

高 效 施 肥

BETTER CROPS CHINA

2018年10月总第41期

本期文章……

黑龙江水稻养分专家系统推荐
施肥田间试验



江西双季稻养分专家系统推荐
施肥田间试验



安徽水稻养分专家系统推荐施
肥田间试验



更多文章 敬请关注



双季稻区氮肥限量标准 和合理减施比例试验

研究内容：在专家推荐施肥系统（NE）的基础上进一步设置氮肥用量的梯度试验，分析产量和养分吸收变化，以期探讨双季稻种植中氮肥的合理和最大减施比例。

项目来源：国家重点研发计划子课题《双季稻和马铃薯施肥限量标准》（2016YFD0200101）

承担单位：江西省红壤研究所
负责人：余鑫初研究员



水稻养分专家系统专辑

高效施肥

国际植物营养研究所系列期刊
《BETTER CROPS》中文版专刊

2018年10月总第41期

主 编 何 萍
编 辑 陈 防 李书田 孙静文

国际项目部

Saskatoon, Saskatchewan, Canada
Kaushik Majumdar, Vice President, IPNI
Asia, Africa, and Middle East Group

理事会

Tony Will, Chairman (CF Industries)
Svein Tore Holsether, Vice Chair (Yara)
Joc O' Rourke, Finance Chair (The Mosaic Company)

IPNI 总部

Peachtree Corners, Georgia, USA
Terry L. Roberts,
President, IPNI

美洲和大洋洲项目部

Guelph, Ontario, Canada
Tom W. Bruulsema, Vice President
Americas/ Oceania Group

东欧/中亚项目部

Moscow, Russia
Svetlana Ivanova, Vice President,
IPNI Eastern Europe/ Central Asia

中国项目部

何 萍 主 任 北京办事处 phe@ipni.net
李书田 副主任 北京办事处 sli@ipni.net
陈 防 副主任 武汉办事处 fchen@ipni.net

会员公司：

BHP Billiton • CF Industries Holdings, Inc. • International
Raw Materials LTD • K+S KALI GmbH • Kingenta
Ecological Engineering Group Co • Nutrien • OCP S.A.
PhosAgro • Shell • Sulphur Solutions • Simplot • Sinofert
Holdings Limited • The Mosaic Company •
Yara international ASA

CONTENTS

目录

基于产量反应和农学效率的中国水稻推荐施肥方法研究	1
中国水稻养分专家系统在田间适用性的验证	9
养分专家系统对黑龙江一季稻产量和养分利用率的影响	15
养分专家系统对吉林一季稻产量和肥料利用率的影响	19
养分专家系统推荐施肥及对安徽中稻产量的影响	24
养分专家系统对湖北中稻产量和养分利用率的影响	29
基于养分专家系统的不同施氮量对双季稻产量及养分利用效率的影响	35
养分专家系统对江西双季稻产量和养分利用率的影响	43
2018 IPNI研究生奖学金评选结果揭晓	封底

网页：Http://www.ipni.net
Http://China-zh.ipni.net

The Government of Saskatchewan helps make this publication possible through its resource tax funding. We thank them for their support of this important educational project.

此刊物由加拿大萨斯喀彻温省政府资助。
特此致谢！

《高效施肥》为 IPNI 中国项目部的出版物，每年五月及十月各一期。
本刊物以推动科学化的合理施肥为目标。
可免费向北京及武汉办事处索取。

基于产量反应和农学效率的中国水稻推荐施肥方法研究

徐新朋 何萍* 杨富强 马进川 Pampolino M.F. Johnston A.M. 周卫*

摘要: 一种基于科学、可靠且低成本的肥料推荐方法对解决水稻由于不合理施肥带来的养分利用率低下和产量降低等问题是必要的。本研究收集了2000–2013年间中国水稻主产区的2218个田间试验,建立一种科学施肥原理并用于水稻的推荐施肥。本研究分析了产量反应(YR)、农学效率(AE)、相对产量(不施N或P或K处理的产量与NPK全施处理的产量的比值,R_Y)和土壤基础养分供应间的相互关系。就平均值而言,施N、P和K的YR分别为2.4、0.9和1.0 t/ha, N、P和K的AE分别为13.0、12.7和8.4 kg/kg。相对产量用于划分土壤基础养分供应等级,平均的N、P和K相对产量分别为0.71、0.89和0.89。产量反应和相对产量间呈典型的线性负相关,而产量反应和AE间呈二次曲线关系。各参数间的相互关系用于建立水稻养分专家支持决策系统(Nutrient Expert, NE),并开展田间试验进行优化和验证。随着对NE系统的不断优化,结果显示使用NE推荐施肥可有效提高产量和净效益。且结果表明,NE系统模拟的AEN与观测的AEN间具有良好的一致性,表明NE方法是一种具有应用前景的推荐施肥工具,并可以在中国应用。

关键词: 水稻, 产量反应, 农学效率, QUEFTS模型, 养分专家系统

1. 前言

水稻是世界上最主要的粮食作物之一,在世界粮食安全中发挥着至关重要的作用。改良的水稻品种、优化的水、土壤和肥料管理和改善的病虫草害防治使世界水稻产量从1984年到2014年增加了59%(FAOSTAT, 2014)。然而,仍然迫切需要保持和增加作物产量以满足人口不断增长的需求,到2030年,全球水稻产量需要增加7.711亿吨才能满足粮食需求(Van Nguyen and Ferrero, 2006)。

在保持生态系统完整性的同时,以经济可行的方式增加农业生产力的挑战是农业可持续发展的基本目标(Liang et al., 2013; Zhao et al., 2015)。截止到2014年,中国水稻种植面积达到了3080万公顷,水稻总产量达到了2.082亿吨,分别占世界水稻总播种面积和总产量的19%和28%(FAOSTAT, 2014)。

为了提高水稻产量,尤其是具有高产潜力的水稻品种,施用足量的养分是必要的(Mueller et al., 2012;



Wang et al., 2012)。然而,农民在施用肥料时通常在很长一段时间内或很大的区域内保持不变,而不是依据作物营养需求进行量身定制,这不仅导致了不平衡施肥,并且导致了肥料效率低下以及低回报率(Pampolino et al., 2007)。此外,过度或不平衡施肥,尤其是氮肥和磷肥,导致了低养分利用率(Qin et al., 2013),还导致了负面环境影响,如温室气体排放(Feng et al., 2013; Liu et al., 2015)、土壤退化和水污染(Guo et al., 2010; Reidsma et al., 2012)等。

优化养分管理是指导密集型水稻系统朝着更加集约化、多样化和可持续农业发展的关键因素之一。水稻养分管理面临的主要挑战是由于作物生产条件、土壤和作物管理以及气候方面的差异,导致土壤养分供应和施肥产量反应具有很大差异(He et al., 2015; Xu et al., 2016)。因此,需要提高对密集型土壤和作物管理技术的改进,以便根据个别地块的具体特征制定养分管理策略(Dobermann and White, 1999)。许多算法和方法在全球已被开发用于作物养分管理(Nhamo et al., 2014; Chen et al., 2015),如作物生长模型(Zhu et al., 2008; Das et al., 2009; Sattari et al., 2014),作物实地养分管理(Alam et al., 2006; Pampolino et al., 2007)。但是,在推荐施肥时应考虑特定地点的土壤养分供应能力和肥料利用效率的临界值。

一种科学、可靠、低成本且农民愿意使用的肥料推荐方法对于解决我国农民养分管理知识短缺问题是必要的。养分专家系统是国际植物营养研究所(IPNI)为解决这些问题而开发的施肥支持决策系统。养分专家系统根据产量反应、农学效率以及QUEFTS模型进行实地养分管理(Janssen et al., 1990; Xu et al., 2015)。产量反应和农学效率作为重要的参数已引入到小麦和玉米养分专家中进行推荐施肥(Chuan et al., 2013; Xu et al., 2014)。同样有必要开发一种动态的实地养分管理工具来提高我国密集型水稻系统的作物产量和养分利用效率。因此,本研究的目标是,(1)分析水稻主产区的水稻产量反应、农学效率和土壤基础养分供应;(2)构建水稻养分专家系统;(3)在中国水稻主产区布置田间试验对水稻养分专家系统进行验证。

2. 材料与方法

2.1 数据来源

数据来源于2000–2013年中国水稻种植区的田间和试验站试验,共计2218个田间试验,这些试验来自于国际植物营养研究所(IPNI)中国项目部以及同行在期刊中已发表的学术文章。试验点涵盖了中国主要的水稻种植区域,包含了不同气候类型、轮作系统、土壤肥力以及水稻品种;含有不同试验处理:优化施肥管理处理、农民习惯措施处理以及一系列基于这两个处理的不施某种养分处理,长期定位试验以及不同的肥料量级处理;包括生物质重、籽粒和秸秆N、P和K养分吸收等指标。

2.2 养分专家系统描述

作物施肥后的效果最终将在产量上得以体现,作物产量反应(施肥与不施某种肥料的产量差)、施肥量和养分利用率间存在着密切关系。随着施肥量的增加,作物产量反应呈二次曲线趋势变化,而养分利用率与产量反应具有相同的变化趋势。土壤基础养分供应可以采用不施某种养分地上部产量或者养分吸收表示(Dobermann et al., 2003a, 2003b),因此产量反应可以很好地表征土壤中某种养分在生育期内的供应状况,尤其是氮素。不施某种养分处理的产量越高,即较低产量反应,表明某种养分的土壤供应能力越高,相反,某种养分的产量反应越高,这种养分土壤基础供应能力就越低(Chuan et al., 2013b)。作物产量反应可以表征土壤的养分状况,而农学效率是评价施肥效应最为直接的手段。因此建立产量反应和农学效率间的内在联系可以为推荐施肥提供强有力的支撑,尤其是对在土壤-作物体系中比较活跃的氮素。而QUEFTS模型通过计算不同目标产量下的地上部和籽粒的养分吸收量为磷素和钾素的施肥推荐提供了有效手段(Buresh et al., 2010)。因此,利用强大的数据库将养分模型和推荐施肥原则相结合将是未来推荐施肥和养分管理的发展趋势。

在水稻养分专家系统中,氮肥推荐主要是依据氮素产量反应(目标产量与不施氮小区的产量差)和氮素农学效率确定,在有产量反应相关试验时可将产量反应数据直接填入系统,系统会根据已有的关系式进行氮肥推荐。在无氮素产量反应数据时,系统会依据相应的参数如可获得产量、土壤质地、有机质含量和土壤障碍因子等信息确定土壤肥力和相对产量,再由可获得产量得到产量反应,并计算氮肥施用量。

对于磷钾养分推荐,主要基于产量反应和一定目标产量下作物的移走量给出施肥量(施磷或施钾量=作物产

量反应施磷或施钾量 + 维持土壤平衡部分)，维持土壤平衡部分主要依据 QUEFTS 模型获得的养分最佳吸收量来求算。如果作物施肥不增产即产量反应为零时，则只考虑作物收获部分养分移走量。对磷钾肥料的推荐还考虑了上季作物养分残效，主要包括作物秸秆处理方式、有机肥施入及上季作物养分带入量等信息。

养分专家系统是在 SSNM 基础上应用 4R 原则结合 QUEFTS 模型计算最佳养分吸收，并依据产量反应和农学效率进行推荐施肥和养分管理的方法。其目的是充分利用农田的基础养分资源、提供合理的养分用量，避免作物对养分的奢侈吸收或不足，在保持土壤肥力的同时，使养分胁迫降到最低并最终达到获得高产、高效的目的。

2.3 田间验证

于 2013–2015 年在七个省布置了 211 个田间试验对养分专家系统进行田间验证（图 1），包括一季稻（吉林省和黑龙江省）、早稻和晚稻（江西省、湖南省和广东省）和中稻（湖北省和安徽省）。所有试验采用统一的标准化方案，每个试验布置六个处理，分别为农民习惯施肥措施（FP）、水稻养分专家系统推荐施肥（NE）、土壤测试（ST）、以及基于 NE 的减氮、减磷和减钾处理。

试验小区面积为 30m²，采用统一的管理措施，应用当地最佳的管理措施进行灌溉和病虫害防治。在 NE 处理中，所有的磷肥作为基肥一次性施入，如果钾肥施用量超过 60 kg K₂O/ha 时施两次肥，分别为基肥和孕穗肥，

否则一次性作基肥施入。氮肥分三次施用，基肥 30%、分蘖肥 35% 和孕穗肥 35%。基肥的肥料插秧前均匀撒在土壤表面，并与土壤混匀，追肥的肥料撒施后灌溉。在 FP 处理中，所有磷肥和钾肥都作为基肥，而氮肥的施用农民通常以不同比例两次施用。在 ST 处理中，所有磷肥和钾肥都以基肥施用，氮肥分两次施用，追肥时期为孕穗期，且基追比为 5:5。减素小区用于计算养分利用效率。各处理的施肥量见表 1。

在收获期，采集三个有代表性的 1m × 1m 的水稻确定秸秆和籽粒产量。将收获后的秸秆和籽粒在 60℃ 下烘 72 小时（直至达到恒重）用以测定干物质重；取部分秸秆和籽粒样品用于测定 N、P 和 K 含量，用于计算回收率、农学效率和偏生产力，并计算化肥成本和净效益（产量效益 - 肥料成本），以验证 NE 系统的农学和经济效益。使用 SPSS13.0 软件在 0.05 水平上对 NE、FP 和 ST 进行统计分析。

3. 结果与讨论

3.1 产量反应和相对产量

就所有数据而言，具有较高的 YRN，平均为 2.4t/ha，其中有 77.8% 的 YRN 位于 1.0–4.0t/ha。施用磷肥和钾肥的平均 YR 分别为 0.9t/ha 和 1.0t/ha，约有 80.5% 的 YRP 和 82.1% 的 YRK 低于 1.5t/ha（图 2）。氮素仍然是产量的首要限制因子，而结果也表明施用磷肥和钾

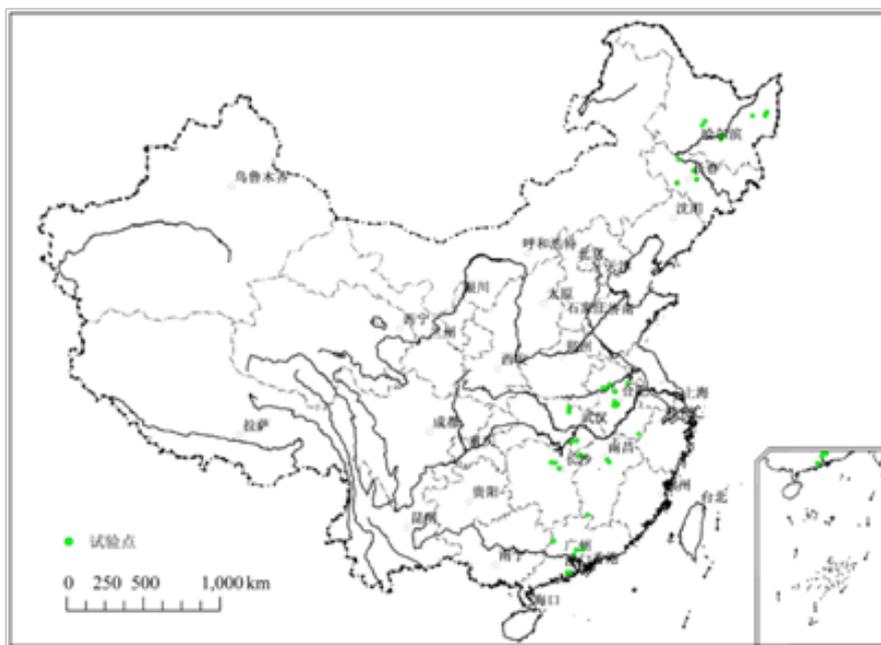


图 1 水稻田间试验点分布

表 1 早稻、中稻、晚稻和一季稻养分专家系统田间验证施肥量 (2013–2015)

水稻类型	省份	试验数	处理	施肥量 (kg/ha)		
				N	P ₂ O ₅	K ₂ O
早稻	湖南	48	NE	146 (133-170)	67 (35-90)	78 (38-150)
	广东		FP	152 (87-320)	56 (26-113)	87 (38-185)
	江西		ST	151 (120-180)	65 (45-90)	99 (67-135)
中稻	湖北	57	NE	157 (103-195)	68 (55-90)	77 (41-150)
	安徽		FP	191 (108-270)	62 (30-135)	79 (45-150)
			ST	182 (120-210)	66 (45-90)	95 (60-180)
晚稻	湖南	48	NE	152 (135-170)	68 (43-90)	74 (31-150)
	广东		FP	159 (79-342)	59 (26-135)	101 (37-225)
	江西		ST	163 (120-180)	59 (30-90)	105 (75-135)
一季稻	黑龙江	58	NE	167 (147-195)	71 (53-96)	86 (45-123)
	吉林		FP	165 (104-220)	67 (35-120)	80 (45-120)
			ST	158 (105-194)	56 (35-80)	84 (45-112)

NE: 养分专家系统; FP: 农民习惯施肥措施; ST: 测土施肥

肥的重要性。根据 Pearson 相关分析得出, 产量反应与土壤肥力相关, 并与土壤养分呈显著负相关 ($P < 0.05$) (Xu et al., 2016), 但产量反应也取决于气候、土壤特性以及前季作物养分残效等 (Pampolino et al., 2012)。

N、P 和 K 的 YR 与 RY 间呈显著线性负相关 (图 3), 其相关系数 (R^2) 分别达到了 0.845 ($n=1448$)、0.929 ($n=862$) 和 0.888 ($n=942$)。水稻平均 N、P 和 K 的 RY 分别为 0.71、0.89 和 0.89。RYN 低于 0.80 的占全部观察数据的 73.6%, 而 P 和 K 的 RY 高于 0.80 的

分别占全部观察数据的 87.0% 和 85.8% (图 4)。

3.2 农学效率与产量反应相关性

N、P 和 K 平均 AE 分别为 13.0、12.7 和 8.4 kg/kg, 所有观察数据中有 79%、70% 和 86% 的分别位于 5–20、0–15 和 0–15 kg/kg 范围内 (图 5)。农学效率高很大程度上取决于养分管理措施, 在高产年份结合好的养分管理措施, AEN 可以达到 15 kg/kg, 甚至可以达到 25 kg/kg (Buresh and Witt, 2007), 而 AEP 可以达到

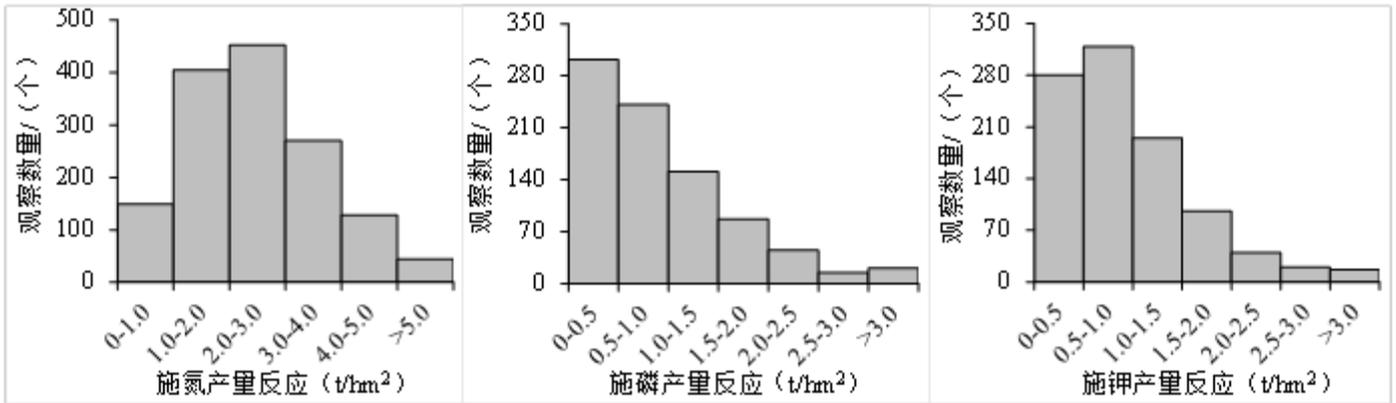


图 2 水稻 N、P 和 K 产量反应频率分布

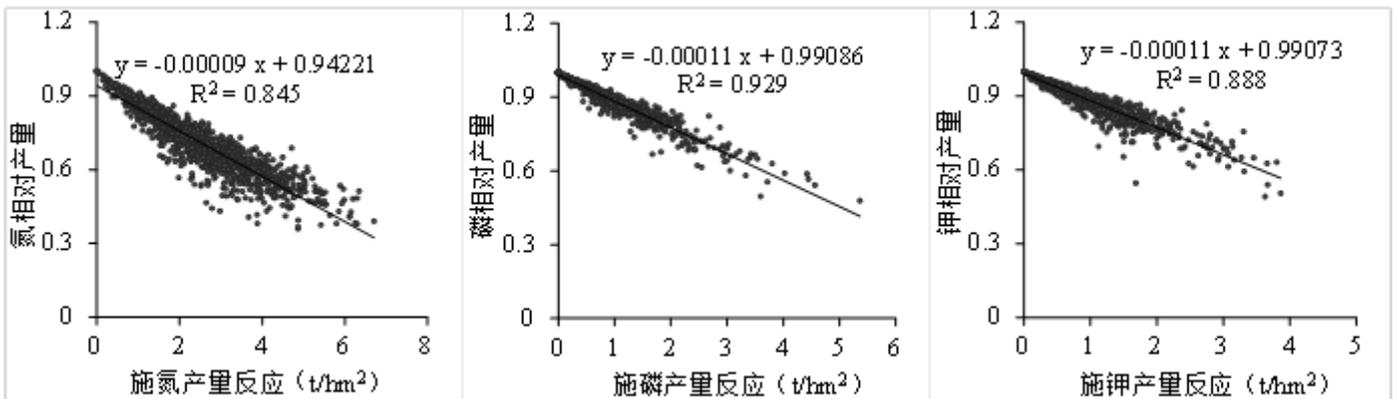


图 3 水稻产量反应与相对产量的关系

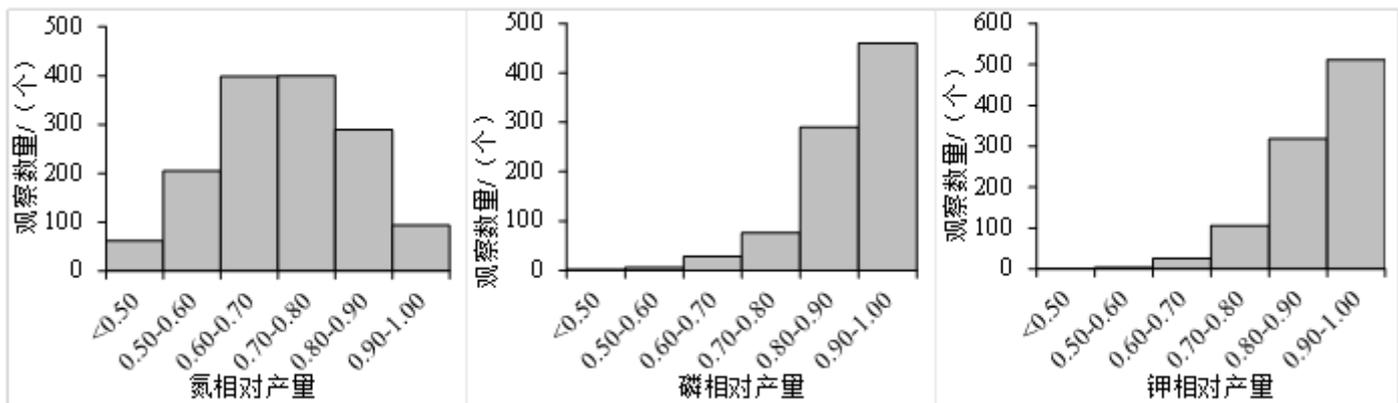


图4 水稻 N、P 和 K 相对产量频率分布

20–50 kg/kg (Dobermann et al., 2007)。提高养分利用效率仍然是中国要面临的主要挑战, 因为当前大多数农民的管理措施不能做到将养分供应与作物养分需求保持一致 (Zhao et al., 2013; Sui et al., 2013)。对于特定地块或地区, 养分限制的产量与可获得产量一样受气候的影响。产量反应和农学效率随着季节变化而变化, 这就要求我们要依据不同季节和轮作系统进行动态推荐施肥。

作物产量随着养分吸收的不断增加会达到一个吸收阈值。因此, 基础土壤养分供应可以用缺素小区的产量反应来确定。但是, 单位粮食产量增加所需的化肥量也取决于化肥利用效率。因此, 在推荐施肥时, 这些数据对于建立产量反应与农学效率间的关系至关重要。本研究确定了产量反应和农学效率间的关系, 呈二次曲线关系 (图6), 其关系式为:

$$AEN = -5E-07X_N^2 + 0.006X_N + 0.598 \quad (R^2 = 0.640, n = 1448, p < 0.001),$$

$$AEP = -9E-07X_P^2 + 0.014X_P + 0.340 \quad (R^2 = 0.686, n = 862, p < 0.001),$$

$$AEK = -7E-07X_K^2 + 0.009X_K + 0.321 \quad (R^2 = 0.663, n = 967, p < 0.001),$$

XN、XP 和 XK 分别表示 N、P 和 K 产量反应 (t/ha)。

3.3 土壤基础养分供应

确定和管理来自土壤和其他来源的养分是实现养分高效利用的重要途径。肥料施用量和养分平衡主要受产量目标和土壤基础养分供应的影响, 而产量反应和相对产量与土壤基础养分供应相关 (Chuan et al., 2013; Xu et al., 2014)。基础土壤养分供应 (土壤肥力) 决定土壤基础产量, 是建立推荐施肥和养分管理原则的重要指标。较高的土壤基础养分供应导致低的产量反应和较高的相对产量 (Xu et al., 2014)。当前研究中, 平均的基础 N、P 和 K 养分供应分别为 91.3、27.5 和 135.9 kg/ha, 变化范围分别为 29.6–204.3、6.8–68.4 和 43.6–307.2 kg/ha (图7)。基础土壤养分供应的频率分布表明 N、P 和 K 的分别有 38%、33% 和 36% 的高于 100、30 和 150 kg/ha。土壤中的基础养分供应大部分来自于土壤矿化、作物和肥料 (有机和无机) 残留、灌溉水和大气沉降。如, 在太湖地区的大气沉降和灌溉水对农业系统的贡献达到了 89 kg N/ha (Ju et al., 2009)。

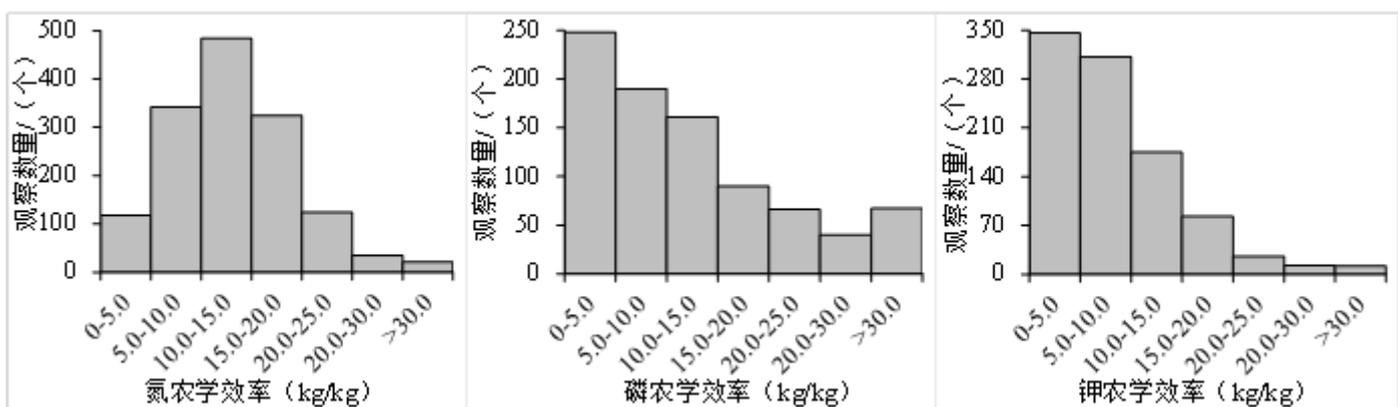


图5 水稻 N、P 和 K 农学效率频率分布

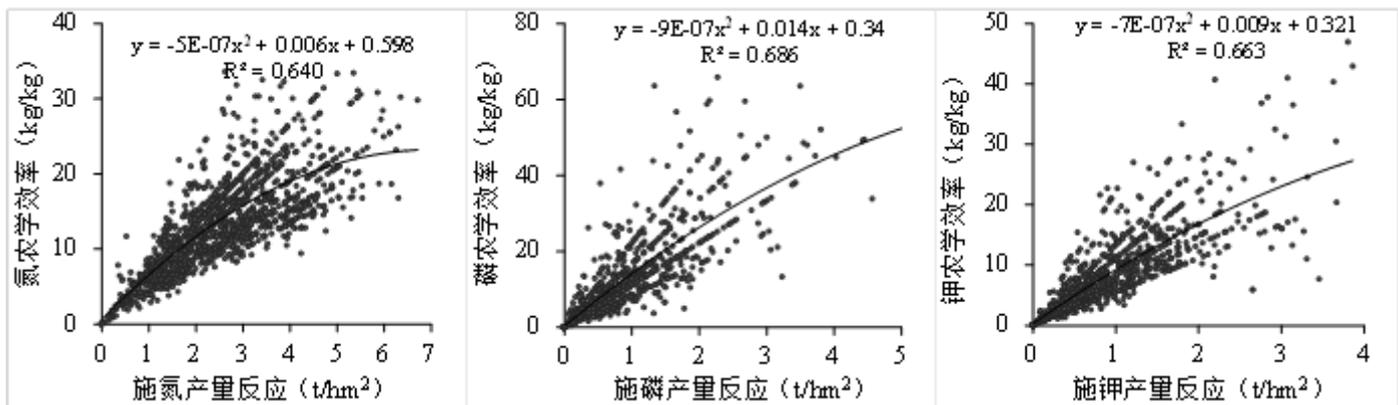


图6 水稻产量反应和农学效率关系

产量反应或相对产量可以表征土壤基础养分供应。根据 Pearson 相关分析，产量反应与土壤基础养分供应呈显著负相关 ($P < 0.001$)，相对产量和土壤基础养分供应呈显著正相关 ($P < 0.001$)。在确定最佳肥料施用量时，考虑土壤总的养分供应量非常重要。然而，对于小农户经营为主体的经营模式要做到每个田块都进行养分吸收测试是不可行的；因此，在估算土壤基础养分供应时使用某种养分所限制的产量（产量反应）进行表征 (Dobermann et al., 2003)。当产量反应数据不可用时，相对产量可以根据给定的可获得产量和土壤肥力分级对产量反应进行估算 (Pampolino et al., 2012)。已有研究表明可以应用产量反应或相对产量来表征土壤基础养分供应对小麦和玉米的施肥量进行推荐 (Chuan et al., 2013; Xu et al., 2014)。

