

磷对稻田甲烷排放的影响及其可能机制

何竹, 薛利红, 杨林章, 许琛

引用本文:

何竹, 薛利红, 杨林章, 等. 磷对稻田甲烷排放的影响及其可能机制[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(2): 445-450.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0593>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同灌溉模式和施氮量条件下稻田甲烷排放及其与有机碳组分关系

王楷, 李伏生, 方泽涛, 董艳芳, 刘靖雯, 黄忠华, 罗维钢

农业环境科学学报. 2017, 36(5): 1012-1020 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1581>

不同水稻品种甲烷排放与土壤酶的关系

周文涛, 戈家敏, 王勃然, 龙攀, 徐莹, 傅志强

农业环境科学学报. 2020, 39(11): 2675-2682 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0517>

不同遮阴处理下施肥对稻田CH₄和N₂O排放的影响

王坤, 娄运生, 邢钰媛, 刘健

农业环境科学学报. 2021, 40(2): 464-472 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0953>

稻鸭共作中CH₄和N₂O排放规律及影响因素

温婷, 赵本良, 章家恩

农业环境科学学报. 2020, 39(7): 1442-1450 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-1389>

长期施用有机物料对稻田生态系统服务功能的影响

全孝飞, 颜晓元, 王书伟, 周伟

农业环境科学学报. 2017, 36(7): 1406-1415 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0401>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

何竹, 薛利红, 杨林章, 等. 磷对稻田甲烷排放的影响及其可能机制[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(2): 445–450.

HE Zhu, XUE Li-hong, YANG Lin-zhang, et al. Effects of phosphorus on methane emissions from rice fields and its possible mechanisms [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(2): 445–450.



开放科学 OSID

磷对稻田甲烷排放的影响及其可能机制

何竹^{1,2}, 薛利红^{1,3*}, 杨林章¹, 许琛^{1,3}

(1. 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 南京 210014; 2. 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095; 3. 江苏大学环境与安全工程学院, 江苏 镇江 212001)

摘要: 目前关于磷对稻田甲烷排放的影响研究较少, 为此, 本文检索了已发表的磷对稻田甲烷排放的相关文章, 并对文献数据进行了再挖掘分析, 总结归纳了磷对甲烷产生和氧化的可能影响, 并对未来需要进一步探究的问题进行了讨论。分析发现磷对稻田甲烷排放的调控主要受种植系统和其他施肥情况的影响, 一季中稻下大都表现为磷肥施用降低甲烷排放, 降幅受其他土壤养分情况影响而不同。磷通过影响水稻根系及其分泌物进而影响土壤碳的有效性, 直接影响土壤磷的有效性, 并改变土壤产甲烷菌和甲烷氧化菌的丰度和群落组成来调控甲烷的产生及氧化过程, 最终影响甲烷的排放。

关键词: 稻田; 磷; 甲烷排放; 甲烷产生; 甲烷氧化菌

中图分类号: S511; S181 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2021)02-0445-06 doi:10.11654/jaes.2020-0593

Effects of phosphorus on methane emissions from rice fields and its possible mechanisms

HE Zhu^{1,2}, XUE Li-hong^{1,3*}, YANG Lin-zhang¹, XU Chen^{1,3}

(1. Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 2. College of Resources and Environmental Science, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 3. School of the Environment and Safety Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212001, China)

Abstract: Methane is the second most important greenhouse gas, and its potential for warming per molecule is 28~34 times higher than that of carbon dioxide. Rice fields, as an important source of methane emissions, emit approximately 12%~26% of the total global methane. Existing studies on methane emissions from rice fields are mainly focused on the effects of the addition of organic matter, fertilizer types, nitrogen, rice varieties, and soil types; however, little attention has been paid to phosphorus. In this study, published studies on phosphorus and methane emissions from paddy fields were reviewed. The data from literature were reanalyzed to summarize the influences of phosphorus on methane production and oxidation, and future research issues were discussed. It was found that the regulation of methane emissions from paddy fields by phosphorus was mainly affected by the planting system and other fertilization conditions. Most of the research data showed that phosphate fertilizer application reduced the methane emissions of single-season Indica rice, and the decrease rate depended on the soil nutrient status. The regulation of the production and oxidation of methane by phosphorus was mainly through affecting the availability of soil carbon by rice roots and their exudates, influencing soil phosphorus availability directly, and changing the abundance and community composition of soil methanogens and methanotrophs.

