

全球食物、饲料、纤维和生物能的需求前景：自然资源的暗示 ——走近千年生态系统评估



克劳德·格林勒
国际食物政策研究所，美国

绪论¹

食物供应（或需求）与周围环境有本质的联系。生态系统服务间的联系包括食物和水的供应、它们的未来发展、与人类福祉的关系和食品安全，最近曾被列为千年生态系统评估的一部分 (MA 2003; MA 2005a)。生态系统服务是指人类从生态系统中获得的收益，它包括支持服务、供给服务、调节服务和文化服务。支持服务包括养分循环、土壤形成和初级生产；供给服务又称生态系统提供的产品，包括食品、饲料、纤维和淡水；调节服务影响生态系统的进程，比如空气质量、土壤侵蚀、气候和害虫；最后，文化服务作为一种非物质的收益，包括风景的美学享受和娱乐方面的好处。各种生态系统服务之间的互相联系和权衡的改变，以及这些服务的未来发展方向，均对人类的福祉有重要的影响。加强或减轻生态系统服务压力的驱动力，以及随着时间的流逝这些驱动力的改变，将对未来人们的福祉和贫穷程度至关重要。

本文有选择地对生态系统服务现状和发展趋势做了扼要的概述；描述未来生态系统服务的结果，重点关注于未来的食物供应以及相关的服务，如使用肥料的影响和生物燃料的作用，并在文章结尾给出一些结论。

对选定的生态系统服务的现状和趋势评估

在过去的50年里，人类对生态系统改变的规模和速度皆超过历史上任何时期同一时间段的情况。在过去的100年里，影响生态系统变化和结果的主要驱动力是非常迅速的人口增长和经济增长。在1960-2000年，世界人口增长翻了一翻（从30亿增长到60亿），世界经济增长超过了六倍。

为满足人类对食物需求量的快速增长，食物产量增加超过了一倍多，用水量也迅速增大，用于生产纸浆和成品纸的木材采伐量有了三倍的增长。木材生产增加了一半，水力发电装机能量翻了一番。为了满足上述迅速增长的需求，食物产区面积大幅度扩大，其他的自然资源，尤其是淡水、鱼类和木材，在有限的范围内对其开发的程度也不断加大(MA 2005 a,b)。在过去的50年中，生产力的提高大大地促进了生态系统服务的供给，例如食品方面提出了“绿色革命”的口号，即推广采用高产谷类品种，并辅之以迅速扩大灌溉区域和加大化肥使用。绿色革命使食品的生产迅速增长，降低了国际粮食价格（尤其在亚

¹这篇文章主要引用千年生态系统评估的研究结果。详细资料可参见<http://www.millenniumassessment.org>，并可以下载到中文版本的合成报告

洲)，减慢了森林和其他区域向耕地转化的步伐。但是，在非洲亚撒哈拉地区，食品产量的提高一直非常缓慢，中东和北非地区由于水资源缺乏使食品产量提高的局限性日益加剧。尽管食品产量和生态系统服务的其他供给增长迅速，但在世界的许多地方，营养水平仍然低的让人无法接受，尤其是非洲亚撒哈拉地区。1997年，非洲亚撒哈拉地区出现营养不良的孩子比十九世纪七十年代多的多，亚洲西部和非洲北部的孩子营养不良的情形也在不断恶化，虽然亚洲在食品安全方面有显著性提高，但营养不良的缺口依然很大，尤其存在于南亚地区，东南亚和东亚的部分地区也同样如此(Rosegrant等. 2001)。

其他生态系统提供的服务有哪些改进呢？根据千年生态系统评估，约60%的生态系统服务出现退化，往往以加强提供服务为代价。垦殖系统，定义为至少有30%用于耕地的土地景观，目前占陆地总面积的24%。农田扩展的主要地区包括原先丛林覆盖的区域，如地中海森林，林地，以及灌木丛，温带，热带，亚热带干阔叶林，水淹草地，热带草原等。同时，物种消亡的速度加快，淡水生态系统和淡水渔业瓦解，栽培物种的基因多样性降低，气候变化首次对所有生态系统服务的影响已经显现出来(MA 2005a,b)。在地表，人类活动使制造含氮化合物的生产速率几乎翻了一番，而这种变化大多是近期发生的。1960-1990年间，磷肥的使用增加了近三倍，但随后有所减少。对当今热点地区来说，干旱的地区更易遭受进一步的环境恶化。

干旱区是指植物生长受可利用水资源限制的陆地，约占地球总陆地面积的40%，其淡水资源供应约只有全球的7%左右。干旱区生活着约20亿人口，其中90%以上属于发展中国家，他们可利用的水资源有限，卫生设施和其他基础设施投入有限，土壤有机质含量低(MA 2005a)。

我们为什么要担忧这些生态系统显著退化呢？千年生态系统评估指出了生态系统及其服务的日益退化给人类带来的几项挑战。首先，对一部分人来说，我们过去享受的生态系统服务，如清新的空气、一些休闲服务和物种的多样性，正在日益消失。其它一些对人类十分重要的服务，如淡水供应或增加的营养食品供应，正在日益紧缩或受到退化的生态系统服务造成的负面影响。第二，生态系统非线性变化的可能性正在增加。这些非线性变化包括天气模式引起的疾病爆发、与1997-98年厄尔尼诺现象相关联的霍乱爆发、大量淡水和海岸生态系统富营养化和缺氧、超过森林砍伐极限引起的区域气候模式改变，重要的食品级商品渔业崩溃等等。第三，退化的生态系统服务使穷人和富人之间的不公增加，其原因是穷人易于生活在对健康和生产有更大威胁的生态系统中，如干旱地区，并经常处于环境退化和贫困加剧的旋涡中。

千年生态系统的情景——未来生态系统服务，关注食物供应和相关成果

为了评估生态系统服务未来的局限性，结合定量模型和定性分析，千年生态系统(MA)提出了四种可能的情景以探索维持生态系统服务的途径。一方面它们探索了全球化增强与区域化增强对决，另一方面它们探索了经济增长与生态系统和服务的本地化适应性管理。

全球协同（GO）情景描述了一个全球化的社会。它的特征是集中于全球贸易和经济自由化；对生态系统问题采取被动式的管理途径，但也采取强有力的措施减轻贫困和不平等，以及投资诸如基础设施和教育这些公共物品。

