

# 农业 N 肥投入与生态经济效益的协调增长

方 斌<sup>1</sup>, 王光火<sup>2,\*</sup>, 吕昌河<sup>3</sup>

(1. 南京师范大学地理科学学院, 南京 210046 2. 浙江大学环境与资源学院, 浙江 杭州 310029 ;  
3. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101 )

**摘要** 精细养分管理多年的试验结果证明水稻养分投入至少可以比目前减少 25% ,而产量可上升 8% ,同时每公顷可以降低淋溶量和气量近 30% 。利用 TechnoGIN 模型计算养分利用效率 ,其结果表明 :目前水稻 N 的表观吸收利用率仅达到 0.2 ,而采用精细养分管理可提高到 0.3 ,如果采用更先进的技术可以将其提高到 0.4 ,甚至 0.5~0.6 。而目前对于非稻类作物蔬菜 ,N 的表观吸收利用率仅为 0.14 ,如果改进技术将其提高到 0.20 ,N 肥的投入可以减少 32% ,N 的丧失可以减少 29% 。如果能进一步提高到 0.25 ,至少还可以减少 14% 的 N 投入和 16% 的 N 丧失。这样淋溶和气化对环境产生的影响可大大降低 ,从而避免过多的养分通过淋溶渗入土壤和直接挥发到大气中 ,影响生态环境 ,影响农业投入产出效益。因此 ,需要从经济收益、环境效益、社会效益等多方面综合考虑未来农业生态效益协调增长方式。

**关键词** 农业效益 ,协调增长 ,TechnoGIN ,精细养分管理

文章编号 :1000-0933 (2007) 01-0214-06 中图分类号 :Q143 ,S181 文献标识码 :A

## Research on harmonious growth of eco-economy and agricultural N input

Fang Bin<sup>1</sup>, Wang Guanghuo<sup>2,\*</sup>, Lü Changhe<sup>3</sup>

1 School of Geography Science , Nanjing Normal University , Nanjing 210046 , China  
2 The College of Resource and Environmental Science , Zhejiang University , Hangzhou 310029 , China  
3 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research , CAS , Beijing 100101 , China

*Acta Ecologica Sinica* 2007 27 (01) 0214~0219.

**Abstract :** In recent experiments researchers have succeeded in increasing the ANRE (Apparent nitrogen-recovery efficiency) in double rice from 0.2 kg plant N kg<sup>-1</sup> fertilizer N in the farmer's fertilizer practice to 0.3 kg kg<sup>-1</sup> using site-specific nutrient management (SSNM). Despite these recent technological developments , there is still space for improving N-use efficiency in rice. Apparent recovery rates of SSNM are 0.3 kg plant N kg<sup>-1</sup> fertilizer N , while with good management it is possible to achieve rates of 0.5-0.6 in irrigated rice. These rates could be reached through an even more real-time N management. We computed nitrogen requirements and losses for apparent N-recovery rates of 0.4 and 0.5 to gain insight of the consequences of the development and adoption of such technologies for environmental sustainability. The results show that a lot can be gained from these technologies. An increase of the apparent N-recovery of 0.3 to 0.4 results in a decrease in total nitrogen losses of 32 percent for double rice and 25 percent for single rice. A further increase to 0.5 would result in another decrease of 14 and 16 percent points for double and single rice , respectively.

Fertilizer recovery rates are even lower for horticultural production than for rice. we used TechnoGIN to compute

基金项目 欧共体合作资助项目 (ICA4-CT-2001-10055 )  
收稿日期 2005-07-08 ; 修订日期 2006-06-27  
作者简介 方斌 (1968 ~ ) 男 , 江西九江人 , 博士 , 主要从事农业资源利用与管理研究. E-mail : wenyanfang731@163.com  
\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail : ghwang@zju.edu.cn