Keywords: paddy field; phosphorus; methane emission; methane production; methanotroph

收稿日期: 2020-05-27 录用日期: 2020-10-13

作者简介: 何竹(1995—), 女, 安徽安庆人, 硕士研究生, 从事土壤生态与微生物生态研究。E-mail: hz15255319551@163.com

*通信作者: 薛利红 E-mail: njxuelihong@gmail.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(41877087)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(41877087)

甲烷(CH₄)作为一种重要的温室气体,其引起的温室效应仅次于二氧化碳,且气体浓度正以每年约1%的速度增长,对全球生态系统的能量收支和全球气候变化具有重要影响。稻田则是农田土壤甲烷的主要排放源,全球稻田每年甲烷排放量为25~50 Tg,贡献了全球甲烷排放总量的10%左右^[1-4]。其中中国稻田面积约占全世界水稻总面积的23%,位居世界第二。因此,如何减少稻田甲烷排放是我国乃至全世界的研究热点。

稻田甲烷的排放是水稻植株-土壤-微生物相互作用的结果^[5]。在当前稻田土壤碳氮充分供应的条件下,磷可能会成为甲烷排放的一个主要调控因子。目前研究多集中在外来有机物添加、肥料类型、氮、水稻品种、土壤类型等因素对甲烷排放的影响,关于磷对稻田甲烷排放影响的研究则较少。为此,本文查阅了国内外已发表的相关文献,从磷对稻田甲烷排放量、甲烷的产生和氧化过程,以及甲烷排放相关微生物的影响等几方面进行了综述,旨在明确磷是否能影响、如何影响稻田甲烷排放,以及其他需要进一步研究的问题。

1 材料与方法

1.1 数据来源与筛选

为了解国内外目前关于甲烷排放研究动态,本文以“水稻或稻田”和“甲烷或CH₄”以及“rice OR paddy OR rice field”和“methane OR CH₄”为关键词分别在中国知网(CNKI)和Web of Science进行文献检索,收集和筛选公开发表的有关稻田甲烷排放的期刊论文。通过检索发现,关于甲烷排放的研究论文共4 765篇,其中与稻田相关的有1 054篇。而在这1 054篇文献中,关于氮与甲烷排放的文献有323篇,关于磷与甲烷排放的文献只有37篇,同时考虑氮磷与甲烷排放的文献不足30篇,其中涉及产甲烷菌与甲烷氧化菌的仅5篇,这说明目前关于磷对稻田甲烷排放影响的研究较少。

为深入分析磷对稻田甲烷排放的影响,以两个限定条件进行进一步筛选:一是大田试验,且设有不同磷用量处理;二是甲烷气样采集方法为静态箱法,测定方法为气相色谱法,并且在水稻全生育期内进行了测定,文中给出了水稻生育期内的甲烷累积排放量,或者可以通过甲烷排放通量等数据计算得到。37篇文章中共有10篇文献符合要求,其中有2篇文献的结果来自于湖南常德同一长期定位试验田2007—2008

的数据^[6-7],为避免重复,仅选择一篇具有2年数据结果的进行具体分析^[6]。此外,文中还列出了本课题组2019年在江苏宜兴和苏州两处长期定位试验田的实测数据(表1)。

1.2 数据处理与分析

在筛选出的文献中,若已直接给出甲烷累积排放量,则直接将数据用于对比分析;若只有甲烷排放通量,则通过水稻生育期计算得到累积排放量。对于以每公顷CO₂当量(CO₂-eq·hm⁻²)表达甲烷排放量的,查看试验时的甲烷增温潜势,将其除以25或28得到排放量;对于用CH₄-C表达排放量的,以分子质量为转换因子,即甲烷除以系数12/16得到排放量^[8]。

