

DOI: 10.5846/stxb202005271368

陈健, 刘顺, 史作民, 赵广东. 川西亚高山三种森林恢复途径对土壤生物有效磷的影响. 生态学报, 2021, 41(7): 2698-2708.

Chen J, Liu S, Shi Z M, Zhao G D. Effects of three forest restoration pathways on soil biologically based phosphorus in the subalpine of western Sichuan. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(7): 2698-2708.

川西亚高山三种森林恢复途径对土壤生物有效磷的影响

陈 健^{1,2}, 刘 顺^{1,2}, 史作民^{1,2,3,*}, 赵广东^{1,2}

1 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 国家林业和草原局森林生态环境重点实验室, 北京 100091

2 四川米亚罗森林生态系统定位观测研究站, 阿坝藏族羌族自治州 623100

3 南京林业大学南方现代林业协同创新中心, 南京 210037

摘要: 土壤生物有效磷在提高森林生产力和生物地球化学循环中起着至关重要的作用, 研究不同森林恢复途径对土壤生物有效磷的影响对于退化森林的适应性恢复和可持续经营具有重要意义。选取川西亚高山不同恢复途径下形成的 3 种森林类型, 即粗枝云杉人工林 (人工种植, PF)、岷江冷杉-红桦天然次生林 (自然更新, NF) 和粗枝云杉阔叶混交林 (人工种植后自然更新, MF), 采用基于生物有效性的土壤磷分级方法测定土壤生物有效磷 ($\text{CaCl}_2\text{-P}$ 、Citrate-P、Enzyme-P 和 HCl-P), 探究不同森林恢复途径对土壤生物有效磷的影响。结果表明: 不同森林恢复途径对土壤生物有效磷影响显著 ($P < 0.05$), NF 和 MF 的土壤 Citrate-P 和 Enzyme-P 显著高于 PF ($P < 0.05$), 而 PF 的土壤 HCl-P 显著高于 NF ($P < 0.05$)。自然更新是 3 种森林恢复途径中最能提高土壤生物有效磷的方式。3 种森林恢复途径下的土壤生物有效磷组分与速效磷均呈现显著的正相关关系, 且 NF 的土壤速效磷与生物有效磷的相关性更强 ($\text{CaCl}_2\text{-P}$ 除外)。显著影响 NF 土壤生物有效磷的土壤理化性质有全钾、铵态氮含量和 pH 值, 且全钾对 NF 的土壤生物有效磷变异的解释程度最高 ($r^2 = 0.63$, $P = 0.001$)。土壤 pH 值、钙和可溶性有机碳含量是显著影响 MF 土壤生物有效磷的主要土壤理化性质 ($P < 0.05$)。对 PF 的土壤生物有效磷具有显著影响的土壤理化性质是土壤有机碳、铁和可溶性有机碳含量。土壤理化性质对 3 种恢复途径下森林土壤生物有效磷的解释率均超过了 80%, 森林恢复途径对土壤生物有效磷的影响与土壤理化性质有关。

关键词: 生物有效磷; 速效磷; 森林土壤; 恢复途径; 亚高山

Effects of three forest restoration pathways on soil biologically based phosphorus in the subalpine of western Sichuan

CHEN Jian^{1,2}, LIU Shun^{1,2}, SHI Zuomin^{1,2,3,*}, ZHAO Guangdong^{1,2}

1 Key Laboratory of Forest Ecology and Environment of National Forestry and Grassland Administration, Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

2 Miyaluo Research Station of Alpine Forest Ecosystem, Aba 623100, China

3 Co-Innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China

Abstract: Soil biologically based phosphorus plays a vital role in improving forest productivity and in biogeochemical cycles. It is very important to study the effects of different forest restoration pathways on soil biologically based phosphorus for the adaptive restoration and sustainable management of the degraded forests. In this study, we determined the soil biologically based phosphorus ($\text{CaCl}_2\text{-P}$, Citrate-P, Enzyme-P, and HCl-P) under three restoration pathways of subalpine forests, i.

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFC0502104-02); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目 (CAFYBB2018ZA003)

收稿日期: 2020-05-27; **网络出版日期:** 2021-01-27

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: shizm@caf.ac.cn

e., *Picea asperata* plantation forest (artificial planting, PF), *Abies faxoniana*-*Betula albosinensis* natural secondary forest (natural without assisted regeneration, NF), and *P. asperata*/mixed broadleaf forest (natural regeneration after artificial planting, MF), in western Sichuan by using biologically based phosphorus (BBP) method. The results showed that different forest restoration pathways had significant effects on soil biologically based phosphorus ($P < 0.05$). Soil Citrate-P and Enzyme-P of NF and MF were significantly higher than those of PF ($P < 0.05$), while soil HCl-P of PF was significantly higher than that of NF ($P < 0.05$). The natural regeneration is the best way for improving soil biologically based phosphorus among the three forest restoration pathways in subalpine of western Sichuan. The four soil biologically based phosphorus fractions under the three forest restoration pathways showed significantly positive correlation with soil available phosphorus, and the correlations between soil available phosphorus and biologically based phosphorus (except $\text{CaCl}_2\text{-P}$) in NF were stronger. The soil physicochemical properties, including total potassium content, ammonium nitrogen, and pH value, significantly affected soil biologically based phosphorus in NF with the highest degree of interpretation by total potassium content ($r^2 = 0.63$, $P = 0.001$). Soil pH value, calcium content and soluble organic carbon content were the main soil physicochemical properties that significantly affected soil biologically based phosphorus in MF ($P < 0.05$). Soil physicochemical properties that had significant impacts on soil biologically based phosphorus in PF were the content of soil organic carbon, iron, and soluble organic carbon. The interpretation rate of soil physicochemical properties to forest soil biologically based phosphorus under the three restoration pathways exceeded 80%. The effect of forest restoration pathways on soil biologically based phosphorus is related to soil physicochemical properties.

Key Words: biologically based phosphorus; available phosphorus; forest soil; restoration pathways; subalpine

土壤磷素有效性是森林生态系统磷循环的关键,其决定了可供植物直接或间接吸收利用的磷含量,在提高森林生产力和生物地球化学循环中发挥着重要作用^[1]。森林生态系统磷循环过程主要包括磷的输入、磷在生态系统中的迁移转化以及磷的输出^[2]。森林土壤的磷主要来源于磷矿物的风化作用、生物残体和根系分泌物等,地表径流和大气沉降等来源较少^[3-4]。由于磷在土壤中具有溶解性低以及移动性差等特点,导致磷的输出量通常很低。因此,森林生态系统中的磷循环主要是生态系统内土壤-植物之间的生物化学循环,这一循环转化过程主要由土壤物理、化学、生物过程以及植物自身的遗传特性共同控制^[5]。森林砍伐后森林生态系统磷循环受到很大影响^[6-7],不同森林恢复途径往往会引起植被^[8]、土壤性质^[9]和凋落物^[10]的变化,这些变化导致土壤中有有机磷的矿化分解、无机磷的吸附与解吸附、沉淀与溶解等过程发生不同程度的改变,进而影响土壤磷素有效性,而土壤磷素有效性对于植物的生长至关重要^[11]。因此,探究不同森林恢复途径对土壤磷素有效性的影响对了解植被生长与生态系统功能发挥具有重要意义。

