

稻田土壤有机碳矿化及其激发效应对磷添加的响应

唐美玲^{1,2} 魏亮² 祝贞科² 李欢² 周萍² 葛体达² 吴金水² 王光军^{1*}

(¹中南林业科技大学生命科学与技术学院,长沙 410004; ²中国科学院亚热带农业生态研究所,亚热带农业生态过程重点实验室,长沙 410125)

摘要 采用室内模拟培养和¹³C同位素标记技术相结合的研究方法,探讨了在葡萄糖与无机氮肥共施的条件下,土壤有机碳矿化及其激发效应对外源磷添加的响应,以揭示土壤有机碳矿化的碳磷耦合调控机制。结果表明:外源磷的输入加快了CO₂的释放,但抑制了CH₄的释放;在整个土壤淹水培养期间,磷添加抑制了土壤碳矿化释放CH₄总量的53.1%,其中外源葡萄糖-¹³C矿化成¹³CH₄的总量降低了70.5%;磷添加促使通过微生物转化的葡萄糖-¹³C向易利用态碳库的分配比例增加了3.6%,显著提高土壤有机碳快库矿化速率,缩短土壤碳矿化周期。土壤培养前期,外源有机质的添加表现为短暂的负激发效应;随着葡萄糖不断矿化分解,CO₂累积激发效应(PE_{CO₂})总体上呈现先增加后下降的趋势,而CH₄累积激发效应(PE_{CH₄})稳步增加最终保持基本稳定状态;培养结束时(100 d),在磷添加条件下,PE_{CO₂}增强32.3%,PE_{CH₄}显著降低93.4%。冗余分析和Pearson分析表明,电导率、氧化还原电位和溶解有机碳对稻田土壤碳矿化的影响最为显著;速效磷与¹³CH₄、PE_{CH₄}呈极显著负相关。在外源有机质添加条件下,磷的添加能够抑制CH₄排放及其激发效应,促进土壤有机质的矿化和养分释放,提高土壤原有有机碳的可利用性,促进稻田土壤有机碳循环。

关键词 稻田土; 有机碳矿化; 磷添加; 激发效应

Responses of organic carbon mineralization and priming effect to phosphorus addition in paddy soils. TANG Mei-ling^{1,2}, WEI Liang², ZHU Zhen-ke², LI Huan², ZHOU Ping², GE Ti-da², WU Jin-shui², WANG Guang-jun^{1*} (¹College of Life Science and Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China; ²Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China).

Abstract: To understand the coupled controlling of carbon (C) and phosphorus (P) on the mineralization of soil organic carbon and amended substrates in paddy soil, we investigated the effects of P addition on the decomposition of organic carbon and its induced priming effect by using ¹³C isotope probing technique in microcosm. The results showed that P addition accelerated the release of CO₂ but inhibited the release of CH₄, leading to 53.1% reduction of total accumulated CH₄ and 70.5% reduction of the ¹³CH₄ derived from exotic glucose-¹³C. P addition altered the carbon distribution during the microbial turnover progress, with 3.6% of glucose-¹³C being transferred into the labile carbon pool, therein significantly increased potential of the mineralization rate of exogenous C. A transient negative priming effect was observed in the early stage of incubation. With time prolonging, the priming effect on CO₂ emission (PE_{CO₂}) generally increased and then decreased after a peak. The priming effect on CH₄ emission (PE_{CH₄}) kept increasing and finally fluctuated at a relative stable value until the end of the experiment (100 days). P addition increased PE_{CO₂} by 32.3% but reduced PE_{CH₄} by 93.4%. Results from the RDA and Pearson analysis showed that elec-

本文由国家自然科学基金项目(41430860,41371304)、中国科学院战略性先导科技专项(XDB15020401)和湖南省自然科学基金项目(2016JJ3132)资助。This work was supported by the National Natural Science Foundation of China(41430860,41371304), the Special Sub-Subject of Strategic Leading Science and Technology of Chinese Academy of Sciences(XDB15020401), and the Natural Science Foundation of Hunan Province(2016JJ3132).

2017-05-18 Received, 2017-12-27 Accepted.

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wanggj652@163.com

tric conductivity, oxidation-reduction potential and dissolved organic carbon significantly affected soil C mineralization. There were significantly negative correlations between available phosphorus (Olsen-P) and $^{13}\text{CH}_4$, and between Olsen-P and PE_{CH_4} . In conclusion, with the addition of exogenous organic matter, P application could reduce CH_4 emissions and inhibit its priming effect, accelerate the mineralization of SOC, probably improve the nutrient supply, and thus enhance the availability of organic C and promote C cycling in paddy soil.

Key words: paddy soil; organic carbon mineralization; phosphorus addition; priming effect.

土壤有机碳(SOC)的矿化作用是具有碳降解功能的微生物分解有机质,为作物生长提供大量养分,向外界释放 CO_2 、 CH_4 等温室气体的生物化学过程^[1].人工施肥和大气氮(N)、磷(P)沉降^[2]能够直接影响农田生态系统的养分输入和平衡.外源C、N、P等养分元素的添加短期内改变了土壤有机碳矿化的反应条件和进程,影响土壤原有有机碳的周转,即产生激发效应^[3].激发效应的持久性、大小、方向受多种因素的综合影响,其影响因子可大致分为外源物质特征和土壤特性两大类^[4].激发效应可表征外源物质刺激土壤原有有机碳矿化的作用强度,其在一定程度上可以综合反映土壤养分盈亏和平衡状况^[5].由于产生碳激发效应环境条件的异质性和试验条件的局限性,土壤有机碳矿化激发效应的产生和响应机制还不甚清楚^[6].因此,探讨土壤碳激发效应的定量化和响应机制,对于预测未来气候变化条件下土壤肥力和碳库动态具有重要意义.