为了保证数据的可比较性,根据表1列出的相关文献中已有处理的描述,将其分为5类进行分别比较:第一类是无肥条件下,即不施肥处理与单施磷肥处理的比较(CK-P),共有1组有效数据^[10];第二类是单施氮肥条件下,即单施氮肥处理与氮磷处理相比(N-NP),共有2组有效数据^[11-12];第三类是氮钾施用条件下,即氮钾处理与氮磷钾处理相比(NK-NPK),共有10组有效数据(包括本课题组的两组观测数据)^[3,6-9,12];第四类是碳施用条件下,不施肥与单施磷肥处理的比较(C-CP),共有1组有效数据^[11];第五类是碳氮施加条件下,有无磷肥处理的比较(MN-MNP),共有1组有效数据^[13](表2)。分别分析这5类条件下施磷对甲烷排放的影响,采用相对增加比例表示,计算公式如下:

$$F = \frac{P - Q}{Q} \times 100\%$$

式中: F 为施磷对甲烷排放的影响,%; P 为施磷处理的甲烷排放量,mg·m⁻²; Q 为不施磷处理的甲烷排放量,mg·m⁻²。

使用Excel软件作图,SPSS 17.0软件对数据进行 t 检验,LSD($P=0.05$ 或 0.01)比较不同处理甲烷及氧化亚氮排放量之间的差异。土壤理化性质与甲烷排放通量间的相关性分析采用Pearson检验法。

2 结果与讨论

2.1 不同条件下施磷引起的甲烷排放量变化

通过对已发表的磷对稻田甲烷排放通量影响的大田试验数据进行再分析(表2),发现磷肥施用对甲烷排放的影响受水稻种植情况的影响较大。一季中稻种植情况下共有8位作者发表的11组数据,涉及到6个生态点、7个年份的数据,涵盖了我国的江苏、浙

江、湖北、湖南,以及印度和荷兰;同时涵盖了不同的施肥情况,包括无肥、单施氮肥、氮钾配施、单施碳以及碳氮配施。其中有10组数据显示磷肥施用降低了甲烷排放,降幅在6.61%~58.85%;只有在碳氮配施的情况下显示为磷肥施用略微增加了甲烷排放,但统计上差异不显著^[13]。本课题组2019年对江苏苏州和宜兴两处长期定位试验一季中稻的NK和NPK处理进行了监测,结果也显示,与NK处理相比,NPK处理降低了甲烷排放,两地降幅分别为20.93%和68.86%(数据尚未发表)。缺磷土壤(有效磷含量 $2.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)不同磷添加处理对一季中稻品种甲烷排放通量影响的盆栽试验研究发现,3个不同磷利用效率的品种均表现出甲烷排放随磷肥用量增加而下降的趋势,低磷处理比高磷处理甲烷排放增加了19%~33%^[14]。以上结果表明,一季中稻下,磷肥施用会降低甲烷排放,具体降幅大小受其他土壤养分情况影响。室内培养试验也证实,与空白对照相比,添加碳源葡萄糖刺激了湿地甲烷的产生,而氮添加和磷添加均抑制了甲烷的产生,且氮和磷的组合添加对甲烷产生的抑制作用增强,表明磷对湿地甲烷的产生具有潜在的调控作用,调控效应大小与其他养分如氮营养密切相关^[11,15-16]。对于双季稻系统,有3位作者发表的5组数据(早稻和晚稻),主要集中在湖南双季稻区2个试验点,且均为氮钾施用的条件。有4组数据显示磷肥施用增加了

甲烷排放,增幅在4.77%~32.86%,统计上差异不显著;仅有一组晚稻处理显示磷肥施用降低了甲烷排放,降幅为46.61%。分析显示,磷能够影响双季稻区稻田甲烷排放,但由于已有报道样本数较少,代表性不够,仍需要大量的田间试验数据来证实。

