

陈金霞, 但建国. 外源氮、磷添加对琼北荔枝园土壤CH<sub>4</sub>氧化能力的影响[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(3): 714-720.

CHEN Jin-xia, DAN Jian-guo. Effects of exogenous nitrogen and phosphorus on methane oxidation in litchi orchard soils in northern Hainan Province, China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(3): 714-720.

## 外源氮、磷添加对琼北荔枝园土壤CH<sub>4</sub>氧化能力的影响

陈金霞, 但建国\*

(海南大学热带农林学院, 海口 570228)

**摘要:**为明确氮(N)和磷(P)的输入对土壤氧化吸收大气甲烷(CH<sub>4</sub>)的影响,通过室内培养实验,研究了外源N、P添加对琼北3种荔枝园土壤CH<sub>4</sub>氧化速率的短期影响。结果表明:不同浓度处理的外源N[(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>]添加对3种荔枝园土壤(暗红湿润铁铝土,用T2表示;筒育湿润铁铝土,用T3表示;湿润玻璃火山灰土,用H3表示)CH<sub>4</sub>氧化速率均产生抑制作用( $P < 0.05$ ),较对照组平均抑制率分别达到29.93%、36.28%和24.80%。不同浓度外源P(KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)添加对3种荔枝园土壤CH<sub>4</sub>氧化具有促进作用,其中对T2、T3土壤CH<sub>4</sub>氧化具有明显的促进作用,H3呈现先促进后抑制的变化趋势。外源N、P同时添加对3种土壤CH<sub>4</sub>氧化均起到了促进作用,与单独添加外源N相比,N、P同时添加缓解了外源N对3种荔枝园土壤CH<sub>4</sub>氧化能力的抑制作用,其中T2土壤的缓解作用最高,这可能与土壤的速效磷背景值较低有关。因此,在荔枝园土壤的施肥管理中应根据土壤类型合理增施N、P肥,以促使土壤对大气CH<sub>4</sub>的氧化能力维持在较高水平上。

**关键词:**甲烷氧化;氮;磷;荔枝园土壤

中图分类号:S153.6 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2019)03-0714-07 doi:10.11654/jaes.2018-0277

### Effects of exogenous nitrogen and phosphorus on methane oxidation in litchi orchard soils in northern Hainan Province, China

CHEN Jin-xia, DAN Jian-guo\*

(Institute of Tropical Agriculture and Forestry, Hainan University, Haikou 570228, China)

**Abstract:** Nitrogen (N) and phosphorus (P) inputs are important factors affecting atmospheric methane (CH<sub>4</sub>) consumption by soils. Using laboratory incubation techniques, the short-term effects of N and P addition on soil CH<sub>4</sub> oxidation in different types of litchi orchard soils in northern Hainan Island were determined in July 2016. Further, the soil samples collected from three litchi orchards in northern Hainan Island were incubated at 26 °C with gravimetric water content of 15% and an initial CH<sub>4</sub> concentration of approximately 15 μL·L<sup>-1</sup> to determine the effects of exogenous N and P on methane oxidation in different types of soils. The results showed that CH<sub>4</sub> oxidation in all litchi orchard soils [Rhodi-Udic Ferralosols (T2), Hapli-Udic Ferralosols (T3), and Udi-Vitric Andosols (H3)] decreased significantly after the exogenous addition of N[(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>]. Compared with that of the control treatment, CH<sub>4</sub> oxidation rate in different types of soils decreased by 29.93%, 36.28%, and 24.80%, respectively. Methane oxidation in litchi garden soils (T2 and T3) significantly increased after the addition of exogenous P (KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>); CH<sub>4</sub> oxidation rates initially increased with incubation time but then decreased in H3 soils. The addition of N and P can stimulate CH<sub>4</sub> oxidation in three litchi soils. N and P were added to mitigate the inhibitory effect of exogenous N on the CH<sub>4</sub> oxidation capacity of three litchi orchard soils, and the relieving effect in T2 soil was higher, which might be attributed to the background value of available P in soil. Therefore, the selection of appropriate N and P fertilizers and the improvement of organic matter status of soils are recommended to maintain high CH<sub>4</sub> oxidation rates in upland soils.

**Keywords:** methane oxidation; nitrogen; phosphorus; litchi orchard soil

收稿日期:2018-03-03 录用日期:2018-07-23

作者简介:陈金霞(1992—),女,山西运城人,硕士研究生,研究方向为环境生态学。E-mail:447956147@qq.com

\*通信作者:但建国 E-mail: danwolke@foxmail.com

基金项目:国家自然科学基金项目(31260118)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(31260118)

甲烷(CH<sub>4</sub>)是大气中的一种温室气体,对全球变暖贡献约占17%,仅次于CO<sub>2</sub>,具有比CO<sub>2</sub>更高的年增长速率及更强的红外吸收能力。以百年时间为尺度,一分子CH<sub>4</sub>的增温潜势为CO<sub>2</sub>的26倍<sup>[1-2]</sup>。过去200年来,人类活动导致大气CH<sub>4</sub>浓度增加,至2016年大气CH<sub>4</sub>浓度已上升到1.85 μL·L<sup>-1</sup>,是工业革命前的2.57倍<sup>[3]</sup>。

