

DOI: 10.5846/stxb202104120941

李婉书, 赵劲松. 土壤磷含量与有效性对 N_2O 排放量的影响元分析. 生态学报, 2023, 43(11): 4712-4721.

Li W S, Zhao J S. Effects of soil phosphorus concentration and availability on N_2O emissions: a meta-analysis. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(11): 4712-4721.

土壤磷含量与有效性对 N_2O 排放量的影响元分析

李婉书^{1,2,3}, 赵劲松^{1,*}

1 华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070

2 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101

3 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049

摘要: 土壤氧化亚氮(N_2O)主要产生于土壤微生物参与的氮循环过程,其排放量受磷含量及有效性影响。添加磷肥有助于缓解陆地生态系统磷限制,提升土壤有效磷含量,进一步影响土壤微生物对氮的利用,同时控制 N_2O 排放。然而不同独立实验中 N_2O 对外源磷添加的响应差异较大。研究从发表的中、英文文献中收集了 54 份关于施用磷肥与 N_2O 排放量的观测结果,采用元分析方法确定添加外源磷后 N_2O 排放量的响应差异及潜在影响因素。结果表明:(1)外源磷添加对土壤 N_2O 排放量影响不显著;但在磷肥施用量 $> 50 \text{ kg P/hm}^2$ 的室外实验中土壤 N_2O 排放量显著降低了 32.5%;施用 NaH_2PO_4 的室内实验中 N_2O 排放量显著降低了 18.4%。(2)土壤 N_2O 对外源磷添加响应的高变异性是磷肥施用量和土壤含水量、土壤 pH、土地利用类型、磷肥种类、纬度和实验时间多种影响因素共同作用的结果。(3)室外和室内实验回归分析中总磷、有效磷回归系数分别为 $-1.433 (P < 0.001)$ 、 $-0.043 (P < 0.001)$,随磷含量增加 N_2O 排放量具有降低趋势。研究结果表明识别土壤磷与 N_2O 的作用关系有助于理解元素生物地球化学循环和缓解全球气候变暖提供新的认识。

关键词: N_2O 排放;总磷;有效磷;元素循环;元分析

Effects of soil phosphorus concentration and availability on N_2O emissions: a meta-analysis

LI Wanshu^{1,2,3}, ZHAO Jinsong^{1,*}

1 College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

2 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

3 College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Soil nitrous oxide (N_2O) is produced primarily by nitrogen cycling processes involving soil microbes, and its emission is affected by phosphorus concentration and availability. The application of phosphorus fertilizer contributes to alleviating phosphorus limitation in the terrestrial ecosystems. It enhances soil available phosphorus concentration, which further affects nitrogen utilization by soil microbes and controls N_2O emissions. However, the response of N_2O to exogenous phosphorus addition varied widely in independent experiments. In this study, 54 observations on phosphorus fertilizer application and N_2O emissions were collected from the published Chinese and English literature, and a meta-analysis was used to determine the differences in response and potential influencing factors of N_2O emissions after applying exogenous phosphorus. The results are as follows. (1) The effect of exogenous phosphorus addition on soil N_2O emissions was not significant. However, soil N_2O emissions were significantly reduced by 32.5% in the outdoor experiments with the application of phosphorus fertilizer $> 50 \text{ kg P/hm}^2$. And soil N_2O emissions were significantly reduced by 18.4% in the

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFD0800102);国家自然科学基金项目(41671253,31670506)

收稿日期:2021-04-12; 网络出版日期:2023-02-07

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jszhao@mail.hzau.edu.cn

indoor experiments with the application of NaH₂PO₄. (2) The high variability of soil N₂O response to exogenous phosphorus addition was the result of the combined effect of various influencing factors such as phosphorus fertilizer application rate and soil moisture, soil pH, land use type, phosphorus fertilizer type, latitude, and experimental time. (3) The regression coefficients of total phosphorus and available phosphorus in the regression analysis of outdoor and indoor experiments were -1.433 ($P < 0.001$) and -0.043 ($P < 0.001$), respectively, and the N₂O emission had a decreasing trend with the increase of phosphorus concentration. These results implied that identifying the relationship between soil phosphorus and N₂O could provide new insights for understanding elemental biogeochemical cycles and mitigating global warming.

Key Words: N₂O emission; total phosphorus; available phosphorus; element cycle; meta-analysis

氧化亚氮(N₂O)是土壤氮循环的重要产物,具有强烈的增温潜势,主要产生于以微生物为主要参与者的硝化、反硝化过程。土壤磷含量及有效性能够影响土壤微生物生长、代谢,改变微生物群落组成^[1],从而影响N₂O排放。

添加外源磷影响土壤N₂O通量,不同独立实验的结果存在差异。有研究表明,室内培养实验中施用磷肥后土壤磷含量增加,缓解了磷对微生物活动的限制,促进了N₂O排放^[2]。也有研究表明,添加外源磷增强了微生物对氮的固定过程,促使释放到大气中的N₂O下降^[3]。在另外一项室外实验中发现,施用磷肥明显促进植物对氮的吸收,土壤氮含量下降,N₂O排放量降低^[4]。目前,有关磷影响N₂O排放量的研究多集中于独立的观测实验,不同的研究根据各自的实验类型与特点,提出了可能影响N₂O排放量的土壤、环境等因素^[5,6],如土壤温度^[7]、水分^[8]和容重^[9]等直接因素,土地利用^[10]、植被覆盖^[4]等间接因素。不同因素间相互作用,使得土壤N₂O排放量随时间和空间的变化具有更大的动态性及不确定性^[2,11-12]。综上,已有关于添加外源磷对N₂O排放量影响的研究缺乏综合性分析,并且土壤磷影响N₂O排放量的具体方式尚不明确,磷与各因素间的相互作用较为复杂。因此,基于独立的实证分析对共同的研究内容进行定量总结,得出关于总体趋势和模式的综合结论是十分必要的^[13]。元分析是一种用于综合评价和比较具有共同研究目的独立研究结果,并根据数据精度进行加权计算的统计方法^[14,15],已被逐渐应用于有关生物地球化学循环的研究中^[16-18]。