**Foundation item** The project was financially supported by the European Economic Commission (No. ICA4-CT-2001-10055 )  
**Received date** 2005-07-08 ; **Accepted date** 2006-06-27  
**Biography** Fang Bing , Ph. D. , mainly engaged in agriculture resource use and management. E-mail fangbin375@163.com

potential technologies for the common rotation of greens-celery-rice. We increased the ANRE from 0.14 in farmer practice to 0.20 and 0.25 assuming that yields remain the same. Like SSNM techniques in rice these changes could be achieved by fine-tuning fertilizer gifts to crop requirements. The results of our computations are promising : An increase of the ANRE from 0.14 to 0.20 would result in a decrease in nitrogen fertilizer of 32 percent and a decrease in nitrogen losses of 29 percent. A consecutive increase of the ANRE to 0.25 would imply another decrease in nitrogen costs by 14 percent points and nitrogen losses by 16 percent points. These computations indicate that there is ample scope for the introduction of new technologies that are beneficial for farmer income as well as the environment.

**Key Words :** agricultural benefit ; harmonious growth ; TechnoGIN ; site-specific nutrient management

我国农业的发展令世人瞩目。从 1965 年到 2002 年 ,粮食产量增长了 148% ,蔬菜和瓜果类增长了 703% <sup>[1]</sup>。1985 年 ~ 1993 年 ,由于技术改进而导致农业产量的提高占了 20% <sup>[2]</sup>。这些新技术主要来源于作物品种的改善和农业化肥的强化利用。其中化肥用量的加大和利用技术改进起到了关键性的作用 ,但也刺激了化肥用量的不断上升 ,如 :化肥总用量由 1962 年的  $0.7 \times 10^6$  Mt 上升到 2001 年的  $4.4 \times 10^6$  Mt ,而且中国目前消耗的化肥量大约占了世界总量的 30% <sup>[1]</sup>。

为促进农业产量的提高 ,化肥的强化利用往往会对生态环境产生负面的影响。稻田内氮的气化是全球变暖的助动剂 ,在一定程度上 ,农田养分的流失已导致水体富营养化 <sup>[3~5]</sup>。而且 ,最近对中国北部蔬菜生产区的研究表明 :土壤水和饮用水中硝态氮污染十分严重 <sup>[6]</sup>。在调查的 69 个点中有一半以上的地区 ,饮用水中硝酸根离子含量超过了  $50 \text{ mg L}^{-1}$  的欧洲的极限 ,有的地方硝酸根含量甚至是这一极限的 3.5 倍 <sup>[7]</sup>。在调查点 ,氮肥的使用量过高 :有记录表明 ,每年的氮的投入达到  $1900 \text{ kg hm}^{-2}$  ,造成大量的氮以气体的形式进入大气中。在我国的南部和东部水稻和蔬菜种植地也有类似报道 <sup>[8]</sup>。

尽管目前已经意识到了化肥使用逐级上升 ,导致土壤理化性变劣 ,面源污染不断扩展的严重性 ,正在寻求可持续发展技术研究 <sup>[9,10]</sup>。问题是在减少农业污染上这种研究的潜力到底有多大。也就是说 ,减少农业污染多大程度上依赖新技术 ,多大程度上依赖政策效应 (行政命令、税收控制和发展有机产品)。本文主要探讨如何利用新技术在增加作物产量的同时 ,减少 N 投入 ,降低污染 ,改善生态环境。

2 研究区和研究方法

2.1 研究区的选择

浦江县位于浙江省中部偏西 ,属金华市 ,亚热带季风气候区 ,四季分明 ,气温适中 ,光照充足 ,雨量丰沛 ,自然资源丰富 ,有着良好的农业资源环境。浦阳江、壶源江和大陈江 ,均属钱塘江水系 ,灌溉条件得天独厚。浦阳江横贯浦江盆地 ,壶源江贯穿北部山区。基本实现大面积旱涝保收。从地形上看 ,有平原、山区和半山区 ,符合“七山二水一分田”中国东部地形特征。因而选择浦江县作研究区 ,其结果对于浙江省 ,乃至全国的农业生产都具有很强的代表性和可比性。