评价森林恢复途径对土壤磷素有效性的影响关键在于土壤磷组分的分级^[11],以往针对森林恢复途径对土壤磷素有效性影响的研究主要采用 Hedley 等^[12]提出的连续浸提法进行土壤磷组分的分级测定,但森林砍伐后采用何种恢复途径更加有利于提高土壤磷素有效性还存在争议。Yang 等^[13]的研究表明,原始林砍伐后采用人工恢复的方式更新有可能导致土壤磷组分含量的变化,且天然次生林土壤磷组分含量显著高于人工林。热带雨林原始林转化为人工林显著降低了土壤磷组分含量,但与天然次生林土壤磷组分含量间差异不显著^[14]。Redel 等^[15]的研究发现,原始林与天然次生林的 $\text{NaHCO}_3\text{-Pi}$ 和 NaOH-Pi 等土壤磷组分差异不显著,说明采用自然更新的恢复途径有利于保持土壤磷素有效性。不同的是,曾晓敏等^[16]在中亚热带地区的研究表明原始林砍伐后人工促进自然更新的恢复途径更有利于森林土壤磷的储存、供应和土壤性质的改善^[17]。Hedley 等^[12]提出的土壤磷分级方法过程繁琐、耗时长、成本高且未能充分体现土壤根际过程在磷矿化利用中的作用^[18],并且有研究结果表明, Hedley 分级法提取的磷组分与植物磷的吸收没有显著关系^[19]。Deluca 等^[20]开发的土壤生物有效磷(biologically based phosphorus, BBP)分级方法有效地弥补了上述不足,该方法简单而廉价,并且捕捉到了根际过程(例如有机酸、质子和胞外酶的分泌)激活的磷在向植物供应磷素的潜在重

要性,极大地提高了理解复杂景观中土壤磷素状况变化的能力。近年来基于 BBP 方法对土壤生物有效磷的研究已应用于森林^[21-24]、湿地^[25]、荒漠^[26]、农田^[27-29]等生态系统类型,其中在森林生态系统中的研究主要侧重于添加实验^[22-23]、不同林龄^[24]和树种丰富度^[25]等对土壤生物有效磷的影响,而不同森林恢复途径对土壤生物有效磷的影响研究尚未见报道。

位于青藏高原东南缘的川西亚高山林区,不但是我国西南林区的主体,同时也是长江上游重要的水源涵养地和生态屏障^[30]。该区在 20 世纪中后期经历了不同程度的砍伐破坏,其后进行了天然更新、人工造林、人工造林和天然更新相结合等多种恢复方式,从而形成了多种森林类型共存的景观^[31]。经过不同恢复途径形成的森林类型在物种组成、凋落物以及土壤性质等方面发生了改变^[32],而这种变化对土壤生物有效磷的影响尚不明晰。本文选择川西亚高山不同恢复途径形成的 3 种森林类型,旨在研究不同森林恢复途径对土壤生物有效磷的影响,并探讨不同恢复途径下土壤生物有效磷的主要影响因素,以期对川西亚高山退化森林的适应性恢复和可持续经营提供科学参考。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究地点位于四川米亚罗自然保护区的毕棚沟区域(102°53′—102°57′E, 31°14′—31°19′N),海拔 2458—4619 m,属于青藏高原-四川盆地的过渡地带。年平均气温 2.7 °C,年平均降雨量为 850 mm 且主要集中在生长季^[33]。研究区内主要原生森林类型为亚高山原始暗针叶林^[34]。20 世纪 50—80 年代,以冷杉(*Abies* sp.)为优势树种的原始暗针叶林被大面积的采伐利用,之后进行了以云杉(*Picea* sp.)为主的人工更新,同时部分地区存在以桦木(*Betula* sp.)等阔叶先锋树种为主的天然更新^[35]。天然林资源保护工程启动后该区森林禁伐封育,现已形成人工林、天然次生林以及人工和天然更新共同作用形成的林分镶嵌分布^[36]。土壤为山地棕壤,石砾含量较多^[37]。

1.2 样地设置

分别选取天然更新形成的岷江冷杉(*A. faxoniana*)-红桦(*B. albosinensis*)天然次生林(NF)、人工种植粗枝云杉(*P. asperata*)后经过天然更新形成的粗枝云杉阔叶混交林(MF)和人工种植的粗枝云杉人工林(PF)作为研究对象。经过全面踏查,在 2900—3000 m 海拔范围内选择东南坡向、林龄约 30 a 的 3 种森林类型,各设置 3 块 20 m×20 m 的样地作为重复,进行样地群落调查,记录样地地形因子、物种名以及树高、胸径等信息,详细的林分特征和立地因子见 Liu 等^[32]。

1.3 样品采集与测定

1.3.1 土壤样品采集与理化性质测定

在每个样地内,采用直径为 5 cm 的土钻按 S 形采集表层土(0—10 cm)样品 6 个,每个样品分为两份,一份保存在-20 °C 冰箱内供土壤生物有效磷测定,另外一份自然风干、研磨、过筛后以供土壤理化性质测定。土壤 pH 值使用电位法测定(水土比为 2.5:1);土壤有机碳(SOC)采用重铬酸钾氧化-外加热法测定;土壤可溶性有机碳(DOC)采用水浸提-TOC 分析仪(TOC-5000 analyzer, Shimadzu, Kyoto, Japan)测定。土壤电导率(EC)采用土壤电导率仪测定,水土比为 5:1;土壤全氮(TN)采用凯氏定氮法测定;土壤铵态氮(NH₄⁺-N)和硝态氮(NO₃⁻-N)采用 2 mol/L 氯化钾溶液浸提,土壤速效磷(AP)采用 0.05 mol/L 盐酸和 0.025 mol/L 硫酸混合溶液浸提,都使用连续流动分析仪(AA3, SEAL Analytical, Inc., Germany)测定;土壤全磷(TP)、全钾(TK)、总铁(Fe)和总钙(Ca)等元素采用酸溶法-等离子发射光谱仪(IRIS Intrepid II XSP, Thermo, USA)测定。

1.3.2 土壤生物有效磷测定

采用 Deluca 等^[20]开发,蔡观等^[27]优化后的土壤生物有效磷测定方法,该方法基于植物利用土壤磷素的难易程度而开发,能够更全面地了解植物体可能采用的磷获取策略。其简要步骤为:分别准确称量 0.5 g 过 2 mm 筛的新鲜土壤装入 15 mL 的离心管中,依次加入 0.01 mol/L 氯化钙、0.01 mol/L 柠檬酸、0.02 EU/mL 酶