本研究汇总施用磷肥对土壤N₂O排放量影响的独立实验,采用元分析方法,探究土壤磷含量及有效性对N₂O排放量的影响,探讨土壤、环境等因素在添加外源磷条件下对N₂O排放量的作用,以期分析施用磷肥后N₂O排放量变化及其异质性来源。

1 材料与方法

1.1 数据来源与筛选

在 Web of Science 数据库和中国知网(CNKI)数据库中以“磷添加”和“N₂O排放量”作为主要关键词,检索截至 2020 年 1 月有关添加外源磷和土壤N₂O排放量的文献。为提高搜索精度、缩小筛选范围,在 Web of Science 全部数据库中设定的搜索语句为:TS=("phosph * add * " OR "P add * " OR "phosph * fertiliz * " OR "P fertiliz * " OR "phosph * input" OR "P input" OR "phosph * appl * " OR "P appl * " OR "phosph * amend * " OR "P amend * " OR "phosph * enrich * " OR "P enrich * " OR "phosph * elevat * " OR "P elevat * " OR "phosphorus limitation") AND TS=("nitrous oxide emission" OR "N₂O emission" OR "nitrous oxide flux" OR "N₂O flux" OR "nitrous oxide efflux" OR "N₂O efflux" OR "nitrous oxide production" OR "N₂O production" OR "soil nitrification rate" OR "gross nitrification");在 CNKI 期刊全部数据库中设定的搜索语句为:SU=('P'+ '磷') AND (SU % '氧化亚氮排放'+ 'N₂O排放'+ '氧化亚氮通量'+ 'N₂O通量'+ '土壤硝化'+ '土壤反硝化')。中、英文数据库共检索到 200 篇期刊论文。

本研究的文献筛选标准如下:(1)文献中记录的是添加磷并设置不添加磷作为对照的实验;同时添加磷、

氮并设置添加氮作为对照的实验也被纳入分析;没有设置重复的实验被排除;(2)文献中记录了N₂O累积排放量,或者可以根据瞬时N₂O排放通量与采样时间计算累积排放量;考虑到N₂O通量随时间的动态变化,由平均通量与观测时间计算得到的累积排放量可能误差较大,仅记录了N₂O平均排放通量且实验周期较长的文献被排除;(3)实验方法和N₂O测量方式等相关信息在文献中有明确的记录,对照组、处理组的均值、样本容量等信息可从文中获得;(4)如果一篇文献中记载了多年数据,则选择最新一年的数据记录;如果多篇文献在相同地点进行的室外实验施肥量相同,则选用距离现在较近年份的文献或记录更为详尽的文献。根据筛选标准,从检索到的200篇文献中共选出符合标准的文献20篇。

1.2 数据预处理

对符合标准的20篇文献进行数据提取,获得54对实验数据。除了记录添加的外源磷和N₂O排放量,同时从文献中提取实验地点位置、环境条件、肥料管理方式、土地利用类型和土壤理化性质等信息。以实验地点为关键词搜索在相同地点开展实验的文献,尽可能补全符合标准的文献缺失的数据信息。

将研究所涉及的实验分为室外实验和室内实验两种类型。室外实验施用肥料总量折算为每公顷施用磷、氮质量,室内实验施用肥料总量折算为每千克土壤施用磷、氮质量。对于记录了N₂O-N排放量的研究,折算为N₂O排放量,室外实验N₂O累积排放量统一记为kg N₂O/hm²,室内实验N₂O累积排放量统一记为μg N₂O/kg。若文章中只记录了标准误差(SE),使用实验重复数转换为标准偏差(SD)。若SD、SE缺失,分别计算全部数据集中处理组与对照组的平均变异系数,采用均值乘以平均变异系数的方式估算缺失的SD^[19]。

1.3 数据分析

通过元分析汇总各独立研究,比较添加外源磷对N₂O排放量影响的差异。通过构建回归模型判断磷与其他土壤、环境等因素对N₂O排放的影响程度。

1.3.1 元分析

为消除各研究间不添加磷时对照组N₂O排放量的差异,使得连续变量N₂O的度量线性化^[20],元分析效应值计算如下:

$$\ln RR_i = \ln\left(\frac{\bar{x}_i}{\bar{x}_c}\right) = \ln \bar{x}_i - \ln \bar{x}_c \quad (1)$$

式中, $\ln RR_i$ 是第 i 对观测值的效应值, \bar{x}_i 和 \bar{x}_c 分别是第 i 对观测值处理组和对照组N₂O累积排放量均值。

加权效应值 $\ln RR'$ 的95%置信区间计算如下:

$$95\% \text{ CI} = \ln RR' \pm 1.96SE' \quad (2)$$

式中, SE' 表示加权标准误差。元分析采用随机效应模型,同时以 Q 统计量、组间方差(τ^2)度量研究间的异质性。

为更清晰地反映添加磷肥后与对照组相比N₂O排放量的变化,采用下式计算加权效应值的百分比变化率:

$$RR\% = (e^{\ln RR'} - 1) \times 100\% \quad (3)$$

对全部实验汇总分析后,再将研究实验分为室外实验与室内实验两组进行亚组分析。根据收集到的数据信息,将室外实验按照磷肥施用量、纬度、土地利用和实验时间分组,将室内实验按照磷肥施用量、土壤含水量、pH、磷肥种类和实验时间分组。