土壤是大气CH<sub>4</sub>主要的陆地汇,在全球碳循环中起着不可忽视的作用。不同的生物群落环境氧化吸收CH<sub>4</sub>的能力是不同的。碳(C)、氮(N)、磷(P)是重要的生长元素,无论是作为结构性元素还是养分元素,在探究生物系统物质和能量循环以及多元平衡过程中都发挥着重要作用,并对该过程具有良好的指示作用<sup>[4]</sup>。目前,关于外源氮添加对于土壤CH<sub>4</sub>氧化的研究已有很多报道,大致分为促进、抑制亦或无显著影响3种情况。Maljanen等<sup>[5]</sup>研究表明大气N沉降明显促进了土壤CH<sub>4</sub>吸收与氧化,产生这种现象的原因可能是在土壤N元素含量较低时,在土壤N素不足以为CH<sub>4</sub>氧化菌生长提供所需N源条件下,为了维持其稳定的CH<sub>4</sub>氧化能力,此时若在土壤中加入适量N则可适当减缓因N源缺乏而对CH<sub>4</sub>氧化菌生长的限制,进一步刺激CH<sub>4</sub>氧化菌的活性,促进CH<sub>4</sub>氧化菌进一步生长繁殖,加快土壤CH<sub>4</sub>氧化速率<sup>[6]</sup>。也有研究表明外源N的添加会抑制土壤CH<sub>4</sub>氧化<sup>[7]</sup>,可能是因为外源N的输入,渗透压过大使土壤中的微生物导致生理缺水无法进行正常的生理活动,进而影响CH<sub>4</sub>氧化菌氧化吸收CH<sub>4</sub>,从而表现为外源N的输入对土壤CH<sub>4</sub>氧化产生抑制作用<sup>[8]</sup>。Zhang等<sup>[9]</sup>通过研究发现,在外源N(NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>)的添加下,亚热带鼎湖山的针叶阔叶林土壤CH<sub>4</sub>氧化速率并没有发生显著变化。这可能是因为N含量相对较低的土壤中,输入的低含量N大多数被植物所吸收。关于外源P添加对土壤CH<sub>4</sub>氧化影响的研究主要集中在增施P肥对稻田与森林土壤CH<sub>4</sub>氧化的影响<sup>[10]</sup>,研究结果均表明外源P肥对土壤CH<sub>4</sub>氧化具有明显的促进作用。这主要是由于在植物的生长发育中P起着重要的作用。P也是土壤微生物细胞中细胞膜的必要组成元素之一,土壤中的微生物可以通过利用P来提高土壤的养分吸收和物质循环。在一些热带地区P被认为是其基本生态系统过程中最主要的限制元素,热带森林土壤中的P常常受到限制<sup>[11]</sup>。Liu等<sup>[12]</sup>也发现P肥的施用能够使热带森林土壤中微生物的生物量显著增加。P缺乏能够抑制土壤中微生物的活性<sup>[13]</sup>,外源P的添加可

以显著提高土壤微生物的呼吸速率<sup>[14]</sup>。目前,有关外源N、P含量对土壤CH<sub>4</sub>氧化影响的研究较少,且对于N、P同时添加对外源N抑制土壤CH<sub>4</sub>氧化缓解的研究还少见报道。

海南岛是荔枝的主要产区,截至2011年,海南省荔枝的种植面积已达2.4万hm<sup>2</sup><sup>[15]</sup>。荔枝可种植于多种类型的土壤上,有研究表明荔枝园土壤对大气CH<sub>4</sub>具有较强的氧化吸收能力<sup>[16]</sup>。随着荔枝园有机肥施用日渐减少,化肥施用日渐增多,施用N肥、P肥对土壤原生动植物群落有很大影响<sup>[17]</sup>,已有的一些研究多是土壤对大气CH<sub>4</sub>的氧化吸收能力及施肥对土壤P含量、微生物群落结构的影响。而探讨外源N、P含量及外源N、P同时添加对荔枝园土壤CH<sub>4</sub>氧化能力的研究鲜有报道。因此,在探索不同类型荔枝园土壤对N、P肥养分需求的基础上,研究外源N、P添加对旱地不同类型荔枝园土壤CH<sub>4</sub>氧化的影响,对土壤CH<sub>4</sub>氧化吸收及全球温室效应的响应具有重要意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

海口位于19°32'~20°05'N,110°10'~110°41'E,地处海南岛北部,属于热带海洋气候,年平均气温24.3℃,平均降水量2067mm,平均相对湿度81.7%,是中国热带土壤分布最集中、土壤资源最丰富的地区<sup>[18]</sup>。荔枝林是该区的主要经济林之一。本研究分别从海南省海口市具有代表性的3个荔枝园进行土样采集:湿润玻璃火山灰土(H3),海口市琼山区永兴镇雷虎村荔枝园,质地为砂土,土壤呈黑色;暗红湿润铁铝土(T2),海口市琼山区大致坡镇美训村荔枝园,质地为黏土,土壤呈红棕色;简育湿润铁铝土(T3),海口市琼山区三门坡镇荔枝园,质地为黏土,土壤呈黄棕色。

### 1.2 土壤采集与N、P添加

2016年5月分别从海口市永兴镇雷虎村、大致坡镇美训村、三门坡镇东南5km处的3个荔枝园耕作层采集5~15cm土壤<sup>[19]</sup>,剔除可见的根系等杂物,过2mm筛,风干备用,一部分用于土壤基本理化性质的测定(表1),另一部分用于室内培养试验。

试验选用的N、P形态分别为硫酸铵[(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>]、磷酸二氢钾(KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)。N添加设置6个浓度,分别为0、20、60、100、200、300mg·kg<sup>-1</sup>;P添加设置6个浓度,分别为0、25、50、75、100、125mg·kg<sup>-1</sup>;为了统一变量,N、P同时添加也设置6个浓度(mg·kg<sup>-1</sup>),分别为N0+

