



增温对南亚热带森林土壤磷形态的影响及其对有效磷的贡献

蒋 芬^{1,2,3} 黄 娟^{1,2} 褚国伟^{1,2} 程 严^{1,2,3} 刘旭军^{1,2,3} 刘菊秀^{1,2} 列志旸^{1,2,3*}

¹中国科学院华南植物园植被退化与生态系统管理重点实验室, 广州 510650; ²中国科学院核心植物园, 广州 510650; ³中国科学院大学, 北京 100049

摘 要 磷(P)是森林生态系统生产力的重要限制性元素。土壤磷的有效性取决于磷的存在形态及其转化过程。目前有关增温如何调控磷形态转化过程, 从而促进土壤有效磷含量增加的机制尚未明确。该研究以南亚热带森林为研究对象, 采用沿海海拔高度从300 m下降至30 m以模拟温度自然上升的方法, 采集该林型0–10、10–20、20–40 cm的土壤, 并用适用于酸性土壤的连续浸提方法分离不同形态磷, 研究增温对土壤不同形态磷含量的影响, 探讨土壤不同形态磷与有效磷的关系, 识别对土壤有效磷在增温背景下增加有重要贡献的磷组分。结果表明增温使0–10 cm的无机钙磷(Ca-Pi)及20–40 cm的无机铁磷(Fe-Pi)和总无机磷含量分别显著增加了65.5%、17.9%和18.5%, 但对总有机磷及各有机磷组分含量均无显著影响。土壤不同形态磷与有效磷含量的相关分析表明, 有效磷与无机态的不同形态磷及有机铝磷、有机铁磷含量均显著正相关, 其中与Fe-Pi含量的相关性最强。通过土壤不同形态磷与有效磷含量的通径分析进一步发现, 无机铝磷、Fe-Pi是土壤磷转化过程中的重要中间过渡性磷组分, 且Fe-Pi是促进有效磷含量增加最重要的直接贡献磷组分。结合前期研究结果, 增温可能增大了凋落物磷对土壤磷的输入, 还可能强化了土壤的吸附和沉淀过程, 使得更多进入到土壤的溶解态磷转化为Ca-Pi、Fe-Pi等缓效磷源, 其中Fe-Pi可能成为南亚热带森林在气候变暖背景下最重要的有效磷来源。

关键词 增温; 磷形态; 有效磷; 吸附-解吸附过程; 溶解-沉淀过程; 通径分析

蒋芬, 黄娟, 褚国伟, 程严, 刘旭军, 刘菊秀, 列志旸 (2021). 增温对南亚热带森林土壤磷形态的影响及其对有效磷的贡献. 植物生态学报, 45, 197-206. DOI: 10.17521/cjpe.2020.0263

Effects of warming on soil phosphorus fractions and their contributions to available phosphorus in south subtropical forests

JIANG Fen^{1,2,3}, HUANG Juan^{1,2}, CHU Guo-Wei^{1,2}, CHENG Yan^{1,2,3}, LIU Xu-Jun^{1,2,3}, LIU Ju-Xiu^{1,2}, and LIE Zhi-Yang^{1,2,3*}

¹Key Laboratory of Vegetation Restoration and Management of Degraded Ecosystems, South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China; ²Core Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China; and ³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract

Aims Phosphorus (P) is generally considered to be the important limiting element for forest ecosystem productivity. The availability of soil P depends on the existing fractions of P and their transformation processes. Many researches showed that warming increases soil available P concentration. However, it is still uncertain that how warming increases soil available P concentration through regulating the P cycle processes. The objective of this study was to investigate the effects of warming on concentration of different soil P fractions and to explore the relationships between different soil P fractions and available P concentration, thus identifying the important P fractions contributing to the increased available P concentration and its corresponding mechanisms under warming.

Methods A field warming experiment was conducted by translocating model forest ecosystems from 300 m to 30 m in south subtropical area. Soils with different treatments at 0–10, 10–20 and 20–40 cm depth were collected, respectively, and then different soil P fractions were separated by continuous extraction method applied in acid soils. The correlation analysis and path analysis were performed to explore the relationships between different soil P fractions and available P concentration in the soils.

Important findings The results showed that warming significantly increased the concentrations of inorganic P

收稿日期Received: 2020-08-03 接受日期Accepted: 2020-12-12

基金项目: 国家自然科学基金(41977287、41991285和31971459)和广东省林业科技创新项目(2019KJX023)。Supported by the National Natural Science Foundation of China (41977287, 41991285 and 31971459), and the Science and Technology Innovation Project of Guangdong Province Forestry (2019KJX023).

* 通信作者Corresponding author (liezhiyang@scbg.ac.cn)

associated with calcium (Ca-Pi) at 0–10 cm depth and inorganic P concentration associated with iron (Fe-Pi) and total inorganic P concentration at 20–40 cm depth by 65.5%, 17.9% and 18.5%, respectively. However, it had no significant effects on total organic P and all organic P fractions. The correlation analysis results showed that available P concentration was significantly positively correlated with all inorganic P fractions and organic P associated with aluminum and iron. Furthermore, the correlation between available P and Fe-Pi concentration was the strongest. In addition, the path analysis highlights that inorganic P associated with aluminum and Fe-Pi were the important intermediate transitional P fractions in the conversion process of soil P, and Fe-Pi was the greatest direct contributor to the increased available P. Based on the results of previous studies, we propose that warming probably not only increased the input of plant litter P to soil P, but also strengthened desorption and dissolution processes, facilitating more dissolved P converted to moderately available P fractions including Fe-Pi and Ca-Pi. Furthermore, Fe-Pi may become the most important contributor of available P in south subtropical forests under warming.

Key words warming; phosphorus fractions; available phosphorus; adsorption-desorption process; dissolution-precipitation process; path analysis

Jiang F, Huang J, Chu GW, Cheng Y, Liu XJ, Liu JX, Lie ZY (2021). Effects of warming on soil phosphorus fractions and their contributions to available phosphorus in south subtropical forests. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 45, 197-206. DOI: 10.17521/cjpe.2020.0263

磷是森林土壤重要的营养元素(Rui *et al.*, 2012), 被普遍认为是热带亚热带生态系统生产力的限制性元素(Vitousek *et al.*, 2010; Hou *et al.*, 2012), 其有效性还会影响土壤碳的储存(Fisk *et al.*, 2015)、氮的固定(Vitousek & Howarth, 1991)、微生物呼吸(Spohn & Schleuss, 2019)和凋落物分解(Chen *et al.*, 2013)等生态系统功能。从前工业时期(1850–1900年)到现代(1999–2018年), 全球地表平均温度已经上升了大约 1.52 °C (Jia *et al.*, 2019)。气候变暖可能会对陆地生态系统的磷循环过程和有效性产生很大影响, 磷循环过程的变化可进一步调节生态系统的碳储存及气候变暖进程, 如最近的研究表明, 随着持续的全球变暖, 磷对全球陆地初级生产力的限制程度将逐渐增加(Sun *et al.*, 2017; Hou *et al.*, 2018), 这可能限制未来生态系统碳储存能力。因此, 增强对磷循环如何响应增温的了解, 有助于改善气候-碳循环耦合模型的相关预测(Reed *et al.*, 2015)。

