

中国稻田水稻生长季 N₂O 排放估算

廖千家骅^{1,2}, 王书伟¹, 颜晓元^{1*}

(1.中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 2.中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:由于土壤水分状况的不同,水稻生长季土壤 N₂O 排放量明显不同于旱地作物。基于多元统计模型,通过多点代面的方法进行尺度扩展,并应用蒙特卡洛方法模拟影响因素的变异程度,模拟了中国稻田水稻生长季的 N₂O 排放情况。所模拟的 378 个点的水稻生长季 N₂O 排放通量为 6.0~74.3 μg N·m⁻²·h⁻¹,其均值接近于原始观测结果;378 个点位的 N₂O 排放通量空间分布不均,排放量较高的点位于北纬 20°到 30°之间;378 个点中单季稻、稻-旱轮作中的水稻和双季稻的生长季 N₂O 平均排放量分别占年总排放量的 53%、34%和 59%。多点代面的尺度扩展结果显示 2008 年中国稻田水稻生长季 N₂O 排放量均值为 22.48 Gg,其 95%的概率区间为 20.5~24.8 Gg;化肥氮的 N₂O 排放系数为 0.27%,与 IPCC 缺省值 0.3%接近。用秩相关关系表征影响因子对中国稻田水稻生长季 N₂O 排放量的不确定性的贡献,结果表明水分管理类型、有机肥类型、土壤属性、氮用量等对结果均有显著影响。

关键词:中国稻田;N₂O 排放;估算;不确定分析

中图分类号:X511 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2012)01-0212-07

Estimation of N₂O Emissions from Paddy Fields During Rice Growing Season in China

LIAO Qian-jia-hua^{1,2}, WANG Shu-wei¹, YAN Xiao-yuan^{1*}

(1.Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2.Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract:Based on a multivariate statistical model, N₂O emission from paddy fields during rice growing season in China was estimated, by considering the variability of influencing factors using Monte-Carlo simulation. The results showed that N₂O fluxes from 378 rice paddy sites during rice-growing season ranged from 6.0 to 74.3 μg N m⁻²·h⁻¹, and the mean of the simulated fluxes was close to that of the observed ones. There was a large spatial heterogeneity in the simulated emissions, with higher emissions occurring between 20° N and 30°N. For single rice, rice-upland crop, double rice cropping system, N₂O emissions during rice-growing season accounted for 53%, 34%, and 59% of their annual emissions, respectively. Monte-Carlo simulation showed that N₂O emissions from paddy fields during rice growing season in China was 24.48 Gg N in 2008, with a 95% uncertainty range of 20.5~24.8 Gg N. The fertilizer-induced N₂O emission factor was 0.27%, which was close to default IPCC value of 0.3%. The Monte-Carlo simulation also showed that water management, the type of organic N, the amount of chemical fertilizer N, and soil properties significantly affected the simulated N₂O emissions.

Keywords:rice paddies in China; N₂O emission; estimation; uncertainty analysis

氧化亚氮(N₂O)是重要的农业温室气体之一,其单位重量的增温潜能为二氧化碳的 298 倍。政府间气候变化委员会(简称 IPCC)第四次评估报告指出:2005 年农业源 N₂O 占人为 N₂O 排放总量的 60%^[1]。因此,定量研究农业 N₂O 来源对认识温室气体排放组成

具有重要意义。中国是农业大国,农业 N₂O 排放已成为中国乃至世界共同关注的问题。水稻是主要农作物之一,我国水稻面积约占世界水稻种植总面积的 20%,占我国耕地总面积的 23%左右(FAO,http://www.fao.org/corp/statistics/zh/)。早期研究认为稻田不排放 N₂O,但从 20 世纪 90 年代开始,越来越多的田间点位观测结果表明稻田排放大量的 N₂O^[2]。

目前关于中国稻田 N₂O 排放的研究大多是田间点位观测研究,但点位研究不能反映区域 N₂O 排放效应,而研究区域稻田 N₂O 排放对从宏观层面上认识其

收稿日期:2011-04-25

基金项目:中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-Q1-07);中国科学院知识创新项目(No. 40621001)

