亚洲地区稻田N_2O排放影响因子统计模拟分析

廖千家骅[1,2],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_2O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_2O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_2O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_2O排放,厩肥作用不明显,添加秸秆的处理N_2O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_2O排放.不同水稻类型的N_2O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_2O排放.

关键词:稻田;N_2O;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_2O Emission from Paddy Fields in Asia

LIAO Qian-jia-hua[1,2], YAN Xiao-yuan[1]

(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; N_2O; statistics; model; impact factors

N_2O是重要的农业温室气体,IPCC 报告指出农田土壤排放的N_2O约占总人为源N_2O的 24%[1,2].早期研究认为水稻田不排放N_2O,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_2O.邢光熹等[3]指出,中国水稻田N_2O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_2O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_2O的重要来源,对N_2O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_2O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

* 通讯联系人,E-mail:yanxy@issas.ac.cn

响因子. 目前水稻田N_2O排放的大样本统计研究有:文献[4~6]分别收集水稻田N_2O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[7]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_2O排放田间点位数据,通过统计模拟分析寻找影响水稻田N_2O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[8~48]中关于亚洲地区水稻田N_2O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^2·h). 由于以前检测方法上的缺陷,用高纯 N_2 为载气时造成 CO_2 干扰引起的N_2O高估现象,因此,对于采用上述方法的 5 篇文献中的N_2O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·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.

$$\begin{aligned}\text{flux} = \text{Intercept} &+ \sum_i \text{肥料因子}_i + \sum_j \text{水分因子}_j \\ &+ \sum_k \text{土壤属性因子}_k + \sum_l \text{作物因子}_l \\ &+ \sum_m \text{气候因子}_m \end{aligned} \quad (1)$$

式中,Intercept 表示常数项;$i \sim m$ 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N_2O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:

$$\begin{aligned}\ln(\text{flux}) = \text{Intercept} &+ A \cdot \ln(1 + \text{Ninput}) \\ &+ \text{OrganicN}_i + \text{Water}_j + B_k \cdot [\text{pH}_k * \ln(\text{STN})] \\ &+ \text{Annual Temperature}_l + \text{Rice type}_m \end{aligned} \quad (2)$$

式中,Intercept 表示常数项;* 表示交互作用;$i \sim m$ 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_2O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_2O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

参数	Numerator df [2)]	Denominator df [3)]	F	p
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_2O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 Estimated values of effects in linear model

参数	估计值	标准误	自由度	p	95% 置信区间	
					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
[organic N = 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℃]	-1.391	0.325	182	0.000	-2.032	-0.749
[temperature > 20℃]	-0.456	0.173	182	0.009	-0.797	-0.115
[temperature = 10℃ ~ 20℃]	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 μg/(m^2·h),预测值的平均值为29.6 μg/(m^2·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_2O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^2时,相对排放通量增长很快,对于低于50 kg/hm^2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_2O排放,而持续淹水最有利于N_2O减排.