实力秩序（OS）情景描述了一个区域化的和破碎化的世界。它的特征关注安全和保护问题；主要强调区域市场的作用；很少关注公共物品；对生态系统问题采用被动式的管理途径。

适应组合（AM）情景的特征是把政治和经济活动集中于区域的流域生态系统；地方机构得到加强，使用共同的局的生态系统管理策略；各种社会机构设计了非常主动的生态管理途径。

技术乐园（TG）情景描述了一个全球化的世界。它的特征是强烈地依赖于环境无害化技术，利用高度管理的（常常是工程化的）生态系统生产生态系统服务；对生态系统采取主动式的管理途径，尽力避免问题。详见MA (2005c)。

对选定的情景参数进行量化（一组农业相关参数，见表1），并利用一套相关软件进行分析，这套软件达到世界最新技术发展水平，包含从全球经济到环境的各个方面，还包括国际粮食政策研究所预测的食物模型（框1）。情节和定量模型均延伸到2050年，并且2100年的结果仍会是这种长期的变化过程的延续，如气候变化、森林采伐和生物多样性消失。

食物供应和需求

所有的情景表明总的人均食物消费量略有增加。GO情景中增长最快，因为在此情景中有较高收入增长和较高的人均购买力。然而在AM情景和OS情景中，作为食物的谷类直接消费却降低(图1)。受收入增加和对家畜产品偏爱程度提高的驱动，预计在世界范围内畜牧产品的人均需求量迅速增长。在GO情景中预计每年人均消费量从1997年的36kg增长到2050年的70kg；在TG情景中（发达国家对肉类偏爱程度较低）只增长到43kg；在AM情景和OS情景中增长到41kg，特别是在发展中国家，人口较多，收入增长缓慢，对肉类产品的购买力较低。在GO情景中，亚洲、前苏联(FSU)地区和OECD地区的需求增长最大，而在非洲亚撒哈拉地区和中东/北非(MENA)地区人均肉类消费量不会显著增长，到2050年，分别只有27kg和34kg（1997年OECD地区人均消费量88kg）(图2)。

在所有4种情景中，全球谷类产量均比1997年有所增加。GO情景中谷类产量增加最多，达到73%（从18.72亿吨增加到32.30亿吨），其次是TG情景中增长57%，OS情景中增长55%，以及AM情景中增长53%。在GO情景中非洲亚撒哈拉地区谷类增长量最大，受收入和投资快速增长的驱动，谷类产量从1997年的0.81亿吨将增加到2050年的3.05亿吨。所有情景中谷类产量的显著增长得益于收入的较快增加和其他方面的发展，如TG情境中强大的科技进步；AM情景中通过适应性管理带来的区域扩张和产量的增长；OS情景中人口增长对大宗农作物的依赖性增强。

然而，按人均和地区为基础的食品生产的增长各不相同。由于水资源匮乏的加剧以及有限的可利用的土地，再加上人口和收入的增长，西亚和北非地区人均谷类产量将会下降，在GO情景中从基础年度的249公斤/人下降到241公斤/人；在AM情景中下降到只有198公斤/人(图 3)。

在所有4种情景中，预计肉类产量在这段时期增长速度要快的多。GO情景中产量增长最快，与1997年的产量相比，增长了170%；在OS情景中增长了86%；在AM情景中增长了85%；在TG情景中增长了79%。

在所有4种情景中，谷类产量的增加更加依赖于耕地产量的提高，而不是耕地面积的扩大。尽管如此，不同的情景和区域中的差异也很大。在GO情景中，全球耕地产量的提高远远超过耕地面积的扩大。前者增长速率为每年1.02%，后者是0.01%。但在非洲亚撒哈拉地区、中东北非地区和拉丁美洲地区，耕地面积扩大的速率较高。而亚洲和前苏联地区，耕地面积增长速率低于全球平均水平。另一方面，在OS情景中，较低的耕地产量给耕地面积的扩大带来较大的负担。就全球范围而言，每年耕地面积预计增加0.34%，而每年产量提高0.48%。非洲亚撒哈拉地区耕地面积的增加尤为显著，平均每年1.01%，拉丁美洲0.57% (图 4)。

食品贸易的结果和国际食品价格

GO情景中，贸易自由化导致国际贸易特别是谷类贸易的增加，2050年谷类贸易量达到6.01亿吨，而1997年仅为1.87亿吨。其他情景中贸易量增加水平相当，如OS情景中为5.26亿吨，AM情景中为5.31亿吨，TM情景中为5.04亿吨。世界肉类产品贸易量自1997年的低水平以来，也有显著性增加。在GO情景中，肉类贸易相对增长较快，绝对数量从0.09亿吨增长到0.68亿吨。

TG情景中，小麦、玉米和大米的价格下降，这是由于产量和贸易量的增加超过了人类需求量的增加。在GO情景中，由于农业研究和基础设施的改进，大米价格也有所下降。同时小麦和玉米价格上涨，这是由于对谷类和家畜产品需求的增加所致。在AM和OS情景中，上述三种谷类价格均上涨，尤以大米价格涨幅最大，究其原因是农业投入较少，人口增长较快，谷类需求降低(图 5)。

儿童营养不良程度的暗示

食物消费以及母婴保育的质量、健康和卫生质量，均对儿童的营养不良起着重要的决定作用。营养不良是最大的导致疾病的原因，全球10%的疾病是母亲和儿童营养不良所引起的。超过一半的儿童死亡与体重过轻有关，营养不良的儿童幸存长大后，更易遭受慢性病或致残的困扰，其生理和智力水平很可能较低(de Onis等 2004; Pelletier 等 1994)。

在GO和TG情景中，营养不良儿童的前景会有所改善。GO情景中发展中国家营养不

良儿童的总数在2015年下降24%，达到1.26亿人，到2050年下降61%。在TG情景中，2015年营养不良儿童的数量下降了9%，2050年下降37%。

在AM情景中，营养不良儿童的数量在2020年增加到1.93亿，随后又下降到1.45亿，比1997年减少0.22亿。在OS情景中，截至2050年，营养不良儿童的数量减少到1.84亿人，但仍比基础年份多出0.18亿人(图 6)。

尽管在GO和TG情景中取得了一些成就，但千年发展目标计划在1990-2015年使营养不良儿童比例减半的目标仍不能实现，两种情景中在2015年发展中国家的学龄前儿童有26.5%营养不良，而计划的目标是15.1%。

