

不同水管理方式下水稻生长季 N_2O 排放量估算: 模型验证和输入参数检验

邹建文¹, 刘树伟¹, 秦艳梅¹, 冯得胜², 朱会林³, 徐永忠³

(1. 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095; 2. 江苏省农林厅, 南京 210036; 3. 江苏省兴化市农业局, 兴化 225700)

摘要: 利用 2005~2007 年我国稻田 N_2O 排放通量的田间原位测定资料和国际上其它地区稻田 N_2O 报道结果, 对作者建立的不同水管理方式下水稻生长季 N_2O 排放估算模型进行了验证。结果表明, 持续淹水稻田 N_2O 排放的拟合结果与其他地区淹水稻田 N_2O 通量值相一致。淹水-烤田-淹水的水管理方式下, 稻田 N_2O 排放的拟合值接近于国际上同类研究结果。淹水-烤田-淹水-湿润灌溉的水管理方式下, 稻田 N_2O 排放的估算模型对田间原位测定资料有很好的适用性。为了检验模型输入参数的可信度, 将本研究建立的有关我国水稻生产的相关资料数据库与以往研究报道结果进行了比较, 结果表明, 两者具有高度的一致性。数据库资料表明, 在 20 世纪 50~70 年代间, 持续淹水稻田占 20%~25%, 大约 75%~80% 的稻田采用淹水-烤田-淹水的水管理方式。在 20 世纪 80~90 年代间, 采用持续淹水, 淹水-烤田-淹水和淹水-烤田-淹水-湿润灌溉水管理方式的稻田分别约占 12%~16%、77% 和 7%~12%。20 世纪 50 年代水稻生长季平均每季总施氮量为 $87.49 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 而 90 年代平均为 $224.64 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。其中, 化学氮肥的施用量从 20 世纪 50 年代的 $37.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 增加到了 90 年代的 $198.8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 分别占水稻生长季氮输入总量的 43% 和 88%。在 20 世纪 50~70 年代间有机氮的输入量相对比较稳定, 平均变幅在 $45.2 \sim 48.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 之间, 随后逐步降低, 有机肥料氮占氮输入总量的比例从 20 世纪 50 年代的 52% 降低到了 90 年代的 9%。作物残体 N 输入量从 20 世纪 50 年代的 $4.9 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 增加到了 80 年代的 $6.3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。20 世纪 50~70 年代水稻生长季氮肥施用量具明显的空间变异性, 而 80~90 年代间其空间变异较小。模型验证和输入参数检验的结果表明, 该模型能较好地模拟我国不同水管理方式下的稻田 N_2O 直接排放量。

关键词: 稻田; 模型验证; 参数检验; 氧化亚氮; 水管理; 氮肥

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)04-0937-12

Quantifying Direct N_2O Emissions from Paddy Fields During Rice Growing Season in China: Model and Input Data Validation

ZOU Jian-wen¹, LIU Shu-wei¹, QIN Yan-mei¹, FENG De-sheng², ZHU Hu+lin³, XU Yong-zhong³

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2. Jiangsu Agriculture & Forestry Department, Nanjing 210036, China; 3. Agriculture Bureau of Xinghua County, Jiangsu Xinghua 225700, China)

Abstract: The models on direct N_2O emissions from rice paddies under different water regimes developed by the authors were validated against field measurements in China reported in 2005-2007 and in other regions. In flooding rice paddies (F), N_2O emission predicted by the model was consistent with previous reports in other regions. Under the water regime of flooding-midseason drainage-reflooding (F-D-F), the model developed in this study was comparable to that established by using worldwide database. The models also well fitted N_2O emissions from rice paddies under the water regime of flooding-midseason drainage-reflooding-moisture but without waterlogging (F-D-F-M) in China. Consistency of rice production data derived from the database of this study with those reported in previous studies suggests that the model input data of rice production had high reliability. The input data showed that water management and nitrogen input regimes have greatly changed in rice paddies since the 1950s. During the 1950s-1970s, about 20%-25% of the rice paddy was continuous water logging, and 75%-80% under the water regime of F-D-F. Since the 1980s, about 12%-16%, 77% and 7%-12% of paddy fields were under the water regimes of F, F-D-F and F-D-F-M, respectively. Total N input during the rice growing season averaged $87.49 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ in the 1950s and $224.64 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ in the 1990s. Chemical N input during the rice growing season has increased from $37.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ in the 1950s to $198.8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ in the 1990s, accounting for 43% and 88% of the seasonal total N inputs, respectively. Manure N input was applied at stable rate, ranging from $45.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ to $48.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ during the 1950s-1970s, but thereafter it decreased over time. The contribution of manure N to total N inputs has decreased from 52% in the 1950s to 9% in the 1990s. Crop residue N retained during the rice growing season has increased from $4.9 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ in the 1950s to $6.3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ in the 1980s. A high spatial variation of nitrogen inputs during the rice growing season was found in the

收稿日期: 2008-05-04; 修订日期: 2008-07-07

基金项目: 中国博士后科学基金项目(20080430173); 高等学校博士学科点专项科研基金项目(200803071010); 南京农业大学引进杰出人才项目(804090)

作者简介: 邹建文(1971~), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为碳氮循环与全球变化, E-mail: jzou21@njau.edu.cn

1950s-1970s, while it was not pronounced in the 1980s-1990s. Overall, the results of this study suggest that the models could be used to quantify direct N_2O emissions from rice paddies under various water regimes in China.

Key words: rice paddies; model validation; input data verification; nitrous oxide; water regime; nitrogen fertilizer

氧化亚氮(N_2O)是最重要的温室气体之一,大气中 N_2O 浓度以每年大约0.26%的速度递增,农业生产所导致的 N_2O 排放量大约占人为源排放总量的60%^[1].就全球尺度而言,由于大量化学氮肥和有机肥的施用,1990~2005年间农业 N_2O 排放量增加了将近17%^[1].虽然早期研究认为稻田无明显 N_2O 排放,20世纪80年代以来的大量研究表明稻田水分管理方式的不同会导致较高的 N_2O 排放^[2-4],此后,稻田 N_2O 排放受到了国内外学者的普遍重视.

许多学者定量估算了我国稻田 N_2O 直接排放量^[5-10].根据估算方法学的不同,可将其划分为两类:基于过程的机制模型(如DNDC模型)估算和基于对报道结果进行统计分析的经验模型(如IPCC排放系数法的经验方程)估算.一般认为机制模型能够准确描述 N_2O 产生的具体过程,因而可望有效地降低 N_2O 排放估算的不确定性,但所需的输入参数较多.随着DNDC模型近几年的发展,该模型已经被频繁地用于我国稻田 N_2O 排放的定量估算,虽然其建立之初主要用来模拟旱作土壤的碳循环和 CO_2 排放^[7-10].除了过程模型外,经验模型也被IPCC推荐用来估算施肥所导致的 N_2O 直接排放量.相对于过程模型,经验模型采用统计分析方法拟合稻田 N_2O 排放量,所需的输入参数较少.基于模型和已有文献报道资料的分析总结,一些学者估算了区域和全球尺度上稻田 N_2O 的排放系数和背景排放量^[6,11].IPCC^[12]指南推荐采用Akiyama等^[11]的研究结果来编制稻田 N_2O 直接排放的国家清单.同时,IPCC建议各国应尽量采用适合本国农田的 N_2O 排放系数,以充分反映该国农作物的具体管理措施和生产状况.

鉴于Akiyama等的结果可能并不充分反映我国多种水分管理方式下的稻田 N_2O 排放情况,为此,笔者在收集我国稻田 N_2O 排放田间观测资料的基础上,采用最小二乘法统计回归技术,建立了用于确定我国不同水分管理下的稻田 N_2O 排放系数和背景排放量的经验模型^[13].本研究的主要目的是对业已建成的稻田 N_2O 排放系数和背景排放量的估算模型进行有效性验证,在此基础上建立模型输入

所需的我国水稻生产的相关数据库,并对输入参数进行检验,以期为基础模型的应用奠定基础.