2.2 研究方法

2.2.1 TechnoGIN 简介

由荷兰 Wageningen 大学创立的投入产出计算工具 TechnoGIN 模型是 IRMLA (综合资源管理与土地利用分析系统)的主体部分 ,也是目前较为完整的农业投入产出计算工具之一 <sup>[11]</sup>。它利用国际水稻研究所 Witt 等人 30a 的水稻试验数据及其它作物田间试验数据建立 <sup>[12]</sup>。其主体部分 QUEFT (热带土壤肥力的量化性评价)已在 Haryana state (India) , Kedah-Perlis region (Malaysia) , Can Tho province (Vietnam) and Ilocos Norte province (Philippines)等地进行了 4a 的初步运行 ,效果相当不错 <sup>[13]</sup>。Ponsioen ,T. c. 等人于 2003 年 1 月编写出 TechnoGIN 模型最初的版本。通过运用浦江的数据进行校正 ,于 2004 年 3 月 23 日形成较为完善的评判模型。其运行产生的技术系数符合浦江的实际 ,得到了地方专家们的认同 <sup>[14]</sup>。

TechnoGIN 从作物适宜性和潜在产量出发 <sup>[11]</sup> ,根据研究区的生态条件、行政区域建立起土地单元 ,同时

结合目前生产技术水平以及设想未来的发展水平。从而将土地利用类型与作物管理单元、技术水平有机结合进行投入产出分析。该模型是目前较为系统的计算农业效益的综合性模型,能够同时对不同土地单元、不同技术水平下的农作系统进行经济效益评价、养分利用、农药使用、劳动力需求、水需求等进行分析。该模型需求的数据庞大,它利用自然资源数据和社会经济数据建立 TechnoGIN 数据库,由 Technology 表、Crop (作物)表、LUT (土地利用单元)表、LMT (土地管理单元)表、Nutrient (养分)表、Biocides (农药投入)表、Efficiency (效率参数)表、Fertiliser (化肥投入折算)表、Currencies (货币换算)表 9 部分组成。由于数据的庞大、数据库难于完备,很难适合农户、农业中小企业普遍推广,但可以作为县级以上科研与管理单位对土地利用与管理的评价模型。其产生的数据对指导农业生产有很强的参考价值。

## 2.2.2 数据来源

2003 年在欧共体资助项目“农业资源综合管理与土地利用分析 (IRMLA)”的总体框架下,对浙江省浦江县近几年具有代表性作物生产及社会经济状况进行了深入调查。通过实地获取、历史资料搜集、查寻、代表性农户调查等方法获得了浦江县土壤、气候、水文、土地利用现状、近 10a 的农业统计数据、人口、社会经济统计数据以及目前浦江县主要农业系统等相关信息。通过对有关数据进行分析、整理,充分吸纳相关专家知识后,运用 GIS 技术建立浦江县土壤单元图、气候分区图和土地单元图。定义了浦江县主要的 24 种土地利用类型,并对各土地利用类型在 11 个土地单元的适宜性进行了评估,在对各土地单元适宜的农业系统详细分析的基础上建立了浦江县 TechnoGIN 数据库<sup>[4]</sup>。

## 2.2.3 TechnoGIN 中的养分利用模型

本文主要讨论农业的养分利用问题,根据土壤性质(粘性浓度)、降雨量、作物特性、管理效率、N、P、K 的流入和流出、不同的土地利用系统组成间的流动,计算各季作物养分需求量(有机和无机养分库)。

主要计算公式如下:

$$F = \frac{U - S - A}{RF \cdot TF \cdot YF \cdot CY} - \frac{R \cdot MF + H}{TF} \quad (1)$$

$$U - S - A = \left( F + \frac{R \cdot MF + H}{TF} \right) \cdot RF \cdot TF \cdot YF \cdot CF \quad (2)$$

式中  $F$  为公顷肥料施用量 ( $\text{kg hm}^{-2}$ );  $U$  为公顷植物吸收量 ( $\text{kg hm}^{-2}$ );  $RF$  为作物吸收率 ( $\text{kg kg}^{-1}$ );  $TF$  为与作物技术修正因子相关的系数;  $YF$  为与作物产量修正因子相关的系数;  $CF$  为与作物本身修正因子相关的系数;  $MF$  为轮作中来自于前茬作物矿化养分循环的修正因子;  $S$  为长期的土壤养分供应 ( $\text{kg hm}^{-2}$ );  $A$  为大气养分供应 ( $\text{kg hm}^{-2}$ );  $R$  为轮作中从前茬作物回收的养分;  $H$  为轮作中来自于前茬作物灰烬中沉降下来的养分。