多层次元分析中,室外、室内实验按照磷肥施用量分为 $<50 \text{ kg P/hm}^2$ 和 $\geq 50 \text{ kg P/hm}^2$ 、 $<100 \text{ mg P/kg}$ 和 $\geq 100 \text{ mg P/kg}$ 的前提下,其余因素分组情况与亚组分析一致。

1.3.2 回归分析

在仅考虑各个因素主效应的情况下,构建室外、室内实验各变量对效应值的回归模型。将纬度、年平均降雨量、年平均气温、实验时间、磷肥施用量、土壤pH、土壤黏粒含量、容重、土壤有机碳含量、总氮、总磷和有效磷共12个变量用于构建室外实验的回归模型。将土壤水分、实验时间、磷肥施用量、土壤pH、土壤黏粒含量、

容重、土壤有机碳含量、总氮和有效磷共 9 个变量用于构建室内实验的回归模型。由于样本容量有限,且涉及自变量较多,设定纳入最佳模型的变量最多为 3 个。

采用基于小样本更正的赤池信息准则(AICc)评价回归模型的优劣,同时计算纳入模型中变量的赤池权重之和(W_{AIC}),判断各变量对模型的重要性。模型自变量之间的共线性通过方差膨胀因子(VIF)度量,若 $VIF > 10$ 则认为变量间存在较为严重的共线性,相应的模型应被排除。采用 Q_E 统计量作为残差异质性检验指标, Q_M 统计量作为组间异质性检验指标。

所有统计分析及图形绘制使用 R 3.6.2^[21] 及其加载包完成。其中, digitize 加载包^[22] 用于提取图片数据; metafor 加载包^[23] 用于元分析; glmulti 加载包^[24] 用于构建回归模型; forestplot 加载包^[25] 用于绘制森林图。

2 结果与分析

2.1 土壤N₂O排放量对磷添加响应的元分析

元分析结果显示(表 1), 54 对观测值的加权效应值为 -0.016 (95% CI: -0.135—0.104), 表明施用磷肥不显著影响土壤N₂O排放量, 不同研究间的异质性较高 ($Q = 1576.8$)。针对室外、室内实验的加权效应值分别为 -0.042 (95% CI: -0.220—0.135)、0.012 (95% CI: -0.151—0.176), 也表明添加磷对土壤N₂O排放量无显著影响。其中, 室内实验 Q 值大于室外实验, 说明室内实验各个研究间的异质性更高。

表 1 不同类型实验元分析结果

Table 1 Meta-analysis results for different types of experiments

实验类型 Experiment types	lnRR'	95% CI	P	Q	τ^2	RR%	n
全部实验 All experiment	-0.016	(-0.135, 0.104)	0.799	1576.8	0.172	-1.6%	54
室外实验 Outdoor experiment	-0.042	(-0.220, 0.135)	0.639	371.1	0.191	-4.1%	27
室内实验 Indoor experiment	0.012	(-0.151, 0.176)	0.882	1163.5	0.160	1.2%	27

lnRR': 加权效应值; 95% CI: 95% 置信区间; τ^2 : 组间方差; RR%: 添加磷肥后N₂O响应百分数; P : 概率值; Q : 总体异质性检验统计量; n : 样本容量

2.1.1 室外实验亚组分析

当施肥量 $> 50 \text{ kg P/hm}^2$ 时, 加权效应值为 -0.393 (95% CI: -0.617—-0.169), 相比于对照组, 施用磷肥后土壤N₂O排放量显著降低了 32.5% ($P < 0.001$, 图 1)。按照纬度、土地利用类型和实验时间分组后的结果显示, 这 3 种因素均未显著影响土壤N₂O排放量(图 1)。实验地区纬度处于 23—40°, 加权效应值为负值, 而当纬度 $< 23^\circ$ 和 $\geq 40^\circ$ 时, 加权效应值为正值。土地利用类型为耕地和林地, 加权效应值分别为 -0.078 (95% CI: -0.414—0.258)、-0.047 (95% CI: -0.320—0.227)。仅在生长季进行的实验加权效应值为 -0.004 (95% CI: -0.330—0.321), 当实验持续时间为全年时, 加权效应值为 -0.073 (95% CI: -0.253—0.108)。

2.1.2 室内实验亚组分析

按照磷肥施用量、土壤含水量和 pH 分组后的结果显示, 这 3 种因素均未显著影响土壤N₂O排放量(图 2)。施用磷肥量 $< 100 \text{ mg P/kg}$ 和 $\geq 100 \text{ mg P/kg}$ 时, 加权效应值分别为 0.020 (95% CI: -0.264—0.303)、-0.007 (95% CI: -0.124—0.111)。统计分析表明, 土壤含水量为正常水分时加权效应值为 -0.092 (95% CI: -0.300—0.117), 高水分时加权效应值为 0.208 (95% CI: -0.018—0.434), 随土壤含水量增加, 施用磷肥后土壤N₂O排放量有升高的趋势。土壤 pH < 6 时, 加权效应值为负值, 当 pH ≥ 6 时, 加权效应值为正值。施用 $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 后土壤N₂O排放量显著增加了 97.6%, 而施用 NaH_2PO_4 后土壤N₂O排放量显著降低了 18.4%, N₂O排放量差异可能与添加的磷肥种类相关。实验时间 < 30 天时结果不显著, 随培养时间延长, 当实验时间 ≥ 30 天时, N₂O排放量显著增加了 41.2%。