表1 不同土壤的基本理化性质

Table 1 The basic physical and chemical properties of different soils

项目 Items	H3	T2	T3
采样点坐标 Sample location coordinates	19°88' N 110°25' E	19°85' N 110°64' E	19°67' N 110°24' E
全氮 Total nitrogen/g·kg <sup>-1</sup>	2.37	0.92	1.34
铵态氮 Ammonium nitrogen/mg·kg <sup>-1</sup>	10.50	16.55	6.35
碱解氮 Available nitrogen/mg·kg <sup>-1</sup>	15.78	10.53	17.00
全磷 Total phosphorus/g·kg <sup>-1</sup>	2.40	0.33	2.61
速效磷 Available phosphorus/mg·kg <sup>-1</sup>	42.26	14.62	121.59
全钾 Total potassium/g·kg <sup>-1</sup>	2.51	0.68	7.76
有效钾 Available potassium/mg·kg <sup>-1</sup>	291.63	93.17	223.13
pH	5.93	5.06	5.03
有机质 Organic matter/g·kg <sup>-1</sup>	93.76	31.64	52.39
C/N	12.73	11.05	12.64
N/P	0.99	2.81	0.51

P 75、N 20+P 75、N 60+P 75、N 100+P 75、N 200+P 75、N 300+P 75。共计 18 个处理,每个处理设置 3 个重复。

### 1.3 室内培养与测定

根据供试土壤的初始含水量,称取相当于 15 g 干土的供试土样放入体积为 150 mL 的厌氧瓶中,用无菌去离子水作空白对照,添加不同浓度的 N<sup>3+</sup>、P<sup>5+</sup>作外源 N、P 处理,用无菌去离子水调节土壤含水量为 15%;样瓶用真空泵进行通气去除空气中的杂质,以减小误差;通过计算注入一定量的 CH<sub>4</sub> 标准气体,使每个瓶中初始 CH<sub>4</sub> 浓度为 15 μL·L<sup>-1</sup>(具体浓度以实际测量为准)<sup>[20]</sup>,使用 Agilent 7890A 气相色谱仪根据已知标准气体的浓度测定每个样瓶中 CH<sub>4</sub> 的初始浓度;将所有样品放入 SANYO 气候箱中于 26 °C 条件下闭光培养 12 d,期间每 2 d 测定一次样瓶中 CH<sub>4</sub> 浓度。

CH<sub>4</sub> 氧化速率计算公式<sup>[21]</sup>:

$$Rt = \frac{\Delta C_{CH_4}}{\Delta t} \times \frac{V \times M_{CH_4}}{W \times V_{mol}}$$

式中:Rt 为 CH<sub>4</sub> 氧化速率,ng CH<sub>4</sub>·kg<sup>-1</sup>·h<sup>-1</sup>;ΔC<sub>CH<sub>4</sub></sub>/Δt 为 CH<sub>4</sub> 浓度消耗速率,ng·kg<sup>-1</sup>·h<sup>-1</sup>;V 为培养容器的顶空体积,L;M<sub>CH<sub>4</sub></sub> 为 CH<sub>4</sub> 的摩尔质量,16.05 g·mol<sup>-1</sup>;W 为干土的质量,g;V<sub>mol</sub> 为单位物质的量的 CH<sub>4</sub> 气体在确定温度下的体积,L·mol<sup>-1</sup>。

外源 N、P 对每种土壤 CH<sub>4</sub> 氧化抑制率的计算公式:

$$PI = (1 - Rt/Rc) \times 100\%$$

式中:PI 为添加外源 N、P 对土壤 CH<sub>4</sub> 氧化的影响程度(PI<0、PI=0 和 PI>0 分别表示促进作用、无作用和抑

制作用),%;Rc 为未添加外源 N、P 时的土壤 CH<sub>4</sub> 氧化速率,ng CH<sub>4</sub>·kg<sup>-1</sup>·h<sup>-1</sup>;Rt 为添加外源 N、P 时的土壤 CH<sub>4</sub> 氧化速率,ng CH<sub>4</sub>·kg<sup>-1</sup>·h<sup>-1</sup>。

同时施用 N、P 对外源 N 抑制土壤 CH<sub>4</sub> 氧化效应的缓解程度计算公式:

$$M_i = \frac{\overline{PI}(N_i) - PI(C_i)}{\overline{PI}(N_i)} \times 100\%$$

式中:M<sub>i</sub> 为同时施用 N、P 对第 i 水平外源 N 的土壤 CH<sub>4</sub> 氧化抑制效应的缓解程度(M<sub>i</sub>>0、M<sub>i</sub>=0 和 M<sub>i</sub><0 分别表示有缓解作用、无缓解作用和促进作用),%; $\overline{PI}(N_i)$  代表第 i 水平外源 N 对土壤 CH<sub>4</sub> 氧化的平均抑制率,%;PI(C<sub>i</sub>) 为外源 N、P 同时添加条件下第 i 水平外源 N 对土壤 CH<sub>4</sub> 氧化的抑制率,%。

### 1.4 数据分析

采用 Excel 2013 进行绘图和数据处理,用 SPSS Statistics 19.0 统计软件进行单因素(One-way ANOVA)方差分析、相关性分析、Duncan 多重比较(P<0.05,P<0.01)。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同浓度 N 处理对荔枝园土壤 CH<sub>4</sub> 氧化速率的影响

