



岷江源区亚高山森林-高山草地生态系统界面土壤无机磷赋存特征及其影响因子

石钰琛 宋怡珂 周俊 盖艾鸿 石凝 孙建 王金牛 吴彦

Characteristics and influencing factors of soil inorganic phosphorus across the interfaces of sub-alpine forest-alpine meadow ecosystems at Minjiang headwaters

SHI Yuchen, SONG Yike, ZHOU Jun, GAI Aihong, SHI Ning, SUN Jian, WANG Jinniu, WU Yan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2021-0769>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

岷江源区典型高山林草交错带土壤养分的空间变化特征及影响因素

Spatial variation characteristics and influencing factors of soil nutrients in the alpine forest-grassland ecotone at Minjiang headwaters

草业科学. 2020, 37(10): 1970 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2020-0095>

巢湖湖滨带不同植被类型土壤碳氮磷生态化学计量学特征

Effect of vegetation type on the eco-stoichiometric characteristics of soils from around Chaohu Lake

草业科学. 2020, 37(8): 1448 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2019-0633>

贵阳市不同栽培草地生态系统呼吸特征及其影响因子

Factors influencing ecosystem respiration in different cultivated grassland ecosystems in Guiyang

草业科学. 2020, 37(11): 2211 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2020-0251>

青藏高原高寒草甸有毒植物对土壤理化性质和土壤微生物丰度的影响

Effects of toxic plants on soil physicochemical properties and soil microbial abundance in an alpine meadow on the Qinghai-Tibetan Plateau

草业科学. 2019, 36(12): 3033 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2019-0405>

青藏高原高寒草地生态系统的适应性管理

Adaptive management of alpine grassland ecosystems over Tibetan Plateau

草业科学. 2019, 36(4): 933 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2019-0224>

牦牛放牧强度对青藏高原东缘高寒草甸群落结构与土壤理化性质的影响

Effects of grazing intensity on community structure and the soil's physical and chemical properties in an alpine meadow on the Eastern Qinghai-Tibet Plateau

草业科学. 2019, 36(4): 1022 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2019-0046>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2021-0769

石钰琛, 宋怡珂, 周俊, 盖艾鸿, 石凝, 孙建, 王金牛, 吴彦. 岷江源区亚高山森林—高山草地生态系统界面土壤无机磷赋存特征及其影响因子. 草业科学, 2023, 40(3): 603-616.

SHI Y C, SONG Y K, ZHOU J, GAI A H, SHI N, SUN J, WANG J N, WU Y. Characteristics and influencing factors of soil inorganic phosphorus across the interfaces of sub-alpine forest–alpine meadow ecosystems at Minjiang headwaters. Pratacultural Science, 2023, 40(3): 603-616.

岷江源区亚高山森林—高山草地生态系统界面 土壤无机磷赋存特征及其影响因子

石钰琛^{1,2}, 宋怡珂³, 周俊⁴, 盖艾鸿¹, 石凝^{2,5},
孙建⁶, 王金牛^{2,7}, 吴彦²

(1. 甘肃农业大学资源与环境学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 中国科学院成都生物研究所, 四川 成都 610041; 3. 中国热带农业科学院环境与植物保护研究所, 海南 海口 571101; 4. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041; 5. 中国科学院大学, 北京 101408; 6. 中国科学院青藏高原研究所, 北京 100101; 7. 西藏生态安全屏障生态监测站网芒康生态站, 西藏 昌都 854500)

摘要: 土壤无机磷是高寒生态系统有效磷的重要来源, 研究亚高山森林—高山草地生态系统界面的土壤无机磷组分动态及其影响因素有助于深刻理解该生态系统的生物地球化学循环过程。本研究采用 Tiessen 修订的 Hedley 磷素分级法, 分析了岷江源区卡卡山和斗鸡台亚高山森林—高山草地生态系统界面不同深度土壤 (0–15 和 15–30 cm) 无机磷组分的季节动态 (生长初期、生长盛期、生长末期) 和空间赋存特征及其主要影响因子。结果表明: 1) 不同形态土壤无机磷的含量受到生长期、植被类型及其交互作用的显著影响 ($P < 0.05$); 斗鸡台土壤活性无机磷 ($\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$) 含量在生长季初期最低; 卡卡山草甸 ($56.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、树种线 ($68.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 和密闭森林 ($65.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 土壤活性无机磷含量在生长季末期最高 ($P < 0.05$); 两处生态系统界面的土壤中等活性无机磷 (NaOH-P_i) 含量在生长季末期均达到最高值 ($P < 0.05$)。2) 密闭森林样带的土壤无机磷主要形态是活性无机磷, HCl-P_i 是树种线样带土壤无机磷的主要形态, 中等活性无机磷和残留无机磷 (Residual-P) 是草甸区土壤无机磷的主要形态。3) 土壤有机碳、全氮、全磷、含水量、酸碱度以及土壤碳氮磷化学计量比与土壤无机磷组分含量显著相关 ($P < 0.05$)。研究结果表明, 生长期、植被类型和土壤理化性质与无机磷组分的变化显著相关。

关键词: 青藏高原; 磷的有效性; 树线交错带; 生长期; 植被带类型; 土壤理化性质; 生态化学计量比

文献标志码: A **文章编号:** 1001-0629(2023)03-0603-14

Characteristics and influencing factors of soil inorganic phosphorus across the interfaces of sub-alpine forest–alpine meadow ecosystems at Minjiang headwaters

SHI Yuchen^{1,2}, SONG Yike³, ZHOU Jun⁴, GAI Aihong¹, SHI Ning^{2,5}, SUN Jian⁶, WANG Jinniu^{2,7}, WU Yan²

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, Gansu, China;

2. Chengdu Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, Sichuan, China;

3. Environment and Plant Protection Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Haikou 571101,

Hainan, China; 4. Chengdu Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences,

Chengdu 610041, Sichuan, China; 5. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China;

收稿日期: 2021-12-21 接受日期: 2022-04-19

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31971436、41661144045); 中国科学院西北生态环境与资源研究院冰冻圈国家重点实验室开放课题 (SKLSOP-2018-07); 中国生物多样性监测与研究网络 (Sino BON)

第一作者: 石钰琛 (1998-), 女, 山西晋城人, 在读硕士生, 主要从事园林植物功能生态学的研究。E-mail: 2368915759@qq.com

通信作者: 盖艾鸿 (1967-), 男, 甘肃平凉人, 副教授, 博士, 主要从事野外地质物化勘探、土地利用规划方面的研究。E-mail: gaiah@gsau.edu.cn

共同通信作者: 王金牛 (1982-), 男, 甘肃通渭人, 副研究员, 博士, 主要从事高山植物功能生态学、山区可持续发展方面的研究。E-mail: wangjn@cib.ac.cn

6. Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

7. Mangkang Ecological Monitoring Station, Tibet Ecological Security Barrier Ecological Monitoring Network, Qamdo 854500, Tibet, China)

Abstract: Soil inorganic phosphorus is a key source of available phosphorus in alpine ecosystems. It is critical to study the dynamics and factors influencing soil inorganic phosphorus fractions across the interface between sub-alpine forest and alpine grassland ecosystem. This is useful to understand their biogeochemical cycle process. We analyzed the seasonal dynamics (the early, peak, and end growth stages) and spatial patterns of inorganic phosphorus fractions and the main factors influencing the soils at different depths (0–15 and 15–30 cm), across the interface between the sub-alpine forest and alpine grassland ecosystem at Kaka and Doujitai Mountains, respectively, of the Min River headwater region. The study was based on the Hedley phosphorus fraction method modified by Tiessen. We found that the content of soil inorganic phosphorus fractions was significantly influenced by growth periods, vegetation, and their interaction ($P < 0.05$). Soil labile inorganic phosphorus ($\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$) content was the lowest in the early growing season at Doujitai Mountain ($P < 0.05$). Labile inorganic phosphorus content was the highest at the end of growing season in the alpine meadows ($56.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), tree species line ($68.4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), and closed forest ($65.7 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) of Kaka Mountain ($P < 0.05$). Moderately labile inorganic phosphorus (NaOH-P_i) content reached the highest at the end of the growing season in both alpine interfaces ($P < 0.05$). $\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$ and HCl-P_i were the main soil inorganic phosphorus forms at the closed forest and tree species line sites, respectively. Moreover, NaOH-P_i and residual inorganic phosphorus (Residual-P) were dominant in the alpine meadow area. Soil organic carbon, total nitrogen, total phosphorus, variable water content, pH, nitrogen and phosphorus stoichiometry ratios, and soil carbon were significantly correlated with the content of soil inorganic phosphorus fractions ($P < 0.05$). The study results indicate that the growth period, vegetation type, and soil physical and chemical properties correlate significantly with a change in inorganic phosphorus fractions in soil.