森林土壤磷循环包括磷的输入、在土壤内的迁移与转化以及输出, 其中, 磷在土壤内的转化过程是磷循环的重要组成部分, 并与磷的形态紧密相关(陈美领等, 2016)。土壤磷可以分为有机磷和无机磷, 无机磷主要以溶解态磷、吸附态磷、矿物态磷(包括原生矿物态磷和次生矿物态磷)和闭蓄态磷的形态存在(Sims & Pierzynski, 2005; 孙桂芳等, 2011)。有机磷是与碳结合的含磷物质的总称, 主要有核酸、核苷酸、肌醇磷酸、磷脂、糖磷、磷蛋白和磷酸酯等(严玉鹏, 2015)。不同形态磷的有效性有很大差异

(Zhu *et al.*, 2018), 对土壤有效磷的贡献不同。有效磷也称为速效磷, 能够被植物吸收利用, 它包括全部溶解态磷、部分吸附态磷、部分微溶性无机磷以及极少量的有机磷(任子文等, 2017)。溶解态磷容易被土壤固定, 主要有吸附固定和化学反应固定两种方式, 土壤磷的吸附主体包括碳酸钙、无定形氧化铁和氧化铝、土壤黏粒等, 另外, 磷吸附在碳酸钙、铁、铝矿物表面时, 可以与这些矿物质反应, 形成化学沉淀, 即次生矿物态磷, 其可能进一步被氧化物等矿物质包被, 沉淀为难以直接利用的闭蓄态磷(张国桥, 2014)。微生物对磷的矿化作用可以使土壤中的植物凋落物、微生物残体、土壤有机质中的磷, 转变为溶解态无机磷, 重新汇入到土壤有效磷库中(Santos *et al.*, 2019)。在这些过程中, 不同形态的磷相互转化, 其存在形态及其相对含量均会影响土壤磷的有效性(Doolette & Smernik, 2011), 因此, 有必要了解土壤不同形态磷的含量, 以更好地理解土壤磷库的变化对植物生长和森林生产力的影响。

气候变暖通过引起土壤温度、湿度、有机质等土壤理化性质的变化(王晓婷等, 2009; Santos *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2019), 以及影响植物(Schreeg *et al.*, 2013; Wu *et al.*, 2020)和微生物(肖辉林和郑习健, 2000; Mei *et al.*, 2019)对磷的周转, 调控土壤磷循环过程, 促进不同形态磷的相互转化, 改变土壤磷的有效性(Dijkstra *et al.*, 2012; Hou *et al.*, 2018)。许多研究认为增温会促进土壤有效磷含量的增加(Jiang *et al.*, 2016; Liu *et al.*, 2017; 唐偲頔等, 2017; 贝昭

贤等, 2018)。然而, 目前有关增温如何调控磷形态转化过程, 从而促进土壤有效磷含量增加的机制尚未明确。一部分研究认为有效磷含量的增加主要是因为增温使土壤磷循环的生物过程受到影响, 如通过改变土壤磷酸酶活性和土壤微生物活性, 促进有机磷矿化或降低微生物固磷量, 从而提高土壤磷有效性(Jiang *et al.*, 2016; 贝昭贤等, 2018), 还有研究认为增温可以强化土壤的解吸附、溶解等非生物过程, 从而促进有效磷含量增加, 相比之下, 增温引起的水分降低还可能会抑制微生物活性, 进而减少微生物矿化作用对有效磷的相对贡献(Yang *et al.*, 2019)。

热带及亚热带森林生产力极高, 占全球陆地生态系统的30%以上(Clark *et al.*, 2001)。然而, 目前有关热带及亚热带地区磷对增温的响应研究较为缺乏(贝昭贤等, 2018)。因此, 我们以南亚热带森林为研究对象, 利用增温平台对磷循环开展了相关研究。前期研究已发现增温促进土壤有效磷含量增加(Lie *et al.*, 2019)。为了进一步理解增温促进土壤有效磷含量增加的内在机制, 我们在前期实验基础上, 进一步采用适用于酸性土壤的连续浸提方法分离土壤不同形态磷, 研究增温对土壤不同形态磷含量的影响, 探讨土壤不同形态磷与有效磷的关系, 识别对土壤有效磷含量在增温背景下增加有重要贡献的磷组分, 为全球变暖背景下南亚热带森林的磷基本情况和森林管理提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 实验地概况

实验地点位于广东省肇庆鼎湖山自然保护区(112.51°–112.56° E, 23.16°–23.19° N)内, 属于南亚热带湿润季风气候, 年平均气温为21.4 °C, 最冷月(1月)和最热月(7月)的平均气温分别为12.6和28.0 °C, 年降水量为1 927 mm, 其中75%集中在3–8月, 干湿季明显, 年平均相对湿度为80%, 土壤类型为赤红壤(刘菊秀等, 2013)。

2012年5月开始修建样地, 利用海拔高度下降模拟气温自然上升, 即在海拔300和30 m处选择坡向、坡度一致的样地(30 m × 30 m), 分别建造3个开顶箱(OTC, 深0.8 m × 长3 m × 宽3 m)其中, 海拔300 m样地的OTC为对照组, 海拔30 m样地的OTC为增温组。所有OTC的填埋土均来自300 m样地的赤红

壤, 并按照对应层次(0–20、20–40、40–70 cm)进行填埋。与此同时, 选取年龄、基径和树高一致的6种优势种苗木, 包括木荷(*Schima superba*)、红枝蒲桃(*Syzygium rehderianum*)、短序润楠(*Machilus breviflora*)、马尾松(*Pinus massoniana*)、红椎(*Castanopsis hystrix*)和山血丹(*Ardisia lindleyana*), 并在同一位置进行驯化。土壤填埋完毕, 将驯化好的6种优势种苗木在各个OTC内进行随机移植, 以模拟南亚热带森林生态系统。

1.2 样品采集

2017年6月, 对各处理样地的OTC土壤分3层(0–10、10–20、20–40 cm)进行采样, 每个OTC随机选5个点, 使用内径为3.5 cm的土钻取土, 再将各个土层的5份土混合均匀, 去掉根系、碎石等杂物, 过2 mm筛, 分成2份, 风干磨碎后过100目筛, 用于不同形态磷含量的测定。

1.3 土壤理化性质测定及磷分级方法

土壤温度由样地各土层的温度传感器记录所得, 土壤含水量采用烘干法测定, pH由pH计测定, 土壤有机碳含量用重铬酸钾氧化-外加加热法测定, 土壤全氮含量采用凯氏定氮法测定, 碳氮比、碳磷比、氮磷比为各元素含量的比值。