食物与生物燃料生产的对决

现代生物燃料包括从玉米和甘蔗发酵得来的乙醇、从油菜籽榨取的燃料油、能够为发电轮机提供燃料的速生树种和通过燃烧发电的农业废弃物。薪材和炭材已逐渐被其他能源载体取代，但在某些地方，它仍然在总能源利用中占有很大的比重。生物燃料的利用程度影响到地面被覆的类型与分布，以及由森林和其他地面被覆类型所提供的服务。

TG情景设想社会将对环境恶化会减少人类福祉确信不疑，并支持削减温室气体和其它空气污染物排放的长期目标。为减少气候变化，国际大家庭设定了一个目标，即2100年全球平均气温比工业化前的水平提高2°C（与欧盟和几个欧洲国家气候政策现行目标相同）。由于排放主要来自能源的使用，这就需要降低矿物燃料的使用量，提高能源的有效利用率，增加“无碳”能源（如现代生物燃料、太阳能和风能）和更多的低碳燃料（如天然气）的使用量，尽管它们在所有能源中总的贡献仍然较小，但其对土地使用和地表覆盖变化有着切实的影响。

生物燃料在温室气体排放中是中性的。在GO情景中，生物燃料用量增长了6倍，主要受到矿物燃料成本增加的驱动，再加上由于取得了作物生产的增长而得到了土地。TG情景中，生物燃料用量增加了4倍，主要受气候变化的驱动，也稍微受到较低的能源需求的负面影响。OS情景中，提供能源的作物与提供食物的作物争夺土地，因而提高了生产成本。不重视这些因素可能会导致提供生物燃料的作物产量长期下降，这会加快土壤退化，并需要大量的化肥和其他方面的投入（MA 2005c）。

氮肥的使用及氮对河流的负担

近几年已实施了一些肥料使用计划，部分详情可参见框 2 和 图 7。所有的计划都表明氮肥用量增加，但是结果却不大相同，主要取决于基本的假设，到2020年的使用量增加范围变化从10%到80%。

对MA情景来说，基于对目前氮使用效率的变化和对农业情景的认识，我们预测GO情景的结果是2020年产量1.10亿吨，2050年在1.2-1.40亿吨之间。TG情景中氮肥使用量略低，其原因是营养元素肥料使用效率增加，氮肥需求略有减少，在2020年产量约1.00亿吨，2050年1.10-1.20亿吨。AM情景预测的结果居中，化肥使用量低于OS情景，更接近GO情景。确信无疑的是计划中有很大的不确定性，包括增加施肥效能的潜力，关于谷物特定营养施用速率的少量的数据，施肥面积，相应的产量反馈以及在所有情景中都缺少的化肥市场价格明确的组合(Wood、Henao和Rosegrant 2004)。

氮元素是河流中的主要营养成分。人类活动干扰河流的营养负荷并向沿海的海上系统输出是影响水质和生物多样性的一个全球性问题。几项研究调查了河流中氮元素向海中输送的情况(见 Green等 2004; Seitzinger 和Kroeze 1998; Seitzinger等 2002; Turner等 2003; Van Drecht 等 2003)。为评估MA情景中的氮通量，该情景涉及到Bouwman等人(2005)先前的一项研究，他们使用联合国粮食农业组织AT2030 (FAO 2003)的结论，设定在陆地系统(沉积作用、生物固氮、肥料和动物肥)氮的总输入量与河流的氮流出量有密不可分的联系。结果表明，GO、AM和OS情景中河流氮流出量在2030年等于或大于5000万吨/年；只有TG情景显示河流氮负荷减小，其原因是肉类食物减少、加强废水处理以及大气沉积物的减少。

土地使用变化的暗示

谷类、家畜和鱼类总需求量的增长，将对未来农业用地的强度和广度以及对由天然草原林地提供的生态系统服务有很大的影响，其后果是这些天然草原林地将被转变为农业用地。在OS情景中，发展中国家的农业用地扩张规模最大，原因是技术投资较低和相应的谷物产量增加较慢，再加上相对大的人口增长和相对低的收入增长。此外该情景中世界食物贸易的壁垒暗示着谷物生产效率的低下，非洲亚撒哈拉地区在2000年到2050年之间农业用地大约从1100万公顷增长到1700万公顷，原始森林消失率可能从现有速度(1970年到2000年大约0.4%)实际增长到0.6%。另一方面，OECD地区农业用地预计会降低。GO情景中森林消失率与OS中相比相对较慢，但是仍然接近现在的全球速度。非洲亚撒哈拉地区大约50%的森林将在2000年至2050年之间消失(MA 2005c)。

世界范围内，2000—2050年生物多样性减少的速度与1970年相比，变化幅度为12-15%。目前OS情景中的减少量最大，其中产量增长缓慢、牧场的扩大和很高的人口增长使农业用地扩张最大。事实上该情境中2050年的物种消失速度与历史上原有的速度相比，几乎没有减缓。GO情景的物种消失速度居第二位(MA 2005c)。

模拟显示与世界的其他地区相比，有三个区域的生态系统服务可能经历较多的变化：中非地区，那里农业区域的扩张以森林和草地为代价，导致这些生态群系提供的服务降低；中东和北非地区，收入增加使食品需求量和食品进口量增大，有限的水资源的压力增大；南亚地区，森林采伐和水资源匮乏将最终给生态系统服务带来负面的影响。

其他生态系统服务对未来食物生产水平的负面影响包括：加剧的水资源缺乏、对农业

加强投入（化肥、灌溉和农药）造成的生态学副作用和加剧的土壤侵蚀。GO 和 OS 情景中预计 2050 年化肥消费量约达 1.2-1.4 亿吨，导致河流和海岸线中氮负荷增加。灌溉和其他用水量的增加和污染负荷的迅速增长，给水资源带来很大的压力。GO 情景中严重缺水的范围从 1995 年的 23 亿人上升到约 49 亿人。在 AM 和 OS 情景中，约 53-55 亿人（约世界人口的 60%）将生活在严重缺水的河床地区。在 OS 和 GO 情景中，由于经济和农业的快速发展导致化石燃料消费量迅速增长，OS 情景中从 2000 年到 2100 年增长 2.5 倍，GO 情景中同期增长 2 倍(MA 2005)。

