

张 溪, 沈素素, 薛利红. 磷添加对长期缺磷稻田土壤磷转化和甲烷排放的影响[J]. 江苏农业学报, 2026, 42(7):1387-1398.
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2026.07.010

磷添加对长期缺磷稻田土壤磷转化和甲烷排放的影响

张 溪¹, 沈素素^{1,2}, 薛利红^{1,2}

(1.江苏省农业科学院农业资源与环境研究所/农业农村部长江下游平原农业环境重点实验室, 江苏 南京 210014; 2.南京农业大学资源与环境科学学院, 江苏 南京 211800)

摘要: 本研究以长期不施磷稻田土壤为研究对象,通过盆栽试验设置施磷处理(NKP)与不施磷处理(NK),系统分析磷添加对缺磷土壤磷素形态、磷转化微生物、甲烷(CH_4)产生及水稻生长的影响。结果表明,磷肥投入可显著增加土壤全磷含量和有效磷含量($P<0.05$);土壤无机磷以铁结合态磷(Fe-P)和钙结合态磷(Ca-P)为主,有机磷以活性和中活性为主,各形态磷绝对含量随磷肥投入而增加,但其占全磷比例降低。施磷处理抑制了土壤磷酸酶活性及磷转化功能基因表达,且分蘖期的抑制远超成熟期。施磷处理虽未改变产甲烷菌群落结构,但驱动甲烷氧化菌中甲基单胞菌属(*Methylobacter*)菌显著增殖并抑制甲基杆菌属(*Methylobacter*)菌增殖,这可能是降低水稻分蘖期稻田土壤甲烷排放峰值的关键因子。相关性分析结果表明,甲烷排放量与闭蓄态磷含量和活性有机磷含量呈显著负相关($P<0.05$),这可能与闭蓄态磷的“物理屏障”效应阻碍产甲烷底物扩散,以及活性有机磷对甲烷氧化菌的营养支持有关。此外,与不施磷处理相比施磷处理显著提升水稻产量和植株吸磷量($P<0.05$)。综上,在长期缺磷稻田中施用磷肥可通过调控土壤磷循环与甲烷氧化菌群落实现水稻分蘖期稻田土壤甲烷排放通量降低与水稻增产。

关键词: 长期缺磷; 稻田; 磷; 甲烷; 产甲烷菌; 甲烷氧化菌

中图分类号: S511; S153.6

文献标识码: A

文章编号: 1000-4440(2026)07-1387-12

Impacts of phosphorus addition on phosphorus transformation and CH_4 emission in long-term phosphorus-deficient paddy soils

ZHANG Xi¹, SHEN Susu^{1,2}, XUE Lihong^{1,2}

(1. Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Agro-Environment in Downstream of Yangtze Plain, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, China; 2. College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 211800, China)

Abstract: This study took long-term phosphorus-deficient paddy soil as the research object. Pot experiments were conducted with a phosphorus application treatment (NKP) and a no-phosphorus application treatment (NK). The effects of phosphorus addition on phosphorus fractions, phosphorus-transforming microorganisms, methane (CH_4) production and rice growth in phosphorus-deficient soil were systematically analyzed. The results showed that phosphorus addition significantly increased soil total phosphorus and available phosphorus contents ($P<0.05$). Soil inorganic phosphorus was dominated by iron-bound phosphorus (Fe-P) and calcium-bound phosphorus (Ca-P), while organic phosphorus was composed

mainly of labile and moderately labile fractions. The absolute content of each phosphorus fraction increased with phosphorus addition, but its proportion to total phosphorus decreased. Phosphorus addition inhibited soil phosphatase activity and the expression of phosphorus-transforming functional genes, and the inhibition was much stronger at the tillering stage than at the maturity stage. Phosphorus

收稿日期: 2025-08-08

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD1700803); 国家自然科学基金项目(41877087)

作者简介: 张 溪(1996-), 男, 江苏涟水人, 博士, 助理研究员, 研究方向为农田养分管理与面源污染阻止与控制。(E-mail) zhangxi@jaas.ac.cn

通讯作者: 薛利红, (E-mail) xuelihong@jaas.ac.cn

addition did not alter the community structure of methanogens, but it drove a significant proliferation of *Methylobacter* among methanotrophs, which may be a key factor in reducing the peak methane emission from paddy soil at the tillering stage. Correlation analysis indicated that methane emission was significantly negatively correlated with occluded phosphorus content and labile organic phosphorus content ($P < 0.05$). This may be related to the “physical barrier” effect of occluded phosphorus in hindering the diffusion of methanogenic substrates, and to the nutritional support provided by labile organic phosphorus for methanotrophs. Furthermore, compared with the no-phosphorus treatment, phosphorus addition significantly increased rice yield and plant phosphorus uptake ($P < 0.05$). In conclusion, phosphorus addition to long-term phosphorus-deficient paddy soil can reduce methane emission flux from the paddy soil at the tillering stage and increase rice yield by regulating soil phosphorus cycling and the methanotrophic community.

Key words: long-term phosphorus-deficiency; paddy soil; phosphorus; methane; methanogen; methanotroph

磷对作物生长至关重要,其有效性直接制约农业可持续发展^[1]。长期定位试验结果表明,无磷投入可致土壤中各种形态磷含量显著降低^[2]。在缺磷稻田生态系统中,土壤磷素的活化或固定动态深刻影响着土壤微生物代谢过程与水稻养分吸收效率^[3-4]。作为土壤磷循环的核心驱动者,土壤微生物在低磷环境中通过分泌无机磷溶解酶和有机磷矿化酶进而提升磷素的生物有效性。郭龙等^[5]发现,无磷处理的土壤酸性磷酸酶和碱性磷酸酶活性均显著高于施磷处理。Bi 等^[6]的研究结果进一步证实,与全量施磷相比,有机无机减施磷肥模式虽然只是轻微提升了吡咯并喹啉酮合成基因 *C(pqqC)* 基因丰度,但显著增强了碱性磷酸酶 *D(phoD)* 基因的表达。此外,低磷环境可诱导水稻根系构型重塑与有机酸分泌增加^[7]。这些分泌物不仅能溶解难溶性磷酸盐,还可刺激磷活化微生物增殖,协同提升磷有效性^[8],但该过程受土壤 pH、氧化还原电位及矿物吸附能力的多重制约。

外源磷添加可通过补充土壤有效磷库,促进磷形态转化并优化根系磷吸收,直接缓解水稻磷匮乏^[9]。然而,土壤磷有效性的变化不仅会调控水稻生理代谢,还可通过重塑根际微生物群落结构与功能,间接影响稻田碳循环过程,特别是甲烷(CH_4)的产生与消耗^[10-11]。作为稻田温室气体排放的关键组分,甲烷与磷有效性的关系逐渐受到关注^[12-14]。Wang 等^[15]对中国福建省 26 个稻田土壤栽培试验发现,甲烷排放与土壤有效磷含量呈负相关。从微生物机制看,甲烷生成依赖于产甲烷菌在厌氧环境下对有机底物(如乙酸)以及 H_2 、 CO_2 的代谢,磷素可通过调节底物供应或产甲烷菌群落结构影响排放通量^[12,16]。Gao 等^[3]基于湖南省长期缺磷水稻土的盆栽试验发现,施磷肥显著提高了根际产甲烷菌的丰度、活性及产甲烷潜力。除了对产甲烷菌的影

