# 亚洲地区稻田N<sub>2</sub>O排放影响因子统计模拟分析

廖千家骅12 颜晓元1\*

(1. 中国科学院南京土壤研究所土壤与农业可持续发展国家重点实验室,南京 210008; 2. 中国科学院研究生院,北京 100049)

摘要:关于稻田N<sub>2</sub>O排放大样本统计分析大多只涉及水分因子和肥料因子,本研究收集历年亚洲稻田N<sub>2</sub>O排放资料和更多影响 因子(水分管理、肥料类型及用量、土壤属性、气候和水稻类型等)的相关信息,从中筛选出具有统计学意义的因子,构建排放 通量和上述因子的统计模型.具有统计学意义的因子包括不同水分管理措施、肥料用量、不同有机肥类型、不同 pH 和土壤全 氮含量交互因子、不同年平均温度和不同水稻类型(p < 0.01),该模型能解释 60.7% 的N<sub>2</sub>O排放通量变异,有统计学意义.水分 管理措施重要性仅次于肥料用量,其中持续淹水:间歇灌溉:湿润灌溉的相对排放比值为0.17:0.56:1.固氮作物秸秆有效促进 N<sub>2</sub>O排放,厩肥作用不明显,添加秸秆的处理N<sub>2</sub>O相对排放通量为不添加任何有机肥处理的 64%.pH 和土壤全氮含量交互作用 和排放通量呈显著正相关;pH > 8 和年平均气温 10 ~ 20℃ 有利于N<sub>2</sub>O排放.不同水稻类型的N<sub>2</sub>O排放量差异显著,早稻相对排 放通量是中稻的 71%,晚稻是中稻的 48%,水稻类型能反映种植之前的土壤水分信息.综合考虑更多影响因子能更有利于解 释水稻田N<sub>2</sub>O排放.

关键词:稻田;N,O;统计;模型;影响因子

中图分类号:X16 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2011)01-0038-08

# Statistical Analysis of Factors Influencing N<sub>2</sub>O Emission from Paddy Fields in

## Asia

LIAO Qian-jia-hua<sup>1 2</sup> ,YAN Xiao-yuan<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Most previous studies attributed variation in  $N_2O$  emission from paddy fields to water managements and fertilizer input. In this study, we compiled a database of  $N_2O$  emission from paddy fields in Asia, including water management, type and amount of nitrogen fertilizer, soil property, climate and rice types. After screening the influencing factors with statistical significance (p < 0.01) such as different water managements, N input, different organic N types, interaction of soil total nitrogen content and different pH levels, different annual temperature levels, and different rice types, a linear model was established to link  $N_2O$  emission to those factors, which could totally explain up to 60.7% of the observed variation in  $N_2O$  emission. The most important influencing factor was the amount of N fertilizer input, which had significantly positive correlation with  $N_2O$  fluxes. Relative emission fluxes of continuous flooding, intermittent irrigation and wet irrigation were 0. 17:0. 56:1. The soil total nitrogen content had significantly positive effect on  $N_2O$  fluxes while the optimum pH for  $N_2O$  emission was pH > 8. Straw of N-fixing crop had much higher fluxes than other organic fertilizers while manure had no significant effects on increasing  $N_2O$  emission. Application of other crop straws actually reduced  $N_2O$  emission by 36%, as compared with fields without organic N input. The relative fluxes for early rice and later rice were 71% and 48% of that for single rice, respectively. Inclusion of more influencing factors such as soil property, climate and rice type helped explaining more of the variations in the observed  $N_2O$  emission from paddy fields.

Key words:paddy fields;  $\mathrm{N_2O}\,;$  statistics; model; impact factors

N<sub>2</sub>O是重要的农业温室气体,IPCC 报告指出农 田土壤排放的N<sub>2</sub>O约占总人为源N<sub>2</sub>O的 24%<sup>[1,2]</sup>.早 期研究认为水稻田不排放N<sub>2</sub>O,但从 20 世纪 90 年代 开始,越来越多的田间点位研究表明水稻田排放大 量的N<sub>2</sub>O. 邢光熹等<sup>[3]</sup>指出,中国水稻田N<sub>2</sub>O年排放 量和水稻生长期排放量约为中国农田年总排放量的 22%和7%.点位研究表明水稻田N<sub>2</sub>O排放受氮肥施 用量、水分管理方式、土壤属性等多因素综合影响, 其中 N 肥被公认为是N<sub>2</sub>O的重要来源,对N<sub>2</sub>O排放量 的估算也多以 N 肥用量为基础. 亚洲地区是高 N 肥施入区,每年消耗的 N 肥约占世界总量的 50%,而 全球 90%的稻田分布在亚洲地区,因此研究亚洲地区水稻田N,O排放具有现实意义.