土壤磷组分的分级方法主要采用McDowell和Condon (2000)提出的连续浸提方法。具体浸提方法如下: 向3.0 g风干、磨碎(过小于2 mm筛)的土壤依次加入1.0 mol·L⁻¹ NH₄Cl溶液、0.1 mol·L⁻¹ NH₄F溶液、0.1 mol·L⁻¹ NaOH溶液、0.5 mol·L⁻¹ H₂SO₄溶液(均为30 mL)。每次加入浸提溶液后振荡, 除NH₄Cl溶液的振荡时间为30 min以外, 其他步骤的振荡时间均为16 h, 振荡后均以10 000 r·min⁻¹离心10 min, 离心后用小于0.45 μm的微孔滤膜过滤出上清液。经NH₄Cl和H₂SO₄浸提后的上清液均不做处理, 直接测定, 分别得到NH₄Cl提取态磷(NH₄Cl-Pi)和无机钙磷(Ca-Pi)含量。经NH₄F和NaOH浸提后的上清液均做进一步处理: (1)取10 mL样品, 加入3 mL 0.9 mol·L⁻¹ H₂SO₄溶液, 酸化过夜后离心, 经测定后分别得到无机铝磷(Al-Pi)和无机铁磷(Fe-Pi)含量; (2)取5 mL样品, 加入0.5 g K₂S₂O₈和10 mL 0.9 mol·L⁻¹ H₂SO₄溶液后加热消解, 经测定后分别得到总铝磷(Al-Pt)和总铁磷(Fe-Pt)含量。上述所有步骤完成后, 保留剩余土壤, 将其烘干后分成两份, 用于测定闭蓄态磷含量, 其中一份在550 °C烧 2 h后, 用15 mL

0.5 mol·L⁻¹ H₂SO₄提取, 经振荡、离心和过滤后, 测定得到总闭蓄态磷(O-Pt)含量, 另一份直接用15 mL 0.5 mol·L⁻¹ H₂SO₄溶液提取, 振荡、离心和过滤后, 测定得到无机闭蓄态磷(O-Pi)含量。本实验所有提取液的磷含量均用等离子体原子发射光谱法测定。

有机铝磷(Al-Po)、有机铁磷(Fe-Po)和有机闭蓄态磷(O-Po)含量均由各组分的总磷含量减去相应的无机磷含量所得。土壤总磷(Pt)含量为NH₄Cl-Pi、Ca-Pi、Al-Pt、Fe-Pt和O-Pt含量之和, 土壤总无机磷(Pi)含量为NH₄Cl-Pi、Ca-Pi、Al-Pi、Fe-Pi和O-Pi含量之和, 土壤总有机磷(Po)含量为Al-Po、Fe-Po和O-Po含量之和。

1.4 数据处理与分析

用SPSS 21.0对数据进行分析, 包括: (1)采用双因素方差分析方法比较不同增温处理、不同土层的土壤理化性质和不同形态磷含量的差异性(显著性水平设定为 $\alpha = 0.05$); (2)用Pearson相关系数对不同磷组分的相关关系进行分析(显著性水平设定为 $\alpha = 0.05$); (3)用通径分析方法分析不同形态磷对有效磷的贡献大小及方式, 具体方法参考杜家菊和陈志伟(2010)。相关数据处理及图表制作在Excel 2016和

SigmaPlot 12中完成。

2 结果和分析

2.1 增温对土壤理化性质的影响

增温使同一土层的土壤温度升高了1.16–1.28 °C, 但显著降低了土壤含水量, 其中0–10和20–40 cm的土壤水分分别降低了15%和9% (图1), 增温对其他理化性质均无显著影响, 测定结果详见Lie等(2019)。

2.2 增温对土壤不同形态磷的影响

增温对不同形态磷含量的影响不完全一致(表1; 图2)。与对照相比, 增温显著增加了Ca-Pi、Fe-Pi、Pi和Pt含量($p < 0.05$), 其中0–10 cm的Ca-Pi及20–40 cm的Fe-Pi和Pi含量分别显著增加了65.5%、17.9%和18.5%, 但增温对其他形态的磷及Po含量没有显著影响($p > 0.05$)。

从数值范围来看, 土壤中不同形态磷的含量差异极大, 但在不同土层的占比大小相似(图2)。对于在总磷的占比而言, 在同一土层的NH₄Cl-Pi所占比例最小, 仅占0.06%–0.32%, Ca-Pi、Al-Pi与O-Pi的占比则均小于5%, 而Fe-Pi和O-Po的占比相对较大,

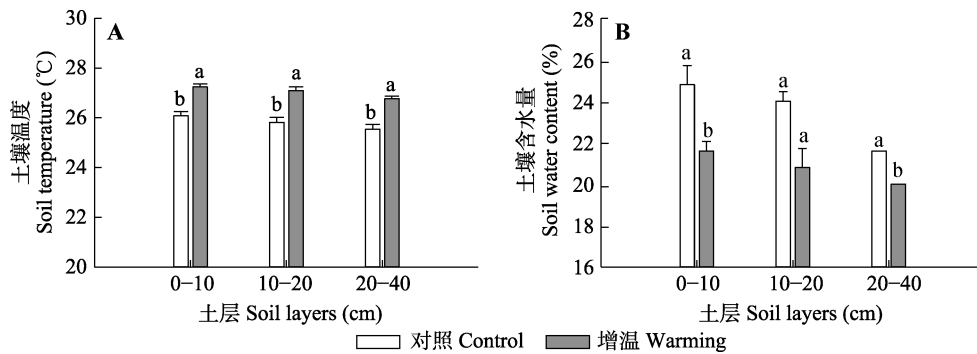


图1 对照和增温处理下南亚热带森林不同土层的土壤温度和含水量(平均值+标准误, $n = 3$)。不同小写字母表示同一土层不同处理间差异显著($p < 0.05$)。

Fig. 1 Soil temperature and water content of different soil layers under control and warming treatments in south subtropical forests (mean + SE, $n = 3$). Different lowercase letters indicate significant differences between different treatments ($p < 0.05$).

表1 基于双因素方差分析结果得到的增温和土层及其交互作用对南亚热带森林土壤不同形态磷(P)含量的影响

Table 1 Results (p values) of two-way ANOVA about the effects of warming, soil layer and their interactions on concentrations of different soil phosphorus (P) fractions in south subtropical forests

	NH ₄ Cl-Pi	Al-Pi	Fe-Pi	Ca-Pi	O-Pi	Al-Po	Fe-Po	O-Po	Pi	Po	Pt
W	0.487	0.473	<0.01	<0.05	0.571	0.794	0.264	0.076	<0.05	0.093	<0.05
L	<0.05	<0.01	<0.001	0.067	<0.01	<0.01	<0.01	0.855	<0.001	<0.05	<0.001
W × L	0.740	0.942	0.963	0.270	0.817	<0.05	0.690	0.737	0.986	0.667	0.814

L, 土层; W, 增温。Al-Pi, 无机铝磷; Al-Po, 有机铝磷; Ca-Pi, 无机钙磷; Fe-Pi, 无机铁磷; Fe-Po, 有机铁磷; NH₄Cl-Pi, NH₄Cl提取态磷; O-Pi, 无机闭蓄态磷; O-Po, 有机闭蓄态磷; Pi, 总无机磷; Po, 总有机磷; Pt, 总磷。粗体表示对应 p 值达到显著性水平($p < 0.05$)。
L, soil layer; W, warming. Al-Pi, inorganic P associated with aluminum; Al-Po, organic P associated with aluminum; Ca-Pi, inorganic P associated with calcium; Fe-Pi, inorganic P associated with iron; Fe-Po, organic P associated with iron; NH₄Cl-Pi, NH₄Cl extracted P; O-Pi, inorganic occluded P; O-Po, organic occluded P; Pi, total inorganic P; Po, total organic P; Pt, total P. Significant p values ($p < 0.05$) are in bold.