响外,Zheng 等^[17]与 Sheng 等^[18]的研究结果证实,磷有效性变化同样可调控甲烷氧化菌的群落演替与氧化活性。值得注意的是,稻田甲烷的释放是土壤中产甲烷菌和甲烷氧化菌相互作用的结果,且该平衡受稻作制度、水稻生育期等多因素影响,因此外源磷添加对稻田这一特殊淹水环境中磷形态转化的机制与甲烷排放的动态变化仍存在认知空白。

基于此,本研究以太湖流域典型黄泥土为对象,设置不施磷和施磷两种处理方式开展水稻盆栽试验,旨在阐明近 20 年缺磷稻田施磷肥后对水稻分蘖期与成熟期土壤磷形态转化、磷循环功能微生物及磷酸酶活性的影响以及对土壤甲烷排放、分蘖期产甲烷菌与甲烷氧化菌的影响。为明确磷对稻田甲烷排放的影响及其机制以及磷肥的优化管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

供试土壤采自南京农业大学丹阳试验站($31^\circ 54'31''\text{N}$, $119^\circ 28'21''\text{E}$)水稻田,选取长期不施磷处理(仅施化学氮肥和钾肥)的微酸性黄泥土为本研究的缺磷处理土壤样本。采集 0~20 cm 表层土,经风干及剔除石砾、根系后过直径 4 mm 筛备用。土壤基础性质为:pH 5.5,有机质含量 33.2 g/kg,全氮含量 1.09 g/kg,全磷含量 0.53 g/kg,有效磷含量 15.5 mg/kg,有效钾含量 190 mg/kg。

盆栽试验于 2022 年 6 月在江苏省农业科学院钢架棚内实施,设不施磷(NK)和施磷(NKP)2 个处理,各处理 3 次重复。试验用盆为聚氯乙烯(PVC)材质,规格为外径 38 cm、内径 30 cm、高 30 cm。具体操作如下:每盆装 20.0 kg 风干土,其中 4.5 kg 分装于 3 个 600 目根际袋内,即每个根际袋装土 1.5 kg,根际袋规格为直径 9.5 cm、高 18.0 cm;剩余

15.5 kg 土用于填充根际袋外空间,3 个根际袋在盆中垂直放置,并调整袋体高度使其上沿与盆内袋外土壤表面齐平。6 月中旬在每个根际袋中移栽 3 株 1 周龄的南粳 46 水稻秧苗。施肥方案如下:氮肥总量 240 kg/hm²(纯 N),按基肥 40%、分蘖肥 30%、穗肥 30% 分别施用;钾肥 160 kg/hm²(以 K₂O 计),按基肥和穗肥各一半分别施用;施磷处理磷肥用量为 100 kg/hm²(以 P₂O₅ 计),作为基肥一次性施入。水分管理与病虫害防治遵循当地农田日常管理。

1.2 采样方法

1.2.1 甲烷样品采集 采用静态暗箱法采集水稻全生育期甲烷样品。密闭顶箱也为 PVC 材质,箱直径 34 cm,高 100 cm,顶箱内部上端安装小风扇,用于混匀箱内气体。采样时,在盆体与顶箱接触的凹槽处注满水,随后将顶箱置于凹槽中以增强装置密封性。通过自动采样器将气体导入 50 mL 铝箔集气袋,分别于密闭后 0 min、10 min、20 min 和 30 min 采集气体样品,同时记录采样时箱内温度,采样结束后迅速带回实验室测定甲烷浓度。采样时段固定为每日上午 8:00–10:00;于水稻移栽后第 1 d、第 4 d、第 7 d、第 10 d、第 14 d、第 17 d、第 25 d 进行密集采样,之后每 7 d 采集 1 次,直至水稻成熟。

1.2.2 土壤和植株样品采集 于水稻分蘖盛期(T)和成熟期(M)采集各根际袋内根际土壤,样品处理采用“同盆合并”原则,即单个盆中 3 个根际袋内的土壤全部收集后,混合均匀作为 1 份独立土壤样品以确保样品具备代表性。混匀后的样本分为 2 份,1 份室温风干、过筛,用于测定土壤不同形态磷含量;另 1 份保存于 -20 °C 冰箱,用于分析土壤磷相关微生物学性质。此外,在水稻移栽后第 1 d(D1)、第 4 d(D4)、第 7 d(D7)、第 10 d(D10)、第 17 d(D17)、第 25 d(D25)采集根际袋内土壤,与气体采样同步,同样采用“同盆合并”原则,收集的土壤样品置于 -80 °C 冰箱,用于产甲烷菌和甲烷氧化菌微生物测序。水稻达到生理成熟期人工收割,单个盆内所有植株的地上部分全部收获,经脱粒、风干后测算各处理产量。

1.3 测试项目及方法

1.3.1 甲烷排放通量 采用美国安捷伦公司 7890B 气相色谱仪检测甲烷浓度,氢火焰离子化检测器(FID)温度为 300 °C,色谱柱温 60 °C,载气为 99.999% 高纯氮气,流速 30 mL/min。甲烷排放通

量计算公式如下:

$$F = \rho \times \frac{V}{A} \times \frac{\Delta C}{\Delta t} \times \frac{273}{273 + T}$$

式中: F 表示甲烷排放通量; ρ 为标准状态下的气体密度(0.54 g/L), V 为采样箱体积, A 为采样底座内土壤表面积; $\Delta C/\Delta t$ 表示单位时间内甲烷气体的排放速率; T 为采样箱内气温。

水稻整个生育期甲烷累积排放量计算公式如下:

$$E = \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{F_i + F_{i+1}}{2} \times (t_{i+1} - t_i) \times 24 \right\}$$

式中: E 为甲烷累积排放量, n 为整个生育期内的采样次数, i 为第 i 次采样; $t_{i+1} - t_i$ 为两次采样的时间间隔;24 为单位换算, F 表示甲烷排放通量。

1.3.2 土壤指标 土壤磷形态及含量的测定:土壤全磷(TP)含量和有效磷(AP)含量分别采用 HClO₄-H₂SO₄ 消解-钼蓝比色法和 0.5 mol/L NaHCO₃ 溶液浸提-钼蓝比色法测定。无机磷分级参照顾益初等^[19]的方法:以 0.5 mol/L NH₄F 提取铝结合态磷(Al-P)、0.1 mol/L NaOH 提取铁结合态磷(Fe-P)、0.3 mol/L Na₃C₆H₅O₇-Na₂S₂O₄ 提取闭蓄态磷(O-P)和 0.5 mol/L H₂SO₄ 提取钙结合态磷(Ca-P)。有机磷分级参照 Bowman 等^[20]的分级体系,分为活性有机磷(LOP)、中活性有机磷(MLOP)、中稳定有机磷(MROP)和高稳定有机磷(HROP)。

土壤磷相关生物学指标的测定:土壤碱性磷酸酶(ALP)活性、酸性磷酸酶(ACP)活性、植酸酶(Phy)活性均采用北京索莱宝科技有限公司生产的酶活试剂盒检测。土壤磷酸二酯酶(PDE)活性检测以双对硝基苯磷酸钠为底物,在 pH 为 8.0 条件下测定,酶活性定义为单位质量土壤中对硝基苯酚在单位时间内的产生量。采用实时荧光定量聚合酶链式反应(qPCR)法对土壤磷循环功能基因[β -螺旋桨植酸酶基因(*bpp*)、碱性磷酸酶 D 基因(*phoD*)、酸性磷酸酶 C 基因(*phoC*)、吡咯并喹啉酮合成基因 C(*pqqC*)]丰度进行定量分析,引物组分别为 *bpp*-F/*bpp*-R、*ALPS*-F730/*ALPS*-R1101、*phoC*-A-F1/*phoC*-A-R1 和 *pqqC*-Fw/*pqqC*-Rv^[21]。扩增体系(20 μ L)如下:10 μ L qPCR Master Mix,0.8 μ L 引物混合液,7.7 μ L ddH₂O 和 1.5 μ L DNA 模板。扩增条件设置如下:*bpp* 基因采用 96 °C 预变性 5 min,随后进行 45 个循环的扩增,每个循环包括 94 °C 变性 15 s、50 °C 退