Keywords: Tibetan Plateau; phosphorus availability; alpine tree-line ecotone; growth period; vegetation belt type; physical and chemical properties of soil; stoichiometry

Corresponding author: GAI Aihong E-mail: gaiah@gsau.edu.cn

WANG Jinniu E-mail: wangjn@cib.ac.cn

磷是生物圈重要的生命元素,也是诸多陆地生态系统的主要限制元素^[1]。磷元素的生物地球化学循环过程决定了其生物有效活性以及持续供应的能力,影响着高寒生态系统的功能和结构^[2]。亚高山森林—高山草地生态系统界面的复杂性、极强的敏感性和脆弱性特征,使其在高海拔生态系统中面临近年来剧烈的气候变化和逐渐加强的人类活动干扰所带来的威胁^[3]。这种生态系统界面不是固定以物理或地形特征的变化为标志,而是从一个生物群过渡到另一个生物群,它的边界有着较高的物种丰富度,且在时空上是可变的^[4]。高寒生态系统由于生境条件限制了树木生长致使植被低矮,出现的明显边缘地带称作高山树线^[5],此生物地理模式往往代表了地貌类型位置和空间结构的变化^[6]。磷的有效性是影响高山树线交错带形成及其生物地球化学循环的重要因素之一^[7],植物和微生物在高山土壤出现营养限制时竞争激烈,较低的磷养分有效

性抑制了树线物种的生长^[8]。土壤磷多种形态的相互转化受生物地球化学作用的影响,各磷素组分的有效性及其在土壤内的迁移转化能力不同^[9]。此外,磷通过影响植被生长调控碳、氮循环,研究磷的动态对于高山生物地球化学的解析十分重要^[10]。Drollinger 等^[11]研究喜马拉雅山脉南坡的高山树线交错带发现,土壤全磷与海拔高度相关性最强,其次是植被凋落物和分解层。青藏高原东部海拔 2 900~4 000 m 草地的土壤养分研究发现,不同草地类型的土壤全磷含量不同,同一草地类型在不同剖面上土壤全磷的分布也有所差异^[12]。高山地区普遍存在低温和水分限制,因此探讨磷的有效性的动态特征和空间格局对于认识高寒生态系统的净初级生产力及其他功能尤为重要。

青藏高原作为地球的“第三极”^[13],物种的个体反应、物种间的相互作用和气候变化期间植被的时滞效应调控着亚高山森林—高山草地生态系统界

面对外部干扰的响应^[14], 对全球生物地化循环具有重要的警示作用。土壤无机磷以多种形态存在, 是上述高寒生态系统有效磷的重要来源。亚高山森林—高山草地生态系统界面的植被类型通过影响土壤性质和凋落物产量导致无机磷组分在海拔梯度上存在差异^[15]。植物进入生长季, 吸收土壤磷的同时植物根系也分泌一定的酸和酶, 土壤中磷形态得到转化和释放^[16], 影响无机磷活性。季节性积雪覆盖的土壤在早春植物生长初期冻结—融化频繁发生, 也会影响土壤无机磷形态的构成^[17]。因此, 了解土壤无机磷组分季节动态和空间分布特征以及影响因子对于理解磷循环、提高土壤磷的有效性及其利用效率具有重要意义。青藏高原岷江上游的林线交错带非生长季植被类型下的土壤无机磷的主要存在形态是钙结合态磷^[18]。川西亚高山地区的研究发现, 经不同恢复途径形成的森林类型显著影响土壤生物有效磷含量, 而且土壤酸碱度、钙以及可溶性有机碳含量显著改变了次生粗枝云杉 (*Picea asperata*) 阔叶混交林的有效磷含量^[19]。然而, 针对高山地区尤其是从亚高山森林—高山草地过渡带中的土壤无机磷组分时空变化及影响因子的综合研究仍不多见。

青藏高原东缘的岷江源区的亚高山森林—高山草地生态系统界面作为高原林区到草甸区的典型过渡地带, 也是研究高山地区土壤磷的理想区域^[20]。为研究高寒生态系统土壤无机磷赋存特征和影响因子, 本研究选择岷江源区卡卡山和斗鸡台两处亚高山森林—高山草地生态系统界面的4条植被带(高寒草甸、树种线、树线、密闭森林)展开研究, 分别在不同生长时期(生长初期、生长盛期、生长末期)和两层土壤剖面下(0—15和15—30 cm)进行取样, 探讨了高寒生态系统界面土壤无机磷组分含量时空分布的异质性, 进一步明确了生长期、植被带类型以及土壤深度对土壤无机磷的影响, 以及其他土壤养分与土壤无机磷组分含量的关联性, 便于更好地理解高寒生态系统的土壤磷循环及其有效性, 并为深入研究提供野外案例支持和相关数据补充。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于四川省松潘县章腊乡境内的卡卡

山(32°59'03" N, 103°40'12" E)和斗鸡台(33°02'31" N, 103°43'59" E), 地处青藏高原的岷山山脉东段, 与岷江发源地弓杠岭相隔仅数公里, 坐落于四川九黄旅游线路大环线, 植物群落内的主要建群种基本一致。研究区域海拔3 600~4 000 m, 地形复杂, 受典型山地季风气候影响, 冬长且无夏, 雪被期长, 四时不分, 年均气温5~9℃, 年均降水量700~800 mm^[21]。岷江冷杉 (*Abies faxoniana*) 是斗鸡台海拔3 600 m 密闭森林植被带中群落乔木层的主要优势物种, 伴生有青海云杉 (*Picea crassifolia*)、祁连圆柏 (*Sabina przewalskii*); 卡卡山由岷江冷杉和祁连圆柏形成较为单一的乔木层, 有少量紫果云杉 (*Picea purpurea*) 和方枝柏 (*Sabina saltuaria*), 郁闭度较小^[22]。树线生态交错带3 700~3 750 m 主要由乔木岷江冷杉和灌木雪山杜鹃 (*Rhododendron aganniphum*)、高山柳 (*Salix taiwanalpina*) 形成^[18]。树种线样带3 800~3 850 m 的高山灌丛以高山杜鹃 (*Rhododendron lapponicum*) 为主。卡卡山研究区最高海拔3 997 m 以下高寒草甸植物种类多样, 主要有高山绣线菊 (*Spiraea alpina*)、窄叶鲜卑花 (*Sibiraea angustata*)、金露梅 (*Potentilla fruticosa*)、红花绿绒蒿 (*Meconopsis punicea*) 和蒿草 (*Artemisia*)^[23]。土壤类型以山地暗棕壤为主, 卡卡山草甸取样处土壤为黑色草毡土, 斗鸡台密闭森林土壤为棕色针叶林土, pH 均呈酸性^[24]。两处研究样地卡卡山树线交错带和斗鸡台树线交错带分别位于东南坡向与西北坡向, 均处于国道G544旁(图1)。