1 模型与数据源

1.1 统计模型

基于稻田水稻生长季 N_2O 排放的17组田间试验研究所得到的71个通量测定结果,依赖于不同水分管理方式下的 N_2O 直接排放因子和背景排放,通过不同的经验模型得以阐述^[13].

$$\text{模型 F: } N_2O-N = 0.0002N \quad (1)$$

$$\text{模型 F-D-F: } N_2O-N = 0.0042(\pm 0.0006)N \quad (2)$$

$$\text{模型 F-D-F-M: } N_2O-N = 0.79(\pm 0.28) + 0.0073(\pm 0.0011)N \quad (3)$$

具体而言,对于持续淹水(F)的稻田 N_2O 季节排放总量平均相当于氮施用量的0.02%[模型F,方程(1)].在淹水-烤田-淹水(F-D-F)的水分管理方式下,采用普通最小二乘法线性回归模型所得出的稻田 N_2O 季节背景排放不明显,水稻生长季 N_2O 排放系数平均为0.42%,标准误为0.06%[模型F-D-F,方程(2)].而在淹水-烤田-淹水-湿润灌溉(F-D-F-M)的水分管理方式下,水稻生长季 N_2O-N 排放系数和背景排放量平均分别为0.73%和0.79 $kg \cdot hm^{-2}$,标准误分别为0.11%和0.28 $kg \cdot hm^{-2}$ [模型F-D-F-M,方程(3)].上述方程(1)~(3)中的 N_2O-N 排放系数为0.0002、0.0042和0.0073 $kg \cdot hm^{-2}$,分别被用来估算持续淹水、淹水-烤田-淹水和淹水-烤田-淹水-湿润灌溉3种不同水分管理方式下氮肥施用所导致的 N_2O 直接排放量.

1.2 输入参数的数据库建立

为了模型的参数输入,笔者收集和整理了我国各级政府农业统计年报和以县为单位的农业普查资料和问卷,在此基础上建立了20世纪50~90年代间有关我国水稻生产的数据库.对于每个县,如果农业普查数据和官方年报统计资料之间的差异>10%,则这些调查数据将不被采用.最终,每年以省为单位的数据库分别由300多个调查数据汇总而成,水稻种植面积数据直接来自于国际水稻所(IRRI).Frolking等^[14]利用遥感和地面调查资料,于2002年建立了我国水稻生产的全国分布图.其中,根据农业气候条件,将我国水稻生产划分为5个种

植区。为了跟 DNDC 模型对我国稻田 N_2O 排放估算结果相比较^[8,9], 与 Frohking 等^[14]的划分相一致, 本研究亦将我国稻田划分为 5 个种植区(图 1), 分别为: I 区-北方和东北地区, 包括黑龙江、内蒙古、辽宁和吉林省; II 区-华北平原和中西部地区, 包括河

南、河北、天津、北京、宁夏、陕西、山西、山东、新疆和甘肃省; III区-西南地区, 包括贵州、四川、重庆和云南省; IV区-长江中下游地区, 包括安徽、湖北、湖南、江苏、江西、上海和浙江省; V 区-华南地区, 包括福建、广东、广西和海南省。以县为单位的数据库包含了水稻产量、水分管理方式、作物残体还田量、有机氮肥和化学氮肥施用量等数据。采用 1950~1959 年之间数据的平均值作为 20 世纪 50 年代的代表值, 其它年代也是如此。

季节性氮的总输入量包括还田的作物残体, 农家有机肥和化学氮肥输入量。水稻生产中化肥涵盖了我国农业生产中常用的主要含氮化学肥料, 包括尿素、复合肥、硫酸铵和碳铵等。除了化学氮肥外, 农家有机肥和植物残体一般被作为基肥在水稻移栽前施用。稻田中的作物残体包括小麦、大麦、大豆、蔬菜和油菜等前茬作物。作物残体的含氮量数据来自于 IPCC 指南^[12], 平均为 0.45%。作物残体还田的氮输入量由各种作物残体还田量乘以各自的含氮量而得。农家有机肥的含氮量平均为 0.61%^[15]。因为本研究采用的统计模型并未区分有机氮肥和无机氮肥施用所导致的 N_2O 排放量差异, 所以水稻生长季氮的总输入量被用来估算 N_2O 的直接排放量。

1.3 模型验证和输入参数检验

采用 2005~2007 年所报道的 N_2O 季节排放通量田间测定结果的独立数据源以验证模型 F-D-F-M (表 1, 图 2)。由于没有持续淹水的稻田或在 F-D-F 的水分管理方式下稻田 N_2O 排放通量测定结果的独立数据源, 模型 F 和模型 F-D-F 的直接验证较为困难。为此, 笔者采用 Akiyama 等^[11]基于全球稻田 N_2O 通量测定资料的模型拟合结果与模型 F-D-F 相比较以验证其有效性。模型 F 的有效性通过与其它地区持续淹水稻田 N_2O 通量测定结果的比较得以验证。就与水稻生产相关的输入参数可信度而言, 采用国际水稻所数据库与本研究数据库的水稻产量相比较得以检验。数据库中水分管理方式和氮输入量与相关专著、会议报道以及期刊论文等报道结果的一致性用以证明输入参数的有效性。

2 结果与讨论

2.1 模型验证

为了验证淹水-烤田-淹水-湿润灌溉的水分管理方式下的估算模型(模型 F-D-F-M)对我国稻田 N_2O 排放的适用性, 本研究收集了 2005~2007 年淹水-

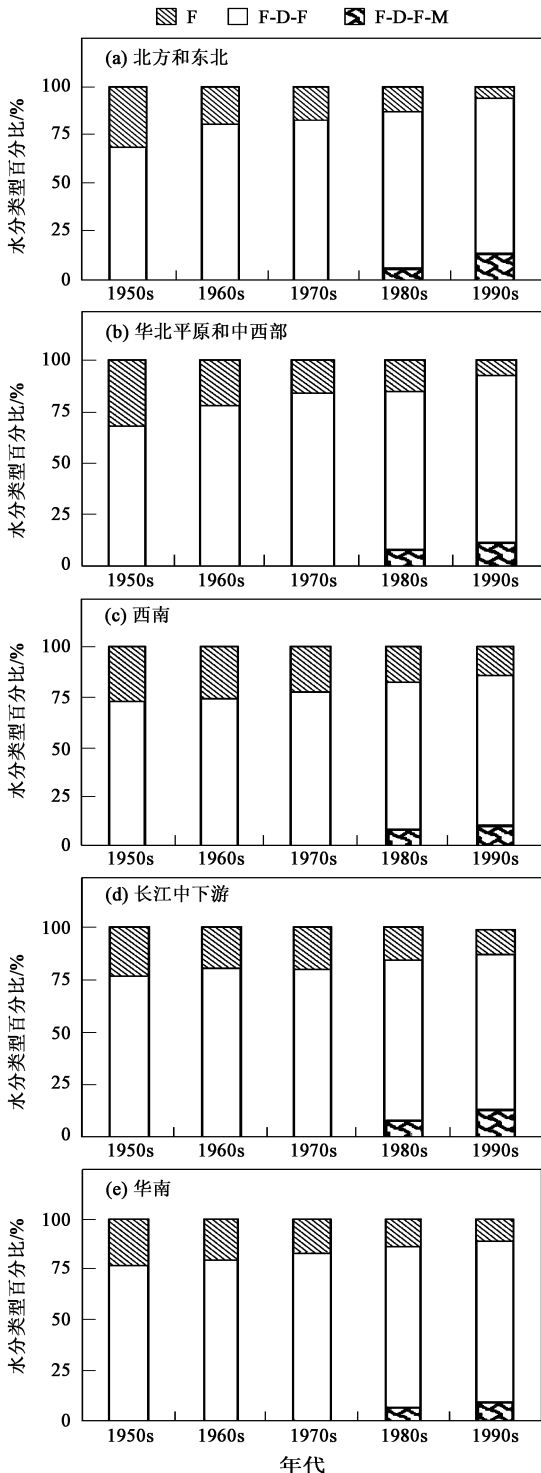
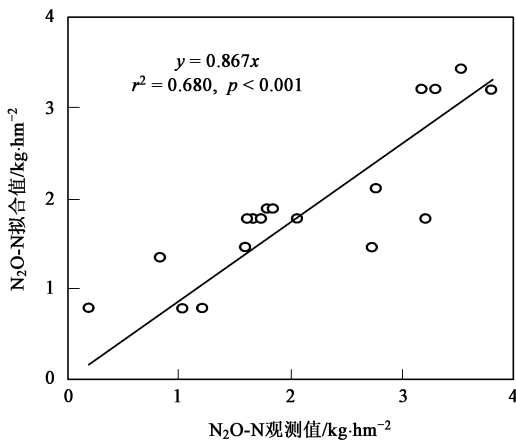