如图 1A 所示,在不添加外源 N 的条件下,3 种荔枝园土壤的 CH<sub>4</sub> 氧化速率具有显著性差异。H3 的 CH<sub>4</sub> 氧化速率最高为 175.39 ng·kg<sup>-1</sup>·h<sup>-1</sup>,T3 的 CH<sub>4</sub> 氧化速率为 132.55 ng·kg<sup>-1</sup>·h<sup>-1</sup>,T2 明显低于前两者,为 75.64 ng·kg<sup>-1</sup>·h<sup>-1</sup>。外源 N 的添加,对 3 种土壤 CH<sub>4</sub> 氧化速率均有显著抑制作用(P<0.05),与对照相比,3 种土壤 CH<sub>4</sub> 氧化速率的平均抑制率分别为 29.93%、36.28% 和 24.80%,随着外源 N 浓度的增加,3 种土壤 CH<sub>4</sub> 氧化抑制效果逐渐增强(图 1B)。

### 2.2 不同浓度 P 处理对荔枝园土壤 CH<sub>4</sub> 氧化速率的影响

如图 2 所示,外源 P 添加对 CH<sub>4</sub> 氧化速率的影响存在促进和先促进后抑制的情况。与对照相比,外源 P 对 T2、T3 的 CH<sub>4</sub> 氧化速率都具有显著促进作用(P<0.05),平均 CH<sub>4</sub> 氧化速率较对照分别提高了 30.94%、39.38%,不同浓度外源 P 处理对 H3 的 CH<sub>4</sub> 氧化速率的影响存在促进-抑制的交替变化特征,以促进为主,且达到显著水平(P<0.05)。不同外源 P 浓度处理对 CH<sub>4</sub> 氧化的促进效果变化趋势随土壤种类不同而异,随着外源 P 浓度的增加,T3 一直呈现逐渐增强的促进效果;T2 的 CH<sub>4</sub> 氧化促进作用先增强后减弱;H3 的 CH<sub>4</sub> 氧化促进效果在外源 P 的作用下呈现先促进

后抑制的变化趋势。利用二次多项式方程对CH<sub>4</sub>氧化速率与外源P浓度进行拟合(表2),根据拟合方程计算出H3、T2、T3的CH<sub>4</sub>氧化速率最大时所对应的外源P浓度(即最佳外源P浓度),分别为40.65、78.31、57.68 mg·kg<sup>-1</sup>。

### 2.3 外源N、P同时添加对荔枝园土壤CH<sub>4</sub>氧化速率的影响

经过以上两个试验,在外源N的作用下,3种荔枝园土壤CH<sub>4</sub>氧化受到明显的抑制,而外源P的添加可以促进土壤CH<sub>4</sub>氧化。N、P同时添加对3种荔枝园

土壤CH<sub>4</sub>氧化的抑制率均显著低于外源N(图3),并对H3、T2、T3土壤CH<sub>4</sub>氧化速率均具有明显的促进作用,且随铵态氮浓度的增加3种荔枝园土壤CH<sub>4</sub>氧化速率促进效果先增强后减弱。如表3所示,与外源N作用下的CH<sub>4</sub>氧化抑制作用相比,3种荔枝园土壤在N、P同时添加对外源N抑制土壤CH<sub>4</sub>氧化的缓解程度之间具有显著性差异( $P<0.05$ )(表3),T2在N、P同时添加作用下缓解作用最高,且随着外源氮浓度的增加,N、P同时添加对于外源N抑制土壤CH<sub>4</sub>氧化的缓解程度逐渐降低。

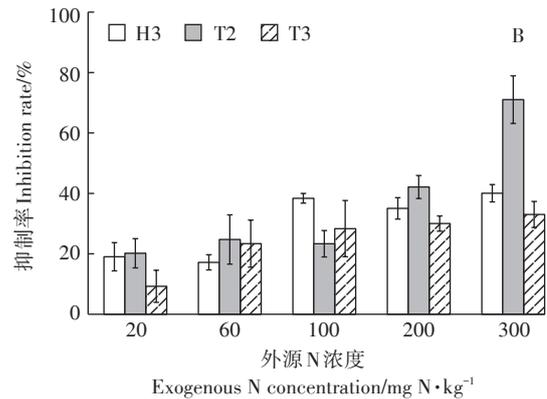
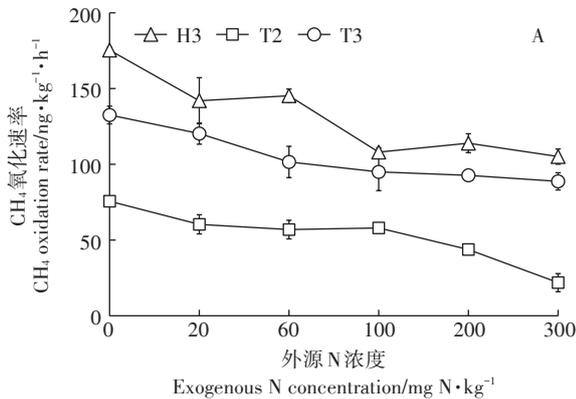


图1 外源N对琼北荔枝园土壤CH<sub>4</sub>氧化速率的影响

Figure 1 The effect of exogenous N on the CH<sub>4</sub> oxidation rate of the litchi orchard soils in northern Hainan Province