磷是农作物生长发育、产量和品质形成必不可少的大量营养元素之一^[7].磷素循环是生态系统内部典型的沉积型循环,受植物自身的遗传特性和土壤生物、理化性质等因素共同控制^[8].中国亚热带地区第四纪红土母质发育而成的水稻土普遍受磷限制^[9].同时,磷极易被土壤颗粒、有机质和其他矿物质吸附固定从而丧失生物活性,难以被植物吸收利用,或随农田径流而流失^[10].土壤中磷的固定、释放等行为动态与有机碳矿化等生化过程密切相关^[11].土壤有机质不仅是磷等养分元素循环的载体和能量来源,还是植物磷素的重要来源^[12].碳、磷元素相互影响、相互耦合,其比值高低对植物的生长发育、有机质的矿化及土壤磷的累积和释放具有重要作用^[13].基于生态化学计量学原理,陆地生态系统中关键养分元素(如N、P)的供需平衡及其有效性影响着土壤碳周转动态^[14-15].大量研究表明,碳、磷元素耦合作用对土壤碳矿化的影响不可忽略^[16-18].刘洋^[19]在氮、磷添加对青藏高原亚高寒草甸有机碳影响的研究中表明,低浓度的P添加能增加SOC含

量,同时显著提高土壤碳矿化.而Keller等^[20]在美国明尼苏达州沼泽湿地的研究结果也显示,N、P肥共施有利于土壤碳矿化.

虽然已有一些不同施肥条件对SOC矿化影响的报道,但迄今为止多元素耦合对有机碳矿化特征的影响机制还不明确,尤其是关于外源磷输入对土壤有机碳矿化及其激发效应的影响鲜有研究.为此,本文选取发育良好的低磷稻田土壤,添加 ^{13}C 标记的葡萄糖作为易利用态外源碳源,施用无机氮肥为稻田基肥,通过室内模拟培养试验,揭示土壤有机碳分解矿化释放 CO_2 、 CH_4 气体的动态特征及其激发效应对外源磷添加的响应规律,以深入了解稻田土壤有机碳矿化的养分元素耦合机制,为减少温室气体的排放和调控土壤碳周转提供基础资料.

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试土壤为亚热带地区第四纪红土母质发育而成的低磷稻田土,采自中国科学院亚热带农业生态研究所桃源农业生态试验站(28°55′47.8″—28°55′48.3″N,111°26′26.8″—111°26′28.7″E)的长期施肥定位试验田.该试验站位于亚热带湿润季风气候带,海拔92.2~125.3m,日照时数1520h,年平均降雨量1440mm,年均气温16.5℃.按照五点采样法采集耕作层(0~20cm)土壤样品,剔除其中可见的植物残体、石块及土壤动物等,运回实验室,自然风干.所得部分土样分别过2和0.149mm筛,用于测定土壤基本理化性质.剩余土样过2mm筛,于25℃下淹水处理预培养14d,测定其含水量,备用.供试土壤基本理化性质如下:pH 5.20,阳离子交换量(CEC)10.1 $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$,黏粒含量14.9%,土壤有机碳(SOC)13.10 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全氮(TN)1.39 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全磷(TP)260 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效磷(Olsen-P)3.70 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

1.2 试验设计

本研究以葡萄糖(2.96% atom ^{13}C)(500

mg C · kg⁻¹土) 为外源碳源,同时以 (NH₄)₂SO₄(90 mg N · kg⁻¹土) 为稻田基肥,外源磷 NaH₂PO₄(30 mg P · kg⁻¹土) 添加作为控制变量进行室内模拟培养试验.试验设计 3 个处理.CK: 土; Glu: 土 + C、N; Glu + P: 土 + C、N、P, 以上每个处理 3 次重复.

称取 30.0 g (干土计) 预培养土样置于 500 mL 厌氧瓶中,按上述试验设计比例定量加入葡萄糖、(NH₄)₂SO₄ 或 NaH₂PO₄,充分混匀后,加入一定量的无菌水 2~3 cm 淹水处理,盖上胶塞及外盖于 25 °C 的黑暗条件下培养.在试验培养第 0.5、1、2、3、5、7、10、15、20、30、35、45、60、100 天时,利用一次性注射器采集 30 mL 气体于已抽真空的顶空瓶中待测,每个培养瓶 3 次重复.采样结束后,利用鼓气装置将厌氧瓶中剩余气体鼓出,待外界大气和瓶内气体交换完毕,重新密封并置于恒温培养室继续培养.另准备一批培养瓶,每瓶称取预处理土样相当于 100 g 的干土,在相同条件下淹水培养,在第 5、15、18、30、33、60、100 天进行破坏性采样.首先过滤掉上层水样,其次将土壤搅匀后分成两部分,取 15 g 风干保存,剩余土壤则置于 4 °C 保存,测定土壤样品中 C、N、P 等相关指标.

1.3 测定方法

土壤 pH 采用 Mettler-toledo 320 pH 计(FE20K, 瑞士) 测定,土水比为 1 : 2.5; 土壤阳离子交换量(CEC) 采用 1 mol · L⁻¹ NH₄OAc 交换-蒸馏滴定法^[21]; 土壤活性有机碳(DOC) 采用 0.05 mol · L⁻¹ K₂SO₄ 溶液提取,有机碳分析仪测定; 土壤全氮(TN) 和有机碳(SOC) 采用 C/N 分析仪(Vario MAX C/N, 德国) 测定; 土壤铵态氮(NH₄⁺-N) 采用 0.5 mol · L⁻¹ K₂SO₄ 溶液提取,流动注射仪(Fiastar 5000, 瑞典福斯) 测定; 土壤全磷(TP) 采用氢氧化钠熔融法并用钼锑抗比色-紫外分光光度计(UV-2450, 日本) 测定^[21]; 土壤速效磷(Olsen-P) 采用 0.5 mol · L⁻¹ NaHCO₃ 溶液浸提,钼锑抗比色-紫外分光光度计测定^[21]; CO₂、CH₄ 用气相色谱仪直接测定; ¹³CO₂、¹³CH₄ 均用稳定性同位素质谱仪直接测定.