2.2 磷对稻田甲烷排放过程的影响及可能机制

2.2.1 磷对甲烷产生的影响

为了进一步明确土壤养分状况尤其是磷对稻田甲烷排放的影响,将已有研究论文中稻田不施肥处理的甲烷累积排放量,与土壤养分含量进行相关性分析。结果发现,甲烷累积排放量与土壤全氮和有机质含量呈极显著正相关关系($P < 0.01$),而与土壤速效磷含量则呈显著负相关($P < 0.05$)(图1)。Wang等^[17]对中国福建省26个稻田土壤的研究也发现,土壤速效磷含量与甲烷产生量负相关,并认为土壤中高的速效磷含量会抑制乙酸发酵产生甲烷,从而使得甲烷排放量减少。

稻田中甲烷的产生主要是 CO_2/H_2 及乙酸($\text{CH}_3\text{COO}-$)两种底物在厌氧状态下被产甲烷菌利用还原而生成的。因此,底物组成与含量及产甲烷菌的丰度活性是决定稻田产甲烷的主要控制因子。甲烷的产生和排放与根系分泌物中有机碳含量显著正相关,根系分泌物中碳转化为甲烷的比例在61%~83%,不受水稻品种以及生育期的影响^[18]。而水稻缺磷时

表1 纳入分析的文献基础信息

Table 1 Basic information of the literatures included in the analysis

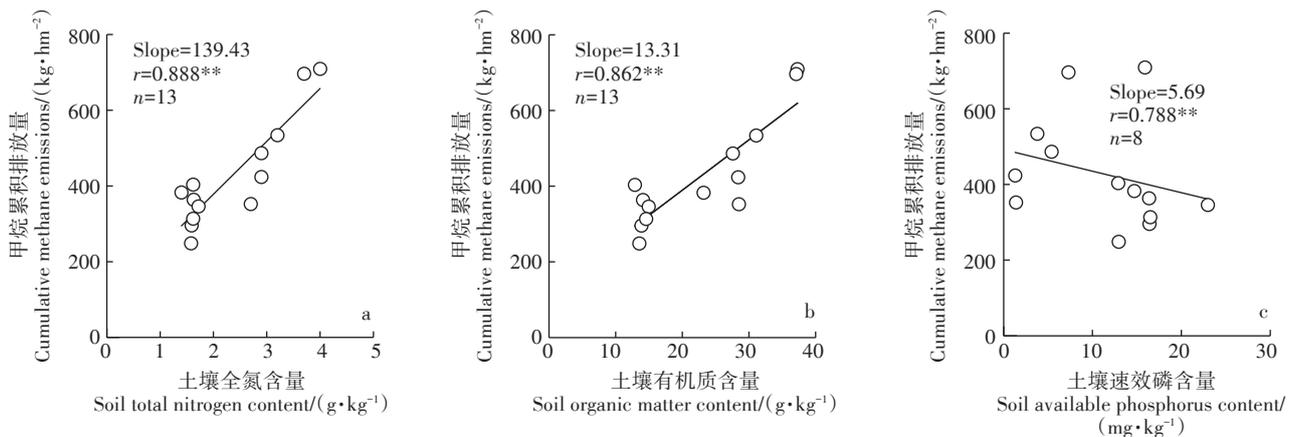
试验年份 Test years	试验地点 Sites	土壤基本性质 Soil basic properties						处理类别及文献出处 Processing category and literature sources
		pH	土壤类型 Soil types	有机质含量 Organic matter content/ $(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	全氮含量 Total nitrogen content/ $(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	全磷含量 Total phosphorus content/ $(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	速效磷含量 Available phosphorus content/ $(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$	
1994	印度	6.20	Haplaquept	15.50	0.9	—	8.00	Control, K_2HOP_4 , SSP, MRP, JRP([8])
2007	湖南望城	6.60	红黄泥田土	20.60	2.05	—	—	CK, NPKS, NPK, NKM([3])
2007	湖南常德	5.60	红黏土	28.30	1.64	—	1.4	CK, NP, NK, NPK, FOM, ROM([6])
2008	湖南常德	5.74	红黏土	23.20	1.4	0.6	14.7	CK, NPK, NK, NP, NPKS, JF([7])
2011	浙江杭州	—	青紫泥黏土	16.20	2.1	0.4	5.26	P0, P30, P60, P90([9])
2013	印度	6.80	Aeric Endoaquept	9.00	0.8	—	8.00	CK, N, P, K, NPK([10])
2014	荷兰	6.92	Sediment	5.42	—	—	—	C, N, P, CN, CP, NP, CNP([11])
2016— 2017	江苏苏州	5.54	黄泥土	13.87	1.59	—	16.41	RNP, SCU, OCN, OF, FN, N0([12])
2018	湖北武汉	6.30	黄褐土	27.34	1.80	1.00	5.00	CK, M, N, MN, NP, MNP, NPK, MNPK, M' NPK([13])
2019	江苏苏州	6.80	黄泥土	24.20	1.43	0.43	8.40	NK, NPK(本课题组试验数据, 尚未发表)
2019	江苏宜兴	5.70	湖白土	28.30	0.98	0.37	16.28	NK, NPK(本课题组试验数据, 尚未发表)