在 TechnoGIN 中评估的养分损失是 N 和 K 的淋溶、N 和 K 的固定、反硝化和 N 的挥发。按照一个部分来计算它们,依赖于作物在厌氧和需氧条件下生长的天气、土壤的粘性度、作物生长期间的降雨量。在将来的作物系统中,损失的部分按照下列方式进行评估:

$$LCH = (F + A + S + R + H - U) \cdot \frac{LF}{(LF + FF + DF + VF)} \quad (3)$$

$$FIX = (F + A + S + R + H - U) \cdot \frac{FF}{(LF + FF + DF + VF)} \quad (4)$$

$$DEN = (F + A + S + R - U) \cdot \frac{DF}{(LF + FF + DF + VF)} \quad (5)$$

$$VOL = (F + A + S + R + H - U) \cdot \frac{VF}{(LF + FF + DF + VF)} \quad (6)$$

式中  $LCH$  为淋溶损失 ( $\text{kg hm}^{-2}$ );  $FIX$  为固定损失 ( $\text{kg hm}^{-2}$ );  $DEN$  为反硝化损失 ( $\text{kg hm}^{-2}$ );  $VOL$  为挥发损失 ( $\text{kg hm}^{-2}$ );  $LF$  为由于淋溶而造成的养分损失率 ( $\text{kg kg}^{-1}$ );  $FF$  为由于固定而造成的养分损失率 ( $\text{kg kg}^{-1}$ );  $DF$  为由于反硝化而造成的养分损失率 ( $\text{kg kg}^{-1}$ );  $VF$  为由于挥发而造成的养分损失率 ( $\text{kg kg}^{-1}$ )。

3 TechnoGIN 效益分析的结果与讨论

多年的精细养分管理 ,按照田间每一操作单元的具体条件 ,精细准确地调整土壤和作物的各项管理措施 ,最大限度地优化使用各项农业投入 ,以获取最高产量和最大经济效益 ,同时保护农业生态环境、保护土地等农业自然资源。其主要技术如下 : (1 )确定区域性水稻目标产量 ; (2 )在田间设立缺肥小区测定土壤 NPK 潜在供应能力 ; (3 )运用养分决策系统 (NuDSS )软件计算水稻需 NPK 肥总量 ; (4 )从水稻的生理性需求和 N 素平衡发 ,调节 N 肥分次施用时期 ; (5 )应用叶色卡确定水稻关键生育期 N 肥施用量 ; (6 )采用常规土壤测试方法 ,确定 P、K 肥施用量 ,以及进行微量元素诊断和矫正 ,保证养分的平衡供应<sup>[15,16]</sup>。 )的试验研究结果 ,对比分析农业发展的现状 ,可以发现 ,与农户实践相比 ,精细养分管理试验可以提高水稻单产的 8% ,同时可以减少 N 肥用量 25%。对双季稻可减少淋溶和气化的量分别为 26% 和 32% ,单季稻对应减少 20% 和 19%<sup>[17]</sup>。利用 TechnoGIN 计算 ,目前双季稻 N 的表观吸收利用率为 0.2 ,而采用精细养分管理技术 ,双季稻 N 肥的表观吸收利用率为 0.3 ,这与精细养分管理浙江金华试验区所报道的十分一致 (其报道的农户实践 N 的表观回收率为仅为 0.19 ,而精细养分管理可达 0.31 )。而从浙江金华试验区最新的资料表明 ,对于单季稻 ,通过采用精细养分管理 ,可将灌溉中稻 N 肥的表观吸收利用率提高到 0.45 ,而其它试验区甚至可达 0.6、0.7 以上<sup>[18]</sup>。利用 TechnoGIN 计算 ,可以发现 ,如果表观吸收利用率从 0.3 提高到 0.4 ,N 的丧失对双季稻可减少 32% ,单季稻可减少 25% ,而从 0.4 提高到 0.5 ,则双季稻和单季稻可分别再提高 14% 和 16%。显然 ,如果普遍采用精细养分管理技术 ,可节约大量投入成本 ,更重要的是能降低淋溶和气化的量<sup>[14]</sup> ,减少环境污染。而如果再结合控释肥、水份退用、反硝化抑制剂等新技术 ,可能更能提高 N 的利用率。具体情况见表 1。