1.4 数据处理

添加¹³C-葡萄糖于稻田土壤中培养,土壤原有碳和外加葡萄糖矿化作用产生 CO₂ 气体,算式为:

$$C_{\text{SOM}} = C_{\text{T}} \times (\delta^{13}\text{CO}_{2,\text{CT}} - \delta^{13}\text{CO}_{2,\text{SUB}}) / (\delta^{13}\text{CO}_{2,\text{SOM}} - \delta^{13}\text{CO}_{2,\text{SUB}}) \quad (1)$$

$$C_{\text{SUB}} = C_{\text{T}} - C_{\text{SOM}} \quad (2)$$

式中: C_T 为各处理的 CO₂ 总释放量 (mg C · kg⁻¹);

C_{SOM} 为来源于 SOM 的 CO₂ 量; C_{SUB} 为来源于外加碳源(¹³C-葡萄糖)的 CO₂ 量; δ¹³CO_{2,CT} 为 CO₂ 的 δ¹³C 值; δ¹³CO_{2,SOM} 为 SOM 的 δ¹³C 值; δ¹³CO_{2,SUB} 为外加碳源(¹³C-葡萄糖)的 δ¹³C 值.

土壤原有碳和外加葡萄糖矿化作用的 CH₄ 产生量计算原理同上.

在土壤培养期间,葡萄糖-C 累积矿化率(S_c %) 由每个采样点累积释放的¹³CO₂ 和¹³CH₄ 的¹³C 总量与加入土壤中葡萄糖-¹³C 总量的百分比表示; 而土壤中残留葡萄糖-¹³C 的量为 S, 其算式为: S = 1 - S_c. 它的动态变化符合一级动力学双库模型^[14].

土壤中易被微生物迅速分解利用的那部分活性碳为快库(a₁), 而暂时固定于微生物体内以及被土壤矿物或团聚体稳定的相对难以利用的惰性碳为慢库(a₂).

$$S = a_1 \times e^{-K_1 t} + a_2 \times e^{-K_2 t} \quad (3)$$

式中: a₁ 和 a₂ 分别为快库和慢库的比例(%); K₁ 和 K₂ 分别为快库和慢库的矿化速率(d⁻¹).

土壤有机碳的半衰期(T_{1/2}, d) 算式为:

$$T_{1/2} = \ln 2 / K_1 \quad (4)$$

土壤快库的平均滞留时间(MRT, d) 的算式为:

$$MRT = 1 / K_1 \quad (5)$$

外源物质的添加引起土壤原有有机质短期内矿化发生改变的现象称为激发效应(PE), 促进土壤原有有机质的分解为正激发, 反之为负激发. 其算式为:

$$PE = C_{\text{SOM_AME}} - C_{\text{SOM_CON}} \quad (6)$$

式中: C_{SOM_AME} 为不同养分元素添加处理中来源于 SOM 的 CO₂(CH₄) 量; C_{SOM_CON} 为对照中来源于 SOM 的 CO₂(CH₄) 量.

使用 Microsoft Excel 2007 处理数据, 采用 Origin 8.5 绘图, 采用 SigmaPlot 12.5 进行双库模型拟合. 运用 SPSS 13.0 软件采用独立样本 T 检验进行不同处理间显著性分析, 同时采用 Pearson 分析法进行各因子间相关性分析. 最后, 运用 Canoco 5.0 以¹³CO₂、¹³CH₄ 和 PE_{CO₂}、PE_{CH₄} 为物种因子做冗余分析(RDA). 表中数据是平均值 ± 标准差.