1.2 样品采集

依据前人经验和已有研究结果, 在卡卡山和斗鸡台选取草甸(3 900~4 000 m)、树种线(3 800~3 850 m)、树线(3 700~3 750 m)和密闭森林(3 600 m)4条植被带(图1), 分别采集植物生长初期(6月)、生长盛期(8月)和生长末期(10月)植被下两层土壤剖面(0—15和15—30 cm)的土样。每条植被带随机选取3个3 m×3 m的样方, 样方两两间隔大于3 m。每个采样点的选择尽量位于多个树木或者灌丛的中间位置, 并对多个样点的混合样品进行指标的测定。每一样方内随机选择3个取样点, 环刀法取得土样后同一样方内3个同土层土样混合成1个样本放入预先编号的自封袋, 带回实验室进行下一步操作, 最后共取得土样144个(2处山体×3个生长期×4条植被带×2层土壤深度×3个重复)。

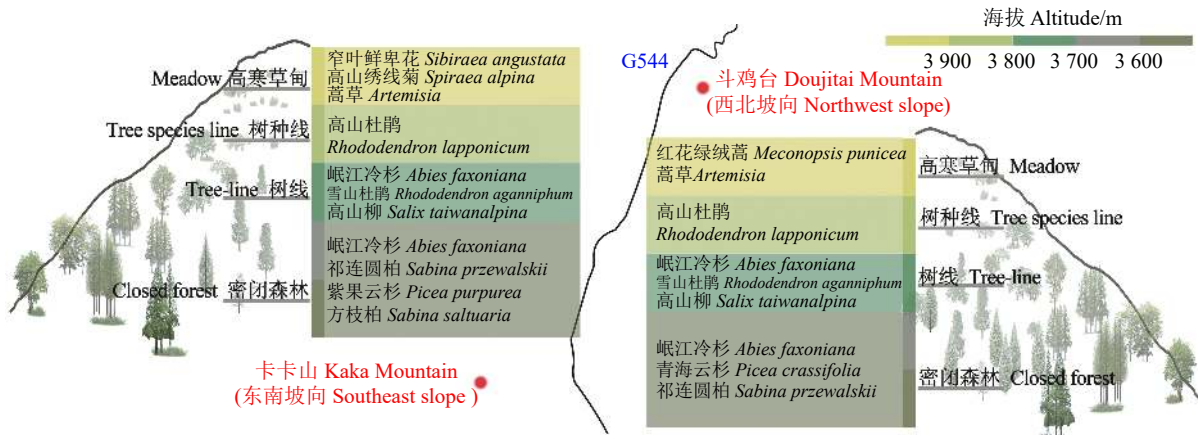


图 1 研究区域两处样地不同植被带示意图

Figure 1 Schematic diagram of the different vegetation zones at the two study sites

1.3 测定项目及方法

土壤 P 分级测定采用 Tiessen 磷素分级法^[25]。Tiessen 分级法是在 Hedley 分级法^[26]的基础上去除微生物磷和团聚体磷的测定。本研究省略了树脂交换态磷的提取,用 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{NaHCO}_3$ 溶液(有效磷)、 $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{NaOH}$ 溶液、 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{HCl}$ 逐级振荡浸提,分别测定其活性无机磷($\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$)、中等活性无机磷(NaOH-P_i)、 HCl-P_i 含量。全磷(total phosphorus, TP)含量采用 $\text{HNO}_3\text{-H}_2\text{O}_2$ 微波消解—钼锑抗比色法^[27]测定。残留无机磷(Residual-P)含量为全磷含量减去 $\text{NaHCO}_3\text{-P}$ 、 NaOH-P 和 HCl-P 含量。

土壤含水量(soil variable water content, VWC)采用烘干法测定;土壤酸碱度由 METTLER TOLEDO pH 计测定(水:土 = 2.5:1);土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)含量用重铬酸钾外加热法测定^[28];全氮(total nitrogen, TN)含量用元素分析仪(Vario EL III, Elementar, Langensfeld, Germany)测定。

1.4 数据处理

土壤数据进行分析前,利用卡方(K-S)检验分析数据正态性,非正态时进行数据转换,对方差同质性进行 Levene 检验。采用单因素方差分析法(One-way ANOVA)研究由不同生长期和植被类型引起的土壤无机磷组分含量的差异,方差齐性时采用最小显著差异法(least significance difference, LSD, $\alpha = 0.05$)进行多重比较,方差不齐则使用 Dunnett T3 进行多重比较。通过一般线性模型(general linear model, GLM)进行多因素方差分析(multi-way ANOVA),研究采样地、生长期、植被带类型和土壤深度及其

交互作用对土壤无机磷组分含量的影响。为明确土壤无机磷形态的时空分布格局,使用冗余分析(redundancy analysis, RDA)分析土壤无机磷组分在不同生长时期与环境因子之间的关系。为进一步测试土壤无机磷组分是否受土壤生境的影响,利用线性函数进行相关分析。统计分析和作图在 SPSS 22.0、Origin 2021 和 Canoco 5.0 中完成。

2 结果与分析

2.1 季节变化与空间格局下土壤无机磷组分特征

卡卡山和斗鸡台的土壤无机磷含量分别为 $17.6 \sim 659.5$ 和 $41.7 \sim 570.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。4 个因素中离均差平方和(sum of squares of deviation from mean, SS)反映主要变异源因子,绝对值愈大则表明这一因素对土壤无机磷组分的影响作用愈大,生长时期和植被带类型及其交互作用对不同土壤无机磷形态的影响显著($P < 0.01$),且生长时期是主要的影响因素,植被带类型对土壤无机磷组分的影响次之。研究地点对 NaOH-P_i 、 HCl-P_i 和 Residual-P 的含量有显著差异($P < 0.05$)。 $\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$ 、 NaOH-P_i 和 HCl-P_i 的含量在各土壤深度间无显著差异($P > 0.05$),且土壤深度与采样地、生长期和植被带类型并无交互作用,以下将不再考虑土层深度的影响(表 1)。

卡卡山和斗鸡台不同生长期的土壤无机磷含量差别很大,尤其是 NaOH-P_i ,在生长期均呈现逐渐增加的趋势并在生长末期含量达到最高($P < 0.05$)。卡卡山草甸区、树种线和密闭森林处生长末期($13.5 \sim 99.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)的 $\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$ 含量显著高于生

表 1 卡卡山和斗鸡台土壤无机磷组分含量的多因素方差分析
Table 1 Multi-way ANOVA on the content of soil inorganic phosphorus fractions at Kaka Mountain and Doujitai Mountain