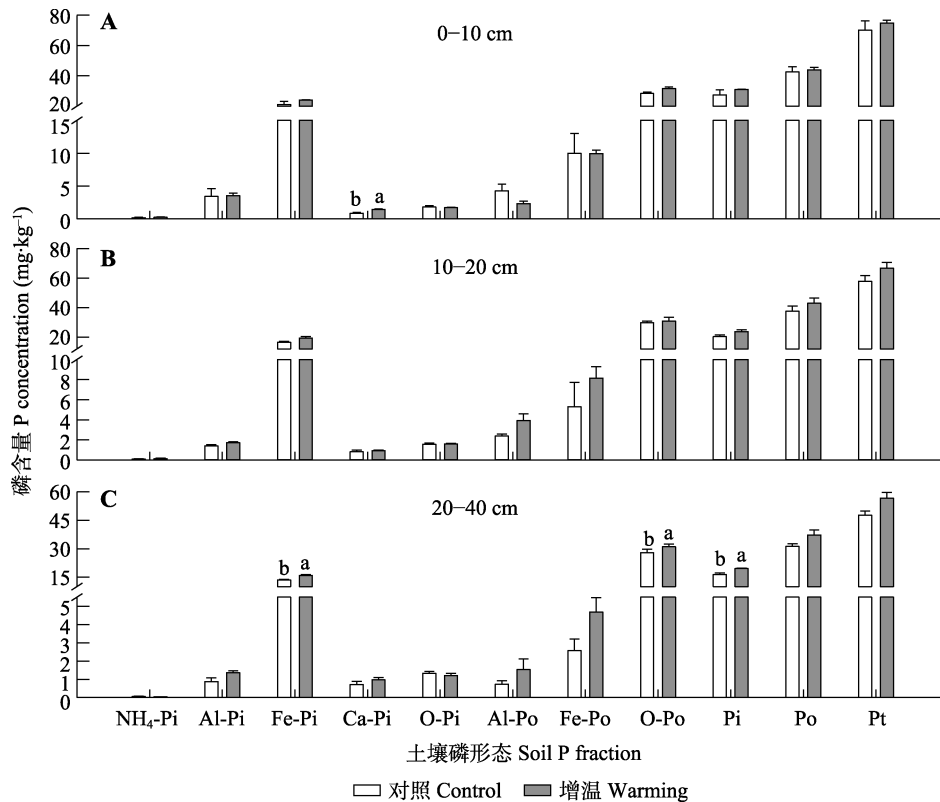


图2 对照和增温处理下亚热带森林每个土层的土壤不同形态磷(P)含量(平均值+标准误, $n = 3$)。Al-Pi, 无机铝磷; Al-Po, 有机铝磷; Ca-Pi, 无机钙磷; Fe-Pi, 无机铁磷; Fe-Po, 有机铁磷; NH_4Cl -Pi, NH_4Cl 提取态磷; O-Pi, 无机闭蓄态磷; O-Po, 有机闭蓄态磷; Pi, 总无机磷; Po, 总有机磷; Pt, 总磷。不同小写字母表示不同处理间差异显著($p < 0.05$)。

Fig. 2 Concentrations of different soil phosphorus (P) fractions of three soil layers under control and warming treatments in south subtropical forests (mean + SE, $n = 3$). Al-Pi, inorganic P associated with aluminum; Al-Po, organic P associated with aluminum; Ca-Pi, inorganic P associated with calcium; Fe-Pi, inorganic P associated with iron; Fe-Po, organic P associated with iron; NH_4Cl -Pi, NH_4Cl extracted P; O-Pi, inorganic occluded P; O-Po, organic occluded P; Pi, total inorganic P; Po, total organic P; Pt, total P. Different lowercase letters indicate significant differences between different treatments ($p < 0.05$).

分别占总磷的25%、40%以上。

2.3 土壤不同磷组分间的相关分析

如表2所示, 有效磷含量与无机态的不同形态磷及Al-Po、Fe-Po含量均显著正相关($p < 0.05$), 其中与Fe-Pi含量的相关性($r = 0.916$)最强, 其次分别为Al-Pi ($r = 0.852$)、O-Pi ($r = 0.738$)、 NH_4Cl -Pi ($r = 0.668$)、Al-Po ($r = 0.667$)和Ca-Pi ($r = 0.536$)含量, 但与O-Po含量没有显著正相关关系($p > 0.05$)。另外, Fe-Pi含量和其他磷组分(O-Po除外)含量均有显著正相关关系($p < 0.05$), 其中与Al-Pi含量的相关性($r = 0.865$)最强, 与O-Pi含量的相关性($r = 0.754$)次之。Al-Po、Fe-Po含量与部分无机磷组分如Al-Pi、Fe-Pi含量显著正相关($p < 0.05$), 然而, O-Po含量与其他形态磷含量均无显著相关关系($p > 0.05$)。

2.4 土壤不同形态磷与有效磷的通径分析

通径分析结果(表3)表明, 各形态磷对有效磷的直接通径系数(D)的绝对值从大到小依次为: Fe-Pi

($D_{3Y} = 0.556$)、Al-Pi ($D_{2Y} = 0.343$)、 NH_4Cl -Pi ($D_{1Y} = 0.166$)、Al-Po ($D_{6Y} = 0.134$)、O-Pi ($D_{5Y} = -0.156$)、O-Po ($D_{8Y} = -0.154$)、Ca-Pi ($D_{4Y} = -0.045$)和Fe-Po ($D_{7Y} = -0.057$)。在所有间接通径系数的绝对值中, 其他各形态磷(O-Po除外)通过Al-Pi和Fe-Pi对有效磷的间接通径系数相对较大, 其中又以Al-Pi通过Fe-Pi对有效磷的间接通径系数(0.481)最大, O-Pi通过Fe-Pi对有效磷的间接通径系数(0.419)次之。

3 讨论

3.1 增温对土壤不同形态磷的影响

增温显著增加了Ca-Pi、Fe-Pi和总无机磷含量($p < 0.05$), 但对其他形态的无机磷、总有机磷及总磷含量没有显著影响(表1; 图2)。我们前期的研究表明, 增温促进有效磷含量增加而使酸性磷酸酶活性下降(Lie *et al.*, 2019)。由于酸性磷酸酶的分泌遵循“经济原则”, 其活性与土壤磷限制程度密切相关,

表2 南亚热带森林土壤不同形态磷(P)含量间的相关系数

Table 2 Correlation coefficients among concentrations of different soil phosphorus (P) fractions in south subtropical forests