表 1 水稻生产中农户实践和改善的技术之间 N 的利用与丧失比较

Table 1 Comparison of N use and losses between farmer practice and improved technologies for rice		
项目 Items	双季稻 Early-late rice	单季稻 Single rice
农户实践 Farmer practice		
产量 Yield (10 <sup>3</sup> kg·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	10.7	7.1
N 肥 N-fertilizer (kg·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	350	200
N 的淋溶 N-leaching (kg·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	28.2	21.3
N 的气化 Gaseous N-losses (kg·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	221.7	138.8
精细养分管理 Site-specific nutrient management (SSNM)		
产量 Yield (10 <sup>3</sup> kg·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	11.5 (8%)	7.7 (8%)
N 肥 N-fertilizer (kg·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	263.0 (-25%)	150.0 (-25%)
N 的淋溶 N-leaching (kg·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	20.9 (-26%)	17.0 (-20%)
N 的气化 Gaseous N-losses (kg·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	151.3 (-32%)	112.0 (-19%)
将来定向的技术 :N 的表观吸收利用率 =0.40		
Future-oriented technology : apparent N-recovery =0.40		
产量 Yield (10 <sup>3</sup> kg·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	11.5 (0%)	7.7 (0%)
N 肥 N-fertilizer (kg·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	198.2 (-25%)	105.0 (-30%)
N 的淋溶 N-leaching (kg·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	14.7 (-30%)	12.0 (-29%)
N 的气化 Gaseous N-losses (kg·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	100.1 (-34%)	87.9 (-22%)
将来定向的技术 :N 的表观吸收利用率 =0.50		
Future-oriented technology : apparent N-recovery =0.50		
产量 Yield (10 <sup>3</sup> kg·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	11.5 (0%)	7.7 (0%)
N 肥 N-fertilizer (kg·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	132.0 (-50%)	84.0 (-44%)
N 的淋溶 N-leaching (kg·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	12.0 (-43%)	10.0 (-41%)
N 的气化 Gaseous N-losses (kg·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	81.0 (-46%)	52.0 (-54%)

数据来源 :农户水稻产量和肥料的利用是调查数据的平均数 ,SSNM 产量比农户调查产量高 8% 是长期的田间试验<sup>[19]</sup> ;精细养分管理中 ,肥料的使用是建立在 N 的表观吸收利用率为 0.27 ,固有营养供应为 0.7 kg·d<sup>-1</sup><sup>[19]</sup> ;所有 N 的丧失都是利用 TechnoGIN 计算的 ,精细养分管理中括号内的数据与农户实践相比较产生的 ,将来的技术中括号的数据是与精细养分管理相比较得出的 ,表观氮肥吸收利用率 (RE)是指施肥区作物氮素积累量与空白区氮素积累量的差占施用氮肥总氮量的百分数<sup>[12]</sup>

Sources :Farmer yields and fertilizer use are survey averages ;Yields for SSNM are 8% higher than average farmer yields<sup>[19]</sup> ;Fertilizer use for SSNM is computed based on an apparent N recovery of 0.27 and indigenous nutrient supply of 0.7 kg/day<sup>[19]</sup> ;All nitrogen losses are computed by TechnoGIN ;Numbers in parentheses are change with respect to farmer practice for SSNM and changes with respect to SSNM for future technologies ;ANRE = (crop uptake N-uptake N on 0 N plot )/N fertilizer

与水稻相比,蔬菜的 N 肥利用率更低,在提高蔬菜和水果等非水稻作物的 N 肥利用率上,相关报道较少。为了弥补这一缺陷,可以借助了 TechnoGIN 工具。通过计算,现有的农户,蔬菜 N 的表观吸收利用率仅为 0.14,如果能达到精细养分管理水平,将蔬菜 N 的表观吸收利用率提高到 0.20,N 肥的投入可以减少 32%,N 的丧失可以减少 29%。如果能进一步提高到 0.25,至少还可以减少 14% 的 N 投入和 16% 的 N 丧失,淋溶和 气化对环境产生的影响可降低。而通过计算,如果通过新的技术采用,N 利用率提高范围相当大,可显著增加 农民投入的产出效益。具体见表 2。