影响因素 Impact factor	活性无机磷 NaHCO ₃ -P _i			中等活性无机磷 NaOH-P _i			HCl-P _i			残留无机磷 Residual-P		
	SS	F	P	SS	F	P	SS	F	P	SS	F	P
采样地 Sampling sites (S)	0.00	0.33	0.57	0.02	5.35	0.02 [*]	0.01	43.22	0.00 ^{**}	0.28	14.98	0.00 ^{**}
生长时期 Growth period (G)	0.01	30.44	0.00 ^{**}	2.52	375.80	0.00 ^{**}	0.06	88.51	0.00 ^{**}	3.90	105.69	0.00 ^{**}
植被带类型 Vegetation type (V)	0.00	4.14	0.01 ^{**}	0.11	10.71	0.00 ^{**}	0.04	45.98	0.00 ^{**}	1.47	26.48	0.00 ^{**}
土壤深度 Soil depth (D)	0.00	2.62	0.11	0.00	0.70	0.41	0.00	1.23	0.27	0.09	5.12	0.03 [*]
采样地 × 生长时期 S × G	0.01	14.95	0.00 ^{**}	0.06	8.82	0.00 ^{**}	0.01	9.13	0.00 ^{**}	0.26	6.96	0.00 ^{**}
采样地 × 植被带类型 S × V	0.00	2.82	0.04 [*]	0.02	1.91	0.13	0.03	26.35	0.00 ^{**}	0.32	5.77	0.00 ^{**}
采样地 × 土壤深度 S × D	0.00	0.02	0.89	0.01	2.42	0.12	0.00	1.63	0.20	0.16	8.76	0.00 ^{**}
生长时期 × 植被带类型 G × V	0.00	2.64	0.02 [*]	0.12	5.82	0.00 ^{**}	0.01	3.29	0.01 ^{**}	0.87	7.85	0.00 ^{**}
生长时期 × 土壤深度 G × D	0.00	1.63	0.20	0.01	1.77	0.18	0.00	1.50	0.23	0.13	3.51	0.03 [*]
植被带类型 × 土壤深度 V × D	0.00	1.12	0.34	0.01	1.43	0.24	0.00	0.22	0.88	0.09	1.55	0.21
采样地 × 生长时期 × 植被带类型 S × G × V	0.00	2.21	0.05 [*]	0.04	2.17	0.05	0.01	4.72	0.00 ^{**}	0.83	7.54	0.00 ^{**}
采样地 × 生长时期 × 土壤深度 S × G × D	0.00	0.88	0.42	0.01	2.02	0.14	0.00	0.80	0.45	0.01	0.38	0.68
采样地 × 植被带类型 × 土壤深度 S × V × D	0.00	1.56	0.20	0.00	0.46	0.71	0.00	0.60	0.61	0.06	1.15	0.33
生长时期 × 植被带类型 × 土壤深度 G × V × D	0.00	1.93	0.08	0.03	1.39	0.23	0.00	0.20	0.98	0.13	1.15	0.34
采样地 × 生长时期 × 植被带类型 × 土壤深度 S × G × V × D	0.00	1.54	0.17	0.01	0.31	0.93	0.00	0.40	0.88	0.13	1.21	0.31

SS值为离均差平方和。* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$ 。
SS is the sum of squares of deviation from the mean. * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$.

长初期和生长盛期 ($10.7 \sim 58.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) ($P < 0.05$)。斗鸡台密闭森林处的生长初期 ($26.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) $\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$ 含量显著低于生长盛期 ($P < 0.05$)。卡卡山各植被带 ($13.3 \sim 62.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 和斗鸡台草甸、树线和树种线处 ($25.2 \sim 114.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 的 HCl-P_i 含量均在生长初期最低。Residual-P 在无机磷含量中占比相对较高, 卡卡山各植被带 ($398.6 \sim 1\,508.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 和斗鸡台草甸、树种线和密闭森林 ($81.8 \sim 782.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 的 Residual-P 含量在生长初期最高 (图 2)。

2.2 生长季土壤无机磷形态在不同植被带的分布格局

在卡卡山, 土壤无机磷组分生长初期、生长盛期和生长末期在第 1 轴、第 2 轴解释量分别为 99.54% 和 0.27%、99.84% 和 0.78%、66.19% 和 30.40%。生长初期草甸 (meadow, AM) 土壤无机磷的主要形态为

$\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$ 和 Residual-P, 树种线 (tree species line, TSL) 和密闭森林 (closed forest, CF) 土壤无机磷的主要形态为 HCl-P_i 和 NaOH-P_i 。在植物生长盛期, AM 土壤无机磷的主要形态为 Residual-P, CF 土壤无机磷的主要形态为 $\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$ 和 HCl-P_i 。在生长末期, AM 土壤无机磷的主要形态为 NaOH-P_i 和 Residual-P, TSL 土壤无机磷的主要形态为 HCl-P_i , CF 土壤无机磷的主要形态为 $\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$ (图 3)。

在斗鸡台, 土壤无机磷组分生长初期、生长盛期和生长末期在第 1 轴、第 2 轴解释量分别为 97.07% 和 2.00%、94.31% 和 4.99%、65.97% 和 30.50%。植物生长初期 AM 土壤无机磷的主要形态为 NaOH-P_i 和 Residual-P, TSL 土壤无机磷的主要形态为 HCl-P_i , CF 土壤无机磷的主要形态为 $\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$ 。生长盛期 AM 土壤无机磷的主要形态为 NaOH-P_i , TSL 土壤无机磷的主要形态为 HCl-P_i 。在生长末期, AM

□ 生长初期 (6 月) Early growthstage (June) ▒ 生长盛期 (8 月) Peak growth stage (August) ■ 生长末期 (10 月) End of growth stage (October)

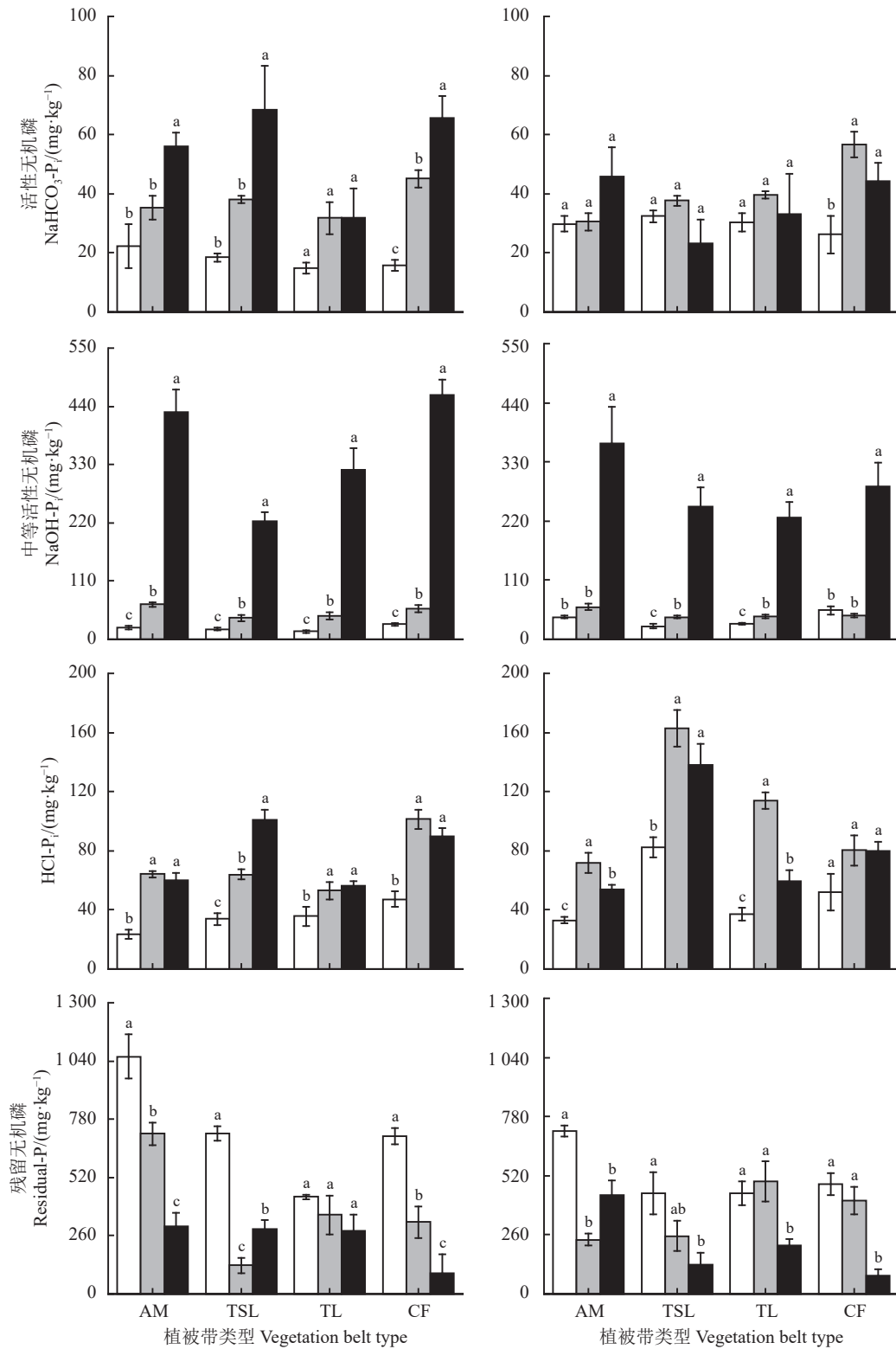


图 2 生长时期和植被带类型对卡卡山 (左) 和斗鸡台 (右) 土壤无机磷组分的影响

Figure 2 Effects of growth period and vegetation belt types on soil inorganic phosphorus fractions in Kaka Mountain (left) and Doujitai Mountain (right)

不同小写字母表示不同生长期间差异显著 ($P < 0.05$)。AM: 草甸; TSL: 树种线; TL: 树线; CF: 密闭森林。图 3 同。

Different lowercase letters mean significant differences among different growth periods at the 0.05 level. AM: meadow; TSL: tree species line; TL: tree-line; CF: closed Forest. This is applicable for Figure 3 as well.