表2 不同条件下施磷对稻田甲烷排放的影响

Table 2 Effects of phosphorus application on methane emissions from paddy fields under different conditions

施肥处理 Fertilizer treatments	水稻类型 Rice types	试验年份 Test years	不施磷处理甲烷排放量 Methane emissions of treatments without phosphorus/(g·m ⁻²)	施磷处理甲烷排放量 Methane emissions of phosphorus treatments/(g·m ⁻²)	F	文献出处 Literature sources
无肥	一季中稻	2013	9.00*(CK)	7.39*(P)	-17.87	[10]
单施氮肥	一季中稻	2014	2.30**(N)	1.92**(NP)	-16.67	[11]
	一季中稻	2018	3.20(N)	2.90(NP)	-9.38	[13]
氮钾施用	一季中稻	1994	20.05*(Control)	15.63*(MRP)	-22.05	[8]
	一季中稻	2016	0.40(RNP)	0.25(SCU)	-38.40	[12]
		2017	1.04*(RNP)	0.65*(SCU)	-37.68	
	早稻	2004	42.19(CK)	44.52(NPK)	5.52	[3]
	晚稻		45.52(CK)	24.30(NPK)	-46.61	
	早稻	2007	21.00(NK)	27.90(NPK)	32.86	[6]
	晚稻		52.40(NK)	54.90(NPK)	4.77	
	晚稻	2018	39.92(NK)	52.33(NPK)	31.09	[7]
	一季中稻	2011	40.46*(P0)	34.56*(P60)	-14.58	[9]
	一季中稻	2019	12.46*(NK)	3.88*(NPK)	-68.86	本课题组未发表试验数据
	一季中稻	2019	19.37(NK)	12.30(NPK)	-20.93	本课题组未发表试验数据
碳施加	一季中稻	2014	1.86(C)	1.71(CP)	-7.76	[14]
碳氮施加	一季中稻	2018	4.20(MN)	4.50(MNP)	7.14	[13]

注:* 和 ** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上相关性显著。
Note: * and ** indicate significant correlation at the 0.05 and 0.01 levels, respectively.



*和**分别表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平显著相关, r 表示相关系数, n 表示数据个数, Slope 为拟合斜率
*and **indicate significant correlation at $P<0.05$ and $P<0.01$ levels respectively, r represents the correlation coefficient, n represents the number of data, and Slope is the fitting slope

图1 甲烷排放量与土壤相关理化指标关系图

Figure 1 Relationship between methane emissions and soil-related physical and chemical indicators

会刺激根系分泌物的增加,3个水稻品种均表现出甲烷排放率随根系分泌物增加而增加的趋势,两者呈显著正相关^[19]。磷肥的施入对稻田土壤碳库、氮库、磷库均有调节作用,增施磷肥可以提高土壤有效磷含量,降低甲烷排放通量^[20]。此外,产甲烷古菌与土壤有机碳、全氮显著对数正相关^[21],产甲烷菌群落的地

理分布格局以及甲烷生产潜力受土壤总有机碳、全磷、pH值以及温度等因素的共同驱动^[22]。30年长期定位施肥处理试验结果表明,产甲烷菌群落组成与土壤总磷、有效磷显著相关,与长期不施磷处理相比,施磷处理改变了分蘖期土壤产甲烷菌的群落组成^[13]。进一步采用湖南长期定位不施磷处理的水稻土作为