4 结论

农业的投入,很多是意念上的投入,对于农民来说,其个性思维就是投入越多,效益越好,从而导致农业化肥的投入不断增加。但是边际成本效益理论、经典试验以及 TechnoGIN 的模拟结果都明确得出养分平衡才是作物生长的良好环境。因此,如果能够以县级为单元,以精细养分试验为基础,以 TechnoGIN 产生的与不同作物、不同品种、不同区域、不同土质所产生的相对应的技术系数为对照,确定各区域范围内各种作物养分可调整范围,结合农业生态学与土壤生态学理论,科学指导农户施肥量、施肥时间、施肥种类,实现区域农业 N 肥的有目标、有方向的减少和生态效益逐步提升,同时以 TechnoGIN 将来定向技术系数为发展目标,建立区域范围对比试验,推广精细养分管理技术的应用区域(与农户养分利用相比,与长期定位经典试验的结果相比,与 TechnoGIN 提出的高技术结果相比),进一步改善养分利用的技术手段、技术方法、技术条件和作物生长环境,培养农户合理养分利用,从而促进农业经济与生态效益协调发展。

研究结果表明,经济作物蔬菜和水果,目前 N 肥的利用效率更低。蔬菜 N 的表观养分吸收利用率,目前仅能达到 0.14,只要从养分集约意识和技术上改进,采用类似于精细养分管理的方法,对化肥种类和用量上给予一定的控制,实现 N 的表观养分吸收利用率达到 0.20、0.25 是完全可能的。如果这样,每公顷可减少 N 肥用量可达到 300~400kg,淋溶、气化的量可减少近 22%~54%。

References :

[1] FAO. FAOSTAT. <http://apps.fao.org> 2004.

[2] Fan S G, Pardey P G. Research, Productivity, and Output Growth in Chinese Agriculture. *Journal of Development Economics*, 1997, 53 (1): 115-137.

[3] Drapper D. Pollution concentration in road run of south-east Queensland case study. *Journal of Environment Engineering* 2000, (4) 313-320.

[4] Ellis E C, Wang S M. Sustainable Traditional Agriculture in the Tai Lake Region in China. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 1997, 61: 177-193.

[5] Lei A P, Hu ZL, Wang J *et al.* Structure of the phytoplankton Community and Its Relationship to Water Quality in Donghu Lake, Wuhan, China. *Journal of Integrative Plant Biology* 2005, 47 (1) 27-37.

表 2 蔬菜生产中农户实践和改善的技术之间 N 的利用与丧失比较  
Table 2 Comparison of N use and losses between farmer practice and improved technologies for vegetables

项目 Items	大白菜-芹菜-萝卜 Cabbage-celery-radish
农户实践 Farmer practice	
产量 Yield ( $10^3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )	42.2-50-30
N 肥 N-fertilizer ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )	920
N 的淋溶 N-leaching ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )	449.1
N 的气化 Gaseous N-losses ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )	242.3
将来定向的技术 N 的表观吸收利用率 = 0.20 Future-oriented technology : apparent N-recovery = 0.20	
N 肥 N-fertilizer ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )	625 (-32%)
N 的淋溶 N-leaching ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )	330 (-27%)
N 的气化 Gaseous N-losses ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )	168 (-31%)
将来定向的技术 N 的表观吸收利用率 = 0.25 Future-oriented technology : apparent N-recovery = 0.25	
N 肥 N-fertilizer ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )	500 (-46%)
N 的淋溶 N-leaching ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )	259 (-42%)
N 的气化 Gaseous N-losses ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )	132 (-46%)

数据来源:农户蔬菜产量和肥料的利用是调查数据的平均数,将来的技术和 N 的丧失是通过 TechnoGIN 计算的;所有产量都被假设是同等的,与实际调查的平均值一致;括号里的数据与农户实践相比较产生的

Farmer yields and fertilizer use are survey averages; Future technologies and nitrogen losses are computed by TechnoGIN as described in Table 2; Yields are assumed identical for all technologies; Quantity in parentheses represents change with respect to the farmer practice

[6 ] Zhang W L , Tian Z X , Zhang N *et al.* Nitrate Pollution of Groundwater in Northern China , Agriculture , Ecosystems and Environment , 1996 59 ( 3 ) :223 — 231.