大样本统计分析有助于发现普遍规律,找出影

收稿日期:2010-02-09;修订日期:2010-04-07

基金项目:国家自然科学基金委创新群体项目(40621001);中国科 学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-Q1-07)

作者简介:廖千家骅(1984~),女,博士研究生,主要研究方向为气候变化与温室气体排放,E-mail:qjhliao@issas.ac.cn

<sup>\*</sup> 通讯联系人 Æ-mail:yanxy@issas.ac.cn

响因子.目前水稻田N<sub>2</sub>O排放的大样本统计研究有: 文献[4~6]分别收集水稻田N<sub>2</sub>O排放资料,构建不 同水分管理下 N 施入量的线性排放公式.这些研究 仅考虑了水分和肥料用量这 2 个影响因素,对于其 他影响因子如水稻类型、土壤属性等并无描述. Bouwman等<sup>[7]</sup>模拟水稻田的施氮量、土壤属性、观 测时间、采样频率等相关因子和排放量之间的关系, 但没有考虑水分管理类型和水稻类型等.因此,本研 究基于大量的N<sub>2</sub>O排放田间点位数据,通过统计模 拟分析寻找影响水稻田N<sub>2</sub>O排放的更多影响因子, 并定性各个因子的重要性.

#### 1 数据收集

本研究共收集了 41 篇文献<sup>[8-48]</sup>中关于亚洲地 区水稻田N<sub>2</sub>O排放的田间点位观测数据 221 组. 排 放量以排放通量均值 flux 表示,单位为µg/(m<sup>2</sup>•h). 由于以前检测方法上的缺陷,用高纯 N<sub>2</sub> 为载气时造 成 CO<sub>2</sub> 干扰引起的N<sub>2</sub>O高估现象,因此,对于采用上 述方法的 5 篇文献中的N<sub>2</sub>O排放通量进行了数值校 正,校正方法参见文献[49]. 影响因子分为肥 料因子、水分因子、土壤属性因子、作物因子和气候 因子.

其中 肥料因子包括化肥类型、施肥量、有机肥 类型和有机肥用量等.由于在大多数文献中不同有 机肥的含水量以及含氮量信息并不清楚,因此不考 虑有机肥的施用量 仅考虑有机肥类型 收集到的肥 料类型包括含氨基氮肥、尿素、混合肥等;有机肥分 为干厩肥(manure)、绿肥(green manure, GM)、固氮 作物秸秆(fixing straw, FS)、一般秸秆(straw)和无 有机肥添加(no).施化肥量(N input)按  $kg/(hm^2 \cdot season)$  计. 水分因子表现为不同的水分管 理措施,分为间歇灌溉(intermittent irrigation, IR)、 连续淹水(flood)、湿润灌溉(wet).土壤属性因子考 虑有机碳含量(soil organic carbon content %, SOC %)、全氮含量(soil total nitrogen content %, STN %)和 pH ,粘粒含量等由于资料太少无法收集.作 物因子考虑不同的水稻类型,分为早稻(early rice)、 晚稻(later rice)、单季稻(single rice). 气候因子收集 年平均温度、年平均降雨量等,其中年平均温度按照 不同气候带划分为 <10℃、10 ~ 20℃、>20℃.

#### 2 模型构建

根据上述的因子数据 构建下列回归模型.

flux = Intercept + 
$$\sum_{i}$$
 肥料因子<sub>i</sub> +  $\sum_{j}$  水分因子<sub>j</sub>  
+  $\sum_{k}$  土壤属性因子<sub>k</sub> +  $\sum_{l}$  作物因子<sub>l</sub>  
+  $\sum_{k}$  气候因子<sub>m</sub> (1)

式中,Intercept 表示常数项;*i*~*m* 代表各个影响因子中的具体因子.

利用统计软件 SPSS16.0 中的线性混合模型 (Linear Mixed Model)对上述因子进行拟合.flux、 STN、用 N 量等连续变量的频度呈对数正态分布,将 其进行对数转化 使数据呈正态分布 贴近模型对数 据分布的要求.考虑到存在施氮量为0,用 ln(1+N input)代替 ln(N input).初步拟合结果显示化肥类 型没有显著效果(p > 0.05),肥料因子仅考虑化肥 N用量和有机肥类型.ln(STN)和 ln(SOC)两者有 很好的正相关性,造成  $\ln(SOC)$  冗余(p > 0.05); pH 当作连续变量时没有意义,但将其当作分层变量 时却有显著统计学意义;同时,pH和STN呈负相关 关系(收集的原始数据中,pH和STN相关系数为 -0.31),可认为不同的 pH 分层对 STN 有一定的聚 集作用 因此土壤因子考虑 pH 分层和 STN 的交互 作用.年平均降雨量无显著效果(p > 0.05),因为 水稻田水分主要受人为因素控制,降雨对N2O排放 的作用被水分管理掩盖.去除无显著效果的因子,公 式(1)转化为:

 $\ln(\text{flux}) = \text{Intercept} + A \cdot \ln(1 + \text{Ninput})$ 

+ OrganicN<sub>i</sub> + Water<sub>i</sub> +  $B_k \cdot [pH_k * ln(STN)]$ 

+ Annual Temperature<sub>i</sub> + Rice type<sub>m</sub> (2) 式中,Intercept 表示常数项;\* 表示交互作用;*i*~*m* 表示各因子分层类型; N input 和 Organic N 分别表 示化肥用量和有机肥类型; Water 表示水分管理措 施; Annual Temperature 表示年平均温度; Rice type 表示水稻类型.

公式(2)的具体结果见表1和表2.