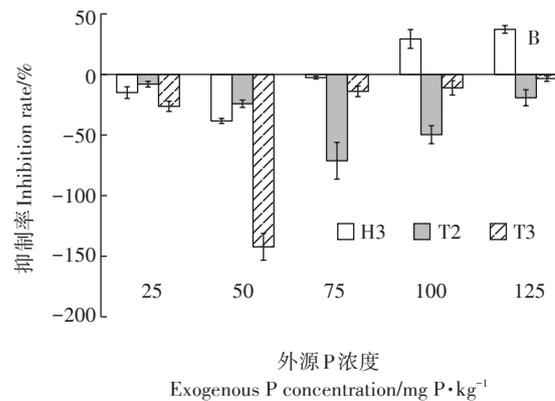
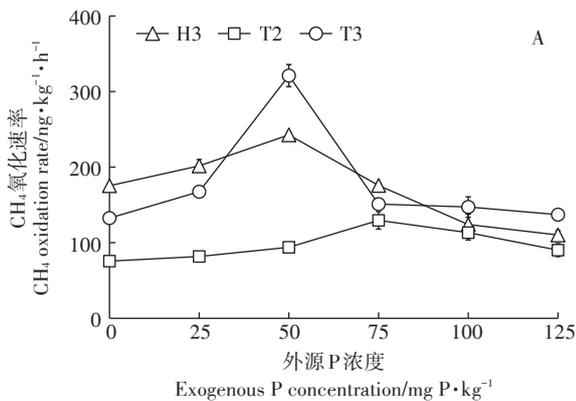


图2 外源P对琼北荔枝园土壤CH<sub>4</sub>氧化速率的影响

Figure 2 The effect of exogenous P on the CH<sub>4</sub> oxidation rate of litchi orchard soils in northern Hainan Province

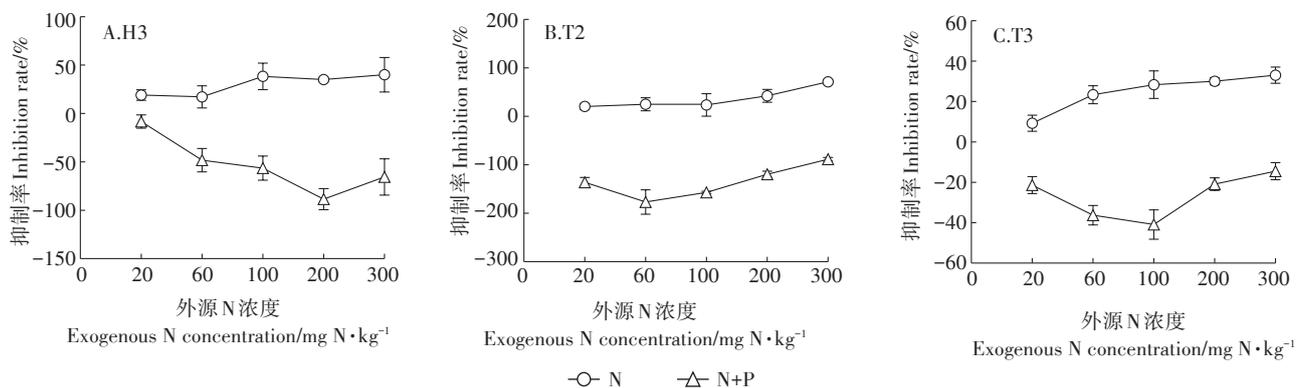
表2 荔枝园土壤CH<sub>4</sub>氧化速率与外源P浓度的回归方程

Table 2 Regression equation of CH<sub>4</sub> oxidation rate and exogenous P concentration in litchi orchard soils

土壤编号 Soil number	样本数 Sample number	回归方程 Regression equation	R <sup>2</sup>	最佳P浓度预测值/mg·kg <sup>-1</sup> The optimal concentration of exogenous P
H3	18	$V = -0.0163W^2 + 1.325W + 182.3$	0.7887**	40.65
T2	18	$V = -0.0074W^2 + 1.159W + 67.423$	0.6727**	78.31
T3	18	$V = -0.0244W^2 + 2.815W + 140.03$	0.3586*	57.68

注:V代表土壤CH<sub>4</sub>氧化速率( $\text{ng}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ ),W代表外源P浓度( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )。\*代表显著相关,\*\*代表极显著相关。

Note: V represents soil CH<sub>4</sub> oxidation rate ( $\text{ng}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ ), W represents exogenous phosphorus concentration ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ). \* represents a significant correlation, \*\* represents a highly significant correlation.

图3 外源N添加和N、P同时添加对荔枝园土壤CH<sub>4</sub>氧化速率的影响Figure 3 Effects of exogenous N addition, N & P addition on soil CH<sub>4</sub> oxidation rate in litchi orchard表3 与添加N相比, N、P同时添加对荔枝园土壤CH<sub>4</sub>氧化抑制的缓解程度(%)Table 3 Effect of N, P addition on the alleviation of soil CH<sub>4</sub> oxidation inhibition in litchi orchard compared with N addition(%)

土壤编号 Soil number	N浓度 N concentration/mg · kg <sup>-1</sup>				
	20	60	100	200	300
H3	143.90±20.59Cd	381.08±20.20Ba	247.13±18.57Bc	352.67±35.67Aab	263.71±26.68Abc
T2	775.87±65.94Aa	815.27±27.83Aa	773.55±13.21Aa	384.54±20.61Ab	224.89±7.09Ac
T3	331.40±26.16Ba	255.34±11.85Cb	244.43±14.79Bb	169.69±6.01Bc	143.90±7.42Bc

注:表中数值为平均值±标准误,同列不同大写字母表示同一N水平下不同土壤之间的差异达到显著水平( $P<0.05$ );同行不同小写字母表示同种土壤不同N处理之间的差异达到显著水平( $P<0.05$ )。

Note: The values in the table are the mean±standard error. Different capital letters in the same column indicate that the differences between different soils under the same nitrogen level reach significant levels ( $P<0.05$ ). Different lowercase letters indicate that the difference between different nitrogen treatments in the same soil reach significant levels ( $P<0.05$ ).