3.4 田间验证

2013 年试验结果显示 (表 2)，NE 处理与 FP 和 ST 处理相比，产量分别增加了 0.2 和 0.1 t/ha，提高了 2.5% 和 1.3%；而经济效益分别增加了 417 和 205 元/ha。2014 年试验与 2013 试验结果相比效果更加显著，NE 处

理与 FP 和 ST 处理相比，产量分别增加了 0.4 和 0.3t/ha，提高了 5.5% 和 3.6%；而经济效益分别增加了 1184 和 863 元/ha。随着养分专家系统不断优化，产量差和经济效益差异逐渐扩大，2015 年 NE 处理与 FP 和 ST 处理相比，产量分别增加了 0.8 和 0.4 t/ha，提高了 9.8% 和 4.7%；而经济效益分别增加了 2147 和 1147 元/ha。

2013 年为水稻养分专家系统进行的第一年田间试验，而下一年试验是在应用前一年试验结果对系统进行校正与改进后进行的田间试验，其施肥量和施肥措施更加合理，因此 NE 处理的产量和经济效益与 FP 和 ST 相比都有所提高。就三年试验而言，NE 处理与 FP 和 ST 处理相比产量分别增加了 0.5 和 0.3t/ha，提高了 6.3% 和 3.7%；经济效益分别增加了 1311 和 782 元/ha，提高了 6.6% 和 3.8%。然而不同种植类型水稻的产量和经济效益增加幅度有所差异 (图 8)，中稻的 NE 处理与 FP 处理相比显著地提高了产量和经济效益 ($P < 0.05$)，分别增加了 0.6 t/ha 和 1734 元/ha，提高了 7.4% 和 9.2%；但与 ST 相比无显著差异，产量和经济效益分别提高了 0.2 t/ha 和 643 元/ha。虽然早稻和晚稻三个处理间无显著差异，但早稻的 NE 处理与 FP 和 ST 处理相比产量分别增加了 0.6

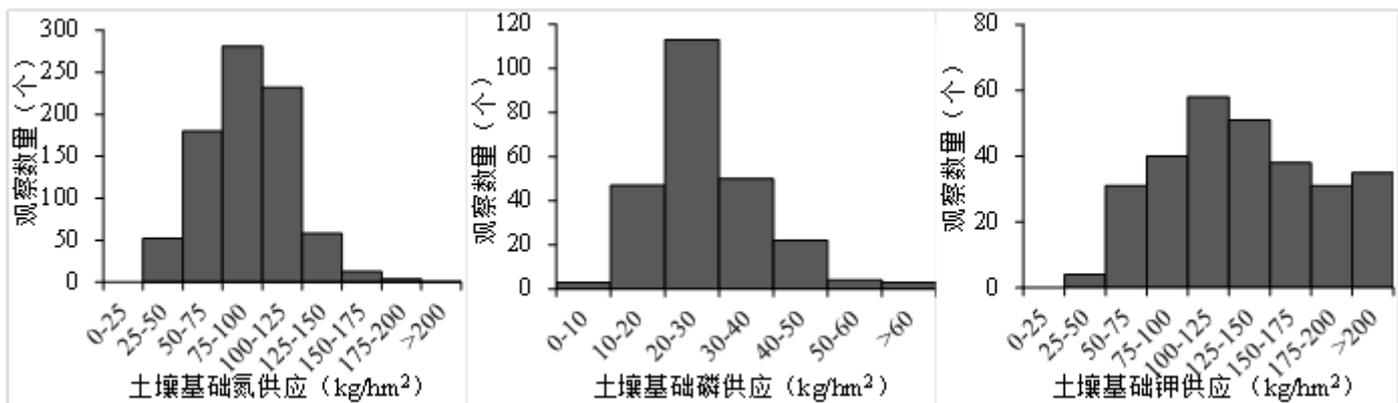


图7 水稻土壤 N、P 和 K 基础养分供应频率分布

和 0.5t/ha，经济效益分别增加了 1377 和 1147 元 /ha，而晚稻的 NE 处理与 FP 和 ST 处理相比产量分别增加了



0.6 t/ha 和 0.3t/ha，经济效益分别增加了 1613 和 875 元 /ha。但一季稻的产量 NE 处理与 FP 和 ST 处理间统计上没有显著性差异，但产量和经济效益都略有增加，产量分别增加了 0.2 和 0.2t/ha，经济效益分别增加了 62

和 572 元 /ha。

养分利用率分析结果得出（表 2），NE 处理与 FP 和 ST 处理相比，REN 在 2013 年分别增加了 7.3 个百分点和 2.7 个百分点；2014 年分别增加了 10.6 个百分点和 8.7 个百分点；2015 年分别增加了 17.7 个百分点和 12.6 个百分点；三年平均 REN 分别增加了 12.2 个百分点和 8.4 个百分点。NE 处理中 REN 大于 40% 的占全部试验数的 42.2%，而大于 50% 的占全部试验数的 23.2%。FP 处理中近半数施氮量过量是导致 REN 低的主要原因，FP 处理中 REN 小于 20% 的占全部试验数的 43.3%。农民的氮磷钾养分施用比例失衡，且很多农民氮肥施用只分两次施用，每次的施肥量比较随意，也是导致 REN 低的原因。

水稻养分专家系统依据的是基于产量反应和农学效率原理进行推荐施肥，农学效率的准确设定对试验结果至关重要。从产量反应和农学效率的关系曲线结果得出（图 9a），系统设置的产量反应和农学效率关系曲线与实测值得出的曲线非常相近，只是在较高产量反应时才表现出差异。实测产量反应计算得出的氮素农学效率和水稻养分专家系统设定的氮素农学效率比较得出（图 9b），均方根误差（RMSE）、标准化均方根误差（n-RMSE）和平均差（ME）分别为 2.8 kg/kg、18.6% 和 -1.4 kg/kg。水稻养分专家系统中，为降低施肥风险，当产量反应超过一定数值时降低了农学效率，因此在高产量反应时实测值高于系统设定值。试验结果得出，系统设定的氮素农学效率和实测的氮素农学效率比较吻合。

表 2 不同处理水稻产量、净收入和氮素利用比较

年份	处理	籽粒产量 (t/ha)	净效益 (元 /ha)	氮素回收率 (%)	氮素农学效率 (kg/kg)	氮素偏生产力 (kg/kg)
2013	OPT	8.2	21430	30.8	13.3	52.8
	FP	8.0	21013	23.5	11.4	47.8
	ST	8.1	21225	28.1	12.3	51.3
2014	OPT	8.1	20352	36.7	16.2	52.4
	FP	7.7	19168	26.1	12.8	47.7
	ST	7.8	19489	28.0	13.8	48.2
2015	OPT	9.0	22145	44.5	20.2	56.8
	FP	8.2	19998	26.8	16.3	52.9
	ST	8.6	20998	31.9	17.2	51.7
所有	OPT	8.4	21277	37.8	16.8	54.0
	FP	7.9	19966	25.6	13.6	49.5
	ST	8.1	20495	29.4	14.6	50.3

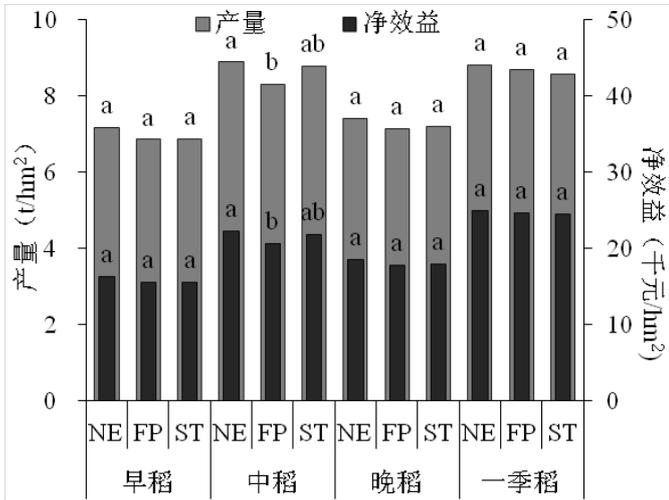


图8 不同种植类型水稻产量和净效益比较

4. 结论

利用2000–2013年收集的大量水稻田间试验数据分析了产量反应、农学效率、相对产量和土壤基础养分供应

的分布及内在联系。研究结果用来开发基于产量反应和农学效率的推荐施肥方法，即水稻养分专家决策支持系统。基于水稻养分专家系统的推荐施肥和养分管理是根据田块特定条件和变量（如作物产量、作物残留管理、历史化肥施用、有机肥施用和养分投入等）而量身定制。在七个省份的211个农户四种不同种植类型的田间试验结果显示，随着对水稻养分专家系统的不断优化，产量、净效益和养分回收率都得到提高，且田间试验中得到的氮素农学效率结果与水稻养分专家系统中的模拟曲线一致。养分专家系统为精准养分管理提供了一种有效的通用方法，但需要配合其他土壤和作物改良措施以提高效益。

参考文献

见 Field Crops Research, 2017, 206:33–42.

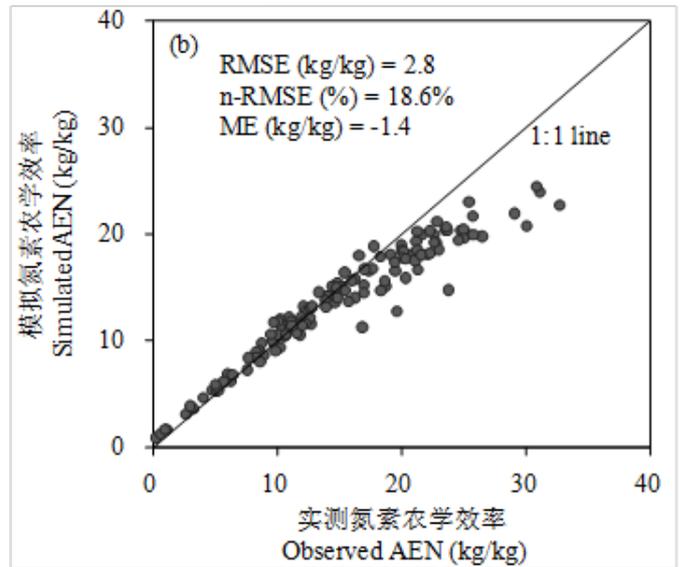
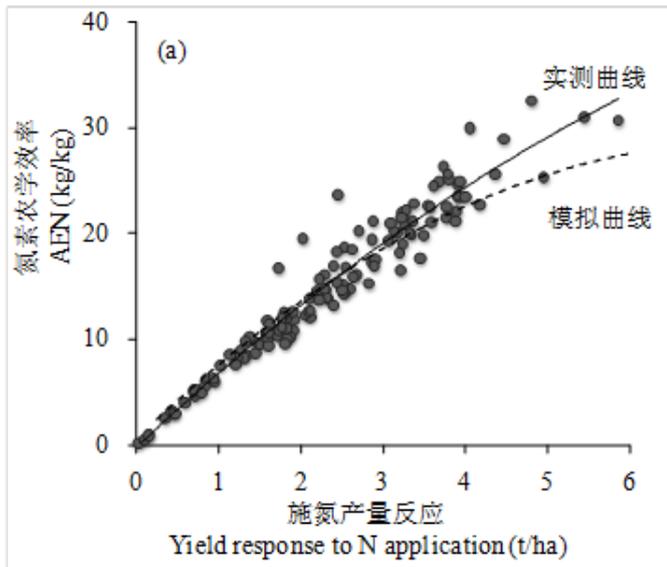


图9 水稻养分专家系统设定农学效率和实测值关系

中国水稻养分专家系统的田间适用性验证

杨富强¹ 徐新朋¹ 马进川¹ 何萍¹ Pampolino F. Mirasol² 周卫¹

(1. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 2. 国际植物营养研究所东南亚项目部, 马来西亚槟州 10670)

摘要: 本研究目的是通过多年多点的田间试验评价养分专家系统 (Nutrient Expert (NE)) 在中国水稻上的适用性。田间试验于 2013–2015 年在我国水稻主产区的 211 个试验点进行, 结果显示: 与农民习惯施肥 (FP) 和测土配方施肥处理 (ST) 相比, NE 处理提高了水稻的籽粒产量, 降低了氮肥和钾肥的推荐用量, 适当提高了磷肥的推荐用量, 整体上平衡了肥料养分的施用比例。NE 处理水稻籽粒产量较 FP 和 ST 提高 3.5%、6.3%。除磷肥偏生产力之外, N、P 和 K 的农学效率、表观回收率以及偏生产力均得到了提高。与 FP 和 ST 相比, NE 处理 N 肥养分回收率分别提高 12.2 和 8.4 个百分点, P 肥养分回收率分别提高 3.7 和 2.9 个百分点, K 肥养分回收率分别提高 16.3 和 6.4 个百分点。田间试验结果表明, NE 水稻养分专家系统可以有效预估地块产量、水稻地上部 N、P 和 K 养分吸收, 能够有效指导我国水稻的田间推荐施肥。

关键词: 水稻, 养分专家系统, 产量, 养分利用率

水稻 (*Oryza sativa* L.) 是我国重要的粮食作物之一, 种植面积占全国粮食作物总面积的 30% (Liu et al., 2013)。我国水稻产量自 2003 年以来呈逐年提高趋势

(FAO, 2013), 期间肥料消费量从 2003 年的 1100 万吨/年增加到 2015 年的 1500 万吨/年。然而, 我国稻田肥料利用率氮肥仅为 28.3%, 磷肥仅为 13.1%, 钾肥

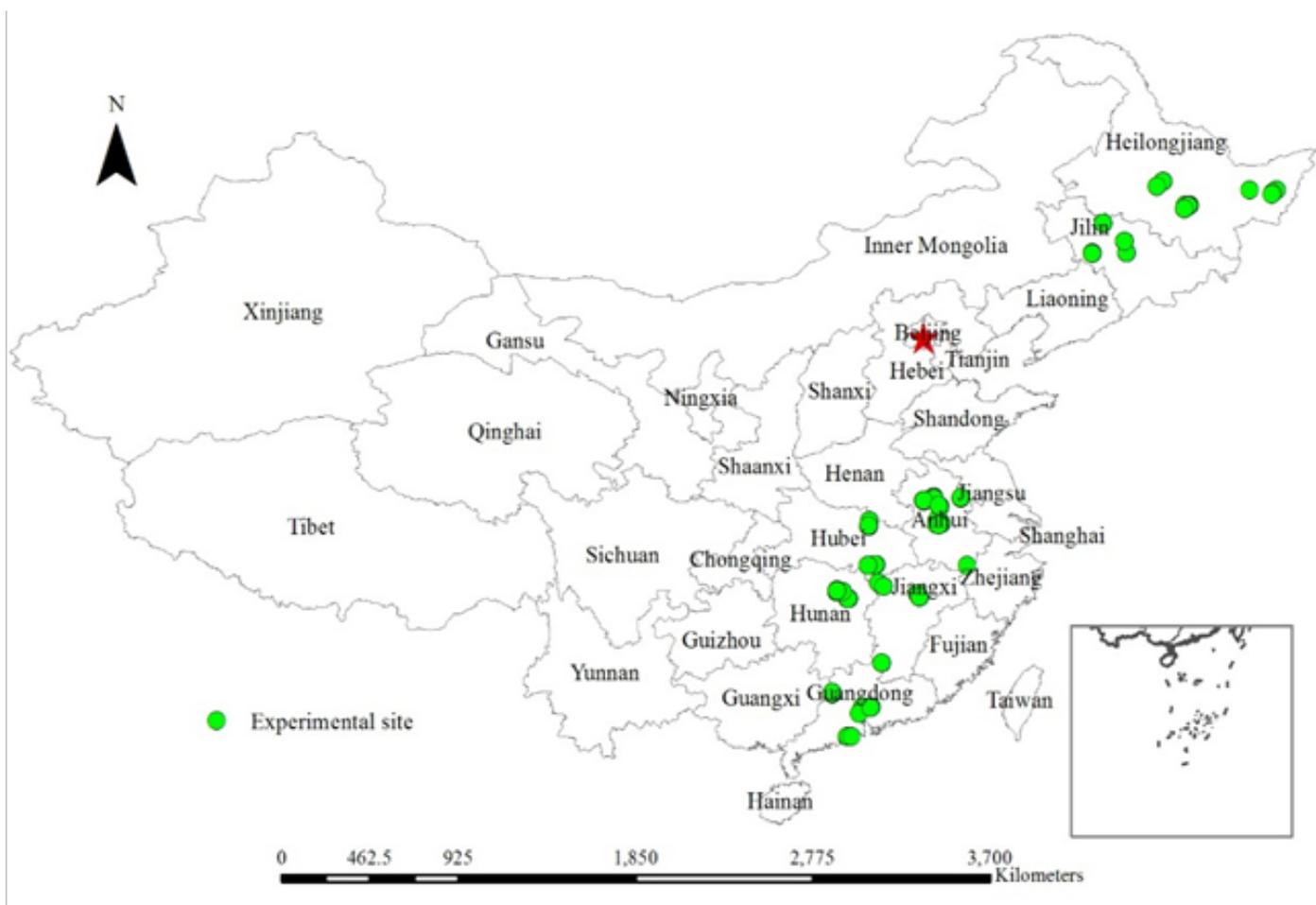


图 1 水稻田间试验分布图

仅为 32.4% (张福锁等, 2008)。稻田的过量施肥问题在我国已经非常普遍, 尤其是氮肥 (李红莉等, 2010), 我国稻田氮肥用量比世界平均水平高 90% (Sui et al., 2013)。过量和不合理施肥, 不仅不能增加产量, 而且会造成浪费威胁生态环境安全 (Guo et al., 2007; Ju et al., 2009)。目前, 生产中出现了很多优化养分管理策略, 与农民习惯相比都有提高产量和养分利用率的作用 (Peng et al., 2006; Yao et al., 2012)。但由于我国一家一户小农经营模式, 以及农民的知识水平有限使得许多管理策略难以实现。本研究通过田间试验对水稻养分专家系统 (Nutrient Expert (NE) for Rice) 的田间实用性进行评价, 旨在为我国稻田科学合理施肥提供有效的方法。

1 材料与方 法

1.1 试验设计

试验于 2013–2015 年在我国水稻主产区进行: 早稻试验在广东、江西和湖南三省, 中稻试验在湖北和安徽两省, 一季稻试验在黑龙江和吉林两省, 七个省三年共计 211 个田间试验。试验点分布见图 1。

每个试验均包括 6 个处理: 1) 养分专家系统推荐施肥 (NE), 2) 农民习惯施肥 (FP), 3) 当地农技部门测土配方施肥 (ST), 4) 基于 NE 推荐不施氮, 5) 基于 NE 推荐不施磷和 6) 基于 NE 推荐不施钾。NE 的施肥量、施肥比例和施肥时间均按照 NE 水稻养分专家系统推荐; FP 的施肥量和施肥次数等完全按照农民习惯; ST 是依据当地农技部门测土配方确定施肥量和管理措施, 施肥措施按照农技部门的推荐。同一地各处理品种、密度均相同, 且病虫害防治均统一操作。

1.2 分析方法

水稻成熟后进行小区实收计产, 同时对水稻秸秆产量进行取样称重。取部分籽粒和秸秆样品在 80℃ 下烘干至恒重, 粉碎后测定 N、P 和 K 的养分含量, 计算养分利用率。秸秆和籽粒中的氮、磷和钾含量采用 $H_2SO_4-H_2O_2$ 方法消煮, 并分别采用凯氏法、钒钼黄比色法和原子吸收法测定 (鲍士旦, 2007)。养分利用率计算及表示如下:

(1) 农学效率 (Agronomic efficiency): 施用单位养分的作物籽粒增产量;

(2) 偏生产力 (Partial factor productivity): 施用单位养分的作物籽粒产量;

(3) 养分回收率 (Recovery efficiency): 施用单位养分的作物吸收量增量。

用均方根误差 (RMSE) 和标准化均方根误差 ($n-RMSE$) 评价水稻养分专家系统的预估值与实测值吻合度。不同处理间的产量和养分利用率差异使用 SAS 软件在 0.05 概率水平进行 ANOVA 分析。计算公式如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (s_i - m_i)^2}{n}}, \quad (1)$$

$$\text{Normalized RMSE} = \frac{RMSE}{\bar{m}}, \quad (2)$$

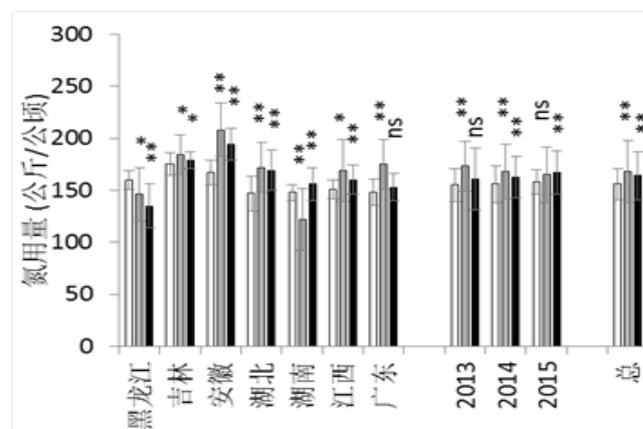
s_i 和 m_i 分别为预估值和实测值, n 是样本量, m 是实测值的平均值^[12]。

2 结果与分析

2.1 施肥量

NE 处理平衡了肥料养分的施用。与 FP 和 ST 相比较, NE 处理降低了 N 和 K_2O 的用量, 提高了 P_2O_5 的用量。FP 的 N 肥用量为 122–208 公斤/公顷, 平均值为 168 公斤/公顷。211 个试验点中有 88 点 N 肥用量超过 180 公斤/公顷, 占总数的 41.7%。NE 处理 N 肥推荐用量为 147–175 公斤/公顷, 平均值为 156 公斤/公顷。ST 的 N 肥用量为 135–194 公斤/公顷, 平均值为 164 公斤/公顷。NE 处理 N 肥用量明显低于 FP, 降幅为 7.1%, 并且较 ST 低 4.9%。

FP 和 ST 的 P_2O_5 肥用量很接近, 为 42–76 公斤/公顷, 平均值分别为 61 和 62 公斤/公顷。NE 处理 P_2O_5 用量稍高于二者, 为 54–80 公斤/公顷, 平均值为 69 公斤/公顷。NE 处理推荐 K_2O 用量为 52–106 公斤/公顷, 平均值为 79 公斤/公顷。而 FP 和 ST 用量为 63–115 和 76–113 公斤/公顷, 平均值分别为 86 和 95 公斤/公顷。NE 处理与 FP 和 ST 比较, 显著降低 K_2O 用量 8.1% 和 16.8% (2013 年 K 肥用量除外) (图 2)。



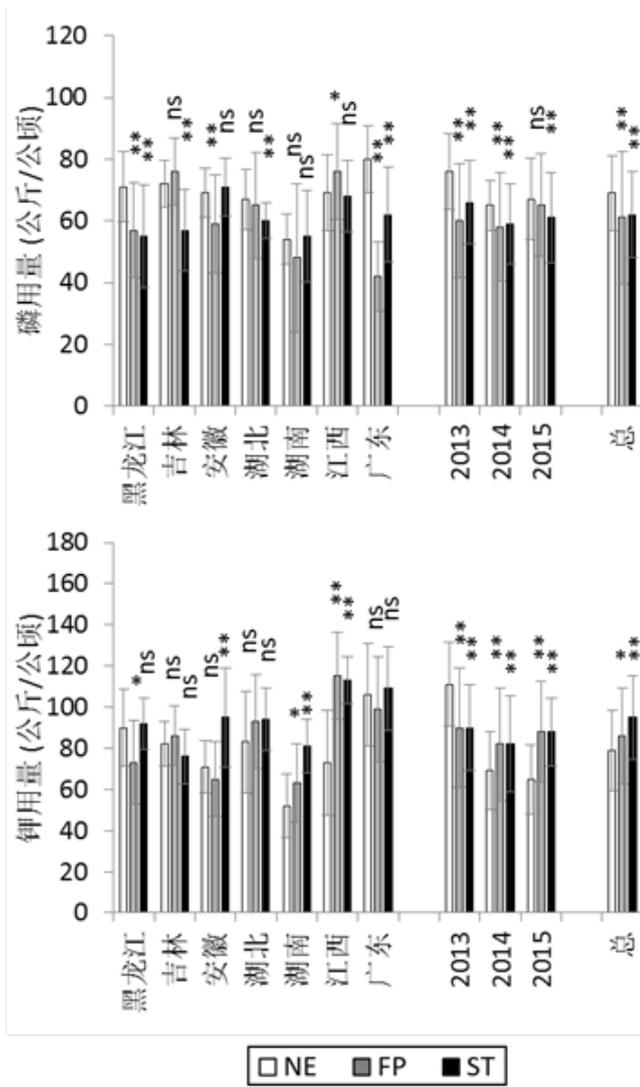


图2 不同处理施肥量比较

注：* 0.05 水平差异显著；** 0.01 水平差异显著；

ns 差异不显著。下同。

2.2 产量

NE 处理可显著提高水稻产量，但对收获指数没有明显影响。NE 处理籽粒产量为 6.7–9.6 吨 / 公顷，平均值为 8.4 吨 / 公顷。而 FP 和 ST 处理籽粒产量为 6.7–9.6 和 6.7–9.7 吨 / 公顷，平均值分别为 7.9 和 8.1 吨 / 公顷。整体而言，NE 处理与 FP 和 ST 相比较，产量分别显著提高 6.3% 和 3.5%。产量结果因地点不同而稍有差异，比如在吉林、湖北和广东，NE 与 FP 处理三年平均值没有差异；在吉林、安徽、湖南和广东，NE 与 ST 处理三年平均值没有差异。但年份间结果趋势一致，NE 较 FP 和 ST 产量均得到了显著提高，2013 年 NE 和 ST 产量间差异不显著（表 1）。

2.3 养分利用率

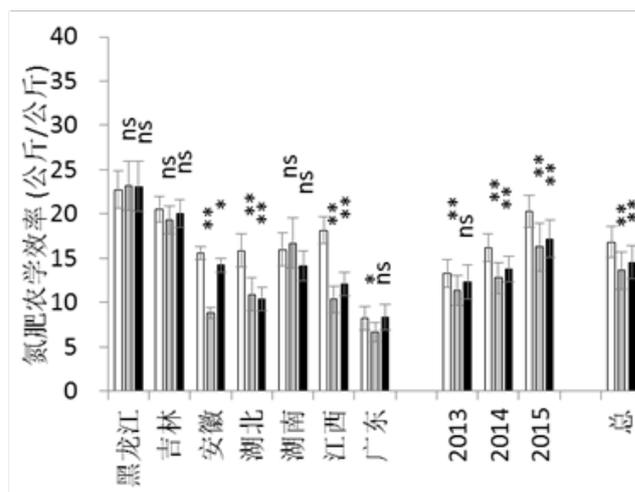


表 1 不同处理水稻产量和收获指数比较

地点 / 年份	籽粒产量 (吨 / 公顷)					收获指数 HI				
	NE	FP	ST	△ 1	△ 2	NE	FP	ST	△ 1	△ 2
黑龙江	8.6	8.2	8.2	0.4**	0.4**	0.50	0.50	0.51	0 ^{ns}	-0.01 ^{ns}
吉林	9.6	9.6	9.7	0 ^{ns}	-0.1 ^{ns}	0.54	0.54	0.55	0 ^{ns}	-0.01 ^{ns}
安徽	8.6	7.8	8.7	0.8**	-0.1 ^{ns}	0.49	0.48	0.48	0.01 ^{ns}	0.01 ^{ns}
湖北	9.4	9.0	8.9	0.4 ^{ns}	0.5*	0.50	0.50	0.49	0 ^{ns}	0.01 ^{ns}
湖南	7.6	7.0	7.4	0.6*	0.2 ^{ns}	0.56	0.57	0.56	-0.01 ^{ns}	0 ^{ns}
江西	8.5	7.4	7.6	1.1**	0.9**	0.56	0.55	0.54	0.01 ^{ns}	0.02 ^{ns}
广东	6.7	6.7	6.8	0 ^{ns}	-0.1 ^{ns}	0.50	0.50	0.49	0 ^{ns}	0.01 ^{ns}
2013	8.2	8.0	8.1	0.2*	0.1 ^{ns}	0.52	0.51	0.51	0.01 ^{ns}	0.01 ^{ns}
2014	8.1	7.7	7.8	0.4**	0.3**	0.51	0.50	0.51	0.01 ^{ns}	0 ^{ns}
2015	9.0	8.2	8.6	0.8**	0.4**	0.54	0.54	0.54	0 ^{ns}	0 ^{ns}
总	8.4	8.0	8.1	0.4**	0.3**	0.53	0.52	0.52	0.01 ^{ns}	0.01 ^{ns}