图 1 20 世纪 50~90 年代我国稻田水分管理方式的变化

Fig. 1 Shifts in water regime of rice paddies for the 5 crop-zone regions in mainland China from the 1950s to 1990s

表 1 淹水-烤田-淹水-湿润灌溉水分管理方式下稻田 N_2O -N排放的模型拟合值和实测值Table 1 Observed and modeled N_2O emissions from paddy fields under the water regime of F-D-F-M during rice growing season

地点	年份	N 输入 /kg·hm ⁻²	N_2O -N 观测值 /kg·hm ⁻²	N_2O -N 拟合值 /kg·hm ⁻²	文献
广东鹤山	2003	331	3.32	3.20	[16, 17]
四川盐亭	2002	133	1.66	1.76	[18]
	2003	133	3.21	1.76	[18]
		133	1.62	1.76	[18]
		133	1.75	1.76	[18]
		133	2.06	1.76	[18]
浙江嘉兴	2003	90	2.74	1.45	[19]
		180	2.78	2.10	[19]
		360	3.54	3.42	[19]
江苏南京	2003	300	3.80	3.20	[20]
	2004	300	3.19	3.20	[21]
辽宁沈阳	2004	150	1.80	1.89	[22]
	2004	0	1.21	0.79	[23]
		150	1.80	1.89	[23]
湖南望城	2004	0	1.03	0.79	[24, 25]
		0	0.20	0.79	[24, 25]
		75	0.83	1.34	[24, 25]
		90	1.60	1.45	[24, 25]
黑龙江三江平原	2004~2005	150	1.84	1.89	[26]

图 2 淹水-烤田-淹水-湿润灌溉水分管理方式下稻田 N_2O 排放的观测值和拟合值比较(数据见表 1)Fig. 2 Comparison of simulated with measured seasonal N_2O emissions from rice paddies under the water regime of F-D-F-M

烤田-淹水-湿润灌溉水分管理方式下的我国稻田 N_2O 排放通量的原位测定资料,其独立于 N_2O 排放量估算模型建立的数据源^[13]。这些通量资料来源于我国 7 个省份(广东、黑龙江、湖南、江苏、辽宁、四川和浙江),除北部和中西部之外,覆盖了我国的主要水稻种植区。表 1 为稻田 N_2O 季节排放总量的观测值和模型拟合值,结果表明淹水-烤田-淹水-湿润灌溉的水分管理方式下,统计模型 F-D-F-M 能够很好地用于估算水稻生长季 N_2O 排放量,虽然模型估算得到的 N_2O 排放结果一般要比实际观测值低

13%左右(图 2)。相对于模拟结果而言,较高的 N_2O 实测值可能是由于在当前的水稻生产中,更多田块在水稻生育后期采用湿润灌溉代替以往持续淹水的水分管理方式,且这种水分管理方式较以往延续了更长的时间。

由于没有持续淹水或淹水-烤田-淹水的水分管理方式下,稻田 N_2O 排放通量的独立数据源,这 2 种水分管理方式下稻田 N_2O 排放通量估算的统计模型无法直接验证。然而,在淹水-烤田-淹水的水分管理方式下,本研究统计模型所计算出的 N_2O 排放系数(0.42%)和 Akiyama 等基于全球 N_2O 排放通量资料所采用的最小二乘法线性回归模型所得出的估算结果十分接近(0.43%, Akiyama 模型)^[11, 13]。对于持续淹水稻田而言, N_2O 季节排放的模型估算结果相当于氮总输入量的 0.02%,这跟在其它区域进行的一些早期研究结果(0.01%~0.05%)相一致^[2, 3]。综合这些研究结果表明,笔者业已建成的统计模型完全可以用来估算我国稻田水稻生长季的 N_2O 排放情况。

2.2 模型的参数输入

2.2.1 水稻种植面积

根据国际水稻所(IRRI)^[27]的统计结果,在 20 世纪 50~60 年代间,我国的水稻种植总面积大约为 $2.92 \times 10^7 \sim 2.94 \times 10^7$ hm²。20 世纪 70 年代增加到了 3.49×10^7 hm²,与 80 和 90 年代相比,分别增加了 7% 和 10%,相对于 20 世纪 70 年代而言,80

和 90 年代水稻种植面积减少的区域主要位于我国长江中下游地区以及华南地区. 总的来说, I 区(北方和东北地区)和 II 区(华北平原和中西部地区)的水稻种植面积仅占总面积的 5%~10%, IV 区(长江中下游地区)的水稻种植面积占到 45%~55%.

2.2.2 稻田水分管理方式

自从 20 世纪 50 年代以来, 我国水稻生产中运用了多种不同的水分管理方式(图 1). 在 20 世纪 50~70 年代间, 大概有 20%~25% 的稻田采用持续淹水的水分管理方式, 而中期烤田的稻田占总面积的 75%~80%. 自从 20 世纪 80 年代以来, 在水稻生产中特别是在水稻生育阶段的后期多采用湿润灌溉的水分管理方式代替了以往的持续淹水. 在 20 世纪 80 年代, 大约 16% 的稻田采用持续淹水的灌溉方式, 77% 采用淹水-烤田-淹水的水分管理方式, 只有 7% 的稻田采用淹水-烤田-淹水-湿润灌溉的水分管理方式, 到 20 世纪 90 年代它们之间的相对比

例已经分别变为 12%、76% 和 12%. 在水稻生育后期采用湿润灌溉的稻田面积在不断扩大.

2.2.3 稻田氮输入

从 20 世纪 50~90 年代稻田氮的季节总输入量呈持续增加趋势(表 2). 在 50 年代水稻生长季 N 输入总量从 V 区的 67.6 kg·hm⁻² 到 I 区的 110 kg·hm⁻², 我国的 5 个水稻种植区 N 季节输入量平均为 87.5 kg·hm⁻², 约为 20 世纪 70 年代水稻生长季 N 输入总量的一半左右. 在 20 世纪 80~90 年代, 季节 N 输入量平均为 215~225 kg·hm⁻². 相对于 20 世纪 80~90 年代而言, 50~70 年代 5 个种植区域之间氮的季节输入量的空间变异较高. 在 50~70 年代, 水稻生长季氮输入量最高的地区一般在 I 区(北方和东北地区)和 II 区(华北平原和中西部地区), 然而在 80~90 年代氮输入量在不同种植区的差异不明显(表 2).

除了稻田氮输入总量的变化, 在 20 世纪 50~

表 2 20 世纪 50~90 年代我国稻田水稻生长季有机和化肥 N 施用量¹⁾/kg·hm⁻²

Table 2 Organic and chemical nitrogen inputs during paddy rice growing season from 1950s to 1990s/kg·hm⁻²

时间	种植区	作物残体 N	有机 N	化肥 N	总输入 N
50 年代	I	1.06	34.95	73.97	109.97
	II	3.68	68.17	34.70	106.55
	III	3.71	41.79	28.68	74.17
	IV	5.33	54.61	37.17	97.12
	V	6.39	25.63	35.56	67.58
	全国	4.88±0.49	45.22±4.01	37.40±4.95	87.49±6.70
60 年代	I	2.26	43.17	101.55	146.98
	II	4.09	58.41	95.87	158.37
	III	3.51	44.45	42.55	90.51
	IV	6.72	57.42	64.63	128.77
	V	7.27	27.25	71.45	105.97
	全国	5.62±0.47	46.65±3.91	69.64±6.62	121.91±8.05
70 年代	I	2.58	39.68	132.83	175.08
	II	2.98	70.25	155.72	228.95
	III	3.48	46.17	105.73	155.37
	IV	7.08	56.64	115.97	179.68
	V	8.64	27.24	107.88	143.76
	全国	6.03±0.48	48.18±3.52	118.50±6.88	172.71±8.40
80 年代	I	3.45	20.78	157.85	182.08
	II	2.81	49.06	179.96	231.83
	III	4.24	59.36	178.38	241.98
	IV	7.39	43.96	167.70	219.05
	V	8.63	27.75	160.53	196.91
	全国	6.31±0.50	40.65±3.61	168.21±5.32	215.16±6.98
90 年代	I	3.87	14.81	194.25	212.94
	II	2.20	18.23	227.00	247.43
	III	3.32	21.10	206.13	230.55
	IV	5.33	26.27	197.84	229.44
	V	7.41	16.06	176.27	199.74
	全国	4.85±0.47	20.99±2.02	198.80±7.23	224.64±7.73