作者简介:廖千家骅(1984—),女,湖南邵阳人,博士研究生,主要从事气候变化影响与温室气体研究。E-mail:qjhliao@issas.ac.cn

* 通讯作者:颜晓元 E-mail:yanxy@issas.ac.cn

对整个农业生态系统或全球温室气体排放的贡献更具有现实意义。中国稻田区域 N_2O 排放的研究方法可分为田块尺度扩展法和模型-GIS 扩展法^[2-7]。田块尺度扩展法首先将大区域划分为若干个分区,基于各分区已有的田间点位观测值,以点位排放值代表该分区的排放。但各分区已有的田间点位观测个数往往较少,有时候仅一个点或者两三个点,点数量太少不足以代表该面积排放,所以对各个分区的估算不确定性较大,进而影响大区域的排放精确度。且田块尺度扩展法仅考虑了氮肥用量和排放量,并未考虑土壤属性等其他影响因子对排放的影响。模型-GIS 扩展法是现今研究的热点,以栅格为基准扩展单位,一个栅格中的数据都是匀质的(可认为每个栅格都是一个点排放),但一般情况下栅格面积都较大,模型所需数据(譬如土壤属性等数据)的空间变异较大,一个点的数量太少不足以代表该栅格的面排放,也存在点数量太少不能代表小分区面排放这个类似的问题。因此,解决这一问题的关键就是尽可能地增加点的个数,使得点个数和分布能代表该区域整体的排放情况。本研究拟采用多点代面的尺度扩展方法,以多点均值表示该区域的排放,获得 N_2O 排放情况。总体思路为:以中国稻田为基本区域,首先获得代表中国稻田分布的多个点位信息(包括土壤属性、耕作制度等),将点位数据代入合适的模型得一定数量的点位稻田 N_2O 排放值,根据中心极限定理,用 N_2O 排放均值来表示区域排放值。

1 研究方法

1.1 模型选择

目前水稻田 N_2O 排放模型可分为机理过程模型和经验统计模型,其中机理过程模型输入参数数量多,用于点位模拟时精确度较高;经验统计模型结构简单、参数少,且具有基于多个点位结果的模拟特点。因此,对于中国稻田 N_2O 排放模型的选择,本研究选用来自多个观测点位结果的经验统计模型,并尽可能地包含较多的影响因子,提高模型精度。现有稻田 N_2O 经验统计模型的研究主要在肥料用量和水分管理两个方面^[8-10],对于其他影响因子如水稻类型、土壤属性等研究得较少。在作者前期研究中,基于大区域范围的多个点位观测结果,构建了稻田水稻生长季的平均排放通量和多个影响因子的多元统计模型,模型描述见公式(1)^[1]。模型每个因子都有显著统计学意义,且模型能解释 60.7% 的变异。该模型的因子分析显示符

合已有的研究成果,具体参数估计值见文献[11]。

$$\ln(\text{flux}) = \text{Intercept} + A \cdot \ln(1 + \text{Ninput}) + \text{Organic } N_i + \text{Water}_j + B_k \cdot [pH_k \cdot \ln(STN)] + \text{Annual Temperature}_1 + \text{Rice type}_m \quad (1)$$

式中: flux 表示生长季的平均排放通量, $\mu\text{g N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$; Intercept 表示常数项; $*$ 表示交互作用; $i \sim m$ 表示各因子分层类型; Ninput 和 $\text{Organic } N$ 分别表示化肥用量和有机肥类型; Water 表示水分管理措施; $\text{Annual Temperature}$ 表示年平均温度; Rice type 表示水稻类型。

1.2 模型应用

作者前期研究还获得了能代表中国稻田土壤属性的 378 个土壤样本,样本选取方法为:以中国稻田为整体区域,首先得到能代表中国稻田土壤属性分布的点位个数,再在稻田分布图中随机选取 378 个点位,通过 GPS 定位,在当地土肥站等机构的协助下,获得对应的土壤样本并分析其理化性质,同时获得了各采样点的作物轮作方式等数据。在所获得的 378 个土样中,一季单季稻土壤样本 86 个,双季稻样本 103 个,稻-旱地轮作样本 189 个,点位在空间呈随机分布状态。

由于土壤属性对稻田 N_2O 排放影响较大,基于 378 组土壤样本数据得到的 N_2O 排放数据,也被认为能在一定程度上代表全国稻田 N_2O 排放概况。因此,本研究基于多元统计模型,结合能代表中国稻田土壤属性分布的点位数据,模拟中国稻田水稻生长季的 N_2O 多点位排放,根据中心极限定理,以多点的均值代表该面排放情况。点排放和面排放计算方法见公式(2)和公式(3)。由于模型是基于单个生长季排放开展的,双季稻需分别对早稻和晚稻进行模拟;进行点-面积扩展时也应应以单个生长季为基准,需用播种面积代替耕地面积。

$$E_j = \sum_i \text{flux}_{ij} \times 24 \times \text{Day}_{ij} \times 10^{-5} \quad (2)$$