结论

在过去的 50 年里，人类对生态系统改变的规模和速度皆超过历史上任何时期同一时间段的情况。它们的改变满足了人们迅速增长的对食物、纤维、木材、淡水和燃料的需求。生态系统服务的增加为不断增长和不断富裕的人类提供了丰富的供给，但是这些服务是以许多其他的服务为代价的。未来几十年中，生态系统服务，特别是水、食物和纤维将持续增加，但他们对生态系统的反作用也会不断加剧。然而在未来几十年中，大多数对生态系统造成的影响来自土地使用的改变，从长远来看，气候变化的影响可能对生态系统的变化以及生态系统服务对人类福祉的负面影响更有决定性的作用。在所有 4 种情景中，即使生产增加，在 2050 年仍有许多穷人将食不果腹。

重要的是，千年生态系统评估显示生态系统服务之间的平衡，包括食品安全的提高和环境之间的平衡，诸如生物多样性降低，水资源匮乏加剧，污染程度增加。氮肥是生态系统服务提供的一个平衡的例子，肥料用量的快速增加使国家和全球食品安全程度提高很多，同时也导致淡水资源退化，并给人类健康带来负面影响。未来研究应该关注于提高食品安全与维持或改善非食品生态系统服务之间的平衡，不仅应强调土地使用的改变对生态系统和生物多样性、减缓气候变化的策略和增加用水安全的影响，还应强调生态系统服务和人类福祉特别脆弱的热点地区，如非洲亚撒哈拉地区、南亚、中东和北非地区。

参考文献:

- Alcamo, J., D. van Vuren, C. Ringler, W. Cramer, T. Masui, J. Alder, and K. Schulze. 2005. Changes in nature's balance sheet: model-based estimates of future worldwide ecosystem services. *Ecology and Society* 10(2): 19 [online] URL:<http://www.ecologyandsociety.org/vol10/iss2/art19/>
- Alcamo, J., P. Döll, T. Henrichs, F. Kaspar, B. Lehner, T. Rösch, and S. Siebert. 2003. Development and testing of the WaterGAP 2 global model of water use and availability. *Hydrological Sciences* 48(3):317–337.
- Alcamo, J., R. Leemans, and E. Kreileman, editors. 1998. *Global change scenarios of the 21st century. Results from the IMAGE 2.1 model*. Pergamon & Elsevier Science, London, UK.
- Bouwman, A.F., G. v. Drecht, J.M. Knoop, A.H.W. Beusen, and C.R. Meinardi. 2005. Exploring changes in river nitrogen export to the world's oceans. *Global Biogeochemical Cycles*. In press.
- Bumb, B., and C. Baanante. 1996. *The Role of Fertilizer in Sustaining Food Security and Protecting the Environment to 2020*. Discussion Paper No. 17. International Food Policy Research Institute (IFPRI), Washington, DC.
- Daberkow, S., K.F. Isherwood, J. Poulisse, and H. Vroomen, 1999. *Fertilizer Requirements in 2015 and 2030*. IFA Agricultural Conference on Managing Plant Nutrition. Barcelona. IFA.
- de Onis, M., M. Blössner, E. Borghi, E.A. Frongillo, and R. Morris. 2004. Estimates of Global Prevalence of Childhood Underweight in 1990 and 2015. *Journal of the American Medical Association* 291(21): 2600–2606.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2003. *World Agriculture: Towards 2015/2030*, J. Bruinsma ed. Earthscan Publications, London, 432 pp.
- Frink, C.R. Waggoner P., J.H. Ausubel. 1999 Nitrogen fertilizer: Retrospect and prospect. *Proceedings of the National Academy of Sciences (USA)* 96:1175-1180. Accessed at http://phe.rockefeller.edu/pnas_nitrogen/pnas_nitrogen.pdf
- Galloway, J. N., F. J. Dentener, D. G. Capone, E. W. Boyer, R. W. Howarth, S. P. Seitzinger, G. P. Asner, C. Cleveland, P. A. Green, E. Holland, D. M. Karl, A. Michaels, J. H. Porter, A. Townsend, and C. Vorosmarty. 2004. Nitrogen cycles: past, present, and future. *Biogeochemistry* 70(2): 153-226.
- Green, P., Vörösmarty, C.J., Meybeck, M., Galloway, J.N., Petersen, B.J. and Boyer, E.W., 2004. Pre-industrial and contemporary fluxes of nitrogen through rivers: a global assessment based on typology. *Biogeochemistry*, 68: 71-105.

- IFA (International Fertilizer Industry Association) . IFA (International Fertilizer Industry Association), IFDC (International Fertilizer Development Center), IPI (International Potash Institute), PPI (Phosphate and Potash Institute, FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations), 2002: *Fertilizer Use by Crop*. 5 ed. Rome.
- IFA (International Fertilizer Industry Association), IFDC (International Fertilizer Development Center), and FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 1999. *Fertilizer Use by Crops*. 4 ed. Rome.
- Kainuma, M., Y. Matsuoka, and T. Morita. 2002. *Climate policy assessment*. Tokyo: Springer.
- Millennium Ecosystem Assessment. 2003. *Ecosystems and human well-being: A framework for assessment*. Washington, D.C.: Island Press.
- Millennium Ecosystem Assessment. 2005a. *Ecosystems and human well-being: Synthesis*. Washington, D.C.: Island Press.
- Millennium Ecosystem Assessment. 2005b. *Ecosystems and human well-being: Current state and trends: Findings of the condition and trends working group*. Washington, DC: Island Press.
- Millennium Ecosystem Assessment. 2005c. *Ecosystems and human well-being: Scenarios: Findings of the scenarios working group*. Washington, DC: Island Press.
- Pauly, D., J. Alder, E. Bennett, V. Christensen, P. Tydemers, and R. Watson. 2003. The future for fisheries. *Science* 302(5649):1359–1361.
- Pelletier, D.L., E.A. Frongillo Jr., D.G. Schroeder, and J.-P. Habicht. 1994. A Methodology for Estimating the Contribution of Malnutrition to Child Mortality in Developing Countries. *Journal of Nutrition* 124(10 suppl.): 2106S–2122S.
- Rosegrant, M. W., M. S. Paisner, S. Meijer, and J. Witcover. 2001. *Global food projections to 2020: emerging trends and alternative futures*. 2020 Vision Food Policy Report. Washington, D.C.: IFPRI.
- Rosegrant, M.W., M. Agcaoili- Sombilla, and N.D. Perez, 1995: Global Food Projections to 2020: Implications for Investment. *Food, Agriculture, and the Environment Discussion Paper No. 5*. Washington, D.C.: IFPRI.
- Seitzinger, S.P., Kroeze, C., Bouwman, A.F., Caraco, N., Dentener, F. and Styles, R.V., 2002. Global patterns of dissolved inorganic and particulate nitrogen inputs to coastal systems: Recent conditions and future projections. *Estuaries*, 25: 640-655.
- Tilman, D., J. Fargione, B. Wolf, C. D'Antonio, A. Dobson, R.Howarth, D. Schindler, W.H. Schlesinger, D. Simberloff, D. Swackhamer, 2001: Forecasting Agriculturally Driven Global Environmental Change. *Science* 292, 281-284.
- Turner, R.E., Rabelais, N.N., Justic, D. and Dortch, Q., 2003. Global patterns of dissolved N, P and Si in large rivers. *Biogeochemistry*, 64: 297-317.
- Van Drecht, G., Bouwman, A.F., Knoop, J.M., Beusen, A.H.W. and Meinardi, C.R., 2003. Global modeling of the fate of nitrogen from point and nonpoint sources in soils, groundwater and surface water. *Global Biogeochemical Cycles*, 17(4): 26-1 to 26-20 (1115, doi:10.129/2003GB002060).