1) 表中黑体字为全国稻田的平均值±标准误

90年代间,水稻生产的肥料运筹规律亦发生了很大的改变.化学氮肥的施用量从50年代的 $37.4 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 增加到了90年代的 $198.8 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,分别占水稻生长季氮输入总量的43%和88%.在90年代,化学氮肥季节性输入比例最高的种植区是II区和III区,而在50~60年代最高的是在I区(表2).有机肥料氮输入量占氮输入总量的比例分别从20世纪50年代的52%降低到了90年代的9%(表2).在20世纪50~70年代间,有机氮的输入比例相对比较稳定,平均变幅在 $45.2\sim 48.2 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 之间,随后逐步降低,80年代水稻生长季有机氮占总施氮量的比例几乎相当于90年代的2倍.

在20世纪50~90年代间,作物残体的收获量估算结果为 $2.2\sim 4.5 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$.50~90年代间留在稻田中的作物残体的比例并没有太大的改变,平均为33%,而到了90年代降低到了只占作物地上部生物量的18%左右.因此,由于50~80年代间收获的作物生物量不断增加的原因,水稻生长季作物残体N输入量从50年代的 $4.9 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 增加到了80年代的 $6.3 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$.相对而言,90年代由于稻田作物残体还田量的减少,导致了作物残体氮的输入量也

表3 本研究水稻生产数据库的输入参数与文献报道结果的一致性比较

Table 3 Consistency of rice production data in this study with those reported in the literature

时间	水分管理方式			文献	有机N占总输入N比例		化肥N / $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	总N / $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	文献
	F/ %	F-D/F/ %	F-D-F/M/ %		百分比/ %	文献			
50年代	24.2	75.8		本研究	57.3	本研究	37.40	87.49	本研究
60年代	20.6	79.4		本研究	43.3	本研究	69.64	121.91	本研究
70年代	19.4	80.6		本研究	31.4	本研究	118.50	172.71	本研究
80年代	15.6	77.3	7.1	本研究	21.8	本研究	168.21	215.16	本研究
90年代	11.8	76.9	12.0	本研究	11.5	本研究	198.80	224.64	本研究
50年代	20.0~25.0	80.0~85.0		[28, 29]	63.0	[30]	36.12	85.31	表4
60年代	18.8~22.8	77.2~81.2		[31]	45.0	[30]	57.66	125.85	表5
70年代	17.5	82.5		[32]	18.9~32.4	[33, 34]	117.64	179.82	表6
80年代	15.0	75.0	10.0	[35]	16.6~21.0	[36]	162.96	215.74	表7
90年代	10.0		90.0	[5]	12.0~15.4	[37]	193.57	229.81	表8
	20.0		80.0	[38]	12.0	[39]			
	25.0		75.0	[6]					

本研究以县为调查单位得到的全国各省水稻产量与国际水稻所的报道结果基本一致(图3),意味着数据库中有关作物产量和生物量的调查资料具有较高的可信度.水稻生产中有机氮占整个季节氮输入总量的比例从20世纪50年代的57.3%下降到90年代的11.5%,以往的一些估算结果表明,20世纪50和90年代的有机氮施用比例分别为63.0%和

相对较低,尽管作物的地上部分收获的生物量较以往高,在90年代平均估算结果为 $4.9 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,几乎与50年代全国5个种植区作物残体N输入量的总体平均水平相当(表2).

2.3 输入参数的检验

总体而言,本研究有关不同水分管理方式在我国水稻生产中采用的调查资料与以往的估算结果具有一致性.在20世纪50~70年代间,季节性持续淹水稻田大约占20%~25%左右,中期烤田稻田占75%~80%,这一估算值与以往的文献报道结果十分接近(表3).在20世纪80~90年代间,采用季节性持续淹水、淹水烤田、淹水和淹水烤田、淹水湿润灌溉3种水分管理方式的稻田所占比例分别为12%~16%、77%和7%~12%,与国内外一些学者的估算值相一致.Xing^[5]估算1995年我国持续淹水的稻田占水稻总面积的10%左右.Li等^[9]估算2000年我国中期烤田的稻田占到水稻总面积的大约80%.Yan等^[9]估算我国三分之二的稻田是采用间歇灌溉或中期烤田的水分管理方式.综上所述,有关我国水稻生产过去几十年水分管理方式变化的历史信息可能在本研究收集的数据库得以充分反映.

12.0%,因此,本研究有关有机氮施用占总N施用比例的估算与已有报道值亦具有可比性(表3).基于对文献报道结果的总结归纳(表4~8),20世纪50年代我国水稻生产中化学氮肥和季节氮输入总量分别为 $36.12 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $85.31 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,至90年代两者分别增加到了 $193.57 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $229.81 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,这和本研究的数据库资料是十分接近的.

总的来说, 基于本研究数据库得来的氮输入量和以往文献中的报道结果基本一致(表 3).

表 4 20 世纪 50 年代稻田化学 N 肥和总施 N 量

Table 4 Chemical and total nitrogen application in rice paddies in 1950s

年份	化肥 N /kg·hm ⁻²	总输入 N /kg·hm ⁻²	文献
1950	41.04		[40]
1952	31.80		[41]
1953		90.04	[42]
1955		100.53	[43]
1956		120.01	[44]
1957		75.03	[45]
1957	31.84		[46]
1958		75.03	[47]
1958	60.03		[48]
1958	23.90		[49]
1958		60.00	[41]
1959		76.50	[50]
1959	31.80		[49]
1959	31.83		[46]
1959	36.72		[51]
平均值±标准误	36.12±3.83	85.31±7.54	

表 5 20 世纪 60 年代稻田化学 N 肥和总施 N 量

Table 5 Chemical and total nitrogen application in rice paddies in 1960s

年份	化肥 N /kg·hm ⁻²	总输入 N /kg·hm ⁻²	文献
1960s		113.04	[52]
1961	39.80		[53]
1962		112.50	[54]
1963	45.04		[55]
1963	47.73		[56]
1963		122.30	[57]
1963	63.60		[58]
1963	57.24		[40]
1964	62.41		[40]
1964		120.02	[59]
1964		152.90	[57]
1965	63.60		[60]
1965		120.90	[61]
1966		139.30	[62]
1968	69.75		[63]
1969	69.75		[63]
平均值±标准误	57.66±3.66	125.85±5.62	

3 结论

模型确定的不同水分管理方式下稻田 N₂O 的排放系数和背景排放量对拟合我国稻田水稻生长季 N₂O 排放具有较好的适切性. 以县为调查单位建立的我国水稻生产的数据库与以往文献报道结果具有高度的一致性. 模型的输入参数表明, 20 世纪 50~90 年代间我国稻田水分管理方式和肥料施用发生

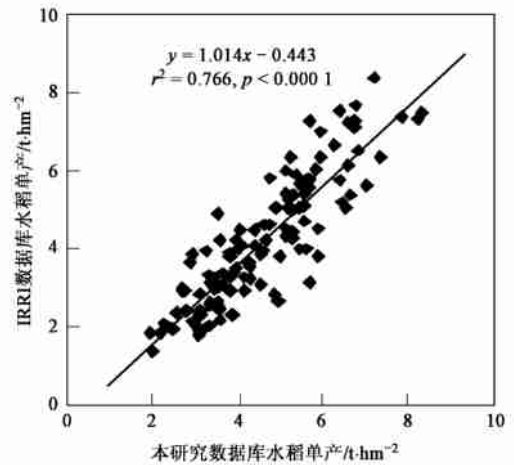


图 3 本研究数据库水稻单产与 IRRI 数据库水稻单产比较

Fig. 3 Consistency of rice yield derived from database of this study with that reported by IRRI