[7 ] Aneja VP ,Murray GM ,Southerland J. Atmospheric nitrogen compounds :Emissions ,transport ,transformation ,depo sition and assessment. Environ Man ,1998 , (4 ) 22 — 25.

[8 ] Sheldrick W F ,Syers J K ,Lingard J. Soil Nutrient Audits for China to Estimate Nutrient Balances and Output/Input Relationships. Agriculture Ecosystems & Environment 2003 94 ( 3 ) :341 — 354.

[9 ] Luijckx T. Troubled Water , Agricultural Non-Point Pollution in the Catchment Area of Taihu Lake. MSc thesis. Wageningen : Wageningen University , 2002.

[10 ] Smil V. Food ,Energy , and the Environment :Implications for Asia's Rice Agriculture. In :Dowling ,N. G. ,S. M. Greenfield and K. S. Fischer eds. Sustainability of Rice in the Global Food System. Davis (USA ) and Manila (Philippines ) :Pacific Basin Study Center and International Rice Research Institute , 1998.

[11 ] Ponsioen T. TechnoGIN : a technical coefficient generator for cropping systems in Llocos Norte Province , Philippines. 1 M. Sc. thesis 2003.

[12 ] De Wit C , Van Keulen H ,Seligman N ,*et al.* Application of interactive multiple goal programming techniques for analysis and planning of regional agricultural development. Agricultural Systems , 1988 26 ( 3 ) 211 — 230.

[13 ] Hengsdijk H ,Nieuwenhuysen A ,Bouman B. LUCTOR :Land Crop Technical Coefficient Generator. A model to quantify cropping systems in the Northern Atlantic zone of Costa Rica. version 2. 0 Quantitative Approaches in systems Analysis. AB-DLO/C. T. de Wit Graduate school for Production Ecology ,Wageningen ,1998.

[14 ] Fang B ,Wang G H. Analysis of crop nutrition limiting factors by TechnoGIN in Pujiang county of Zhejiang Province. Journal of Zhejiang University , 2005 31 ( 4 ) 417 — 422.

[15 ] Peng S B ,Huan X L ,Zhong X H ,*et al.* Research strategy in improving fertilizer-nitrogen use efficiency of irrigated rice in China. Agricultural Science in China 2002 35 ( 9 ) 1095 — 1103.

[16 ] Wang G H ,Zhang Q C ,Huang C Y. SSNM-A new approach to increasing fertilizer N use efficiency and reducing N loss from rice fields ,Journal of Zhejiang University , 2003 29 ( 1 ) :67 — 70.

[17 ] Wang G H ,Dobermann A ,Witt C *et al.* performance of site-specific nutrient management for irrigated rice in southeast China. Agronomy J 2001 , 93 869 — 878.

[18 ] Peng S B ,Roland J B ,Huang J L. Strategies for overcoming low agronomic nitrogen use efficiency in irrigated rice systems in China. Field Crops Research , 2006 96 ( 4 ) 37 — 47.

[19 ] Wang G H ,Sun Q ,Fu R X ,*et al.* Site-specific nutrient management in intensive irrigated rice systems of Zhejiang province , China. . In Dobermann A *et al.* (ed. ) Increasing productivity of intensive rice systems through site - specific nutrient management. Science Publishers , Inc. , International Rice Research Institute , Enfield , NH (USA ) and Los Banos , Philippines 2004.

参考文献 :

[14 ] 方斌 ,王光火. 对浙江省浦江县作物养分限制因子的 TechnoGIN 分析. 浙江大学学报 2005 31 ( 4 ) 417 ~ 422.

[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. 中国农业科学 2002 35 ( 9 ) 1095 ~ 1103.

[16 ] 王光火 ,张奇春 ,黄昌勇. 提高水稻氮肥利用率、控制氮肥污染的新途径——SSNM. 浙江大学学报 2003 , 29 ( 1 ) 67 ~ 70.