### 3 讨论

本研究中,不同浓度的N、P处理对荔枝园土壤CH<sub>4</sub>氧化速率的影响不同,其中外源N添加抑制了CH<sub>4</sub>氧化( $P<0.05$ ),外源P添加促进了CH<sub>4</sub>氧化( $P<0.05$ ),N、P同时添加对外源N抑制土壤CH<sub>4</sub>氧化有较大的缓解作用。

已有研究表明NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N对CH<sub>4</sub>的氧化有明显的抑制作用<sup>[22]</sup>。出现这种现象的原因一方面可能是NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N对CH<sub>4</sub>氧化的抑制作用是因为添加了NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N后增强了土壤中氨氧化细菌的活性,而氨氧化细菌的单氧酶(AMO)和CH<sub>4</sub>氧化菌氧化CH<sub>4</sub>时需要的CH<sub>4</sub>单氧酶(pMMO)生理特性具有较高的一致性,因此两者对于底物CH<sub>4</sub>和NH<sub>3</sub>的选择有竞争作用。此外,外源N的添加也促进了CH<sub>4</sub>产生,抵消掉一部分CH<sub>4</sub>氧化菌氧化的CH<sub>4</sub>,从而表现为CH<sub>4</sub>氧化受到抑制<sup>[23]</sup>。另一方面可能是因为外源N的输入造成渗透压过大,使土壤中的微生物因生理缺水而无法进行正常的生理活动,导致CH<sub>4</sub>氧化菌出现生理性缺水,进而影响CH<sub>4</sub>氧化菌氧化吸收CH<sub>4</sub>,从而表现为外源N的输入对土壤

CH<sub>4</sub>氧化的抑制作用<sup>[8]</sup>。外源N的输入对CH<sub>4</sub>氧化有抑制作用还有一种原因,是在酸性土壤中,NH<sub>4</sub><sup>+</sup>的输入使氨氧化细菌经过一系列的硝化作用生成的NO<sub>2</sub><sup>-</sup>和羟胺等产物对CH<sub>4</sub>氧化菌的生长有一定的毒害作用,使其无法进行正常的新陈代谢<sup>[24]</sup>。因此不考虑硫对CH<sub>4</sub>产生的影响;对于硫对CH<sub>4</sub>氧化的影响,相关资料显示,硫抑制CH<sub>4</sub>产生主要是在厌氧环境下有机物碳矿化的一个重要终端过程<sup>[25]</sup>,少量添加SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>在短时间内对CH<sub>4</sub>氧化的影响不大<sup>[26]</sup>,而本次研究主要是在好氧环境下,且添加的是(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>,所以认为N的影响是主要控制因素。

P元素是微生物膜结构系统和其体内高磷化合物的主要构成元素<sup>[27]</sup>,有研究发现,外源P的输入可以明显增加土壤微生物量,提高土壤微生物的活性,使土壤微生物的群落结构发生改变,并且可以提高土壤微生物群落的多样性<sup>[28]</sup>。土壤P的缺乏通常不利于土壤微生物的生长,因此可能会影响土壤CH<sub>4</sub>氧化菌的生长,从而影响其对CH<sub>4</sub>的氧化吸收。本研究表明,外源P添加会刺激CH<sub>4</sub>氧化过程,这与其他学者的研究结果一致<sup>[29]</sup>。主要原因包括:(1)外源P的加

人有助于增加土壤微生物群落的丰度和多样性,P可以诱导多种具有碳降解功能的细菌增加,降低土壤可溶性有机碳的复杂度,从而加速复杂有机碳的降解和CH<sub>4</sub>氧化<sup>[30]</sup>; (2)铝对CH<sub>4</sub>氧化有抑制作用<sup>[31]</sup>,而P能吸附铝<sup>[32]</sup>,可减轻铝对CH<sub>4</sub>氧化的抑制作用。将N、P同时添加后土壤的CH<sub>4</sub>氧化抑制作用明显得到缓解,是因为施加适量的P不仅可以提高土壤肥力水平,增加土壤细菌群落的功能性<sup>[33]</sup>,还可以缓解N沉降对CH<sub>4</sub>氧化的抑制作用<sup>[34]</sup>。N、P同时添加对T2的缓解作用较高,这可能跟该土壤的速效磷背景值较低有关,T2有效磷含量仅为14.62 mg·kg<sup>-1</sup>,其他2种土壤为42.26 mg·kg<sup>-1</sup>与121.59 mg·kg<sup>-1</sup>,都明显高于T2的土壤有效磷含量,因此,N、P同时添加对土壤CH<sub>4</sub>氧化抑制的缓解作用很有可能与土壤的速效磷背景值有关。随着外源N浓度的增加,N、P同时添加对于外源N抑制土壤CH<sub>4</sub>氧化的缓解程度逐渐降低,可能是因为随着NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N添加量的增加,CH<sub>4</sub>氧化的抑制作用愈大<sup>[35]</sup>。