水分是土壤氧气含量的重要限制因子,进而控

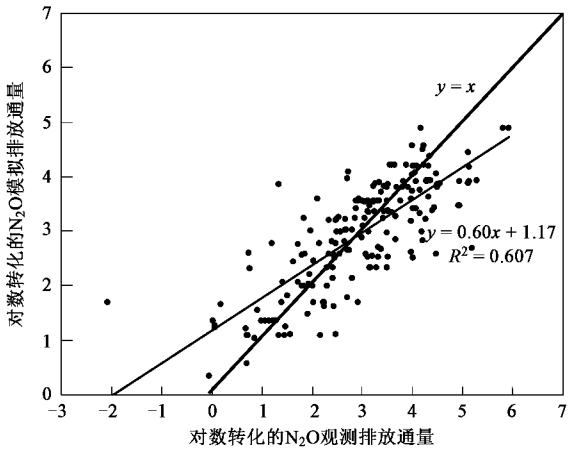

图 1　水稻田排放通量预测值和观测值对比图

Fig. 1　Comparison of predicted and observed N_2O fluxes in paddy fields

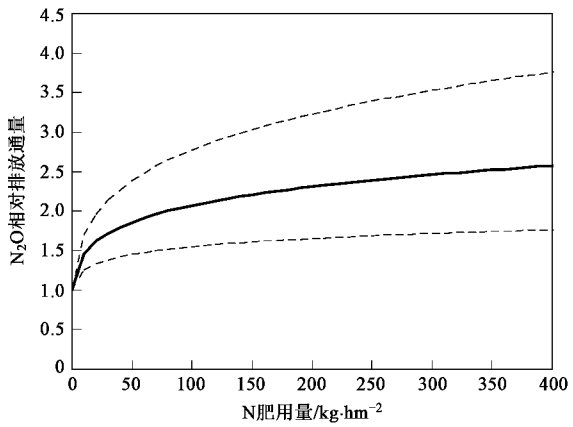

图 2　肥料用量的N_2O相对排放通量

Fig. 2　Relative N_2O fluxes from N input

制硝化和反硝化进程. Davidson 等[50]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_2O占主导,在 60%左右硝化和反硝化同时作用. 郑循华等[51]研究发现 WFPS 在 85%和 98%左右,N_2O排放量最大,低于这个湿度,则排放量和湿度呈正相关. Smith[52]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_2O/N_2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_2,中间产物N_2O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_2O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,其相对排放通量结果刚好位于持续淹水和间歇灌溉之间.

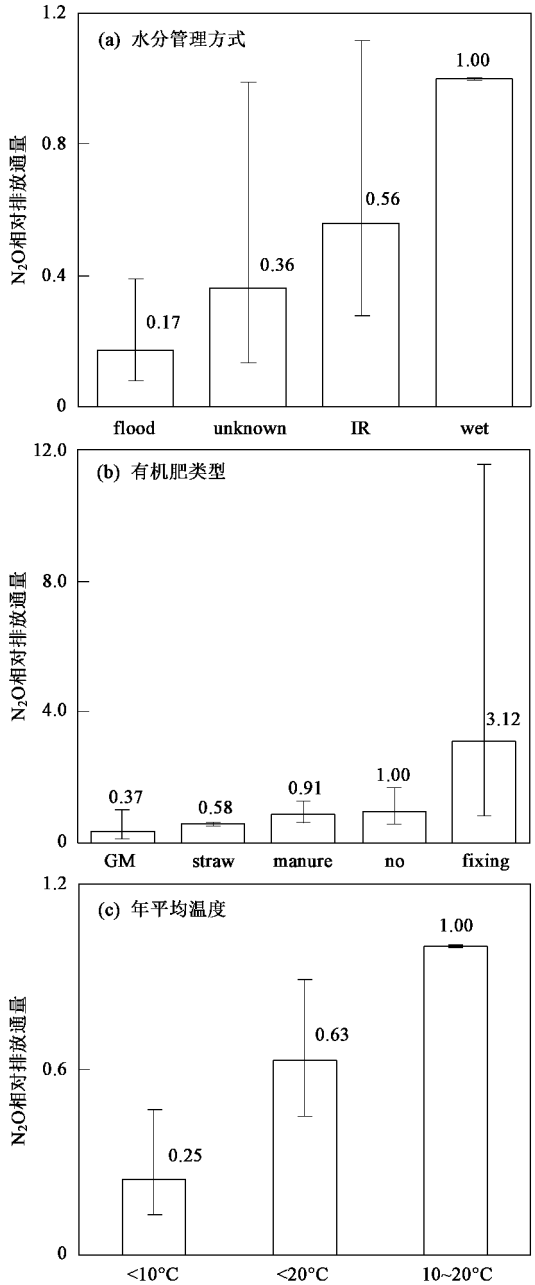

图 3　不同水分管理方式、有机肥类型、年平均温度的N_2O相对排放通量

Fig. 3　Relative N_2O fluxes for different water managements, annual temperatures and organic fertilizer types

N 肥是引起N_2O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_2O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).

$$\text{flux}(N) = e^{3.886} \cdot e^{0.44} \cdot \text{STN}^{A_i} \cdot (1 + \text{Ninput})^{0.158} \cdot e^{\text{Water}_i} \cdot e^{T_i} \cdot e^{\text{Ricetype}_i} \quad (3)$$

$$\text{对应的 flux}(0) = e^{3.886} \cdot e^{0.44} \cdot \text{STN}^{A_i} \cdot e^{\text{Water}_i} \cdot e^{T_i} \cdot e^{\text{Ricetype}_i} \quad (4)$$

$$\text{emission} = \text{flux} \cdot \text{days} \cdot 24/100\,000 \quad (5)$$

$$\text{FIE} = \frac{100 \cdot [\text{emission}(N) - \text{emission}(0)]}{N}\% \quad (6)$$

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[3]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[6]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[4]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[53]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.

表 3 不同水分类型下 FIE 和背景平均排放通量模拟结果

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

水分类型	数据组数	FIE/%	95% 置信区间		背景平均排放通量[1)] /μg·(m^2·h)$^{-1}$	95% 置信区间	
			下限	上限		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)—为负值

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_2O排放[图 3(b)].