(浓度均为 0.02 EU/mL 的植酸酶、酸性磷酸酶和碱性磷酸酶混合而成)和 1 mol/L 盐酸的提取液 10 mL,摇匀后 25 ℃ 恒温振荡(180 r/min)3 h,结束后立即离心 30 min 提取上清液分别用于测定氯化钙磷(用来表征能直接被根际截留或扩散的磷酸根离子, $\text{CaCl}_2\text{-P}$)、柠檬酸磷(用来表征能被有机酸活化而从土壤中释放的无机磷, Citrate-P)、酶提取磷(用来表征易被土壤微生物以及植物分泌的植酸酶、酸性磷酸酶和碱性磷酸酶矿化的有机磷, Enzyme-P)和盐酸磷(用来表征由 H^+ 活化的稳定无机磷, HCl-P)。植酸酶在使用前利用透析袋在 4 ℃ 环境下透析 5 d 以排除植酸酶本身所含磷量。最后使用孔雀石绿法^[38]在多功能酶标仪(SpectraMaxi3, Molecular Devices, USA)上测定每个磷组分的浓度。

1.4 数据分析

采用 SPSS 22.0(SPSS Inc., Chicago, USA)进行单因素方差分析(One-way ANOVA),多重比较采用 Tukey 方法,利用 Origin2018(OriginLab, Northampton, MA, USA)作图。采用土壤生物有效磷组分比率来比较不同恢复途径下植物的磷获取策略,选用 Bootstrap 法求取比率的置信区间,在计算比率前对数据进行标准化^[26]。在 R3.6.3 软件中运行 vegan 包进行冗余分析(Redundancy analysis, RDA)和蒙特卡罗置换检验(Monte-Carlo permutation test, 999 次置换)以筛选不同森林恢复途径下土壤生物有效磷的主要影响因子^[39]。

2 结果与分析

2.1 土壤生物有效磷组分含量

不同森林恢复途径对土壤生物有效磷组分影响显著(图 1)。NF 的土壤 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 含量最高,显著高于 MF

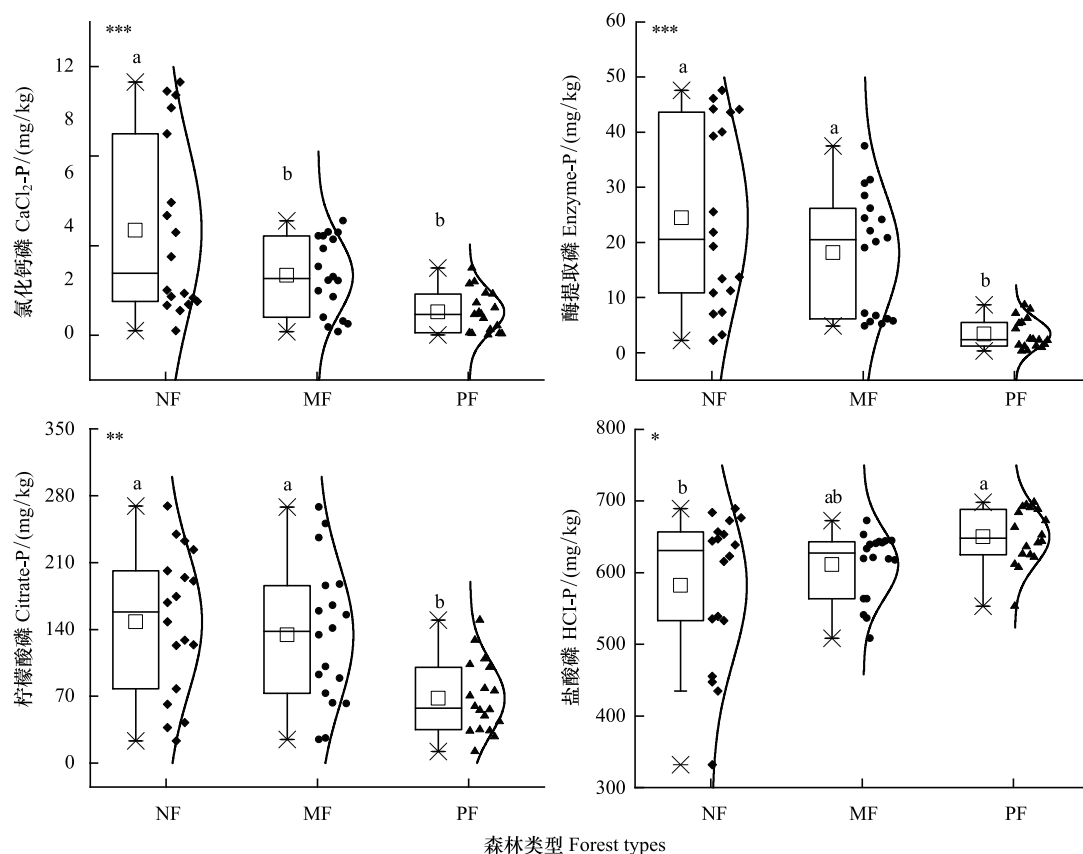


图 1 不同森林恢复途径对土壤生物有效磷组分的影响

Fig.1 Effects of different forest restoration pathways on soil biologically based phosphorus fractions

图中的不同小写字母代表不同森林类型间差异显著,星号代表显著性检验水平,*** $P < 0.001$; ** $P < 0.01$; * $P < 0.05$; NF:岷江冷杉-红桦天然次生林;MF:粗枝云杉阔叶林;PF:粗枝云杉人工林

和 PF,并且 MF 与 PF 的土壤 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 差异不显著。NF 的土壤具有最高的 Enzyme-P 含量,NF 和 MF 的土壤 Enzyme-P 分别比 PF 的土壤 Enzyme-P 显著高了 619.53% 和 432.48%。从图 1 可看出,MF 和 PF 比 NF 的土壤 Citrate-P 都低,NF 比 MF 和 PF 分别高了 10.19% ($P>0.05$) 和 117.82% ($P<0.05$)。不同于其他 3 种土壤生物有效磷组分,土壤 HCl-P 含量大小在 3 种森林类型中表现为 $\text{PF}>\text{MF}>\text{NF}$,PF 的土壤 HCl-P 显著高于 NF,MF 与其他两种森林类型间差异不显著。

2.2 土壤生物有效磷组分比率

由表 1 可知,不同森林恢复途径对川西亚高山森林土壤 Citrate-P/ $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 、Enzyme-P/ $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 和 HCl-P/ $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 的比率值影响显著 ($P<0.05$)。PF 的土壤 Citrate-P/ $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 比率值比 MF 显著高了 197.71% ($P<0.05$),而 MF 与 NF 土壤的 Citrate-P/ $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 比率值差异并不显著 ($P>0.05$)。PF 的土壤 Enzyme-P/ $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 比率值比 MF 显著高了 261.46% ($P<0.05$),PF 与 NF 土壤的 Enzyme-P/ $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 比率值差异并不显著 ($P>0.05$)。对于土壤 HCl-P/ $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 的比率值而言,PF 比 MF 和 NF 分别显著高了 282.59% 和 207.19% ($P<0.05$)。不同恢复途径没有显著改变土壤 Citrate-P/Enzyme-P 和 HCl-P/Citrate-P 比率值 ($P>0.05$),但 PF 的土壤 HCl-P/Citrate-P 比率值最大且高于 MF 和 NF,MF 的土壤 Citrate-P/Enzyme-P 比率值分别是 PF 和 NF 的 1.90 倍和 1.91 倍。不同恢复途径并未显著改变土壤 HCl-P/Enzyme-P 比率值 ($P>0.05$),3 种森林类型土壤 HCl-P/Enzyme-P 比率值大小排序为 $\text{NF}<\text{MF}<\text{PF}$ 。