2 结果与分析

2.1 CO₂ 和 CH₄ 累积释放量对磷添加的响应

由图 1 可以看出, 在土壤碳矿化模拟试验中, 外源物质的添加促进了 CO₂ 的释放. 随着土样培养时

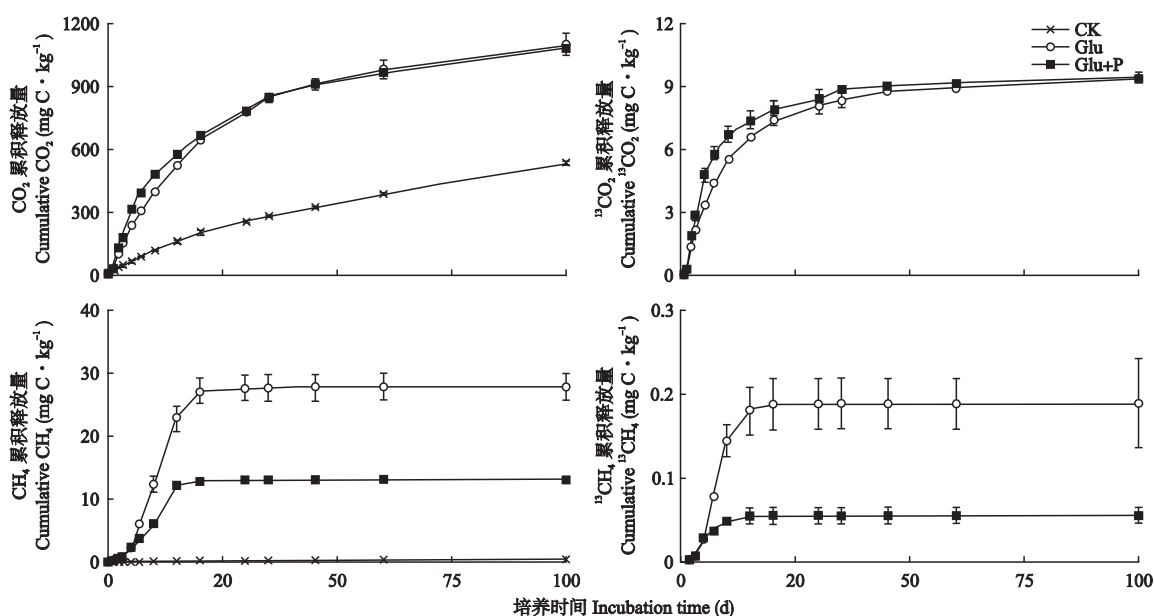


图1 磷添加对碳矿化释放 CO_2 、 $^{13}\text{CO}_2$ 、 CH_4 和 $^{13}\text{CH}_4$ 的影响

Fig.1 Effects of adding phosphorus on cumulative CO_2 , $^{13}\text{CO}_2$, CH_4 and $^{13}\text{CH}_4$ by carbon mineralization.

CK: 土壤 Soil; Glu: 土壤+C、N Soil+C, N; Glu+P: 土壤+C、N、P Soil+C, N, P. 下同 The same below.

间的推移,土壤有机碳不断矿化, CO_2 累积释放量逐渐增加,随后趋于平缓.与对照相比,养分元素的添加促进了 CO_2 释放(1.91~2.04倍).添加磷素对稻田土壤有机碳矿化释放 CO_2 总量基本没有影响,但在土壤培养前期(0~30 d),相对加快了 CO_2 释放.添加的外源葡萄糖能够快速矿化生成 $^{13}\text{CO}_2$.在0~10 d,葡萄糖分解迅速, $^{13}\text{CO}_2$ 的累积释放量急剧上升;在10~30 d,葡萄糖的分解速率减慢;在30~100 d,葡萄糖已基本矿化完全, $^{13}\text{CO}_2$ 的累积释放量不再增加.在0~60 d培养期间,磷素的添加使易利用态葡萄糖- ^{13}C 产生 CO_2 的速率加快.

在无外源物料干扰条件下, CH_4 释放极少且趋于稳定,其变化增长范围为0.02~0.36 $\text{mg C} \cdot \text{kg}^{-1}$.外源葡萄糖和N添加使培养前期 CH_4 累积释放量快速增长,100 d时, CH_4 的累积释放量比对照提高了75.8倍.土壤有机碳矿化释放 CH_4 能力受土壤磷含量的影响,外源磷添加减少了53.1%的 CH_4 释放.养分元素的添加刺激外源葡萄糖-C经微生物厌氧作用逐渐矿化,并释放出少量 $^{13}\text{CH}_4$ 气体,培养至20

d后基本无 $^{13}\text{CH}_4$ 产生.在整个土壤淹水培养期间,P的输入使 ^{13}C -葡萄糖矿化释放的 $^{13}\text{CH}_4$ 总量降低了70.5%,即下降了0.13 $\text{mg C} \cdot \text{kg}^{-1}$.

2.2 外源葡萄糖- ^{13}C 矿化的双库模型特征

^{13}C 标记的葡萄糖在微生物作用下分解矿化,并释放一定量的 $^{13}\text{CO}_2$ 、 $^{13}\text{CH}_4$ 气体,其碳矿化动态符合一级动力学双库模型.由表1可知,与对照相比,磷添加使得慢库中3.6%的惰性碳转移为快库的易利用态碳,同时显著加快了易利用态碳的矿化速率.加磷处理的快速转化碳库的半衰期及平均滞留时间小于不添加磷素处理,且两者均具有显著差异.

2.3 稻田土壤有机碳矿化的磷激发效应

在葡萄糖矿化分解过程中,其 CO_2 、 CH_4 累积激发效应总体上表现为正激发(图2).0~3 d,两处理均表现出短暂的 CO_2 负激发,随后进入 CO_2 正激发效应阶段,激发效应强度大体上呈现先增加后降低的变化趋势,最大值出现在第45天;在矿化后期磷输入使 CO_2 激发效应的减缓趋势明显降低,在100 d土壤培养试验结束时,加磷处理提高了 CO_2 激发

表1 外源葡萄糖- ^{13}C 的双库转化特征

Table 1 Double pools transformation properties of exogenous glucose- ^{13}C

处理 Treatment	快库 a_1 (%)	快库矿化速率 K_1 (d^{-1})	慢库 a_2 (%)	慢库矿化速率 K_2 (d^{-1})	半衰期 $T_{1/2}$ (d)	平均滞留时间 MRT (d)
Glu	57.7±2.5a	0.123±0.007b	42.3±2.5a	0.002±0.000a	5.64a	8.13a
Glu+P	61.3±0.5a	0.184±0.006a	38.7±0.5a	0.002±0.000a	3.77b	5.43b

同列不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$) Data with different letters in the same column mean significant difference among treatments at 0.05 level.