式中: E 表示稻田水稻生长季 N_2O 单位面积年均排放量, $\text{kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$; i 表示水稻类型(仅双季稻时早稻和晚稻叠加, $i=2$); j 表示 378 个点位中的一个; flux 表示生长季的模拟排放通量, $\mu\text{g N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$; Day 表示该作物的生长季长, d 。

$$TE = \frac{A}{n} \times 10^{-3} \times \sum_k^n \text{flux}_k \times 24 \times \text{Day}_k \times 10^{-5} \quad (3)$$

式中: TE 表示中国稻田水稻生长季的 N_2O 排放量, Gg ; n 表示生长季个数(其中双季稻需叠加一次, $n=378+103=481$); k 表示第 k 个稻田水稻生长季; A 表

示中国稻田播种面积,10³ hm²。

公式(2)、(3)中各参数具体数值及确定方法见表 1,由于本研究获得的土壤样本均来源于 2007—2008 年间,其他数据源也选取 2008 年为基准年。

每个模型因子的参数估计值均呈正态分布,模型模拟结果同时给出其标准差和 95%的置信区间^[1],为了得到更为准确的估算结果,需要采用蒙特卡洛方法对参数进行变异取值。蒙特卡洛方法又称随机抽样或统计试验方法,其基本思路为:首先构建概率模型,把具体问题转化为概率问题,再借助计算机手段在该概率区间产生随机数列,进行大量的数字模拟试验,得到大量的模拟试验结果,最后对试验结果进行统计分析,以均值等统计结果给出所求问题的解^[12-13]。本研究根据该参数估计值的概率分布,以及其他因子设置的变异系数(表 1),在各估计值概率分布的 95%置信区间内进行 10 000 次虚拟取值,利用 Matlab7.0 计算语言实现,得到 10 000 次模拟结果。因此,将公式(2)和(3)分别变为公式(4)和(5)。

$$E_{je} = \sum_i flux_{ije} \times 24 \times Day_{ij} \times 10^{-5}$$

(4)

$$TE_e = \frac{A}{n} \times 10^{-3} \times \sum_k flux_{ke} \times 24 \times Day_k \times 10^{-5}$$

(5)

式中:e 表示 10 000 次模拟中的 1 次。

在每次的虚拟模拟中,利用 rand 函数给出一个(0,1)范围内的任意值,若小于 0.2,则认为这一次模拟的水分管理状态为持续淹水状态,取持续淹水状态

的模型估计值和变异;若大于 0.2,则认为是间歇灌溉状态。有机肥类型也采用类似的方法进行变异。

2 结果与分析

2.1 中国稻田 N₂O 排放点位分布情况

将所需参数代入模型中,通过蒙特卡洛方法进行 10 000 次模拟,获得 481×10 000 个水稻生长季 N₂O 排放通量值。481 组水稻生长季排放通量均值位于 6.0~74.3 μg N·m⁻²·h⁻¹,其均值和标准差分别为 31.3 μg N·m⁻²·h⁻¹ 和 15.6 μg N·m⁻²·h⁻¹。该均值略低于稻田水稻生长季原始排放通量均值 37.0 μg N·m⁻²·h⁻¹ (n=222)^[1],但模拟结果和原始观测结果这两组数据的不对称 t 检验显示两样本均值无显著差异(P>0.05)。早稻、晚稻和单季稻的原始观测通量均值和模拟通量均值的对比见图 1。对 3 组数据进行均值不对称 t 检验,

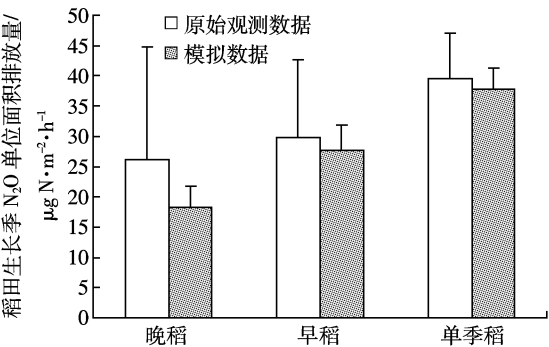


图 1 不同类型水稻生长季 N₂O 原始观测值和模拟值的对比图
Figure 1 The comparison of observations and simulations of N₂O emission from different rice types

表 1 中国稻田水稻生长季 N₂O 计算公式所需参数来源和变异
Table 1 Resource lists of parameters for N₂O emission estimation in Chinese paddies