#### 4 结论

(1)3种荔枝园土壤对CH<sub>4</sub>的吸收能力有一定的差异,且3种土壤的CH<sub>4</sub>氧化能力从高到低排序为湿润玻璃火山灰土(H3)>简育湿润铁铝土(T3)>暗红湿润铁铝土(T2)。

(2)外源N添加会抑制琼北3种荔枝园土壤的CH<sub>4</sub>氧化,且随着外源N浓度的增加,3种土壤CH<sub>4</sub>氧化抑制效果逐渐增强;外源P的添加对土壤CH<sub>4</sub>氧化有明显的促进作用,随着外源P浓度的增加,促进效果逐渐减弱。

(3)N、P同时添加对外源N抑制土壤CH<sub>4</sub>氧化有明显的缓解作用,暗红湿润铁铝土(T2)在N、P同时添加作用下缓解作用最高,这很有可能与土壤的速效磷背景值有关。而在外源N浓度的不断增加下,N、P同时添加对于外源N抑制土壤CH<sub>4</sub>氧化的缓解程度逐渐降低。

因此,在施肥管理过程中应根据土壤类型适当地增施P肥,使土壤对大气CH<sub>4</sub>的氧化能力维持在较高水平上,充分发挥土壤对大气CH<sub>4</sub>的氧化能力。

#### 参考文献:

[1] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.

[2] Salawitch R J, Bennett B F, Hope A P, et al. Earth's climate system [M]/Salawitch R J, Canty T P, Hope A P, et al. Paris climate agreement: Beacon of hope. Cham: Springer International Publishing AG, 2017: 1-50.

[3] World Meteorological Organization. The state of greenhouse gases in the atmosphere based on global observations through 2016[J]. *WMO Greenhouse Gas Bulletin*, 2017, 13: 1-8.

[4] Agren G I. Stoichiometry and nutrition of plant growth in natural communities[J]. *Annual Review of Ecology, Evolution, & Systematics*, 2008, 39: 153-170.

[5] Maljanen M, Jokinen H, Saari A, et al. Methane and nitrous oxide fluxes, and carbon dioxide production in boreal forest soil fertilized with wood ash and nitrogen[J]. *Soil Use & Management*, 2006, 22(2): 151-157.

[6] 丁维新, 蔡祖聪. 土壤甲烷氧化菌及水分状况对其活性的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2003, 11(1): 94-97.

DING Wei-xin, CAI Zu-cong. Methanism of methane oxidation by methanotrophs and effect of soil moisture content on their activity[J]. *Chinese Academy of Science*, 2003, 11(1): 94-97.

[7] Shrestha R K, Strahm B D, Sucre E B. Greenhouse gas emissions in response to nitrogen fertilization in managed forest ecosystems[J]. *New Forests*, 2015, 46(2): 167-193.

[8] 方华军, 程淑兰, 于贵瑞, 等. 大气氮沉降对森林土壤甲烷吸收和氧化亚氮排放的影响及其微生物学机制[J]. *生态学报*, 2014, 34(17): 4799-4806.

FANG Hua-jun, CHENG Shu-lan, YU Gui-rui, et al. Microbial mechanism responsible for the effects of atmospheric nitrogen deposition on methane uptake and nitrous oxide emission in forest soils: A review[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(17): 4799-4806.

[9] Zhang T, Zhu W, Mo J, et al. Increased phosphorus availability mitigates the inhibition of nitrogen deposition on CH<sub>4</sub> uptake in an old-growth tropical forest, southern China[J]. *Biogeosciences*, 2011, 8(9): 2805-2813.

[10] Gray N D, Mccann C M, 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(1/2/3): 307-317.

[11] 吴回军, 欧阳学军. 磷添加对南亚热带森林土壤有机碳氮矿化影响的培养试验研究[J]. *广东林业科技*, 2008, 24(6): 6-14.

WU Hui-jun, OUYANG Xue-jun. Effects of P addition on organic C and N mineralization from subtropical forests soil during incubation, southern China[J]. *Guangdong Forestry Science and Technology*, 2008, 24(6): 6-14.

[12] Liu L, Gundersen P, Zhang T, et al. Effects of phosphorus addition on soil microbial biomass and community composition in three forest types in tropical China[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2012, 44(1): 31-38.

[13] Cleveland C C, Townsend A R, Schmidt S K. Phosphorus limitation of microbial processes in moist tropical forests: Evidence from short-term laboratory incubations and field studies[J]. *Ecosystems*, 2002, 5(7): 0680-0691.