注：△ 1NE 减去 FP；△ 2：NE 减去 ST。*，** 分别表示 5% 和 1% 显著水平，ns 为差异不显著。

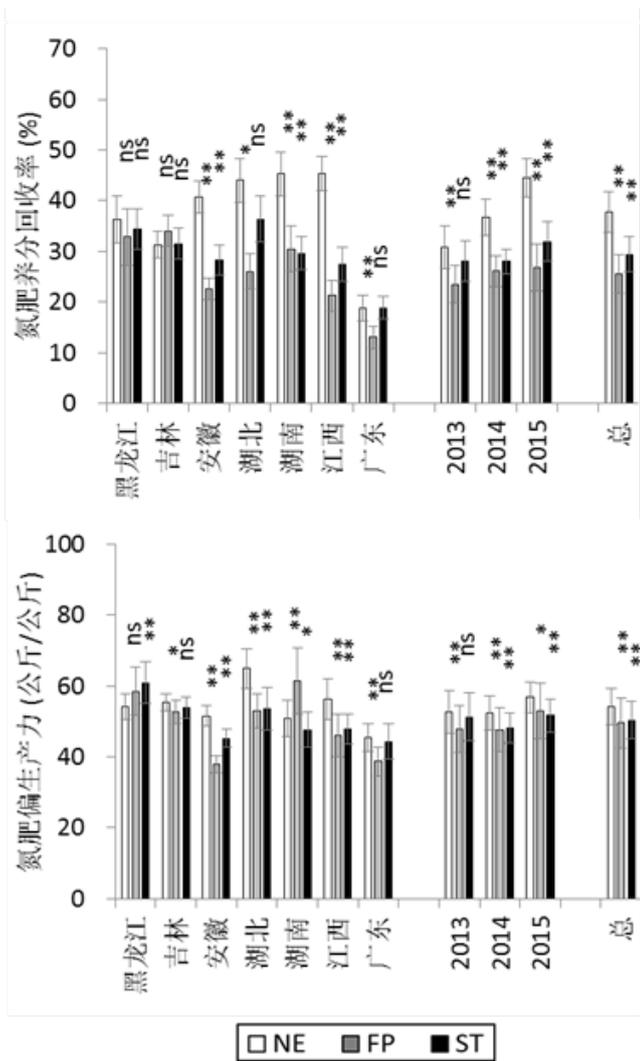


图3 不同处理水稻氮素利用率

与FP和ST相比较,NE显著提高了N肥的利用效率,三年试验结果一致。NE处理氮肥农学效率为8.3–22.8(平均值为16.8)公斤/公斤,养分回收率为18.9%–45.4%(平均值为37.8%),偏生产力为45.4–65.0(平均值为54.1)公斤/公斤。FP和ST处理氮肥农学效率为6.7–23.2(平均值为13.6和14.6)公斤/公斤,养分回收率为13.1%–36.4%(平均值为25.6%和29.4%),偏生产力为37.9–61.3(平均值为49.5和50.3)公斤/公斤。与FP和ST相比较,NE处理氮肥农学效率、养分回收率和偏生产力分别平均显著提高23.6%和15.6%,12.2和8.4个百分点,以及9.1%和7.5%(图3)。

2.4 产量和养分吸收预测

为了计算肥料推荐用量,NE系统需要对地块的可获得产量和地上部养分需求量进行预估。我们利用三年的田间验证试验,对系统预估值和田间实测值进行比对,

分析系统预估值的准确性。2015年结果显示:产量预估值与实测值均匀分布于1:1线两侧,相对应的RMSE和n-RMSE值分别为0.947吨/公顷和10.7%,误差均在可接受范围内,说明系统预估值非常接近田间实测值(图4)。2013–2015年N、P和K养分吸收对应的RMSE值分别为29.4、10.9和60.5公斤/公顷,相应的n-RMSE值分别为21.3%、31.5%和32.3%。N素预估值误差在可接受范围内,说明预估值比较接近真实值。而P和K素误差稍大,说明预估值与真实值有偏差。但P低于50公斤/公顷和K低于250公斤/公顷时预估值与实测值也都均匀分布于1:1线两侧(图5)。

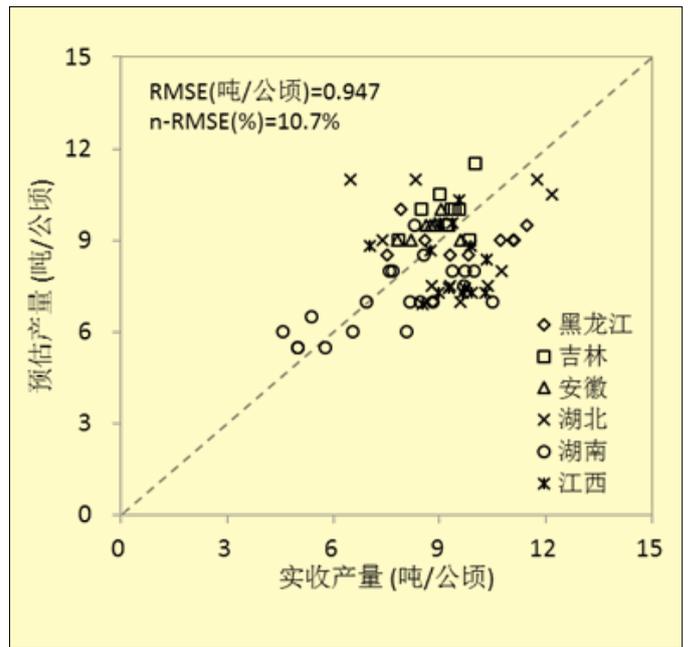
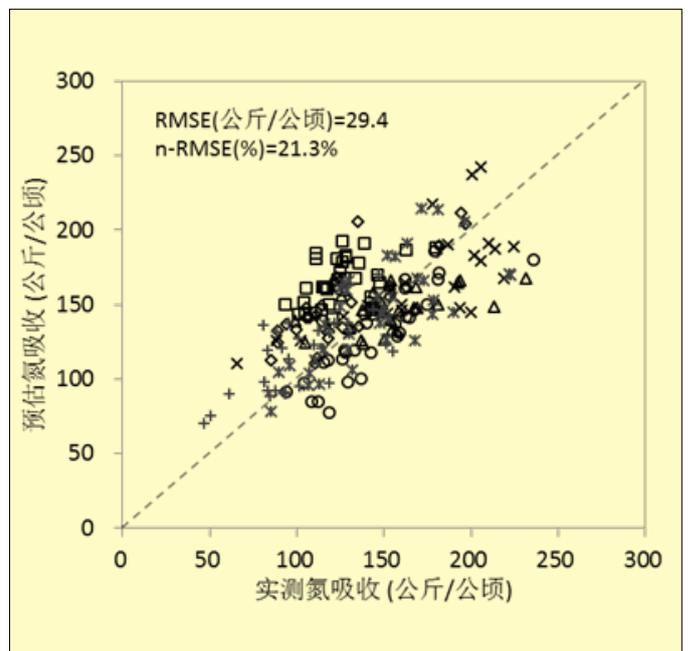


图4 NE系统预估产量与实测产量的比较



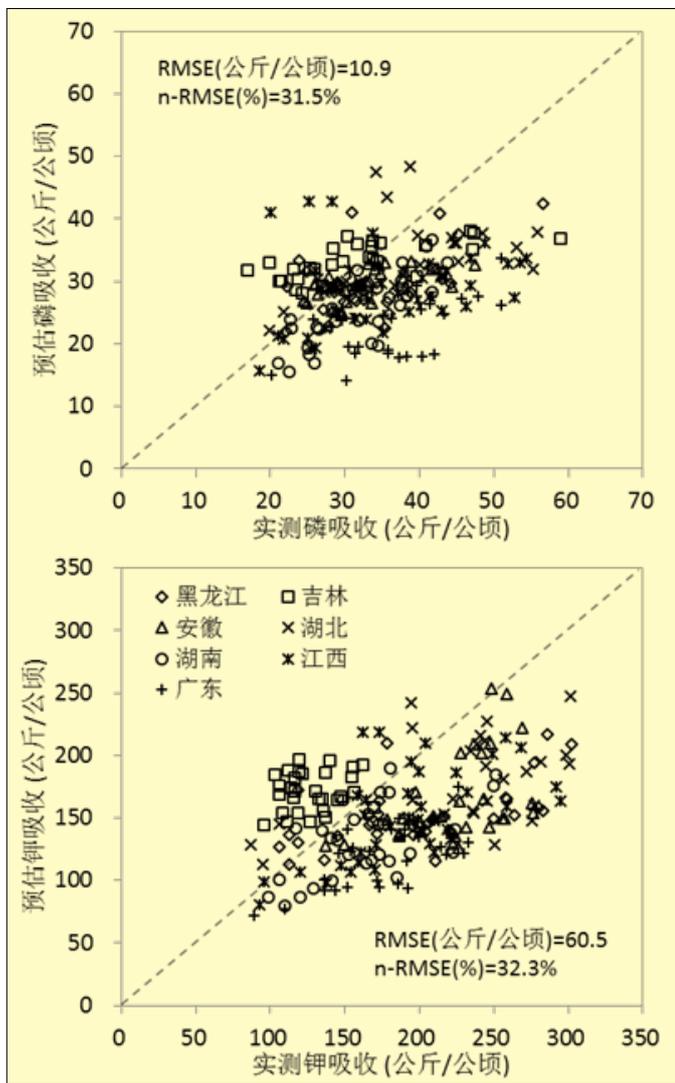


图5 NE系统预估养分吸收与实测养分吸收的比较

3 讨论

NE系统推荐施肥量整体降低了N肥和K肥的用量,适当提高了P肥的用量。但在一些试验点和个别年份,结果可能会出现差异。比如黑龙江NE处理平均推荐施N量高于FP和ST,而推荐施K肥量低于FP和ST。这主要是因为NE系统充分考虑了生长季内当地环境因素,包括土壤性质、轮作制度和气候等因素(Xu et al., 2014)。相反,农民习惯和当地推荐一般多年采用一个配方,而不能根据作物生长情况变化而调整。Buresh等(2010)也认为推荐施肥方案应该充分考虑作物生长环境、耕作方式、上季作物残留、有机质、温度和水分管理等因素。NE系统正是充分考虑了这些因素,可以满足中国以小农户为经营主体地块条件各不相同的种植模式。

中国消耗世界三分之一的化肥,但NPK肥料利用率远低于发达国家。过量的肥料导致环境风险增强,

如水体富营养化、土壤酸化和养分失衡等(Guo et al., 2010)。本研究结果显示,NE处理N素养分回收率达到37.8%,较农民习惯和测土配方施肥均有不同程度的提高(图3)。因为NE系统充分考虑了影响肥料利用率的多个因素,并结合4R养分管理策略,提高了我国水稻田间的养分利用效率。

4 结论

多年多点田间验证试验结果表明:整体而言,与FP和ST处理相比,NE养分专家系统推荐N肥用量分别降低7.1%和4.9%,K肥用量分别降低8.1%和16.8%,P肥用量稍有提高。NE处理与FP和ST处理相比,产量平均分别提高6.3%和3.5%,氮肥农学效率分别提高23.6%和15.6%,回收率提高12.2和8.4个百分点,偏生产力提高9.1%和7.5%。田间实测产量和养分吸收量与NE系统预估值比较吻合。说明NE养分专家系统可以指导田间水稻精确化平衡施肥,进一步提高水稻产量和效益,同时降低水田环境风险。

参考文献

- Liu MJ, Lin S, Dannenmann M, et al. Do water-saving ground cover rice production systems increase grain yields at regional scales. *Field Crops Research*, 2013, 150: 19–28.
- FAO (2013) FAOSTAT. <http://faostat.fao.org>.
- 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径. *土壤学报*, 2008, 45: 915–924.
- 李红莉, 张卫峰, 张福锁, 等. 中国主要粮食作物化肥施用量与效率变化分析. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16: 1136–1143.
- Sui B, Feng XM, Tian GL, et al. Optimizing nitrogen supply increases rice yield and nitrogen use efficiency by regulating yield formation factors. *Field Crops Research*, 2013, 150: 99–107.
- Guo JP, and Zhou CD. Greenhouse gas emissions and mitigation measures in Chinese agroecosystems. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, 142: 270–277.
- Ju XT, Xing GX, Chen XP, et al. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems. *PNAS*, 2009, 106: 3041–3046.
- Peng SB, Buresh RJ, Huang JL, et al. Strategies for overcoming low agronomic nitrogen use efficiency in irrigated

rice systems in China. *Field Crops Research*, 2006, 96: 37–47.

Yao FX, Huang JL, Cui KH, et al. Agronomic performance of high-yielding rice variety grown under alternate wetting and drying irrigation. *Field Crops Research*, 2012, 126: 16–22.

鲍士旦. 土壤农化分析(第3版). 北京: 中国农业出版社, 2007.

Liu HL, Yang JY, Drury CF, et al. Using the DSSAT±CERES–Maize model to simulate crop yield and nitrogen cycling in fields under long-term continuous maize

production. *NutrCyclAgroecosyst*, 2011, 89: 313–328.

Xu XP, He P, Pampolino MF, et al. Fertilizer recommendation for maize in China based on yield response and agronomic efficiency. *Field Crops Research*, 2014, 157: 27–34.

Buresh RJ, Pampolino MF, and Witt C. Field-specific potassium and phosphorus balances and fertilizer requirements for irrigated rice-based cropping systems. *Plant and Soil*, 2010, 335: 35–64.

Guo JH, Liu XJ, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands. *Science*, 2010, 327: 1008–1010.



养分专家系统对黑龙江一季稻产量和养分利用率的影响

刘双全 姬景红 李玉影 佟玉欣 刘颖 张明怡

(黑龙江省农业科学院土壤肥料与环境资源研究所, 黑龙江省土壤环境与植物营养重点实验室, 黑龙江省肥料工程技术研究中心, 哈尔滨 150086)

摘要: 通过 4 年 36 点次田间验证试验, 研究养分专家系统对黑龙江一季稻产量和养分利用率的影响。试验结果表明, NE 推荐施肥平衡了氮磷钾肥用量及比例, 较农民习惯施肥水稻产量提高 10.8%, 经济效益增加 170 元/亩。NE 推荐施肥较农民习惯施肥氮肥农学效率增加 6.6 kg/kg, 氮肥回收率增加 9.8%。

关键词: 水稻, 产量, 氮肥回收率, 氮肥农学效率

黑龙江省是我国粮食主产区, 更是我国最大的商品粮生产基地, 2015 年耕地面积 1586.6 万公顷, 占全国耕地总面积的九分之一。2015 年农作物播种面积 1479.5 万公顷, 主要粮食作物有玉米、水稻和马铃薯。

水稻播种面积达 384.3 万公顷, 占全国水稻播种面积的 12.7%, 占黑龙江省农作物播种面积的 26.0%。2015 年黑龙江省水稻总产达到 2199.7 万吨, 占黑龙江省粮食作物产量的 34.8%, 平均单产为 6988 kg/公顷。

盲目施肥是导致水稻单产不高的原因之一, 我省农民施肥中普遍存在重氮肥, 轻磷、钾肥及中微量元素的现象, 导致水稻产量不高、品质下降。因此, 开展平衡施肥研究可以消除土壤养分限制因子, 为科学施肥提供理论依据, 对加快我省由农业大省向农业强省转变具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤: 土壤类型为水稻土, 土壤基本化学性质见表 1。

供试水稻品种: 2014 年为中龙粳 2 号; 2015 年为阳光 4 号; 2016 年为龙粳 31; 2017 年为龙稻 18。

供试肥料: 氮肥 30% 作种肥, 70% 作追肥; 磷肥全部作种肥一次施入; 钾肥 50% 作种肥, 50% 作追肥。氮肥用尿素、磷肥用重过磷酸钙、钾肥用氯化钾。

1.2 试验设计

2014–2017 年在黑龙江省设立 Nutrient Expert (NE) 水稻推荐施肥田间验证试验, 在不同生态类型的水稻主产区 10 个农户 4 年共设立了 36 个田间验证试验。每个试验设 6 个处理, 小区面积 90 平方米。试验处理如下:

1. NE: 基于养分专家系统推荐量
2. NE N: NE 推荐量基础上, 不施氮肥
3. NE P: NE 推荐量基础上, 不施磷肥
4. NE K: NE 推荐量基础上, 不施钾肥

表 1 黑龙江 10 个农户土壤基本化学性状

农户	pH	有机质 (g/kg)	全氮 (g/kg)	全 P (g/kg)	全 K (g/kg)	速效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)
马文臣	6.78	36.3	1.74	0.76	22.80	37.6	223.3
谢文宝	5.39	38.6	1.98	0.51	22.90	17.6	176.7
王天生	6.02	36.9	1.76	0.47	22.51	12.2	69.7
夏清海	5.64	46.2	2.10	0.64	23.58	23.0	124.9
王西国	5.74	32.6	1.66	0.18	21.78	15.7	122.5
王维华	5.87	47.3	2.17	0.69	22.86	24.1	147.0
马波	5.86	33.0	1.63	0.66	22.63	20.0	163.0
王国	5.94	47.6	2.22	0.72	22.05	31.4	129.9
王开辉	6.04	14.2	0.85	0.47	22.67	20.1	269.5
王维良	5.58	49.4	2.37	0.84	23.63	32.8	103.0



5. FP: 农民习惯施肥

6. ST: 基于土壤测试优化的施肥处理

1.3 测定指标及方法

1.3.1 土壤基本化学性质 试验前采集 0-20 cm 土层土壤样品, 采用常规方法分析土壤基本化学性质。

1.3.2 水稻吸氮量及产量 收获时, 每小区取 2 m² 水稻考种、测产; 将水稻秸秆和籽粒 105℃ 杀青 0.5 h, 70℃ 烘干, 称重, 采用凯氏法测定全氮含量。

1.4 数据处理及计算公式

采用 Excel 2007 和 SPSS 13.0 进行数据的统计分析。

氮肥表观回收率 (REN%) = (施氮小区植株地上部吸氮量 - 不施氮小区植株地上部吸氮量) / 施氮量 × 100;

氮肥农学效率 (AEN)(kg · kg⁻¹) = (施氮小区产量 - 不施氮小区产量) / 施氮量

平衡系数是投入的氮磷钾养分与植株地上部氮磷钾养分吸收量的比值。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对水稻产量、效益的影响

黑龙江省 36 个试验结果表明, 推荐施肥对水稻产量和经济效益有明显的促进作用 (表 2)。与专家推荐施肥 (NE) 相比, 不施氮肥平均减产 46.1%, 不施磷肥平均减产 16.8%, 不施钾肥平均减产 15.9%。NE 推荐施肥比农民习惯施肥增产 10.8%, 比 ST 增产 4.2%。不施氮肥对产量影响最大, 其次是磷肥、钾肥。与 NE 处理相比,

表 2 黑龙江 36 个试验不同处理对水稻产量、效益及氮肥回收率的影响

处理	施肥量 (公斤 / 亩)			平均产量 公斤 / 亩	氮农学效率 公斤 / 公斤	氮肥回收率 %	效益 元 / 亩
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O				
1.NE	10.5	4.3	5.8	592.2	25.7	40.1	—
2.NE-N	0.0	4.3	5.8	319.4	—	—	-770
3.NE-P	10.5	0.0	5.8	492.5	—	—	-269
4.NE-K	10.5	4.3	0.0	498.2	—	—	-249
5.FP	11.6	3.8	4.9	534.3	19.1	30.3	-170
6.ST	10.0	3.8	6.0	568.1	25.4	35.6	-66

不施氮肥平均少收入 770 元 / 亩；不施磷肥平均少收入 269 元 / 亩；不施钾肥少收入 249 元 / 亩。NE 处理比农民习惯施肥平均多收入 170 元 / 亩，比当地推荐施肥 ST 处理平均多收入 66 元 / 亩。专家推荐施肥比农民习惯施肥和当地推荐施肥能提高水稻产量、增加效益。

2.2 氮肥农学效率及氮肥回收率分析

黑龙江省 36 点次试验结果表明 (图 1)，NE、FP、ST 处理氮肥农学效率范围为 4.9–49.9、3.5–46.6、11.1–49.8 公斤 / 公斤，平均分别为 25.7、19.1、25.4 公斤 / 公斤。氮肥回收率范围为 24.7%–77.0%、12.2%–61.6%、5.5%–54.7%，平均分别为 40.1%、30.3% 和 35.6%。与 FP 相比，NE 和 ST 分别平均增加氮肥农学效率 6.6 公斤 / 公斤和 6.3 公斤 / 公斤；增加氮肥回收率 9.8 和 5.3 个百分点。说明无论是专家推荐施肥还是当地推荐施肥，均提高了氮肥农学效率和氮肥回收率，而以 NE 处理效果最佳。

2.3 水稻平衡施肥与养分循环

用平衡系数表示养分投入和养分产出的比值。黑龙

江省 36 个试验结果表明，NE、FP 和 ST 氮的平衡系数平均分别为 1.08、1.28 和 1.10；磷的平衡系数平均分别为 1.65、1.57 和 1.53；钾的平衡系数平均分别为 0.40、0.36 和 0.44。专家推荐施肥较当地推荐施肥和农民习惯施肥在维持土壤氮素平衡方面具有一定的优势。总体来看黑龙江省农民习惯施肥中氮磷肥用量不同地区有高有低，磷肥施用量，钾肥用量严重不足。专家推荐施肥中钾肥用量较农民习惯施肥钾肥用量有所提高。

3 结论

黑龙江省 36 个试验结果表明，专家推荐施肥 (NE) 比农民习惯施肥 (FP) 和当地推荐施肥 (ST) 能显著提高水稻产量、增加效益。无论是专家推荐施肥还是当地推荐施肥均提高了氮肥农学效率和氮肥利用率，以 NE 处理效果最佳。与 FP 相比，NE 和 ST 平均分别增加氮肥农学效率 6.6 和 6.3 公斤 / 公斤；增加氮肥回收率 9.8 和 5.3 个百分点。

专家推荐施肥较当地推荐施肥和农民习惯施肥在维持土壤氮平衡方面具有一定的优势。总体来看，黑龙江省农民习惯施肥中氮磷肥用量不同地区有高有低，磷肥施用

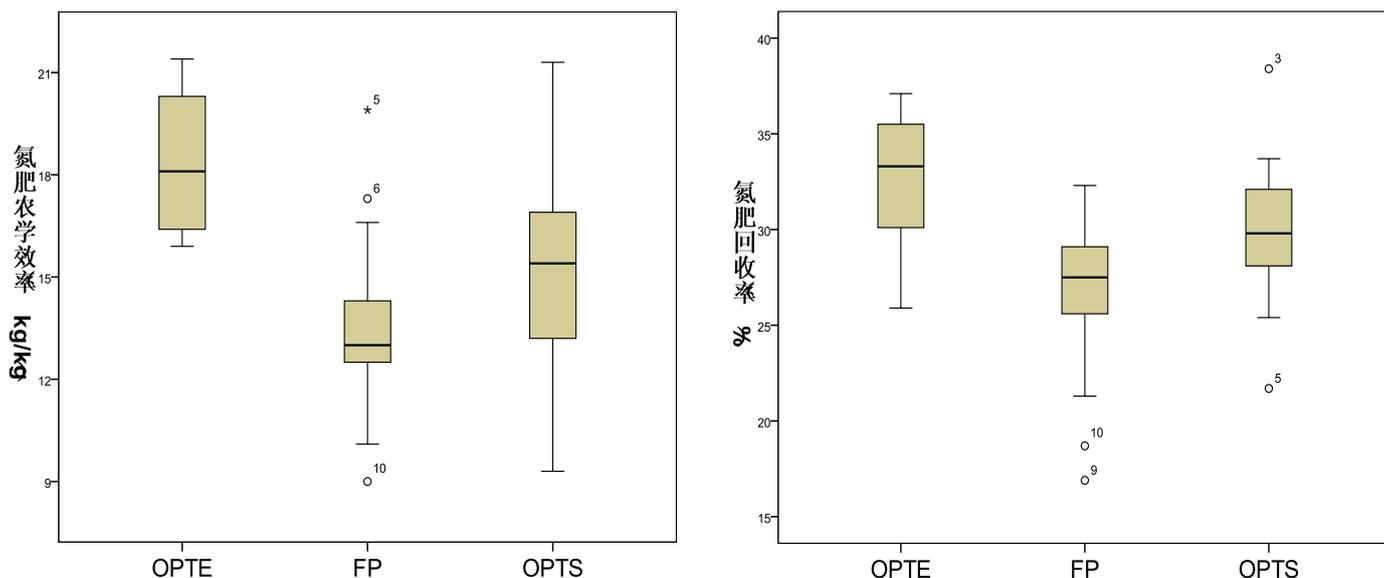


图 1 三个处理的氮肥农学效率和氮肥回收率

表 3 黑龙江 36 个水稻试验养分平衡概算表

处理	养分投入 (公斤 / 亩)			养分支出 (公斤 / 亩)			平衡系数		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
NE	10.5	4.3	5.8	9.8	2.6	14.4	1.08	1.65	0.40
FP	11.6	3.8	4.9	9.0	2.4	13.6	1.28	1.57	0.36
ST	10.0	3.8	6.0	9.0	2.5	13.6	1.10	1.53	0.44

过量，钾肥用量严重不足，对水稻高产稳产带来了不利影响。专家推荐施肥中钾肥用量比农民习惯施肥钾肥用量有所提高。

总之，农民习惯施肥氮磷钾比例不合理，尤其是钾肥用量极低，如生产上不予重视，将影响土壤中养分平衡和农业的可持续发展。采取专家推荐施肥措施平衡氮磷钾施用比例，不但可以显著增加作物产量、提高经济效益，还可以提高氮肥农学效率和氮肥当季回收率。因此，应该加强研究，加大宣传力度，推广平衡施肥，达到粮食增产、农业增效、农民增收的目标。

参考文献

- [1] 黑龙江省统计局. 黑龙江统计年鉴[M]. 中国统计出版社, 2016
- [2] 徐新朋. 基于产量反应和农学效率的水稻和玉米推荐施肥方法研究. 中国农业科学院博士学位论文, 2015年6月
- [3] 姬景红, 李玉影, 刘双全等. 控释尿素对黑龙江水稻产量和氮素利用率的影响. 高效施肥, 2017, 38(1): 3-7
- [4] 贾东, 卢晶晶, 孙雅君, 等. 氮肥不同运筹模式对水稻生产及氮肥利用率的影响[J]. 湖北农业科学, 2015, (15): 3621-3625



养分专家系统对吉林一季稻产量和肥料利用率的影响

王寅 刘奕 李春林 李玉玺 朱希茹 冯国忠 焉莉 高强

(吉林农业大学资源与环境学院 / 吉林省商品粮基地土壤资源可持续利用重点实验室, 吉林长春 130118)

摘要: 于 2013—2017 年在吉林省中部一季稻区的永吉县、九台市、梨树县和前郭县布置 54 个田间试验, 研究了水稻养分专家系统推荐施肥 (Nutrient Expert, NE) 和农民习惯施肥 (FP) 对稻谷产量、经济效益和肥料利用率的影响, 评估了水稻 NE 推荐施肥方法的应用效果。结果显示, NE 处理平衡了水稻的施肥量, 相比 FP 处理显著减少氮、磷肥用量, 平均分别减少 13.8 公斤 N/公顷 (7.5%) 和 6.7 公斤 P₂O₅/公顷 (8.9%)。全部试验 NE 处理的稻谷产量和收益平均分别为 9.47 吨/公顷和 26103 元/公顷, 均略高于 FP 处理 (9.36 吨/公顷和 25753 元/公顷) 但差异并不显著。NE 处理的氮 (N)、磷 (P₂O₅)、钾 (K₂O) 肥农学利用率平均分别为 17.0、42.5 和 33.4 公斤/公斤, 回收利用率平均分别为 29.2%、19.5% 和 35.6%, 偏生产力平均分别为 48.0、120.1 和 93.5 公斤/公斤。其中, NE 处理的氮肥的农学利用率和偏生产力, 磷肥的农学利用率、回收利用率和偏生产力及钾肥的农学利用率显著高于 FP 处理。多年多点研究证明, NE 养分专家推荐施肥显著减少了氮、磷肥投入, 并在小幅增加稻谷产量和经济效益的同时大幅提高了肥料利用率, 显示出良好的应用效果, 实践上可用于吉林省中部一季稻区的水稻推荐施肥。

关键词: 养分专家系统, 吉林, 水稻, 产量, 养分利用率

化肥对促进我国农业持续增产和粮食安全发挥了重要作用^[1]。但是, 化肥的不合理使用也使我国很多地区出现增肥不增产、肥料利用率偏低、生态环境污染等一系列问题, 极大阻碍了农业的可持续发展^[2-4]。为此, 农业部于 2015 年提出了“至 2020 年实现化肥零增长”战略, 推动我国科学施肥技术的研究与推广。目前, 我国常用的推荐施肥方法包括肥料效应法、测土配方施肥法、养分专家系统推荐施肥等^[5]。其中, 养分专家系统推荐施肥 (Nutrient Expert, NE) 是利用 QUEFTS 模型明确作物的养分内在效率, 基于作物产量反应和农学效率之间的关系, 综合 4R 原则而进行推荐施肥的方法^[6-7]。目前, NE 养分专家系统在我国大田作物上已有较广泛的应用, 对优化区域施肥措施、促进节肥增效发挥了重要作用^[7-10]。

吉林是我国重要的粮食主产省, 全国 10 大产粮大县

中有 7 个位于吉林省。水稻作为省内第二大粮食作物, 产量水平较高, 稻米品质优良, 经济效益较好, 水稻产业对保障省域农业发展和农民增收具有重要意义^[11]。但是, 现阶段吉林省农户的水稻养分管理措施还存在很多问题, 如施肥普遍过量、施用方式不合理、养分不平衡等^[12-13], 科学施肥的理念、方法与技术还需进一步研究推广。为此, 本研究通过设置多年多点的大田试验, 研究 NE 养分专家系统推荐施肥方法在吉林省中部一季稻区的应用效果与适用性, 以期为吉林省水稻的科学施肥提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验概况