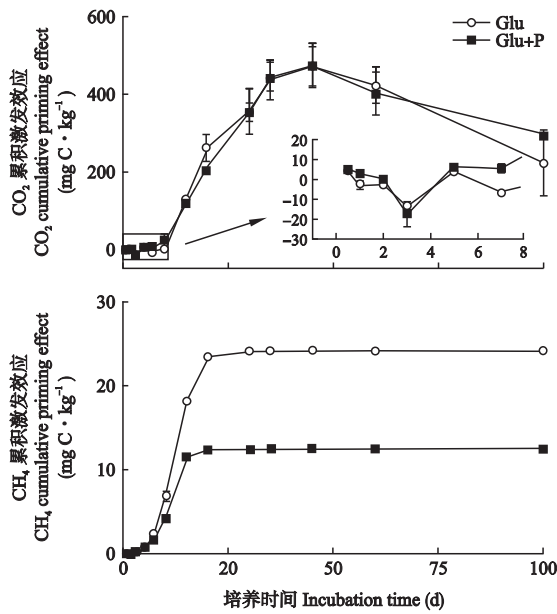


图2 磷添加对碳矿化的 CO₂、CH₄ 累积的激发效应
Fig.2 CO₂, CH₄ cumulative priming effect of carbon mineralization in response to phosphorus addition.

效应 增幅 32.3%. 0~30 d, CH₄ 正激发效应极速增加 随后基本保持稳定状态; 在 100 d 磷添加抑制了 CH₄ 激发效应 降幅 93.4%. CO₂ 激发效应变化趋势与总激发效应趋势相同, CO₂ 激发效应平均占总激发效应的 93.1%. 总体上 磷添加使总激发效应增加了 24.4% (总激发效应图未显示).

2.4 稻田土壤环境因子与碳矿化的相关性

由表 2 可知, 土壤环境因子之间, Eh 与 EC、DOC 分别呈极显著正相关, EC 与 DOC 呈极显著正相关, 而 pH 与 DOC 不具有相关关系, 与 NH₄⁺-N 呈极显著正相关. 土壤环境因子与碳矿化相关指标之间, Eh 与 ¹³CO₂、PE_{CO₂}、PE_{CH₄} 均呈极显著负相关, 但与 ¹³CH₄ 呈显著负相关. pH 与 ¹³CH₄、PE_{CH₄} 呈极显著

正相关, 与 PE_{CO₂} 呈显著正相关. EC 与 ¹³CO₂、¹³CH₄、PE_{CO₂}、PE_{CH₄} 均呈极显著负相关, 同时 DOC 与 ¹³CO₂、¹³CH₄、PE_{CO₂}、PE_{CH₄} 也均呈极显著负相关, Olsen-P 与 ¹³CH₄、PE_{CH₄} 呈极显著负相关. 碳矿化相关指标之间, ¹³CO₂、¹³CH₄ 与 PE_{CO₂}、PE_{CH₄} 之间两两相互呈极显著正相关关系.

2.5 稻田土壤环境因子与碳矿化的冗余分析

采用 RDA 分析方法, 将稻田土壤碳矿化特征指标 (¹³CO₂、¹³CH₄; PE_{CO₂}、PE_{CH₄}) 作为物种, 将 6 项土壤理化指标作为环境因素, 对 2 个变量组进行分析. 经 Canoco 5.0 的 RDA 排序分析表明, 图 3A 的第 1 轴能够解释所有信息的 80.3%, 第 2 轴能解释 9.3%, 累积解释信息量达 89.6%; 而图 3B 的累积解释信息量达 87.3%, 第 1 轴能够解释所有信息的 85.4%. 由此可知, 第 1 轴主要决定土壤碳矿化和土壤理化因子的关系. 土壤理化因子 EC 的连线长度最长, 同时第 1 排序轴上的投影长度最长, Eh、DOC 次之, Olsen-P 最短. 从图 3 可以看出, pH 与 ¹³CH₄、PE_{CH₄} 呈正相关; Olsen-P 与 ¹³CH₄、PE_{CH₄} 呈负相关; Eh、EC、DOC 均与 ¹³CO₂、¹³CH₄、PE_{CO₂}、PE_{CH₄} 两两之间呈负相关关系. 此结果与皮尔森相关性分析相互印证.

3 讨 论

3.1 磷添加对稻田土壤碳矿化的影响

磷素是稻田生态系统中土壤有机碳矿化最常见的关键性限制因素^[22]. 磷元素的添加改变了有机碳矿化的反应条件和进程, 土壤有机碳的矿化速率和累积矿化量均随着外源磷输入量的增加而增大^[17]. Fisk 等^[23]通过室内培养试验表明, 外源磷的输入能够促进土壤有机碳的矿化, 与前人研究结果一致. 本研究中磷添加加快了有机碳的矿化速率. 该现象

表 2 土壤环境因子与碳矿化指标的相关性分析

Table 2 Correlation analysis between soil environmental factors and carbon mineralization indexes (n=42)

	土壤环境因子 Soil environmental factor						碳矿化指标 Carbon mineralization index		
	氧化还原电位 Eh	pH	电导率 EC	溶解有机碳 DOC	铵态氮 NH ₄ ⁺ -N	速效磷 Olsen-P	¹³ CO ₂	¹³ CH ₄	CO ₂ 累积激发 效应 PE _{CO₂}
pH	-0.13								
EC	0.88**	-0.15							
DOC	0.85**	-0.13	0.93**						
NH ₄ ⁺ -N	-0.21	0.43**	-0.20	-0.09					
Olsen-P	-0.22	-0.18	-0.03	-0.13	0.04				
¹³ CO ₂	-0.92**	0.10	-0.94**	-0.89**	0.27	0.14			
¹³ CH ₄	-0.31*	0.46**	-0.48**	-0.41**	0.19	-0.66**	0.44**		
PE _{CO₂}	-0.86**	0.34*	-0.80**	-0.72**	0.27	-0.02	0.84**	0.49**	
PE _{CH₄}	-0.51**	0.46**	-0.65**	-0.57**	0.28	-0.50**	0.63**	0.96**	0.65**

* P<0.05; ** P<0.01.