	AP	NH ₄ Cl-Pi	Al-Pi	Fe-Pi	Ca-Pi	O-Pi	Al-Po	Fe-Po
NH ₄ Cl-Pi	0.668**							
Al-Pi	0.852**	0.402						
Fe-Pi	0.916**	0.690**	0.865**					
Ca-Pi	0.536*	0.494*	0.556*	0.661**				
O-Pi	0.738**	0.417	0.810**	0.754**	0.428			
Al-Po	0.667**	0.421	0.569*	0.667**	0.136	0.717**		
Fe-Po	0.676**	0.215	0.789**	0.743**	0.394	0.773**	0.609**	
O-Po	0.022	0.007	0.052	0.227	0.217	-0.044	0.129	0.283

Al-Pi, 无机铝磷; Al-Po, 有机铝磷; AP, 有效磷; Ca-Pi, 无机钙磷; Fe-Pi, 无机铁磷; Fe-Po, 有机铁磷; NH₄Cl-Pi, NH₄Cl提取态磷; O-Pi, 无机闭蓄态磷; O-Po, 有机闭蓄态磷; Pi, 总无机磷; Po, 总有机磷; Pt, 总磷。*表示在0.05水平上显著相关; **表示在0.01水平上显著相关。
Al-Pi, inorganic P associated with aluminum; Al-Po, organic P associated with aluminum; AP, available P; Ca-Pi, inorganic P associated with calcium; Fe-Pi, inorganic P associated with iron; Fe-Po, organic P associated with iron; NH₄Cl-Pi, NH₄Cl extracted P; O-Pi, inorganic occluded P; O-Po, organic occluded P; Pi, total inorganic P; Po, total organic P; Pt, total P. * indicates a significant correlation at the 0.05 level; ** indicates a significant correlation at the 0.01 level.

表3 南亚热带森林土壤不同形态磷(P)与有效磷含量的通径分析

Table 3 Path analysis of concentrations of different soil phosphorus (P) fractions to available P concentration in south subtropical forests

因子 Factor	直接通径系数	间接通径系数 Indirect path coefficient							
	Direct path coefficient	$X_1 \rightarrow Y$	$X_2 \rightarrow Y$	$X_3 \rightarrow Y$	$X_4 \rightarrow Y$	$X_5 \rightarrow Y$	$X_6 \rightarrow Y$	$X_7 \rightarrow Y$	$X_8 \rightarrow Y$
$X_1 \rightarrow$	0.166		0.138	0.384	-0.022	-0.065	0.056	-0.012	-0.001
$X_2 \rightarrow$	0.343	0.067		0.481	-0.025	-0.126	0.076	-0.045	-0.008
$X_3 \rightarrow$	0.556	0.115	0.297		-0.030	-0.118	0.089	-0.042	-0.035
$X_4 \rightarrow$	-0.045	0.082	0.191	0.378		-0.067	0.018	-0.022	-0.033
$X_5 \rightarrow$	-0.156	0.069	0.278	0.419	-0.019		0.096	-0.044	0.007
$X_6 \rightarrow$	0.134	0.070	0.195	0.371	-0.006	-0.112		-0.035	-0.020
$X_7 \rightarrow$	-0.057	0.035	0.271	0.413	-0.018	-0.121	0.082		-0.044
$X_8 \rightarrow$	-0.154	0.001	0.018	0.126	-0.010	0.007	0.017	-0.016	

剩余通径系数(P_e) = 0.102, 决定系数(R^2) = 0.898。X₁、X₂、X₃、X₄、X₅、X₆、X₇、X₈、Y分别代表NH₄Cl-Pi (NH₄Cl提取态磷)、Al-Pi (无机铝磷)、Fe-Pi (无机铁磷)、Ca-Pi (无机钙磷)、O-Pi (无机闭蓄态磷)、Al-Po (有机铝磷)、Fe-Po (有机铁磷)、O-Po (有机闭蓄态磷)和AP (有效磷)含量。

Residual path coefficient (P_e) = 0.102, determination coefficient (R^2) = 0.898. X₁, X₂, X₃, X₄, X₅, X₆, X₇, X₈ and Y represent NH₄Cl-Pi (NH₄Cl extracted P), Al-Pi (inorganic P associated with aluminum), Fe-Pi (inorganic P associated with iron), Ca-Pi (inorganic P associated with calcium), O-Pi (inorganic occluded P), Al-Po (organic P associated with aluminum), Fe-Po (organic P associated with iron), O-Po (organic occluded P), Pi (total inorganic P), Po (total organic P), Pt (total P) and AP (available P) concentration, respectively.

当磷限制得到缓和, 酸性磷酸酶活性可能会随之下降, 反之则增大(Allison & Vitousek, 2005)。磷酸酶活性下降可能会导致微生物对有机磷的矿化作用减弱, 因此, 在本研究中, 增温促进有效磷含量增加的主要原因可能不是微生物对有机磷的矿化作用。结合前期研究结果, 增温可能增大了凋落物磷对土壤磷的输入, 还可能强化了土壤磷的吸附和沉淀过程, 使得更多进入到土壤的溶解态磷转化为Ca-Pi、Fe-Pi等缓效磷源。缓效磷源通过解吸附或溶解过程, 可持续转化为溶解态磷(Sims & Pierzynski, 2005), 是土壤有效磷库的重要来源。

铁磷是指与铁氧化物或者氢氧化物相结合形成的磷, 易受氧化还原条件等的影响, 在土壤磷循环

转化过程中发挥着重要作用(赵双菊等, 2018)。土壤中铁氧化物组分是影响土壤对磷的吸附固定能力的重要因素, 其还原和溶解过程可把吸附和闭蓄的磷释放出来(闫金龙, 2016)。高度风化的土壤在增温后, 铁氧化物会增加, 因为温度的增加能有效促进化学风化以及游离铁的富集(龙晓泳, 2011); 同时, 磷的吸附过程为吸热效应, 增温有利于反应的进行, 使得土壤对磷的吸附强度和吸附量增大(杜建军等, 1993; 苏莹莹, 2012), 因此, 在增温条件下更多的磷会被铁氧化物吸附(Siebers *et al.*, 2017), 本研究发现的增温促进土壤Fe-Pi含量显著增加的结果(表2)与之一致。

钙磷主要包括有效磷源磷酸二钙型(Ca₂-P)、缓

效磷源磷酸八钙型($\text{Ca}_8\text{-P}$)和迟效磷源磷酸十钙型($\text{Ca}_{10}\text{-P}$)(顾益初和钦绳武, 1997)。本研究中 Ca-Pi 主要指 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 和 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ (蒋柏藩和顾益初, 1989)。有研究表明, 施入潮土的溶解态磷肥在短时期内(约一个生长季节)主要转化为 $\text{Ca}_2\text{-P}$, 继而向 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 和 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 转化, 而 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 由于是迟效磷源磷灰石, 在相当长的时间内较为稳定, 没有明显变化(顾益初和钦绳武, 1997)。前期研究结果表明, 增温促进凋落物磷含量增加(Lie *et al.*, 2019), 这部分磷经微生物矿化后, 可使土壤溶解态磷增加, 同时增温可促进溶解态磷与碳酸钙发生吸附沉淀, 产生更多的 $\text{Ca}_8\text{-P}$ (王涛等, 2010), 本研究结果中增温促进表层土(0–10 cm)的 Ca-Pi 含量增加(图1)与之一致。另外, 增温引起的土壤水分减少(图1), 不利于磷组分在土壤中的迁移和扩散(Dijkstra *et al.*, 2012), 可减少表层土 Ca-Pi 的淋溶和地表径流损失(Zhu *et al.*, 2018)。