本研究于 2013—2017 年在吉林省中部一季稻区的 4

表 1 吉林省一季稻 NE 田间试验不同区域土壤基本理化性质与多年平均气候状况

地点	年份	试验数	pH	有机质 (克/公斤)	碱解氮 (毫克/公斤)	有效磷 (毫克/公斤)	速效钾	年均气温 (摄氏度)	年均降雨 (毫米)
前郭	2013	4	8.5	16.0	96.4	18.2	143.3	4.9	697
永吉	2013-2017	11	6.1	28.4	122.5	24.5	141.0	4.6	573
九台	2013-2017	22	6.3	26.5	118.5	20.5	137.4	5.8	544
梨树	2014-2017	17	6.5	23.4	74.2	29.9	123.3	4.5	471

个地区设置大田试验，分别为前郭县深井子镇 (n=4)、永吉县万昌镇 (n=11)、九台市兴隆镇 (n=22) 和梨树县小宽镇 (n=17) 共计 54 个试验。各研究地区田间试验的耕层土壤基本理化性质及区域多年平均气候状况详见表 1。

1.2 试验设计

所有田间试验均设计 5 个施肥处理，包括：1) 水稻养分专家系统推荐施肥 (NE)，2) 农民习惯施肥 (FP)，3) NE 推荐施肥基础上不施氮肥 (NE-N)，4) NE 推荐施肥基础上不施磷肥 (NE-P) 和 5) NE 推荐施肥基础上不施钾肥 (NE-K)。其中，FP 处理水稻的施肥量通过调查试验点周边 10 位农户的施肥情况而确定，NE 处理施肥量是通过农户调查采集的土壤、作物和施肥信息，利用水稻 NE 养分专家系统软件计算获得。各试验地区 FP 和 NE 处理的水稻氮、磷、钾肥推荐用量详见表 2。

所有试验采用的氮、磷、钾肥品种分别为尿素 (N 46%)、磷酸二铵 (N18%、P₂O₅ 46%)、氯化钾 (K₂O 60%)。FP 处理的氮肥运筹为基肥：分蘖肥：穗肥 =40%：30%：30%，钾肥运筹为基肥：穗肥 =50%：50%。NE 处理则遵循水稻养分专家系统推荐施肥运筹，氮肥分 4 次施用，比 FP 处理增加一次粒肥，NE 处理的氮肥运筹为基肥：分蘖肥：穗肥：粒肥 =30%：30%：20%：20%，钾肥运筹为基肥：穗肥 =60%：40%。所有施肥处理的磷肥均作基肥施用。除施肥量和施肥运筹外，田间试验其余管理措施均与当地农户保持一致。

所有试验的小区面积均设为 40 平方米，永吉和九台水稻种植密度为 18 万株 / 公顷，前郭和梨树水稻种植密度为 16 万株 / 公顷。试验品种均采用当地主流水稻品种，主要为吉农大系列和吉洋系列，各地区均于 4 月初育苗，5 月中下旬移栽，当年 9 月下旬收获。

1.3 测定项目与方法

所有大田试验的基础土壤样品的采集和测定均用如下方法统一进行^[14]。施基肥前在整个田块均匀布点 15 个取 0-20 cm 耕层土壤，实验室风干磨细过筛后按常规法测定：pH 按水土比 2.5:1，pH 计测定；有机质用重铬酸钾容量法；碱解氮用碱解扩散法-标准酸滴定；有效磷用 0.5 mol/LNaHCO₃ 浸提-钼锑抗比色法；速效钾用 1 mol/LNH₄OAc 浸提-火焰光度法。

大田试验收获前，每个小区按平均穗数取有代表性的 5 穴水稻样品脱粒考种，样品风干后粉碎后采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮，凯氏定氮仪测定全氮，钒钼黄比色法测定全磷，火焰光度计测定全钾^[14]。收获时，每个小区单打单收，每个小区均匀划定 3 个 1 平方米测产区进行测产。稻谷脱粒风干后测定含水量，计算得到稻谷产量。肥料成本和经济效益根据试验当年的稻谷价格、氮、磷、钾肥价格进行计算。

相关参数^[15-16]的计算公式为：

肥料农学利用率 (AE, 公斤 / 公斤) = (施肥处理稻谷产量 - 不施肥处理稻谷产量) / 施肥量

肥料回收利用率 (RE, %) = (施肥处理地上部植株养分积累量 - 不施肥处理地上部植株养分积累量) / 施肥量 × 100

肥料偏生产力 (PFP, 公斤 / 公斤) = 施肥处理稻谷产量 / 施肥量。

1.4 数据统计分析

所有试验数据均采用 Excel 软件计算，采用 SPSS17.0 软件的 T 检验方法比较处理间在 p = 0.05 水平上的差异显著性。

2 结果

表 2 吉林省一季稻 NE 养分专家系统与农民习惯施肥的施肥量比较

地点	施氮量 (公斤 N/ 公顷)			施磷量 (公斤 P ₂ O ₅ / 公顷)			施钾量 (公斤 K ₂ O/ 公顷)		
	NE	FP	ΔNE-FP	NE	FP	ΔNE-FP	NE	FP	ΔNE-FP
前郭	167.0 b	202.3 a	-35.3	68.0 b	85.3 a	-17.3	91.3 a	88.8 a	2.5
永吉	173.5 b	190.0 a	-16.5	71.6a	75.0 a	-3.4	90.7 a	76.0 b	14.7
九台	168.4a	165.5a	3.0	69.0 b	73.6 a	-4.6	89.5 a	82.2 b	7.3
梨树	171.4 b	200.0 a	-28.6	65.5 b	74.7 a	-9.2	87.8 b	105.0 a	-17.2
全部	170.3 b	184.1 a	-13.8	68.4 b	75.1 a	-6.7	89.3 a	88.6 a	0.7

注：NE 为养分专家系统推荐施肥，FP 为农民习惯施肥，ΔNE-FP 为 NE 与 FP 施肥量的差值，同一地点处理均值后不同的小写字母表示处理间差异显著，下同。

2.1 水稻 NE 养分专家系统的节肥效应

表 2 显示, 吉林省中部一季稻区不同地区的 FP 处理施肥量差异较大。氮肥用量以九台市明显较低, 磷肥、钾肥用量则分别以前郭县和梨树县明显较高。相比之下, NE 处理的施肥量在不同区间差异较小。前郭县、永吉县和梨树县三个地区 NE 处理的氮肥用量与 FP 处理相比均显著较低, 九台市则非常接近。四个地区的磷肥用量均以 NE 处理低于 FP 处理, 除永吉县外均表现出显著差异。梨树县 NE 处理的钾肥用量显著低于 FP 处理, 其余三个地区则均相对较高。总体来看, 吉林省中部一季稻区 NE 处理的氮、磷肥用量显著低于 FP 处理, 分别降低 7.5% 和 8.9%, 钾肥用量则略高于 FP 处理, 但增幅不显著。

2.2 水稻 NE 养分专家系统的产量效应与经济效益

吉林省中部一季稻区不同地区的 FP 处理的稻谷产量水平在 8.78 ~ 10.36 吨 / 公顷之间, 平均为 9.36 吨 / 公顷 (表 3)。NE 处理的稻谷产量水平在 8.79 ~ 10.26 吨 / 公顷之间, 平均为 9.47 吨 / 公顷, 较 FP 处理平均提高 0.11 吨 / 公顷, 但并无显著差异。成本方面, 前郭县和梨树县 NE 处理的化肥成本显著低于 FP 处理, 而永吉县和九台市则无显著差异, 总体来看 NE 处理显著低于 FP 处理, 平均减少化肥投入 91 元 / 公顷。由于前郭县 NE 处理的平均稻谷产量低于 FP 处理, 因此其收益也较低, 而其余三个地区 NE 处理的收益则高于 FP 处理。总体上, 四个地区 NE 处理与 FP 处理相比平均增收 440 元 / 公顷, 但并无显著差异。

2.3 水稻 NE 养分专家系统的氮肥利用效率

表 4 显示, 吉林省中部一季稻区不同地区的 FP 处理的氮肥农学利用率在 14.1 ~ 16.8 公斤 / 公斤之

间, 平均为 15.3 公斤 / 公斤, 氮肥回收利用率分布在 20.3% ~ 42.1% 之间, 平均为 28.6%, 氮肥偏生产力分布在 37.7 ~ 48.5 公斤 / 公斤之间, 平均为 44.1 公斤 / 公斤。与 FP 处理相比, NE 处理显著提高了永吉县、九台市和梨树县的氮肥农学利用率, 并显著提高了永吉县和梨树县的氮肥回收利用率和偏生产力。由于前郭县 NE 处理的稻谷产量低于 FP 处理, 因此该地区 NE 处理的氮肥农学利用率、回收利用率和偏生产力较 FP 处理显著下降。总体来看, 四个地区 NE 处理的氮肥农学利用率和偏生产力平均分别为 17.0 和 48.0 公斤 / 公斤, 显著高于 FP 处理, 平均分别提高 11.1% 和 8.8%, 氮肥回收利用率平均为 29.2%, 与 FP 处理无显著差异。

2.4 水稻 NE 养分专家系统的磷肥利用效率

吉林省中部一季稻区 NE 处理的磷肥农学利用率、回收利用率和偏生产力总体上均显著高于 FP 处理 (表 5)。不同地区的 FP 处理的磷肥农学利用率在 7.7 ~ 16.6 公斤 / 公斤之间, 平均为 9.6 公斤 / 公斤, 磷肥回收利用率分布在 11.2% ~ 25.1% 之间, 平均为 15.9%, 磷肥偏生产力分布在 101.1 ~ 114.5 公斤 / 公斤之间, 平均为 108.0 公斤 / 公斤。与 FP 处理相比, NE 处理显著提高了四个地区的磷肥农学利用率和偏生产力, 并显著提高了九台市的磷肥回收利用率。不同地区的 NE 处理的磷肥农学利用率在 36.3 ~ 43.8 公斤 / 公斤之间, 平均为 42.5 公斤 / 公斤, 较 FP 处理提高 3.42 倍; 磷肥回收利用率分布在 8.3% ~ 27.0% 之间, 平均为 19.5%, 较 FP 处理提高 22.6%; 磷肥偏生产力分布在 115.4 ~ 125.5 公斤 / 公斤之间, 平均为 120.1 公斤 / 公斤, 较 FP 处理提高 11.2%。

表 3 吉林省一季稻 NE 养分专家系统与农民习惯施肥的产量与经济效益比较

地点	产量 (吨 / 公顷)			化肥成本 (元 / 公顷)			经济效益 (元 / 公顷)		
	NE	FP	ΔNE-FP	NE	FP	ΔNE-FP	NE	FP	ΔNE-FP
前郭	9.63 a	10.36 a	-0.73	1493 b	1726a	-233	23110a	24855a	-1511
永吉	10.26 a	9.98 a	0.28	1603 a	1609a	-7	28606a	27916a	685
九台	9.58 a	9.31 a	0.27	1555 a	1536a	19	26584a	25817a	748
梨树	8.79 a	8.78 a	0.01	1549 b	1804a	-255	24566a	24483a	337
全部	9.47 a	9.36 a	0.11	1558 b	1649 a	-91	26103 a	25753 a	440

表4 吉林省一季稻 NE 养分专家系统与农民习惯施肥的氮肥利用率比较

地点	氮肥农学利用率 (公斤 / 公斤)			氮肥回收利用率 (%)			氮肥偏生产力 (公斤 / 公斤)		
	NE	FP	ΔNE-FP	NE	FP	ΔNE-FP	NE	FP	ΔNE-FP
前郭	14.8 a	15.4 a	-0.6	35.6 b	42.1 a	-6.5	49.6 a	44.2 b	5.4
永吉	16.9 a	14.2 b	2.7	23.4 a	20.3 b	3.1	51.3 a	45.2 b	6.1
九台	17.8 a	16.8 b	1.0	32.2 a	33.5 a	-1.3	49.0 a	48.5 a	0.5
梨树	16.6 a	14.1 b	2.5	27.5 a	24.5 b	3.0	44.2 a	37.7 b	6.5
全部	17.0 a	15.3 b	1.7	29.2 a	28.6 a	0.6	48.0 a	44.1 b	3.9

表5 吉林省一季稻 NE 养分专家系统与农民习惯施肥的磷肥利用率比较

地点	磷肥农学利用率 (公斤 / 公斤)			磷肥回收利用率 (%)			磷肥偏生产力 (公斤 / 公斤)		
	NE	FP	ΔNE-FP	NE	FP	ΔNE-FP	NE	FP	ΔNE-FP
前郭	36.3 a	16.6 b	19.7	8.3 a	11.2 a	-2.9	121.8 a	113.1 b	8.7
永吉	41.7 a	13.0 b	28.7	27.0 a	25.1 a	1.9	125.5 a	114.5 b	11.0
九台	43.8 a	7.7 b	36.1	21.6 a	14.4 b	7.2	120.8 a	109.2 b	11.6
梨树	42.6 a	8.1 b	34.5	14.4 a	13.0 a	1.4	115.4 a	101.1 b	15.3
全部	42.5 a	9.6 b	32.9	19.5 a	15.9 b	3.6	120.1 a	108.0 b	12.1

2.5 水稻 NE 养分专家系统的钾肥利用效率

吉林省中部一季稻区 NE 处理的钾肥农学利用率总体上显著高于 FP 处理, 而回收利用率和偏生产力则无显著差异 (表 6)。不同地区的 FP 处理的钾肥农学利用率在 5.4 ~ 16.1 公斤 / 公斤之间, 平均为 6.8 公斤 / 公斤, 钾肥回收利用率分布在 23.5% ~ 42.5% 之间, 平均为 30.5%, 钾肥偏生产力分布在 71.9 ~ 113.4 公斤 / 公斤之间, 平均为 93.3 公斤 / 公斤。与 FP 处理相比, NE 处理显著提高了四个地区的钾肥农学利用率, 提高了梨树县的钾肥回收利用率和偏生产力及永吉县的钾肥回收利用率。而前郭县的钾肥回收利用率和偏生产力、永吉县的钾

肥偏生产力则以 NE 处理显著低于 FP 处理。不同地区的 NE 处理的钾肥农学利用率在 27.0 ~ 34.5 公斤 / 公斤之间, 平均为 33.4 公斤 / 公斤, 较 FP 处理提高 3.91 倍; 钾肥回收利用率分布在 24.0% ~ 53.2% 之间, 平均为 35.6%, 较 FP 处理提高 16.7%; 钾肥偏生产力分布在 89.6 ~ 99.8 公斤 / 公斤之间, 平均为 93.5 公斤 / 公斤, 与 FP 处理基本一致。

3 结论

多年多点试验结果显示, 吉林省中部一季稻区采用水稻养分专家系统推荐施肥方法与 FP 处理相比, 在显著降

表6 吉林省一季稻 NE 养分专家系统与农民习惯施肥的钾肥利用率比较

地点	钾肥农学利用率 (公斤 / 公斤)			钾肥回收利用率 (%)			钾肥偏生产力 (公斤 / 公斤)		
	NE	FP	ΔNE-FP	NE	FP	ΔNE-FP	NE	FP	ΔNE-FP
前郭	27.0 a	16.1 b	10.9	24.0 b	42.5 a	-18.5	90.6 b	102.6 a	-12.0
永吉	33.2 a	8.6 b	24.6	53.2 a	40.2 b	13.0	99.8 b	113.4 a	-13.6
九台	34.5 a	5.4 b	29.1	26.9 a	23.5 a	3.4	94.0 a	98.2 a	-4.2
梨树	33.8 a	5.4 b	28.4	38.2 a	30.4 b	7.8	89.6 a	71.9 b	17.7
全部	33.4 a	6.8 b	26.6	35.6 a	30.5 a	5.1	93.5 a	93.3 a	0.2

低氮、磷肥投入的基础上小幅提高了稻谷产量和经济效益,而且显著提高氮肥的农学利用率和偏生产力、磷肥的农学利用率、回收利用率和偏生产力及钾肥的农学利用率。结果证明水稻养分专家系统推荐施肥方法在吉林省中部一季稻区具有良好的应用效果与推广前景。

参考文献

[1] 朱兆良, 金继运. 保障我国粮食安全的肥料问题[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(2): 259-273.

[2] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 915-924.

[3] Peng S B, Tang Q Y, Ying Z. Current status and challenges of rice production in China.[J]. Plant Production Science, 2009, 12(1): 3-8.

[4] 李娟, 李松昊, 邬奇峰, 等. 不同施肥处理对稻田氮素径流和渗漏损失的影响[J]. 水土保持学报, 2016, (5): 23-28.

[5] 串丽敏, 何萍, 赵同科. 作物推荐施肥方法研究进展[J]. 中国农业科技导报, 2016, 18(1): 95-102.

[6] 何萍, 金继运, Pampolino, 等. 基于作物产量反应和农学效率的推荐施肥方法[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(2): 499-505.

[7] Xu X P, He P, Yang F Q, et al. Methodology of fertilizer recommendation based on yield response and agronomic efficiency for rice in China [J]. Field Crops Research, 2017, 206: 33-42.

[8] Chuan L M, He P, Jin J Y, et al. Estimating nutrient uptake requirements for wheat in China[J]. Field Crops Research, 2013, 146: 96-104.

[9] Xu X P, He P, Zhang J J, et al. Spatial variation of attainable yield and fertilizer requirements for maize at the regional scale in China [J]. Field Crops Research, 2017, 203: 8-15.

[10] Yang F Q, Xu X P, Ma J C, et al. Experimental validation of a new approach for rice fertilizer recommendations across smallholder farms in China [J]. Soil Research, 2017, 55: 579-589.

[11] 张大瑜, 邵玺文, 凌凤楼, 等. 吉林省水稻生产省域尺度比较优势分析与建议[J]. 中国农学通报, 2011, 27(2): 289-293.

[12] 沈娟, 高强. 吉林省水稻施肥现状的调查分析[J]. 东北农业科学, 2011, 36(2): 40-43.

[13] 焉莉, 冯国忠, 兰唱, 等. 基于 GIS 的吉林省水稻种植区施氮效果及减排潜力分析[J]. 中国农业科学, 2017 (17): 3365-3374.

[14] 鲍士旦. 土壤农化分析(第3版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.

[15] 彭少兵, 黄见良, 钟旭华, 等. 提高中国稻田氮肥利用率的研究策略[J]. 中国农业科学, 2002, 35(9): 1095-1103.

[16] 刘瑞, 戴相林, 郑险峰, 等. 半旱地不同栽培模式及施氮下农田土壤养分表观平衡状况研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(4): 934-941.



养分专家系统推荐施肥及对安徽中稻产量的影响

李录久¹, 吴萍萍¹, 姚文麒², 王家嘉¹, 李虹颖¹

(1. 安徽省农业科学院土壤肥料研究所, 合肥 230031; 2. 长丰县农业技术推广中心, 长丰 231100)

摘要: 通过田间试验分析安徽省一季中稻的施肥量及养分专家系统 (NE) 对其籽粒产量的影响。4 年 40 户试验结果表明, 相比于农民习惯施肥 (FP) 和当地农技术部门测土配方推荐施肥 (ST), NE 推荐施肥氮肥平均用量分别减少 19.99% 和 13.72%, 磷肥投入相近, 钾肥用量比 ST 降低 17.15% 而较 FP 增长 20.78%, 总体上 NE 推荐施肥既大幅度减少氮肥用量, 同时较 FP 增加磷钾供应, 又减少 ST 磷钾用量避免奢侈吸收, 氮磷钾养分投入比例较为合适。NE 推荐的氮磷钾施肥量对安徽省一季中稻具有较明显的增产效应。40 地试验, NE 比不施氮的对照增产 28.14% ~ 111.24%, 比不施磷增产 2.33% ~ 21.15%, 比不施钾增产 0.17% ~ 19.87%, 4 年总平均增产率分别为 42.45%、10.53% 和 11.38%, 总体上施氮的增产率很高, 部分地块施磷、施钾的增产效应也较明显, 氮磷钾的增产效应顺序为 N>>K>=P。水稻籽粒产量 ST 与 NE 相近, FP 表现较差; NE 较 ST 和 FP 分别增产 -9.28% ~ 14.96% 和 -3.31% ~ 19.36%, 平均增产 -0.76% 和 9.32%, NE 与 ST 产量基本持平, 与 FP 相比增产效应较明显, NE 具有很好的应用效果和技术优势。

关键词: 养分专家系统 NE, 氮磷钾用量, 水稻产量

水稻是我国主要的粮食作物, 1949 ~ 2009 的 60 年间, 我国水稻平均年播种面积 $3.0937 \times 10^7 \text{ hm}^2$, 占粮食作物播种面积的 27%; 总产平均为 $1.3329 \times 10^8 \text{ t}$, 占粮食总产的 42%, 居粮食作物首位^[1,2]。2016 年我国水稻种植面积为 $3.0178 \times 10^7 \text{ hm}^2$, 总产增至 $2.0708 \times 10^8 \text{ t}$ ^[2]。安徽是我国水稻重要生产省份, 2012 年种植面积高达 $2.215 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 总产 $1.393 \times 10^7 \text{ t}$, 播种面积和总产量分别占全国的 7.35% 和 6.82%, 仅次于湖南、江西、黑龙江和江苏等省, 分别居全国第 5、第 7 位^[2,3]; 2016 年全省水稻种植面积为 $2.2655 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 总产 $1.4018 \times 10^7 \text{ t}$, 水稻生产在安徽占有重要地位。

养分专家系统 (Nutrient Expert, NE) 是在 SSNM 基础上应用国际上最新的 4R 养分管理技术原理, 结合 QUEFTS 模型计算最佳养分吸收, 并依据产量反应和农

学效率进行推荐施肥和养分管理的一种推荐施肥方法^[4,5]。与测土配方施肥相比, 省去了取土和化验等繁杂工作, 既充分利用农田的基础养分资源、提供合理的养分用量, 避免作物对养分的奢侈吸收, 又保障作物养分供应, 在保持土壤肥力的同时, 使养分胁迫降到最低并最终达到高产、高效的目的。2009 年以来, 我国在小麦和玉米种植区不同气候条件下全面开展了应用 NE 系统推荐施肥工作, 结果表明, 在保证作物产量的前提下, NE 能够科学减施氮肥, 提高肥料利用率, 是较好的指导农民科学施肥的新方法。2013 年起, 在农业部行业专项“南方低产水稻土改良技术”、“水田合理耕层构建技术”、国家水稻产业技术体系培肥岗位专家、中国农科院创新工程和 IPNI 的资助下, 开展了水稻 NE 田间试验, 以进一步验证水稻 NE 系统在安徽一季中稻的适应性。现将结果整理如下。

表 1 供试土壤 0 ~ 20 厘米耕层基本农化性状

年度	pH (水, 2.5:1)		有机质 (g/kg)		全氮 (g/kg)		有效 P (mg/kg)		速效 K (mg/kg)	
	范围	平均	范围	平均	范围	平均	范围	平均	范围	平均
2013	5.07-7.29	5.62	14.4-26.0	19.8	1.02-1.44	1.16	5.4-29.4	17.0	96.0-189.7	154.8
2014	4.96-6.50	5.74	12.5-27.4	18.5	0.88-1.75	1.39	6.0-25.6	15.5	46.2-205.8	114.1
2015	4.92-6.23	5.48	10.5-20.3	13.2	0.93-1.90	1.19	9.8-43.3	24.1	58.3-233.0	131.3
2016	5.12-6.54	5.94	10.3-19.6	14.1	0.56-0.96	0.71	10.7-33.2	20.6	95.6-194.2	137.5

1. 材料与方 法 .

1.1 土壤养分状况

试验于 2013 ~ 2016 年在安徽省合肥市长丰县和肥西县及蜀山区、滁州市定远县和明光市、阜阳市颍上县、淮南市潘集区、黄山市屯溪区 5 市 8 县市区 10 户农民地块进行, 供试土壤为安徽省主要成土母质——下蜀系黄土、黄褐土和砂姜黑土发育而成的水稻土。试验前 0 ~ 20 cm 耕层土壤采用常规分析法测定, 养分状况见表 1。

1.2 试验设计

每年 10 户农民试验均设置以下 6 个处理: ① NE (在调查农民施肥和水稻产量等信息的基础上, 基于水稻养分专家系统 NE 计算 NPK 推荐用量), ② NE-N (NE 推荐量基础上, 不施氮肥), ③ NE-P (NE 推荐量基础上, 不施磷肥), ④ NE-K (NE 推荐量基础上, 不施钾肥), ⑤ ST (测土或当地农技推广部门推荐的施肥量), ⑥ FP (当地农民习惯施肥量), 施肥量见表 2。供试肥料品种: 氮肥用尿素, 磷肥用磷酸二铵或过磷酸钙, 钾肥用氯化钾。小区面积 20 ~ 60 m², 固定 NE 位置, 其它小区随机排列, 不设重复。全部磷肥作基肥, 钾肥按基肥 - 孕穗肥 50% - 50% 的比例施用。氮肥在 NE 及减 P 减 K 处理按基肥——分蘖肥——孕穗肥 50% - 30% - 20% 的比例施用, ST 及 FP 处理分别按 60% - 25% - 15% 和 70% - 30% - 0% 的比例施肥。基肥于水稻移栽前全层撒施, 与土壤充分混合。供试水稻品种为丰良优 6 号、C 两优 87、两优 900、Y 两优 512、

两优 8106、皖稻 197、天优华占等当地主栽品种, 每年 4 月下旬后开始育秧, 5 月中下旬到 6 月上中旬移栽, 9 月下旬开始陆续收获, 栽插密度 25 cm × 20 cm, 20000 株 /hm²。其它栽培管理措施, 如病虫害防治以及水分管理, 同当地一般大田水稻。

2. 结果与分析

2.1 养分专家系统 NE 的推荐施肥量

从表 2 可看出, 4 年试验农民习惯施肥 FP 处理调查得出的 N、P₂O₅、K₂O 施用量为 165 ~ 270、30.0 ~ 90.0 和 30.0 ~ 105.0 kg/hm², 总平均为 209.1、62.1 和 64.0 kg/hm², 投入的 N:P₂O₅:K₂O 养分比例为 3.37:1:1.03, 户与户之间养分投入量差异较大, 整体上以氮为主, 磷和钾投入量较少。当地测土配方施肥或农技部门推荐施肥氮磷钾养分投入量相应为 165.0 ~ 225.0、60.0 ~ 90.0 和 60.0 ~ 180.0 kg/hm², 4 年总平均为 193.9、70.7 和 93.9 kg/hm², N:P₂O₅:K₂O 为 2.74:1:1.33。NE 专家系统计算的氮磷钾养分投入量分别为 145 ~ 195、48.0 ~ 90.0 和 54.0 ~ 120.0 kg/hm², 总平均为 167.3、66.2 和 77.3 kg/hm², 投入的 N:P₂O₅:K₂O 为 2.53:1:1.17。由此可见, NE 处理的氮肥投入量大幅度降低, 相较于 FP 和 ST, 4 年 40 户总平均用量分别减少 19.99% 和 13.72%, 即 FP 和 ST 较 NE 多施 N 肥 25.0% 和 15.9%。至于磷肥, 4 年 40 户总平均, NE 较 ST 减少 6.36%, 比 FP 多 6.60%, 总体上差异不大;

表 2 水稻 NE、ST 和 FP 处理施肥量 (单位: kg/hm²)

处理	养分	2013		2014		2015		2016		总平均 用量
		范围	平均	范围	平均	范围	平均	范围	平均	
NE	N	165-175	170.0	150.0-195.0	173.8	145.0-170.0	156.9	156.0-186.0	168.6	167.3
	P ₂ O ₅	60-75	65.5	60.0-90.0	71.7	60.0-80.0	69.9	48.0-72.0	57.6	66.2
	K ₂ O	70-75	73.5	60.0-120.0	77.2	54.0-78.0	63.7	78.0-120.0	94.8	77.3
ST	N	165-210	197.5	165.0-210.0	190.5	180.0-210.0	193.5	180.0-225.0	193.9	193.9
	P ₂ O ₅	60-75	72.0	60.0-90.0	70.2	60.0-90.0	72.5	60.0-80.0	68.0	70.7
	K ₂ O	70-120	105.5	60.0-180.0	93.0	60.0-105.0	83.0	90.0-105.0	91.5	93.3
FP	N	165-270	213.0	180.0-255.0	209.0	180.0-225.0	202.5	195.0-240.0	212.0	209.1
	P ₂ O ₅	37.5-90	57.0	30.0-90.0	62.3	45.0-75.0	57.0	30.0-90.0	72.0	62.1
	K ₂ O	45-105	70.5	45.0-90.0	69.8	45.0-90.0	57.0	30.0-75.0	58.5	64.0

40 农户钾平均投入, NE 比 ST 少 17.15% 而较 FP 多 20.78%, 表明 NE 既增加 FP 的钾供应又避免 ST 的奢侈吸收, 氮磷钾养分投入比例也较为合适 (表 3)。

2.2 养分专家系统 NE 对水稻籽粒产量的影响

2.2.1 水稻施用氮磷钾的的增产效应

水稻籽粒产量统计结果 (表 3) 表明, 安徽省水稻主产区包括江淮水稻主产区及沿江江南和沿淮地区, 水稻 NE 养分专家系统推荐的氮磷钾施肥组合具有较明显的增产效应。4 年试验, 以不施氮、磷、钾的处理 NE—N、NE—P 和 NE—K 为对照, 10 户农民 10 个地块, 水稻氮磷钾配合施用的 NE 处理较不施氮对照 (NE—N) 增产分别为 28.14% ~ 81.04%、30.05% ~ 111.24%、29.68% ~ 55.57% 和 23.68% ~ 90.29%, 平均增产