2.1.3 多层次元分析

将室外、室内实验按照磷肥施用量分组后, 大部分因素的不同水平下加权效应值结果包含正、负值, 说明

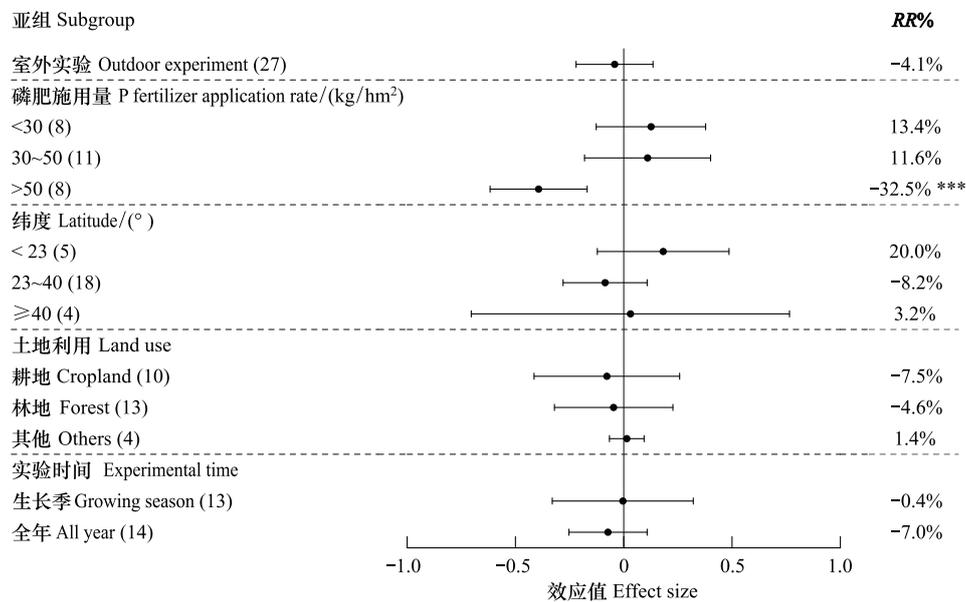


图1 施磷条件下不同因素对室外实验N₂O排放量的影响

Fig.1 Effects of different factors on N₂O emissions in outdoor experiments under phosphorus addition

图中圆形表示加权效应值;误差线表示加权效应值 95% 置信区间;括号中数字表示每个组内的样本数量/个;RR%:添加磷肥后N₂O响应百分数;***表示 $P < 0.001$

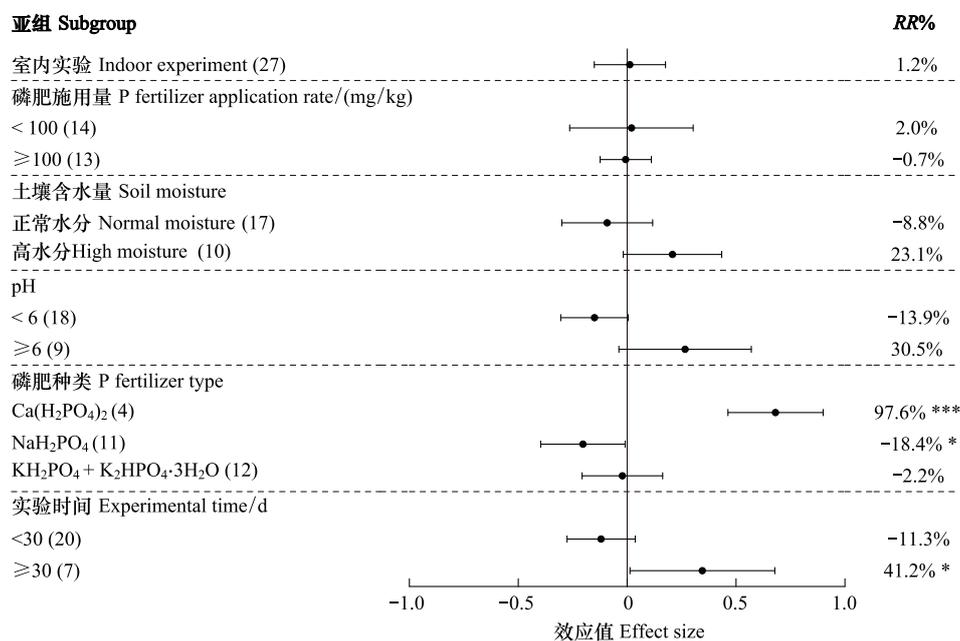


图2 施磷条件下不同因素对室内实验N₂O排放量的影响

Fig.2 Effects of different factors on N₂O emissions in indoor experiments under phosphorus addition

土壤含水量为正常水分包括 35%—70% 土壤充水孔隙度、60%—65% 田间持水量,高水分包括 80%—96% 土壤充水孔隙度、80% 田间持水量;KH₂PO₄+K₂HPO₄·3H₂O 包括施用 KH₂PO₄和施用 KH₂PO₄+K₂HPO₄·3H₂O;***表示 $P < 0.001$; *表示 $P < 0.05$

添加外源磷后,在各因素影响下,土壤N₂O排放量的响应具有较大不确定性(图3)。室外实验中,实验地区纬度≥40°,各磷肥施用水平结果显著。磷肥施用量≥50 kg P/hm²,土地利用类型为耕地和实验时间为生长季的组别N₂O排放量显著降低。室内实验中,磷肥施用量<100 mg P/kg,土壤含水量为高水分、施用

Ca(H₂PO₄)₂和实验时间≥30 天的 3 个组别N₂O排放量显著增加。相似地,磷肥施用量<100 mg P/kg,pH <6 和施用 KH₂PO₄+K₂HPO₄·3H₂O 的组别N₂O排放量显著降低。室外、室内实验不同因素各水平下分析结果显著的组别样本量均较小。