火 30 s、72 ℃ 延伸 30 s。*phoD*、*phoC* 和 *pqqC* 3 个基因的循环参数与 *bpp* 基因基本相同,但退火温度调整为 55 ℃。

土壤产甲烷菌和甲烷氧化菌的高通量测序:使用土壤 DNA 试剂盒(FastDNA™ SPIN Kit for Soil,美国 MP 生物医疗公司产品)从 0.5 g 土壤中提取 DNA。DNA 完整性采用琼脂糖凝胶电泳检测;浓度与纯度采用 NanoDrop 1000 微量分光光度计(美国赛默飞世尔科技公司产品)检测。引物 *mals/mcrArev* 和引物 A189F/Mb661R 分别被用来进行土壤产甲烷菌 DNA 和甲烷氧化菌 DNA 的扩增,具体扩增条件及方法等参照许琛^[2]的方法。纯化后的扩增产物采用 Illumina PE300 平台进行双端测序,测序服务由广东美格基因科技有限公司提供,测序所得原始数据的统计分析由该公司按试验需求完成。

1.3.3 植株全磷含量的测定 水稻收获后将植株地上部分分离为稻谷与秸秆两部分,于 105 ℃ 杀青 30 min,再转入 75 ℃ 烘箱烘干至恒质量后粉碎过筛,备用。采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮-钒钼黄比色法^[21]分别测定稻谷和秸秆的全磷含量。

1.4 数据处理与分析

数据统计分析采用 Microsoft Excel 2016 软件与 SPSS 24.0 软件完成,图表绘制通过 Origin 2021 软件完成。两处理间的统计学差异采用 *t* 检验进行比较,物种群落组成及多样性分析在美格云平台完成。

2 结果与分析

2.1 土壤磷含量及无机磷和有机磷的形态

从图 1A、图 1B 可知,与不施磷处理(NK-T、NK-M)相比,添加磷处理(NKP-T、NKP-M)水稻分蘖期和成熟期土壤全磷含量和有效磷含量均显著或极显著提高($P<0.05$ 、 $P<0.01$ 、 $P<0.001$)。不施磷处理土壤无机磷含量介于 92.41~112.3 mg/kg,占磷总量的 43.8%~47.9%(图 1C);而添加磷处理土壤无机磷含量(106.6~127.9 mg/kg)虽然高于不施磷处理,但其占比却降至 37.4%~41.4%。不管是水稻分蘖期还是成熟期,Fe-P 和 Ca-P 在施磷处理和不施磷处理下均是无机磷的主导形态(占无机磷总量>76.3%)。水稻成熟期施磷处理土壤中 Fe-P 含量和 Al-P 含量显著和极显著高于不施磷处理($P<0.05$ 、 $P<0.01$)。相较于分蘖期,水稻成熟期不施磷处理土壤 Fe-P 与 Ca-P 含量显著降低($P<0.05$),施磷处理 Ca-P 也显著下降($P<0.05$)。

不施磷处理土壤有机磷含量介于 97.16~112.6 mg/kg,占磷总量的 46.1%~48.1%(图 1D);施磷处理土壤有机磷含量(103.2~132.0 mg/kg)虽然更高,但占比显著下降至 36.3%~42.9%。施磷和不施磷处理土壤中有机磷在水稻不同生育期均以活性有机磷和中活性有机磷为主(占有机磷总量>57.6%)。与不施磷处理相比,水稻分蘖期土壤中的中活性有机磷含量显著升高($P<0.05$)。相较于分蘖期,水稻成熟期施磷处理土壤中活性有机磷含量和中活性有机磷含量显著降低($P<0.05$)。

2.2 土壤磷转化酶活性和功能基因丰度

水稻分蘖期土壤磷转化酶活性测定结果(图 2A)显示,与不施磷处理相比,施磷处理土壤中碱性磷酸酶活性、酸性磷酸酶活性、植酸酶活性和磷酸二酯酶活性差异均未达显著水平($P>0.05$)。土壤磷转化功能基因丰度检测结果(图 2B)显示,与不施磷处理相比,施磷处理水稻分蘖期土壤中吡咯并喹啉合成基因 C(*pqqC*)基因丰度显著下降($P<0.05$);其他基因丰度差异未达显著水平($P>0.05$)。

2.3 磷添加对长期不施磷稻田土壤甲烷排放的影响

从图 3A 可见,稻田土壤甲烷排放放在移栽后 2 个月内呈单峰曲线,在水稻分蘖期达峰值后迅速下降。施磷处理虽未显著改变水稻全生育期稻田土壤甲烷排放趋势,但降低了分蘖盛期的甲烷排放通量。具体而言,施磷处理稻田土壤甲烷排放通量在水稻移栽后第 17 d 达到峰值,比不施磷处理降低 24.2%。从图 3B 可知,施磷处理水稻全生育期稻田土壤甲烷累计排放量与不施磷处理相比,差异未达显著水平($P>0.05$)。