表 1 不同森林恢复途径下土壤生物有效磷组分比率

Table 1 Soil biologically based phosphorus fractions ratio under different forest restoration pathways

生物有效磷组分比 BBP Fractions comparison	森林类型 Forest types	比率 Ratio	置信区间下限 Lower 95%CI	置信区间上限 Upper 95%CI
Citrate-P/ $\text{CaCl}_2\text{-P}$	NF	1.99±0.44ab	1.13	2.84
	MF	1.31±0.38b	0.56	2.03
	PF	3.90±1.32a	1.28	6.46
Enzyme-P/ $\text{CaCl}_2\text{-P}$	NF	1.67±0.37ab	0.95	2.39
	MF	0.96±0.31b	0.36	1.56
	PF	3.47±1.19a	1.12	5.80
HCl-P/ $\text{CaCl}_2\text{-P}$	NF	2.79±0.56b	1.71	3.91
	MF	2.24±0.68b	0.86	3.53
	PF	8.57±3.08a	2.72	14.77
Citrate-P/Enzyme-P	NF	2.36±0.98a	0.44	4.29
	MF	4.51±1.59a	1.45	7.68
	PF	2.37±0.83a	0.76	4.02
HCl-P/Citrate-P	NF	1.99±0.54a	0.98	3.10
	MF	1.55±0.27a	1.03	2.09
	PF	2.30±0.42a	1.48	3.11
HCl-P/Enzyme-P	NF	4.11±1.80a	0.58	7.64
	MF	5.24±1.81a	1.70	8.79
	PF	6.51±3.10a	0.34	12.50

表中数据为平均值±标准误,不同小写字母表示同一土壤生物有效磷组分比率在森林类型间差异显著 ($P<0.05$);BBP:生物有效磷 Biologically based phosphorus;柠檬酸磷/氯化钙磷 Citrate-P/ $\text{CaCl}_2\text{-P}$;酶提取磷/氯化钙磷 Enzyme-P/ $\text{CaCl}_2\text{-P}$;盐酸磷/氯化钙磷 HCl-P/ $\text{CaCl}_2\text{-P}$;柠檬酸磷/酶提取磷 Citrate-P/Enzyme-P;盐酸磷/柠檬酸磷 HCl-P/Citrate-P;盐酸磷/酶提取磷 HCl-P/Enzyme-P;CI:置信区间 Confidence intervals

2.3 土壤生物有效磷与速效磷的关系

3 种森林恢复途径下的土壤生物有效磷与土壤速效磷均呈现显著的正相关关系(图 2)。对于 MF 而言,土壤速效磷与 Citrate-P ($r=0.79$, $P<0.001$) 和 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ ($r=0.90$, $P<0.001$) 相关性更高,MF 土壤速效磷可能主要来自 Citrate-P 和 $\text{CaCl}_2\text{-P}$;3 种森林类型中土壤速效磷与 Enzyme-P 相关性最高的是 NF ($r=0.69$, $P<0.01$);

对于 PF 而言,土壤速效磷和 HCl-P 相关性最高($r=0.76$, $P<0.001$),PF 土壤速效磷可能主要来自 HCl-P。

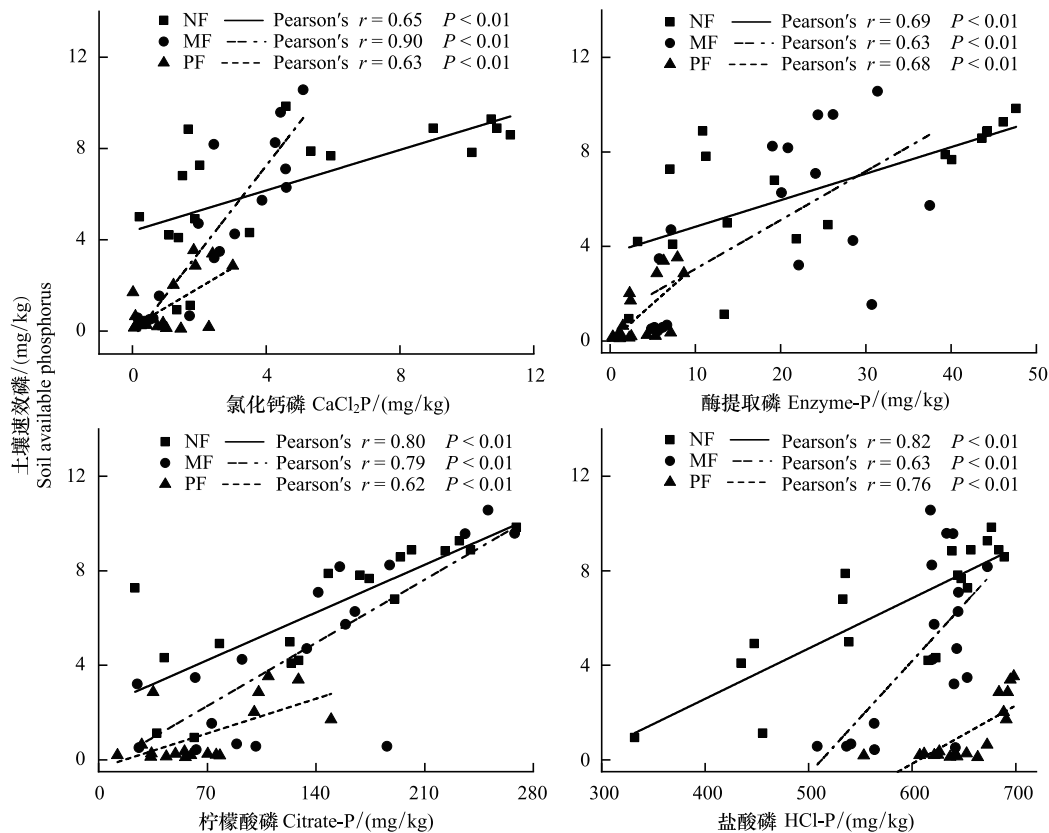


图2 土壤生物有效磷组分与速效磷的相关分析

Fig.2 Correlation analysis between soil biologically based phosphorus fractions and available phosphorus