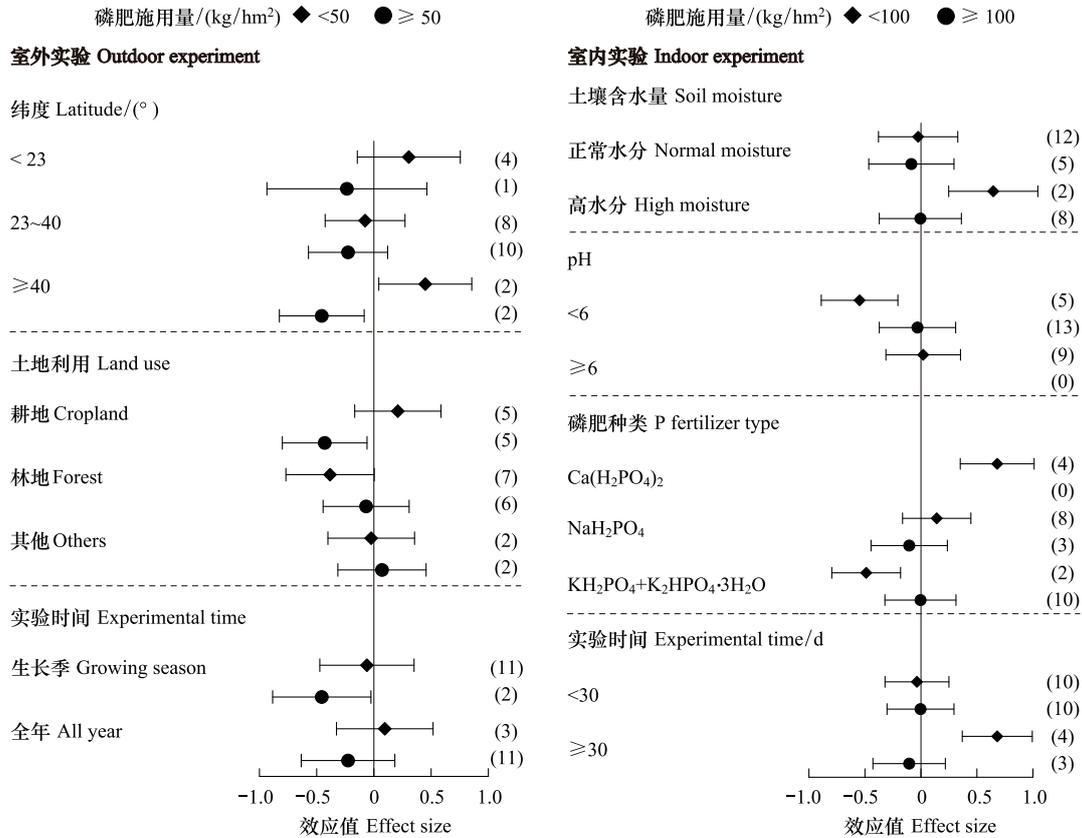


图3 室外、室内实验不同磷肥施用量下各因素对N₂O排放量的影响

Fig.3 Effects of various factors on N₂O emissions under different phosphorus fertilizer application rates in outdoor and indoor experiments

2.2 多变量影响下土壤N₂O排放量差异分析

2.2.1 室外实验

根据 AICc 准则和回归分析拟合结果,年平均气温、容重和总磷是描述室外实验添加外源磷后N₂O累积排放量差异的最佳模型变量。回归模型组间异质性检验结果极显著($Q_M = 26.3, P < 0.001$, 表 2),说明纳入模型中变量对模型有一定影响,其中,年平均气温与总磷对N₂O累积排放量的变化有显著影响($P < 0.001$)。随年平均气温升高、土壤中总磷含量增加,N₂O排放量具有降低趋势(表 2)。模型残差异质性检验结果极显著($Q_E = 60.1, P < 0.001$, 表 2),意味着没有纳入模型的其他变量同样会影响N₂O排放。由回归分析中各变量对模型的重要性程度可知,年平均气温、总磷和有机碳对模型较重要(图 4),即在室外实验中因实验地区年平均气温、总磷和土壤有机碳的差异,使得施用磷肥后土壤N₂O排放具有不同的响应。

2.2.2 室内实验

同样地,依据 AICc 准则,回归分析拟合结果表明容重、有效磷是描述室内实验添加外源磷后N₂O累积排放量差异的最佳模型变量。回归模型组间异质性检验结果极显著($Q_M = 104.2, P < 0.001$, 表 2),容重和有效磷对模型影响显著($P < 0.001$)。随土壤容重和有效磷含量增加,N₂O排放量呈下降趋势。残差异质性检验结果极显著($Q_E = 71.3, P < 0.001$, 表 2),与室外实验结果相似,没有纳入模型中的其他变量影响着N₂O排放,仍有未

考虑到的异质性来源。室内实验回归分析各变量对模型的重要性排序表明,土壤性质(有机碳、容重和有效磷)是影响 N_2O 排放的主要因素(图4)。

表2 不同类型实验最佳回归模型统计分析结果

Table 2 Statistical analysis results of the best regression model for different types of experiments

实验类型 Experiment types	室外实验 Outdoor experiment				室内实验 Indoor experiment		
	截距项 Intercept	年平均气温 Mean annual temperature	容重 Bulk density	总磷 Total phosphorus	截距项 Intercept	容重 Bulk density	有效磷 Available phosphorus
系数 Coefficient	0.888	-0.041 ***	0.370	-1.433 ***	5.077	-3.636 ***	-0.043 ***
方差膨胀因子 Variance Inflation Factor		2.504	2.208	2.005		1.021	1.021
Q_E			60.1 ***			71.3 ***	
Q_M			26.3 ***			104.2 ***	
n			16			15	