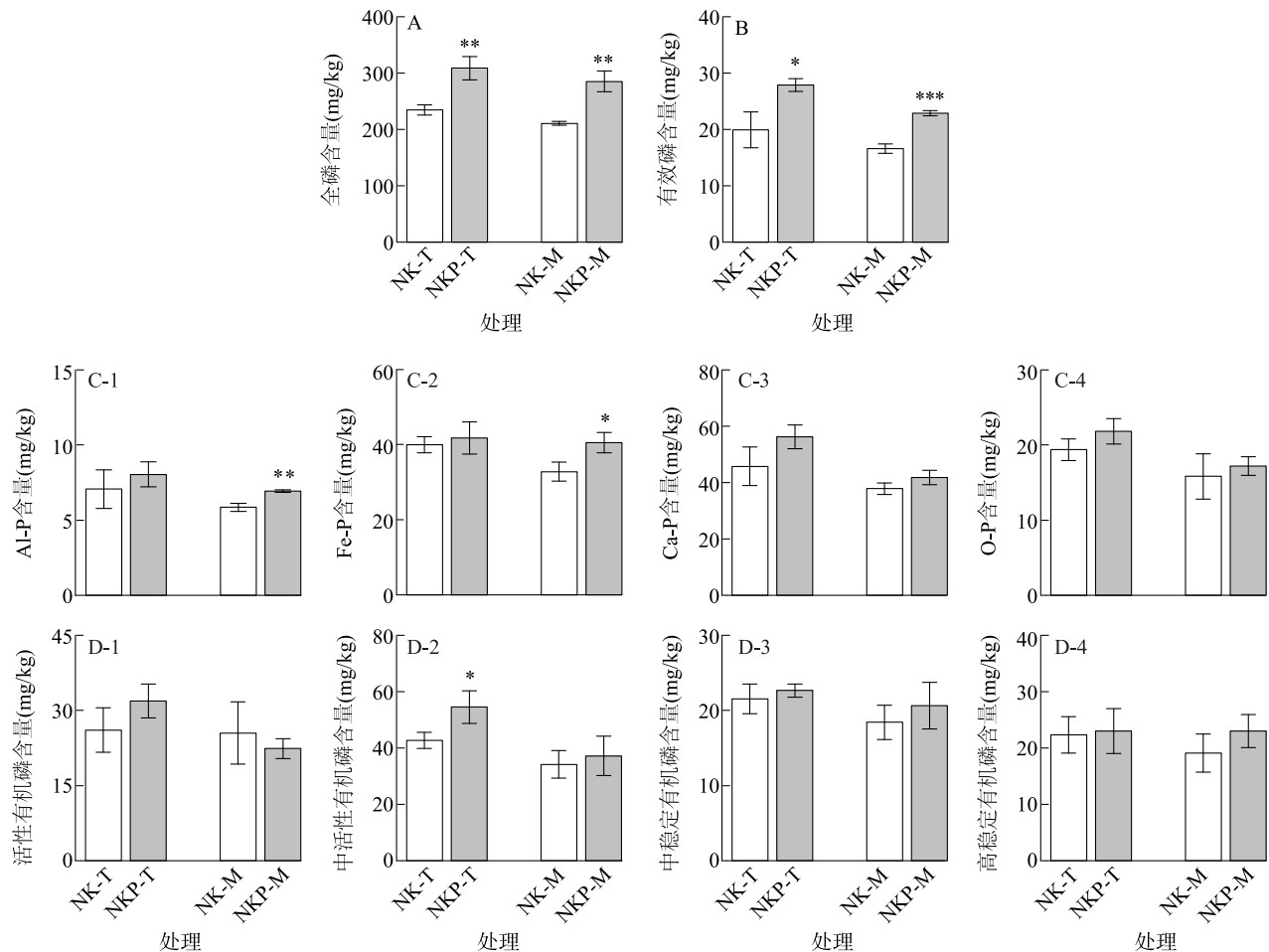
2.4 施磷处理对稻田土壤产甲烷菌和甲烷氧化菌的影响

Alpha 多样性分析结果(表 1)表明,施磷与不施磷处理对水稻移栽后土壤产甲烷菌的群落丰富度(Chao1 指数)和均匀度(Shannon 指数)均无显著影响($P>0.05$)。与不施磷处理相比,施磷处理土壤甲烷氧化菌的 Chao1 指数在水稻移栽后第 10 d 和第 25 d 显著上升($P<0.05$);Shannon 指数在水稻移栽后第 25 d 显著上升($P<0.05$)。

属水平物种组成(图 4A)显示,施磷处理与不施磷处理的土壤中产甲烷菌均以甲烷杆菌属(*Methanobacterium*)菌、甲烷胞菌属(*Methanocella*)菌和甲烷丝菌属(*Methanotherix*)菌为绝对优势类群(总占比>

90.0%),尽管移栽后3类菌属菌丰度呈轻微下降趋势,但分蘖期内无显著变化。甲烷杆菌属菌和甲烷胞菌属菌为氢营养型产甲烷菌,甲烷丝菌属菌为乙酸营养型产甲烷菌。值得注意的是,除移栽后第17 d外,

施磷处理普遍降低了氢营养型产甲烷菌相对丰度,同时乙酸营养型产甲烷菌的占比提高。主坐标(PCoA)分析结果(图4C)进一步证实,与不施磷相比,施磷处理并未显著改变产甲烷菌群落结构。



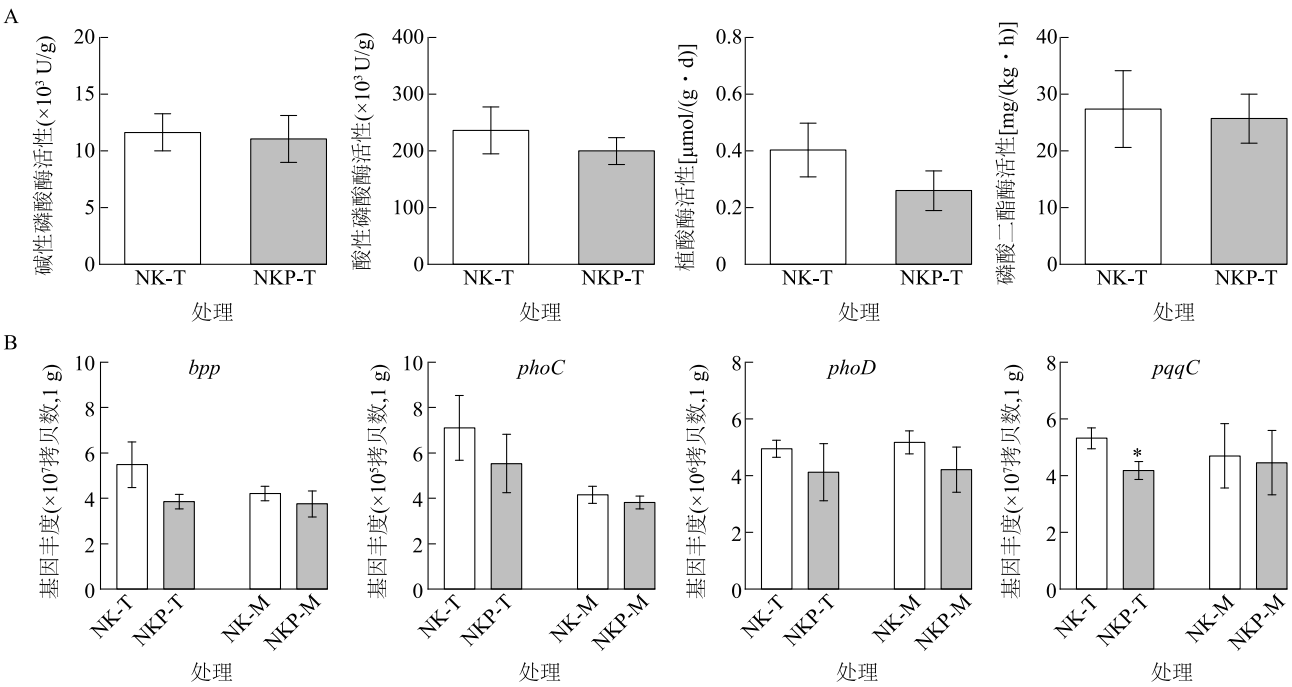
A:不同生育期土壤全磷含量;B:不同生育期土壤有效磷含量;C:不同生育期土壤不同形态无机磷含量;D:不同生育期土壤不同形态有机磷相对含量。NK-T:不施磷处理(水稻分蘖期);NKP-T:施磷处理(水稻分蘖期);NK-M:不施磷处理(水稻成熟期);NKP-M:施磷处理(水稻成熟期)。Al-P:铝结合态磷;Fe-P:铁结合态磷;Ca-P:钙结合态磷;O-P:闭蓄态磷。同一生育时期图柱上*表示与不施磷处理相比差异显著($P<0.05$);同一生育时期图柱上**表示与不施磷处理相比差异极显著($P<0.01$);同一生育时期图柱上***表示与不施磷处理相比差异极显著($P<0.001$)。

图1 水稻分蘖期和成熟期土壤中全磷、有效磷含量以及无机磷和有机磷组分含量

Fig.1 Contents of total phosphorus, available phosphorus, inorganic phosphorus and organic phosphorus fractions in soil at tillering and mature stages of rice

甲烷氧化菌群落组成(图4B)则以I型菌门(γ -变形菌门)为主导(总占比>85.0%),包括甲基单胞菌属(*Methylomonas*)菌、甲基杆菌属(*Methylobacter*)菌、甲基微菌属(*Methylomicrobium*)菌、甲基球菌属(*Methylosarcina*)菌、甲基副球菌属(*Methyloparacoccus*)菌和甲基嗜热菌属(*Methylocaldum*)菌。随着生育期的推进,水稻分蘖期甲基单胞菌