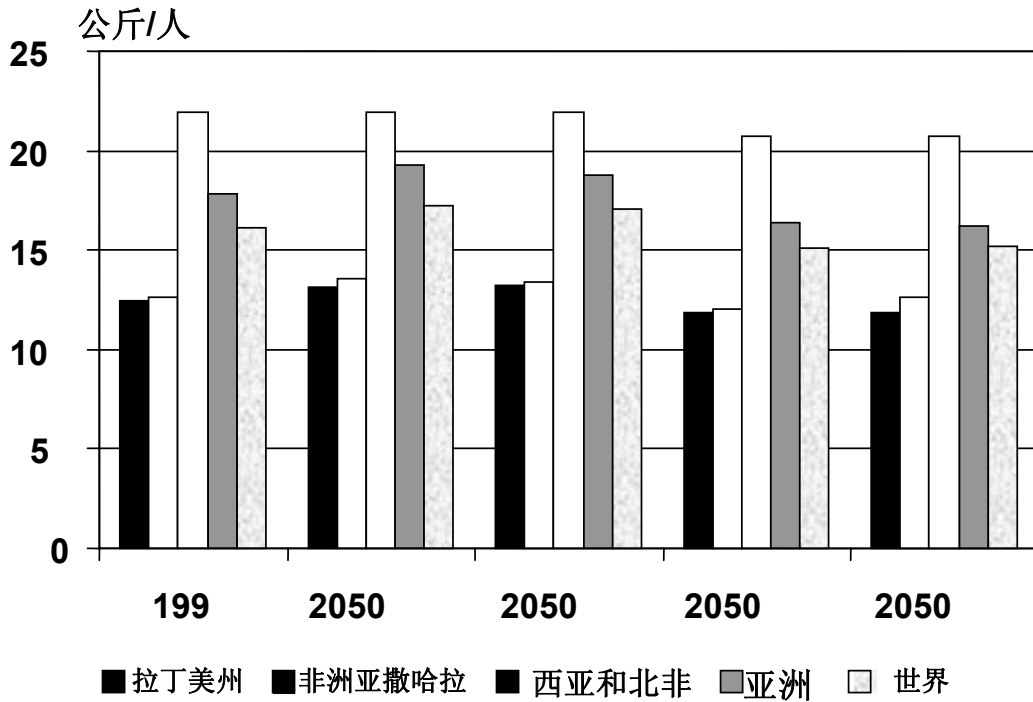
- Wood, S., J. Henao, and M.W. Rosegrant. 2004. The Role of Nitrogen in Sustaining Food Production and Estimating Future Nitrogen Fertilizer Needs to Meet Food Demand. In *Agricultural and the Nitrogen Cycle*, ed. A.R. Mosier, J.K. Syers, and J.R. Freney. Washington, D.C.: Island Press.
- Xenopoulous, M., D. Lodge, J. Alcamo, M. Märker, K. Schulze, and D. van Vuuren. 2005. Scenarios of freshwater fish extinctions from climate change and water withdrawals. *Global Change Biology* 11:1-8.

表 1:千年生态系统情景中选定的与农业相关的参数

参数	全球协同	技术乐园	适应组合	实力秩序
非农业收入增长	收入高速增长 2020-2050: 3.0%/年 2050-2100: 2.3%/年	收入中速增长(逐步增加) 2020-2050: 2.5%/年 2050-2100: 2.3%/年	收入中/低速增长, 随时间有所改善 2020-2050: 1.9%/年 2050-2100: 1.9%/年	发达国家收入中速增长, 发展中国家收入低速增长 2020-2050: 1.0%/年 2050-2100: 1.3%/年
人口增长	人口低增长 2050: 81 亿人口 2010: 61 亿人口	人口中度增长 2050: 88 亿人口 2010: 86 亿人口	人口略微高度增长 2050: 95 亿人口 2010: 98 亿人口	人口高度增长 2050: 96 亿人口 2010: 105 亿人口
投资	人力资本和有形资本投资高	人力资本、有形资本和自然资本投资高	社会范围内的中度投资	发达国家中度投资, 发展中国家低投资
技术进步	中~高	中, 逐渐增加	中/底	底
灌溉区域	灌溉区域显著扩大, 增长效率高	发展中国家部分灌溉区域扩大, 增长效率高	灌溉区域不扩大, 增长效率由低到中	灌溉区域扩大范围小, 增长效率低
其他农业参数	产量增长由低到高, 完全的贸易自由化, 较高的肉产品需求	发展中国家产量增长由低到高; 发达国家产量低增长(有机农业), 完全的贸易自由化, 肉产品需求低	发达国家产量逐渐减少, 由中到低; 肉产品需求低; 现存的贸易壁垒在未来可能降低	发达国家产量增长低, 发达国家肉产品需求高, 发展中国家肉产品需求高, 贸易壁垒增加