2.4 土壤生物有效磷与土壤理化性质的关系

通过表2可以看出土壤pH值与NF土壤Enzyme-P呈显著的负相关关系($r=-0.73$, $P<0.05$), $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 与NF土壤Enzyme-P呈显著的正相关关系($r=0.74$, $P<0.05$), Ca和TK分别与NF土壤 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 和Citrate-P呈显著的正相关关系($P<0.05$)。土壤pH值与MF土壤Enzyme-P呈显著的正相关关系($r=0.76$, $P<0.01$), Ca与MF土壤 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 呈显著的正相关关系($r=0.78$, $P<0.01$)。对于PF而言,土壤pH值与HCl-P呈显著的负相关关系($r=-0.84$, $P<0.001$), SOC和DOC与Enzyme-P皆呈显著的正相关关系($r=0.83$, $P<0.001$)。

通过冗余分析分别检验3种森林恢复途径下pH、EC、SOC、TN、TP、TK、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、DOC、Ca、Fe等11个土壤理化性质对土壤生物有效磷的解释程度。结果表明,土壤理化性质对NF土壤生物有效磷的累积解释率为86.42% ($F=3.47$, $P=0.016$), 其中第一轴解释了63.84%, 第二轴解释了18.50%。土壤理化性质能够解释MF土壤生物有效磷变异的88.96% ($F=4.40$, $P=0.010$), 第一轴和第二轴分别解释了75.70%和12.17%。土壤理化性质对PF土壤生物有效磷的累积解释率达91.40% ($F=5.80$, $P=0.004$), 其中前两轴分别解释了79.58%和8.74% (表3)。

蒙特卡罗置换检验结果显示,不同森林恢复途径下土壤生物有效磷的影响因素不同(表4),显著影响NF土壤生物有效磷的土壤理化性质有3个,其中TK对NF的土壤生物有效磷变异的解释程度最高($r^2=0.63$, $P=0.001$), 3个土壤理化性质解释程度大小排序为 $\text{TK}>\text{NH}_4^+\text{-N}>\text{pH}$ 。土壤pH、Ca和DOC是显著影响MF土壤生物有效磷的土壤理化性质($P<0.05$)。对PF土壤生物有效磷具有显著影响的土壤理化性质有SOC($r^2=0.70$, $P=0.001$)、Fe($r^2=0.51$, $P=0.004$)和DOC($r^2=0.68$, $P=0.001$)。

表 2 土壤生物有效磷组分与土壤理化性质的皮尔逊相关分析

Table 2 Pearson correlation analysis of soil biologically based phosphorus fractions and soil physicochemical properties												
森林类型 Forest types	生物有效磷组分 BBP fractions	pH	TP	TN	SOC	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	Ca	Fe	TK	EC	DOC
NF	CaCl ₂ -P	-0.41	0.37	0.19	0.17	0.49	0.27	0.76 **	0.18	0.61	0.26	0.56
	Enzyme-P	-0.73 *	0.16	0.30	0.30	0.74 *	0.12	0.35	-0.37	0.68	0.56	0.55
	Citrate-P	-0.55	0.20	0.07	0.09	0.65	0.20	0.19	0.02	0.72 *	0.36	0.48
	HCL-P	-0.52	0.28	0.14	0.04	0.62	0.01	0.39	0.13	0.40	0.36	0.61
MF	CaCl ₂ -P	0.59	0.04	0.12	-0.12	-0.27	0.30	0.78 **	-0.18	0.60	-0.05	0.30
	Enzyme-P	0.76 **	0.05	0.33	0.17	0.03	0.26	0.41	-0.30	0.30	-0.01	0.07
	Citrate-P	0.31	-0.08	0.20	0.08	0.04	-0.15	0.64	-0.05	0.16	-0.21	0.68
	HCL-P	0.22	0.18	0.15	-0.10	-0.19	0.37	0.25	-0.23	0.44	0.31	-0.12
PF	CaCl ₂ -P	-0.23	0.22	0.68	0.68	0.08	0.40	-0.07	-0.71 *	-0.48	0.17	0.58
	Enzyme-P	-0.28	0.39	0.68	0.83 ***	0.07	0.46	0.40	-0.65	-0.03	0.16	0.83 ***
	Citrate-P	-0.48	-0.03	0.51	0.38	-0.11	0.31	-0.02	-0.53	-0.54	-0.03	0.34
	HCL-P	-0.84 ***	0.40	0.57	0.49	0.00	0.48	-0.14	-0.49	0.03	-0.19	0.20

星号代表显著性检验水平,*** $P<0.001$; ** $P<0.01$; * $P<0.05$; Citrate-P: 柠檬酸磷; CaCl₂-P: 氯化钙磷; Enzyme-P: 酶提取磷; HCL-P: 盐酸磷; pH: 土壤酸碱度; SOC: 土壤有机碳 Soil organic carbon; DOC: 土壤可溶性有机碳 Soil dissolved organic carbon; EC: 土壤电导率 Soil conductivity; TN: 土壤全氮 Soil total nitrogen; NH₄⁺-N: 土壤氨态氮 Soil ammonium nitrogen; NO₃⁻-N: 土壤硝态氮 Soil nitrate nitrogen; TP: 土壤全磷 Soil total phosphorus; TK: 土壤全钾 Soil total potassium; Fe: 土壤总铁 Soil total iron; Ca: 土壤总钙 Soil total calcium

表 3 土壤生物有效磷与土壤理化性质的冗余分析结果

Table 3 Redundancy analysis results of soil biologically based phosphorus and soil physicochemical properties					
森林类型 Forest types	轴 1 解释率/% Axis 1 explained	轴 2 解释率/% Axis 2 explained	总体解释率/% Total explained	<i>F</i>	<i>P</i>
NF	63.84	18.50	86.42	3.47	0.016
MF	75.70	12.17	88.96	4.40	0.010
PF	79.58	8.74	91.40	5.80	0.004

表 4 土壤生物有效磷与土壤理化性质的蒙特卡罗置换检验

Table 4 Monte Carlo permutation test of soil biologically based phosphorus and soil physicochemical properties						
土壤理化性质 Soil physicochemical properties	NF		MF		PF	
	<i>r</i> ²	<i>P</i>	<i>r</i> ²	<i>P</i>	<i>r</i> ²	<i>P</i>
pH	0.49	0.01	0.60	0.004	0.15	0.29
TP	0.04	0.75	0.03	0.80	0.24	0.11
TN	0.12	0.37	0.05	0.69	0.31	0.05
SOC	0.14	0.30	0.006	0.97	0.70	0.001
NH ₄ ⁺ -N	0.55	0.005	0.008	0.94	0.05	0.66
NO ₃ ⁻ -N	0.06	0.65	0.20	0.17	0.07	0.57
Ca	0.12	0.39	0.45	0.02	0.15	0.28
Fe	0.18	0.24	0.09	0.50	0.51	0.004
TK	0.63	0.001	0.11	0.41	0.30	0.06
EC	0.28	0.08	0.11	0.43	0.06	0.65
DOC	0.29	0.08	0.50	0.01	0.68	0.001