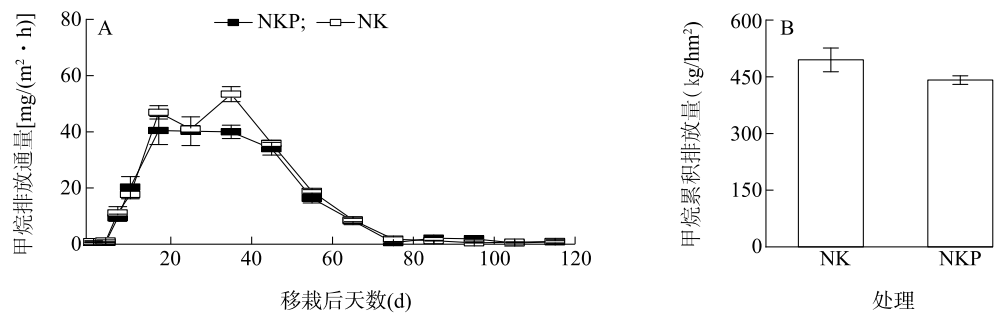
属菌与甲基微菌属菌相对丰度显著增加,而甲基杆菌属菌和甲基球菌属菌相对丰度显著降低。在水稻分蘖前期施磷处理对甲基单胞菌属菌的刺激作用更显著,但对甲基杆菌属菌存在抑制效应。主坐标分析结果(图4D)显示,与不施磷处理相比,施磷处理对甲烷氧化菌群落结构的影响未达显著水平。



A:土壤磷循环关键酶活性;B:土壤磷循环功能基因丰度。NK-T、NKP-T、NK-M、NKP-M 见图 1 注。*bpp*: β -螺旋桨植酸酶基因;*phoD*:碱性磷酸酶 D 基因;*phoC*:酸性磷酸酶 C 基因;*pqqC*:吡咯并喹啉酮合成基因 C。同一生育时期图柱上 * 表示与不施磷处理相比差异显著 ($P < 0.05$)。

图 2 不同处理土壤磷转化酶活性和磷循环功能基因丰度

Fig.2 Soil phosphorus-transforming enzyme activities and phosphorus cycling functional gene abundances under different treatments



A:不同处理甲烷排放通量;B:不同处理甲烷累积排放量。NK:不施磷处理;NKP:施磷处理。

图 3 水稻全生育期甲烷排放通量和累积量

Fig.3 Methane (CH_4) emission fluxes and cumulative emissions throughout the rice growing season

表 1 分蘖期土壤产甲烷菌和甲烷氧化菌的 Alpha 多样性

Table 1 Alpha diversity index of soil methanogens and methanotrophs at the tillering stage

取样时间	处理	产甲烷菌		甲烷氧化菌	
		Chao1 指数	Shannon 指数	Chao1 指数	Shannon 指数
水稻移栽后第 1 d	NK	473.50±96.50	5.58±0.21	554.40±6.85	5.23±0.20
	NKP	478.20±35.40	5.80±0.29	604.20±41.40	5.76±0.39
水稻移栽后第 4 d	NK	484.40±39.50	5.63±0.16	574.30±32.10	5.46±0.34
	NKP	546.20±41.90	5.56±0.35	631.70±20.30	5.42±0.23

取样时间	处理	产甲烷菌		甲烷氧化菌	
		Chao1 指数	Shannon 指数	Chao1 指数	Shannon 指数
水稻移栽后第 7 d	NK	402.90±64.50	5.54±0.18	572.10±24.00	5.35±0.11
	NKP	462.50±37.40	5.94±0.26	621.30±63.90	5.42±0.06
水稻移栽后第 10 d	NK	417.40±66.90	5.61±0.10	587.80±44.20	5.46±0.23
	NKP	472.60±23.20	5.72±0.13	665.60±3.70 *	5.83±0.17
水稻移栽后第 14 d	NK	511.60±76.70	5.57±0.56	620.90±39.40	5.42±0.15
	NKP	480.50±69.30	5.59±0.03	614.70±63.00	5.39±0.29
水稻移栽后第 17 d	NK	510.10±126.00	5.85±0.20	626.70±29.10	5.32±0.29
	NKP	515.10±36.90	5.83±0.04	627.80±27.90	5.44±0.32
水稻移栽后第 25 d	NK	523.30±17.90	6.07±0.10	625.80±12.00	5.29±0.15
	NKP	492.90±93.40	6.08±0.32	665.90±8.03 *	5.77±0.11 *

A产甲烷菌属水平

相对丰度(%)

处理

■ 甲烷杆菌属(*Methanobacterium*); ■ 甲烷胞菌属(*Methanocella*);
■ 甲烷丝菌属(*Methanothrix*); ■ 甲烷调节菌属(*Methanoregula*);
■ 候选甲烷吞噬菌属(*Candidatus Methanoperedens*); ■ 其他属

B产甲烷氧化菌属水平

相对丰度(%)

处理

■ 甲基单胞菌属(*Methylomonas*); ■ 甲基杆菌属(*Methylobacter*);
■ 甲基微菌属(*Methyломicrobium*); ■ 甲基球菌属(*Methylosarcina*);
■ 甲基副球菌属(*Methyloparacoccus*); ■ 甲基嗜热菌属(*Methylocaldum*);
■ 克隆丝菌属(*Clonothrix*); ■ 其他属

C产甲烷菌

主坐标2(17.0%)

主坐标1(18.0%)

● NK: ● NKP

D产甲烷氧化菌

主坐标2(12.5%)

主坐标1(37.9%)

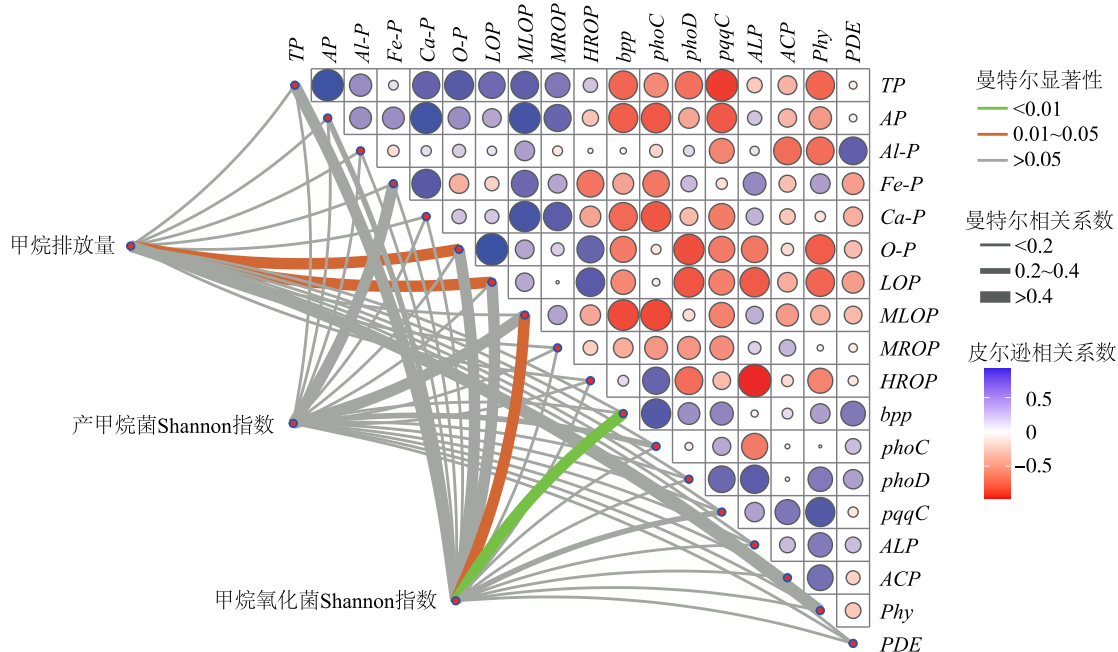
Fig.4 Community composition and principal coordinate analysis (PCoA) of methanogens and methanotrophs in soil under different treatments at the tillering stage of rice