参数	说明	来源	参数变异
点位数据土壤属性等	所获得的全国农田土壤剖面土壤理化属性和轮作制度数据库,共 378 组数据,采样时间跨度为 2007—2008 年	中国科学院知识创新项目(No. 40621001)	各点值不变异
化肥用量	以 2008 年为基准年,以省份为基准单位,由于豆类施氮量普遍较低,假定旱地中豆类单位面积用氮量为 50 kg N·hm ⁻² ,由各省总氮用量减去豆类作物总氮用量后,除以其他作物总种植面积得其他作物的单位面积用氮量。稻田采用其他作物单位面积用氮量结果,每省一个值	中国统计年鉴 2009http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2009/indexch.htm; 中国农村统计年鉴 2009 http://www.tjcn.org/plus/view.php?aid=14015	每个省均值为基准,30%的变异
有机肥类型	有机肥类型很多,但在中国常用有机肥为秸秆和厩肥,假定农田施用秸秆:施用厩肥:没有施加有机肥的比例为 0.4:0.2:0.4。休闲季无有机肥	参考文献[14]	比值不变异
气候	以 2008 年为基准年,点位信息参考就近网点的气象信息,包括降雨量、气温等	中国气象科学数据共享网 http://cdc.cma.gov.cn/index.jsp	气候数据不变异
水分管理	中国稻田水分类型为持续淹水:间歇灌溉=0.17:0.8	参考文献[15-16]	比值不变异
生长时长	东北单季稻生长季为 125 d,单季稻的生长季为 110 d,双季稻中早稻为 77 d,晚稻为 93 d	参考文献[16]	不变异
模型参数估计值	统计模型的参数估计值,包括表示常数项估计值和各因子参数估计系数	参考文献[11]	估计值的 95% 置信区间内变异

除晚稻组有显著差异之外($P<0.05$),早稻组、单季稻组均无显著差异($P>0.05$)。

根据公式(4)获得 378×10 000 个水稻点位的生长季 N_2O 排放值,得其排放均值的点位分布图(图2)。其点位排放量范围为 0.18~2.24 $kg\ N\cdot hm^{-2}$,均值为 0.99 $kg\ N\cdot hm^{-2}$,标准差为 0.44 $kg\ N\cdot hm^{-2}$ 。由图2可以看出,排放量较高点位于北纬 20°~30°之间,东北单季稻区和广东、广西两省的点位排放量很低。这可能是因为东北地区温度较低造成了排放量较少,而位于北纬 20°~30°之间的东部沿海地区较高的施氮量对 N_2O 排放的促进作用较大,湖南、江西等地则是双季稻产区。

为对比水稻生长季与非水稻生长季的排放情况,需要计算非水稻生长季的排放情况。非水稻生长季包括休闲季和旱作生长季。对于休闲季,本研究认为其水分处于排干状态,利用 IPCC 报告中的背景排放值代替(年排放量为 1 $kg\ N\cdot hm^{-2}$):

$$\text{休闲季排放量} = \frac{\text{休闲季天数}}{365} \times 1 \quad (6)$$

对于稻-旱轮作方式中的旱作季节,通过 2006IPCC 指南中的计算方法估算其排放:

$$\text{旱作季节排放量} = N \times 1\% \quad (7)$$

式中: N 表示施氮量, $kg\ N\cdot hm^{-2}\cdot 季^{-1}$ 。

计算结果显示:378 个点位的生长季 N_2O 排放量占对应总年排放量的 8%~77%,均值为 45%;其中单季稻、稻-旱轮作中的稻田、双季稻点位的生长季 N_2O 排放量平均占全年排放的 53%、34%、59%。

Xing^[3]利用田块尺度扩展法计算 1995 年稻田 N_2O 排放量,得生长季的排放量占全年排放量的 40%,与本文研究结果相近。单季稻点位主要集中于东北地区,有研究表明东北地区的稻田在解冻时期排放大量的 N_2O ^[17],而本研究计算的东北地区休闲季并未考虑这点,可能造成一定程度的低估。但也有研究得到位于东北地区的稻田水稻生长季排放占年排放的 69%^[18],高于本结果值(53%)。有较多的研究针对稻-旱轮作系统的 N_2O 排放,其中稻季 N_2O 排放量占年排放的 17%~40%^[6,19-20],进一步验证了本结果的合理性。双季稻的点位全年排放观测结果较少,Xing^[3]在区域范围内估算的双季稻区生长季的 N_2O 排放占年排放的 51%,和本研究结果较为一致。