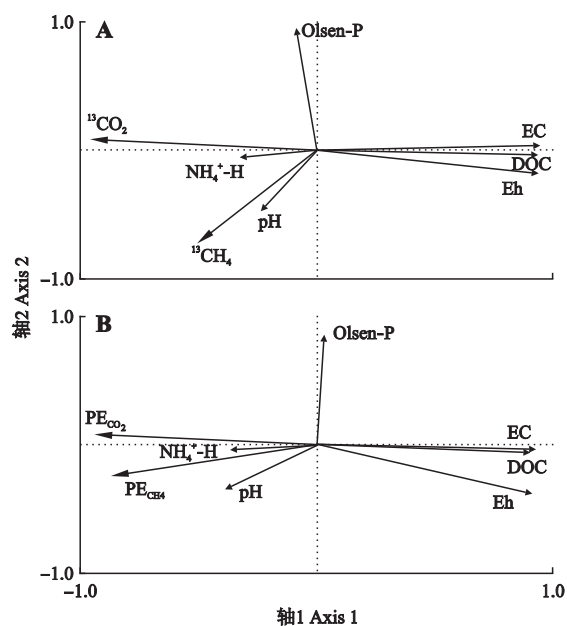


图3 土壤环境因子与碳矿化关系的冗余分析
Fig.3 Redundancy analysis of the relationship between soil environmental factors and carbon mineralization.

可能由两方面原因导致:其一,磷素的添加促使微生物增加易利用态碳库的分配比例,显著提高快库的矿化速率,加快葡萄糖的转化;其二,磷素诱导具有降解复杂有机碳化合物功能的微生物菌落增加,且其活性增强,从而降低DOC分子量、芳香度和腐殖化程度,促进活性有机碳累积,加快土壤碳周转^[18-24]。皮尔森相关性分析中,Olsen-P与¹³CH₄释放量具有极显著负相关关系,与其他土壤理化指标不相关;同时,在RDA分析中,Olsen-P对¹³CO₂、¹³CH₄生成的解释量小于9.3%,EC、Eh、DOC对外源葡萄糖矿化释放¹³CO₂、¹³CH₄的影响程度均较大,表明土壤磷添加间接地影响土壤碳矿化动态。这可能是在磷添加的条件下,土壤微生物活性增强,促进有机碳矿化和CO₂、CH₄累积释放量的增多^[25]。该过程消耗了大量氧气和游离态养分离子,导致Eh和EC下降;由于本文土壤为铁、锰含量较高的红壤,低Eh下高价铁、锰被还原,带来pH的上升,进而反馈调节土壤微生物对有机碳的矿化过程。

土壤微生物有氧呼吸分解有机质释放大量的CO₂,而CH₄是微生物厌氧分解有机质的最终产物。CH₄可与CO₂相互转化,其排放取决于土壤中甲烷氧化菌和产甲烷古菌活动的动态平衡^[26]。土壤碳矿化释放CO₂和CH₄气体的动态过程取决于C和N、P等养分元素间的耦合平衡关系^[27]。本研究发现,磷添加加快了土壤有机碳矿化释放CO₂,但抑制了

CH₄的释放。这可能与磷可利用性对甲烷氧化菌和产甲烷菌的影响有关。由于古菌在富营养条件下竞争力较低,磷的输入能够降低古菌与细菌的丰度比,抑制产甲烷古菌活性,使有机碳矿化产物中CH₄所占比例下降^[28]。CH₄氧化活性的增强可能是施磷减少CH₄释放的另一原因。I型甲烷氧化菌是稻田生态系统中实现CH₄减排的主要功能微生物^[29],其通过戊糖磷酸途径(RuMP pathway)实现CH₄同化,对磷的需求量大^[30]。Zheng等^[31]发现,施磷能显著提高甲烷氧化功能基因*pmoA*的丰度,促进CH₄氧化。

3.2 葡萄糖激发效应对磷添加的响应

作为土壤营养动态过程中的一项综合指标,激发效应反映了在某一特定的耕作栽培系统内土壤养分元素的盈亏和平衡状况^[5]。土壤碳矿化的激发效应主要与外源物料的种类和数量、土壤理化性质以及微生物的活性和群落组成有关^[32]。本研究采用长期定位试验田的低P水稻土(速效磷含量为3.7 mg·kg⁻¹),以葡萄糖与无机氮肥共施为养分背景,探讨土壤有机碳矿化对磷添加的响应机制。培养前期,外源葡萄糖添加对土壤原有有机碳矿化表现出短暂的负激发效应,原因可能是在养分充足条件下,微生物倾向于选择“低成本”碳源,促使微生物直接利用易利用态碳矿化,保护了原有有机质的积累。葡萄糖添加促进了土壤微生物的生长和胞外酶的释放,大量胞外酶的累积引发了对土壤原有有机质的共代谢,从而表现出逐渐增强的正激发效应。根据“养分限制理论”,养分元素缺乏时,微生物通过强化土壤有机碳矿化释放养分,从而带来正激发效应的增强。在培养试验前60 d,施磷整体削弱了葡萄糖的激发效应,可能是由于磷可利用性的提高抑制了磷酸酶活性,减少了含磷有机物的矿化。随着土壤碳库中活性组分越来越少,土壤微生物呈“半饥饿状态”,微生物丰度和相关酶活性下降,土壤有机碳矿化作用减弱,CO₂正激发效应逐渐减小。培养末期,由于微生物的生长消耗,施磷和不施磷土壤的养分可利用性均大幅度降低,养分限制不再是导致二者激发效应差异的主导因素,磷添加下更强的微生物活性可能是此时激发效应较高的原因^[33]。

在适宜的环境条件下,难分解的组分经土壤微生物作用可向易分解组分转化^[34],并被产甲烷古菌利用分解产生CH₄^[35]。在土壤培养试验前期,外源养分元素的添加促进土壤中活性有机碳累积,刺激CH₄正激发效应极速增强;随着易利用碳的消耗殆尽,微生物逐渐分解难降解的有机物,PE_{CH₄}稳步增