45.28%、45.27%、40.87% 和 38.82%; NE 处理较无磷的对照 (NE—P) 产量相对提高 4.17% ~ 17.20%、2.33% ~ 21.15%、6.01% ~ 15.63% 和 2.34% ~ 14.81%, 平均增产率达 10.00%、11.34%、10.93% 和 9.84%; NE 较缺钾处理 (NE—K) 增产 0.17% ~ 13.32%、4.88% ~ 15.79%、8.96% ~ 17.89% 和 2.92% ~ 19.87%, 产量平均提高 6.80%、9.71%、14.81% 和 14.23%。总体上 4 年试验, 施氮最低增产 23.68%、最高达 112.24%、总平均增产率高达 42.45%, 施氮的增产效应极为明显; 施磷最低只增产 2.33%、最高则增加 21.15%、平均提高 10.53%, 远低于氮的增产效应, 但变化幅度相对较小, 施钾与施磷效果相当, 最低仅增长 0.17%, 产量基本持平, 最高增产 19.87%、总平均增产 11.38%, 略高于磷 (表 3), 变异系数也高于磷。安徽省一季水稻 (中稻) 氮磷钾的增

表 3 各年度 10 户农民地块水稻籽粒产量统计

年度	处理	水稻籽粒产量 (kg/hm ²)				变异系数 (%)	施肥增产率 (%)				变异系数 (%)
		最小值	最大值	平均值	标准差		最小值	最大值	平均值	标准差	
2013	NE	7284	9236	8182	676.7	8.27	--	--	--	--	--
	NE—N	4773	6758	5632	677.7	12.03	28.14	81.04	45.28	14.13	31.21
	NE—P	6357	8866	7438	773.6	10.40	4.17	17.20	10.00	4.14	41.39
	NE—K	6551	8698	7661	699.7	9.13	0.17	13.32	6.80	4.72	69.48
	ST	7526	9546	8570	714.4	8.34	-9.28	2.10	-4.52	4.20	92.97
	FP	6460	8119	7393	643.7	8.71	5.12	14.02	10.68	3.32	31.12
2014	NE	7260	9680	8675	832.3	9.59	--	--	--	--	--
	NE—N	4450	7252	5972	816.0	13.66	30.05	111.24	45.27	24.80	54.77
	NE—P	6544	8890	7791	680.5	8.73	2.33	21.15	11.34	7.01	61.77
	NE—K	6270	9230	7907	975.4	12.34	4.88	15.79	9.71	3.56	36.64
	ST	7590	9580	8724	731.2	8.38	-6.03	14.96	-0.56	6.45	1154
	FP	6930	9001	7930	769.2	9.70	2.96	19.36	9.39	5.39	57.39
2015	NE	7815	9765	8778	582.4	6.64	--	--	--	--	--
	NE—N	5274	7095	6231	606.3	9.73	29.68	55.57	40.87	9.98	24.41
	NE—P	7050	8628	7913	513.0	6.48	6.01	15.63	10.93	2.59	23.70
	NE—K	6657	8370	7645	568.2	7.43	8.96	17.89	14.81	3.34	22.58
	ST	7866	9348	8669	521.9	6.02	-4.84	6.30	1.26	4.60	366.7
	FP	7455	8802	8088	461.5	5.71	2.76	13.11	8.53	3.78	44.27
2016	NE	8034	9882	8788	561.3	6.39	--	--	--	--	--
	NE—N	5193	7476	6330	650.8	10.28	23.68	90.29	38.82	20.22	52.08
	NE—P	7184	8964	8001	640.3	8.00	2.34	14.81	9.84	4.06	41.22
	NE—K	6885	8883	7694	502.0	6.52	2.92	19.87	14.23	5.18	36.42
	ST	7380	9711	8719	787.5	9.03	-5.91	11.56	0.79	5.88	742.6
	FP	7150	9050	8085	618.4	7.65	-3.31	16.17	8.69	5.95	68.44

产效应顺序为 N>>K>P。

表 3 的结果还表明，相比不施氮、不施磷和不施钾的对照，氮磷钾配合的 NE 处理，4 年的标准差均相对较小，变异系数分别为 4 个处理中最低、次低、次低和最低，水稻籽粒产量表现较为稳定，说明即使在安徽南北各地土壤和气候条件相差很大的地区，水稻养分专家系统推荐的施肥处理也能稳定增产；不施氮的 NE—N 处理，标准差相对较大，4 年变异系数均表现为最高，表明不施氮则水稻籽粒产量极不稳定，氮肥对水稻产量有重大影响；不施磷的 NE—P 处理，4 年表现不同，变异系数 2013 年次高、2014 年最高、2015 次低、2016 年最低，与试验地土壤有效磷含量有关；不施钾的 NE—K 处理，标准差和变异系数的表现与无磷处理相似，中间两年高于 P 而另外 2 年又低，主要原因是这两年基础土壤的速效钾变化幅度较大（表 1）。分析氮磷钾肥增产率变化趋势，也可以得到相似的结论，NE—N、NE—P 和 NE—K 的变异系数，变幅分别为 24.41% ~ 54.77%、23.70% ~ 61.77% 和 22.58% ~ 69.48%，平均为 40.62%、42.02% 和 41.28%，也是增施氮肥的增产率变化范围较小，施磷、施钾的增产率变幅较大，而钾又略高于磷（表 3）。

统计 4 年 10 地 40 点试验水稻施用氮磷钾的增产率分布频数与频率（表 4），可以发现，水稻施氮的增产率较高，仅有 1 地的增产率低于 25%、2 地的增产率介于 25% ~ 30%，增产率在 30% ~ 50%、50% ~ 75%、75% ~ 100% 的分别有 26 个、7 个和 2 个，相应占 65.0%、17.5% 和 5.0%，有一个点的增产率甚至超过 100%，说明水稻施用氮肥具有极为明显的增产效果，氮仍是影响安徽一季水稻（中稻）籽粒产量的决定性因素，不施氮将严重影响水稻正常生长发育，籽粒产量将会大幅度下降。表 4 还说明，磷钾肥的增产作用与氮肥有较大差异，4 年 40 地试验，分别有 7 地和 5 地试验，施磷、补

钾的增产率低于 5%，相应占 17.5% 和 12.5%；增产率在 5% ~ 10% 的占 20.0% 和 22.5%，在 10% ~ 15% 的相应占 47.5% 和 32.5%，在 15% ~ 20% 的占 10% 和 32.5%，仅个别地点的增产率超过 20%，这一结果说明，尽管安徽省一季中稻区大多数试验施磷、施钾都有明显的增产效果，但是仍分别有 37.5% 和 35% 即超过 1/3 的地块施用磷钾肥的增产率在 10% 以下，同时磷肥的增产作用总体上低于钾肥，增产率很少能超过 15%；磷钾肥的增产效应应在一些稻田不明显，特别是在沿淮淮北砂姜黑土地地区，当前这些区域土壤有效钾、速效磷含量较高，水稻施用磷钾肥的增产作用不明显，不需要每季大量施用磷钾肥，可不施、少施或隔季施用。

2.2.2 测土施肥 ST 和农民习惯施肥 FP 的产量效应

从表 3 也可看出，当地测土配方施肥或农技部门推荐施肥 ST 处理，水稻的籽粒产量也较高，4 年 40 地试验，总体上与养分专家系统 NE 处理产量相近；以 ST 作对照，4 年试验 NE 较 ST 的增产率分别为 -9.28% ~ 2.10%、-6.03% ~ 14.96%、-4.84% ~ 6.30% 和 -5.91% ~ 11.56%，平均增产 -4.52%、-0.56%、1.26% 和 0.79%，仅后两年 NE 平均产量略高且基本持平，前两个年度还低于 ST 处理，特别是 2013 年度，减产还很明显。4 年 40 地总平均增产率为 -0.76%，基本持平。进一步分析各年度 ST 处理增产率的标准差和变异系数，可以发现，标准差较大，变异系数特别高，是所有 6 个处理中最高的，4 年分别高达 93%、1154%、367% 和 743%，表明 NE 与 ST 间水稻产量差异表现得极不稳定。统计 4 年 10 地 40 点试验 NE 对 ST 处理的增产率分布频数与频率（表 4），也可以看出，共有 25 地即 62.5% 的试验，NE 与 ST 间产量差异不到 5%，差异在 5% ~ 10% 的占 27.5%，即 90% 的试验产量差异都低于 10%，说明 NE 与 ST 处理间水稻产量差异不明显。

表 4 水稻增产率总的分布频数与频率

增产率 (%)	<5 (25)		5 ~ 10 (25 ~ 50)		10 ~ 15 (50 ~ 75)		15 ~ 20 (75 ~ 100)		>20 (100)	
	数量 (个)	频率 (%)	数量 (个)	频率 (%)	数量 (个)	频率 (%)	数量 (个)	频率 (%)	数量 (个)	频率 (%)
N 素	1	2.5	29	72.5	7	17.5	2	5.0	1	2.5
P 素	7	17.5	8	20.0	19	47.5	4	10.0	2	5.0
K 素	5	12.5	9	22.5	13	32.5	13	32.5	0	0
ST	25	62.5	11	27.5	4	10.0	0	0	0	0
FP	7	17.5	13	32.5	16	40.0	4	10.0	0	0

注：增产率分布范围，非括号内数字代表 P 素、K 素、ST 和 FP，括号内的数字仅表示 N 素增产幅度。

表3还表明, NE处理对ST的增产率, 前两年总体上表现减产而之后则为增产, 其原因可能是刚开始养分专家系统NE才引进, 需要进行更多的田间试验的验证以调整计算参数; 经过不断验证和参数调整, NE计算的氮磷钾用量组合与测土配方施肥ST的产量差异逐渐缩小并最终超越, 虽然NE的施肥量特别是氮磷用量总体上比ST低。由此可以看出, 水稻养分专家系统NE具有很好的应用效果和技术优势, 省去了繁杂的取土化验过程也能获得理想的产量。

表3也说明, 农民习惯施肥FP表现较差, 水稻籽粒产量明显低于NE和ST。4年40地试验, NE对FP的增产率分别为5.12%~14.02%、2.96%~19.36%、2.76%~13.11%和-3.31%~16.17%, 产量平均提高10.68%、9.39%、8.53%和8.69%, 总体平均产量提高9.32%, 增产效应较明显。统计分析的标准差也较小, 4年试验变异系数相对也较小。增产率分布范围(表4), 4年40地试验, 在5%~10%的占32.5%, 高达40%的点增产率达10%~15%, 而低于5%和超过15%的所占比例均较少。仅有一地试验NE产量低于FP, 其原因可能是当年这一试验所用水稻品种为粳稻, 生育期长, NE推荐的氮肥量远低于FP的缘故。总体上, 50%试验NE对FP的增产率超过10%, 说明NE较FP具有很大的增产优势, 尽管NE的施肥量特别是氮磷钾用量低于FP处理。

3. 小结

3.1 水稻养分专家系统NE氮肥投入量大幅度降低, 4年40户试验, 相较于农民习惯施肥FP和当地农技术部门推荐施肥ST, 总平均用量分别减少19.99%和13.72%。磷肥投入, NE较ST减少6.36%但比FP增加6.60%, 差异不大; 钾肥用量, NE比ST降低17.15%而

较FP增长20.78%, 总体上NE既大幅度减少氮肥用量, 同时较FP增加磷钾供应, 又较ST减少磷钾用量避免奢侈吸收, 氮磷钾养分投入比例较为合适。

3.2 水稻养分专家系统NE推荐的氮磷钾施肥量对安徽省一季中稻具有较为明显的增产效应。4年40地试验, NE较不施氮的对照增产28.14%~111.24%, 施磷产量相对提高2.33%~21.15%, 施钾增产0.17%~19.87%, 总平均增产率分别为42.45%、10.53%和11.38%, 总体上施氮的增产率很大, 部分地块施磷、施钾的增产效应也较明显, 但磷钾的增产率远低于氮, 氮磷钾的增产效应顺序为N>>K>=P。

3.3 当地农技术部门推荐施肥ST水稻产量与养分专家系统NE相近, 农民习惯施肥FP表现较差、籽粒产量明显低于NE和ST。4年40地试验, NE较ST和FP分别增产-9.28%~14.96%和-3.31%~19.36%, 总体平均产量提高-0.76%和9.32%, NE与ST产量基本持平, NE与FP相比增产效应较为明显, NE具有很好的应用效果和技术优势。

参考文献

- [1] 李录久, 王家嘉, 吴萍萍, 黄厚宽, 蒋荫锡. 秸秆还田下氮肥运筹对白土田水稻产量和氮吸收利用的影响. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(1): 254-262.
- [2] 国家统计局. 2016年全国农作物生产统计调查资料[M]. 2016.
- [3] 安徽省统计局. 安徽农村统计调查资料[M]. 2017.
- [4] 中国土壤与肥料, 2014.
- [5] 徐新朋, 魏丹, 李玉影, 等. 基于产量反应和农学效率的推荐施肥方法在东北春玉米上应用的可行性研究[J]. 植物营养与肥料学报 2016, 22(6): 1458-1467.



养分专家系统对湖北中稻产量和养分利用率的影响

刘东海 陈云峰 李双来 乔艳 张智 李武 胡诚*

(湖北省农业科学院植保土肥研究所, 农业部废弃物肥料化利用重点实验室, 农业部武汉黄棕壤生态环境重点野外科学观测试验站湖北武汉, 430064)

摘要: 为评价中稻养分专家系统 (Nutrient Expert, NE) 推荐施肥对中稻产量的效应、养分利用率的影响, 于 2013–2017 年期间在湖北省中稻上开展了 42 个试验, 并对结果进行了分析。广水市 NE 比习惯施肥 FP 施氮量减少 18.0%、磷肥量增加 23.9% 和钾肥量增加 8.9% 情况下, 中稻增产 1.4%, 差异不显著。赤壁市 NE 比习惯施肥 FP 施氮、磷和钾肥分别减少 8.8%、32.9% 和 44.1% 的情况下, 中稻增产 6.9%, 差异不显著。中稻氮、磷和钾肥平均农学效率分别为 12.5、9.5 和 1.3kg/kg, 中稻氮、磷和钾肥平均当季利用率分别为 39.8%、6.5% 和 27.9%。水稻养分专家系统推荐施肥促进了水稻对氮磷钾养分的吸收和利用, 达到增产增收效应, 氮肥利用效率也高于全国平均水平, 可在中稻种植区推广应用。

关键词: 养分专家系统 (NE), 中稻, 农学效率、养分利用率

水稻是我国种植面积最大、产量最高、氮肥用量最多的粮食作物之一, 而湖北省是我国水稻大省之一, 水稻播种面积占粮食作物总播种面积的 50% 左右, 稻谷产量占粮食总产 70% 左右 (游艾青等, 2008)。在水稻生产上由于施氮量过高, 养分管理不当, 农民施肥方式粗放, 造成了肥料的利用效率低, 肥料的流失和浪费以及农业的面源污染问题, 给环境带来危害 (张福锁等, 2000; 韩宝吉, 2011)。目前测土配方施肥是常用的施肥方法 (陈桂英, 2010; 卜容燕, 2010), 但是需要分析各种土壤养分指标, 费时费力。近年来, 一种基于作物产量反应和农学效率的农田养分专家系统 (Nutrient Expert, 以下简称 NE), 结合目标产量、土壤性质、气候条件及养分管理措施等作物生产相关信息, 在没有土壤测试值情况下, 利用 QUEFTS (quantitative evaluation of the fertility

of tropicals soils) 模型针对特定地块快速生成个性化的施肥方案 (何萍等, 2012), 已经在小麦 (贾良良等, 2017; 苏瑞光等, 2014)、玉米 (王宜伦等, 2014; 何萍等, 2014; 魏建林, 2018) 等多种作物上开展了农田养分推荐。本研究从 2013 年开始在湖北进行了多年多点的田间试验对水稻养分专家系统进行验证和改进, 旨在土壤测试不及时或条件不具备情况下建立一种简便、适用于我国小农户为经营主体的中稻推荐施肥和养分管理方法。

1 材料与方 法

1.1 试验区域概况

试验自 2013 年 5 月水稻种植季始, 连续 5 年在中稻上试验。试验地点位于湖北省广水市和赤壁市。广水市

表 1 试验区域土壤农化性质 (样本数 n=42)

试验区	特征值	有机质 (g/kg)	pH	全氮 (%)	全磷 (%)	全钾 (%)	速效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)
广水	最小值	4.02	5.49	0.38	0.04	1.41	3.59	62.93
	最大值	24.49	7.27	1.55	0.44	3.16	25.18	213.10
	平均值	14.94	6.48	1.00	0.25	1.96	13.06	138.74
	变异系数	34.40	7.85	37.37	48.79	27.12	47.62	36.07
赤壁	最小值	15.67	5.16	0.82	0.07	1.44	4.6	61.56
	最大值	40.93	8.28	2.77	0.65	1.93	21.36	249.31
	平均值	28.63	6.1	1.63	0.3	1.70	10.72	153.44
	变异系数	35.14	13.54	44.81	51.14	7.13	36.21	28.53

供试土壤类型为黄棕壤，赤壁市供试土壤类型为红壤，均是一季中稻，秸秆不还田。

表 2 两个试验点不同年份试验数量

地点 \ 时间	2013	2014	2015	2016	2017
广水	4	5	5	5	
赤壁	4	4	5	5	5

1.2 试验区土壤基本理化性状

中稻试验前取 0 ~ 20cm 耕层土壤，常规法进行理化性状分析，结果见表 1。

1.3 试验设计与方法

每季作物试验以农户为单元，每户设置 6 个处理，每个处理 30m²。处理包括：1) NE：水稻养分专家系统推荐施肥；2) NE-N：不施氮肥，磷钾肥用量同 NE 处理；3) NE-P：不施磷肥，氮钾肥用量同 NE 处理；4) NE-K：不施钾肥，氮磷肥用量同 NE 处理；5) OPTS：当地农技推广部门推荐施肥处理；6) FP：农民习惯施肥；2013 年到 2017 年共 42 户农田进行田间试验。试验前进行农户施肥情况调查，运用养分专家施肥推荐系统将各个农户的施肥情况、产量信息及生产条件进行分析，提出当地中稻推荐施肥用量。试验用氮肥为尿素（N 46.0%），磷肥为过磷酸钙（P₂O₅ 16%），钾肥为氯化钾（K₂O 60%）。所有处理的耕作、除草、病虫害防治等均按常规管理方式进行。施肥量见表 3。2013 年 5 月至 2017 年 9 月，广水供试水稻杂交品种两优 766、Y 两优 1998、II 优 1128、II 优 188、II 优 476、岗优 188 和笨两优 9 号。广水种植密度 23.1 万穴 / 公顷。磷、钾肥在播种前作基肥一次性撒施。氮肥基蘖穗肥比例：40-30-30。赤壁供试水稻杂

交品种岗优 1577、明优 98、笨两优 9 号和晶两优 534。赤壁种植密度 28.0 万穴 / 公顷。磷、钾肥在播种前作基肥一次性撒施。氮肥基蘖穗肥比例：40-30-30。水稻均在 5 月 25 号左右插秧，9 月 24 号左右收获，小区全部收获进行测产。

1.4 有关指标计算

养分积累量 (kg/ha) = [非收获物干重 (kg/ha) × 非收获物养分含量 (g/kg) + 籽粒干重 (kg/ha) × 籽粒养分含量 (g/kg)] / 1000

肥料利用率 (%) = (施肥区养分积累量 - 减素处理区养分积累量) / 施肥量 × 100

肥料农学效率 (kg/kg) = (施肥区籽粒产量 - 减素处理区籽粒产量) / 施肥量

施肥收益 (元 / ha) = 籽粒产量 × 作物籽粒价格 - 化肥成本

施肥产投比 = 施肥收益 / 化肥投入

养分表观平衡 = 施肥量 - 水稻地上部养分移走量

试验数据采用 SPSS20 和 Excel 2007 软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 推荐施肥对中稻产量的影响

从表 4 看出，在广水市和赤壁市 NE 处理中稻产量最高，分别是 8100 kg/ha 和 7425 kg/ha，比 FP 和 OPTS 处理均增产，但差别不显著；其中 NE-N 处理中稻产量最低，只有 6019 kg/ha 和 5754 kg/ha。施氮分别增产 34.6% 和 29.0%，施磷肥分别增产 15.4% 和 2.8%，施钾肥分别增产 1.7% 和 0.7%。

表 3 不同处理施肥量 (kg/ha)

处理号	广水			赤壁		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
NE	153.9±1.7	68.9±2.5	85.5±8.6	147.6±3.9	63.3±2.4	60.4±4.1
FP	187.6±4.0	55.6±2.56	78.5±8.9	161.9±4.3	94.3±6.9	108.0±3.0
OPTS	165.8±2.6	60.0±1.1	97.4±3.9	173.3±4.0	60.4±1.0	88.7±0.9

表 4 不同处理对中稻产量的影响

处理号	广水			赤壁		
	产量 (kg/ha)	与 FP 比 (%)	与 OPTS 比 (%)	产量 (kg/ha)	与 FP 比 (%)	与 OPTS 比 (%)
NE	8100 ± 330a	1.4	4.3	7425 ± 225a	6.9	1.6
NE-N	6019 ± 422c	-24.6	-22.5	5754 ± 220b	-17.1	-21.3
NE-P	7017 ± 434b	-12.1	-9.6	7224 ± 205a	4.1	-1.2
NE-K	7963 ± 364ab	-0.3	2.5	7373 ± 171a	6.2	0.9
FP	7985 ± 263ab		2.8	6943 ± 200a		-5.0
OPTS	7766 ± 321ab	-2.7		7309 ± 155a	5.3	

注：同一列数字后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平。下同。

2.2 推荐施肥对中稻经济效益的影响

从表 5 看出，NE-K 施肥收益最高，其次是 NE，NE-N 施肥收益最差。在广水市和赤壁市 NE 较 FP 分别增收 343 元 /ha 和 1884 元 /ha，NE 较 OPTS 分别增收 947 元 /ha 和 585 元 /ha。在广水市 OPTS 比 FP 欠收 604 元 /ha，而在赤壁市则增收 1299 元 /ha。基于养分专家系统推荐施肥，在广水市和赤壁市施用氮肥纯收益分别是 4546 元 / ha 和 3482 元 / ha，施用磷肥纯收益分别是 2241 元 / ha 和 -29 元 / ha，施用钾肥纯收益分别是 -221 元 / ha 和 -292 元 / ha，适量减少钾肥投入，更有利于增收。NE 产投比比 FP 和 OPTS 高。因此养分专家系统推荐施肥 (NE) 有利于增产增收。

2.3 推荐施肥对中稻氮磷钾养分积累量的影响

在广水市和赤壁市 NE 较 FP 植株氮积累量分别增

加了 6.6% 和 14.1%，植株磷积累量分别增加了 5.2% 和 17.9%，植株钾积累量分别增加了 7.8% 和 0.9%；OPTS 较 FP 植株氮积累量分别增加了 3.3% 和 17.9%，植株磷积累量分别增加了 8.2% 和 14.2%，植株钾积累量分别增加了 2.1% 和 9.2%。NE 与 OPTS 促进了中稻对氮、磷和钾素养分的吸收利用 (表 6)。

2.4 基于养分专家系统推荐施肥的肥料利用效率

广水市中稻氮、磷和钾肥平均农学效率分别为 13.6、15.7 和 1.6 kg/kg，赤壁市中稻氮、磷和钾肥平均农学效率分别为 11.3、3.2 和 0.9 kg/kg。广水市中稻氮、磷和钾肥平均当季利用率分别为 36.7%、4.9% 和 38.7%，赤壁市中稻氮、磷和钾肥平均当季利用率分别为 42.8%、8.0% 和 17.0% (表 7)。

表 5 中稻施肥的经济效益 (元 /ha)

处理号	广水			赤壁		
	施肥收益	肥料投入	产投比	施肥收益	肥料投入	产投比
NE	19054	2006	9.5	17517	1788	9.8
NE-N	14508	1141	12.7	14035	925	15.2
NE-P	16813	1431	11.8	17546	1236	14.2
NE-K	19265	1439	13.4	17809	1361	13.1
FP	18711	2050	9.1	15633	2419	6.5
OPTS	18107	2085	8.7	16932	2071	8.2

注：水稻价格 2.6 元 /kg；N、P₂O₅ 和 K₂O 价格分别为 5.65、8.33 和 6.67 元 /kg

表6 施肥对中稻养分积累量的影响 (kg/ha)

处理号	广水			赤壁		
	N	P	K	N	P	K
NE	160.4±12.4a	34.3±1.9a	224.0±23.0a	179.8±10.1a	36.6±2.1a	288.0±14.9a
NE-N	102.7±10.2b	25.2±2.1b	143.8±14.9b	116.5±8.1c	28.4±1.8b	229.4±13.2b
NE-P	134.2±13.9ab	31.0±3.1ab	176.3±19.0ab	175.6±10.6a	31.5±1.9ab	283.2±13.6a
NE-K	147.6±11.9a	33.0±2.3a	191.1±18.3ab	192.7±10.9a	36.1±2.2ab	277.8±14.3a
FP	150.4±11.0a	32.7±2.3a	207.8±21.5a	157.6±10.0b	31.0±1.7b	285.6±13.2a
OPTS	155.4±13.9a	35.3±3.0a	212.2±22.0a	185.8±10.2a	35.4±1.7ab	311.9±15.0a

表7 肥料的农学效率和当季利用率

处理号	广水		赤壁	
	农学效率 kg/kg	当季利用率 %	农学效率 kg/kg	当季利用率 %
N	13.6	36.7	11.3	42.8
P ₂ O ₅	15.7	4.9	3.2	8.0
K ₂ O	1.6	38.7	0.9	17.0

2.5 推荐施肥对中稻氮、磷、钾素平衡的影响

基于中稻秸秆未还田情况下,计算肥料投入与植株携出养分平衡状况(表8)。广水市和赤壁市NE植株氮素平均携出量分别为160.4和179.8 kg/ha,平均亏缺7.4和31.8kg/ha,而FP平均携出量分别为150.4和157.6 kg/ha,平均盈余为36.6和4.4 kg/ha,而OPTS平均携出量分别为155.4和185.8 kg/ha,平均盈余为10.6和-12.8 kg/ha。广水市和赤壁市NE、FP和OPTS植株磷素平均携出量在31.0~36.5 kg/ha,盈余为23.3~63.0 kg/ha,广水市和赤壁市NE、FP和OPTS植株钾素平均携出量在207.9~311.9 kg/ha,平均亏缺115.2~222.9 kg/ha。

3 小结与讨论

当前,高量化肥投入导致了较高土壤基础养分供应(Cui Z L et al, 2008),并对环境安全构成了潜在威胁,作物养分专家系统(NE)是基于作物产量反应和农学效

率,能够针对农田快速生成个性化的施肥方案。本试验表明,广水市中稻养分专家系统推荐施肥NE比习惯施肥FP施氮低18.0%、磷肥高23.9%和钾肥高8.9%情况下,中稻增产1.4%,差异不显著。赤壁市中稻养分专家系统推荐施肥NE比习惯施肥FP施氮、磷和钾肥分别低8.8%、32.9%和44.1%的情况下,中稻增产6.9%,差异不显著。NE虽然降低了氮肥用量,由于相应增加了磷钾肥的施用量,使农田养分供应更加均衡,促进了作物产量的提高,实现了节肥增效。在广水市和赤壁市NE较FP分别增收343元/ha和1884元/ha,无显著差异。施用氮肥纯收益分别是4546元/ha和3482元/ha,施用磷肥纯收益分别是2241元/ha和-29元/ha,施用钾肥纯收益分别是-221和-292元/ha。在广水市和赤壁市NE较FP植株氮积累量分别增加了6.6%和14.1%,植株磷积累量分别增加了5.2%和17.9%,植株钾积累量分别增加了7.8%和0.9%;基于养分专家系统推荐施肥的中稻的氮肥利用效率高于全国平均水平(张福锁等,2000),

表 8 中稻体系的养分表观平衡 (kg/ha)

处理号	施肥量			养分移走量			养分表观盈余			
	N	P	K	N	P	K	N	P	K	
广水	NE	153.9	68.9	85.5	160.4	34.4	224.0	-7.4	34.7	-139.0
	NE-N	0	68.9	85.5	102.7	25.2	143.8	-102.7	43.8	-58.8
	NE-P	153.9	0	85.5	134.2	31.0	176.3	18.8	-31.0	-91.3
	NE-K	153.9	68.9	0	147.6	33.0	191.1	5.4	36.0	-191.1
	FP	187.6	55.6	78.5	150.4	32.7	207.9	36.6	23.3	-128.9
	OPTS	165.8	60.0	97.4	155.4	35.4	212.2	10.6	24.7	-115.2
赤壁	NE	147.6	63.3	60.4	179.8	36.6	288.0	-31.8	26.5	-228.0
	NE-N	0	63.3	60.4	116.5	28.4	229.4	-116.5	34.6	-169.4
	NE-P	147.6	0	60.4	175.6	31.5	283.2	-27.6	-31.5	-223.2
	NE-K	147.6	63.3	0	192.7	36.1	277.8	-44.7	26.9	-277.8
	FP	161.9	94.3	108.0	157.6	31.0	285.6	4.4	63.0	-177.6
	OPTS	173.3	60.4	88.7	185.8	35.4	311.9	-12.8	24.6	-222.9

磷肥和钾肥利用效率低于全国平均水平,可能与试验地磷钾含量高有关。广水市和赤壁市 NE 植株氮素呈现亏缺,而 FP 植株氮素呈现盈余。广水市和赤壁市 NE、FP 和 OPTS 植株磷素呈现盈余,广水市和赤壁市 NE、FP 和 OPTS 植株钾素呈现亏缺,因此秸秆还田对培肥地力有重要意义。

参考文献:

[1] Cui Z L, Zhang F S, Chen X P, et al. On farm estimation of an in season nitrogen management strategy based on soil Nmin test [J]. Field Crops Research, 2008, 105: 48-55.