3 讨论

3.1 森林恢复途径对土壤生物有效磷及其比率的影响

不同森林恢复途径对土壤生物有效磷影响显著 ($P<0.05$), NF 的土壤 CaCl₂-P 显著高于 MF 和 PF, 并且

MF 与 PF 的土壤 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 差异不显著(图 1),说明在 NF 的土壤孔隙水中可直接吸收利用根际截留或扩散的磷酸根离子含量较高,而人为干扰会降低土壤孔隙水中的磷酸根离子^[20]。除 HCl-P 外,NF 和 MF 的土壤生物有效磷都比 PF 高(图 1),说明多树种的森林类型要比单一种植的纯林更加有利于土壤生物有效磷的生成积累^[24]。不同森林恢复途径通过改变植被群落组成^[40],从而影响土壤理化性质和凋落物产量来调节土壤磷循环过程^[41]。Yang 等^[13]在辽宁东部山地森林中的研究表明,原始针阔混交林转变为落叶松(*Larix gmelinii*)人工林更有可能导致土壤生物有效磷组分的变化。Gao 等^[42]研究发现土壤 Citrate-P 随木质生物炭的增加而增加,另外在日本北方森林中的研究也表明土壤有机碳增加导致土壤中生物有效磷增加^[21],这与本研究结果一致。我们的研究结果显示 NF 的土壤有机碳含量比 MF 和 PF 的高^[32],土壤有机碳的这种积累可能增加了土壤磷素有效性^[43]并提高了土壤生物有效磷(图 1)。采用人工种植的恢复途径形成的粗枝云杉人工林由于缺乏土壤有机质的积累,会导致有机磷含量的减少,并可能通过降低磷酸双酯酶活性和外生菌根真菌含量,进而抑制有机磷的矿化^[44],从而降低了 Enzyme-P。总体而言,NF 的土壤生物有效磷(除 HCl-P 外)均高于 MF 和 PF,可能与其具有较高的树种多样性有关^[32],树种多样性与土壤磷的生物有效性呈正相关^[45],树种多样性会显著影响土壤微生物多样性,并且能增加细根生物量以及土壤有机碳,从而增加土壤生物有效磷^[24]。另外,NF 中较高的 Citrate-P 反映了柠檬酸等低分子量有机酸可以通过促进难溶性磷酸盐溶解来提高土壤生物有效磷组分^[46],同样地,NF 土壤中较高的 Enzyme-P 含量反映了 NF 具有比 MF 和 PF 更高的土壤有机磷矿化能力^[47],能够分泌更多的磷酸酶和植酸酶来获取磷^[48]。

不同恢复途径下森林土壤生物有效磷的组成及比率状况反映了其土壤磷素的供应能力及磷获取策略^[26]。在本研究的 4 种土壤生物有效磷中, $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 和 Enzyme-P 含量最低(图 1),说明在川西亚高山 3 种森林恢复途径下植物能够直接吸收利用土壤孔隙水中的磷较少。除了 MF 中的 Enzyme-P/ $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 接近于 1 外,3 种森林恢复途径下土壤 Citrate-P/ $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 、Enzyme-P/ $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 和 $\text{HCl-P}/\text{CaCl}_2\text{-P}$ 的比率都大于 1(表 1),说明土壤中酸或酶的分泌可能是植物除了吸收土壤孔隙水中的 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 以外有效的磷获取策略,且在 NF 中这种磷吸收策略高于其他两种林型。3 种森林恢复途径下土壤 Citrate-P/Enzyme-P 的比率大于 1,说明在川西亚高山森林土壤中,对于磷吸收而言,有机酸可能比磷酸酶和植酸酶具有更大的潜力释放磷,且 MF 的这种潜力高于其他两种林型。PF 的土壤 $\text{HCl-P}/\text{Citrate-P}$ 最大,说明 PF 土壤中的无机磷被强烈地吸附,柠檬酸不足以使磷从土壤基质中释放。3 种森林恢复途径下土壤 $\text{HCl-P}/\text{Enzyme-P}$ 比率值都大于 1,且 PF 土壤中该比率值最大,说明土壤中大多数磷是无机磷,NF 和 MF 土壤中的有机磷占比高于 PF。3 种森林恢复途径下土壤中 Citrate-P 和 HCl-P 最高,同样地,Wu 等在亚热带阔叶混交林^[24]和杉木人工林^[23]中的研究也表明 Citrate-P 和 HCl-P 高于 Enzyme-P 和 $\text{CaCl}_2\text{-P}$,但与 Deluca 等^[20]的研究结果不同,说明在川西亚高山森林中存在潜在磷库,植物或者土壤微生物在获取磷的过程中不仅需要释放低分子量的有机酸,还需要释放更多的 H^+ 以补充磷的获得。我们的研究结果显示,川西亚高山 3 种森林恢复途径下植物可能更容易释放有机酸(如柠檬酸等)来获取土壤中的磷^[26]。

3.2 土壤生物有效磷的影响因素

影响土壤生物有效磷的因素包括生物因素和环境因素^[49],且前人研究结果表明土壤生物有效磷的变化可以通过土壤理化性质等环境因素来解释^[50]。本研究结果表明,土壤理化性质对 3 种森林恢复途径下的土壤生物有效磷变异解释程度较高,解释率均超过了 80%(表 3),蒙特卡罗置换检验结果显示,不同恢复途径下森林土壤生物有效磷的影响因素不同(表 4)。显著影响 NF 的土壤生物有效磷的土壤理化性质有 TK、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 pH,这与蔡观等^[27]和 Erinle 等^[51]的研究结果一致。Erinle 等^[51]的研究表明,土壤氮素的增加能够显著提高土壤 HCl-P 和 Citrate-P。土壤 pH、Ca 和 DOC 是显著影响 MF 土壤生物有效磷的土壤理化性质($P < 0.05$),土壤 pH^[29]、Ca^[50] 可以通过影响土壤磷素和土壤颗粒^[52]的吸附作用来影响土壤生物有效磷含量^[53]。对 PF 土壤生物有效磷有显著影响的土壤理化性质是 SOC 和 DOC,这与黄翊兰等^[25]的研究结果一致,DOC 与 SOC 能够为植物和土壤微生物提供碳源以支持植物根系和土壤微生物分泌胞外酶或根系分泌物来加强对磷

的获取^[54]。同时,Fe 也是显著影响 PF 土壤生物有效磷的土壤因子之一(表 4),这可能与土壤中的磷和铁的氢氧化物结合而发生沉积作用有关^[55]。另外也有研究表明土壤质地、土壤阳离子交换量对土壤生物有效磷影响很大^[56],说明土壤生物有效磷是多个土壤理化性质综合作用的结果^[57]。土壤理化性质为土壤微生物代谢提供了必要的底物,而不同森林恢复途径通过影响土壤理化性质和土壤微生物的代谢活动间接作用于土壤生物有效磷^[58]。

4 结论

自然更新是川西亚高山 3 种森林恢复途径中最能提高土壤生物有效磷的方式。有机酸或胞外酶的分泌可能是植物除了吸收土壤孔隙水中的 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 以外有效的磷素获取策略,且释放有机酸可能是比分泌胞外酶更有潜力获取磷的策略。3 种森林恢复途径下土壤生物有效磷组分与速效磷均呈现显著正相关关系,土壤理化性质能解释超过 80% 的土壤生物有效磷变异,森林恢复途径对土壤生物有效磷的影响与土壤理化性质有关。