NH_4Cl 提取态磷包含溶解态磷和弱吸附态磷(McDowell & Condron, 2000)。本研究结果表明, 增温后 $\text{NH}_4\text{Cl-Pi}$ 含量没有发生显著变化(图1), 这可能是因为增温对吸附和解吸附作用均有促进作用(Barrow, 2015), 使得增温后的弱吸附态磷和溶解态磷仍处于动态平衡。

闭蓄态磷由于是被氧化铁胶膜包被的磷酸盐, 在除去外层铁质包膜前, 很难发挥其效用, 因此是最难被植物吸收利用的磷形态(张林等, 2009)。王涛等(2010)研究不同培养温度和时间对磷肥在黑土中的转化的影响, 发现闭蓄态磷在所有处理中形成的量均小于1%, 这说明磷肥施入土壤后向闭蓄态磷转化的速率很慢。因此, 增温对闭蓄态磷的形成和转化的影响可能十分微弱, 使之表现为没有显著变化(表2)。

3.2 土壤不同形态磷与有效磷的相关关系及通径分析

一般认为, 土壤有效磷和某种形态的磷组分相关关系愈显著, 该形态磷的相对有效性就愈高(杨小燕, 2016), 但是由于各形态磷组分间存在不同程度的相关关系, 且其在土壤中的含量各不相同, 因此, 简单相关分析不能比较各磷组分对有效磷的贡献大小和方式, 而应用通径分析可以将因变量与自变量的相互影响(相关系数)分解为直接影响(直接通径系数)和间接影响(间接通径系数), 能进一步解释土壤各形态磷对有效磷的贡献大小和方式(孙倩倩

等, 2012)。

直接通径系数与相关系数有很大不同, 甚至符号相反, 如 Ca-Pi 对土壤有效磷的直接贡献为负效应, 但是它们通过 Al-Pi 、 Fe-Pi 对有效磷的较大的间接正效应, 使得它们与有效磷含量呈显著正相关关系(表2, 表3), 这说明 Ca-Pi 可能主要通过向 Al-Pi 和 Fe-Pi 进行转化以补充有效磷。此外, 尽管 Al-Po 与有效磷含量呈显著正相关关系($r = 0.667$), 但是 Al-Po 对有效磷的直接贡献($D_{6Y} = 0.134$)较小, 而其通过 Al-Pi 和 Fe-Pi 对有效磷的间接正效应较大(表2, 表3), 这说明土壤微生物的矿化作用对有效磷的形成有一定贡献。

直接通径系数的绝对值越大, 说明该形态磷组分对有效磷含量的直接影响越大。从土壤各磷组分对有效磷的直接通径系数(表3)可以看出, Fe-Pi 对土壤有效磷的直接通径系数的绝对值最大($D_{3Y} = 0.556$), Al-Pi ($D_{2Y} = 0.343$)次之, 而其他磷组分的直接通径系数的绝对值均在0.2以下, 说明 Fe-Pi 是有效磷增加最重要的直接贡献磷组分; 此外, 与 Al-Pi 或 Fe-Pi 相关的间接通径系数相对较大, 表明 Al-Pi 、 Fe-Pi 是土壤磷转化过程中的重要中间过渡性磷组分。在自然状态下, 土壤中无机态的 Al-P 会逐渐向 Fe-P 转化(孙桂芳等, 2011)。此外, Al-Pi 在总磷的占比(小于5%)远小于 Fe-Pi 的占比(大于25%, 图2)。因此, 相比其他磷组分, Fe-Pi 对调控亚热带森林土壤磷循环起到最为重要的作用, 可能成为亚热带森林在气候变暖背景下最重要的有效磷来源。

4 结论

增温使亚热带森林土壤 Ca-Pi 、 Fe-Pi 和总无机磷含量增加, 但对有机磷组分均无显著影响。土壤不同形态磷与有效磷含量的相关分析表明, 有效磷含量与无机态的不同形态磷及 Al-Po 、 Fe-Po 含量均显著正相关, 其中与 Fe-Pi 含量的相关性最强。进一步通过通径分析发现, Al-Pi 、 Fe-Pi 是土壤磷转化过程中的重要中间过渡性磷组分, 且 Fe-Pi 是促进有效磷增加最重要的直接贡献磷组分。结合前期研究结果, 增温可能增大了凋落物磷对土壤磷的输入, 还可能强化了土壤的吸附和沉淀过程, 使得更多进入到土壤的溶解态磷转化为 Ca-Pi 、 Fe-Pi 等缓效磷源, 其中 Fe-Pi 可能成为亚热带森林在气候变暖背景下最重要的有效磷来源。