- [14] Ilstedt U, Singh S. Nitrogen and phosphorus limitations of microbial respiration in a tropical phosphorus-fixing Acrisol (Ultisol) compared with organic compost[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2005, 37(7): 1407-1410.
- [15] Rowlands D W, Grace P R, Scheer C, et al. Influence of nitrogen fertilizer application and timing on greenhouse gas emissions from a lychee (*Litchi chinensis*) orchard in humid subtropical Australia[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2013, 179(4): 168-178.
- [16] 孙娟, 李松刚, 魏志远, 等. 海南中西部妃子笑荔枝营养诊断初探[J]. 热带作物学报, 2014, 35(10): 1932-1936.  
SUN Juan, LI SONG-gang, WEI Zhi-yuan, et al. The nutrient diagnosis of Feizhixiao litchi in Hainan[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2014, 35(10): 1932-1936.
- [17] 齐莎, 赵小蓉, 郑海霞, 等. 内蒙古典型草原连续5年施用氮磷肥土壤生物多样性的变化[J]. 生态学报, 2010, 30(20): 5518-5526.  
QI Sha, ZHAO Xiao-rong, ZHENG Hai-xia, et al. Changes of soil biodiversity in Inner Mongolia steppe after 5 years of N and P fertilizer applications[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(20): 5518-5526.
- [18] 龚子同, 张甘霖, 漆智平. 海南岛土系概论[M]. 北京: 科学出版社, 2004.  
GONG Zi-tong, ZHANG Gan-lin, QI Zhi-ping. Hainan island soil series introduction[M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [19] 魏晋. 不同区域森林土壤甲烷氧化及其影响因子的初步研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2007.  
WEI Jin. A primary study on methane consumption by forest soils from different zones and its controlling factors[D]. Nanjing: Nanjing Agriculture University, 2007.
- [20] Lima A B, Muniz A W, Dumont M G. Activity and abundance of methane-oxidizing bacteria in secondary forest and manioc plantations of Amazonian Dark Earth and their adjacent soils[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2014, 5: 550.
- [21] Jang I, Lee S, Zoh K-D, et al. Methane concentrations and methanotrophic community structure influence the response of soil methane oxidation to nitrogen content in a temperate forest[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2011, 43(3): 620-627.
- [22] Li X Y, Cheng S L, Fang H J, et al. The contrasting effects of deposited  $\text{NH}_4^+$  and  $\text{NO}_3^-$  on soil  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2\text{O}$  fluxes in a subtropical plantation, southern China[J]. *Ecological Engineering*, 2015, 85: 317-327.
- [23] 王智平, 胡春胜, 杨居荣. 无机氮对土壤甲烷氧化作用的影响[J]. 应用生态学报, 2003, 14(2): 305-309.  
WANG Zhi-ping, HU Chun-sheng, YANG Ju-rong. Effect of inorganic nitrogen on the oxidation of methane in soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(2): 305-309.
- [24] Schnell S, King G M. Mechanistic analysis of ammonium inhibition of atmospheric methane consumption in forest soils[J]. *Appl Environ Microbiol*, 1994, 60(10): 3514-3521.
- [25] 胡敏杰, 全川, 邹芳芳. 氮输入对土壤甲烷产生、氧化和传输过程的影响及其机制[J]. 草业学报, 2015, 24(6): 204-212.  
HU Min-jie, TONG Chuan, ZOU Fang-fang. Effects of nitrogen input on  $\text{CH}_4$  production, oxidation and transport in soils, and mechanisms: A review[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2015, 24(6): 204-212.
- [26] 胡敏杰, 邹芳芳, 任鹏, 等. 闽江河口湿地土壤 $\text{CH}_4$ 产生与氧化速率对外源氮、硫添加的响应[J]. 生态学报, 2017, 37(1): 167-176.  
HU Min-jie, ZOU Fang-fang, REN Peng, et al. Effects of nitrogen and sulfate additions on methane production and oxidation in the Min River estuarine marsh[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(1): 167-176.
- [27] 林先贵, 胡君利. 土壤微生物多样性的科学内涵及其生态服务功能[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 892-900.  
LIN Xian-gui, HU Jun-li. Scientific connotation and ecological service function of soil microbial diversity[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 892-900.
- [28] Liu L, Gundersen P, Zhang T, et al. Effects of phosphorus addition on soil microbial biomass and community composition in three forest types in tropical China[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2012, 44(1): 31-38.
- [29] Jugnia L B, Mottiar Y, Djuikom E, et al. Effect of compost, nitrogen salts, and N P K fertilizers on methane oxidation potential at different temperatures[J]. *Applied Microbiology & Biotechnology*, 2012, 93(6): 2633-2643.
- [30] 李霞, 田光明, 朱军, 等. 不同磷肥用量对水稻土有机碳矿化和细菌群落多样性的影响[J]. 土壤学报, 2014, 51(2): 360-372.  
LI Xia, TIAN Guang-ming, ZHU Jun, et al. Effects of rate of phosphorus fertilizer on organic carbon mineralization and bacterial community diversity in paddy soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(2): 360-372.
- [31] Tong C, Wang C, Huang J F, et al. Ecosystem respiration does not differ before and after tidal inundation in brackish marshes of the Min River estuary, southeast China[J]. *Wetlands*, 2014, 34(2): 225-233.
- [32] 王维奇, 曾从盛, 全川. 闽江口芦苇湿地土壤甲烷产生与氧化能力研究[J]. 湿地科学, 2008, 6(1): 60-68.  
WANG Wei-qi, ZENG Cong-sheng, TONG Chuan. Methane production and oxidation capacities of soil from the reed marsh of the Minjiang River estuary[J]. *Wetland Science*, 2008, 6(1): 60-68.
- [33] Tan H, Barret M, Mooij M J, et al. Long-term phosphorus fertilisation increased the diversity of the total bacterial community and the phod phosphorus mineraliser group in pasture soils[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2012, 49(6): 1-12.
- [34] 刘剑秋, 曾从盛, 陈宁. 闽江河口湿地研究[M]. 北京: 科学出版社, 2006.  
LIU Jian-qiu, ZENG Cong-sheng, CHEN Ning. Study on wetland in Minjiang estuary[M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [35] 齐润杰, 陈金霞, 但建国. 外源氮对琼北不同类型土壤甲烷氧化能力的影响[J]. 热带作物学报, 2016, 37(8): 1534-1539.  
QI Run-jie, CHEN Jin-xia, DAN Jian-guo. Effects of exogenous nitrogen on methane oxidation in upland soils of different types in northern Hainan island[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2016, 37(8): 1534-1539.