供试土壤,开展了不同磷肥用量下的水稻盆栽试验,发现缺磷土壤上施磷显著提高了水稻移栽后34 d根区土壤产甲烷菌的丰度,促进了有机碳的消耗,显著增加了产甲烷势^[23]。基于以上研究结果,可以推断缺磷可刺激水稻根系分泌物增加,提高土壤碳的有效性,进而影响产甲烷菌丰度及其群落组成,促进甲烷排放。

2.2.2 磷对甲烷氧化的影响

稻田产生的甲烷在排向大气之前约有10%~30%在根际和土水界面被甲烷氧化菌(MOB)所消耗。根据生理特征,甲烷氧化菌大致分为两种类型:Ⅰ型(γ -MOB)和Ⅱ型(α -MOB),Ⅰ型利用单磷酸核糖途径同化甲醛,Ⅱ型利用丝氨酸途径同化甲醛^[24]。 γ -MOB在低甲烷浓度和高氧气浓度时活性较高, α -MOB则在相反的条件下占据主导地位。文献检索发现,磷对甲烷的氧化也能产生影响:稻田土壤磷添加增加了甲烷氧化菌的丰度^[25];美国大沼泽湿地磷富营养化后甲烷氧化菌数量提高4倍,且甲烷氧化菌的群落结构也发生了变化,磷富营养化后发现了 α -MOB,而未富营养化的湿地中仅发现有 γ -MOB的存在^[26]。稻田长期定位试验田分蘖期试验结果发现,NP处理的土壤甲烷氧化菌丰度显著高于N处理,粪肥同时添加时磷对甲烷氧化菌丰度的影响不大;但无论是化肥单施还是粪肥配施,磷添加都改变了稻田甲烷氧化菌的群落组成^[13]。湖南长期定位不施磷处理水稻土的不同磷肥用量盆栽试验发现,缺磷土壤上施磷显著提高了水稻移栽后34 d根区土壤甲烷氧化菌的丰度,并改变了根区土壤甲烷氧化菌的群落组成, γ -MOB增加, α -MOB降低,甲烷氧化潜势也显著升高^[23]。这可能是由于缺磷土壤施磷后促进了植株和根系生长,根系泌氧能力加强,根区土壤中氧气浓度有所增高。

2.2.3 磷对稻田甲烷排放的可能影响机制

磷对稻田甲烷排放的调控主要通过影响土壤产甲烷能力和甲烷氧化能力来完成。其可能调控机制(图2)有:一是磷通过对土壤碳氮有效性的调控而影响产甲烷菌以及甲烷氧化菌的群落结构及活性,进而影响甲烷的产生和氧化^[27];二是磷通过影响根系分泌物以及根系泌氧能力,即影响反应底物以及根系微环境从而影响甲烷的产生及氧化过程^[28];三是磷的生物有效性能直接调控甲烷氧化菌群中与磷获取转运相关的功能基因的表达,影响甲烷的氧化^[29]。其最终表现是促进还是抑制稻田甲烷排放,取决于其对产甲烷

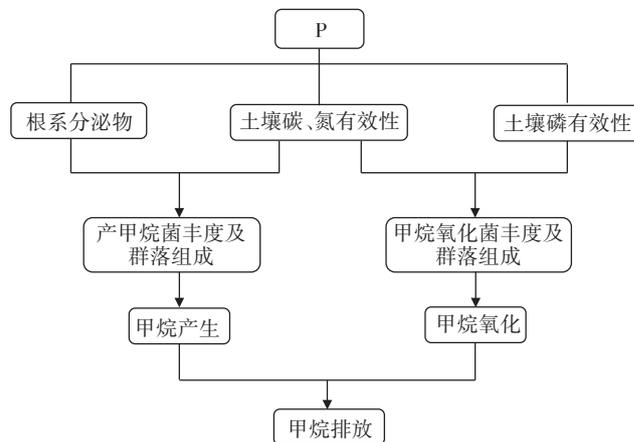


图2 磷对甲烷排放的可能影响机制框架图

Figure 2 Framework diagram of possible impact mechanisms of phosphorus on methane emissions