2.2 中国稻田 N_2O 排放的总量分析

根据公式(5)获得 2008 年中国稻田水稻生长季 N_2O 排放量的多次模拟值,根据中心极限定理,该排

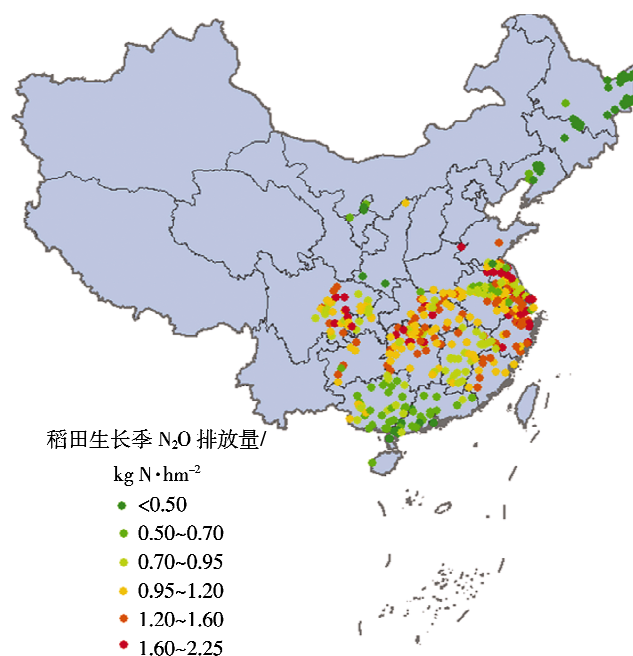


图2 中国稻田水稻生长季 N_2O 排放量的 378 个点位分布图

Figure 2 Spatial distribution of N_2O emission in growing season from 378 soil profiles in Chinese paddies

放量的频率分布应呈正态分布。图3显示的是 10 000 个排放量的频率分布,符合正态分布,在一定程度上证明了多点代面的合理性,其极大似然估计均值和标准差分别为 22.48 Gg 和 1.11 Gg,95%的概率区间为 20.5~24.8 Gg。

本研究估算的中国农田 N_2O 排放结果和前人研究成果较为一致(表2),但本研究的不确定区间更小,可能原因有以下几个方面:

(1)本研究所用的模型属于含较多影响因子的经验统计模型,在一定程度上提高了模拟准确性。

(2)基于能代表中国农田的土壤属性点位数据,

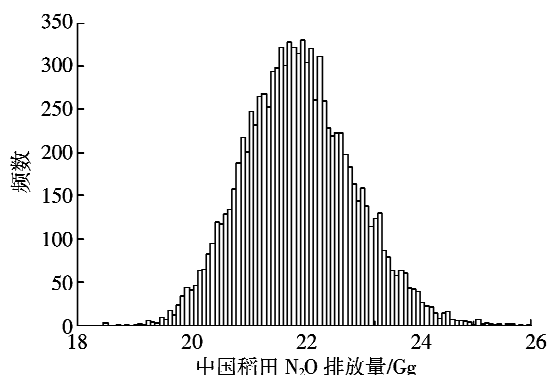


图3 中国稻田水稻生长季 N_2O 排放量 10 000 次模拟频率分布图

Figure 3 Frequency distribution from 10 000 times simulated values of N_2O emission in Chinese paddies

在一定程度上减少排放的时空变异。

(3)利用蒙特卡洛方法对排放量进行多次模拟,以统计结果表征模拟结果,增加结果的可靠性。

(4)在现有通过机理过程模型 GIS 扩展的研究中,所用的土壤属性数据来源为 20 世纪 70 年代至 80 年代的土壤数据^[5-6],而 30 年以来中国经济飞速发展,施肥、水土流失等对 SOC 等都有较大的影响,本文采用的数据采样年份为 2008 年左右,有更新价值。

化肥施加是引起 N₂O 排放的主要原因之一,本研究还计算了在整个中国稻田中由化肥引起的 N₂O 排放系数(FIE,Fertilizer-induced N₂O emission factor)。通过类似的方法进行 10 000 次蒙特卡洛模拟,得到不施化肥(有机肥仍然施加)的情况下 N₂O 的排放均值为 9.85 Gg,95%的频率区间为 9.01~10.75 Gg。同时根据公式(8)计算得 FIE 值。

$$FIE(\%)=\frac{E_N-E_0}{N_{\text{rice}}}\times 10$$

(8)

式中: E_N 表示施化肥的排放量,Gg; E_0 表示未施化肥的总排放量,Gg; N_{rice} 表示 2008 年中国水稻生长季肥料用量, 10^4 t N 。