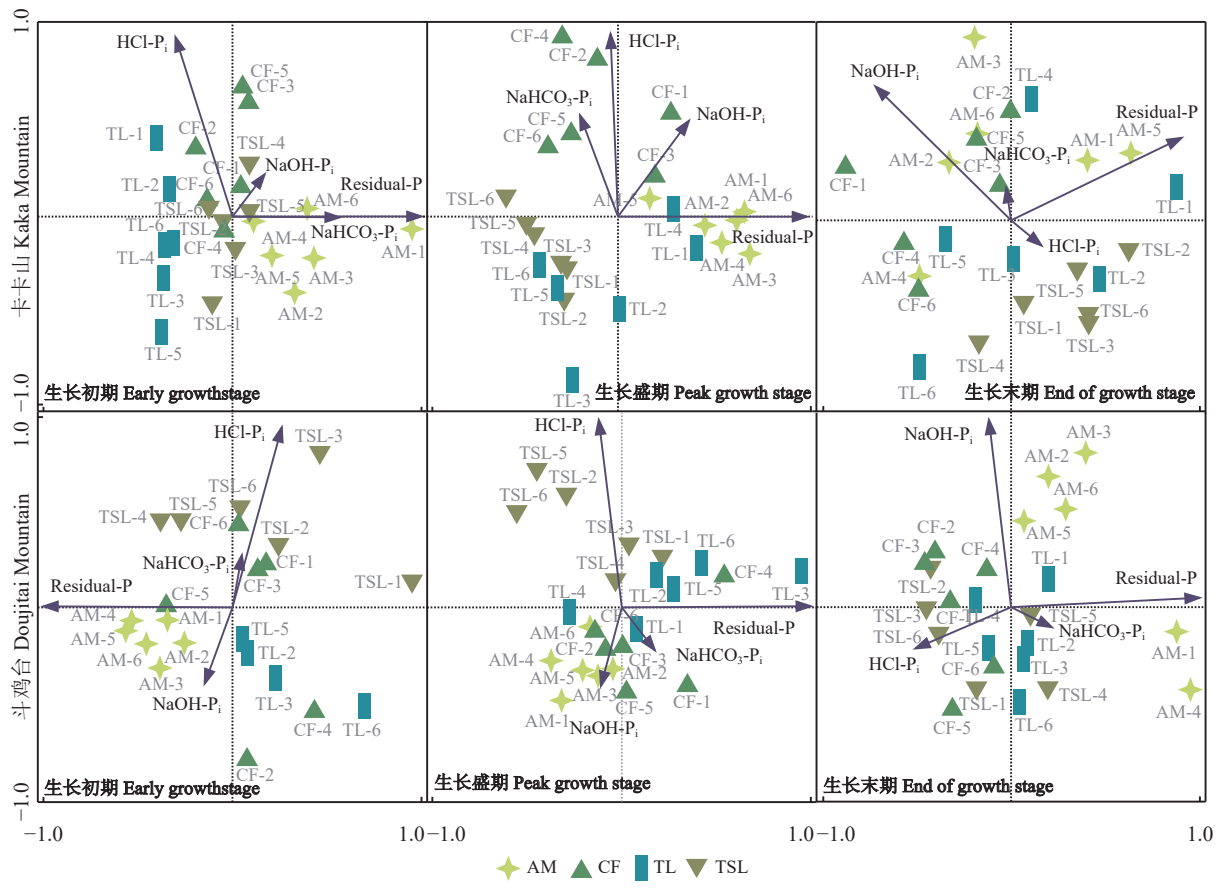


图 3 卡卡山和斗鸡台土壤无机磷形态季节动态和空间格局的冗余分析

Figure 3 Redundancy analysis of seasonal dynamics and spatial distribution pattern of soil inorganic phosphorus forms at Kaka Mountain and Doujitai Mountain

第 1 轴和第 2 轴分别代表第 1 主成分和第 2 主成分。磷形态箭头和植被带类型之间的角度越小则磷形态和该植被带之间有良好的相关性。
The first and second axes represent the first and second principal components, respectively. The smaller the angle between the arrows of a phosphorus form and a vegetation belt type, the better is the correlation between them.

土壤无机磷的主要形态为 NaOH-P_i 和 Residual-P , TSL 土壤无机磷的主要形态为 HCl-P_i , 树线 (tree-line, TL) 土壤无机磷的主要形态为 $\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$ (图 3)。

总体上看, 在生长期内的同一样带的土壤无机磷形态较为类似, AM 土壤无机磷的主要形态是中等活性无机磷 (NaOH-P_i) 和残留无机磷 (Residual-P), TSL 的主要无机磷形态是 HCl-P_i , CF 的主要无机磷形态是活性无机磷 ($\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$) (图 3)。

2.3 土壤无机磷形态与土壤关键理化性质的关系

土壤关键理化性质 SOC、TN、TP、VWC、pH 与土壤无机磷组分含量相关性显著 ($P < 0.05$)。土壤 $\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$ 含量受土壤碳含量的影响显著 ($P < 0.01$), 表现出明显的负相关关系, 与土壤酸碱度呈显著正相关关系 ($P < 0.05$)。 NaOH-P_i 含量与土壤全氮含量呈显著负相关关系 ($P < 0.01$), 与土壤含水量呈显著

负相关关系 ($P < 0.05$)。土壤 HCl-P_i 含量与土壤酸碱度呈显著正相关关系 ($P < 0.01$)。 Residual-P 含量与土壤含水量呈显著正相关关系 ($P < 0.01$) (图 4)。

碳氮比对土壤无机磷组分含量存在显著影响 ($P < 0.05$)。随着碳氮比值的增加, $\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$ 和 HCl-P_i 含量逐渐降低 ($P < 0.05$), 土壤 NaOH-P_i 含量逐渐增加 ($P < 0.01$)。 $\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$ 和 Residual-P 含量与碳磷比呈显著负相关关系 ($P < 0.05$)。氮磷比与 Residual-P 含量呈显著负相关关系 ($P < 0.01$) (图 5)。