能力与甲烷氧化能力的影响程度。

3 结论与展望

磷对稻田甲烷排放的影响大小,是促进还是抑制作用,仍需要大量的田间试验数据来证实。但可以明确的是,在碳氮充分供应的条件下,磷是调控甲烷排放的主要因素。

未来应在以下方面加强研究:首先,需要在更广的范围内(不同土壤类型、不同土壤肥力状况、不同水稻品种)开展不同磷施用情况下的甲烷排放田间观测研究,并针对缺磷和富磷土壤分别开展不同磷添加水平试验,系统总结磷对稻田甲烷产生、排放的影响及其规律。其次,需要深入研究磷与碳氮等养分互作对甲烷排放及氧化过程的影响,探讨稻田甲烷排放与土壤化学计量比之间的关系。最后,需要利用现代基因组学技术,深入研究甲烷氧化菌对磷的响应策略。

参考文献:

- [1] Kirschke S, Bousquet P, Ciais P, et al. Three decades of global methane sources and sinks[J]. *Nature Geoscience*, 2013, 6(10):813-823.
- [2] Holzapfel-Pschorn A, Seiler W. Methane emission during a cultivation period from an Italian rice paddy[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1986, 91(11):11803-11814.
- [3] 秦晓波. 不同施肥处理稻田甲烷和氧化亚氮排放特征[C]//中国气象学会2007年年会气候变化分会场论文集,北京:中国气象学会,2007:141-149. QIN Xiao-bo. Characteristics of methane and nitrous oxide emissions from paddy fields under different fertilizer treatments [C]//Proceedings of the 2007 Annual Meeting of the Chinese Meteorological Society Climate Change Branch, Beijing: Chinese Meteorological Society, 2007:141-149.