强,最终保持基本稳定状态。这可能是由于产甲烷古菌对环境适应性较强,且反应底物来源充足的关系。外源磷的添加,使土壤微生物活动受 P 限制得到缓解,降低了产甲烷古菌的丰度^[36],抑制了 CH₄ 的激发效应。原因可能是营养元素相对丰富的土壤对激发效应的响应比营养元素相对缺乏的土壤小。与本文结论相似,廖畅等^[37]也发现,相对于养分元素充足的表层和中层土,外源碳对亚热带森林深层土壤碳激发效应的影响更强。本研究和廖畅等^[37]的研究均为添加易利用态碳源葡萄糖,而添加不同外源有机质类型可导致不同的碳激发效应,故本研究结论的适用范围尚不清楚,需要进一步的研究论证。

4 结 论

添加磷素促进稻田土壤有机碳矿化释放 CO₂, 显著抑制 CH₄ 的释放;同时,磷输入促使微生物增加葡萄糖-¹³C 向易利用态碳库的分配比例,显著提高土壤有机碳快库矿化速率,缩短土壤碳矿化周期。

土壤培养前期,外源物料的添加表现为短暂的负激发效应;随着葡萄糖不断矿化分解,PE_{CO₂}总体上呈现先增加后下降的趋势,而 PE_{CH₄}稳步增加随后保持基本稳定状态;在磷添加条件下,PE_{CO₂}增强 32.3%,PE_{CH₄}显著降低 93.4%。

RDA 和 Pearson 分析表明,EC、Eh 和 DOC 对稻田土壤碳矿化的影响最显著;Olsen-P 与¹³CH₄、PE_{CH₄}呈极显著负相关关系,可间接影响低磷土壤碳矿化动态。

总体上,在外源有机质添加条件下,磷的添加能够促进低磷土壤有机碳矿化,提高有机碳快库的矿化速率,显著降低 CH₄ 排放,促进稻田土壤有机碳周转;同时,磷添加缓解土壤微生物的磷限制作用,提高土壤原有有机碳的可利用性,显著抑制 CH₄ 累积激发效应。土壤碳矿化释放的 CH₄ 相对于 CO₂ 更容易受到外源磷输入的影响。

参考文献

- [1] Lao X-R (劳秀荣), Wu Z-Y (吴子一), Gao Y-C (高燕春). Effect of long-term returning straw to soil fertility. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2002, **18**(2): 49-52 (in Chinese)
- [2] Sun L-Y (孙丽英). Atmospheric Nitrogen and Phosphorus Deposition in Nanjing and Effects of Simulated Nitrogen Deposition on Gaseous Emissions of Soils. PhD Thesis. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2014 (in Chinese)
- [3] Kuzyakov Y, Friedel JK, Stahr K. Review of mechanisms and quantification of priming effects. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, **32**: 1485-1498
- [4] Wang H, Xu WH, Hu GQ, et al. The priming effect of soluble carbon inputs in organic and mineral soils from a temperate forest. *Oecologia*, 2015, **178**: 1239-1250
- [5] Zhu P-L (朱培立), Huang D-M (黄东迈). Discussion on priming effect of soil nitrogen. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 1994, **27**(4): 45-52 (in Chinese)
- [6] Tian Y-W (田耀武), Wang N (王宁), Liu J (刘晶). The priming effect of soil organic carbon induced by mustard. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences* (核农学报), 2016, **30**(12): 2418-2424 (in Chinese)
- [7] Abel S, Ticconi CA, Delatorre CA. Phosphate sensing in higher plants. *Physiologia Plantarum*, 2010, **115**: 1-8
- [8] Zhao Q (赵琼), Zeng D-H (曾德慧). Phosphorus cycling in terrestrial ecosystems and its controlling factors. *Acta Phytoecologica Sinica* (植物生态学报), 2005, **29**(1): 153-163 (in Chinese)
- [9] Wang Y-Z (王永状), Chen X (陈欣), Shi Y (史奕). Phosphorus availability in cropland soils of China and related affecting factors. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2013, **24**(1): 260-268 (in Chinese)
- [10] Zhou QX, Zhu YM. Potential pollution and recommended critical levels of phosphorus in paddy soils of the southern Lake Tai area, China. *Geoderma*, 2003, **115**: 45-54
- [11] Turner BL, Lambers H, Condon LM, et al. Soil microbial biomass and the fate of phosphorus during long-term ecosystem development. *Plant and Soil*, 2013, **367**: 225-234
- [12] Huang M (黄敏). Variation Characteristics and Driving Factors of Soil Organic Carbon and Phosphorus in Hilly Regions of Subtropical China. PhD Thesis. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2005 (in Chinese)
- [13] Wang J-L (王建林), Zhong Z-M (钟志明), Wang Z-H (王忠红), et al. Soil C/P distribution characteristics of alpine steppe ecosystems in the Qinghai-Tibetan Plateau. *Acta Pratacultura Sinica* (草业学报), 2014, **23**(2): 9-19 (in Chinese)
- [14] Creamer CA, Jones DL, Baldock JA, et al. Stoichiometric controls upon low molecular weight carbon decomposition. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, **79**: 50-56
- [15] Sinsabaugh RL, Manzoni S, Moorhead DL, et al. Carbon use efficiency of microbial communities: Stoichiometry, methodology and modeling. *Ecology Letters*, 2013, **16**: 930-939
- [16] Chen X-Y (陈小云), Guo J-H (郭菊花), Liu M-Q (刘满强), et al. Effects of fertilization on lability and recalcitrancy of organic carbon of red paddy soils. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2011, **48**(1): 125-131 (in Chinese)
- [17] Liu D-Y (刘德燕), Song C-C (宋长春). Effects of