3 讨论

3.1 生长期和植被类型对土壤无机磷组分及形态的影响

生长时期、植被带类型、土壤理化性质及其交互作用影响亚高山森林—高山草地生态系统界面

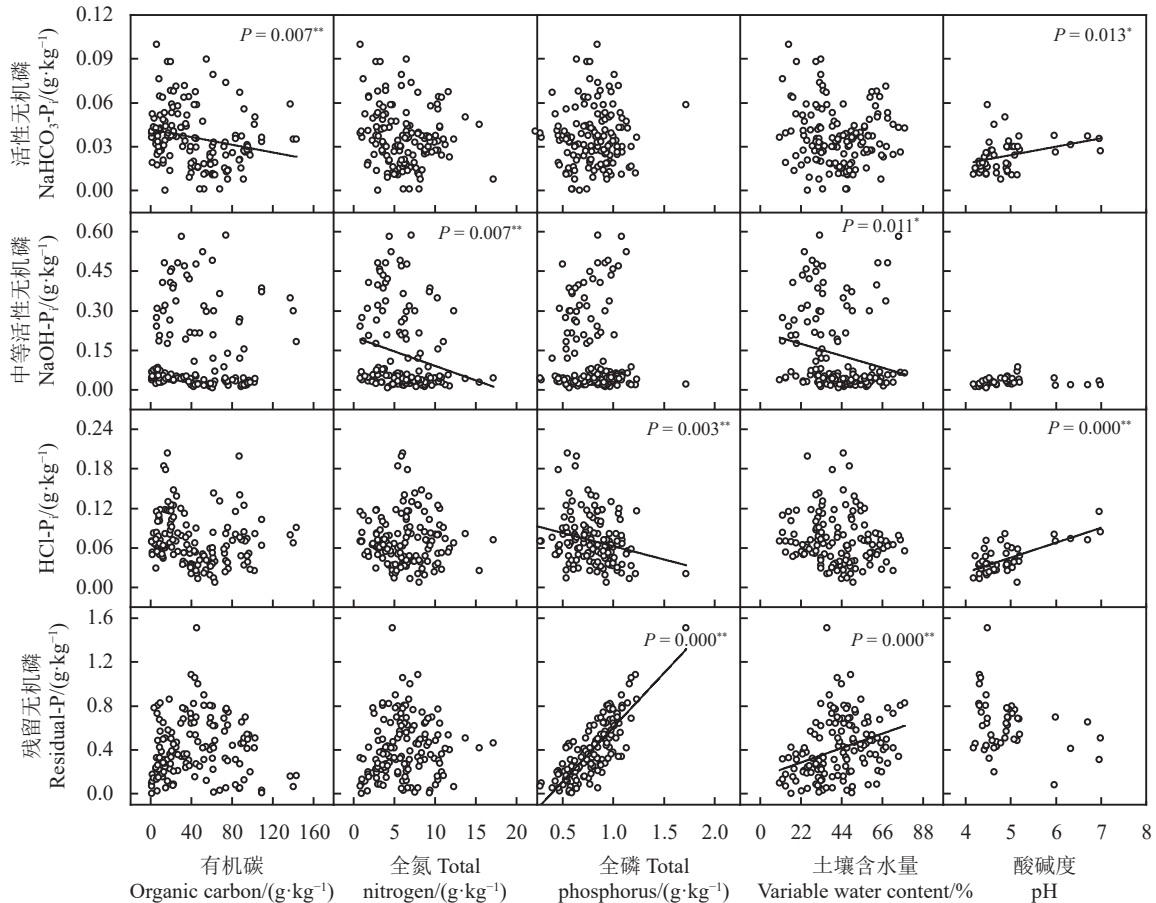


图 4 卡卡山和斗鸡台土壤有机碳、全氮、全磷、土壤含水量、pH 与土壤无机磷组分的散点相关图

Figure 4 Scatter correlation diagram between soil organic carbon, total nitrogen, total phosphorus, variable water content, pH, and soil inorganic phosphorus fractions at Kaka Mountain and Doujitai Mountain

有机碳、全氮、全磷、土壤含水量的样本量为 144, pH 的样本量为 48。黑线是土壤理化性质和无机磷组分显著相关的拟合直线; * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$; 图 5 同。

soil organic carbon, total nitrogen, total phosphorus, variable water content sample size $N = 144$, pH sample size $N = 48$. The black line is a fitting line which has a significant correlation between soil physical and chemical properties and inorganic phosphorus fractions; * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$. This is applicable for Figure 5 as well.

的土壤无机磷形态、含量和有效性,这与前人研究结果一致^[16, 29]。卡卡山和斗鸡台的土壤无机磷组分含量在不同生长时期和垂直植被带上有显著差异,生长期间的差异更甚;在土层 0—15 和 15—30 cm 几乎没有显著差异。本研究生长时期对于 NaOH- P_i 和 Residual-P 的 SS 值分别为 2.52 和 3.90, 相较其他无机磷的 SS 值明显较大,说明生长期对这两种无机磷组分含量的影响尤为明显。Residual-P 主要是由抗风化能力强的硅酸盐包裹的难以利用的无机磷,在青藏高原东缘的贡嘎山燕子沟的研究表明,当土壤 pH 低至 4.14 时, Residual-P 的溶解也十分困难,因此在研究区域海拔 2 334~3 600 m 处 Residual-P 始终是土壤全磷的最大组分^[30];关于未

经干扰的天然次生林土壤磷素形态的垂直分布特征研究指出,在含磷较低的土壤中,较长的时间尺度内残留磷通过土壤的生物化学反应转化为有效磷^[30-31]。在本研究中,残留无机磷明显较其他无机磷形态含量多,是无机磷的第一大组分,在不同植被带生长期的储量水平存在差异,且在生长初期时的含量显著最高。理县米亚罗自然保护区高山树线交错带枯枝落叶分解的研究表明,近年来气候变化背景下的林线上移进一步使植物功能群的凋落物在分解过程中加速了土壤中铁、铝元素的释放和累积^[32]。本研究酸性土壤环境令有机磷矿化释放的无机磷优先被土壤中金属氧化物所固定,磷酸盐易与土壤凋落物带来的大量游离的铁铝矿物吸附结