[2] 陈桂英. 建阳市水稻测土配方施肥研究与应用 [D]. 中国农业科学院, 2010.

[3] 何萍, 金继运, Mirasol F P, 等. 基于作物产量反应和农学效率的推荐施肥方法 [J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18 (2): 499-505.

[4] 何萍, 徐新朋, 仇少君, 等. 我国北方玉米施肥产量效应和经济效益分析 [J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(6):1387-

1394.

[5] 贾良良, 杨军芳, 孙彦铭, 等. 小麦养分专家系统推荐施肥对河北省冬小麦产量、养分效率和环境效应的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2017 (5):51-55.

[6] 何召阳, 姜雪, 臧磊, 等. 基于产量反应和农学效率的水稻和玉米推荐施肥方法探究 [J]. 科学种养, 2016 (8).

[7] 韩宝吉. 湖北省中稻最佳养分管理技术研究 [D]. 华中农业大学, 2011.

[8] 卜容燕, 李小坤, 鲁剑巍等. 中稻氮磷钾肥的施肥效果及推荐用量 [J]. 中国农学通报, 2010 (14).

[9] 苏瑞光, 王宜伦, 刘举, 等. 养分专家系统推荐施肥对潮土冬小麦产量及养分吸收利用的影响 [J]. 麦类作物学报, 2014, 34(1):120-125.

[10] 王宜伦, 苏瑞光, 刘举, 等. 养分专家系统推荐施肥对超高产夏玉米产量及养分吸收利用的影响 [J]. 河南农业科学, 2014 43(6): 44-48.

[11] 魏建林, 谭德水, 郑福丽, 等. 养分专家系统推荐施肥对小麦玉米产量、效益及养分平衡的影响 [J]. 山东农业科学, 2018(2): 87-92.

[12] 徐新朋. 基于产量反应和农学效率的水稻和玉米推荐施肥方法研究 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2012.

[13] 游艾青, 陈亿毅. 湖北省水稻生产发展战略思考 [J]. 湖北

农业科学, 2008, 47(11): 1361-1364.

[14] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径 [J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 915-924.



基于养分专家系统的不同施氮量对双季稻产量及养分利用效率的影响

鲁艳红^{1, 2}, 廖育林^{1, 2}, 聂军^{1, 2*}, 朱启东^{1, 2}, 周兴^{1, 2}, 程会丹^{1, 2}, 聂鑫^{1, 2}

(1. 湖南省土壤肥料研究所, 湖南长沙 410125; 2. 农业部湖南耕地保育科学观测实验站, 湖南长沙 410125)

摘要: 基于养分专家(NE)推荐系统推荐施肥方案, 采用田间试验研究不同施氮量对双季稻产量、氮、磷、钾养分吸收利用效率的影响, 探讨氮、磷、钾养分利用效率及磷钾养分吸收利用效率与氮养分吸收利用的关系。结果表明, 早、晚稻产量均表现为在一定范围内随施氮量提高而提高, 之后产量随施氮量升高而降低。本试验施氮条件下, 早稻产量最高的处理是 75%N (105 kg N/ha), 比不施肥(CK)和不施化学氮肥(N0)处理分别增产 58.1% 和 33.1%; 晚稻产量最高的为 100%N (146 kg N/ha) 处理, 比 CK 和 N0 分别增产 67.6% 和 42.1%。施氮水平对双季稻植株氮、磷、钾养分积累量有显著影响, 早、晚稻稻谷氮、磷、钾积累量均以 100%N 处理最高, 其水稻植株氮、磷、钾积累量也较高。不同施氮水平对氮、磷、钾养分利用效率也有显著影响。早晚稻植株磷、钾积累量与氮积累量之间存在极显著相关关系, 磷、钾素表现利用率及农学效率与水稻植株氮积累量也存在极显著正相关关系。综上所述, 适宜的施氮量可以增加双季稻产量, 促进水稻对氮、磷、钾养分的吸收, 同时提高双季稻的磷、钾素利用效率。在本试验条件下, 综合考虑双季稻产量效应及氮磷钾养分利用效率, 早稻施氮量 105 kg N/ha, 晚稻 146 kg N/ha 较为适宜。

关键词: 氮肥用量; 双季稻; 产量; 养分吸收利用

肥料在作物生产过程中有着无法取代的支撑作用, 被称之为作物的“粮食”。曾有学者在详细分析了 20 世纪作物生产发展的各影响因素之后得出结论: 20 世纪全世界所增加的作物产量中的一半是来自于化肥施用^[1]。同时, 施肥可以提高粮食单产 50% 以上, 总产 30%, 20 世纪 80 年代联合国粮农组织在世界各地通过大量田间试验已经验证此结论。我国化肥试验网的大量试验结果也表明, 施用化肥可提高水稻、玉米等粮食作物单产 40%–50%, 且根据其结果推算, 1986–1990 年粮食总产中有 35% 左右是来自于化肥施用的作用^[2]。国内外的经验均表明, 无论是处于什么阶段的国家, 最有效、最重要的增产措施是施肥, 特别是化肥的施用。

在越来越大的粮食需求压力下, 大量施用化肥在保障我国粮食安全中起着举足轻重的作用。但是, 随着化肥用量不断增加其增产效应呈现降低趋势, 在过去的 30 多年里, 我国化肥施用量增长了 4.5 倍, 粮食产量却只是增长了近 85%, 化肥施用量的增速与同时期粮食产量的增速相

差较大^[3]。同时, 大量和不合理施肥还带来其他不良后果, 如肥料利用率偏低、肥料损失严重、农产品品质下降、生态环境污染风险加大等, 严重威胁到农业生产效益及农业可持续发展^[1, 3–5]。尤其是氮肥的滥用是造成这些后果的主要原因^[6], 我们更应该在保障粮食安全的同时, 合理减少氮肥施用、提高氮肥利用率以减轻环境压力, 达到高产高效环保的目标。

如何调控氮肥施用量, 减少氮无效损失, 促进氮素有效吸收和利用, 同时提高作物产量, 一直是植物营养研究领域的焦点问题。在目前的条件下, 在我国耕地中每施用 1 公斤氮素可增加水稻、小麦和玉米三大粮食作物的产量在 10 kg 左右^[1]。闫湘等^[3]通过总结分析 2002–2005 年我国 19 个省的施肥调查结果和 22 个省的养分监测田间试验结果, 得出结论: 当前我国水稻的施氮量为 193.5 kg/ha, 存在氮肥施用过量的地区约占 25% ~ 40%, 而 10% ~ 25% 地区则是施用量不足。据报道, 我国谷类粮食作物氮肥利用率和农学效率远远低于同期世界水平^[3, 7]。

基金项目: 国际植物营养研究所合作项目(IPNI-Hunan); 国家重点研发计划“粮食丰产增效科技创新”重点专项(2017YFD0301504, 2018YFD03006); 湖南省农业科技创新资金项目(2018ZD02–2)。

作者简介: 鲁艳红(1974—), 女, 湖北武穴人, 博士, 副研究员, 主要从事植物营养与作物高效施肥研究。E-mail: luyanhong6376432@163.com

通讯作者: 聂军(1972—), 男, 湖南沅江人, 博士, 研究员, 主要从事植物营养与施肥原理研究。E-mail: niejun197@163.com

适宜的施氮量可以使作物增产,降低农业环境污染的风险,同时促进田间养管理平衡。了解氮、磷、钾三者作物吸收利用时相互影响的关系对于指导如何保证各种养分的平衡供应,提高化肥利用率,保证我国粮食安全,缓解环境压力有重要意义。目前,大部分研究主要集中在施氮量对粮食产量效应、氮肥利用率及对土壤氮素肥力的影响等方面,而在施氮量对作物磷、钾吸收积累及利用效率的影响上关注较少,本研究通过南方双季稻区氮肥量级试验,探讨不同施氮水平下双季稻的产量以及氮含量与磷、钾积累量及其利用率的关系,旨在为南方双季稻种植区制定高产高效的养管理策略提供科学依据。

1 材料与方

1.1 试验地点及材料

试验于2017年3月~2017年11月在湖南省长沙县高桥镇(北纬28°28'49",东经113°20'50")进行。该地处于东亚季风区,属亚热带湿润气候,海拔85m,年均气温17.2℃,日照时间1663h,年降水量1422mm。土壤类型属于河流沉积物发育而成的河沙泥。试验前采集0~20cm耕层土壤测定其基本理化性状:pH 5.4,碱解氮202mg/kg,有效磷18.4mg/kg,速效钾83.4mg/kg。供试早稻品种为常规稻湘早籼32号,晚稻品种为杂交稻深优9586。

1.2 试验设计

试验共设7个处理:1)CK(不施任何肥料);2)N0(不施氮,磷、钾肥用量同100%N处理);3)50%N(氮肥按100%N用量的50%施用,磷、钾肥用量同100%N处理);4)75%N(氮肥按100%N处理用量的75%施用,磷、钾肥用量同100%N处理);5)100%N(早稻氮肥用量140kgN/ha,磷肥用量65kgP₂O₅/ha,钾肥用量81kgK₂O/ha;晚稻氮肥用量146kgN/ha,磷肥用量68kgP₂O₅/ha,钾肥用量108kgK₂O/ha);6)125%N(氮肥按100%N处理用量的125%施用,磷、钾肥用量同100%N处理);7)150%N(氮肥按100%N处理用量的150%施用,磷、钾肥用量同100%N处理)。100%N处理的施肥量及施肥方案采用养分专家系统(Nutrient Expert System)^[8]推荐所得。施用的肥料种类氮肥为尿素,磷肥为钙镁磷肥,钾肥为氯化钾。早稻施肥处理氮肥基-穗-穗肥比例为30%-35%-35%,钾肥按照基-穗

肥比例为50%-50%;分蘖肥追肥时间为早稻移栽后第17天,穗肥追肥为早稻移栽后第42天。晚稻氮、钾肥基-穗-穗肥比例均为40%-40%-20%;分蘖肥追肥时间晚稻移栽后第7天,穗肥追肥为早稻移栽后第30天。磷肥均做基施一次性施用。其他管理与当地田间管理一致。

1.3 分析测定项目

试验开始前采集0~20cm耕层土样,用于测定土壤pH、碱解氮、有效磷、速效钾。早、晚稻成熟期各小区单打单晒称重计产。并测定稻谷和稻草氮、磷、钾含量。

1.4 计算方法[9]

稻谷氮(磷、钾)积累量(Nitrogen/phosphorus/potassium accumulation by grain, GNA, kg/ha) = 稻谷产量 × 稻谷氮(磷、钾)含量

稻草氮(磷、钾)积累量(Nitrogen/phosphorus/potassium accumulation by straw, SNA, kg/ha) = 稻草产量 × 稻草氮(磷、钾)含量

植株氮(磷、钾)总积累量(Total nitrogen/phosphorus/potassium accumulation, TNA, kg/ha) = 稻谷氮(磷、钾)积累量 + 稻草氮(磷、钾)积累量

氮肥(磷、钾肥)表观利用率(Apparent use efficiency of nitrogen/phosphorus/potassium fertilizer, ANE, %) = (施肥区作物吸氮(磷、钾)量 - 不施肥区作物吸氮(磷、钾)量) / 施肥量 × 100(注:不施肥区为CK处理,下同。)

氮肥(磷、钾肥)农学效率(Agronomic efficiency of nitrogen/phosphorus/potassium fertilizer, NAE, kg/kg) = (施肥区稻谷产量 - 不施肥区稻谷产量) / 施氮(磷、钾)肥量

氮肥(磷、钾肥)生理利用率(Physiological efficiency of nitrogen/phosphorus/potassium fertilizer, NPE, kg/kg) = (施肥区稻谷产量 - 不施肥区稻谷产量) / (施肥区地上部氮(磷、钾)积累量 - 不施肥区地上部氮(磷、钾)积累量)

1.5 数据处理与统计

数据处理及统计分析采用Microsoft Excel 2010和DPS 7.5等数据处理系统。

2 结果与分析

2.1 不同处理对双季稻产量的影响

施用氮肥对早、晚稻产量有影响作用(表1)。早稻不同处理稻谷产量表现为 75%N > 100%N > 125%N > 150%N > 50%N > N0 > CK, 在施氮量低于 75%N 时, 稻谷产量随着施氮量增加而增加; 当高于 75%N 时, 随着施氮量的增加而降低。晚稻不同处理稻谷产量 100%N > 75%N > 125%N > 150%N > 50%N > N0 > CK, 在施氮量不超过 100%N 处理时, 稻谷产量随施氮量增加而增加, 超过 100%N 后随施氮量提高稻谷产量呈降低趋势。早稻稻草产量在施氮量低于 125%N 时随施氮量增加而增加, 晚稻稻草产量随施氮量变化趋势与稻谷产量变化趋势一致; 早晚稻生物产量受施氮量影响的增、减产规律与稻谷产量相似。无论早晚稻的稻谷、稻草产量均是 CK 处

理最低, 其次为 N0 处理; 早稻季最高产量处理 75%N 比 CK 和 N0 处理分别增产 58.1% 和 33.1%, 达到显著差异水平 ($p < 0.05$); 晚稻季最高产量处理 100%N 比 CK 和 N0 分别增产 67.6% 和 42.1% ($p < 0.05$)。

2.2 不同处理对双季稻氮、磷、钾积累量的影响

2.2.1 不同处理的双季稻氮、磷、钾含量

由表2可知, 施氮提高了早、晚稻稻谷和稻草氮含量。早稻施氮处理稻谷、稻草氮含量比不施氮(CK 和 N0)处理高 13.87% 和 33.08%、11.07% 和 82.19%, 晚稻季除 150%N 处理的稻谷氮含量低于 CK 处理外, 其余各施氮处理均高于不施氮处理。施氮对双季稻吸钾能力也有一定的影响, 从表2中可以看出除早稻施氮处理稻谷钾含量与不施氮的 N0 处理无明显差异外, 早晚稻稻谷、稻草钾含量施氮处理均低于不施氮的 N0、CK 处理。施氮对

表 1 不同处理早、晚稻产量 (kg/ha)

处理	早稻			晚稻		
	稻谷产量	稻草产量	生物产量	稻谷产量	稻草产量	生物产量
CK	4250d	2207c	6458c	5093d	3331c	8425d
N0	5049cd	2605bc	7654bc	6008c	3739bc	9747c
50%N	5345bcd	3115ab	8460ab	7448b	4281ab	11729b
75%N	6718a	3335a	10053a	7759b	4752a	12510b
100%N	6560ab	3361a	9921a	8538a	5136a	13673a
125%N	6051abc	3661a	9712a	7548b	4488ab	12036b
150%N	5663abc	3372a	9035ab	7515b	4458ab	11972b

注: 差异显著性检验采用 Duncan 新复极差法, 同一列中数字后不同字母表示差异达 0.05 显著水平。下同。

表 2 不同处理早晚稻稻谷、稻草的 N、P、K 含量 (g/kg)

处理	早稻			晚稻			
	氮 (N)	磷 (P)	钾 (K)	氮 (N)	磷 (P)	钾 (K)	
稻谷	CK	11.32	3.15	8.14	9.53	2.73	6.18
	N0	10.67	3.14	6.48	8.35	2.72	6.13
	50%N	14.20	3.28	6.13	9.59	2.91	5.76
	75%N	12.89	3.22	5.47	9.62	2.56	5.50
	100%N	13.52	4.46	6.40	9.57	2.87	5.35
	125%N	14.01	4.20	5.88	10.27	2.94	5.60
	150%N	13.01	3.56	6.50	9.28	2.94	5.32
稻草	CK	5.60	2.77	39.06	5.42	1.42	42.31
	N0	5.56	2.74	39.28	5.20	1.34	38.24
	50%N	7.80	2.24	37.85	5.69	1.74	37.19
	75%N	6.22	3.03	37.47	7.34	1.53	36.11
	100%N	7.59	2.75	36.07	7.33	1.55	36.03
	125%N	8.09	2.69	35.48	7.01	1.75	37.05
	150%N	10.13	2.24	38.54	7.00	1.79	37.07

水稻磷素的影响不明显。

2.2.2 不同处理的双季稻氮、磷、钾积累量

施氮量对早、晚稻氮、磷、钾的吸收积累均产生一定影响（表3）。所有处理中早稻稻谷100%N处理氮、磷积累量最高，在施氮量低于100%时，稻谷氮、磷积累量随着施氮量的增加而增加，当施氮量超过100%N时，稻谷氮、磷积累量随施氮量增加而降低，钾虽无此规律，但早稻稻谷钾积累量仍以100%N处理最高。早稻稻草氮积累量在本试验施氮量条件下随施氮量的增加而增加，磷积累量以75%N处理最高，钾积累量以150%N处理最高。早稻植株氮、磷、钾积累量最高的处理分别为125%N、100%N和150%N处理。

晚稻稻谷氮积累量变化趋势与早稻类似，在施氮量

为100%N以下时随施氮量的提高而提高，当超过该施氮时随施氮量提高而降低。所有处理中稻谷磷、钾积累量最高均为氮积累量最高的100%N处理。晚稻稻草氮积累量随施氮量变化规律与稻谷类似，稻草氮积累量最高的100%N处理其磷、钾积累量也较高。晚稻植株氮、磷、钾积累量最高的处理均为100%N处理。这可能说明水稻吸收矿质营养元素时，氮的积累会对磷、钾元素的积累有一定的促进作用。

2.2.3 双季稻氮积累量与磷、钾素积累的关系

双季稻氮积累量对植株磷素的吸收积累有显著影响（图1）。早、晚稻植株磷积累量随着氮积累量的升高而增加，且呈极显著相关关系。

双季稻氮积累量会影响水稻对钾素的吸收积累（图

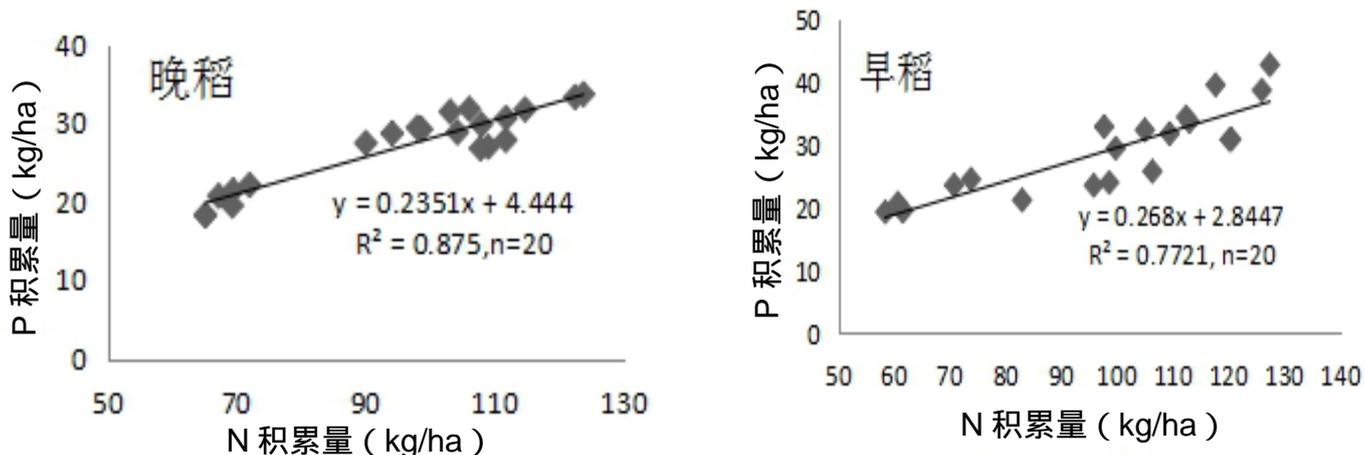


图1 早、晚稻N积累量与磷素吸收积累的关系

表3 不同处理早晚稻稻谷、稻草及植株的N、P、K积累量(kg/ha)

处理	稻谷			稻草			地上部		
	氮(N)	磷(P)	钾(K)	氮(N)	磷(P)	钾(K)	氮(N)	磷(P)	钾(K)
	早稻								
CK	48.11b	13.39e	34.60ab	12.36d	6.11b	86.22c	60.47b	19.50e	120.82c
N0	53.87b	15.85de	32.72b	14.49d	7.14b	102.34bc	68.35b	22.35de	125.89bc
50%N	75.90a	17.53cde	32.77b	24.29c	6.98b	117.89ab	100.19a	24.51de	150.66ab
75%N	86.60a	21.63bc	36.75ab	20.74c	10.11a	124.96ab	107.34a	31.74bc	161.71a
100%N	88.69a	29.26a	41.98a	25.51bc	9.24a	121.23ab	114.20a	38.50a	163.21a
125%N	84.77a	25.41ab	35.58ab	29.62ab	9.85a	129.90a	114.39a	35.26ab	165.48a
150%N	73.67a	20.16cd	36.81ab	34.16a	7.55b	129.96a	107.83a	27.71cd	166.77a
	晚稻								
CK	48.54d	13.90e	31.48d	18.06d	4.73b	140.95b	66.60e	18.64e	172.43c
N0	50.16d	16.34d	36.83c	19.44cd	4.26b	142.98b	69.61e	21.35d	179.81bc
50%N	71.42c	21.67b	42.90ab	24.36c	7.45a	159.21ab	95.78d	29.12bc	202.11abc
75%N	74.64bc	19.86c	42.67ab	34.88ab	7.27a	171.58ab	109.52b	27.13c	214.26a
100%N	81.71a	24.50a	45.68a	37.64a	7.96a	185.04a	119.35a	32.46a	230.71a
125%N	77.51ab	22.19b	42.27ab	31.46b	7.85a	166.28ab	108.98bc	30.04b	208.55ab
150%N	69.74c	22.09b	39.98bc	31.20b	7.98a	165.25ab	100.94cd	30.07b	205.22ab

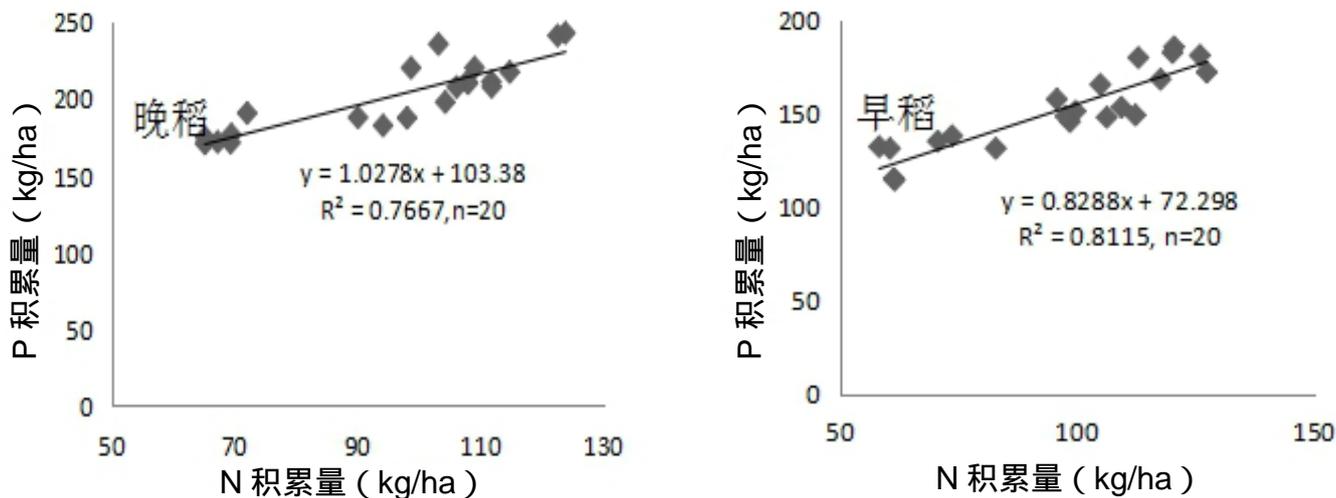


图 2 早、晚稻 N 积累量与钾素吸收积累的关系

2), 早、晚稻植株钾积累量与氮积累量存在极显著正相关。

2.3 不同处理对双季稻氮、磷、钾养分利用效率的影响

2.3.1 不同处理的双季稻氮、磷、钾利用效率

施氮对氮、磷、钾素利用效率有一定影响(表4)。早、晚稻的氮素表观利用率均随着氮肥施用量增加而降低;磷素表观利用率在早稻季是随着施氮量增加呈先升高后下降的趋势,晚稻季则无明显规律;钾素表观利用率在晚稻季也是先增加后下降,在早稻季却是随着施氮量增加而上升。早稻 100%N 处理的氮肥表观利用率与 50%N、150%N 处理差异显著 ($p < 0.05$), 晚稻 100%N 处理与 150%N 处理的氮肥表观利用率差异也显著 ($p < 0.05$)。100%N 处理的磷素表观利用率是所有处理中最高的,钾素的表现

利用率也较高。100%N 处理的两季水稻氮、磷、钾生理利用率较高。早稻氮、磷、钾肥农学效率均表现为在一定施氮量范围内先呈现随施氮量提高而上升,当超过该施氮量水平后随施氮量增加反而下降的趋势;晚稻氮肥农学效率随施氮量增加而下降,磷、钾肥农学效率与早稻表现为类似的变化趋势。早稻季氮、磷、钾肥农学效率最高的均为 75%N 处理,与 100%N 处理差异不显著 ($p > 0.05$), 75%N 氮肥农学效率与 125%N、150%N 差异均达到显著 ($p < 0.05$); 晚稻 100%N 处理的氮肥农学效率较高,与 50%N、150%N 处理差异均达显著水平 ($p < 0.05$),磷、钾肥农学效率最高的 100%N 处理与其它处理差异显著 ($p < 0.05$)。

2.3.2 双季稻氮积累量与磷、钾素利用的关系

表 4 不同处理早晚稻的氮、磷、钾肥利用效率

处理	表观利用率 RE(%)			生理利用率 PE (kg/kg)			农学效率 AE (kg/kg)		
	氮 (N)	磷 (P)	钾 (K)	氮 (N)	磷 (P)	钾 (K)	氮 (N)	磷 (P)	钾 (K)
早稻									
CK	—	—	—	—	—	—	—	—	—
N0	—	12.28% ^d	21.19% ^b	—	227.06 ^a	140.91 ^a	—	28.11 ^b	11.88 ^b
50%N	56.75% ^a	17.63% ^d	44.41% ^{ab}	26.66 ^b	212.37 ^a	52.97 ^a	15.64 ^{ab}	38.56 ^{ab}	16.29 ^{ab}
75%N	44.63% ^{ab}	43.08% ^{bc}	60.85% ^{ab}	52.13 ^a	199.82 ^a	59.81 ^a	23.50 ^a	86.89 ^a	36.72 ^a
100%N	38.37% ^b	66.89% ^a	63.09% ^{ab}	40.55 ^{ab}	114.79 ^a	54.57 ^a	16.50 ^{ab}	81.31 ^a	34.37 ^a
125%N	30.81% ^{bc}	55.49% ^{ab}	66.47% ^a	31.88 ^{ab}	109.17 ^a	41.43 ^a	10.29 ^b	63.39 ^{ab}	26.79 ^{ab}
150%N	22.55% ^c	28.91% ^{cd}	68.38% ^a	21.89 ^b	98.56 ^a	22.33 ^a	6.73 ^b	49.73 ^{ab}	21.02 ^{ab}
晚稻									
CK	—	—	—	—	—	—	—	—	—
N0	—	9.14% ^d	8.23% ^b	—	341.24 ^a	-45.65 ^a	—	30.79 ^c	10.19 ^c
50%N	39.98% ^a	35.31% ^{bc}	33.09% ^{ab}	81.66 ^a	226.56 ^b	142.06 ^a	32.25 ^a	79.27 ^b	26.25 ^b
75%N	39.20% ^a	28.61% ^c	46.63% ^{ab}	62.13 ^b	313.82 ^a	64.96 ^a	24.34 ^b	89.74 ^b	29.71 ^b
100%N	36.13% ^a	46.56% ^a	64.98% ^a	65.44 ^b	249.46 ^b	63.55 ^a	23.59 ^b	115.97 ^a	38.40 ^a
125%N	23.22% ^b	38.41% ^{ab}	40.27% ^{ab}	57.33 ^b	213.08 ^b	67.92 ^a	13.45 ^c	82.64 ^b	27.36 ^b
150%N	15.68% ^b	38.51% ^{ab}	36.56% ^{ab}	70.51 ^{ab}	211.33 ^b	107.42 ^a	11.06 ^c	81.53 ^b	26.99 ^b

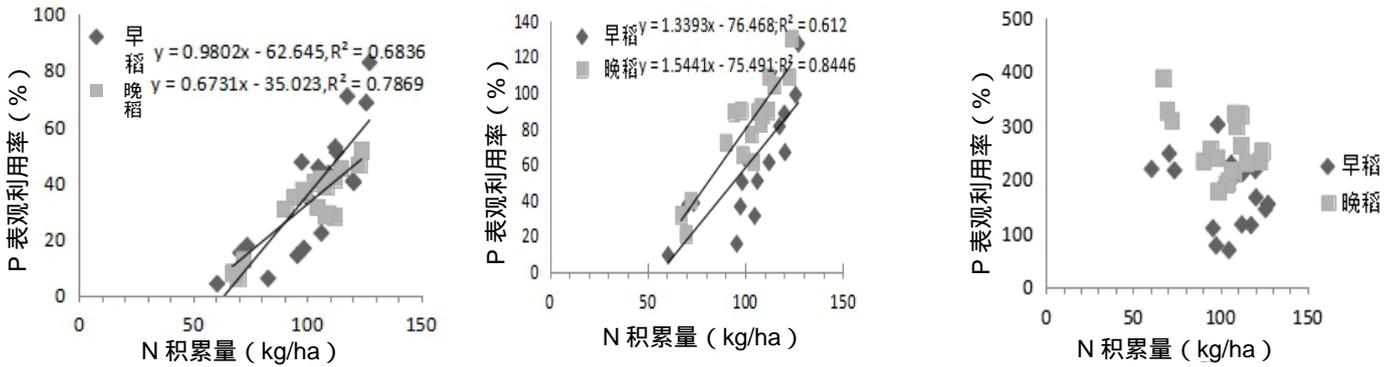


图3 氮含量与磷素利用的关系

双季稻氮积累量对磷素利用效率有不同影响(图3)。早、晚稻磷的表观利用率与水稻植株氮积累量呈正相关关系,农学效率也与氮素积累呈极显著相关性,磷素生理利用率与氮积累量的相关性不明显。