- phosphorus enrichment on mineralization of organic and contents of dissolved carbon in a freshwater marsh soil. *China Environmental Science* (中国环境科学), 2008, **28**(9): 769-774 (in Chinese)
- [18] Li X (李霞), Tian G-M (田光明), Zhu J (朱军), *et al.* Effects of rate of phosphorus fertilizer on organic carbon mineralization and bacterial community diversity in paddy soil. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2014, **51**(2): 360-372 (in Chinese)
- [19] Liu Y (刘洋). Effects of Nitrogen and Phosphorus Addition on Soil Organic Carbon in Sub-alpine Meadows of Qinghai-Tibetan Plateau. Master Thesis. Lanzhou: Lanzhou University, 2014 (in Chinese)
- [20] Keller JK, Bridgham SD, Chapin CT, *et al.* Limited effects of six years of fertilization on carbon mineralization dynamics in a Minnesota fen. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, **37**: 1197-1204
- [21] Bao S-D (鲍士旦). Soil and Agricultural Chemical Analysis. Beijing: China Agriculture Press, 2000 (in Chinese)
- [22] Spohn M, Kuzyakov Y. Phosphorus mineralization can be driven by microbial need for carbon. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, **61**: 69-75
- [23] 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. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, **81**: 212-218
- [24] Tan H, Barret M, Mooij MJ, *et al.* Long-term phosphorus fertilisation increased the diversity of the total bacterial community and the *phod* phosphorus mineraliser group in pasture soils. *Biology and Fertility of Soils*, 2013, **49**: 661-672
- [25] Li Z-Q (李增强), Zhao B-Z (赵炳梓), Zhang J-B (张佳宝). Application of ¹³C-labeled PLFA analysis in soil microbial ecology studies. *Chinese Journal of Eco-Agriculture* (中国生态农业学报), 2016, **24**(4): 470-477 (in Chinese)
- [26] Zhang J-C (张坚超), Xu Y-Q (徐锦钦), Lu Y-H (陆雅海). Microbial mechanisms of methane production and oxidation in terrestrial ecosystems. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2015, **35**(20): 6592-6603 (in Chinese)
- [27] Tang Z-Z (汤珍珠), Zhu Z-K (祝贞科), Shen B-J (沈冰洁), *et al.* Effect of stoichiometric ratio of soil nutrients on mineralization and priming effect of glucose in paddy soil. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2017, **54**(1): 246-254 (in Chinese)
- [28] Nemergut DR, Townsend AR, Sattin SR, *et al.* The effect of chronic nitrogen fertilization on alpine tundra soil microbial communities: Implication for carbon and nitrogen cycling. *Environmental Microbiology*, 2010, **10**: 3093-3105
- [29] Liu JN, Xu HS, Jiang Y, *et al.* Methane emissions and microbial communities as influenced by dual cropping of *Azolla* along with early rice. *Scientific Reports*, 2017, **7**: 40635
- [30] Han B (韩冰), Su T (苏涛), Li X (李信), *et al.* Research progresses of methanotrophs and methane monooxygenases. *Chinese Journal of Biotechnology* (生物工程学报), 2008, **24**(9): 1511-1519 (in Chinese)
- [31] Zheng Y, Zhang LM, He JZ. Immediate effects of nitrogen, phosphorus, and potassium amendments on the methanotrophic activity and abundance in a Chinese paddy soil under short-term incubation experiment. *Journal of Soils and Sediments*, 2013, **13**: 189-196
- [32] Xue J-Y (薛晶月), Zhang H-X (张洪轩), Quan Q (全权), *et al.* Effect of land-use type on soil carbon mineralization and its priming effect on red soils in the mid-subtropics of China. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology* (应用与环境生物学报), 2014, **20**(3): 516-522 (in Chinese)
- [33] Spohn M, Chodak M. Microbial respiration per unit biomass increases with carbon-to-nutrient ratios in forest soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, **81**: 128-133
- [34] Wu J-M (吴家梅), Ji X-H (纪雄辉), Huo L-J (霍莲杰), *et al.* Fraction changes of oxidation organic carbon in paddy soil and its correlation with CH₄ emission fluxes. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2013, **33**(15): 4599-4607 (in Chinese)
- [35] Tang H (汤宏), Shen J-L (沈健林), Liu J-Y (刘杰云), *et al.* Effects of rice straw fraction on methane and carbon dioxide emission from rice paddy soil. *Ecology and Environmental Sciences* (生态环境学报), 2016, **25**(7): 1125-1133 (in Chinese)
- [36] Li X (李霞). Soil Phosphorus Eco-stoichiometric Behavior Integrated with Carbon and Nitrogen Sequestration in Paddy Field: A Mesocosm Investigation. PhD Thesis. Hangzhou: Zhejiang University, 2014 (in Chinese)
- [37] Liao C (廖畅), Tian Q-X (田秋香), Wang D-Y (汪东亚), *et al.* Effects of labile carbon addition on organic carbon mineralization and microbial growth strategies in subtropical forest soils. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2016, **27**(9): 2848-2854 (in Chinese)

作者简介 唐美玲,女,1993年生,硕士研究生.主要从事稻田土壤碳循环的研究. E-mail: 3193067323@qq.com

责任编辑 张凤丽

唐美玲,魏亮,祝贞科,等.稻田土壤有机碳矿化及其激发效应对磷添加的响应.应用生态学报,2018,29(3):857-864

Tang M-L, Wei L, Zhu Z-K, *et al.* Responses of organic carbon mineralization and priming effect to phosphorus addition in paddy soils. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, **29**(3): 857-864 (in Chinese)