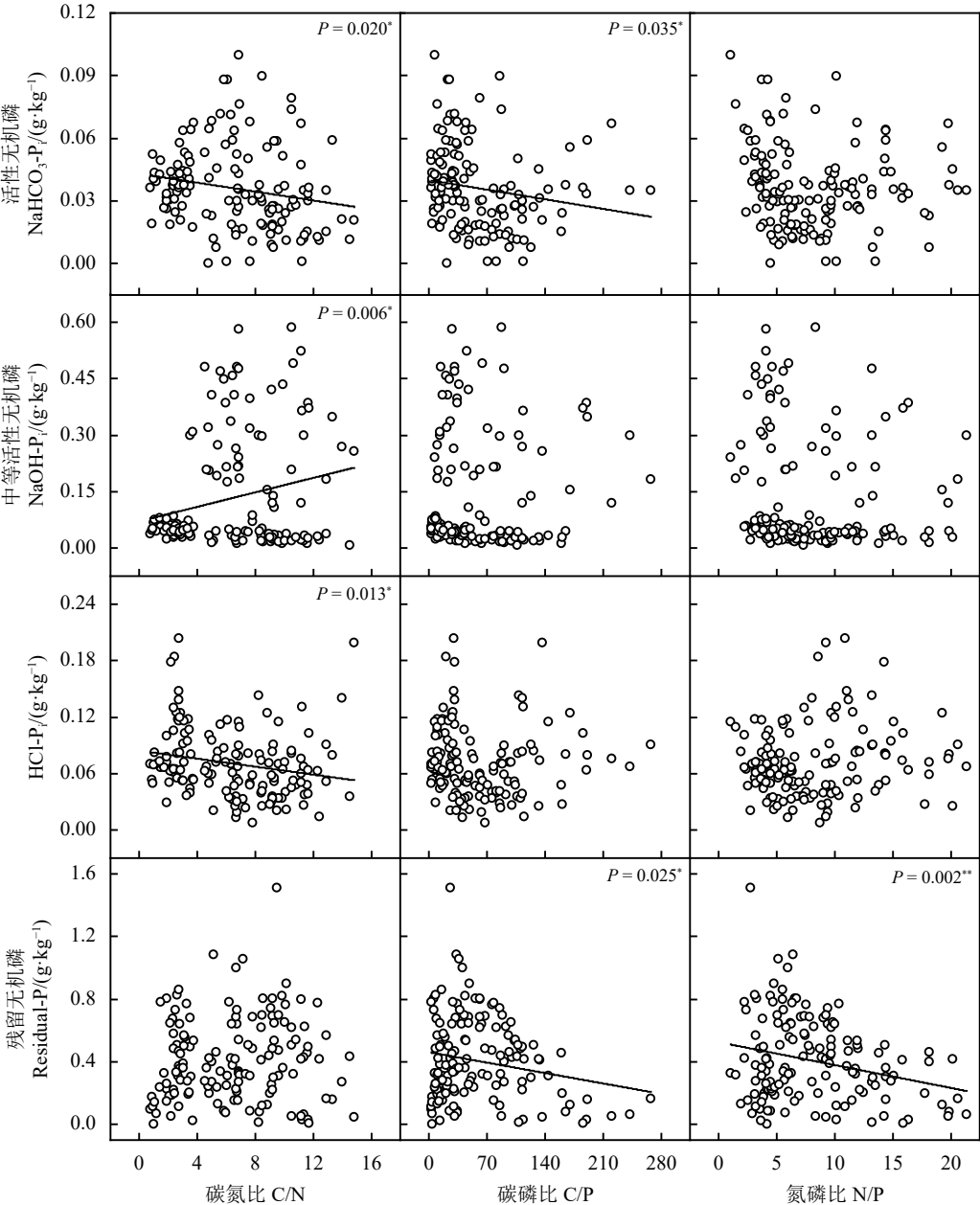


图 5 卡卡山和斗鸡台土壤 C/N、C/P、N/P 与土壤无机磷组分的散点相关图

Figure 5 Scatter correlation diagram of soil C/N, C/P, N/P, and inorganic phosphorus fractions at Kaka Mountain and Doujitai Mountain

合^[33]。NaOH- P_i 是铁铝氧化物或氢氧化物吸附磷，铁铝氧化物或氢氧化物随土壤水分含量减少和氧化作用的加强而增加，从而提高对磷的吸附^[34]。本研究中卡卡山和斗鸡台在植物生长季由于受到降雨—温度耦合以及各植被带水土保持和蒸散发作用的影响^[24]，造成土壤水分含量从生长初期至生长末期持续降低 [卡卡山 ($34.3\% \pm 4.1\%$)~($45.9\% \pm 1.4\%$); 斗鸡台 ($35.9\% \pm 1.7\%$)~($52.5\% \pm 2.4\%$)]。因此生长期

力提高，NaOH- P_i 含量呈现持续增加的趋势。伴随着植物刚进入生长季开始吸收土壤养分，土壤活性无机磷含量较非生长季一般有所下降^[35]，各植被带的 $NaHCO_3-P_i$ 含量在生长初期最低。植物生长期产生的凋落物包括叶片残留物通常是土壤活性磷的重要来源^[36]，植物进入生长盛期后，土壤微生物活性增强，凋落物增加，凋落物矿化后可以补充土壤 $NaHCO_3-P_i$ 含量^[18]。卡卡山植物生长末期草甸区、树种线和密闭森林的 $NaHCO_3-P_i$ 含量最高，斗鸡台

密闭森林的 $\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$ 在生长盛期、生长末期显著高于生长初期, 草甸样带生长末期的 $\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$ 含量最高。一方面生长盛期和生长末期土壤根系分泌物的输入和凋落物的矿化增加了 SOC 含量 [卡卡山 3 条样带生长盛期 $(3.8 \pm 1.4) \sim (11.6 \pm 2.5) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 生长末期 $(10.6 \pm 2.3) \sim (35.4 \pm 8.7) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$; 斗鸡台草甸生长盛期 $(8.6 \pm 1.1) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 生长末期 $(48.4 \pm 4.6) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$; 密闭森林样带各生长期 $(80.6 \pm 5.9) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, $(34.3 \pm 2.5) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, $(121.2 \pm 9.1) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$], 为土壤微生物带来能源^[37-38]。另一方面土壤凋落物 C/N 通过对微生物数量和活性的影响调节土壤有机物质分解, 促进微生物群落规模的扩大^[39]。这增强了土壤酸性磷酸酶的活性, 从而增加生物有效性最高的土壤无机磷含量。

生长期, 以蒿草等为优势种的草甸区土壤无机磷形态主要是 NaOH-P_i 和 Residual-P , 以高山杜鹃和以岷江冷杉为优势种的树种线和密闭森林植被带的土壤无机磷形态主要是 HCl-P_i 和 $\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$ 。在卡卡山和斗鸡台的垂直梯度上, 随着海拔的上升, 植被从森林过渡到灌丛和草甸, 植被带土壤养分、微生物活性和凋落物质量均在发生变化^[17]。植物的根系吸收无机磷、土壤微生物活化矿物磷和土壤性质变化引起无机磷的再分配等过程造成不同植被下土壤无机磷形态的差异^[18]。草甸区特别是卡卡山草甸的磷形态以 Residual-P 为主, 表明该植被带下土壤的磷活性较差。植物种类通过控制土壤 pH 的变化对于 HCl-P_i 的垂直格局分布有着十分直接的影响^[15], 本研究中 HCl-P_i 含量与 pH 呈现显著的正相关关系 ($R = 0.70$, $P < 0.01$), 树种线样带更为明显 ($R = 0.92$, $P < 0.01$)。植物群落组成关系到土壤中金属元素的释放, 树种线植被带土壤的 HCl-P_i 含量也与该植被带土壤钙含量有关^[40]。Shen 等^[32] 发现高寒生态系统以高山杜鹃等为优势种的落叶灌木凋落物中 Ca 元素等的释放速率显著高于常绿乔木和灌木林下凋落物, 而 Al 和 Fe 在不同植物功能群下凋落物中积累, 已有卡卡山的研究表明 NaOH-P_i 含量与 Fe 含量呈显著正相关关系^[18]。斗鸡台生长初期和卡卡山生长盛期、生长末期密闭森林样带的主要无机磷形态是 $\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$, 这是因为针叶林的酸性土壤环境^[18] 和 TN、C/N、N/P、VWC 等因子共同控制^[41] 活化 HCl-P_i 向 $\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$ 转化。

3.2 土壤关键理化性质与土壤无机磷组分的关系

在亚高山森林—高山草地生态系统界面不同植被类型下土壤理化性质影响土壤磷素形态及其循环过程。卡卡山、斗鸡台的高山灌丛和乔木林处的土壤无机磷组分与土壤关键理化性质 (有机碳、全氮、全磷、含水量、pH) 的相关性显著, 这与前人研究结果^[30, 42] 相似, 土壤有机质、酸性磷酸酶、土壤温度、可溶性有机碳和微生物量氮等影响土壤无机磷的有效性。小兴安岭的阔叶红松林土壤 TP 与各磷组分 (HCl-P_i 、 $\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$ 和 NaOH-P_i 等) 之间相关性显著, 且所占比例较大的组分与 TP 相关性较高^[43]。本研究中 Residual-P 含量明显高于 HCl-P_i , 与 TP 相关性也更为显著。土壤含水量影响土壤中的氧化还原反应, 直接关系到土壤无机磷的吸附与释放^[44]。Zhang 等^[45] 发现干旱显著增加了土壤次生铁铝矿物相关的土壤无机磷含量, 磷酸钙中无机磷含量显著降低, 干旱条件下土壤 pH 降低促进磷酸钙对磷的增溶作用, 而这部分释放出的磷与土壤中丰富的可交换铝通过化学反应转化为次生矿物无机磷组分。土壤含水量影响铁、铝元素与无机磷的结合, 本研究中土壤含水量与 NaOH-P_i 含量呈显著负相关关系, 这与前人研究结果一致^[34]。pH 较低时会增加土壤中磷酸盐的溶解度, pH 为 6~7 时, 磷的有效性最高^[46]。本研究结果中, 在 pH 为 4.17~6.99 时, 土壤 $\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$ 和 HCl-P_i 含量与 pH 呈正比, 随 pH 的增大 $\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$ 和 HCl-P_i 含量增加。