有关厩肥添加对N_2O排放的研究很不一致,在本研究收集的文献中,有 4 篇文献[8,9,21,22]报道添加厩肥能减少N_2O排放,3 篇文献[20,27,34]证明添加厩肥增加N_2O排放,因此对N_2O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_2O排放[54];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_2O排放[16,23]. 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_2O排放[16,23]. 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_2O排放差异.

秸秆对于N_2O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_2O排放[27];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_2O排放[29,38,47],且 C/N 和N_2O排放呈显著负相关[55]. 而且,一般作物秸秆含 N 量很低,在添加量(以干重计)为 3 000 kg/hm^2 时,秸秆含 N 量为 0.5%,得秸秆增加的氮量 15 kg/hm^2,仅占常规施肥量 200 kg/hm^{2}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_2O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_2O排放.

4.2 其他因子对N_2O排放的影响

土壤因子对N_2O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_2O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 $STN = -0.039 \times pH + 0.386$, $R^2 = 0.31$, $p < 0.001$, $n = 206$),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.

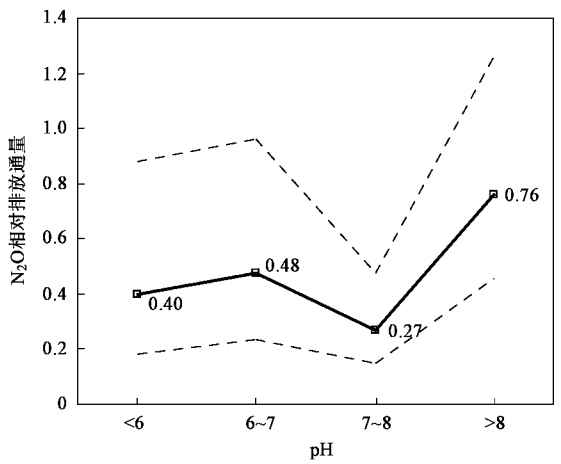

图 4　pH 分层的N_2O相对排放通量

Fig. 4　Relative N_2O fluxes among pH classes

pH 值对土壤 N_2O 排放机制较为复杂,Sahrawat[56]、朱兆良等[57]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[58]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_2O结果受其他一些未知因素的协同作用.

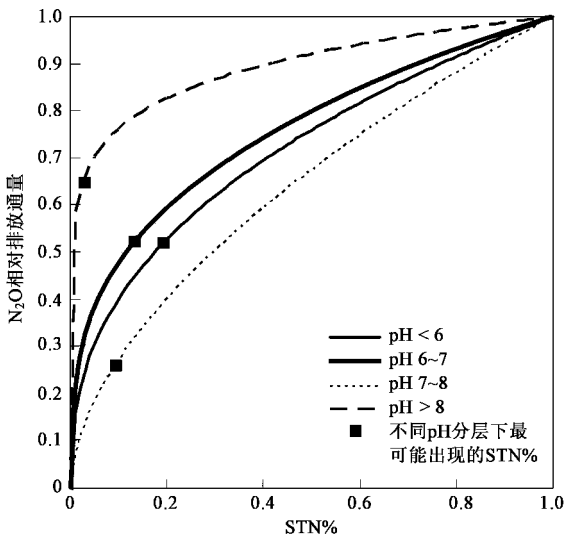

图 5　pH * ln(STN)的N_2O相对排放通量

Fig. 5　Relative N_2O fluxes from paddy fields with different pH levels * ln(STN)

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℃,相对排放量约为 < 10℃的 4 倍, > 20℃的 1.6 倍[图 3(c)]. 年平均温度位于 10 ~ 20℃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℃. 同理,年平均温度 < 10℃和 > 20℃时水稻种植期的平均温度很有可能是 10 ~ 20℃和 > 30℃. 而硝化和反硝化细菌适宜的温度为 20 ~ 30℃,过高或者过低都会抑制硝化菌的活性[59]. 因此,水稻种植期的平均温度位于 20 ~ 30℃区间(此时年平均温度区间很有可能位于 10 ~ 20℃)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_2O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_2O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_2O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_2O相对排放通量

Table 4 Relative N_2O 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	(0.31,0.77)
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℃;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_2O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_4 和N_2O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_2O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_2O 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_2O 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_2O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_2O 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_2O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_4,N_2O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_2O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_4 和N_2O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_2、CH_4 和N_2O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_4 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_4 和N_2O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_4 和N_2O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_4 和N_2O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_2O 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_4和N_2O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_4和N_2O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_2O 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_4和N_2O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_2O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_2O 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_2O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_2O生成与排放影响因素及N_2O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_2O排放影响的研究[J]. 环境科学学报,2002,**5**(22):598-602.

[59] 俞大铖,李季伦. 微生物学[M]. 北京:科学出版社,1985. 62-63.