双季稻氮积累量对钾素利用效率有一定影响(图4)。双季稻钾素表观利用率与水稻氮素积累呈极显著的相关性,农学效率也与植株氮积累量呈正相关关系,生理利用率与氮素积累的相关性不明显。

3. 讨论

科学施肥是指按照作物养分的需求规律,以科学的方法合理施用化肥,使化肥资源得到充分合理的利用,以达到高产、高效农业生产和土壤生产力可持续,以及宏观调控农业生态系统的养分平衡和尽可能改善环境质量的目的。

氮肥合理施用增加双季稻产量。氮素作为水稻生长发育过程中所必需的大量元素之一,且由于“养分的不可替代性”,想要保证水稻稳产、高产,氮肥的施用必不可

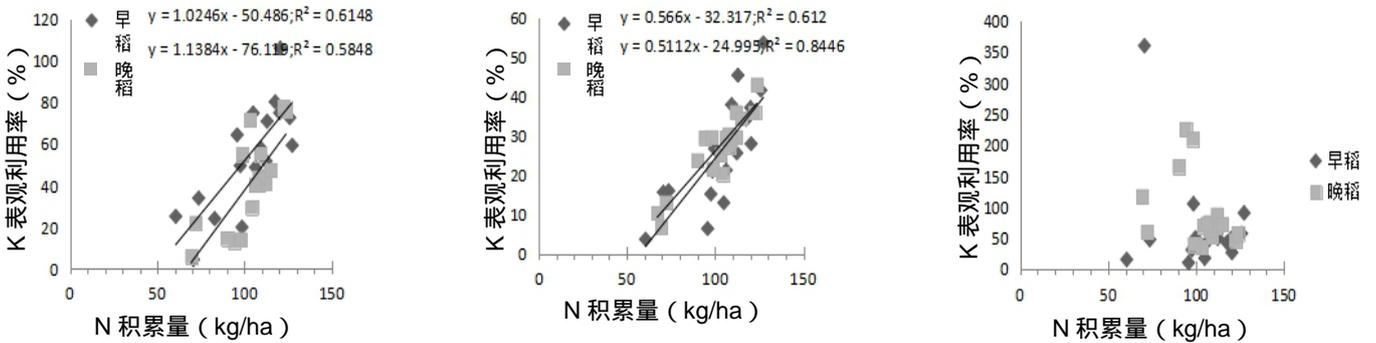


图4 氮含量与钾素利用的关系

少。施用氮肥可以显著提高水稻产量。近几年,鲁艳红等通过研究不同形态氮肥对水稻产量的影响,发现在我国南方双季稻区施用控释氮肥或尿素均可显著增加水稻产量,其中尿素增产41.9%–70.9%,控释氮肥增产45.6%–77.3%^[10]。本研究结果表明双季稻早稻施用氮肥比不施氮肥处理增产5.9%–58.1%,晚稻季增产24.0%–67.6%,这与前人研究结果相类似。合理施用氮肥在提高双季稻产量中的作用更大,我国学者在不同施氮量下,对江西省双季稻区高、中、低产田进行研究,认为随着施氮量增加,早、晚产量均呈先升高后降低的趋势,低、中、高产田获得最高产的施氮量分别为120、180、240 kg/ha^[9]。其他大量的研究也表明在当前的栽培技术和产量水平下,双季稻最适宜施氮量在120–200 kg/ha之间^[11–13],超过一定的

施氮量后,水稻产量开始下降^[14]。本文研究结果表明在双季稻早稻季,稻谷产量最佳处理为施氮量105kg/ha的75%N,晚稻稻谷产量最佳则为146 kg/ha的100%N处理,这与其他学者的研究结果相比,显得略低,原因可能是本试验所在地区稻田土壤氮素速效成分相对较高。另外本研究早、晚稻最佳产量处理不同,可能是由于本试验早、晚稻100%N处理是根据该田块连续3年的产量水平、农民施肥习惯和目标产量等调查数据,通过养分专家系统推荐所得,其得出的早稻100%N处理施氮量为140 kg N/ha,晚稻推荐施氮量146 kg N/ha,早、晚稻施氮量很接近,并且早稻使用品种为常规稻,晚稻品种为杂交稻,导致早稻季100%N处理的推荐量略有过量。

氮肥合理施用促进氮素吸收利用。如何调控土壤养分

的投入量,减少养分的无效损失,对促进养分的有效吸收与利用具有重要意义。氮素是土壤肥力中最活跃的组成部分,施用氮肥显著提高了水稻氮素吸收量,合理施氮更促进氮素向稻谷积累^[15]。王秀斌等对机插双季稻进行研究认为施氮与不施氮相比,显著增加了早、晚稻氮素积累量,增幅分别为43.7%—67.41%和63.76%—107.65%^[16]。本试验中氮素吸收量最高的施氮处理比不施氮的CK处理早稻增幅89.2%,晚稻增幅79.2%,在达到最高的增幅后,随着施氮量的增加,水稻的氮吸收量随之下降,施氮的促进作用转化为抑制作用。段云佳等也指出适宜的施氮量有利于棉花氮素的快速积累,氮肥用量过多或不足均不利于棉花生长发育,从而影响氮素的吸收^[17]。增施氮肥虽然促进了水稻氮素吸收,但是高氮水平的氮肥利用率比低氮水平处理要低。一些学者认为这主要是由于增施氮肥虽然促进了水稻营养器官中氮素向稻谷中转移,但是转移率相对降低,过多氮素滞留在营养器官中,造成植株“奢侈”吸氮,从而使氮素利用率下降^[18]。2009年Artacho等^[19]在智利地区的研究也指出,随着氮肥施用量的增加,氮肥利用率会逐渐下降。如何保证水稻尽可能地吸收氮素养分,保持稳产增产的同时,提升氮素利用效率,众多学者对此看法不一。廖育林等^[20]认为通过减少20%常规尿素与紫云英配施或者减40%控释尿素与紫云英配施可以使早稻增产并促进植株氮素吸收,从而提高氮肥利用效率和农学效率。鲁艳红等的研究表明在南方双季稻种植区,氮肥减量下添加氮素抑制剂在保证水稻稳产的同时,有利于氮素利用效率的提升及土壤氮素平衡的保持^[21]。本文的结果是氮肥合理施用可在保证双季稻稳产增产条件下,进一步地稳定、提升氮肥利用效率,如早稻产量最高的75%处理氮肥表观利用率较高,农学效率最高;晚稻100%处理产量最高,氮肥表观利用率,农学效率也处于较高水平。

氮肥合理施用促进磷、钾素吸收利用。在相同的土壤类型、水分管理及其他栽培措施条件下,养分平衡状况对养分效应高低有明显作用。当某种养分供应过量时,可能会造成其他养分的缺乏或毒害,而导致减产。比如,单施大量氮肥会破坏植物体内激素的平衡,使植物的生长受到严重影响,配合施用磷、钾肥则可使植物生长得到改善^[22]。闫湘等^[23]也提出缺乏某种养分会限制其他养分发挥作用,而保证作物生长期所需的各种养分均衡供给可以避免此种状况发生。我们试验的结果也出现了同样的现象:氮肥施用不足,双季稻氮素表观利用率虽然很高,氮、磷、钾积累量却相对较低,双季稻产量同样处于低水平状态,

这造成氮、磷、钾素利用效率不高;施氮过量,水稻氮吸收量增加,但是籽粒的氮积累却相应降低,稻草中的钾素积累偏高,产量有所下降,同样地氮、磷、钾素利用效率也下降。双季稻植株对氮、磷、钾养分吸收利用均表现出随施氮量增加而先增后降的趋势,这一特点与杂交棉^[24]、甜瓜^[25]和加工番茄^[26]的养分吸收规律相一致。氮是植物体内许多化合物的物质基础,氮素供应状况关系到植物体内各种物质及能量的转化。氮肥合理施用可以保证作物体内积累充足的氮素,使作物更好地进行各种代谢过程,进而促进对磷、钾素的吸收利用。氮、磷、钾素间的影响是相互的。王伟妮等^[27]指出当施肥量处于低、中水平时,氮、磷、钾间互作效应均表现为协同促进作用;施肥量超过一定水平后则表现为拮抗作用。本文研究结果表明,适宜施氮处理的水稻籽粒氮素积累量最高,说明施氮虽然降低了氮肥表观利用率,但合理地施用氮肥可以促使双季稻中的氮素向稻谷转运;而经过相关性分析,表明双季稻氮积累与磷、钾积累量均呈极显著正相关关系,磷、钾积累量均随着氮积累量的增加而增加。由此可以推测,氮肥合理施用可促进双季稻对氮、磷、钾的吸收并使其向籽粒积累,从而增加双季稻产量。

4. 结论

合理施用氮肥可增加双季稻产量,施氮过量或不足均可能导致双季稻不同程度的减产,综合考虑养分专家系统推荐所得及其他因素影响:本试验条件下,为保证水稻达到稳产、高产目的,早稻施氮量105 kg N/ha,晚稻施氮146 kg N/ha较为适宜,在该施氮条件下,双季稻氮、磷、钾积累量和利用效率均处于较高或最高水平。然而,本研究只是针对施氮量对双季稻产量,氮、磷、钾养分吸收积累量及氮、磷、钾养分利用效率的部分组成参数进行分析研究,明确施氮量对双季稻磷、钾利用的关系还需对施氮量与养分利用效率其它各参数的关系进行更深的研究。

参考文献

- [1] 朱兆良,金继运.保障我国粮食安全的肥料问题[J].植物营养与肥料学报,2013,19(2):259-273.
- [2] 金继运,林葆.化肥在农业生产中的作用和展望[J].作物杂志,1997,(2):5-9.
- [3] 闫湘,金继运,梁鸣早.我国主要粮食作物化肥增产效应与肥料利用效率[J].土壤,2017,49(6):1067-1077.

- [4] 白由路. 我国肥料发展若干问题的思考[J]. 中国农业信息, 2014, (22):5-9
- [5] 金继运. 我国肥料资源利用中存在的问题及对策建议[J]. 中国农技推广, 2005, (11):4-6.
- [6] 蔡祖聪, 颜晓元, 朱兆良. 立足于解决高投入条件下的氮污染问题[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(1):1-6.
- [7] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报, 2008, 45(5):915-924.
- [8] 何萍, 金继运, Pampolino, 等. 基于作物产量反应和农学效率的推荐施肥方法[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(2):499-505.
- [9] 鲁艳红, 廖育林, 汤海涛, 等. 不同施氮量对水稻产量、氮素吸收及利用效率的影响[J]. 农业现代化研究, 2010, 31(4):479-483.
- [10] 鲁艳红, 聂军, 廖育林, 等. 不同控释氮肥减量施用对双季水稻产量和氮素利用的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(2):155-161.
- [11] 王秀斌, 徐新朋, 孙刚, 等. 氮肥用量对双季稻产量和氮肥利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报 2013, 19(6):1279-1286.
- [12] 侯云鹏, 杨建, 李前, 等. 施氮对水稻产量、氮素利用及土壤无机氮积累的影响[J]. 土壤通报, 2016, 47(1):118-124.
- [13] 刘桃菊, 朱冰, 江绍琳, 等. 施氮量对双季稻氮素吸收和产量的影响及其优化[J]. 浙江农业学报, 2014, 26(4):1004-1009.
- [14] Aslam M M, Zeeshan M, Irum A, et al. Influence of seedling age and nitrogen rates on productivity of rice: A review[J]. American Journal of Plant Sciences, 2015, 6(9):1361-1369.
- [15] 郭晨, 徐正伟, 李小坤, 等. 不同施氮处理对水稻产量、氮素吸收及利用率的影响[J]. 土壤, 2014, 46(4):618-622.
- [16] 王秀斌, 徐新朋, 孙静文, 等. 氮肥运筹对机插双季稻产量、氮肥利用率及经济效益的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(5):1167-1176.
- [17] 段云佳, 谭玲, 张巨松, 等. 施氮量对枣棉间作系统棉花干物质和氮素积累的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(6):1441-1448.
- [18] 叶全宝, 张洪程, 魏海燕, 等. 不同土壤及氮肥条件下水稻氮利用效率和增产效应研究[J]. 作物学报, 2005, 31(11):1422-1428.
- [19] Pamela Artacho, Claudia Bonomelli, Francisco Meza. Nitrogen application in irrigated rice grown in Mediterranean conditions: Effects on grain yield, dry matter production, nitrogen uptake, and nitrogen use efficiency[J]. Journal of Plant Nutrition, 2009, 32(9):1574-1593.
- [20] 廖育林, 鲁艳红, 谢坚, 等. 紫云英配施控释氮肥对早稻产量及氮素吸收利用的影响[J]. 水土保持学报 2015, 29(3):190-195.
- [21] 鲁艳红, 汤文光. 氮素抑制剂对双季稻产量、氮素利用效率及土壤氮平衡的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(1):95-104.
- [22] 陆景陵. 植物营养学(上)(第2版)[M]. 中国农业大学出版社, 2003.
- [23] 闫湘, 金继运, 何萍, 等. 提高肥料利用率技术研究进展[J]. 中国农业科学, 2008, 41(2):450-459.
- [24] 李伶俐, 房卫平, 马宗斌, 等. 施氮量对杂交棉氮、磷、钾吸收利用和产量及品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(3):663-667
- [25] 胡国智, 冯炯鑫, 张炎, 等. 不同施氮量对甜瓜养分吸收、分配、利用及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(3):760-766.
- [26] 汤明尧, 张炎, 胡伟, 等. 不同施氮水平对加工番茄养分吸收、分配及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(5):1238-1245.
- [27] 王伟妮, 鲁剑巍, 何予卿, 等. 氮、磷、钾肥对水稻产量、品质及养分吸收利用的影响[J]. 中国水稻科学, 2011, 25(6):645-653.

养分专家系统对江西双季稻产量和养分利用率的影响¹

柳开楼¹, 李大明¹, 吴昌强¹, 万国¹, 胡惠文¹, 余喜初^{1*}, 杨富强², 叶会财¹

(1 江西省红壤研究所 / 江西省红壤耕地保育重点实验室 / 国家红壤改良工程技术研究中心, 南昌, 330046; 2 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京, 100081)

摘要: 为合理评估养分专家系统 (NE) 在双季稻区的化肥减施效果, 本研究于 2014–2016 年在江西省进贤县开展了 3 年 6 季的田间试验, 并分析了 NE 系统与农民习惯处理 (FP)、当地农技部门的测土配方推荐施肥处理 (ST) 下水稻产量、氮磷钾养分吸收量、化肥施用量和肥料偏生产力变化。结果表明: 1) 与 FP 和 ST 相比, NE 处理可以显著提高早晚稻的籽粒产量 (除了 2014 年), 2015 和 2016 年, NE 处理的早晚稻产量分别增加了 15.17%–32.74% 和 14.33%–19.25%。2) NE 处理可以显著促进双季稻对氮磷钾养分的吸收 (除了 2014 年), 在 2015 和 2016 年, NE 处理的早晚稻氮素吸收量分别比 FP 处理增加了 25.16%–33.21% 和 22.09%–26.82%; 磷素吸收量增加了 27.45%–29.57% 和 27.02%–38.60%, 钾素吸收量增加了 16.59%–22.34% 和 14.24%–16.21%。3) 与 FP 处理相比, 3 年间 NE 处理的早稻季和晚稻季氮肥用量分别减少 24.86%–29.15% 和 28.15%–34.43%; 磷肥用量分别减少 15.97%–37.05% 和 31.72%–44.75%, 钾肥用量分别减少 60.35%–66.22% 和 72.29%–74.02%。4) 与 FP 处理相比, 3 年间 NE 处理的早、晚稻氮肥偏生产力分别提高了 53.26%–83.41% 和 48.77%–81.86%; 磷肥偏生产力分别增加了 57.97%–76.31% 和 66.24%–115.83%, 钾肥偏生产力分别增加了 113.25%–156.13% 和 160.88%–206.00%。因此, NE 系统可以在双季稻区实现化肥减施增效的目标, 且当氮磷钾肥的偏生产力增加 1kg/kg 时, 氮磷钾的盈余量分别降低 2.62、0.19 和 1.46kg/ha。

关键词: 养分专家系统, 双季稻, 化肥减施增效, 偏生产力

水稻尤其双季稻在我国粮食生产上占据重要地位^[1–2]。据统计, 我国南方双季稻区水稻种植面积和产量占全国水稻种植面积和总产量的 40% 左右, 是我国重要的水稻生产区域^[3–4], 但是, 由于高产品种的养分需求和稻农知识水平不高等因素的影响, 该地区的双季稻种植普遍存在化肥施用不合理和肥料利用率偏低等现象, 进而导致双季稻收益下降, 从而严重阻挫了稻农种植双季稻的积极性^[5–6]。

化肥是重要的农业生产资料, 是粮食的“粮食”。自新中国成立以来, 化肥在促进我国粮食和农业生产发展中起了不可替代的作用^[7]。有研究表明, 虽然双季稻区 (江西、湖南等) 的化肥施用量明显低于稻麦轮作种植区 (江苏、浙江等发达省份), 但也存在化肥过量施用、盲目施用、种类搭配不合理等问题, 其化肥总体利用率也不高^[8–10]。以双季稻区的江西省为例, 调查资料显示, 其化肥施用量与全国趋势基本一致, 2011 年氮、磷、钾、复合

肥消费量比 1995 年消费量分别增长了 42.1%、87.9%、141.8% 和 204.2%; 化肥消费结构以氮肥和复合肥为主。其中, 早稻季氮磷钾肥的施用量分别为 197.93kg/ha、93.34kg/ha、117.41kg/ha, 晚稻季氮磷钾肥用量则分别为 226.49kg/ha、84.96kg/ha 和 100.3kg/ha^[10–12]。但是, 在该区域的所有稻农中, 仅有 15% 的农户可以实现高产和氮肥的高效利用^[10]。因此, 研究如何提高双季稻区的化肥利用率就显得非常重要。

科学的推荐施肥方法是实现水稻高产高效生产的重要技术措施, 长期以来, 国内外围绕科学施肥研究提出了很多推荐施肥方法, 比如以土壤测试为基础的测土配方施肥技术, 该技术在双季稻区的大面积示范推广基本实现了平衡施肥, 提高了化肥利用率, 维持了水稻高产稳产^[13–15]。但是, 由于土壤测试耗时耗力、周期性较长, 且某些土壤速效养分不稳定、其与水稻需肥量和产量相关性不强

基金项目: 国家重点研发计划“肥料养分推荐方法与限量标准”(2016YFD0200101); 国家重点研发计划“粮食丰产增效科技创新”重点专项(2016YFD0300901); 公益性行业(农业)科研专项经费资助(201503122)。

作者简介: 柳开楼(1984—), 男, 河南滑县人, 博士研究生, 助理研究员, 主要从事土壤肥料方面的研究。手机: 15070822925, Email: liukailou@163.com。

* 通讯联系人: 余喜初, E-mail: yxchu@163.com。

等问题^[16-17]，影响了测土配方施肥技术的进一步推广。再加上我国的农业主要以农户经营为主体^[18]，复种指数高，作物种植茬口紧，依据土壤测试指导施肥存在测试推荐不及时和成本高等难题。因此，研究开发适应我国国情的推荐施肥技术就显得十分迫切。

中国农业科学院农业资源与农业区划研究所与国际植物营养研究所合作研创了小麦、玉米和水稻等主要作物基于产量反应和农学效率的推荐施肥方法^[18-20]。同时结合计算机技术，建立问答式界面，把复杂的施肥原理简化为农技推广部门和农民方便使用的养分专家系统（Nutrient Expert），简称 NE 系统^[21]。NE 系统可以通过了解过去 3 至 5 年的产量水平和施肥历史完成施肥推荐，其既适合指导农户，也适合大面积区域推荐施肥^[21]。前期的大量研究已经表明，该方法可以同时实现小麦玉米等作物的高产和化肥减施目标^[18-24]。但是，在双季稻区，关于 NE 系统下水稻的产量和养分吸收变化还有待进一步研究，且对 NE 系统的化肥减施效果还缺乏有效评估^[16,25]。因此，本研究拟以 NE 系统为切入点，结合农民习惯施肥和当地农技部门推荐施肥，于 2014-2016 年开展了 3 年 6 季的田间试验，并通过分析不同处理的水稻产量、氮磷钾养分吸收量、化肥施用量和肥料偏生产力变化，从而为该地区的化肥减施增效提供理论和技术支撑。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

2014-2016 年，本研究在江西省进贤县开展了 3 年 6 季的田间试验，该地处中亚热带，年均气温 18.1℃，≥ 10℃ 积温 6480℃，年降雨量 1537 mm，年蒸发量 1150 mm，无霜期约为 289d，年日照时数 1950h。试验地分别位于进贤县张公镇马家村（116° 10' 48.04" E，28° 21' 18.54" N）、颜家村（116° 9' 23.22" E，28° 21' 56.37" N）

和温圳镇何家村（116° 6' 12.93" E，28° 20' 14.98" N），其中马家村为 3 块田，颜家村和何家村各 2 块田。试验地土壤均为红壤性水稻土，成土母质为第四纪红粘土。2014 年试验开始前耕层土壤肥力情况见表 1。

1.2 试验设计

试验处理分别为：FP：农民习惯施肥处理；ST：当地农技部门推荐的测土配方施肥处理；NE：基于 NE 系统的推荐施肥处理。小区面积 60 m²，1 次重复。

FP 处理的施肥量来源于农户调查，肥料运筹为：磷肥全部作为基肥，氮肥 40% 做基肥，60% 做分蘖肥施用。钾肥 50% 做基肥，50% 做分蘖肥施用。ST 处理的施肥量来源于当地农技站，肥料运筹与 FP 一致。NE 处理的施肥量来源于 NE 系统，NE 系统的原理是，用不施肥区的养分吸收或产量水平表征土壤基础肥力，即地块施肥后作物产量反应越小，则土壤基础肥力越高，肥料推荐量越低；反之则肥料推荐量越高。该方法在汇总过去十几年全国范围的水稻肥料田间试验的基础上，建立了基于产量反应和农学效率的推荐施肥模型。此外，NE 系统还基于 4R 的养分管理原则，推荐合适的肥料品种和适宜的肥料用量，以及合适的施肥时间和恰当的施肥位置。具体方法见文献^[22]，每季开始前，NE 处理的施肥量均要根据上季的产量反应等数据进行调整和优化。NE、NE-N、NE-P 和 NE-K 处理的肥料运筹为：磷肥全部作为基肥，氮肥 40% 做基肥，30% 做分蘖肥，30% 做穗肥施用。钾肥 50% 做基肥，50% 做分蘖肥施用。氮磷钾的肥料种类为尿素（N 为 46.2%）、钙镁磷肥（P₂O₅ 为 12.5%）和氯化钾（K₂O 为 60%）。种植制度为早稻-晚稻-冬闲。稻田病虫害按当地习惯采用农药进行防治。

1.3 测定指标

1) 水稻产量：在早晚稻成熟期每个小区实打实收，

表 1 试验前土壤肥力情况

地点	pH	有机质 %	全 N g/kg	全 P g/kg	全 K g/kg	碱解氮 mg/kg	有效磷 mg/kg	速效钾 mg/kg
马家 1	5.33	2.12	1.45	0.73	11.59	119.41	44.55	100.80
马家 2	5.12	2.21	1.57	0.82	11.46	153.20	61.70	143.70
马家 3	4.93	2.51	1.51	0.76	12.77	107.24	21.00	76.16
颜家 1	5.49	1.67	2.11	0.58	11.18	132.21	35.85	71.67
颜家 2	5.26	1.77	2.14	0.82	11.11	118.15	33.25	49.84
何家 1	5.14	2.02	2.47	1.17	11.11	108.92	66.00	60.33
何家 2	5.13	1.68	2.04	0.69	11.93	119.41	49.15	53.77



晒干称重，从而获得实际产量。

2) 氮磷钾养分吸收量：在早晚稻成熟期每个小区采集 5 穴植株样品，带回室内分成籽粒和秸秆，烘干称重，研磨后测定籽粒和秸秆中的氮磷钾含量，氮磷钾含量的测定方法分别为凯氏定氮法、钼锑抗比色法和火焰分光光度计法^[26]。并根据籽粒和秸秆的干物质计算氮磷钾养分吸收量。具体公式如下：

$$Nuptake = Grain \times N_{Grain} + Straw \times N_{Straw} \quad (1)$$

$$Puptake = Grain \times P_{Grain} + Straw \times P_{Straw} \quad (2)$$

$$Kuptake = Grain \times K_{Grain} + Straw \times K_{Straw} \quad (3)$$

式 (1) - (3) 中，Nuptake、Puptake 和 Kuptake 分别为水稻 N、P 和 K 养分吸收量 (kg/ha)，Grain 和 Straw 分别为水稻籽粒和秸秆干物质 (kg/ha)，Ngrain、Pgrain 和 Kgrain 分别为水稻籽粒 N、P 和 K 含量 (%)，NStraw、PStraw 和 KStraw 分别为水稻秸秆 N、P 和 K 含量 (%)。

3) 化肥偏生产力：计算公式如下：

$$PFP - N = \frac{Yield}{Amount - N} \quad (4)$$

$$PFP - P = \frac{Yield}{Amount - P} \quad (5)$$

$$PFP - K = \frac{Yield}{Amount - K} \quad (6)$$

式 (4) - (6) 中，PFP-N、PFP-P 和 PFP-K 分别为 N、P₂O₅ 和 K₂O 肥料的偏生产力 (kg/kg)，Yield 分别为水稻籽粒产量 (kg/ha)，Amount-N、Amount-P 和 Amount-K 分别为 N、P₂O₅ 和 K₂O 的施用量 (kg/ha)。

4) 养分平衡：计算公式如下：

$$N_{balance} = N_{input} - N_{uptake} \quad (7)$$

$$P_{balance} = P_{input} - P_{uptake} \quad (8)$$

$$K_{balance} = K_{input} - K_{uptake} \quad (9)$$

式 (7) - (9) 中，N_{balance}、P_{balance} 和 K_{balance} 分别为 N、P 和 K 的养分平衡 (kg/ha)，N_{input}、P_{input} 和 K_{input} 分别为 N、P 和 K 的投入量 (kg/ha)，N_{uptake}、P_{uptake} 和 K_{uptake} 分别为水稻 N、P 和 K 吸收量 (kg/ha)，本研究主要考虑肥料投入，忽略了降水、灌溉等的投入。

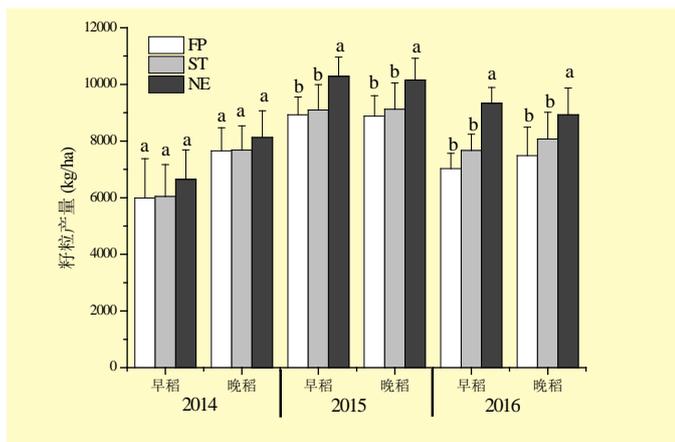
所有数据均采用 Excel 2003 进行处理，统计分析采

用 SPSS 16.0 软件进行, 差异显著性检验采用最小显著差法 (Fisher's LSD) 于 $P < 0.05$ 水平上进行, 图件采用 Origin 8.1 软件完成。

2 结果分析

2.1 双季稻籽粒产量

在 2014–2016 年间, 3 年 6 季的水稻产量波动较大 (图 1), 除了 2014 年早稻产量低于晚稻之外, 2015 和 2016 年的早晚稻产量则不存在显著差异。与 FP 和 ST 相比, NE 处理可以显著提高早晚稻的籽粒产量 (2014 年除外), 但 FP 和 ST 处理间不存在显著差异 (图 1)。在 2014 年, 虽然 NE 处理的早晚稻产量高于 FP 和 ST 处理, 但差异不显著。与 FP 处理相比, 在 2015 和 2016 年 NE 处理的早稻产量分别增加了 15.17% 和 32.74%, 晚稻产量增加 14.33% 和 19.25%。与 ST 处理相比, 2015 和 2016 年早稻季 NE 处理的增幅为 13.04% 和 21.74%, 晚稻季的增幅为 11.26% 和 10.54%。且 2015 和 2016 年的 NE 处理的增



产结果均呈现出早稻季的增幅高于晚稻季。

注: 同一年份同一种植季柱上不同小写字母表示差异显著 ($p < 0.05$)。下同。

图 1 不同处理早晚稻产量变化

2.2 双季稻氮磷钾养分吸收量

与产量的结果相似, 3 年 6 季中氮磷钾素的养分吸收也呈现出 2014 年晚稻季高于早稻季, 但 2015 和 2016 年则不存在显著差异 (表 2)。在不同处理间, NE 处理可以显著促进双季稻对氮磷钾素养分的吸收 (除了 2014 年), 2015 和 2016 年 NE 处理的早晚稻养分吸收量均显著高于 FP 和 ST 处理。对于氮素吸收量, 早稻季 NE 处理分别比 FP 处理增加了 33.21% 和 25.16%, 晚稻季的增幅为 26.82% 和 22.09%; 磷素吸收量和钾素吸收量也呈现出相似的规律, 与 FP 处理相比, NE 处理在早晚稻的磷素吸收量增加了 27.45%–29.57% 和 27.02%–38.60%, 钾素吸收量增加了 16.59%–22.34% 和 14.24%–16.21%。但是, 与 NE 处理的增产结果不同, 养分吸收量则呈现出氮素为早稻高于晚稻, 而磷钾则为早稻低于晚稻。