## 3 结果

表1 中的 F 值表示各因子解释总体变异的贡献,即重要性,F 值越大表明对结果变异解释程度越高.最重要的影响因子为化肥用量,其次为水分类型,这印证了 IPCC 《1996 国家温室气体排放清单指南》中根据氮肥用量计算N<sub>2</sub>O排放量、IPCC 《2006 国家温室气体排放清单指南》中根据氮肥用量和水分管理类型计算稻田N<sub>2</sub>O排放量的合理性.其它重要影响因子包括 pH 与土壤全氮交互因子、年平均

表1 因子的 Type Ⅲ 检测结果1)

Table 1 Type Ⅲ test of effects

	Numerator df $^{2)}$	Denominator df 3)	F	р
Intercept	1	182	39.84	0.000
Organic N	4	182	3.49	0.009
Rice type	2	182	5.09	0.007
Water	3	182	11.56	0.000
Annual Temperature	2	182	10.22	0.000
ln(1 + N input)	1	182	24.21	0.000
pH* ln(STN)	5	182	8.36	0.000

1) Type Ⅲ用于默认无缺失数据的方差变异分析;2) Numerator df 表

示该因子层的自由度; 3) Denominator df 表示模型总自由度

温度(p < 0.001),有机肥类型重要性最弱(p < 0.01).

每个因子分层的估计值、标准差、自由度、统计 学重要性以及 95% 的置信区间见表 2. 化肥用量、全 氮含量和排放通量均呈显著正相关关系. 表 2 的估 计值大小代表每个因子不同分层对的N<sub>2</sub>O排放的相 对大小,如:水分类型中持续淹水的相对排放通量 最小;年平均温度 10 ~ 20℃的相对排放通量最 大等.

	表 2	线性模型参数估计结果
Table 2	Estim	ated values of effects in linear model

	4.1. <i>t</i>		<b></b>		95%		
<b>参</b> 叙	估计值	标准误	自田度	р	下限	上限	
Intercept	3.886	0.476	182	0.000	2.947	4.826	
[organic N = fixing straw ]	1.675	0.663	182	0.012	0.367	2.983	
[organic N = green manure ]	-0.470	0.509	182	0.358	- 1. 474	0.535	
[organic N = manure ]	0.536	0.265	182	0.045	0.013	1.060	
$[\text{organic N} = \text{no}^{1}]$	0.440	0.174	182	0.012	0.097	0.784	
[organic N = straw ]	0 2)	0.000	—	—	—	—	
[rice type = early rice ]	-0.328	0.207	182	0.115	- 0. 737	0.080	
[rice type = late rice ]	-0.713	0. 229	182	0.002	-1.164	-0.261	
[rice type = single rice ]	0	0.000	—	—	_	—	
[Water = flood]	-1.684	0.377	182	0.000	- 2. 429	- 0. 939	
[Water = IR]	-0.654	0.328	182	0.048	- 1. 301	- 0. 006	
[Water = unknown $^{3)}$ ]	-1.052	0.462	182	0.024	- 1.964	-0.139	
[Water = wet ]	0	0.000	—	—	_	—	
[temperature < $10^{\circ}$ C ]	- 1. 391	0.325	182	0.000	- 2. 032	- 0. 749	
[temperature > $20^{\circ}C$ ]	-0.456	0.173	182	0.009	- 0. 797	-0.115	
[temperature = $10^{\circ}C \sim 20^{\circ}C$ ]	0	0.000	—	—	_	—	
ln(1 + N input)	0.158	0.032	182	0.000	0.095	0.227	
$[pH < 6]* \ln(STN)$	0.397	0.173	182	0.023	0.056	0.739	
[pH 6 ~ 7]* ln(STN)	0.320	0.154	182	0.039	0.016	0.625	
[pH 7 ~ 8]* ln(STN)	0.571	0.127	182	0.000	0.321	0.821	
$[pH > 8]* \ln(STN)$	0.119	0.111	182	0. 289	-0.101	0.339	
[pH = Unknown ]* ln(STN)	0.267	0.265	182	0.315	- 0. 256	0.791	

1) no 表示无有机肥;2) 表示冗余值;3) unknown 表示文献中未明确的类型

模型模拟值和原始观测值的对比情况见图 1, 其中大多数点位于 y = x 线的两侧 ,总体拟合度较好. 观测值 <1 的点偏离 y = x 程度较大,但由于其数值 小 指数转化为 flux 之后差值并不算太大;观测值处 于 4~6 区间的点存在低估现象,指数转化为 flux 之 后更明显. flux 观测值的平均值(以 N 计)为 37.5  $\mu g/(m^2 \cdot h)$ ,预测值的平均值为 29.6  $\mu g/(m^2 \cdot h)$ ,低 了 21%.预测值和模拟值线性回归拟合能解释约 60.7% 的变异 模型具有显著统计学意义.

4 讨论

# 4.1 N 肥用量和水分管理对N<sub>2</sub>O排放的影响 肥料用量是最重要的影响因子,图2显示的是

肥料用量的相对排放通量,施肥和未施肥的差异很 大,当 N 肥用量(以 N 计,下同)是 100 和 300  $kg/hm^{2}$ 时,其相对排放通量为无施肥状态的 2.1 和 2.5 倍.当施肥量为 0~50 kg/hm<sup>2</sup>时,相对排放通量 增长很快,对于低于 50 kg/hm<sup>2</sup>的排放通量估值并 不准确.但由于数据来源中肥料用量基本高于 50  $kg/hm^{2}$ ,而且现实施肥中稻田的施肥量一般高于 50  $kg/hm^{2}$ ,因此对于常规施肥有很好的借鉴意义.