2.5 稻田土壤甲烷排放与磷组分的相关性

对不同磷组分和磷转化相关微生物活性的分析结果(图 5)显示,土壤有效磷含量与钙结合态磷含量、中活性有机磷含量呈显著正相关($P<0.05$),说明钙结合态磷与中活性有机磷是该地区有效磷的重要赋存形态。此外,钙结合态磷含量与中活性有机磷含量呈显著正相关($P<0.05$),而闭蓄态磷含量与活性有机磷含量呈显著正相关($P<0.05$),表明有机磷与无机磷形态间存在转化关联。磷循环功能基因丰度及酶活性与磷组分的相关性主要表现为:闭蓄态磷含量、活性有机磷含量与 *phoD* 基因丰度呈显著负相关关系($P<0.05$),中活性有机磷含量与基因

bpp 丰度和 *phoC* 丰度之间呈显著负相关关系($P<0.05$),高稳定有机磷含量则与碱性磷酸酶活性之间存在极显著的负相关关系($P<0.01$)。

对水稻移栽后 25 d 土壤甲烷累积排放量与磷组分、相关微生物的相关性分析结果显示,甲烷排放量仅与闭蓄态磷含量和活性有机磷含量呈显著负相关($P<0.05$)。甲烷氧化菌群的 Shannon 指数与中活性有机磷呈正相关($P<0.05$),但与 *bpp* 基因丰度呈显著负相关关系;而产甲烷菌 Shannon 指数与所有磷组分及磷相关微生物参数均无显著相关性($P>0.05$),这与其群落结构的稳定性特征相符。



TP:土壤全磷含量;AP:土壤有效磷含量;LOP:活性有机磷含量;MLOP:中活性有机磷含量;MROP:中稳定有机磷含量;HROP:高稳定有机磷含量;Al-P:铝结合态磷含量;Fe-P:铁结合态磷含量;Ca-P:钙结合态磷含量;O-P:闭蓄态磷含量;ALP:碱性磷酸酶活性;ACP:酸性磷酸酶活性;Phy:植酸酶活性;PDE:磷酸二酯酶活性;bpp:β-螺旋浆植酸酶基因丰度;phoD 碱性磷酸酶 D 基因丰度;phoC:酸性磷酸酶 C 基因丰度;pqqC:吡咯并喹啉酮合成基因 C 丰度。

图 5 移栽后 25 d 甲烷排放累积量与第 25 d 产甲烷菌、甲烷氧化菌多样性及各磷组分含量、磷转化微生物活性的相关性

Fig.5 Correlation of cumulative methane emission at 25 days after rice transplanting with methanogen and methanotroph diversity, phosphorus fraction contents, and phosphorus-transforming microbial activity

2.6 施磷处理对水稻产量及作物吸磷量的影响

从表 2 可知,与不施磷处理相比,施磷处理可显著提升水稻产量 46.5% ($P<0.05$),表明土壤长期磷缺乏已严重制约水稻产量。施磷处理可显著促进水稻对磷素的吸收,水稻秸秆磷含量和作物吸磷量均显著高于不施磷处理($P<0.05$),增幅分别为 70.8% 和 43.0%。

表 2 水稻产量及植株磷含量

Table 2 Rice yield and plant phosphorus content

处理	产量 (t/hm ²)	秸秆磷含量 (g/kg)	稻谷磷含量 (g/kg)	作物吸磷量 (kg/hm ²)
NK	4.88±1.01	0.72±0.08	2.09±0.13	21.40±7.00
NKP	7.15±0.50 *	1.23±0.19 *	2.69±0.27	30.60±10.50 *

NK、NKP 见图 3 注。同列数据后 * 表示与不施磷处理相比差异显著 ($P<0.05$)。

3 讨论

3.1 施磷处理对稻田土壤磷形态及有效性的影响

土壤磷形态的相互转化受固持-释放平衡调控,直接决定磷素的生物有效性^[22]。本研究结果表明,施磷处理可显著提升太湖流域长期缺磷稻田土壤的全磷含量和有效磷含量($P<0.05$),符合磷肥扩增土壤磷库的普遍规律^[23-24]。与此同时,水稻分蘖期和成熟期,施磷处理相较不施磷处理对土壤中各形态无机磷和有机磷的含量有促进作用,这与前人的研究结果相吻合^[23, 25],但其无机磷占比和有机磷占比均显著低于不施磷处理。这种双占比下降现象源于土壤全磷含量增幅与各组分含量增幅的显著失衡:全磷含量增幅远超无机磷含量与有机磷含量的增幅。推测其潜在机制如下:(1)优先扩容特性,外源磷输入直接提升土壤总磷库;(2)形态转化迟滞,输入的无机磷需经溶解-再沉淀过程转化为可检测形态,存在时间滞后效应;(3)微生物固持竞争,新增磷素被快速转化为非提取态生物量磷(如微生物细胞内的多聚磷酸盐等),传统分级方法无法捕获。

在无机磷形态方面,不施磷处理和施磷处理均以 Fe-P 和 Ca-P 为主,这与稻田淹水条件下铁氧化物还原和 Ca^{2+} 的高活性密切相关。通常,弱酸性土壤中高含量的铁离子和铝离子会使施入的磷肥优先形成 Al-P 和 Fe-P,其中部分 Al-P 可继续转变为 Fe-P^[26];而淹水诱导的 pH 中性化则会促进淋溶态 Ca^{2+} 重新吸附到胶体表面并与磷酸根相结合,从而增加 Ca-P 含量^[25]。水稻生育期动态显示,不施磷处理水稻成熟期稻田土壤 Fe-P 含量和 Ca-P 含量同步下降,可能与缺磷土壤中水稻根系分泌物(如小分子量有机酸)对难溶磷的活化有关^[12],而施磷处理仅 Ca-P 含量显著降低($P<0.05$),推测原因可能是施磷后作物长势增强,会从土壤中摄取更多有效磷,而 Ca-P 是无机磷中作物最易吸收的成分,会优先被吸收利用进而使其含量明显减少^[27]。闭蓄态磷占比的稳定性印证了其化学惰性的特征。

施磷处理通过提升土壤磷有效性,触发微生物代谢策略从矿化向储存转型,即微生物将新增磷素整合为核酸、磷脂等生物量组分^[28-29]。这一策略转变可引发双重效应:一方面,磷酸酶活性下降和磷循环基因表达被抑制,直接削弱有机磷的矿化能力;另一方面,微生物固持介导的有机磷合成增强,导致有

机磷净累积^[30]。然而,本研究结果显示,有机磷含量增幅显著低于全磷含量增幅的主要原因在于新增磷的形态再分配,部分磷转化为了博曼-科尔(Bowman-Cole)法无法捕获的非分级有机磷(如微生物生物量磷)。需要关注的是,施磷处理的磷循环功能基因 *bpp*、*phoC* 和 *pqqC* 的相对丰度在水稻分蘖期的降幅远超成熟期,这可能与水稻生育期的磷需求差异有关,因为分蘖期是水稻需磷关键期^[2],根系分泌物(如小分子量有机酸)增多,促进土壤磷素的生物有效性,从而强化了微生物对基因表达的负反馈;而成熟期水稻磷吸收减弱,土壤磷因固定或淋溶,含量略有下降,基因表达抑制效应随之缓解。这些结果证实了磷有效性提升抑制微生物磷获取功能的核心假设,揭示了长期缺磷稻田中微生物通过功能适应性重组驱动磷库向生物量组分再分配的内在机制。