*** 表示 $P < 0.001$; Q_E : 残差异质性检验统计量; Q_M : 组间异质性检验统计量; n : 样本容量

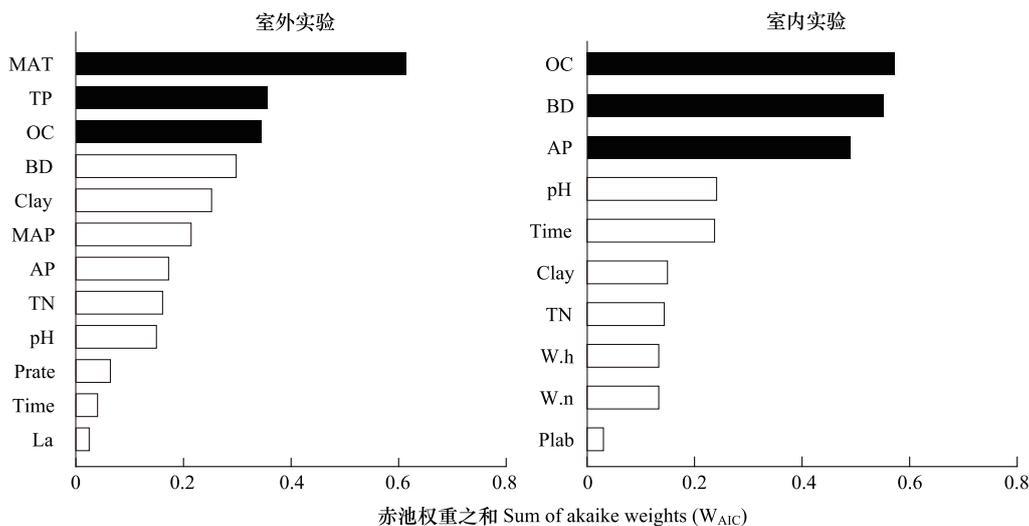


图4 不同变量对室外、室内实验回归模型的重要性程度

Fig.4 The importance of different variables to the regression model of outdoor and indoor experiments

MAT:年平均气温 Mean annual temperature; OC:土壤有机碳含量 Soil organic carbon; TP:总磷 Total phosphorus; pH:土壤 pH Soil pH; BD:容重 Bulk density; MAP:年平均降雨量 Mean annual precipitation; Clay:土壤黏粒含量 Soil clay; AP:有效磷 Available phosphorus; TN:总氮 Total nitrogen; Prate:室外实验磷肥施用量 Phosphate fertilizer application rate in outdoor experiments; Plab:室内实验磷肥施用量 Phosphate fertilizer application rate in indoor experiments; Time:实验时间 Experiment time; La:纬度 Latitude; W.h:土壤含水量为高水分 High moisture; W.n:土壤含水量为正常水分 Normal moisture

3 讨论

3.1 土壤磷对 N_2O 排放量的影响

土壤本底磷含量及形态影响 N_2O 排放。本研究中,室外、室内实验最佳回归模型中总磷与有效磷系数均为负值,且对模型影响显著(表2),说明土壤本底磷含量及形态的差异影响土壤 N_2O 排放量。相关研究显示,由变质沉积岩和超基性岩两种母质发育,本底磷有效性不同的热带森林土壤,添加外源磷后 N_2O 响应不同,变质沉积岩发育的土壤 N_2O 排放量显著降低,而添加磷对超基性岩发育土壤的 N_2O 排放量无影响^[26]。

施用磷肥后,随土壤有效磷含量增加, N_2O 排放量降低。室外实验亚组分析结果表明,较高的施磷量

(> 50 kg P/hm²)对土壤N₂O排放量具有显著的缓解作用(图 1)。添加磷肥后,土壤中有效磷含量的变化可能是使得N₂O排放量改变的原因之一。一项持续施肥 6 年的实验证实了添加磷后有效磷含量显著增加,缓解了热带森林土壤氮饱和状况,净氮矿化速率和硝化速率同时加快,N₂O排放量降低^[27]。与室外实验结果不同,在室内条件下高施磷量(≥100 mg P/kg)带来的缓解作用并不明显。

施用磷肥后,土壤总磷对N₂O排放量的影响与有效磷相似。Mori 等^[28]进行了为期 2 年的室外实验发现,土壤中总磷、有效磷含量均在施用磷肥后增加,同时促进了植物生长,根系吸收的氮含量和水分提高,使得排放到大气中的N₂O减少。

3.2 其他因素对N₂O排放量的影响

土壤有机碳是土壤有机质的重要组成部分,影响植物生长和微生物活动,与N₂O排放量具有一定相关性。本研究室外、室内实验最佳回归模型变量不包含土壤有机碳(表 2),但不同类型实验中有机碳 W_{AIC}均较高(图 4),对N₂O影响较大。一项在温带草原开展的研究表明碳限制掩盖了磷对N₂O排放量的影响^[29]。在碳限制条件下,土壤磷对N₂O排放无显著影响,而碳限制解除时,添加外源磷后,在较高磷浓度下N₂O排放量显著减少^[29]。这项研究进一步表明陆地生态系统中,氮循环常与碳、磷循环耦合在一起^[30],施用磷肥后,碳、磷相互作用从而影响N₂O通量。

温度变化也是导致N₂O排放量差异的原因之一。室内实验多是在适宜的温度下进行的培养实验,因此本研究并未讨论温度对室内实验的影响,而在室外,不同地区太阳辐射、海陆分布引起气候分异,地面差异性吸收太阳短波辐射,温度变化较大。在本研究中,年平均气温显著影响N₂O排放量(表 2)。