水分管理措施为仅次于肥料用量的重要影响因 子.持续淹水:间歇灌溉:湿润灌溉相对排放通量的 比值为0.17:0.56:1 [图 3(a)],湿润灌溉有利于 N<sub>2</sub>O排放,而持续淹水最有利于N<sub>2</sub>O减排.

水分是土壤氧气含量的重要限制因子,进而控



制硝化和反硝化进程. Davidson 等<sup>[50]</sup>认为土壤充水 孔隙度(water filled pore space, WFPS)在 30% ~ 70%之间,硝化作用产生的N<sub>2</sub>O占主导,在 60% 左右 硝化和反硝化同时作用.郑循华等<sup>[51]</sup>研究发现 WFPS 在 85%和 98% 左右,N<sub>2</sub>O排放量最大,低于这 个湿度,则排放量和湿度呈正相关. Smith<sup>[52]</sup>报道土 壤处于干-湿交替时存在较高的反硝化作用率,当氧 气处于一定浓度时,才能产生高的N<sub>2</sub>O/N<sub>2</sub>比率.因 此,持续淹水的水分处于饱和状态,氧气含量很少, 反硝化进行得很彻底,产物为 N<sub>2</sub>,中间产物N<sub>2</sub>O很 少.湿润灌溉使得水分一直处于半饱和状态,可以同 时发生不彻底的硝化和反硝化作用,最有利于N<sub>2</sub>O 排放;存在数次土壤干湿交替作用的间歇灌溉排放 位于中间.unknown 为文献中未明确的水分管理类 型,可以假定为持续淹水、间歇灌溉或者湿润灌溉,





annual temperatures and organic fertilizer types

N 肥是引起N<sub>2</sub>O排放的直接因子,由 N 肥引起的排放因子(fertilizer-induced emission factor, FIE) 是估算N<sub>2</sub>O排放便捷方法之一.水分管理措施也很 重要,计算不同水分管理类型下的 FIE 更能代表真 实情况.利用原始数据中含施 N 量的观测组,计算 模型模拟结果中每个观测组的 FIE 值,再分不同水

分管理措施的 FIE 取均值 ,结果见表 3. 具体计算方法见公式(3)~(6).  
flux(N) = 
$$e^{3.886} \cdot e^{0.44} \cdot STN^{A_i} \cdot (1 + Ninput)^{0.158}$$

• 
$$e^{Water_i} \cdot e^{T_i} \cdot e^{Ricetype_i}$$
 (3)  
对应的 flux (0) =  $e^{3.886} \cdot e^{0.44} \cdot STN^{A_i} \cdot e^{Water_i}$   
•  $e^{T_i} \cdot e^{Ricetype_i}$  (4)

emission = flux • days • 24/100 000 (5)  
FIE = 
$$\frac{100 \cdot [\text{emission}(N) - \text{emission}(0)]}{N}$$

式中 N 表示 N 肥输入量( $kg/hm^2$ ); *i* 表示不同因子 的分层;  $A_i$  为不同 pH 分层和 ln(STN)的交互作用 系数; days 为观测时长或生长季; 3.886 为常数项系 数; 0.44 为有机肥类型中无有机肥项的系数; 0.158 为肥 料 用 量 系 数; emission 表示 生长季 排 放 量 ( $kg/hm^2$ ).

FIE 均值为 0.33%, 略高于 IPCC2006 指南<sup>[3]</sup>中 推荐值 0.3%. 其中,持续淹水的 FIE 值最小,其次 为间歇灌溉,湿润灌溉最大,3种水分类型的FIE比

表 <b>5</b>	个同水分尖型下	FIE 和育意平均排放通重模拟结果	

(6)

Table 3	FIE values and	mean of background	fluxes for different	water managements
---------	----------------	--------------------	----------------------	-------------------

水分类型	***		95%置信区间		背景平均排放通量 <sup>1)</sup>	95%置信区间	
	奴加妇奴	FIL/%	下限	上限	$/\mu g \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$	下限	上限
持续淹水	37	0.07	0.054	0.087	2.8	2. 2	3.3
间歇灌溉	119	0.38	0.32	0.45	17.3	15.9	18.7
湿润灌溉	8	0.85	0.59	1.11	39.0	25.5	52.5
不确定	9	0.30	2)	0.76	6.4	2.7	10.1
均值	173	0.33	0.28	0.39	14.6	13.0	16.3

1) 公式(4) 中的 flux(0); 2) 一为负值

值为 0.08:0.45:1,这和图 2(a) 中的相对排放通量 趋势一致. 邹建文等<sup>[6]</sup>将中国地区水稻田分成持续 淹水、淹水-烤田-淹水、淹水-烤田-淹水-湿润灌溉等 3 种模式, FIE 分别为 0.02%、0.42% 和 0.73%; Akiyama 等<sup>[4]</sup>得到持续淹水稻田 FIE0.22%,有排水 过程稻田 FIE 0.37%,均值为 0.31%; Yan 等<sup>[53]</sup>指 出水稻 FIE 为 0.25%.上述结果和本研究结果整体 趋势一致,两者不同之处在于:上述研究仅考虑水肥 因素,并没有考虑其他因子的综合影响,表 3 中所得 的 FIE 是综合作用(包含 pH、STN、水稻类型、气温、 肥料类型)的模拟结果,更具现实意义.