3.2 施磷处理对稻田甲烷减排的微生物调控机制

本研究发现,长期缺磷稻田复施磷肥后,水稻分蘖期甲烷排放峰值显著降低($P<0.05$)。这一结果与何竹等^[10]的试验结果基本一致。与此同时,Wang 等^[15]也报道,中国福建省 26 个稻田土壤的磷有效性与甲烷排放量呈负相关;Lu 等^[7]对菲律宾不同水稻品种开展盆栽试验,结果表明,低磷供应条件下甲烷排放量更高,且甲烷排放量随磷肥投入量的增加而降低。在磷匮乏土壤中施磷,可通过提升土壤全磷含量和有效磷含量,重塑土壤碳、氮、磷化学计量比及根系分泌物的耦合动态,进而影响产甲烷菌和甲烷氧化菌的群落组成与结构^[31],最终协同调控甲烷排放^[3, 32]。

对产甲烷菌而言,氢营养型产甲烷菌(以甲烷杆菌属菌和甲烷胞菌属菌为代表)与乙酸营养型产甲烷菌(以甲烷丝菌属菌为代表)在稻田土壤中始终占据绝对优势,且以氢营养型产甲烷菌为主导。这一结论与 Roy 等^[33]的研究结果一致,即在中性厌氧稻田环境中,氢营养型产甲烷菌在甲烷产生初期占主导地位。施磷处理可导致氢营养型产甲烷菌占比呈下降趋势,而推动乙酸营养型产甲烷菌增殖。产生这一现象的机制可能与磷对底物竞争及产甲烷菌代谢路径的调控有关:氢营养型产甲烷菌的生长依赖 Ni、Fe 等金属辅因子,而在酸性水稻土中施磷肥会使磷与铁离子结合形成磷酸盐沉淀,导致游离态铁离子浓度降低,进而抑制氢营养型产甲烷菌的

酶活性^[34];乙酸营养型产甲烷菌对磷的需求较弱,施磷处理可能通过加速有机碳分解和根系分泌物释放提高土壤中乙酸浓度^[12],为其提供充足底物,从而促进其增殖。然而,本研究发现,水稻移栽后施磷处理与不施磷处理相比,产甲烷菌的 α 多样性和群落组成无显著差异。这表明,长期缺磷环境下,产甲烷菌可通过功能冗余维持群落稳定性,仅通过调整优势菌属菌的比例来响应磷输入,进而未对全生育期甲烷累积排放产生显著影响。

甲烷氧化菌以 I 型氧化菌为主,这与稻田强氧化还原条件和 I 型菌较强的适应性密切相关^[35-36]。事实上,由于 I 型和 II 型甲烷氧化菌的碳同化代谢途径有差异(I 型为单磷酸核酮糖途径,II 型为丝氨酸途径),造成 I 型甲烷氧化菌的甲烷氧化能力明显高于 II 型^[37]。本研究结果显示,与不施磷处理相比,施磷处理显著提高了水稻移栽后第 10 d 和 25 d 甲烷氧化菌的 Chao 1 指数($P<0.05$),同时显著提高水稻移栽后第 25 d 甲烷氧化菌的 Shannon 指数($P<0.05$),并特异性促进甲基单胞菌属菌增殖,抑制甲基杆菌属菌。甲基单胞菌属菌是典型的“R 策略者”,其生长速率快、对甲烷亲和力高^[38],施磷处理可通过提升土壤磷有效性促进其生物量积累^[39-43],从而增强甲烷氧化能力。然而,甲基杆菌属菌更适应根际弱氧微环境和低温环境,磷输入通过促进水稻根系生长和径向氧分泌提高根际氧分压从而破坏其适宜生境,同时高温会进一步抑制其丰度^[44-45]。相关性分析结果表明,分蘖期甲烷排放量与闭蓄态磷含量和活性有机磷含量呈显著负相关($P<0.05$),推测这可能与闭蓄态磷的“物理屏障”作用和活性有机磷的矿化对甲烷氧化菌的营养供给有关,主要表现在氧化铁胶膜包被的闭蓄态磷会物理隔离产甲烷菌与有机碳底物的接触,降低底物扩散效率从而间接抑制产甲烷菌活性;此外活性有机磷的矿化可为甲烷氧化菌的甲烷单加氧酶合成提供磷素,从而增强甲烷氧化潜力,这与成熟期活性有机磷的降低趋势吻合。

本研究中,施磷处理在降低水稻分蘖期稻田土壤甲烷排放通量的同时显著提升了水稻产量及植株吸磷量,凸显了磷管理的“减排-增产”协同效应。然而,该效应的普遍适应性仍需进一步验证,特别是其是否依赖于长期磷匮乏形成的独特的“磷限制”生态背景,至于施磷后磷肥在土壤-微生物-植物系统

中的迁移转化路径,以及不同磷形态对甲烷排放的特异性调控机制有待后续研究予以阐明。

4 结 论

本研究结果显示,长期缺磷稻田复施磷肥可显著增加土壤全磷含量与有效磷含量($P<0.05$),虽使各形态无机磷与有机磷的绝对量普遍增加,但因全磷总量增幅更大,各形态磷占全磷的比重呈降低趋势。同时,施磷处理通过抑制磷酸酶活性和下调磷转化功能基因表达来降低微生物对磷的获取能力,驱动磷库向生物量再分配。

施磷处理在降低水稻分蘖期稻田土壤甲烷排放通量的同时大幅提升了水稻产量及植株吸磷量。不同于分蘖期产甲烷菌群落结构的稳定,施磷后土壤中甲烷氧化菌的群落结构随时间变化显著,其整体活性的增强可能是水稻分蘖期甲烷排放峰值降低的关键驱动因素。此外,甲烷的排放受闭蓄态磷和活性有机磷调控,这可能与产甲烷底物限制及甲烷氧化菌的营养供给有关。

综上,长期缺磷稻田复施磷肥可通过优化土壤磷循环过程及定向调控甲烷氧化菌群落结构协同实现水稻分蘖期稻田土壤甲烷排放通量降低与水稻增产。

参考文献:

- [1] 王淑英,樊廷录,丁宁平,等. 黄土旱塬黑垆土长期肥料试验土壤磷素和磷肥效率的演变特征[J]. 中国生态农业学报,2018,26(7):1038-1047.
- [2] 许 琛. 长期不施磷肥对太湖流域稻田甲烷排放及相关微生物的影响研究[D]. 镇江:江苏大学,2022.
- [3] Gao D D, Sheng R, Whiteley A S, et al. Effect of phosphorus amendments on rice rhizospheric methanogens and methanotrophs in a phosphorus deficient soil[J]. Geoderma, 2020, 368:114312.
- [4] Gao D D, Sheng R, Moreira-Grez B, et al. Influences of phosphorus and potassium deficiencies on the methanotrophic communities in rice rhizosphere[J]. Applied Soil Ecology, 2022, 170:104265.
- [5] 郭 龙,冯童禹,薛壮壮,等. 氮形态和磷肥对红壤玉米根际解磷微生物群落和磷酸酶活性的影响[J]. 土壤学报,2023,60(5):1493-1506.
- [6] Bi Q F, Li K J, Zheng B X, et al. Partial replacement of inorganic phosphorus (P) by organic manure reshapes phosphate mobilizing bacterial community and promotes P bioavailability in a paddy soil[J]. Science of the Total Environment, 2020, 703:134977.
- [7] Lu Y, Wassmann R, Neue H U, et al. Impact of phosphorus sup-