2.3 双季稻化肥减施潜力分析

在本研究中, FP 和 ST 的化肥施用量在 3 年 6 季均相同, 而 NE 处理则由于每季均会根据上季的结果进行调整和优化, 所以其化肥施用量每季均不同。图 2 显示, NE 系统可以显著降低氮磷钾肥的施用量。与 FP 处理相比, 在 2014、2015 和 2016 年 NE 处理的早稻季氮肥 (N) 用量分别降低了 29.15%、24.86% 和 27.63%, 晚稻季分别降低 28.63%、28.15% 和 34.43%; 早晚稻磷肥 (P_2O_5)

表 2 不同处理早晚稻养分吸收量 (kg/ha) 变化

养分	处理	2014		2015		2016	
		早稻	晚稻	早稻	晚稻	早稻	晚稻
N	FP	95.78 ± 23.07a	120.24 ± 17.99a	104.78 ± 15.41b	115.42 ± 10.37b	99.93 ± 12.05b	115.78 ± 14.59b
	ST	107.88 ± 23.26a	102.60 ± 14.71a	113.20 ± 24.04ab	124.57 ± 22.28ab	110.99 ± 24.08ab	133.52 ± 10.94a
	NE	117.28 ± 16.35a	135.51 ± 29.52a	139.58 ± 31.38a	146.37 ± 29.67a	125.07 ± 19.47a	141.35 ± 31.85a
P	FP	21.92 ± 4.72a	43.52 ± 6.54a	32.06 ± 2.56b	32.35 ± 3.27b	36.36 ± 4.90b	31.61 ± 8.47b
	ST	31.49 ± 7.49a	27.65 ± 8.55a	37.01 ± 8.28ab	37.18 ± 7.90ab	44.63 ± 8.63a	33.98 ± 6.50b
	NE	32.70 ± 11.49a	29.00 ± 6.24a	40.86 ± 14.58a	41.09 ± 7.98a	47.11 ± 10.59a	43.81 ± 6.68a
K	FP	153.50 ± 43.28a	162.78 ± 40.41a	141.34 ± 15.31b	172.16 ± 16.92b	153.48 ± 15.87b	169.97 ± 12.55b
	ST	199.32 ± 64.22a	160.14 ± 33.66a	151.42 ± 16.50ab	185.49 ± 20.05ab	175.09 ± 24.13ab	184.18 ± 21.38ab
	NE	169.30 ± 63.11a	174.62 ± 47.43a	164.79 ± 12.11a	196.67 ± 18.14a	187.78 ± 21.18a	197.52 ± 42.01a

注: 同一年份同一种植季同一养分下不同处理数据后不同小写字母表示差异显著 ($p < 0.05$), 下表同。氮磷钾养分含量指 N、P 和 K 的含量。

的降幅分别为 15.97%–37.05% 和 31.72%–44.75%，钾肥 (K₂O) 的降幅分别为 60.35%–66.22% 和 72.29%–74.02%。且 NE 处理的氮磷钾肥也明显低于 ST 处理，但

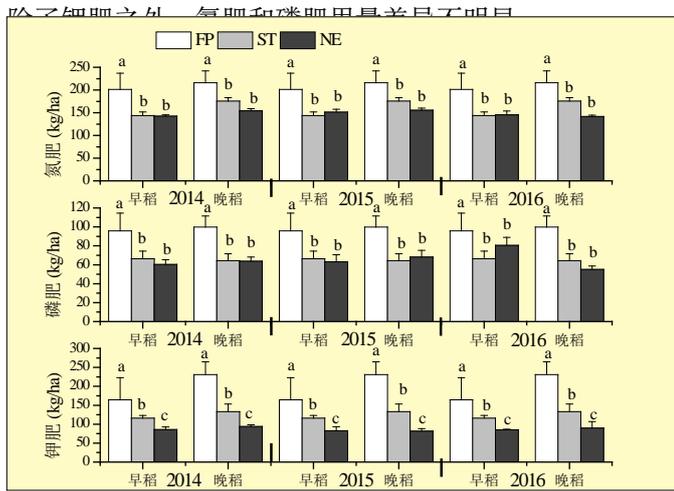


图 2 不同处理早晚稻化肥施用量变化

注：氮磷钾肥施用量指 N、P₂O₅ 和 K₂O 的用量。

2.4 双季稻氮磷钾肥偏生产力

在双季稻区，3 年 6 季中 NE 处理下氮磷钾肥的偏生产力分别为 59.97kg/kg、137.91kg/kg 和 101.26kg/kg (表 3)，显著高于 FP (36.71 kg/kg、78.32 kg/kg 和 39.60 kg/kg) 和 ST 处理 (50.07 kg/kg、121.72 kg/kg 和 64.06 kg/kg)。对于氮肥 (N) 偏生产力，在 2014、2015 和 2016 年 NE 处理的早稻季分别比 FP 提高了 56.65%、53.26% 和 83.41%，晚稻季的增幅分别为 48.77%、59.12% 和 81.86%；磷肥 (P₂O₅) 和钾肥 (K₂O) 偏生产力也呈现出相似的规律，与 FP 相比，3 年间早晚稻季 NE 处理的磷肥 (P₂O₅) 偏生产力分别增加了 57.97%–76.31% 和 66.24%–115.83%，钾肥 (K₂O) 偏生产力分别增加了 113.25%–156.13% 和 160.88%–206.00%。

2.5 双季稻的养分平衡及其与化肥偏生产力的关系

不同施肥处理可以显著影响早晚稻的养分平衡，在 2014–2016 年，氮磷养分基本上均为盈余状态。对于氮素

表 3 不同处理早晚稻化肥偏生产力 (kg/kg) 变化

养分	处理	2014		2015		2016	
		早稻	晚稻	早稻	晚稻	早稻	晚稻
N	FP	29.77 ± 6.90b	35.41 ± 3.77b	44.38 ± 3.12b	41.09 ± 3.33c	34.95 ± 2.65c	34.63 ± 4.66c
	ST	42.12 ± 7.82a	43.70 ± 4.89ab	63.35 ± 6.24a	51.93 ± 5.28b	53.40 ± 4.02b	45.95 ± 5.36b
	NE	46.64 ± 7.29a	52.68 ± 6.10a	68.02 ± 4.52a	65.38 ± 4.96a	64.11 ± 3.85a	62.98 ± 6.66a
P	FP	62.57 ± 14.50b	76.67 ± 8.16b	93.27 ± 6.56c	88.97 ± 7.22b	73.46 ± 5.57	74.99 ± 10.10c
	ST	91.03 ± 16.91ab	119.44 ± 13.36a	136.92 ± 13.48b	141.94 ± 14.43a	115.41 ± 8.68	125.60 ± 14.64b
	NE	110.32 ± 17.25a	127.46 ± 14.75a	162.82 ± 10.82a	148.98 ± 11.31a	116.04 ± 6.97	161.85 ± 17.10a
K	FP	36.45 ± 8.45c	33.13 ± 3.53c	54.34 ± 3.82c	38.45 ± 3.12c	42.80 ± 3.25	32.41 ± 4.37c
	ST	52.26 ± 9.71b	57.79 ± 6.46b	78.60 ± 7.74b	68.68 ± 6.98b	66.25 ± 4.98	60.77 ± 7.08b
	NE	77.74 ± 12.16a	86.44 ± 10.01a	124.08 ± 8.25a	110.52 ± 8.39a	109.61 ± 6.58	99.16 ± 10.48a

注：氮磷钾肥的偏生产力指 N、P₂O₅ 和 K₂O 的偏生产力。

表 4 不同处理早晚稻的养分平衡 (kg/ha)

养分	处理	2014		2015		2016	
		早稻	晚稻	早稻	晚稻	早稻	晚稻
N	FP	105.36 ± 12.86a	95.87 ± 17.90a	106.36 ± 20.51a	100.70 ± 25.53a	81.21 ± 13.87a	76.34 ± 1.31a
	ST	35.69 ± 15.24b	73.11 ± 7.39a	20.37 ± 16.02b	51.14 ± 14.96b	-37.41 ± 16.06c	42.20 ± 3.62b
	NE	25.22 ± 13.57b	18.74 ± 5.15b	21.56 ± 4.86b	8.92 ± 4.78c	20.50 ± 11.46b	0.36 ± 0.12c
P	FP	73.79 ± 14.22a	56.28 ± 5.17a	73.66 ± 16.37a	57.45 ± 8.43a	69.36 ± 14.04a	52.19 ± 3.24a
	ST	34.94 ± 10.53b	36.64 ± 1.24b	29.42 ± 0.26b	27.11 ± 0.58b	21.79 ± 4.62b	26.30 ± 0.82b
	NE	27.55 ± 6.34b	34.75 ± 1.80b	32.28 ± 7.13b	37.05 ± 0.83b	43.32 ± 2.07a	21.34 ± 3.11b
K	FP	10.78 ± 5.41a	18.17 ± 6.81a	12.95 ± 3.37a	-1.21 ± 0.31a	10.80 ± 5.81a	20.97 ± 1.06a
	ST	-83.61 ± 56.90b	-27.29 ± 13.48b	-135.70 ± 59.18b	-62.63 ± 19.87b	-189.37 ± 66.81b	-51.32 ± 10.20b
	NE	-113.80 ± 55.76b	-170.62 ± 43.03c	-101.93 ± 31.78b	-124.82 ± 31.59c	-102.63 ± 39.72b	-127.52 ± 25.01c

注：氮磷钾养分平衡指 N、P 和 K 的平衡。

平衡, NE 和 ST 处理的盈余量均显著低于 FP 处理, 且 NE 处理表现最低。磷平衡也表现出相似的规律。而钾素则除了 FP 为盈余之外, ST 和 NE 均为亏缺。

通过肥料偏生产力与养分平衡的量化关系 (图 3) 发

现, 氮磷钾的养分平衡量均随着肥料偏生产力的增加而降低, 且均可以用线性方程进行拟合。拟合方程表明, 当氮磷钾肥的偏生产力增加 1kg/kg 时, 氮磷钾素的盈余量分别降低 2.62、0.19 和 1.46kg/ha。

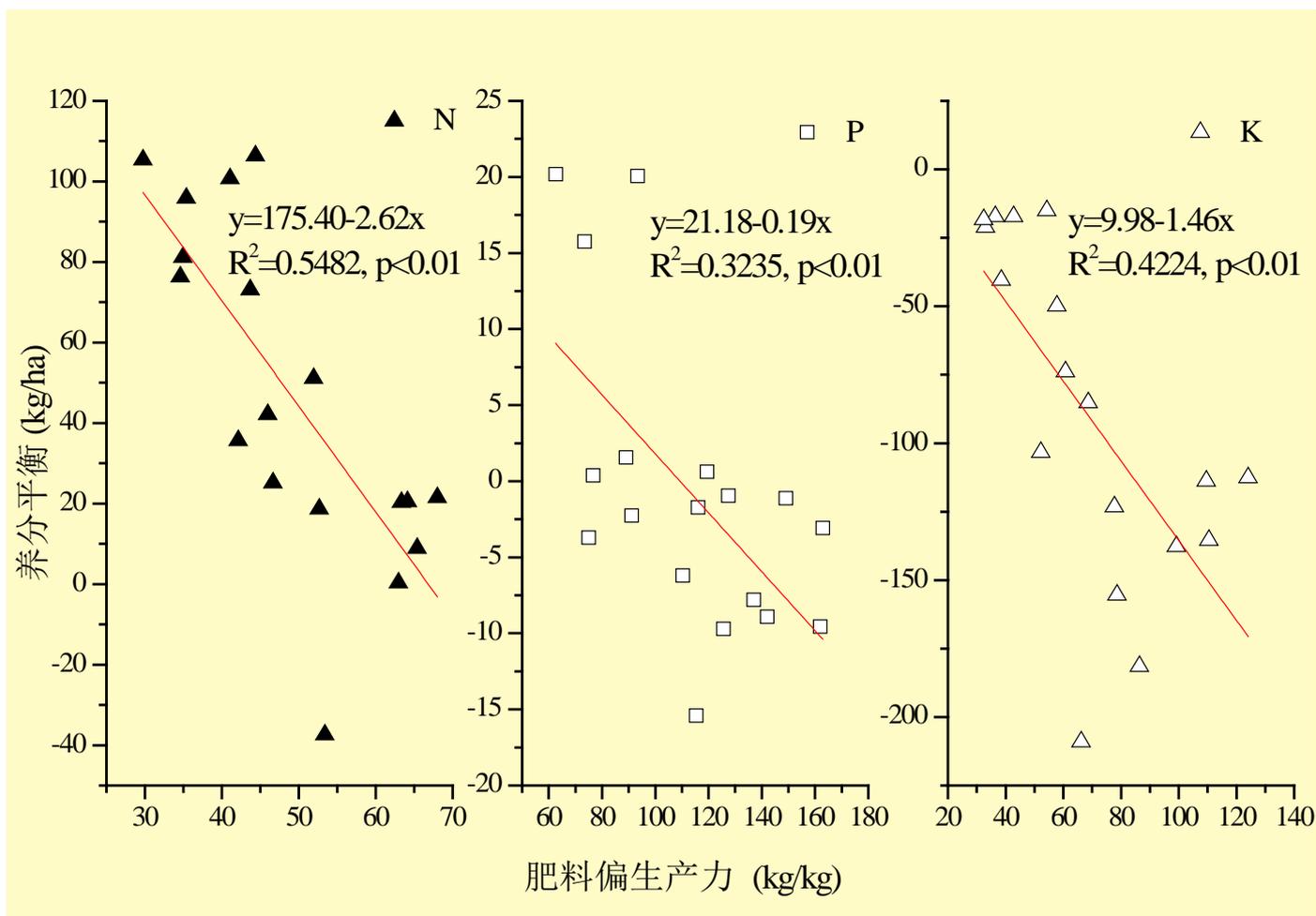


图 3 肥料偏生产力与养分平衡的相互关系

注: 氮磷钾肥的偏生产力指 N、P₂O₅ 和 K₂O 的偏生产力; 氮磷钾养分平衡指 N、P 和 K 的平衡。

3 讨论

3.1 NE 系统可以提高双季稻产量

南方丘陵的双季稻区是我国主要的粮食供应地区之一, 在该地区的双季稻种植中, 化肥在维持水稻高产中起着至关重要的作用^[7]。然而, 近年来, 随着农村劳动力的流失, 水稻种植中的化肥施用呈现出随意性和盲目性, 进而导致该地区的肥料利用率不高, 造成化肥资源的大量浪费^[8-10]。因此, 在该地区开展化肥减施增效研究就显得十分迫切。在本研究中, NE 系统可以在农民习惯施肥的基础上, 根据目标产量和土壤基础肥力高低确定具体的氮磷钾产量反应, 并结合氮磷钾肥的农学效率, 在考虑秸秆还田等措施的基础上进行推荐施肥, 再结合 4R 养分管

理进行肥料运筹。因此, 与农民习惯施肥相比, NE 系统可以显著提高双季稻产量, 早晚稻产量增幅为 15.17%–32.74% 和 14.33% 和 19.25%; 且 NE 系统的产量也显著高于当地农技部门的测土配方处理。同时, 在考虑氮磷钾肥的产量反应和农学效率进行施肥量推荐的基础上, NE 系统也对测土配方数据进行了兼容^[21], 即当有土壤测试数据时, NE 系统会在推荐施肥时进行养分丰缺的精准判断, 从而更为准确地推荐施肥量, 因此, NE 系统的水稻产量也显著高于测土配方处理。但是, NE 系统在早稻和晚稻上增产效果略有不同, 原因可能与早晚稻季的温光条件存在差异有关, 且早晚稻连续种植下, 其系统内的氮磷钾等养分会存在累积效应^[27-28]。同时, 在 3 年 6 季中, 随着 NE 系统的持续应用, 双季稻的养分吸收量也呈现出



NE 处理显著高于农民习惯施肥处理。这与 NE 系统在小麦和玉米上的应用效果相似^[18-24]。但与作物对养分的奢侈吸收规律相反，原因之一是 NE 系统针对具体田块，根据氮磷钾肥的农学效率和产量反应进行施肥量推荐，且每年每季均为根据上季的产量反应等信息进行调整和优化，其施肥量与当季水稻养分需求高度吻合^[16, 25]。另一原因是 NE 系统依据 4R 养分原理优化了肥料运筹^[25]，增加了氮肥中的穗肥施用，从而有效满足了水稻开花后的养分需求。此外，NE 系统的养分吸收量增加还可能与良好的根系生长和开花后的养分吸收转运有关，但具体原因还有待进一步研究。

3.2 双季稻区的化肥减施潜力

在双季稻区，由于氮磷养分存在较高的盈余量，因此，与农民习惯施肥相比，早晚稻季 NE 系统中氮肥 (N) 的减施比例为 24.86%–29.15% 和 28.15%–34.43%；磷肥 (P₂O₅) 的减施比例分别为 15.97%–37.05% 和 31.72%–44.75%，钾肥 (K₂O) 的减施比例分别为 60.35%–

66.22% 和 72.29%–74.02%。这与其他人的研究结果相似^[19-25]，且晚稻季的化肥减施比例明显高于早稻季，这可能与早稻季的养分残效有关^[27-28]。但氮磷钾肥的减施比例差异较大，原因可能与土壤养分供应能力^[29]、水稻品种和种植模式有关。其中钾肥的减施比例较高的原因还与本研究充分考虑了秸秆全量还田带入的钾和土壤养分平衡有关，但是，也有研究表明，在田间水源充足的情况下，释放出来的秸秆钾从土壤进入水体比化肥钾进入水体有滞后性。从而可能影响了水稻对秸秆钾素的吸收利用^[30]，同时，全量还田下的秸秆腐解等可能会影响水稻苗期的生长^[31]。因此，根据秸秆全量还田背景下推荐的钾肥减施效果还有待进一步研究。此外，NE 系统在提高水稻产量的同时可以显著降低氮磷钾肥施用量的原因还与本研究中 NE 系统可以提高氮磷钾肥的偏生产力有关。然而，由于本研究的化肥减施比例是根据 3 年 6 季的结果得出的，化肥长期减施下的水稻产量变化还有待进一步跟踪研究，以期更为客观地指导该地区的化肥减施增效策略。此外，本研究还发现，在不考虑秸秆还田下，NE 处理下早晚稻季的钾素平

衡处于匮乏状态, 因此, 钾肥的减施比例还有待进一步深入探讨。

4 结论

在双季稻区, NE 系统可以通过优化肥料运筹进一步提升水稻产量、养分吸收量和氮磷钾肥的偏生产力。与农民习惯施肥相比, NE 系统下产量增加 14.33%–32.74%, 氮磷钾素吸收量分别增加了 22.09%–33.21%、27.02%–38.60% 和 14.24%–22.34%; 氮磷钾肥的偏生产力分别增加了 48.77%–83.41%、57.97%–115.83% 和 113.25%–206.00%。且显著优于当地农技部门的测土配方处理。同时, NE 系统可以显著降低氮磷钾肥的施用量。与农民习惯施肥相比, 氮磷钾肥的减施比例分别为 24.86%–34.43%、15.97%–44.75% 和 60.35%–74.02%。且当氮磷钾肥的偏生产力增加 1kg/kg, 氮磷钾素的盈余量分别降低 2.62、0.19 和 1.46kg/ha。

参考文献

[1] 朱德峰, 张玉屏, 陈惠哲, 向镜, 张义凯. 中国水稻高产栽培技术创新与实践. 中国农业科学, 2015, 48(17): 3404–3414.

[2] 段居琦, 周广胜. 中国双季稻种植区的气候适宜性研究. 中国农业科学, 2011, 45(2): 218–227.

[3] 肖丽萍, 何秀文, 刘木华, 蔡金平, 石庆华, 潘晓华. 我国南方双季稻区水稻生产机械化发展现状分析. 江西农业大学学报, 2013, 35(4): 682–686.

[4] 邹应斌. 长江流域双季稻栽培技术发展. 中国农业科学, 2011, 44(2): 254–262.

[5] 吴建富, 潘晓华, 石庆华, 王苏影, 李涛, 李强. 江西双季水稻施肥中存在的问题及对策. 中国稻米, 2012, 18(5): 33–35.

[6] 任万军. 杂交稻高产高效施氮研究进展与展望. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(6): 1505–1513.

[7] 闫湘, 金继运, 梁鸣早. 我国主要粮食作物化肥增产效应与肥料利用效率. 土壤, 2017, 49(6): 1067–1077.

[8] 李书田, 刘晓永, 何萍. 当前我国农业生产中的养分需求分析. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(6): 1416–1432.

[9] 刘钦普. 中国化肥施用强度及环境安全阈值时空变化. 农业工程学报, 2017, 33(6): 214–221.

[10] 陈琦. 农户水稻施肥现状调查与分析, 南京农业大学博士学位论文. 2013

[11] 曾希柏, 李菊梅. 中国不同地区化肥施用及其对粮食生产的影响. 中国农业科学, 2004: 37(3), 387–392..

[12] 刘钦普. 江苏氮磷钾化肥使用地域分异及环境风险评价. 应用生态学报, 2015, 26(5): 1477–1483.

[13] 赵海东, 赵小敏, 谢林波, 郭熙. 江西上饶市水稻肥料利用率的空间差异及其影响因素研究. 土壤学报, 2014, 51(1): 22–31.

[14] 赵亮, 张贺翠, 廉小平, 陆广涛, 朱利泉. 喀斯特地形区水稻测土配方施肥指标体系研究. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(4): 1056–1065.

[15] 张德军. 利用 "3414" 试验设计进行水稻测土配方施肥研究. 中国土壤与肥料, 2009, (6): 52–56.

[16] Xu X., Xie J., Hou Y., He P., Pampolino M. F., Zhao S., Zhou W. Estimating nutrient uptake requirements for rice in China. Field Crops Research, 2015, 180: 37–45.

[17] Cui Z., Zhang H., Chen X., Zhang C., Ma W., Huang C., Gao Q. Pursuing sustainable productivity with millions of smallholder farmers. Nature, 2018, 555(7696): 363

[18] 王宜伦, 苏瑞光, 刘举, 韩燕来, 卢艳丽, 白由路, 谭金芳. 养分专家系统推荐施肥对潮土夏玉米产量及肥料效率的影响. 作物学报, 2014, 40(3): 563–569.

[19] 王宜伦, 白由路, 王磊, 刘举, 韩燕来, 谭金芳. 基于养分专家系统的小麦–玉米推荐施肥效应研究. 中国农业科学, 2015, 48(22): 4483–4492.

[20] 徐新朋, 魏丹, 李玉影, 谢佳贵, 刘双全, 侯云鹏, 何萍. 基于产量反应和农学效率的推荐施肥方法在东北春玉米上应用的可行性研究. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(6): 1458–1467.

[21] 徐新朋. 基于产量反应和农学效率的水稻和玉米推荐施肥方法研究, 中国农业科学院博士学位论文, 2015

[22] Chuan L., He P., Pampolino M. F., Johnston A. M., Jin J., Xu X., Zhou W. Establishing a scientific basis for fertilizer recommendations for wheat in China: Yield response and agronomic efficiency. Field Crops Research, 2013, 140: 1–8.

[23] Xu X., He P., Pampolino M. F., Johnston A. M., Qiu S., Zhao S., Zhou W. Fertilizer recommendation for maize in China based on yield response and agronomic efficiency. Field Crops Research, 2014, 157: 27–34.

[24] Xu X., He P., Qiu S., Pampolino M. F., Zhao S., Johnston A. M., Zhou W. Estimating a new approach of fertilizer recommendation across small-holder farms in China. Field Crops Research, 2014, 163: 10–17.

[25] Yang F., Xu X., Ma J., He P., Pampolino M. F.,

Zhou W. Experimental validation of a new approach for rice fertiliser recommendations across smallholder farms in China. *Soil Research*, 2017, 55(6): 579–589.

[26] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000

[27] 张仕祥, 李辉信, 胡锋, 黄发泉, 黄花香. 早稻磷肥残效对当年晚稻产量的影响. *土壤学报*, 2006, 43(4): 611–616.

[28] 侯红乾, 冀建华, 刘光荣, 刘益仁, 刘秀梅, 程正新, 杨俊成, 文石林. 南方红壤区稻-稻连作体系下氮肥减施模式研

究. *中国水稻科学*, 2012, 26(5): 555–562.

[29] 李继福, 鲁剑巍, 任涛, 丛日环, 李小坤, 周鹏, 杨文兵, 戴志刚. 稻田不同供钾能力条件下秸秆还田替代钾肥效果. *中国农业科学*, 2013, 47(2): 292–302.

[30] 李继福, 任涛, 鲁剑巍, 丛日环, 李小坤, 马晓晓. 水稻秸秆钾与化肥钾释放与分布特征模拟研究. *土壤*, 2013, 45(6): 1017–1022.

[31] 石广跃, 方书亮, 王兴龙. 苏北地区稻麦秸秆持续全量还田下机插秧苗促早发技术. *中国稻米*, 2016, 22(3): 85–86.



2018年IPNI研究生奖学金评选结果揭晓

为鼓励在植物营养和养分管理相关学科取得优异成绩的优秀研究生，国际植物营养研究所 (IPNI) 每年设立研究生奖学金。2018年10月IPNI 研究生奖学金评审结果揭晓。评审委员会按照标准对每一位申请者的学术业



毕业后希望在高校或研究院所从事植物营养研究工作。

张佳佳，中国农业科学院农业资源与农业区划研究所植物营养学硕博连读研究生。论文题目为“基于产量反应和农学效率的萝卜推荐施肥和限量标准”，研究不同产区萝卜施肥产量反应、农学效率和土壤基础养分供应特征，建立基于产量反应和农学效率的推荐施肥方法，利用模型优化田间管理措施，建立协同农学和环境效应的氮肥施用方案和限量标准。博士



唐哲仁，复旦大学环境科学与工程系博士研究生，环境工程专业。主要从事生物质废弃物资源化利用研究，包括农业废弃物高效堆肥化处理，以及微生物-矿物质在复合有机物体系统中的交互作用。未来致力进入国际组织工作，为解决欠发达国家和地区的贫困、环境、食物、教育等问题贡献自己的力量。



杨晓，上海交通大学园艺学博士研究生。博士论文主要研究“甘氨酸态氮对叶用莴苣多酚代谢及抗氧化活性的影响”。该研究利用不同浓度的模式有机氮源“甘氨酸”探究其对叶用莴苣代谢及生理的影响。博士毕业后希望继续从事农业科研工作。



推广并重的科技工作者。

马庆旭，浙江大学环境与资源学院博士研究生。主要从事植物有机营养及其环境调控研究。通过无菌水培、根际模拟、大田原位吸收等方法，结合 ^{13}C 、 ^{15}N 、 ^{14}C 、 ^{35}S 单标记和多标记技术研究土壤含氮/磷/硫有机分子周转变化规律、土壤游离氨基酸生物有效性及微生物调控机制。未来希望在高校继续从事有机植物营养相关研究工作，做一个基础理论与技术

IPNI研究生奖学金自2007年开始设立，凡有IPNI项目的国家，在具有学位授予资格的大学和科研单位从事土壤和植物营养学相关学科的在读研究生都有资格申

请。截止到2018年已有48位来自中国的研究生获得此项殊荣。请符合条件的研究生于每年1月1日至4月30日网上提交申请。详情请随时关注www.ipni.net/awards。



的可持续发展贡献自己的一份力量。

郭俊杰，南京农业大学资源与环境科学学院植物营养与肥料学系在读博士生。研究方向为养分资源综合管理。主要从事养分综合管理下畜禽有机肥培肥地力及稳产增效机制研究，旨在探究有机肥提高土壤肥力和作物产量潜力及相关机制，为推广有机肥替代化肥提供理论支撑。未来希望在高等院校或者科研院所继续从事与植物营养相关的工作，为我国农业



为农业可持续发展提供依据。毕业后希望继续以农业环境为主题，从微观和宏观两方面探寻我国环境友好型农业的可能性。

姚致远，西北农林科技大学资源环境学院植物营养学专业博士研究生，学位论文题目为“豆类绿肥还田对黄土高原旱地麦田环境的影响”。该研究通过定量分析夏休闲期种植不同豆类绿肥相对传统夏休闲-冬小麦种植模式下碳足迹的变化，土壤有机碳的稳定性以及土壤硝态氮残留等指标，旨在综合评估黄土高原地区种植绿肥替代夏休闲对环境的影响，进而



主要过程。博士毕业后继续从事红壤酸化防治与酸性土改良的研究工作。

蔡泽江，中国农业科学院农业资源与农业区划研究所土壤学博士研究生。博士论文题目为：“有机物料影响红壤化学氮肥致酸的差异与机制”，初步探明长期不同施肥下红壤酸化演变特征，有机肥减缓红壤酸化的合理用量；明确了作物秸秆降低化学氮肥硝化过程和氢离子产生量，以及去羧基作用消耗了硝化作用释放的氢离子，是其减缓红壤酸化的两个主



Muhammad Riaz，华中农业大学植物营养学博士研究生，论文题目为“施硼提高三叶橙对铝诱导根系生长受阻的耐受性”，研究柑橘硼营养、硼缓解铝毒导致的柑橘根系生长受限。博士毕业后希望在本领域继续博士后研究。

请。截止到2018年已有48位来自中国的研究生获得此项殊荣。请符合条件的研究生于每年1月1日至4月30日网上提交申请。详情请随时关注www.ipni.net/awards。