固氮作物秸秆贡献最大,相对排放通量是未添加有机肥的3.12倍,是添加秸秆的5.38倍;添加厩肥略高于未施有机肥,添加秸秆和绿肥比未施有机肥相对排放通量要小,能减少N<sub>2</sub>O排放[图3(b)].

有关厩肥添加对N<sub>2</sub>O排放的研究很不一致,在 本研究收集的文献中,有4篇文献<sup>[8,9,21,22]</sup>报道添加 厩肥能减少N<sub>2</sub>O排放,3篇文献<sup>[20,27,34]</sup>证明添加厩肥 增加N<sub>2</sub>O排放,因此对N<sub>2</sub>O排放表现为相对排放通量 略高于未添加有机肥项,两者无显著差异.添加厩肥 能有效改变土壤微生物、物理化学属性等.厩肥能增 加硝化菌和反硝化菌的活性,促进硝化和反硝化作 用;同时也能增加其他微生物的活性,加快土壤氧气 的消耗,加速了土壤厌氧环境的形成,间接增强了土 壤生物反硝化作用,促进N<sub>2</sub>O排放<sup>[54]</sup>;含N量高的 厩肥或者添加较多厩肥时,对总施 N 量的贡献增加,也能促进N<sub>2</sub>O排放<sup>[16 23 ]</sup>.而对于未经堆腐的厩肥,在矿化分解过程和硝化菌、反硝化菌竞争 N 源, 表现为抑制N<sub>2</sub>O排放<sup>[16 23 ]</sup>.不同的厩肥类型、施肥 量、施用方式和施用时间都有可能造成较大的N<sub>2</sub>O 排放差异.

秸秆对于N<sub>2</sub>O排放的作用一直是研究的热点. 有田间实验表明添加前一年晚稻秸秆促进第二年早 稻N<sub>2</sub>O排放<sup>[27]</sup>;但更多研究认为一般作物秸秆的 C/N很高,在分解过程中其他微生物竞争 N 源,降低 N<sub>2</sub>O排放<sup>[29,38,47]</sup>,且C/N和N<sub>2</sub>O排放呈显著负相 关<sup>[55]</sup>. 而且,一般作物秸秆含N量很低,在添加量 (以干重计)为3000 kg/hm<sup>2</sup>时,秸秆含N量为 0.5% ,得秸秆增加的氮量 15 kg/hm<sup>2</sup> ,仅占常规施肥 量 200 kg/hm<sup>2</sup>的 7.5%,对总施 N 量影响较小.图 3 (b) 中秸秆的相对排放通量为无添加有机肥的 64% 和未添加有机肥相比具有显著差异(p < 0.001) 因此认为秸秆在大区域范围内具有一定减 排效果,减排量为36%.绿肥对于N<sub>2</sub>O排放的作用类 似于一般作物秸秆,且其相对排放通量更小,但绿肥 数据量较少 在大区域范围内是否有减排效果应需 收集更多数据进一步研究. C/N 含量很低的固 N 作 物秸秆,表现为促进N,O排放.

4.2 其他因子对N<sub>2</sub>O排放的影响

土壤因子对N<sub>2</sub>O排放的贡献不容忽略,表1中

pH\* ln(STN)的F值和肥料因子相近,进一步说明 原来的统计研究仅考虑水分管理和肥料信息是不够 的.pH\* ln(STN)的系数均为正数,ln(STN)和 ln (flux)呈显著正相关(p < 0.001).图4显示不同 pH 分层的相对排放通量,假定 STN% 为 0.1. 曲线呈凹 型折线 ,pH > 8 最有利于N,O排放 ,pH 处于 7~8 时 最小,前者的相对排放通量为后者的2.8倍.不同 pH 分层和 STN 交互作用的相对排放通量见图 5. 对 本研究所收集的原始数据进行相关性分析,pH和 STN 呈显著负相关(回归方程为 STN = -0.039 ×  $pH + 0.386 R^2 = 0.31 p < 0.001 n = 206$ ) 当 pH 值 高时 STN 往往含量较低 不同的 pH 分层对 STN 有 大致的划分.因此结合实际情况,笔者考虑不同 pH 分层下、最有可能出现的 STN 值(符合上述回归公 式)的相对排放通量.pH 根据划分的类型分别取 4 个分段的均值:5、6.5、7.5 和9,对应的 STN% 回归 值为 0.197、0.135、0.095 和 0.034, 见图 5 中的点 值.STN 和 pH 的负相关性能在一定程度上能缓解 pH 分层造成的差异,但不能改变整体趋势,pH > 8 时对应的相对排放量仍然最大,相对排放通量为 0.65, pH 处于 7~8 最小, 为 0.26. 前者排放通量是 后者的 2.5 倍,低于图 3 中的 2.8 倍,证明取 pH 和 STN 的交互作用比两者单独作用更加有效.