表 6 20 世纪 70 年代稻田化学 N 肥和总施 N 量

Table 6 Chemical and total nitrogen application in rice paddies in 1970s

年份	化肥 N /kg·hm ⁻²	总输入 N /kg·hm ⁻²	文献
1970		223.02	[52]
1971		184.04	[52]
1971		150.40	[52]
1971		164.09	[52]
1972		227.92	[52]
1972		148.03	[52]
1972	139.53		[63]
1974	95.45		[64]
1974~1975		187.50	[65]
1975		187.50	[66]
1975~1977	127.21		[67]
1975~1978	119.25		[67]
1975~1979		188.58	[68]
1976	111.70		[69]
1976		195.04	[66]
1976		187.50	[70]
1977		164.93	[66]
1977	105.14		[71]
1977		187.50	[72]
1978	123.03		[73]
1978		150.00	[74]
1978		147.65	[75]
1978	138.32		[75]
1978	105.10		[76]
1978	123.08	156.04	[77]
1978	126.21		[40]
1978~1979	121.25		[78]
1979	103.50		[79]
1979	119.34		[79]
1979	105.50		[80]
1979		150.50	[40]
1979	118.60		[81]
1979		180.03	[81]
1979		187.50	[74]
1979		190.82	[82]
1979		225.20	[81]
平均值±标准误	117.64±3.12	179.82±5.25	

表 7 20 世纪 80 年代稻田化学 N 肥和总施 N 量

Table 7 Chemical and total nitrogen application in rice paddies in 1980s

年份	化肥 N /kg·hm ⁻²	总输入 N /kg·hm ⁻²	文献
1980s	170.80		[83]
1980s	195.05		[84]
1980	161.10		[85]
1980	175.10		[86]
1980	187.52		[85]
1981		190.75	[87]
1981		198.80	[88]
1981		222.61	[88]
1982	135.85		[89]
1982	165.00		[90]
1982	187.45		[90]
1982	171.00	235.51	[91]
1982	198.00		[92]
1983	120.05		[93]
1983	174.00		[91]
1984	211.52	259.48	[94]
1985	165.05		[95]
1985	195.05		[96]
1985	180.00		[97]
1984		220.45	[94]
1985		273.00	[94]
1986	150.00		[98]
1986	150.00	150.0	[99]
1986		196.45	[100]
1986	149.92		[101]
1987	180.05		[102]
1987	161.50	222.65	[103]
1987	150.00	215.65	[104]
1987	100.05	150.00	[99]
1987	120.05		[100]
1987	154.50		[101]
1988	120.00	168.00	[105]
1988	190.82	225.00	[95]
1988	115.53		[106]
1988	180.00		[107]
1988	240.00	240.05	[108]
1989	150.05		[100]
1989		283.45	[40]
1989	122.45		[109]
1989	150.00		[106]
1989	163.29		[110]
平均值±标准误	162.96±5.17	215.74±9.83	

表 8 20 世纪 90 年代稻田化学 N 肥和总施 N 量

Table 8 Chemical and total nitrogen application in rice paddies in 1990s

年份	化肥 N /kg·hm ⁻²	总输入 N /kg·hm ⁻²	文献
1990s		226.00	[111]
1990	158.25	237.00	[112]
1990		177.75	[112]
1990	195.00		[113]
1991	120.00		[114]
1991	162.15		[115]
1991	177.50		[116]
1991	195.00	195.00	[117]
1992	165.00		[118]
1992	187.50	187.50	[119]
1992	238.50		[120]
1992	260.00	260.00	[119, 121]
1993		141.40	[122]
1993	157.50		[123]
1993	337.35	337.35	[40]
1994	150.00	195.00	[124]
1994	166.70	166.70	[125]
1994	167.90		[126]
1994	174.90		[127]
1994	177.00		[128]
1994	225.00	300.00	[129]
1994		270.00	[120]
1995	150.00		[125]
1995	150.00		[100]
1995	159.50		[124]
1995	220.87	291.00	[130]
1995	280.20	280.20	[131]
1996	150.00		[132]
1996	180.00	180.00	[133]
1996	187.50	187.50	[134]
1996	276.00		[135]
1997	135.00		[136]
1997		150.00	[132]
1997	153.80		[137]
1997	195.00	248.50	[138]
1997	172.50		[139]
1997	225.00	225.00	[140]
1997	279.00		[135]
1998	140.10		[141]
1998	140.10		[142]
1998	236.30	236.30	[143]
1998	305.00	305.00	[135]
1999	146.25		[144]
1999	159.45		[144]
1999	176.40		[144]
1999		185.40	[144]
1999	303.00	303.00	[135]
平均值±标准误	193.57±8.32	229.81±11.60	

了很大变化. 在 20 世纪 50~ 70 年代间, 持续淹水稻田占 20%~ 25%, 大约 75%~ 80% 的稻田采用淹水-烤田淹水的水分管理方式. 在 20 世纪 80~ 90 年代间, 采用持续淹水、淹水-烤田淹水和淹水-烤田淹水-湿润灌溉的水分管理方式的稻田分别占 12%~ 16%、77% 和 7%~ 12%. 20 世纪 50 年代水稻生长季平均每季总施氮量为 87.49 kg·hm⁻², 而 90 年代平均为 224.64 kg·hm⁻². 其中, 化学氮肥施

用量占水稻生长季氮输入总量的比例从 20 世纪 50 年代的 43% 增加到了 90 年代的 88%, 而有机氮肥占氮输入总量的比例从 20 世纪 50 年代的 52% 降低

到了 90 年代的 9%。20 世纪 50~70 年代水稻生长季氮肥施用量具明显的空间变异性, 而 80~90 年代间其空间变异较小。

参考文献:

- [1] IPCC. Agriculture [A]. In: Climate Change 2007: Mitigation, Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [C]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 499-533.
- [2] Smith C, Brandon M, Partrick Jr W. Nitrous oxide emission following urea-N fertilization of wetland rice[J]. Soil Sci Plant Nutr, 1982, **28**: 164-171.
- [3] Granli T, Birkman O. Nitrous oxide from agriculture [A]. In: Norwegian Journal of Agricultural Science, vol. 12. Advisory Service [C]. Agriculture University of Norway, Norway, 1994.
- [4] Cai Z, Xing G, Yan X, *et al.* Methane and nitrous oxide emissions from rice paddy fields as affected by nitrogen fertilizers and water management[J]. Plant Soil, 1997, **196**: 7-14.
- [5] Xing G. N_2O emission from cropland in China [J]. Nutr Cycl Agroecosys, 1998, **52**: 249-254.
- [6] Yan X, Akimoto H, Ohara T. Estimation of nitrous oxide, nitric oxide and ammonia emissions from croplands in East, Southeast and South Asia[J]. Global Change Biol, 2003, **9**: 1080-1096.
- [7] Li C, Zhuang Y, Cao M, *et al.* Comparing a process-based agroecosystem model to the IPCC methodology for developing a national inventory of N_2O emissions from arable lands in China[J]. Nutr Cycl Agroecosys, 2001, **60**: 159-175.
- [8] Li C, Mosier A, Wassmann R, *et al.* Modeling greenhouse gas emissions from rice-based production systems[J]. Global Biogeochem Cycles, 2004, **18**: GB1043.
- [9] Li C, Frohling S, Xiao X, *et al.* Modeling impacts of farming management alternatives on CO_2 , CH_4 and N_2O emissions: A case study for water management of rice agriculture of China[J]. Global Biogeochem Cycles, 2005, **19**: GB3010.
- [10] Li C, Salas W, DeAngelo B, *et al.* Assessing alternative for mitigating net greenhouse gas emissions and increasing yields from rice production in China over the next twenty years[J]. J Environ Qual, 2006, **35**: 1554-1565.
- [11] Akiyama H, Yagi K, Yan X. Direct N_2O emissions from rice paddy fields: Summary of available data[J]. Global Biogeochem Cycles, 2005, **19**: GB105.
- [12] IPCC. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories [M]. Kanagawa: IGES, Japan, 2006.
- [13] 邹建文, 秦艳梅, 刘树伟. 不同水分管理方式下水稻生长季 N_2O 排放量估算: 模型建立[J]. 环境科学, 2009, **30**(2): 313-321.
- [14] Frohling S, Qiu J, Boles S, *et al.* Combining remote sensing and ground census data to develop new maps of the distribution of rice agriculture in China[J]. Global Biogeochem Cycles, 2002, **16**: 1091-1101.
- [15] 黄娅琳, 蔡典雄. 稻草还田对水稻的增产效应及对土壤肥力的影响[J]. 土壤肥料, 1997, **26**(2): 18-20.
- [16] 刘惠, 赵平, 林永标, 等. 华南丘陵地区农林复合生态系统晚稻田甲烷和氧化亚氮排放[J]. 热带亚热带植物学报, 2006, **14**(4): 269-274.
- [17] 刘惠, 赵平, 林永标, 等. 华南丘陵区农林复合生态系统早稻田 CH_4 和 N_2O 排放通量的时间变异[J]. 生态环境, 2006, **15**(1): 58-64.
- [18] 江长胜, 王跃思, 郑循华, 等. 耕作制度对川中丘陵区冬灌田 CH_4 和 N_2O 排放的影响[J]. 环境科学, 2006, **27**(2): 207-213.
- [19] 黄树辉, 蒋文伟, 吕军, 等. 氮肥和磷肥对稻田 N_2O 排放的影响[J]. 中国环境科学, 2005, **25**(5): 540-543.
- [20] 陈书涛, 黄耀, 郑循华, 等. 轮作制度对农田氧化亚氮排放的影响及驱动因子[J]. 中国农业科学, 2005, **38**(10): 2053-2060.
- [21] 陈书涛, 黄耀, 郑循华, 等. 种植不同作物对农田 N_2O 和 CH_4 排放的影响及其驱动因子[J]. 气候与环境研究, 2007, **12**(2): 147-154.
- [22] 郑靖, 王重阳, 王跃思, 等. 氮肥对潮棕壤稻田 N_2O 排放和土壤无机氮素的影响[J]. 农业系统科学与综合研究, 2006, **22**(2): 139-142.
- [23] 王重阳, 郑靖, 顾江新, 等. 下辽河平原单季稻田主要温室气体排放及驱动机制[J]. 农业环境科学学报, 2006, **25**(增刊): 237-242.
- [24] 秦晓波, 李玉娥, 刘克樱, 等. 不同施肥处理对稻田氧化亚氮排放的影响[J]. 中国农业气象, 2006, **27**(4): 273-276.
- [25] 秦晓波, 李玉娥, 刘克樱, 等. 不同施肥处理稻田甲烷和氧化亚氮排放特征[J]. 农业工程学报, 2006, **22**(7): 143-148.
- [26] 陈卫卫, 张友民, 王毅勇, 等. 三江平原稻田 N_2O 通量特征[J]. 农业环境科学学报, 2007, **26**(1): 364-368.
- [27] 国际水稻所(IRRI). Rice stat database [EB/OL]. <http://www.iri.org/science/ricestat/index.asp>, Los Baños, Philippines, 2004.
- [28] 毛礼钟. 稻田灌溉[M]. 北京: 农业出版社, 1981. 38-71.
- [29] 李君凯. 水稻栽培[M]. 北京: 农业出版社, 1982. 112-124.
- [30] 黄东迈. 有机肥无机肥对提高土壤氮素肥力的作用及其配合施用[J]. 土壤通报, 1985, **29**(5): 197-201.
- [31] 郑海龙. 水稻模式高产栽培[M]. 浙江: 浙江大学出版社, 1990. 247-256.
- [32] 吴光南, 邹江石. 水稻栽培理论与技术[M]. 北京: 农业出版社, 1981. 416-449.
- [33] 熊毅, 徐琪, 姚贤良, 等. 耕作制对土壤肥力的影响[J]. 土壤学报, 1980, **17**(2): 101-119.
- [34] 文启孝. 有机肥料在养分供应和保持土壤有机质含量方面的作用[A]. 见: 中国土壤学会. 中国土壤的合理利用和培肥[C]. 南京: 中国科学院南京土壤研究所, 1983. 10-18.
- [35] 高亮之, 李林. 水稻气象生态[M]. 北京: 中国农业出版社, 1992. 35-48.
- [36] 汪恩德, 黄东迈. 江苏徐淮、宁镇丘陵、太湖区农田养分状况及调控措施[J]. 江苏农业科学, 1989, **17**(1): 15-17.
- [37] 徐琪, 杨林章, 董一鸣, 等. 作物和水稻生态系统物质循环[A]. 见: 徐琪. 中国稻田生态系统[C]. 北京: 农业出版社, 1998. 9-28.