受收集的数据信息和样本数量的限制,其他可能影响N₂O排放量的因素没有纳入分析过程中。有研究表明,在含植物根系的地块施用磷肥,N₂O排放量减少,相反,在去除植物根系的地块施用磷肥N₂O排放量无显著变化^[31]。施用磷肥几天后,植物根际土壤比非根际土壤磷含量下降更多,植物根系对磷肥吸收较快,并可能持续促进根系的氮吸收^[31]。微生物多样性与土壤中总磷含量密切相关。在长期高氮沉降的老龄林中,添加外源磷后微生物生物量显著增加^[32]。相关实验证明,磷富集的土壤中微生物活性提高,在一定程度上促进了潜在可矿化氮比率,加快了氮的周转速度^[33]。而向耕地土壤施用磷肥后发现,土壤总磷、有效磷含量和参与硝化、反硝化过程的微生物多样性均有所增加,但N₂O排放量降低^[34]。结合以上的研究分析,在有植被覆盖的区域,微生物与植物会竞争利用土壤中的磷,由于植物对磷的吸收,可能限制了微生物对磷的利用。受到磷限制的异养微生物通过参与反硝化过程,可能会增加氮的损失,加快N₂O生成^[35]。而随着施用外源磷含量的增加,更多磷有机会被不同种类微生物利用,N₂O排放量改变。

3.3 数据变异程度对分析结果的影响

自然界中土壤状况和气候环境复杂多样,因土壤性质和环境条件的不同,施用磷肥后N₂O排放量具有较高变异性。本研究中总体元分析结果、不同类型实验元分析和亚组分析中大多数组别结果显示添加外源磷后不显著影响N₂O排放量。这可能由于纳入统计分析的各独立实验中N₂O排放量对磷肥的响应不同,研究间的差异较大。此外,每个独立实验的样本特征、实验方法不完全一致,这将会在真实效应之间引入异质性^[23],因而在元分析过程中数据变异程度较高。值得注意的是,本研究的样本量较少,各因素不同水平下的元分析结果存在一定偏差,变量对回归模型的重要性程度不易体现。

4 结论

添加外源磷对N₂O排放的影响具有不确定性和多样性,基于不同条件下的实验得到的研究结果不同。本研究通过汇总独立实验综合分析,结果显示添加外源磷不显著影响土壤N₂O排放量,但在室外、室内实验研究中,磷肥施用量、磷肥种类的差异引起土壤N₂O排放量的变化。同时,土壤总磷、有效磷含量增加,N₂O排放量具有下降趋势。N₂O排放受到土壤-环境-生物等多种因素的共同影响,特别是环境条件的不同,加剧了添加外源磷后N₂O的差异化响应。

参考文献 (References):

- [1] 施瑶, 王忠强, 张心昱, 孙晓敏, 刘希玉, 何念鹏, 庾强. 氮磷添加对内蒙古温带典型草原土壤微生物群落结构的影响. 生态学报, 2014, 34(17): 4943-4949.
- [2] Mori T, Ohta S, Ishizuka S, Konda R, Wicaksono A, Heriyanto J, Hardjono A. Effects of phosphorus addition on N_2O and NO emissions from soils of an *Acacia mangium* plantation. Soil Science and Plant Nutrition, 2010, 56(5): 782-788.
- [3] 孙正, 苏荣琳, 徐鹏, 吴宏涛, 胡金丽, 赵劲松, 胡荣桂. 添加磷对水稻-油菜轮作土壤 N_2O 排放影响. 环境科学, 2019, 40(7): 3355-3360.
- [4] Baral B R, Kuypers T W, Van Groenigen J W. Liebig's law of the minimum applied to a greenhouse gas: alleviation of P-limitation reduces soil N_2O emission. Plant and Soil, 2014, 374(1/2): 539-548.
- [5] Wang F M, Li J, Wang X L, Zhang W, Zou B, Neher D A, Li Z A. Nitrogen and phosphorus addition impact soil N_2O emission in a secondary tropical forest of South China. Scientific Reports, 2014, 4: 5615.
- [6] Zheng M H, Zhang T, Liu L, Zhu W X, Zhang W, Mo J M. Effects of nitrogen and phosphorus additions on nitrous oxide emission in a nitrogen-rich and two nitrogen-limited tropical forests. Biogeosciences, 2016, 13(11): 3503-3517.
- [7] Song H, Wang J, Zhang K, Zhang M Y, Hui R, Sui T Y, Yang L, Du W B, Dong Z R. A 4-year field measurement of N_2O emissions from a maize-wheat rotation system as influenced by partial organic substitution for synthetic fertilizer. Journal of Environmental Management, 2020, 263: 110384.
- [8] Yan R R, Tang H J, Xin X P, Chen B R, Murray P J, Yan Y C, Wang X, Yang G X. Grazing intensity and driving factors affect soil nitrous oxide fluxes during the growing seasons in the Hulunber meadow steppe of China. Environmental Research Letters, 2016, 11(5): 054004.
- [9] Sitaula B K, Hansen S, Sitaula J I B, Bakken L R. Effects of soil compaction on N_2O emission in agricultural soil. Chemosphere-Global Change Science, 2000, 2(3/4): 367-371.
- [10] 韩佳乐, 郝珊, 刘振杰, 张曼, 张阿凤. 黄土高原地区两种土地利用方式 CO_2 和 N_2O 排放特征. 环境科学, 2019, 40(11): 5164-5172.
- [11] Gerber J S, Carlson K M, Makowski D, Mueller N D, de Cortazar-Atauri I G, Havlik P, Herrero M, Launay M, O'Connell C S, Smith P, West P C. Spatially explicit estimates of N_2O emissions from croplands suggest climate mitigation opportunities from improved fertilizer management. Global Change Biology, 2016, 22(10): 3383-3394.
- [12] Courtois E A, Stahl C, Van den Berge J, Bréchet L, Van Langenhove L, Richter A, Urbina I, Soong J L, Peñuelas J, Janssens I A. Spatial variation of soil CO_2 , CH_4 and N_2O fluxes across topographical positions in tropical forests of the Guiana Shield. Ecosystems, 2018, 21(7): 1445-1458.
- [13] Arnqvist G, Wooster D. Meta-analysis: synthesizing research findings in ecology and evolution. Trends in Ecology & Evolution, 1995, 10(6): 236-240.
- [14] Zhao X, Liu S L, Pu C, Zhang X Q, Xue J F, Zhang R, Wang Y Q, Lal R, Zhang H L, Chen F. Methane and nitrous oxide emissions under no-till farming in China: a meta-analysis. Global Change Biology, 2016, 22(4): 1372-1384.
- [15] 柳江, 彭少麟. 生态学与医学中的整合分析(Meta-analysis). 生态学报, 2004, 24(11): 2627-2634.
- [16] Liu L L, Greaver T L. A review of nitrogen enrichment effects on three biogenic GHGs: the CO_2 sink may be largely offset by stimulated N_2O and CH_4 emission. Ecology Letters, 2009, 12(10): 1103-1117.
- [17] Liu C, Lu M, Cui J, Li B, Fang C M. Effects of straw carbon input on carbon dynamics in agricultural soils: a meta-analysis. Global Change Biology, 2014, 20(5): 1366-1381.
- [18] van Kessel C, Venterea R, Six J, Adviento-Borbe M A, Linnquist B, van Groenigen K J. Climate, duration, and N placement determine N_2O emissions in reduced tillage systems: a meta-analysis. Global Change Biology, 2013, 19(1): 33-44.
- [19] Bai E, Li S L, Xu W H, Li W, Dai W W, Jiang P. A meta-analysis of experimental warming effects on terrestrial nitrogen pools and dynamics. New Phytologist, 2013, 199(2): 441-451.
- [20] Hedges L V, Gurevitch J, Curtis P S. The meta-analysis of response ratios in experimental ecology. Ecology, 1999, 80(4): 1150-1156.
- [21] R Core Team. R: A Language and Environment for Statistical Computing. Vienna; R Foundation for Statistical Computing, 2019, [2021-04-10]. <https://www.R-project.org/>.
- [22] Poisot T. The digitize package: extracting numerical data from scatterplots. The R Journal, 2011, 3(1): 25-26.
- [23] Viechtbauer W. Conducting meta-analyses in R with the metafor package. Journal of Statistical Software, 2010, 36(3): 1-48.
- [24] Calcagno V. glmulti: Model selection and multimodel inference made easy. R Package Version 1.0.8. (2020-05-26) [2021-04-10]. <https://CRAN.R-project.org/package=glmulti>.