图 4 pH 分层的N<sub>2</sub>O相对排放通量 Fig. 4 Relative N<sub>2</sub>O fluxes among pH classes

pH 值 对 土 壤  $N_2O$  排 放 机 制 较 为 复 杂, Sahrawat<sup>[56]</sup>、朱兆良等<sup>[57]</sup>认为酸性到微碱性的 pH范围内,硝化作用和 pH 呈显著正相关.而同时也有 实验证明,反硝化作用也和 pH 呈显著正相关.黄耀 等<sup>[58]</sup>证明在 pH 5.6~8.6范围内,土壤 $N_2O$ 排放与 土壤 pH 呈显著正相关.本研究结果显示 pH 位于中 性范围时呈现低谷,和已知现象不符.笔者认为上述的研究结果均来源于精确的室内实验,往往为单因 子实验,排除了其他因素的干扰,而在综合研究中, 由于不同观测点、观测人员等随机误差、以及一些尚 未考虑到的因素,都可能导致N<sub>2</sub>O结果受其他一些 未知因素的协同作用.





不同年平均温度对 $N_2O$ 排放贡献差异很大(表 2),且对整个模型的贡献值也较高(表1).最有利于  $N_2O$ 排放的年平均气温为 10~20°C,相对排放量约 为<10°C的4倍,>20°C的1.6倍[图3(c)].年平 均温度位于10~20°C的点大部分位于亚热带季风 区,此时水稻种植期的平均温度往往为20~30°C. 同理,年平均温度<10°C和>20°C时水稻种植期的 平均温度很有可能是10~20°C和>30°C.而硝化和 反硝化细菌适宜的温度为20~30°C,过高或者过低 都会抑制硝化菌的活性<sup>[59]</sup>.因此,水稻种植期的平 均温度位于20~30°C区间(此时年平均温度区间很 有可能位于10~20°C)有利于微生物活性,促进 $N_2O$ 排放.

早稻和晚稻的相对排放通量分别是单季稻的 72%和49%(表4),且晚稻和单季稻的区别达到显 著差异水平(表2).这种差异可能是水稻种植之前 的水分状态不同造成.单季稻和早稻种植之前往往 为旱地作物或者空闲地,处于排水状态,土壤氧化还 原电位较高,土壤含水率也较低,有利于N<sub>2</sub>O排放. 晚稻种植之前的水分状况为淹水状态,氧化还原电 位较低,不利于N<sub>2</sub>O排放.在水稻种植之后,原本淹 水状态的土壤氧化还原电位会一直较低,而原本氧 化还原电位高的土壤会慢慢降低,相比较而言有利 于N<sub>2</sub>O排放.而且,单季稻种植之前处于旱地或者休 闲状态的时间比早稻要长,相对排放通量也较大.

### 表4 不同水稻类型N<sub>2</sub>O相对排放通量

Table 4 Relative N2O fluxes of different rice types

稻类	相对排放通量	95%置信区间
单季稻	1 1)	—
晚稻	0.49	(0.31 p.77)
早稻	0.72	(0.48,1.08)

1) 假定单季稻相对排放通量为1

#### 5 结论

(1)所建立的统计模型能解释 60.7% 的总体变 异,具有显著统计学意义.大样本统计模型结果显 示:肥料用量是最重要的影响因子,和排放通量呈显 著正相关;水分管理措施重要性仅次于肥料用量,其 中湿润灌溉最有利于 $N_2O$ 排放;STN 和排放通量呈 显著正相关关系,pH 呈非线性关系,pH > 8 最有利 于 $N_2O$ 排放;添加一般秸秆能减少 36% 的 $N_2O$ 排放; 最有利于 $N_2O$ 排放的年平均温度为 10~20°C;不同 水稻类型能代表种植之前的水分信息,早稻的相对 排放是单季稻的 0.71,晚稻是单季稻的 0.48.

(2)除了 N 用量和水分管理等因子,统计模型显示土壤属性因子、气候因子和作物类型对排放通量均具统计学意义,综合考虑更多影响因子更有利于解释水稻田N,0排放.

#### 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]. 2007.
- [2] 蔡祖聪,徐华,马静.稻田生态系统 CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O排放[M].合肥:中国科学大学出版社,2009.296-299.
- [3] 邢光熹,颜晓元.中国农田N<sub>2</sub>O排放的分析估算与减缓对策
  [J].农村生态环境,2000,16(4):1-6.
- [4] Akiyama H , Yagi K , Yan X. Direct N<sub>2</sub>O emissions from rice paddy fields: Summary of available data [J]. Global Biogeochemical Cycles, 2005, 19, GB1005, doi: 10.1029/ 2004GB002378.
- [5] Zou J , Huang Y , Qin Y , et al. Changes in fertilizer-induced direct N<sub>2</sub>O emissions from paddy fields during rice-growing season in China between 1950s and 1990s [J]. Global Change Biology , 2009 , 15: 229-242.
- [6] 邹建文,刘树伟,秦艳梅,等.不同水分管理方式下水稻生长 季N<sub>2</sub>O排放量估算:模型验证和输入参数检验[J].环境科 学,2009,30(4):937-948.