致谢 感谢广州市民生科技攻关项目(201903010021)的资助。

参考文献

- Allison SD, Vitousek PM (2005). Responses of extracellular enzymes to simple and complex nutrient inputs. *Soil Biology & Biochemistry*, 37, 937-944.
- Barrow NJ (2015). A mechanistic model for describing the sorption and desorption of phosphate by soil. *European Journal of Soil Science*, 66, 9-18.
- Bei ZX, Zhang QF, Zheng W, Yang LM, Chen YM, Yang YS (2018). Effects of simulated warming on soil phosphorus availability in subtropical Chinese fir plantation. *Acta Ecologica Sinica*, 38, 1106-1113. [贝昭贤, 张秋芳, 郑蔚, 杨柳明, 陈岳民, 杨玉盛 (2018). 模拟增温对中亚热带杉木人工林土壤磷有效性的影响. 生态学报, 38, 1106-1113.]
- Chen H, Dong S, Liu L, Ma C, Zhang T, Zhu X, Mo J (2013). Effects of experimental nitrogen and phosphorus addition on litter decomposition in an old-growth tropical forest. *PLOS ONE*, 8, e84101. DOI: 10.1371/journal.pone.0084101.
- Chen ML, Chen H, Mao QG, Zhu XM, Mo JM (2016). Effect of nitrogen deposition on the soil phosphorus cycle in forest ecosystems: a review. *Acta Ecologica Sinica*, 36, 4965-4976. [陈美领, 陈浩, 毛庆功, 朱晓敏, 莫江明 (2016). 氮沉降对森林土壤磷循环的影响. 生态学报, 36, 4965-4976.]
- Clark DA, Brown S, Kicklighter DW, Chambers JQ, Thomlinson JR, Ni J, Holland EA (2001). Net primary production in tropical forests: an evaluation and synthesis of existing field data. *Ecological Applications*, 11, 371-384.
- Dijkstra FA, Pendall E, Morgan JA, Blumenthal DM, Carrillo Y, LeCain DR, Follett RF, Williams DG (2012). Climate change alters stoichiometry of phosphorus and nitrogen in a semiarid grassland. *New Phytologist*, 196, 807-815.
- Doolette AL, Smernik RJ (2011). Soil organic phosphorus speciation using spectroscopic techniques//Bünemann EK, Oberson A, Frossard E. *Phosphorus in Action*. Springer, Berlin. 3-36.
- Du JJ, Chen ZW (2010). Method of path analysis with SPSS linear regression. *Bulletin of Biology*, 45(2), 4-6. [杜家菊, 陈志伟 (2010). 使用SPSS线性回归实现通径分析的方法. 生物学通报, 45(2), 4-6.]
- Du JJ, Zhang YP, Bai JL, Yin ZP (1993). Study on characteristics of phosphorus adsorption and temperature effect in several soils in Shaanxi. *Chinese Journal of Soil Science*, 24(6), 241-243. [杜建军, 张一平, 白锦麟, 尹志鹏 (1993). 陕西几种土壤磷吸附特征及温度效应的研究. 土壤通报, 24(6), 241-243.]
- Fisk M, Santangelo S, Minick K (2015). Carbon mineralization is promoted by phosphorus and reduced by nitrogen addition in the organic horizon of northern hardwood forests. *Soil Biology & Biochemistry*, 81, 212-218.
- Gu YC, Qin SW (1997). Accumulation, transformation and availability of phosphorus in fluvoaquic soil under long-term application of phosphate fertilizer. *Soil*, 29(1), 13-17. [顾益初, 钦绳武 (1997). 长期施用磷肥条件下潮土中磷素的积累、形态转化和有效性. 土壤, 29(1), 13-17.]
- Hou E, Chen C, Luo Y, Zhou G, Kuang Y, Zhang Y, Heenan M, Lu X, Wen D (2018). Effects of climate on soil phosphorus cycle and availability in natural terrestrial ecosystems. *Global Change Biology*, 24, 3344-3356.
- Hou E, Chen C, McGroddy ME, Wen D (2012). Nutrient limitation on ecosystem productivity and processes of mature and old-growth subtropical forests in China. *PLOS ONE*, 7, e52071. DOI: 10.1371/journal.pone.0052071.
- Jia G, Shevliakova E, Artaxo P, De Noblet-Ducoudre N, Houghton R, House J, Kitajima K, Lennard C, Popp A, Sirin A, Sukumar R, Verchot L (2019). Land-climate interactions//Shukla PR, Skea J, Calvo Buendia E, Masson-Delmotte V, Pörtner HO, Roberts DC, Zhai P, Slade R, Connors S, van Diemen R, Ferrat M, Haughey E, Luz S, Neogi S, Pathak M, et al. *Climate Change and Land: An IPCC Special Report on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse Gas Fluxes in Terrestrial Ecosystems*. Cambridge University Press, Cambridge, UK. 1-11.
- Jiang BF, Gu YC (1989). A suggested fractionation scheme of inorganic phosphorus in calcareous soils. *Scientia Agricultura Sinica*, 22, 58-66. [蒋柏藩, 顾益初 (1989). 石灰性土壤无机磷分级体系的研究. 中国农业科学, 22, 58-66.]
- Jiang Y, Rocha AV, Rastetter EB, Shaver GR, Mishra U, Zhuang Q, Kwiatkowski BL (2016). C-N-P interactions control climate driven changes in regional patterns of C storage on the North Slope of Alaska. *Landscape Ecology*, 31, 195-213.
- Lie ZY, Lin W, Huang WJ, Fang X, Huang CM, Wu T, Chu GW, Liu SZ, Meng Z, Zhou GY, Liu JX (2019). Warming changes soil N and P supplies in model tropical forests. *Biology and Fertility of Soils*, 55, 751-763.
- Liu JX, Li YL, Liu SZ, Li YY, Chu GW, Meng Z, Zhang DQ (2013). An introduction to an experimental design for studying effects of air temperature rise on model forest ecosystems. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 37, 558-565. [刘菊秀, 李跃林, 刘世忠, 李义勇, 褚国伟, 孟泽, 张德强 (2013). 气温上升对模拟森林生态系统影响实验的介绍. 植物生态学报, 37, 558-565.]
- Liu X, Yang Z, Lin C, Giardina CP, Xiong D, Lin W, Chen S, Xu C, Chen G, Xie J, Li Y, Yang Y (2017). Will nitrogen