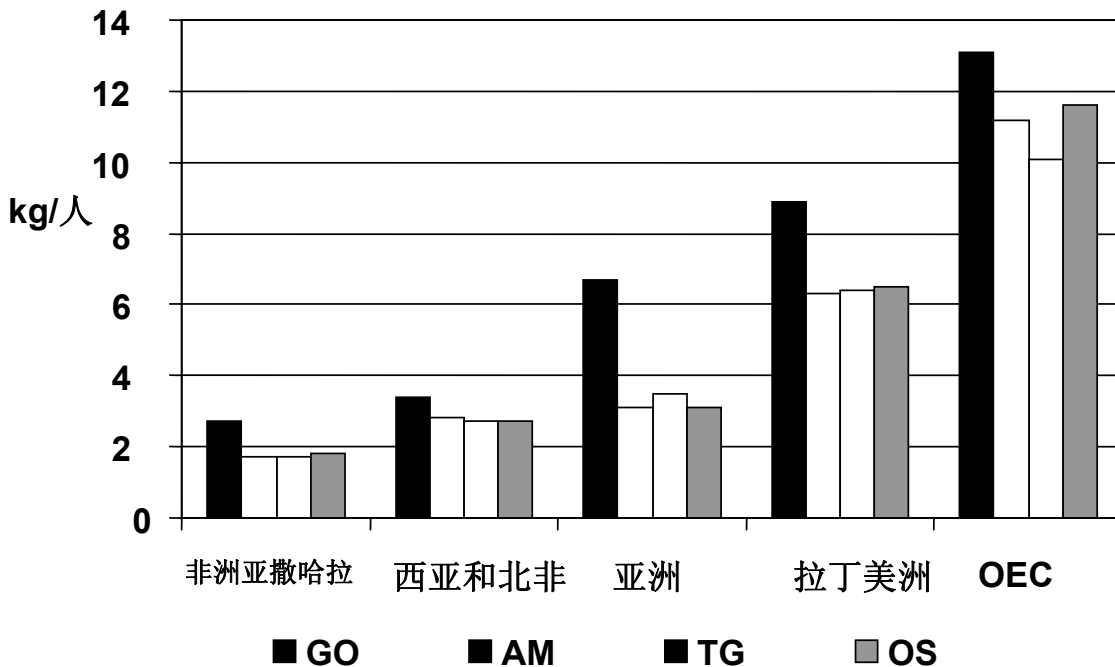
来源: IFPRI-IMPACT 模型参数 (引自 MA)

图1: 1997年人均用作食物的谷类产量, 以及2050年千年生态系统评估各情景中的计划产量



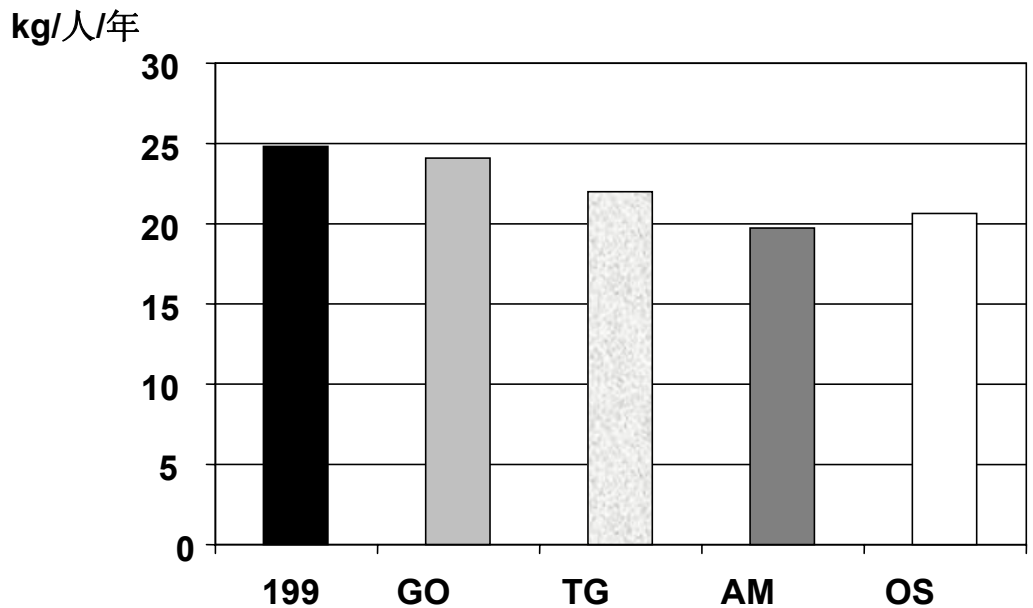
来源: IMPACT模拟 (引自MA)

图2: 2050年千年生态系统评估各情景中的计划人均肉类需求量



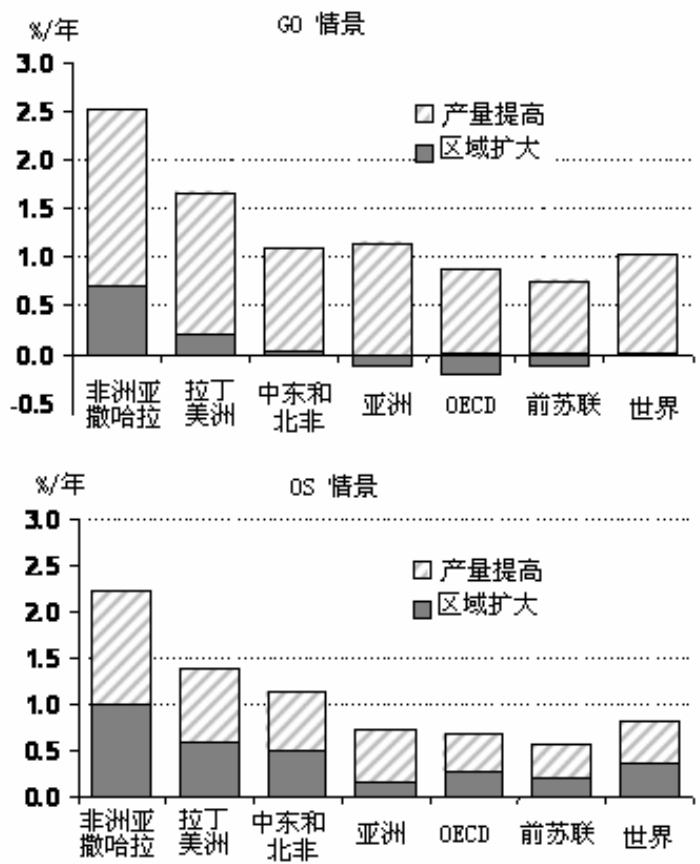
来源: IMPACT模拟 (引自MA)