- [4] Sakai S, Imachi H, Sekiguchi Y, et al. Isolation of key methanogens for global methane emission from rice paddy fields: A novel isolate affiliated with the clone cluster rice cluster I [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2007, 73(13):4326-4331.
- [5] 李大明, 成艳红, 刘满强, 等. 双季稻田甲烷排放与土壤产甲烷菌群落结构和数量关系研究[J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32(4):866-873. LI Da-ming, CHENG Yan-hong, LIU Man-qiang, et al. Relationship between methane emission and the community structure and abundance of methanogens under double rice cropping system[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(4):866-873.
- [6] Yang S, Shang Q, Wu P, et al. Methane emissions from double rice agriculture under long-term fertilizing systems in Hunan, China[J]. *Agriculture, Ecosystem and Environment*, 2010, 137:308-316.
- [7] 刘金剑, 吴萍萍, 谢小立, 等. 长期不同施肥制度下湖南红壤晚稻田 CH₄ 的排放[J]. *生态学报*, 2008, 28(6):2878-2886. LIU Jin-jian, WU Ping-ping, XIE Xiao-li, et al. Methane emission from late rice fields in Hunan red soil under different long-term fertilizing systems [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(6):2878-2886.
- [8] Adhya T K, Pattnaik P, Satpathy S N, et al. Influence of phosphorus application on methane emission and production in flooded paddy soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998:177-181.
- [9] 李霞. 土壤磷素耦合的水田碳-氮库动态消长规律及其生态化学计量学调控潜能[D]. 杭州:浙江大学, 2014:77-78. LI Xia. Soil phosphorus coupled paddy field carbon-nitrogen pool dynamic growth and decline and its eco-stoichiometric regulation potential[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014:77-78.
- [10] Datta A, Santra S C, Adhya T K. Effect of inorganic fertilizers (N, P, K) on methane emission from tropical rice field of India[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 66:123-130.
- [11] Kim S Y, Veraart A J, Meima-Franke M, et al. Combined effects of carbon, nitrogen and phosphorus on CH₄ production and denitrification in wetland sediments[J]. *Geoderma*, 2015, 259-260:354-361.
- [12] Hou P F, Yu Y L, Xue L H, et al. Effect of long term fertilization management strategies on methane emissions and rice yield[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 725:1-8.
- [13] Zhang W Z, Sheng R, Zhang M M, et al. Effects of continuous manure application on methanogenic and methanotrophic communities and methane production potentials in rice paddy soil[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2018, 258:121-128.
- [14] Lu Y, Wassmann R, Neue H, et al. Impact of phosphorus supply on root exudation, aerenchyma formation and methane emission of rice plants[J]. *Biogeochemistry*, 1999, 47(2):203-218.
- [15] Medvedeff C A, Inglett K S, Inglett P W. Patterns and controls of anaerobic soil respiration and methanogenesis following extreme restoration of calcareous subtropical wetlands[J]. *Geoderma*, 2015, 245/246:74-82.
- [16] Veraart A J, Steenbergh A K, Ho A, et al. Beyond nitrogen: The importance of phosphorus for CH₄ oxidation in soils and sediments[J]. *Geoderma*, 2015, 259/260:337-346.
- [17] Wang W Q, Sardans J, Wang C, et al. Relationships between the potential production of the greenhouse gases CO₂, CH₄ and N₂O and soil concentrations of C, N and P across 26 paddy fields in southeastern China[J]. *Atmospheric Environment*, 2017, 164:458-467.
- [18] 李广灏, 汪子貂, 邱征, 等. 不同施肥处理方式对稻田甲烷排放的影响[J]. *安徽农学通报*, 2016, 22(1):54-58. LI Guang-hao, WANG Zi-diao, QIU Zheng, et al. Effects of different fertilization treatments on methane emission from rice fields[J]. *Anhui Agri Sci*, 2016, 22(1):54-58.
- [19] 唐海明, 肖小平, 汤文光, 等. 长期施肥对双季稻田甲烷排放和关键功能微生物的影响[J]. *生态学报*, 2017, 37(22):7669-7678. TANG Hai-ming, XIAO Xiao-ping, TANG Wen-guang, et al. Effects of long-term fertilizer treatments on CH₄ fluxes and key functional microorganisms in a double-cropping paddy field[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(22):7669-7678.
- [20] Jugnia L, Mottiar Y, Djuikom E, et al. Effect of compost, nitrogen salts, and NPK fertilizers on methane oxidation potential at different temperatures[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2012, 93(6):2633-2643.
- [21] Liu D, Ding W, Jia Z, et al. Relation between methanogenic archaea and methane production potential in selected natural wetland ecosystems across China[J]. *Biogeosciences*, 2011, 8(2):329-338.
- [22] Zu Q, Zhong L, Deng Y, et al. Geographical distribution of methanogenic archaea in nine representative paddy soils in China[J]. *Front Microbiol*, 2016, 7:1447.
- [23] Gao D D, Sheng R, Whiteley A, et al. Effect of phosphorus amendments on rice rhizospheric methanogens and methanotrophs in a phosphorus deficient soil[J]. *Geoderma*, 2020, 368:1-10.
- [24] Holzapfel-Pschorn A, Seiler W. Methane emission during a cultivation period from an Italian rice paddy[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1986, 91(11):11803-11814.
- [25] Gray N D, Macann C, Christgen B, et al. Soil geochemistry confines microbial abundances across an arctic landscape; implications for net carbon exchange with the atmosphere[J]. *Biogeochemistry*, 2014, 120(1):307-317.
- [26] Chauhan A, Pathak A, Ogram A. Composition of methane-oxidizing bacterial communities as a function of nutrient loading in the Florida everglades[J]. *Microbial Ecology*, 2012, 64(3):750-759.
- [27] Fisk M, Santangelo S, Minick K. Carbon mineralization is promoted by phosphorus and reduced by nitrogen addition in the organic horizon of northern hardwood forests[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2014, 81(2015):212-218.
- [28] Tawaraya K, Horie R, Wagatsuma T, et al. Metabolite profiling of shoot extract, root extract, and root exudate of rice under nitrogen and phosphorus deficiency[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2018, 64(3):312-322.
- [29] Ho A, Kerckhof F M, Luke C, et al. Conceptualizing functional traits and ecological characteristics of methane-oxidizing bacteria as life strategies[J]. *Environ Microbiol Rep*, 2013, 5(3):335-345.