- [7] Bouwman A F, Boumans L J M. Modeling global N<sub>2</sub>O and NO emissions from fertilized fields [J]. Global Biogeochemical Cycles 2002, 16(4), 1080, doi:10.1029/2001GB001812.
- [8] 杨军,胡飞.广州地区早稻田施肥对N<sub>2</sub>O排放影响的初步研究[J].华南农业大学学报,1996,17(4):52-57.
- [9] 杨军,伍时照.广州地区晚季稻田 CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O排放研究初报 [J].华南农业大学学报,1997,19(3):62-64.
- [10] Cai Z C , Xing G X , Shen G Y , et al. Measurements of  $CH_4$  and  $N_2O$  emissions from rice paddies in Fengqiu , China [J]. Soil Science and Plant Nutrition , 1999 45:1–13.
- [11] Cai Z C , Xing G X , Yan X Y , et al. Methane and nitrous oxide emissions from rice paddy fields as affected by nitrogen fertilisers and water management [J]. Plant and Soil , 1997 , 196:7-14.
- [12] 徐华,鹤田治雄. 丘陵区稻田N<sub>2</sub>O排放的特点[J]. 土壤与环 境,1999 **8**(4):266-270.
- [13] 曹金留,徐华.苏南丘陵区稻田氧化亚氮的排放特点[J].生态学杂志,1999,18(3):6-9.
- [14] Xiong Z Q, Xing G X, Tsuruta H, et al. Measurement of nitrous oxide emissions from two rice-based cropping systems in China [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2002 64:125-133.
- [15] 蒋静艳,黄耀,宗良纲.水分管理与秸秆施用对稻田 CH<sub>4</sub>和 N<sub>2</sub>O排放的影响[J].中国环境科学,2003 23(5):552-556.
- [16] 邹建文,黄耀,宗良纲,等. 稻田 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O排放及其影响因素[J].环境科学学报 2003,23(6):758-764.
- [17] 徐华,蔡祖聪. 土壤性质和非水稻生长期土壤水分对 CH<sub>4</sub> 产 生、氧化和排放的影响 [J]. 中国科学院研究生院学报, 2004,21(3):427-432.
- [18] 梁巍,张颖,岳进,等.长效氮肥施用对黑土水旱田 CH<sub>4</sub>和 N<sub>2</sub>O排放的影响[J].生态学杂志 2004 23(3):44-48.
- [19] 卢维盛,张建国,廖宗文.广州地区晚稻田 CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O的排放通量及其影响因素[J].应用生态学报,1997,8(3):275-278.
- [20] 陈冠雄,王正平.稻田CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O的排放及养萍和施肥的影响[J].应用生态学报,1995 6(4):378-382.
- [21] Zheng X H , Wang M X , Wang Y S , et al . Mitigation options for methane , nitrous oxide and nitric oxide emissions from agricultural ecosystems [J]. Advances in Atmospheric Sciences , 2000 ,17:83-92.
- [22] Yu K W, Chen G X, Patrick W H. Reduction of global warming potential contribution from a rice field by irrigation, organic matter, and fertilizer management [J]. Global Biogeochemical Cycles, 2004, 18, GB3018, doi:10.1029/2004GB002251.
- [23] Zou J W , Huang Y , Lu Y Y , et al. Direct emission factor for N<sub>2</sub>O from rice-winter wheat rotation systems in southeast China
  [J]. Atmospheric Environment , 2005 39:4755-4765.
- [24] Jiang C S , W Y S , Zheng X H , et al . Methane and Nitrous Oxide Emissions from Three Paddy Rice Based Cultivation Systems in Southwest China [J]. Advances in Atmospheric Sciences , 2006 , 23 (3) : 415-424.
- [25] Christine K, Klaus D, Zheng X H, et al. Fluxes of methane and nitrous oxide in water-saving rice production in north China [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2007 77:293-304.