通过计算得到中国水稻生长季中因施化肥引起的排放系数 FIE 为 0.27%,和 IPCC 推荐的稻田肥料 FIE 值 0.3%较为接近;还得到不施有机肥的情况下,无任何肥料添加的背景排放量均值为 $0.385\text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$,总

量为 10.91 Gg,95%频率区间为 10.08~11.12 Gg。

2.3 因子灵敏度分析

通过变化因子获得结果的变异,这种分析手段称之为因子灵敏度分析,蒙特卡罗方法是常用方法之一^[12]。用因子的变异和模拟结果变异的相关关系来表征灵敏度,本文采用 Spearman 秩相关关系法表示该相关关系,得到不同因子的灵敏度。Spearman 秩相关系数属于非参数检验,对分布形式不做要求,在非正态分布的情况下应用较好,表达式如下^[22]:

$$r(i,j)=1-\frac{6\sum_{k=1}^n d_k^2}{n^3-n}$$

(9)

式中: $d_k=(x_{ik}-x_i)(x_{jk}-x_j)$, x_{ik} 、 x_{jk} 分别为数值 i 和数值 k 在样方 j 中的秩; x_i 、 x_j 分别为 k 个样方中种 i 或种 j 的重要值的平均值; n 为样本量。

利用蒙特卡洛方法获得 $481\times 10\,000$ 组排放通量和对应的因子变量,对每一个因子变量和排放量进行秩相关分析,因此得到 481 组秩相关系数 R 。从公式(5)可以看出,中国稻田水稻生长季排放量 TE 是通过 481 组排放通量得到的,可以认为 TE 和各因子变量的秩相关关系为 R 和 481 组排放通量的加权平均值,具体结果见图 4。

从图 4 可以看出,不同水分管理类型的系数变异对结果的影响最大,其加权秩相关系数达到 0.58,影

表 2 中国稻田 N₂O 排放量估计值列表
Table 2 The estimations on N₂O emission from rice paddies in China

方法	排放量/Gg	基准年	文献	变异方法	因子
田块尺度扩展法	35.6	1995	[3-4]	无不确定估算	—
田块尺度扩展法	1.8~9.5(背景值)	1993	[7]	以所获得的背景值范围为变异区间	—
二元线性回归	18	1997	[6,10]	FIE 变异	水分管理方式、N 用量
修正后的 IPCC 2006 指南	33.1	2007	[21]	无不确定估算	肥料用量和类型
DNDC 模型 GIS 扩展	290~610(全年排放量)	1990	[5]	水分管理方式变异	土壤属性、肥料管理等

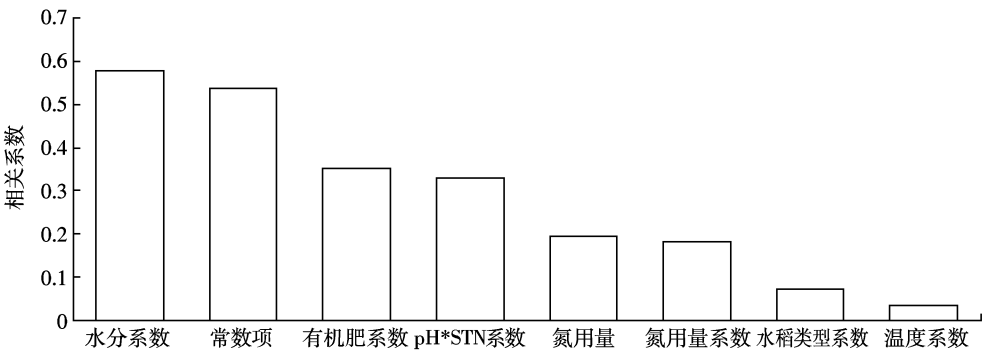


图 4 中国稻田水稻生长季 N₂O 排放量和影响因子的相关关系

Figure 4 The correlations between N₂O emissions from paddy fields during rice growing season in China and different factors

响极显著($P<0.001$)。水分含量对 N_2O 排放有较大影响^[23],当水分含量达到一定程度时能极大地促进 N_2O 排放^[24-25],IPCC2006 指南^[26]也认为水分类型对 N_2O 排放贡献较大。

有机肥类型对排放的贡献较大($P<0.001$),本研究中有有机肥类型包含未施有机肥、秸秆、厩肥 3 种,模型因子分析结果显示三者呈显著差异($P<0.001$)^[11],因此在进行区域范围的多点模拟时对总结果的贡献较大。