参考文献(References):

- [1] Elser J J, Bracken M E S, Cleland E E, Gruner D S, Harpole W S, Hillebrand H, Ngai J T, Seabloom E W, Shurin J B, Smith J E. Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystems. *Ecology Letters*, 2007, 10 (12): 1135-1142.
- [2] Elser J, Bennett E. Phosphorus cycle: a broken biogeochemical cycle. *Nature*, 2011, 478(7367): 29-31.
- [3] Reed S C, Townsend A R, Taylor P G, Cleveland C C. Phosphorus cycling in tropical forests growing on highly weathered soils//Bünemann E, Oberson A, Frossard E, eds. *Phosphorus in Action: Biological Processes in Soil Phosphorus Cycling*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2011: 339-369.
- [4] 方晰, 陈金磊, 王留芳, 李胜蓝, 项文化, 雷丕锋. 亚热带森林土壤磷有效性及其影响因素的研究进展. *中南林业科技大学学报*, 2018, 38(12): 1-12.
- [5] Frossard E, Condon L M, Oberson A, Sinaj S, Fardeau J C. Processes governing phosphorus availability in temperate soils. *Journal of Environmental Quality*, 2000, 29(1): 15-23.
- [6] Turrión M B, Glaser B, Solomon D, Ni A, Zech W. Effects of deforestation on phosphorus pools in mountain soils of the Alay Range, Khyrgyzia. *Biology and Fertility of Soils*, 2000, 31(2): 134-142.
- [7] Marangut D, Guillaume T, Kuzyakov Y. Land-use change affects phosphorus fractions in highly weathered tropical soils. *CATENA*, 2017, 149: 385-393.
- [8] Dalling J W, Heineman K, Lopez O R, Wright S J, Turner B L. Nutrient availability in tropical rain forests: the paradigm of phosphorus limitation//Goldstein G, Santiago L S, eds. *Tropical Tree Physiology: Adaptations and Responses in a Changing Environment*. Cham: Springer, 2016: 261-273.
- [9] Moghimian N, Hosseini S M, Kooch Y, Darki B Z. Impacts of changes in land use/cover on soil microbial and enzyme activities. *CATENA*, 2017, 157: 407-414.
- [10] Zhu X A, Liu W J, Chen H, Deng Y, Chen C F, Zeng H H. Effects of forest transition on litterfall, standing litter and related nutrient returns: implications for forest management in tropical China. *Geoderma*, 2019, 333: 123-134.
- [11] Zhang H Z, Shi L L, Wen D Z, Yu K L. Soil potential labile but not occluded phosphorus forms increase with forest succession. *Biology and Fertility of Soils*, 2016, 52(1): 41-51.
- [12] Hedley M J, Stewart J W, Chauhan B S. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. *Soil Science Society of America Journal*, 1982, 46(5): 970-976.
- [13] Yang K, Zhu J J, Yan Q L, Sun O J. Changes in soil P chemistry as affected by conversion of natural secondary forests to larch plantations. *Forest Ecology and Management*, 2010, 260(3): 422-428.
- [14] Wang J C, Ren C Q, Cheng H T, Zou Y K, Bughio M A, Li Q F. Conversion of rainforest into agroforestry and monoculture plantation in China: Consequences for soil phosphorus forms and microbial community. *Science of the Total Environment*, 2017, 595: 769-778.
- [15] Redel Y, Rubio R, Godoy R, Borie F. Phosphorus fractions and phosphatase activity in an Andisol under different forest ecosystems. *Geoderma*, 2008, 145(3/4): 216-221.

- [16] 曾晓敏, 高金涛, 范跃新, 袁萍, 鲍勇, 高颖, 赵盼盼, 司友涛, 陈岳民, 杨玉盛. 中亚热带森林转换对土壤磷积累的影响. 生态学报, 2018, 38(13): 4879-4887.
- [17] Reiners W A, Bouwman A F, Parsons W F J, Keller M. Tropical rain forest conversion to pasture: changes in vegetation and soil properties. *Ecological Applications*, 1994, 4(2): 363-377.
- [18] Klotzbücher A, Kaiser K, Klotzbücher T, Wolff M, Mikutta R. Testing mechanisms underlying the Hedley sequential phosphorus extraction of soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2019, 182(4): 570-577.
- [19] Yang L M, Yang Z J, Peng Y Z, Lin Y Y, Xiong D C, Li Y Q, Yang Y S. Evaluating P availability influenced by warming and N deposition in a subtropical forest soil: a bioassay mesocosm experiment. *Plant and Soil*, 2019, 444(1): 87-99.
- [20] DeLuca T H, Glanville H C, Harris M, Emmett B A, Pingree M R A, de Sosa L L, Cerdá-Moreno C, Jones D L. A novel biologically-based approach to evaluating soil phosphorus availability across complex landscapes. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 88: 110-119.
- [21] Pingree M R A, Makoto K, Deluca T H. Interactive effects of charcoal and earthworm activity increase bioavailable phosphorus in sub-boreal forest soils. *Biology and Fertility of Soils*, 2017, 53(8): 873-884.
- [22] Zhong H T, Kim Y N, Smith C, Robinson B, Dickinson N. Seabird guano and phosphorus fractionation in a rhizosphere with earthworms. *Applied Soil Ecology*, 2017, 120: 197-205.
- [23] Wu H L, Xiang W H, Chen L, Ouyang S, Xiao W F, Li S G, Forrester D I, Lei P F, Zeng Y L, Deng X W, Zeng L X, Kuzyakov Y. Soil phosphorus bioavailability and recycling increased with stand age in Chinese fir plantations. *Ecosystems*, 2020, 23(5): 973-988.
- [24] Wu H L, Xiang W H, Ouyang S, Forrester D I, Zhou B, Chen L X, Ge T D, Lei P F, Chen L, Zeng Y L, Song X Z, Peñuelas J, Peng C H. Linkage between tree species richness and soil microbial diversity improves phosphorus bioavailability. *Functional Ecology*, 2019, 33(8): 1549-1560.
- [25] 黄翊兰, 崔丽娟, 李春义, 李伟, 雷茵茹. 滨海滩涂湿地不同植被土壤磷的生物有效性及其影响因子分析. 生态环境学报, 2019, 28(10): 1999-2005.
- [26] Crain G M, McLaren J R, Brunner B, Darrouzet-Nardi A. Biologically available phosphorus in biocrust-dominated soils of the Chihuahuan desert. *Soil Systems*, 2018, 2(4): 56.
- [27] 蔡观, 胡亚军, 王婷婷, 袁红朝, 王久荣, 李巧云, 葛体达, 吴金水. 基于生物有效性的农田土壤磷素组分特征及其影响因素分析. 环境科学, 2017, 38(4): 1606-1612.
- [28] Hoang K T K, Marschner P. P pools after seven-year P fertiliser application are influenced by wheat straw addition and wheat growth. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2019, 19(3): 603-610.
- [29] 袁佳慧, 汪玉, 王慎强, 赵品恒, 王宏燕, 陈浩, 朱文彬. 稻麦轮作磷肥减施下水稻土壤磷素生物有效性特征. 生态与农村环境学报, 2018, 34(7): 599-605.
- [30] 蒋有绪. 川西亚高山暗针叶林的群落特点及其分类原则. 植物生态学与地植物学丛刊, 1963, 1(1/2): 42-50.
- [31] 张远东, 刘世荣, 赵常明. 川西亚高山森林恢复的空间格局分析. 应用生态学报, 2005, 16(9): 1706-1710.
- [32] Liu S, Luo D, Yang H G, Shi Z M, Liu Q L, Zhang L, Kang Y. Fine root dynamics in three forest types with different origins in a subalpine region of the Eastern Qinghai-Tibetan Plateau. *Forests*, 2018, 9(9): 517.
- [33] Ni X Y, Yang W Q, Li H, Xu L Y, He J, Tan B, Wu F Z. The responses of early foliar litter humification to reduced snow cover during winter in an alpine forest. *Canadian Journal of Soil Science*, 2014, 94(4): 453-461.
- [34] 张远东, 赵常明, 刘世荣. 川西米亚罗林区森林恢复的影响因子分析. 林业科学, 2005, 41(4): 189-193.
- [35] 杨玉坡, 李承彪. 四川森林. 北京: 中国林业出版社, 1992: 1-368.
- [36] 张远东, 赵常明, 刘世荣. 川西亚高山人工云杉林和自然恢复演替系列的林地水文效应. 自然资源学报, 2004, 19(6): 761-768.
- [37] 刘顺, 罗达, 刘千里, 张利, 杨洪国, 史作民. 川西亚高山不同森林生态系统碳氮储量及其分配格局. 生态学报, 2017, 37(4): 1074-1083.
- [38] Ohno T, Zibilske L M. Determination of low concentrations of phosphorus in soil extracts using malachite green. *Soil Science Society of America Journal*, 1991, 55(3): 892-895.
- [39] Zheng B X, Zhang D P, Wang Y, Hao X L, Wadaan M A M, Hozzein W N, Peñuelas J, Zhu Y G, Yang, X R. Responses to soil pH gradients of inorganic phosphate solubilizing bacteria community. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 25.
- [40] Maharjan M, Marangut D, Kuzyakov Y. Phosphorus fractions in subtropical soils depending on land use. *European Journal of Soil Biology*, 2018, 87: 17-24.
- [41] Zhou J, Wu Y H, Bing H J, Yang Z J, Wang J P, Sun H Y, Sun S Q, Luo J. Variations in soil phosphorus biogeochemistry across six vegetation types along an altitudinal gradient in SW China. *CATENA*, 2016, 142: 102-111.
- [42] Gao S, Hoffman-Krull K, Bidwell A L, DeLuca T H. Locally produced wood biochar increases nutrient retention and availability in agricultural soils