- [38] Li C, Qiu J, Frohling S, *et al.* Reduced methane emissions from large-scale changes in water management in China's rice paddies during 1989-2000[J]. *Geophys Res Lett*, 2002, **29**: 1972.
- [39] Zheng X, Han S, Huang Y, *et al.* Re-quantifying the emission factors based on field measurements and estimating the direct N₂O emission from Chinese croplands[J]. *Global Biogeochem Cycles*, 2004, **18**: GB2018.
- [40] 陈永元, 汪剑鸣, 晏顺根. 施肥与水稻生产的关系探讨[J]. *江西农业学报*, 1995, **7**(2): 132-136.
- [41] 杨立炯, 汤玉庚. 陈永康水稻高产经验的总结、提高、示范、推广[J]. *中国农业科学*, 1964, **5**(5): 1-8.
- [42] 沈学年. 中国的水稻[J]. *生物学通报*, 1953, **2**(9): 309-313.
- [43] 陈禹平, 贾植三, 田声高. 四川水稻施用有机无机混合肥料的初步试验总结[J]. *土壤学报*, 1956, **7**(4): 169-176.
- [44] 屠启澎, 周厚基, 全月澳. 不同时期追施氮肥对一季晚粳稻氮素营养的影响[J]. *湖北农业科学*, 1957, **3**(5): 325-331.
- [45] 周伯瑜. 水稻追施尿素、硝酸铵、硫酸铵效果试验[J]. *新疆农业科学*, 1964, **8**(6): 216.
- [46] 霍克斌. 从经济效益探讨氮素化肥的合理使用[J]. *中国农业科学*, 1963, **4**(10): 36-39.
- [47] 崔 , 张静兰, 倪文, 等. 北方高产水稻的主要栽培技术和理论分析. *作物学报*, 1962, **1**(3): 259-272.
- [48] 朱光琪. 农家肥肥料肥效的研究(一) 农家肥料对水稻的肥效[J]. *土壤学报*, 1959, **10**(22): 180-189.
- [49] 黄和义, 施汝麟. 鄂东地区棉地和稻田的土壤肥力情况及其氮素平衡的展望[J]. *土壤学报*, 1960, **4**(6): 15-25.
- [50] 刘克 , 蓝仁德. 汉中地区几项水稻栽培技术调查[J]. *陕西农业科学*, 1960, **3**(4): 162-166.
- [51] 刘茂林, 华兆龙, 贾根兴. 太湖地区黄泥土三要素肥料定位试验[J]. *土壤学报*, 1965, **16**(3): 13-19.
- [52] 湖南农学院农作物教研组. 水稻栽培[M]. 湖南: 湖南人民出版社, 1974. 98-122
- [53] 裴保义, 徐光壁, 华筠. 中期施肥对单季晚稻的氮素代谢的初步研究[J]. *土壤通报*, 1962, **6**(6): 13-19.
- [54] 张静兰, 崔徽, 阎龙飞. 氮素营养对水稻生长、产量和碳氮代谢的影响[J]. *植物学报*, 1964, **12**(1): 75-81.
- [55] 刘茂林, 华兆龙, 贾根兴. 太湖地区黄泥土三要素肥料定位试验[J]. *土壤学报*, 1965, **16**(3): 13-19.
- [56] 刘芷宇, 彭千涛, 尹楚良, 等. 江苏练湖农场两种主要土壤的供肥特点及其对晚稻生长的影响[J]. *土壤学报*, 1965, **16**(4): 387-394.
- [57] 汕头专区农科所、潮安县农业局、东风公社农技站驻内畔大队工作组. 晚稻高产: 肥、水怎样管理-广东内畔大队晚稻高产栽培经验[J]. *广西农业科学*, 1965, **8**(1): 7-14.
- [58] 孙羲, 王岳定. 水稻耐肥性与氮肥施用量的研究[J]. *土壤学报*, 1964, **15**(4): 373-379.
- [59] 奚振邦, 卞以洁, 邝安琪, 等. 双季稻的吸肥高峰与挥发性氮肥全层施用法的研究[J]. *土壤学报*, 1978, **15**(2): 113-125.
- [60] 张如玉. 丰产水稻氮素追肥技术研究初报[J]. *辽宁农业科学*, 1963, **2**(1): 12.
- [61] 巨玉琳, 张波, 胡山泉. 大搞科学实验样板田喜获丰产艾大队 1965 年水稻栽培增产经验[J]. *宁夏农林科技*, 1966, **4**(4): 14-18.
- [62] 张润球, 阮成泉, 马灿平. 巧施壮尾肥是水稻高产栽培的一项关键措施-学习高产队施肥经验的体会[J]. *广东农业科学*, 1979, **12**(5): 44-46.
- [63] 顾美华. 关于高产水稻施肥的几个问题[J]. *浙江农业科学*, 1978, **15**(6): 40-45.
- [64] 朱兆良, 蔡贵信, 俞金洲. 稻田中 N~(15) 标记硫酸铵的氮素平衡的研究初报[J]. *科学通报*, 1977, **21**(11): 503-506.
- [65] 陈家裘. 对水稻高产栽培氮肥施用的一些体会[J]. *广西农业科学*, 1980, **10**(10): 5-9.
- [66] 吉水县农科所. 通气稻田好-省肥产量高[J]. *江西农业科技*, 1978, **6**(4): 33-34.
- [67] 金安世, 董春田. 论稻作施肥体系的改革-以前、后期施肥法代替大头肥施肥法[J]. *辽宁农业科学*, 1982, **17**(5): 14-18.
- [68] 范业成, 陶其骥. 水稻分次施肥法的研究[J]. *土壤肥料*, 1980, **9**(2): 28-30.
- [69] 随县棉花良种场. 南优二号亩产一千五百零三斤的栽培技术[J]. *湖北农业科学*, 1977, **16**(3): 12-13.
- [70] 江西省农科院作物所杂优系. 第八讲: 杂交二晚高产栽培技术[J]. *江西农业科学*, 1977, **5**(5): 42-44.
- [71] 宁夏农学院农学系水稻组. 水稻分期追施氮肥总结[J]. *宁夏农林科技*, 1978, **11**(3): 1-4.
- [72] 岑溪县农业局. 杂交水稻高产栽培的一些体会[J]. *广西农业科学*, 1978, **8**(6): 10-11.
- [73] 蔡贵信, 朱兆良. 太湖地区水稻土的氮素供应和氮肥的合理施用[J]. *土壤*, 1983, **15**(6): 203-204.
- [74] 杨光亚. 杂交水稻高产施肥技术的试验研究[J]. *土壤肥料*, 1981, **10**(3): 35-37.
- [75] 王文卓, 杨凤琴, 杨素清. 水稻高产栽培的施肥技术-黎明 A × C (57) 亩产超 1500 斤和丰锦品种亩产 1359 斤的施肥技术[J]. *辽宁农业科学*, 1979, **14**(4): 1-6.
- [76] 黄进军. 从水稻氮素营养谈合理施肥技术[J]. *广西农业科学*, 1982, **12**(5): 25-28.
- [77] 李伟波, 吴留松, 廖海秋, 等. 太湖地区高产稻田氮肥施用与作物吸收利用的研究[J]. *土壤学报*, 1997, **37**(1): 67-73.
- [78] 林治堂, 胡乃铮. 我区水稻栽培技术改革的一些做法[J]. *辽宁农业科学*, 1981, **16**(2): 35-37.
- [79] 李实焯, 王家玉, 孔万根. 稻田土壤供氮性能的研究 II. 双季稻种植过程中施肥对土壤供氮性能和水稻产量的影响[J]. *土壤学报*, 1982, **22**(1): 13-21.
- [80] 林炎金, 林增泉. 连续施肥对土壤供肥和稻吸肥的影响[J]. *福建农业大学学报*, 1994, **18**(3): 309-314.
- [81] 沈瑞芝, 朱惠芳, 黄伟祥, 等. 沼气肥对稻麦作物的肥效[J]. *上海农业科学*, 1981, **9**(5): 12-13.
- [82] 李实焯, 王家玉, 孔万根. 稻田土壤供氮性能的研究 I. 不同类型稻田土壤供氮性能的初步观察[J]. *土壤学报*, 1981, **21**(5): 50-57.
- [83] 黄东迈, 孙庚寅, 邵侗, 等. 淮北稻田土壤供氮特性的探讨[J]. *江苏农业科学*, 1982, **9**(10): 1-9.
- [84] 苏宝林. 北方水稻[M]. 北京: 科学普及出版社, 1986. 34-36.
- [85] 陈伟焯, 康文刚. 水稻产量与密度、施肥量和施肥期相互关系的研究[J]. *天津农业科学*, 1980, **7**(1): 37-38.