- deposition mitigate warming-increased soil respiration in a young subtropical plantation? *Agricultural and Forest Meteorology*, 246, 78-85.
- Long XY (2011). *Climatic Response of Pedogenic Iron Oxides in Subtropical and Tropical Regions*. PhD dissertation, Nanjing University, Nanjing. 121-122. [龙晓泳 (2011). 热带亚热带表生铁氧化物的气候响应研究. 博士学位论文, 南京大学, 南京. 121-122.]
- McDowell RW, Condron LM (2000). Chemical nature and potential mobility of phosphorus in fertilized grassland soils. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 57, 225-233.
- Mei LL, Yang X, Zhang SQ, Zhang T, Guo JX (2019). Arbuscular mycorrhizal fungi alleviate phosphorus limitation by reducing plant N:P ratios under warming and nitrogen addition in a temperate meadow ecosystem. *Science of the Total Environment*, 686, 1129-1139.
- Reed SC, Yang X, Thornton PE (2015). Incorporating phosphorus cycling into global modeling efforts: a worthwhile, tractable endeavor. *New Phytologist*, 208, 324-329.
- Ren ZW, Wu JM, Shi PP, Zhou CF (2017). Research progress on phosphorus chemical behavior and influencing factors in red soil. *Inner Mongolia Forestry Investigation and Design*, 40, 100-104. [任子文, 吴佳美, 石佩佩, 周垂帆 (2017). 红壤磷素化学行为及影响因素研究进展. 内蒙古林业调查设计, 40, 100-104.]
- Rui YC, Wang YF, Chen CR, Zhou XQ, Wang SP, Xu ZH, Duan JC, Kang XM, Lu SB, Luo CY (2012). Warming and grazing increase mineralization of organic P in an alpine meadow ecosystem of Qinghai-Tibet Plateau, China. *Plant and Soil*, 357, 73-87.
- Santos F, Abney R, Barnes M, Bogie N, Ghezzehei TA, Jin L, Moreland K, Sulman BN, Berhe AA (2019). The role of the physical properties of soil in determining biogeochemical responses to soil warming//Mohan JE. *Ecosystem Consequences of Soil Warming*. Academic Press, Salt Lake City, USA. 209-244.
- Schreeg LA, Mack MC, Turner BL (2013). Leaf litter inputs decrease phosphate sorption in a strongly weathered tropical soil over two time scales. *Biogeochemistry*, 113, 507-524.
- Siebers N, Sumann M, Kaiser K, Amelung W (2017). Climatic effects on phosphorus fractions of native and cultivated North American grassland soils. *Soil Science Society of America Journal*, 81, 299-309.
- Sims JT, Pierzynski GM (2005). Chemistry of phosphorus in soils//Tabatabai MA, Sparks DL. *Chemical Processes in Soils*. Soil Science Society of America, Madison, USA. 151-192.
- Spohn M, Schleuss PM (2019). Addition of inorganic phosphorus to soil leads to desorption of organic compounds and thus to increased soil respiration. *Soil Biology & Biochemistry*, 130, 220-226.
- Su YY (2012). *Study on the Spatial-temporal Variability of Phosphorus and Soil Adsorption in Forest Belt Surrounding Taihu Lake*. Master degree dissertation, Nanjing Forestry University, Nanjing. 4-5. [苏莹莹 (2012). 环太湖林带磷素时空变异及土壤吸附作用研究. 硕士学位论文, 南京林业大学, 南京. 4-5.]
- Sun GF, Jin JY, Shi YL (2011). Research advance on soil phosphorus forms and their availability to crops in soil. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, (2), 1-9. [孙桂芳, 金继运, 石元亮 (2011). 土壤磷素形态及其生物有效性研究进展. 中国土壤与肥料, (2), 1-9.]
- Sun QQ, Wang ZY, Zhao H, Wang XJ, Lv HF, Chen Y (2012). Effect of site-specific fertilization on soil phosphorus in purple garden soil. *Acta Ecologica Sinica*, 32, 2539-2549. [孙倩倩, 王正银, 赵欢, 王小晶, 吕慧峰, 陈怡 (2012). 定位施肥对紫色菜园土磷素状况的影响. 生态学报, 32, 2539-2549.]
- Sun Y, Peng S, Goll DS, Ciais P, Guenet B, Guimberteau M, Hinsinger P, Janssens IA, Peñuelas J, Piao S, Poulter B, Violette A, Yang X, Yin Y, Zeng H (2017). Diagnosing phosphorus limitations in natural terrestrial ecosystems in carbon cycle models. *Earth's Future*, 5, 730-749.
- Tang CD, Guo JF, Zhang Z, Cai XZ, Yang YS (2017). Effects of soil warming and precipitation exclusion on soil nutrients and microbial biomass in young Chinese fir plantation. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 12, 40-45. [唐偲頔, 郭剑芬, 张政, 蔡小真, 杨玉盛 (2017). 增温和隔离降雨对杉木幼林土壤养分和微生物生物量的影响. 亚热带资源与环境学报, 12, 40-45.]
- Vitousek PM, Howarth RW (1991). Nitrogen limitation on land and in the sea: How can it occur? *Biogeochemistry*, 13, 87-115.
- Vitousek PM, Porder S, Houlton BZ, Chadwick OA (2010). Terrestrial phosphorus limitation: mechanisms, implications, and nitrogen-phosphorus interactions. *Ecological Applications*, 20, 5-15.
- Wang H, Liu S, Schindlbacher A, Wang J, Yang Y, Song Z, You Y, Shi Z, Li Z, Chen L, Ming A, Lu L, Cai D (2019). Experimental warming reduced topsoil carbon content and increased soil bacterial diversity in a subtropical planted forest. *Soil Biology & Biochemistry*, 133, 155-164.
- Wang T, Zhou JM, Wang HY, Du CW, Chen XQ (2010). Influences of temperature and duration of incubation on transformation of phosphate fertilizers in black soil. *Acta Pedologica Sinica*, 47, 1188-1193. [王涛, 周健民, 王火焰, 杜昌文, 陈小琴 (2010). 培养温度和时间对磷肥在黑土中转化的影响. 土壤学报, 47, 1188-1193.]
- Wang XT, Guo WD, Zhong Z, Cui XY (2009). Long term trends of soil moisture and temperature change in East China in relationship with climate background. *Advances in Earth Science*, 24, 181-191. [王晓婷, 郭维栋, 钟中, 崔晓燕 (2009). 中国东部土壤温度、湿度变化的长期趋

- 势及其与气候背景的联系. 地球科学进展, 24, 181-191.]
- Wu T, Liu SZ, Lie ZY, Zheng MH, Duan HL, Chu GW, Meng Z, Zhou GY, Liu JX (2020). Divergent effects of a 6-year warming experiment on the nutrient productivities of subtropical tree species. *Forest Ecology and Management*, 461, 117952. DOI: 10.1016/j.foreco.2020.117952.
- Xiao HL, Zheng XJ (2000). Effects of soil warming on some soil chemical properties. *Soil and Environmental Sciences*, 9, 316-321. [肖辉林, 郑习健 (2000). 土壤温度上升对某些土壤化学性质的影响. 土壤与环境, 9, 316-321.]
- Yan JL (2016). *Study on the Adsorption of Iron Oxide-organic Matter Complex on Phosphorus and Its Regulation Effects on Phosphorus Fraction*. PhD dissertation, Southwest University, Chongqing. 4-5. [闫金龙 (2016). 铁氧化物-有机质复合物对磷的吸附与形态调控效应研究. 博士学位论文, 西南大学, 重庆. 4-5.]
- Yan YP (2015). *Adsorption, Desorption and Precipitation of Several Soil Organic Phosphates on Iron and Aluminum (Oxyhydr) Oxide*. PhD dissertation, Huazhong Agricultural University, Wuhan. 2-4. [严玉鹏 (2015). 几种土壤有机磷在铁铝氧化物表面的吸附、解吸与沉淀. 博士学位论文, 华中农业大学, 武汉. 2-4.]
- Yang LM, Yang ZJ, Peng YZ, Lin YY, Xiong DC, Li YQ, Yang YS (2019). Evaluating P availability influenced by warming and N deposition in a subtropical forest soil: a bioassay mesocosm experiment. *Plant and Soil*, 444, 87-99.
- Yang XY (2016). *Effect of Organic Acids on Black Soil Phosphorus Fractionations and Phosphorus Availability*. PhD dissertation, Northeast Forestry University, Harbin. 15-16.
- [杨小燕 (2016). 外源有机酸对黑土土壤磷形态及有效性的影响. 博士学位论文, 东北林业大学, 哈尔滨. 15-16.]
- Zhang GQ (2014). *Effects of Different Forms of P Fertilizer and Its Supply Strategy on Soil P Availability and P Utilization Efficiency on Calcareous Soil*. Master degree dissertation, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang. 5-6. [张国桥 (2014). 不同磷源及其施用方式对石灰性土壤磷的有效性及其与磷肥利用效率的影响. 硕士学位论文, 石河子大学, 新疆石河子. 5-6.]
- Zhang L, Wu N, Wu Y, Luo P, Liu L, Chen WN, Hu HY (2009). Soil phosphorus form and fractionation scheme: a review. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 20, 1775-1782. [张林, 吴宁, 吴彦, 罗鹏, 刘琳, 陈文年, 胡红宇 (2009). 土壤磷素形态及其分级方法研究进展. 应用生态学报, 20, 1775-1782.]
- Zhao SJ, Qi WX, Li J, Gang DG, Ran YZ (2018). Impact of water level on phosphorus flux in water level fluctuating zone at Miyun Reservoir. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 38, 2400-2408. [赵双菊, 齐维晓, 李静, 钢迪嘎, 冉韵竹 (2018). 水位对密云水库消落区土壤磷通量影响的模拟研究. 环境科学学报, 38, 2400-2408.]
- Zhu J, Li M, Whelan M (2018). Phosphorus activators contribute to legacy phosphorus availability in agricultural soils: a review. *Science of the Total Environment*, 612, 522-537.

责任编辑: 吕晓涛 编辑: 赵航