在本研究中,土壤属性(表现为 $pH \times STN$)对总排放的贡献包括土壤属性的值和系数,土壤属性系数的变异对排放有显著影响($P<0.001$),因此可以推断出:将土壤属性本身值固定,相当于在一定程度上减少了土壤属性对排放变异的影响。

氮用量被认为是最重要的影响因子^[27],且在模型的因子分析中也得到了验证^[11]。氮用量以及系数的变化对排放结果具有极显著影响($P<0.001$),但在本研究中氮用量变化以及氮用量系数变化对结果的影响却小于水分管理方式、有机肥类型等。其原因可能有以下两点:一是肥料用量在模型构建中属于连续变量,其系数估计值的变异区间相对于水分管理方式等间断变量较小;二是在模型构建中,认为排放量和肥料用量是线性增长关系,而水分管理方式等间断变量是以指数形式表示,相对来说降低了肥料用量变异对排放的影响。

常数项可以认为是一些未知的因子对排放的贡献情况;温度和水稻类型系数的变异对总排放的相关系数值很小,影响不显著($P>0.05$)。

3 结论

本研究通过多元统计模型的区域扩展得到:

(1)481 个中国水稻生长季 N_2O 排放通量模拟值为 $6.0 \sim 74.3 \mu g N \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$,其均值和原始观测通量均值显示无显著差异;378 个稻田点位的 N_2O 生长季排放量空间分布不均,排放量较高点位位于纬度 $20^\circ \sim 30^\circ$ 之间,其均值为 $0.99 kg N \cdot hm^{-2}$;378 个稻田点位的生长季排放量占年总排放量范围的 $8\% \sim 77\%$,单季稻均值为 53% ,稻-旱轮作中的水稻均值为 34% ,双季稻均值为 59% 。

(2)2008 年中国稻田水稻生长季 N_2O 排放量为 $22.48 Gg$,95%频率区间为 $20.5 \sim 24.8 Gg$;因施化肥引起的排放系数 FIE 为 0.27% ,和 IPCC 推荐的稻田肥料 FIE 值 0.3% 接近。

(3)水分管理类型系数的变异对中国稻田水稻生长季 N_2O 排放量的影响最大,其次为有机肥类型系数、土壤属性系数和氮用量等。

参考文献:

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Agriculture/Climatic Change 2007: Mitigation, Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[C].
- [2] 蔡祖聪,徐华,马静.稻田生态系统 CH_4 和 N_2O 排放[M].合肥:中国科学技术大学出版社,2009.
CAI Zu-cong, XU Hua, MA Jing. Methane and nitrous oxide emissions from rice-based ecosystems[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2009.
- [3] Xing G X. N_2O emission from cropland in China[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1998, 52: 249-254.
- [4] 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.
XING Guang-xi, YAN Xiao-yuan. Analysis and estimation of N_2O emissions from croplands in China and its mitigation options[J]. *Rural Eco-Environment*, 2000, 16(4): 1-6.
- [5] Li C, Frolking 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 Biogeochemical Cycles*, 2005, 19, doi:10.1029/2004GB002341.
- [6] Zou J W, Huang Y, Qin Y M, 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.
- [7] 王智平.中国农田 N_2O 排放量的估算[J].农村生态环境,1997,13(2):51-55.
WANG Zhi-ping. Estimation of nitrous oxide emission of farmland in China[J]. *Rural Eco-Environment*, 1997, 13(2): 51-55.
- [8] 秦艳梅,过燕琴,高志亮,等.中国农田 N_2O 排放通量原位观测研究的汇总分析[J].农业环境科学学报,2009,28(12):2608-2613.
QIN Yan-mei, GUO Yan-qin, GAO Zhi-liang, et al. A Summary of field studies on N_2O measurements in Chinese croplands during 1990-2008[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(12): 2608-2613.
- [9] Akiyama H, Yagi K, Yan X Y. Direct N_2O emissions from rice paddy fields: Summary of available data[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2005, 19, doi:10.1029/2004GB002378.
- [10] Zou J W, Huang Y, Jiang J Y, et al. A 3-year field measurement of CH_4 and N_2O emissions from rice paddies in China: Effects of water regime, crop residue and fertilizer application[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2005, 19, doi:10.1029/2004GB002401.
- [11] 廖千家骅,颜晓元.亚洲地区稻田 N_2O 排放影响因子统计模拟分析[J].环境科学,2011,32(1):39-45.
LIAO Qian-jia-hua, YAN Xiao-yuan. Statistical analysis of factors influencing N_2O emission from paddy fields in Asia[J]. *Environment Science*, 2011, 32(1): 39-45.
- [12] 徐钟济.蒙特卡罗方法[M].上海:上海科学技术出版社,1985:1-5.