- [86] 徐海光, 周厚钧. 不同时期施用氮素化肥对麦茬稻生长发育的影响[J]. 河北农业学报, 1999, 25(2): 5-9.
- [87] 贾恩明, 史书仁. 水稻高效益生产技术讲座(8)——合理经济施肥, 推行科学灌溉[J]. 新农业, 1987, 16(10): 12-13.
- [88] 吴文钧. 水稻节水栽培配水量及施肥模式(下)[J]. 新农业, 1986, 15(16): 22.
- [89] 黄文彬, 沈景光, 李聂耳. 早造水稻优质高产品种栽培技术探讨[J]. 广东农业科学, 1986, 19(4): 11-13.
- [90] 徐大胜. 杂交水稻高产栽培的理论与方法(综述)(上)[J]. 耕作与栽培, 1990, 10(1): 26-29.
- [91] 胡承太, 颜振德. 水稻品种产量形成的生理生态研究II. 品种氮素营养特性与其产量形成的关系[J]. 江苏农业科学, 1984, 11(3): 1-8.
- [92] 李伟波, 吴留松, 廖海秋, 等. 太湖地区高产稻田氮肥施用与作物吸收利用的研究[J]. 土壤学报, 1997, 49(1): 67-73.
- [93] 周修冲, 徐培智, 姚建武, 等. 双季稻田不同肥料连续配施效应试验[J]. 广东农业科学, 1994, 29(4): 26-30.
- [94] 林辉, 陈祖仁, 唐福钦, 等. 福建省稻田化肥的适宜用量和配比的研究[J]. 福建农业学报, 1989, 4(1): 23-32.
- [95] 刘承柳. 杂交中稻低氮攻中施肥方式的增产效应[J]. 湖北农业科学, 1988, 33(5): 5-8.
- [96] 朱兆良, 张绍林, 蔡贵信. 稻田中化肥 N 损失的研究[J]. 土壤学报, 1989, 41(4): 337-343.
- [97] 汪恩德, 黄东迈. 江苏徐淮、宁镇丘陵、太湖区农田养分状况及调控措施[J]. 江苏农业科学, 1989, 17(1): 15-17.
- [98] 余晓鹤, 黄东迈. 土壤表层管理对部分土壤化学性质的影响[J]. 土壤通报, 1990, 34(4): 158-161.
- [99] 刘枫, 张辛未, 汪春水. 皖南双季稻区长期施肥效应研究[J]. 植物营养与土壤学报, 1998, 5(4): 224-230.
- [100] 袁玲, 杨邦俊, 郑兰君, 等. 长期施肥对土壤酶活性和氮磷养分的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 1997, 4(4): 300-306.
- [101] 张明芝, 柯福源, 汪寅虎. 单季晚稻计算机配方施肥[J]. 上海农业学报, 1994, 10(4): 44-47.
- [102] 蔡贵信, 朱兆良, 朱宗武, 等. 水稻田中碳铵和尿素的氮素损失的研究[J]. 土壤, 1985, 28(5): 225-229.
- [103] 王伯伦. 水稻高产栽培的施肥问题[J]. 北方水稻, 1993, 9(1): 1-4.
- [104] 刘远坤, 倪克鱼, 黄宗洪, 等. 望天田水稻施肥技术研究[J]. 贵州农业科学, 1989, 18(5): 29-32.
- [105] 张太白, 简贵才, 战以时. 水稻土肥力与水稻计量施肥参数的测定水稻土肥力与水稻计量施肥参数的测定[J]. 云南农业大学学报, 1990, 5(4): 201-204.
- [106] 任成礼, 刘郁文, 王常湘. 水稻施用化肥的增产效应及其经济效益分析[J]. 吉林农业大学学报, 1990, 12(3): 31-35, 70.
- [107] 朱兆良. 稻田节氮的水肥综合管理技术的研究[J]. 土壤, 1991, 34(5): 241-245.
- [108] 张绍林, 朱兆良, 徐银华, 等. 关于太湖地区稻麦上氮肥的适宜用量[J]. 土壤, 1988, 31(1): 19-22.
- [109] 张崇国, 蹇守发. 配方施肥对水稻的增产效果试验[J]. 四川农业科技, 1990, 20(1): 16-17.
- [110] 严明建, 成善美, 陈国斌, 等. 施硅及氮、磷、硅配施对水稻生产的影响[J]. 耕作与栽培, 1993, 13(1): 55-56.
- [111] 李春来, 刘中漱. 水稻超稀植栽培应注意合理施肥[J]. 新农业, 2000, 30(1): 38.
- [112] 王竺美, 黄昌勇, 施丹潮. 中高肥力土壤水稻亩产 500 公斤稳穗增粒节氮施肥技术的研究[J]. 浙江农业科学, 1991, 33(3): 124-126.
- [113] 成春彦, 徐传国, 赵立新. 大颗粒尿素不同施用次数在水稻上的肥效试验[J]. 农业新科技, 1993, 16(3): 24-26.
- [114] 黎天义. 增施有机肥及配方施肥对中低产水稻田地力的影响[J]. 广西农业科学, 1995, 32(4): 167-169.
- [115] 何国祥. 不同肥料结构对水稻产量和土壤肥力的影响[J]. 土壤肥料, 1996, 33(6): 16-18.
- [116] 王月琴, 刘文锋, 廖臻瑞. 不同温区水稻养分吸收量及化肥利用率研究[J]. 耕作与栽培, 1999, 19(4): 51-52.
- [117] 徐志福. 水稻“三高一稳”栽培法在红壤性水田的应用[J]. 浙江农业科学, 1993, 35(4): 178-180.
- [118] 潘贺玲, 于奎武, 李焕珍, 等. 有机无机肥配合施用对盐化草甸土的培肥效果[J]. 沈阳农业大学学报, 2000, 45(2): 181-184.
- [119] 李伟波, 吴留松, 廖海秋. 太湖地区高产稻田氮肥施用与作物吸收利用的研究[J]. 土壤学报, 1997, 50(1): 67-73.
- [120] Ling Q H. Reform fertilizing plan improve population quality[A]. 见: 凌启鸿. 水稻高产高效理论与新技术[C]. 北京: 中国农业出版社, 1996. 124-135.
- [121] 徐心慰. 太仓市化肥投入使用状况的几个问题[J]. 上海农业科技, 1994, 24(4): 29.
- [122] 龚振平, 车奎植, 张玉田, 等. 三江平原水稻适宜施肥量的研究[J]. 黑龙江农业科学, 1994, 17(4): 12-15.
- [123] 黄娅琳, 蔡典雄. 稻草还田对水稻的增产效应及对土壤肥力的影响[J]. 土壤肥料, 1997, 34(2): 18-20.
- [124] 郑义, 刘玉堂, 葛树春. 玉米、水稻、大豆、红薯配方施肥技术[J]. 河南农业, 1996, 7(8): 10-11.
- [125] 刘枫, 张辛未, 汪春水. 皖南双季稻区长期施肥效应研究[J]. 植物营养与肥料学报, 1998, 5(3): 224-230.
- [126] 陈云呈. 水稻专用肥在水稻上的应用效果[J]. 福建农业科技, 1996, 27(2): 33.
- [127] 杨录威. 浅谈辽东冷凉稻区氮素化肥的合理施用[J]. 辽宁农业科学, 1995, 36(3): 13-15.
- [128] 丁元树, 陈志坚, 王人民. 稻田连续年内水旱轮作的后效应研究I. 土壤理化特性及后作物产量[A]. 见: 凌启鸿. 水稻高产高效理论与新技术[C]. 北京: 中国农业出版社, 1996. 84-91.
- [129] 邵吉安, 陈永华, 陈志芬, 等. 有机肥和化肥配施对水稻的增产作用[A]. 上海农业科技, 1994, 24(3): 17, 31.
- [130] 林贤勤, 徐德海, 余申苗, 等. 营养输入和输出对红壤高产稻田产量的影响[A]. 见: 凌启鸿. 水稻高产高效理论与新技术[C]. 北京: 中国农业出版社, 1996. 92-95.
- [131] 罗延恂, 李静敏. 氮肥利用亟待提高[J]. 北京农业, 1997, 17(5): 4-5.
- [132] 李延, 庄卫民, 饶秀庭, 等. 有机无机肥配施对红壤性水稻土生产力和地力培肥的效果研究[J]. 福建农业学报, 1998, 13(1): 29-34.
- [133] 银英梅, 银友善, 孙景芝, 等. 土壤供肥能力与施肥对水稻产

- 量的影响[J]. 辽宁农业科学, 1998, 39(3): 9-11.
- [134] 甄长超. 麦茬水稻化肥分层深施方法及注意事项[J]. 安徽农业, 1997, 26(6): 22.
- [135] 张亚丽. 水稻氮效率基因型差异评价与氮高效机理研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2006. 1-17.
- [136] 粟学军. 化肥不同施用技术对水稻产量的影响[J]. 广西农业科学, 2000, 37(1): 16-17.
- [137] 张琳, 肖平, 李庆和. 肥力高在水稻上的应用效果[J]. 安徽农业科学学报, 1999, 39(6): 602-604.
- [138] 邵思文, 徐志福, 蒋彭炎. 红壤稻田晚稻氮化肥运筹试验研究[J]. 浙江农业科学, 1998, 40(4): 171-172.
- [139] 刘忠翰, 彭江燕. 化肥氮素在水稻田中迁移与淋失的模拟研究[J]. 农村生态环境, 2000, 16(2): 9-13.
- [140] 杨进宝, 刘登彪, 孙光新, 等. 引黄灌区水稻氮肥合理施用探讨[J]. 宁夏农林科技, 1998, 41(1): 33-35.
- [141] 谢寅忠, 王玉良, 马忠民, 等. 寒地水稻施用有机肥及稻草还田效果[J]. 垦殖与稻作, 1999, 15(4): 34-35.
- [142] 戴庆林, 郑海春, 王芬棠, 等. 内蒙古地区化肥施用与肥分利用现状[J]. 内蒙古农业科技, 2000, 28(3): 3-5.
- [143] 秦松, 孙锐锋, 熊元, 等. 肥力高菌肥在粮食作物上的应用效果初报[J]. 贵州农业科学, 2000, 29(3): 60-61.
- [144] 胡泽友, 郭朝晖, 周作明, 等. 湖南省稻田化肥施用与氮磷流失状况的研究[J]. 湖南农业大学学报, 2000, 50(4): 264-266.

《环境科学》编辑部关于启用编辑信息管理系统公告

《环境科学》编辑部已经开通本刊网站并启用编辑信息管理系统(网站地址: <http://www.hjxx.ac.cn>). 该系统能实现在线投稿、在线审稿、期刊浏览检索等功能, 欢迎广大作者、读者和审稿专家使用. 目前我刊所有来稿都通过网站编辑信息管理系统进行. 作者使用编辑信息管理系统投稿时请先进行注册, 注册完毕后以作者身份登录, 按照页面上给出的提示投稿即可. 如果您在使用过程中有问题, 请及时与我刊编辑部联系.

邮政地址: 北京市海淀区双清路18号《环境科学》编辑部

邮 编: 100085

电 话: 010-62941102, 010-62849343

传 真: 010-62849343

E-mail: hjxx@rcees.ac.cn

网 址: www.hjxx.ac.cn