- [25] Gordon M, Lumley T. forestplot: Advanced forest plot using 'grid' graphics. R Package Version 1.10.1. (2020-12-12) [2021-04-10]. <https://CRAN.R-project.org/package=forestplot>.
- [26] Mori T, Yokoyama D, Kitayama K. Contrasting effects of exogenous phosphorus application on N₂O emissions from two tropical forest soils with contrasting phosphorus availability. SpringerPlus, 2016, 5(1): 1237.
- [27] Chen H, Gurnesa G A, Zhang W, Zhu X M, Zheng M H, Mao Q G, Zhang T, Mo J M. Nitrogen saturation in humid tropical forests after 6 years of nitrogen and phosphorus addition: hypothesis testing. Functional Ecology, 2016, 30(2): 305-313.
- [28] Mori T, Ohta S, Ishizuka S, Konda R, Wicaksono A, Heriyanto J, Hamotani Y, Gobara Y, Kawabata C, Kuwashima K, Nakayama Y, Hardjono A. Soil greenhouse gas fluxes and C stocks as affected by phosphorus addition in a newly established *Acacia mangium* plantation in Indonesia. Forest Ecology and Management, 2013, 310: 643-651.
- [29] O'Neill R M, Girkin N T, Krol D J, Wall D P, Brennan F P, Lanigan G J, Renou-Wilson F, Müller C, Richards K G. The effect of carbon availability on N₂O emissions is moderated by soil phosphorus. Soil Biology and Biochemistry, 2020, 142: 107726.
- [30] Gruber N, Galloway J N. An earth-system perspective of the global nitrogen cycle. Nature, 2008, 451(7176): 293-296.
- [31] Mori T, Ohta S, Ishizuka S, Konda R, Wicaksono A, Heriyanto J. Phosphorus application reduces N₂O emissions from tropical leguminous plantation soil when phosphorus uptake is occurring. Biology and Fertility of Soils, 2014, 50(1): 45-51.
- [32] Liu L, Gundersen P, Zhang T, Mo J M. Effects of phosphorus addition on soil microbial biomass and community composition in three forest types in tropical China. Soil Biology and Biochemistry, 2012, 44(1): 31-38.
- [33] White J R, Reddy K R. Influence of phosphorus loading on organic nitrogen mineralization of Everglades soils. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(4): 1525-1534.
- [34] Zhang Y, Xie D T, Ni J P, Zeng X B. Optimizing phosphate fertilizer application to reduce nutrient loss in a mustard (*Brassica juncea* var. *tumida*)-maize (*Zea mays* L.) rotation system in Three Gorges Reservoir area. Soil and Tillage Research, 2019, 190: 78-85.
- [35] Sundareshwar P V, Morris J T, Koepfler E K, Fornwalt B. Phosphorus limitation of coastal ecosystem processes. Science, 2003, 299(5606): 563-565.