- XU Zhong-ji. Monte-Carlo method[M]. Shanghai:Shanghai Scientific & Technical Publishers, 1985:1-5.
- [13] 黎锁平. 运用蒙特卡罗方法求解随机性问题[J]. 甘肃工业大学学报, 2001, 27(2):95-97.
- LI Suo-ping. Solution of stochastic problems with Monte-Carlo method [J]. *Journal of Gansu University of Technology*, 2001, 27(2):95-97.
- [14] 全国农业技术推广服务中心. 中国有机肥料养分志[M]. 北京:中国农业出版社, 1999: 53-145.
- National Agro-Tech Extension and Service Center. Organic fertilizer resources in China[M]. Beijing: China Agricultural Press, 1999:53-145.
- [15] Li C S, Qiu J J, Frolking S, et al, Reduced methane emissions from large scale changes in water management of China's rice paddies during 1980-2000 [J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29 (20), 1972, doi:10. 1029/2002GL015370.
- [16] Yan X Y, Akiyama H, Yagi K, et al. Global estimations of the inventory and mitigation potential of methane emissions from rice cultivation conducted using the 2006 Intergovernmental Panel on Climate Change Guidelines[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2009, 23. doi:10. 1029/2008 GB 003299.
- [17] 陈冠雄, 黄国宏, 黄 斌, 等. 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.
- CHEN Guan-xiong, HUANG Guo-hong, HUANG Bin, et al. CH_4 and N_2O emission from a rice field and effect of Azolla and fertilization on them[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1995, 6(4):378-382.
- [18] 陈卫卫, 王毅勇, 赵志春, 等. 三江平原春小麦农田生态系统氧化亚氮通量特征[J]. 应用生态学报, 2007, 18(12):2777-2782.
- CHEN Wei-wei, WANG Yi-yong, ZHAO Zhi-chun, et al. Nitrous oxide flux in spring wheat field ecosystem in Sanjiang Plain of Northeast China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(12):2777-2782.
- [19] 马 静, 徐 华, 蔡祖聪, 等. 稻季施肥管理措施对后续麦季 N_2O 排放的影响[J]. 土壤, 2006, 38(6):687-691.
- MA Jing, XU Hua, CAI Zu-cong, et al. Effect of fertilizer application in rice-growing season on N_2O emissions from following wheat-growing season[J]. *Soils*, 2006, 38(6):687-691.
- [20] 黄明蔚, 刘 敏, 陆 敏, 等. 稻麦轮作农田系统中氮素渗漏流失的研究[J]. 环境科学学报, 2007, 27(4):629-636.
- HUANG Ming-wei, LIU Min, LU Min, et al. Study on the nitrogen leaching in the paddy-wheat rotation agroecosystem [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 27(4):629-636.
- [21] 张 强, 巨晓棠, 张福锁. 应用修正的 IPCC2006 方法对中国农田 N_2O 排放量重新估算[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(1):7-13.
- ZHANG Qiang, JU Xiao-tang, ZHANG Fu-suo. Re-estimation of direct nitrous oxide emission from agricultural soils of China via revised IPCC2006 guideline method[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(1):7-13.
- [22] 王翠红, 梁晓霞, 辛晓芸. 汾河太原段硅藻种间关联和相关分析[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(6):2162-2166.
- WANG Cui-hong, LIANG Xiao-xia, XIN Xiao-yun. Inter species association analysis of diatom in Taiyuan Segment of Fenhe River[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(6):2162-2166.
- [23] 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.
- [24] 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.
- ZHENG Xun-hua, WANG Ming-xing, WANG Yue-si, et al. Impact of soil humidity on N_2O production and emission from a rice-wheat rotation ecosystem[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1996, 7(3):273-279.
- [25] 邹建文. 稻麦轮作生态系统温室气体 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 排放研究 [D]. 南京:南京农业大学, 2005:78-80.
- ZOU Jian-wen. A study on greenhouse gases(CO_2 , CH_4 and N_2O) emissions from rice-winter wheat rotations in Southeast China[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2005:78-80.
- [26] Intergovernmental Panel on Climate Change(IPCC), 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Institute for Global Environmental Strategies. Hayama, Japan. 2007.
- [27] 马二登, 马 静, 徐 华, 等. 施肥对稻田 N_2O 排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(12):2453-2458.
- MA Er-deng, MA Jing, XU Hua, et al. Effects of fertilization on nitrous oxide emission from paddy fields: A review[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(12):2453-2458.