图 3: 1997年和2050年千年生态系统评估各情景中, 西亚和北非地区人均谷类产量



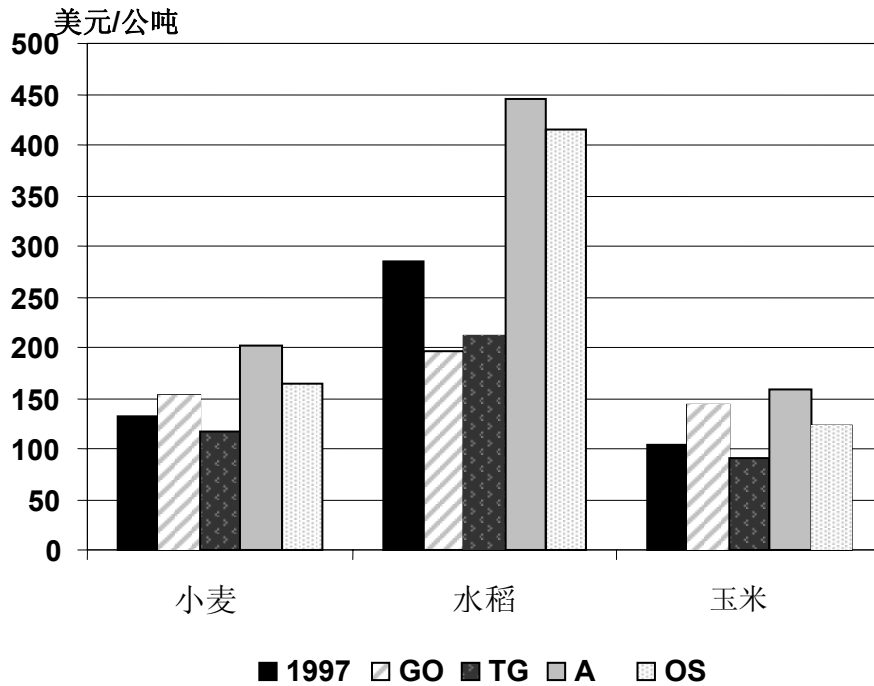
来源：IMPACT模拟（引自MA）

图4: 1997-2050年，千年生态系统评估GO和OS情景中，食物产量增加来源



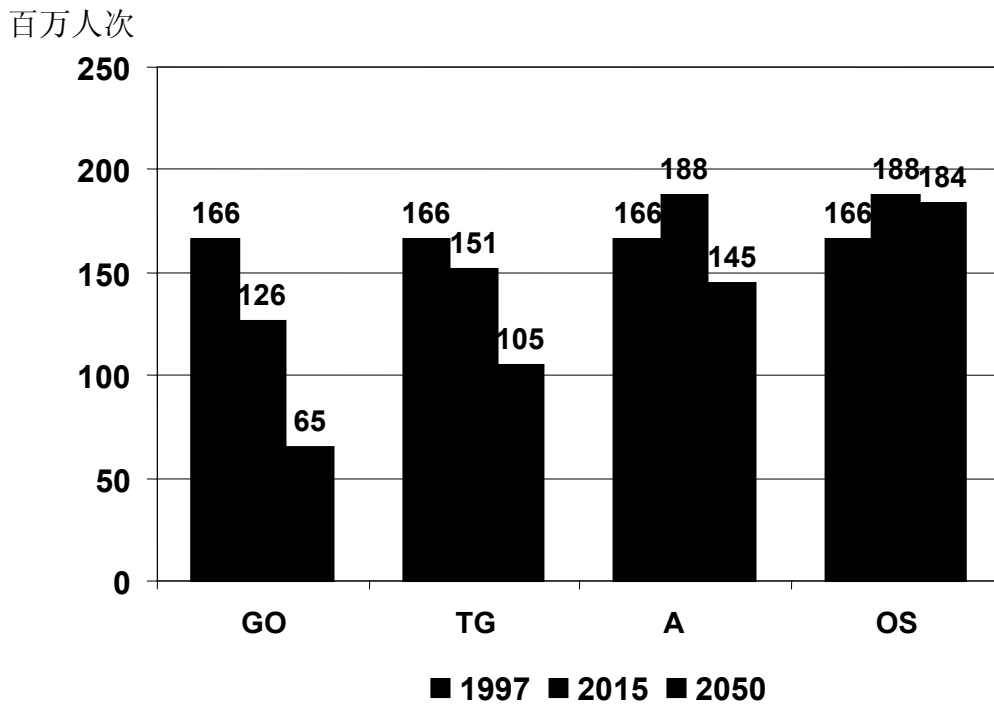
来源：IMPACT模拟（引自MA）

图 5: 千年生态系统评估4情景中, 2050年小麦、玉米和水稻的国际价格



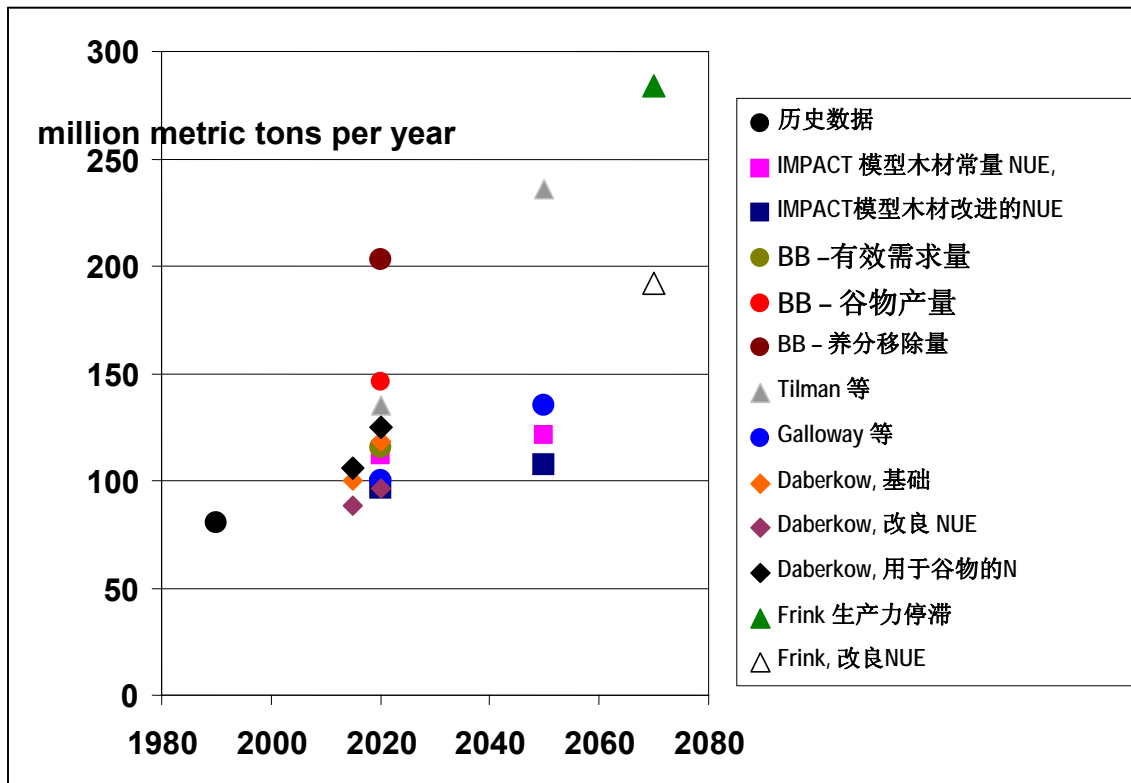
来源: IMPACT模拟 (引自MA)