- of the San Juan Islands, USA. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 233: 43-54.
- [43] Hou E Q, Chen C G, Wen D Z, Liu X. Relationships of phosphorus fractions to organic carbon content in surface soils in mature subtropical forests, Dinghushan, China. *Soil Research*, 2014, 52(1): 55-63.
- [44] 曾晓敏, 范跃新, 林开森, 赵盼盼, 袁萍, 周嘉聪, 张秋芳, 程蕾, 徐建国, 陈岳民. 亚热带不同海拔黄山松林土壤磷组分及微生物特征. *生态学报*, 2018, 38(18): 6570-6579.
- [45] Zeugin F, Potvin C, Jansa J, Scherer-Lorenzen M. Is tree diversity an important driver for phosphorus and nitrogen acquisition of a young tropical plantation? *Forest Ecology and Management*, 2010, 260(9): 1424-1433.
- [46] Santos S R, de Barros Silva E, Alleoni L R F, Graziotti P H. Citric acid influence on soil phosphorus availability. *Journal of Plant Nutrition*, 2017, 40(15): 2138-2145.
- [47] Huang W, Liu J, Zhou G, Zhang D, Deng Q. Effects of precipitation on soil acid phosphatase activity in three successional forests in southern China. *Biogeosciences*, 2011, 8(7): 1901-1910.
- [48] Giles C D, Richardson A E, Cade-Menun B J, Mezeli M M, Brown L K, Menezes-Blackburn D, Darch T, Blackwell M S A, Shand C A, Stutter M I, Wendler R, Cooper P, Lumsdon D G, Wearing C, Zhang H, Haygarth P M, George T S. Phosphorus acquisition by citrate- and phytase-exuding *Nicotiana tabacum* plant mixtures depends on soil phosphorus availability and root intermingling. *Physiologia Plantarum*, 2018, 163(3): 356-371.
- [49] Hoang K T K, Marschner P. Plant and microbial-induced changes in P pools in soil amended with straw and inorganic P. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2017, 17(4): 1088-1101.
- [50] Gao S, DeLuca T H. Wood biochar impacts soil phosphorus dynamics and microbial communities in organically-managed croplands. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 126: 144-150.
- [51] Erinle K O, Doolette A, Marschner P. P pools in barley detritusphere are influenced by N and P addition to the soil. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2019, 19(2): 463-468.
- [52] Erinle K O, Li J Q, Doolette A, Marschner P. Soil phosphorus pools in the detritusphere of plant residues with different C/P ratio—influence of drying and rewetting. *Biology and Fertility of Soils*, 2018, 54(7): 841-852.
- [53] Zhou J, Wu Y H, Prietzel J, Bing H J, Yu D, Sun S Q, Luo J, Sun H Y. Changes of soil phosphorus speciation along a 120-year soil chronosequence in the Hailuoguo Glacier retreat area (Gongga Mountain, SW China). *Geoderma*, 2013, 195-196: 251-259.
- [54] Wei X M, Razavi B S, Hu Y J, Xu X L, Zhu Z K, Liu Y H, Kuzyakov Y, Li Y, Wu J S, Ge T D. C/P stoichiometry of dying rice root defines the spatial distribution and dynamics of enzyme activities in root-detritusphere. *Biology and Fertility of Soils*, 2019, 55(3): 251-263.
- [55] Havlin J L, Beaton J D, Tisdale S L, Nelson W L, Beaton G D. *Soil Fertility and Fertilizers: An Introduction to Nutrient Management*. New Jersey: Prentice Hall, 1999: 160-198.
- [56] Jalali M, Jalali M. Relation between various soil phosphorus extraction methods and sorption parameters in calcareous soils with different texture. *Science of the Total Environment*, 2016, 566-567: 1080-1093.
- [57] 贾兴永, 李菊梅. 土壤磷有效性及其与土壤性质关系的研究. *中国土壤与肥料*, 2011, 43(6): 76-82.
- [58] Wei X M, Hu Y J, Razavi B S, Zhou J, Shen J L, Nannipieri P, Wu J S, Ge T D. Rare taxa of alkaline phosphomonoesterase-harboring microorganisms mediate soil phosphorus mineralization. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, 131: 62-70.