- ply on root exudation, aerenchyma formation and methane emission of rice plants[J]. *Biogeochemistry*, 1999, 47(2): 203-218.
- [8] Wang Y L, Lambers H. Root-released organic anions in response to low phosphorus availability: recent progress, challenges and future perspectives[J]. *Plant and Soil*, 2020, 447(1): 135-156.
- [9] Li S L, Shi J Q, Li H, et al. Application of phosphorus in red paddy soils enhances growth and yield of rice and alters CO₂ and CH₄ emission from soils in a time-and dose-dependent manner[J]. *Paddy and Water Environment*, 2023, 21(3): 401-413.
- [10] 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.
- [11] Shang Q Y, Yang X X, Gao C M, et al. Net annual global warming potential and greenhouse gas intensity in Chinese double rice-cropping systems: a 3-year field measurement in long-term fertilizer experiments[J]. *Global Change Biology*, 2011, 17(6): 2196-2210.
- [12] Xu C, Shen S S, Zhou B B, et al. Long-term non-phosphorus application increased paddy methane emission by promoting organic acid and methanogen abundance in Tai Lake region, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 864: 161146.
- [13] Zhu X C, Li J, Liang X H, et al. Long-term P fertilizer application reduced methane emissions from paddies in a double-rice system[J]. *Agronomy*, 2022, 12(9): 2166.
- [14] Rath A K, Ramakrishnan B, Rao V R, et al. Effects of rice-straw and phosphorus application on production and emission of methane from tropical rice soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2005, 168(2): 248-254.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] Zheng Y, Zhang L M, He J Z. Immediate effects of nitrogen, phosphorus, and potassium amendments on the methanotrophic activity and abundance in a Chinese paddy soil under short-term incubation experiment[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2013, 13(1): 189-196.
- [18] Sheng R, Chen A L, Zhang M M, et al. Transcriptional activities of methanogens and methanotrophs vary with methane emission flux in rice soils under chronic nutrient constraints of phosphorus and potassium[J]. *Biogeosciences*, 2016, 13(23): 6507-6518.
- [19] 顾益初, 蒋柏藩. 石灰性土壤无机磷分级的测定方法[J]. *土壤*, 1990(2): 101-102, 110.
- [20] Bowman R A, Cole C V. An exploratory method for fractionation of organic phosphorus from grassland soils[J]. *Soil Science*, 1978, 125(2): 95-101.
- [21] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [22] 张 林, 吴 宁, 吴 彦, 等. 土壤磷素形态及其分级方法研究进展[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(7): 1775-1782.
- [23] 王海龙, 张 民, 刘之广, 等. 多年定位试验条件下不同施磷水平对土壤无机磷分级的影响[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(5): 318-324.
- [24] 黄 晶. 基于几个长期定位试验的长江上、中游水稻土磷素肥力与磷肥肥效的演变规律[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2017.
- [25] 王 飞, 李清华, 林 诚, 等. 长期不同供磷水平下南方黄泥田生产力及磷组分特征[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2020, 28(7): 960-968.
- [26] 许 琛, 沈素素, 何 竹, 等. 长期施无机磷肥对黄泥土稻田土壤磷库的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2022, 41(11): 2506-2514.
- [27] 陈 凤, 王晓双, 甘国渝, 等. 长期施用磷肥对稻-油轮作土壤磷组分及微生物多样性的影响[J]. *华中农业大学学报*, 2021, 40(1): 168-178.
- [28] Sinsabaugh R L, Hill B H, Follstad Shah J J. Ecoenzymatic stoichiometry of microbial organic nutrient acquisition in soil and sediment[J]. *Nature*, 2009, 462(7274): 795-798.
- [29] McLaren T I, Smernik R J, McLaughlin M J, et al. Chapter two-the chemical nature of soil organic phosphorus: a critical review and global compilation of quantitative data[J]. *Advances in Agronomy*, 2020, 160: 51-124.
- [30] Ringeval B, Augusto L, Monod H, et al. Phosphorus in agricultural soils: drivers of its distribution at the global scale[J]. *Global Change Biology*, 2017, 23(8): 3418-3432.
- [31] Shen N C, Tan J N, Wang W J, et al. Long-term changes of methane emissions from rice cultivation during 2000-2060 in China: trends, driving factors, predictions and policy implications[J]. *Environment International*, 2024, 191: 108958.
- [32] Kong D L, Li S Q, Jin Y G, et al. Linking methane emissions to methanogenic and methanotrophic communities under different fertilization strategies in rice paddies[J]. *Geoderma*, 2019, 347: 233-243.
- [33] Roy R, Klüber H D, Conrad R. Early initiation of methane production in anoxic rice soil despite the presence of oxidants[J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 1997, 24(4): 311-320.
- [34] 冷 欢, 杨 清, 黄钢锋, 等. 氢营养型产甲烷代谢途径研究进展[J]. *微生物学报*, 2020, 60(10): 2136-2160.
- [35] Mohanty S R, Bodelier P L E, Floris V, et al. Differential effects of nitrogenous fertilizers on methane-consuming microbes in rice field and forest soils[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2006, 72(2): 1346-1354.
- [36] Nwoko N L, Enebe M C. Methane production and oxidation-a review on the *pmoA* and *mcrA* gene abundances for understanding the functional potentials of agricultural soils[J]. *Pedosphere*, 2025, 35(1): 161-181.
- [37] Ho A, Kerckhof F M, Luke C, et al. Conceptualizing functional traits and ecological characteristics of methane-oxidizing bacteria as

- life strategies [J]. *Environmental Microbiology Reports*, 2013, 5 (3):335-345.
- [38] Hao Q Q, Wang O M, Gong X Z, et al. Cadmium-induced responses and tolerance mechanisms of aerobic methanotrophs in rice paddy soils [J]. *Environmental Science & Technology*, 2025, 59 (22):11029-11038.
- [39] 王天鹤,王禹,杨浏,等. 不同肥料对苹果品质、产量和土壤质量的影响[J]. *江苏农业科学*, 2025, 53(12):168-176.
- [40] 曹少娜,张倩男,王克雄,等. 化肥减量配施微生物菌剂对青花菜产量和品质的影响[J]. *江苏农业科学*, 2025, 53(9):115-123.
- [41] 刘红杰,任德超,张素瑜,等. 不同施肥模式对冬小麦产量和土壤养分的影响[J]. *江苏农业科学*, 2025, 53(8):225-233.
- [42] 杭慧娟,陈硕,杨梦圆,等. 不同特肥配施在促进玉米生长中的效应研究[J]. *南京农业大学学报*, 2024, 47(5):880-890.
- [43] 程林,王宗亚,黄双双,等. 氨基酸增值磷肥对黄褐土磷素有效性及酶活性的影响[J]. *江苏农业学报*, 2024, 40(11):2046-2052.
- [44] 邓永翠,车荣晓,吴伊波,等. 好氧甲烷氧化菌生理生态特征及其在自然湿地中的群落多样性研究进展[J]. *生态学报*, 2015, 35(14):4579-4591.
- [45] Warttinen I, Hestnes A G, McDonald I R, et al. *Methylobacter tundripaludum* sp.nov., a methane-oxidizing bacterium from Arctic wetland soil on the Svalbard islands, Norway (78 degrees N) [J]. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 2006, 56(1):109-113.

(责任编辑:黄克玲)