6: 千年生态系统评估4情景中, 1997年、2015年以及计划2050年营养不良儿童的数量



来源: IMPACT模拟 (引自MA)

图 7: 不同情景中肥料氮元素使用量投影



NUE: 养分利用效率

来源: IMPACT模拟 (引自MA)

框 1 – 全球模拟训练中使用的模型

全球模拟训练中使用的模型包括:

- 美国国际食品政策研究院的IMPACT模型, 用于计算国家和地区食物供应, 需求, 贸易和国际食品价格(Rosegrant等 2001)。
- 德国卡塞尔大学的WaterGAP模型, 用于计算全球水资源的使用和可用性的流域表(Alcamo等 2003)。
- 日本国立环境研究学院的AIM全球变化综合模型, 用于计算地表覆盖和其他指标的全球变化, 重点是亚洲地区(Kainuma 等. 2002)。
- 荷兰国立公共卫生和环境学院的IMAGE 2.2全球变化模型, 用于计算气候和全球地表被覆和其他指标网格比例尺度上的全球变化(Alcamo 等 1998; IMAGE-小组2001)。
- 加拿大大不列颠哥伦比亚大学的Ecopath with Ecosim模型, 用于计算所选的海洋生态系统的由于捕捞造成的动态变化(Pauly 等 2000)。
- 千年生态系统评估的一部分——淡水水生物多样性模型, 在一个河流流域表上鉴定鱼类种群数目的变化, 该变化是改变河流径流的一种因素(Sala 等 2005, Xeonoupoulus 等 2005)。
- 千年生态系统评估的一部分——陆地物种多样性模型, 用于计算陆地生物多样性的总体变化, 该变化是栖息地消失、气候变化、氮元素沉积和外来物种入侵的因素之一(Sala 等 2005)。

来源: MA (2005c); Alcamo 等(2005)。

框 2 –全球氮肥使用方案

全球氮肥使用方案包括时间范围、情景和基本假设。Bumb和Baanante (1996) 研制了以1990年7900万吨的氮肥使用量为基准的2000-2020年氮肥使用方案。他们使用三种方法，“营养物去除法”和“谷类产量法”评估能满足2020年预计的谷类需求的氮的需求量(Rosegrant、 Agcaoili- Sombilla和Perez 1995)，以及“有效肥料需求法”，以经济学、人口统计学和其他因素为基础预计的氮使用量。这三种方法得出的2020年全球氮肥用量分别是2.03亿吨、1.46亿吨和1.15亿吨。

Tilman等人(2001)基于1960年到1999年的氮肥使用量和时间、人口、GDP的线性回归，外推出2020年氮肥使用量的外推平均值是1.35亿吨，2050年是2.36亿吨。Daberkow等人(1999)以粮农组织（FAO）“2015-2030农业前景”(Bruinsma 2003)研究成果为支撑，以播种面积和产量目标为基础，评估相应所需的氮肥用量。研究人员使用“Fertilizer Use By Crop”数据库(FUBCD IFA, IFDC, FAO 1999)，得出三种情景（基础情形，改良营养利用效率（NUE）和谷物的氮肥用量）下谷物特种营养用量和反应速度。预计的氮肥用量分别是2015年1亿吨、0.88亿吨和1.06亿吨；2030年1.18亿吨、0.96亿吨、1.25亿吨。Galloway等人(2004)以Daberkow的“基础情形”2030年的情境为基础，制订出他们的2050年氮肥方案，假定至2050年，氮肥使用量增长率为常数，外推出2050年氮肥用量是1.35亿吨。

Frink、Waggoner和Ausubel (1999)基于2070年100亿人所需的足够的卡路里（1万卡路/人/天），制订氮肥使用方案。情境包括（1）1990年的农业生产水平（营养物使用效率常数和谷物产量）；（2）通过空气沉积施加的氮肥；（3）使用改良的NUE后的平均产量增长；（4）1990年以前使用改良的NUE后的平均产量增长。这些情景的结果分别是2.84亿吨、0吨、1.92亿吨和1.92亿吨。在只通过氮沉积且不另外施加的情况下，谷物种植面积必须扩大到全球面积的207%，也就是说，该情景要达到2070年预计的卡路里需求量是不可能的。

Wood、Henao和Rosegrant (2004)基于“趋势分析”和“未来食物需求情景”的最新的FUBCD数据（MA情景中到2050年的IMPACT方案），设计了一系列氮肥方案。趋势分析基于Bumb和Baanante (1996)最新的“有效需求方法”，并假定作为一个更广泛的土壤肥力修复计划的一部分，在2020年到2050年之间，氮肥用量将高于土壤退化。结果是2020年1.12亿吨和2050年1.71亿吨。考虑到该分析中对氮肥使用效率常数和土壤复原目标保守的估计，这个结果可能是氮肥用量的最大值。“未来食物需求情景”使用两个情景，一个基于Daberko等人(1999)的“谷类的氮肥使用”方法，假定氮肥使用效率为常数；另一个基于“改良的营养使用效率”方法，但也考虑到特殊区域氮肥使用效率。假设NUE为常数时，2020年和2050年预计氮肥用量分别是1.12亿吨和1.21亿吨。假设NUE改良时，相应的产量分别是96吨和107吨。

来源: Wood、Henao和Rosegrant (2004); MA (2005c).