- [26] 肖小平,伍芬琳,黄风球.不同稻草还田方式对稻田温室气体 排放影响研究[J].农业现代化研究 2007 28(5):629-632.
- [27] 秦晓波 李玉娥.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.
- [28] 陈书涛,黄耀.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.
- [29] 江长胜, 王跃思, 郑循华. 川中丘陵区冬灌田甲烷和氧化亚氮 排放研究[J]. 应用生态学报, 2005, 16(3):539-544.
- [30] Jin Y, Yi S, Wei L, et al. Methane and nitrous oxide emissions from rice field and related microorganism in black soil, northeastern China [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2005, 73:293-301.
- [31] Kumar U, Jain M C, Pathak H, et al. Nitrous oxide emission from different fertilizers and its mitigation by nitrification inhibitors in irrigated rice [J]. Biology and Fertility of Soils, 2000 32: 474-478.
- [32] Majumdar D , Kumar S , Pathak H , et al. Reducing nitrous oxide emission from an irrigated rice field of North India with nitrification inhibitors [J]. Agriculture Ecosystems & Environment , 2000 , 81:163-169.
- [33] Ghosh S , Majumdar D , Jain M C. Methane and nitrous oxide emissions from an irrigated rice of North India [ J ]. Chemosphere 2003 51:181-195.
- [34] Pathak H , Bhatia A , Prasad S , et al. Emission of nitrous oxide from rice-wheat systems of Indo-Gangetic plains of India [J]. Environmental Monitoring and Assessment 2002 77: 163-178.
- [35] Suratno W , Murdiyarso D , Suratmo F G , et al. Nitrous oxide flux from irrigated rice fields in West Java [J]. Environmental Pollution ,1998 ,102:159-166.
- [36] Bronson K F , Neue H U , Singh U , et al. Automated chamber measurements of methane and nitrous oxide flux in a flooded rice soil. 1. Residue , nitrogen , and water management [J]. Soil Science Society of America Journal ,1997 61:981-987.
- [37] Bronson K F, Singh U, Neue H U, et al. Automated chamber measurements of methane and nitrous oxide flux in a flooded rice soil. 2. Fallow period emissions [J]. Soil Science Society of America Journal ,1997 61:988-993.
- [38] Abao E B, Bronson K F, Wassmann R, et al. Simultaneous records of methane and nitrous oxide emissions in rice-based cropping systems under rainfed conditions [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems 2000 58:131-139.
- [39] Malla G , Bhatia A , Pathak H , et al. Mitigating nitrous oxide and methane emissions from soil in rice-wheat system of the Indo-Gangetic plain with nitrification and urease inhibitors [J]. Chemosphere , 2005 58:141-147.
- [40] Bhatiaa A, Pathakb H, Jaina N, et al. Global warming potential of manure amended soils under rice-wheat system in the Indo-Gangetic plains [J]. Atmospheric Environment, 2005, 39: 6976-6984.
- [41] 江长胜,王跃思,郑循华,等.耕作制度对川中丘陵区冬灌田 CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O排放的影响[J].环境科学,2006,27(2):207-

213.

- [42] Toshiaki I, Sanjit K D, Ram G K. Nitrous oxide emission measurement with acetylene inhibition method in paddy fields under flood conditions [J]. Paddy Water Environment, 2007, 5: 83-91.
- [43] 于亚军,朱波,王小国. 成都平原水稻→油菜轮作系统氧化亚 氮排放[J]. 应用生态学报,2008,19(6):1277-1282.
- [44] 马静,徐华,蔡祖聪. 焚烧麦秆对稻田 CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O排放的影响
  [J].中国环境科学,2008,28(2):107-110.
- [45] Wang Y , Zhu B , Wang Y. N<sub>2</sub>O Emission from paddy field under different rice planting modes [J]. Wuhan University Journal of Natural Sciences 2006 ,11 (4):989-996.
- [46] Towprayoon S, Smakgahn K, Poonkaew S. Mitigation of methane and nitrous oxide emissions from drained irrigated rice fields [J]. Chemosphere, 2005, 59: 1547-1556.
- [47] 马静.秸秆还田和氮肥施用对稻田 CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O排放的影响
  [D].南京:中国科学院南京土壤研究所 2008.
- [48] 黄树辉.裂缝条件下稻田土壤中N<sub>2</sub>O的释放和氮溶质运移的 机理研究[D].杭州:浙江大学 2005.
- [49] Zheng X Y, Mei B L, Wang Y H, et al. Quantification of N<sub>2</sub>O fluxes from soil-plant systems may be biased by the applied gas chromatograph methodology [J]. Plant and Soil 2008 311:211-234.
- [50] Davidson E A, Swank W T. Environmental parameters regulating gaseous nitrogen losses from two forested ecosystems via nitrification and denitrification [J]. Applied and Environmental Microbiology ,1986 , 52: 1287-1292.
- [51] 郑循华,王明星,王跃思,等.稻麦轮作生态系统中土壤湿度 对N<sub>2</sub>0产生与排放的影响[J].应用生态学报,1996,7(3): 273-279.
- [52] Smith K A. Greenhouse gas fluxes between land surface and the atmosphere [J]. Progress of Physocial Geography, 1990 3:349-372.
- [53] Yan X Y, Akiyama H, Ohara T. Estimation of nitrous oxide, nitric oxide and ammonia emissions from croplands in East, Southeast and South Asia [J]. Global Change Biology. 2003, 9: 1080-1096.
- [54] 张玉铭,胡春胜,董文旭.农田土壤N<sub>2</sub>O生成与排放影响因素及N<sub>2</sub>O总量估算的研究[J].中国生态农业学报,2004,12 (3):119-123.
- [55] Huang Y , Zou J W , Zheng X H , et al. Nitrous oxide emissions as influenced by amendment of plant residues with different C: N ratios [J]. Soil Biology & Biochemistry , 2004 , 36: 973–981.
- [56] Sahrawat K L. Nitrification in some tropic soils [J]. Plant and Soil ,1982 ,65:281-286.
- [57] 朱兆良,文启孝.中国土壤氮素[M].南京:江苏科学技术出版社,1992.97-160.
- [58] 黄耀,焦燕,宗良纲,等. 土壤理化特性对麦田N<sub>2</sub>0排放影响的研究[J].环境科学学报 2002 5(22):598-602.
- [59] 俞大钹 李季伦.微生物学[M].北京:科学出版社,1985.62-63.