土壤 C/N、C/P 和 N/P 是用来衡量土壤限制性营养的重要指标^[39], 直接或间接地影响土壤磷素组分含量。土壤化学计量比的时空变化格局受生物环境的影响复杂^[47], 本研究中碳氮磷化学计量比随植被生长期、土层深度、植被样带和纬度等的变化趋势是复杂多变的, 在各生长期和植被带等 C/N、C/P 和 N/P 与无机磷组分的相关关系存在差异, 特别是活性磷增多的时期和样带。但是从整体上分析, 土壤无机磷组分与碳氮磷化学计量比有明显的相关关系。土壤 C/N 通过改变微生物的群落组成和活性, 对土壤磷酸酶活性产生影响^[39]。本研究随着土壤 C/N 增大, 土壤 $\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$ 含量减小, NaOH-P_i 含量增加, HCl-P_i 含量减小。C/P 反映出有机质矿化时释放 P 潜力的大小, 是土壤 P 有效性的表征参数^[48]。本研究中土壤无机磷活性与 C/P 显著相关。陆地生

态系统的临界 N/P 作为养分限制指标来指示氮限制或磷限制, 可以反映磷活性, N/P 较高时土壤磷活性较低, N/P 较低时则磷活性较高^[49], 本研究中 Residual-P 含量与 N/P 呈负相关关系。

4 结论

植物生长期和植被带类型通过改变亚高山森林—

高山草地生态系统界面土壤理化性质影响无机磷有效性。土壤的碳、氮、磷含量及其化学计量比, 土壤酸碱度和含水量与土壤无机磷组分含量显著相关。土壤无机磷含量受不同海拔的植被带类型的影响, 一定程度上可能也与乔灌木凋落物有关, 使得土壤无机磷组分含量在生长期不同阶段的特征差异明显。

参考文献 References:

- [1] WASSEN M J, VENTERINK H O, LAPSHINA E D, TANNEBERGER F. Endangered plants persist under phosphorus limitation. *Nature*, 2005, 437: 547-550.
- [2] WU Y H, ZHOU J, YU D, SUN S Q, LUO J, BING H J, SUN H Y. Phosphorus biogeochemical cycle research in mountainous ecosystems. *Journal of Mountain Science*, 2013, 10(1): 43-53.
- [3] WU N, GOPAL S R, EKLABYA S. High-altitude Ecosystem Interfaces in the Hindu Kush Himalayan Region. Kathmandu, Nepal: International Centre for Integrated Mountain Development, 2013: 3-14.
- [4] ERDOS L, GALLE R, BATORI Z, PAPP M, KOERMOECZI L. Properties of shrub-forest edges: A case study from south Hungary. *Central European Journal of Biology*, 2011, 6(4): 639-658.
- [5] KOENER C. Treelines will be understood once the functional difference between a tree and a shrub is. *Ambio*, 2012, 41(3): 197-206.
- [6] MALANSON G P, RESLER L M, BUTLER D R, FAGRE D B. Mountain plant communities: Uncertain sentinels. *Progress in Physical Geography*, 2019, 43(4): 521-543.
- [7] FAJARDO A, PIPER F I. An assessment of carbon and nutrient limitations in the formation of the southern Andes tree line. *Journal of Ecology*, 2016, 105(2): 517-527.
- [8] LYU M, SUN M, PENUELAS J, SARDANS J, SUN J, CHEN X P, ZHONG Q L, CHENG D L. Temperature controls growth of *Pinus taiwanensis* along an elevational gradient. *Trees*, 2021, 35(2): 433-440.
- [9] CROSS A F, SCHLESINGER W H. A literature-review and evaluation of the Hedley fractionation: Applications to the biogeochemical cycle of soil phosphorus in natural ecosystems. *Geoderma*, 1995, 64(3-4): 197-214.
- [10] CHEN H, ZHU Q, PENG C H, WU N, WANG Y F, FANG X Q, GAO Y H, ZHU D, YANG G, TIAN J Q, KANG X M, PIAO S L, OUYANG H, XIANG W H, LUO Z B, JIANG H, SONG X Z, ZHANG Y, YU G R, ZHAO X Q, GONG P, YAO T D, WU J H. The impacts of climate change and human activities on biogeochemical cycles on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Global Change Biology*, 2013, 19(10): 2940-2955.
- [11] DROLLINGER S, MVLLER M, KOBL T, SCHWAB N, BOHNER J, SCHICKHOFF U, SCHOLTEN T. Decreasing nutrient concentrations in soils and trees with increasing elevation across a treeline ecotone in Rolwaling Himal, Nepal. *Journal of Mountain Science*, 2017, 14(5): 843-858.
- [12] 顾振宽, 杜国祯, 朱炜歆, 索南吉, 张世虎. 青藏高原东部不同草地类型土壤养分的分布规律. *草业科学*, 2012, 29(4): 507-512.
- [12] GU Z K, DU G Z, ZHU W X, Suonanj, ZHANG S H. Distribution pattern of soil nutrients in different grassland types and soil depths in the eastern Tibetan Plateau. *Pratacultural Science*, 2012, 29(4): 507-512.
- [13] LI L H, ZHANG Y L, LIU L S, WU J S, WANG A F, LI S C, ZHANG H M, ZU J X, DING M J, PAUDEL B. Spatiotemporal patterns of vegetation greenness change and associated climatic and anthropogenic drivers on the Tibetan Plateau during 2000—2015. *Remote Sensing*, 2018, 10(10): 1525.
- [14] LIU H Y, CUI H T, HUANG Y M. Detecting Holocene movements of the woodland-steppe ecotone in northern China using discriminant analysis. *Journal of Quaternary Science*, 2001, 16(3): 237-244.
- [15] 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.

- [16] 吴艳宏, 周俊, 邴海健, 余东, 孙守琴, 罗辑. 贡嘎山海螺沟典型植被带总磷分布特征. *地球科学与环境学报*, 2012, 34(3): 70-74.
WU Y H, ZHOU J, BING H J, YU D, SUN S Q, LUO J. Characteristic of total phosphorus distribution in typical vegetation zones along Hailuoguo of Gongga Mountain. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2012, 34(3): 70-74.
- [17] FREPPAZ M, WILLIAMS B L, EDWARDS A C, SCALENGHE R, ZANINIA E. Simulating soil freeze/ thaw cycles typical of winter alpine conditions: Implications for N and P availability. *Applied Soil Ecology*, 2007, 35(1): 247-255.
- [18] 张林, 吴彦, 吴宁, 孔璐, 刘琳, 胡红宇. 林线附近主要植被类型下土壤非生长季磷素形态. *生态学报*, 2010, 30(13): 3457-3464.
ZHANG L, WU Y, WU N, KONG L, LIU L, HU H Y. The soil phosphorus form under different vegetation types near timberline during non-growing season. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(13): 3457-3464.
- [19] 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.
- [20] 徐光荣, 张世熔, 钟钦梅, 王贵胤. 岷江上游典型土壤磷的迁移特性研究. *农业环境科学学报*, 2018, 37(8): 1741-1747.
XU G R, ZHANG S R, ZHONG Q M, WANG G Y. Phosphorus movement characteristics of typical soils in the upper reaches of the Minjiang River, China. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(8): 1741-1747.
- [21] 高景, 王金牛, 徐波, 谢雨, 贺俊东, 吴彦. 不同雪被厚度下典型高山草地早春植物叶片性状、株高及生物量分配的研究. *植物生态学报*, 2016, 40(8): 775-787.
GAO J, WANG J N, XU B, XIE Y, HE J D, WU Y. Plant leaf traits, height and biomass partitioning in typical ephemerals under different levels of snow cover thickness in an alpine meadow. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2016, 40(8): 775-787.
- [22] 刘美, 马志良. 青藏高原东部乔灌木交错带地被物和土壤碳氮磷化学计量特征. *应用与环境生物学报*, 2021, 27(5): 8.
LIU M, MA Z L. Carbon, nitrogen, and phosphorus stoichiometric characteristics of ground covers and soils in a forest-shrub ecotone on the eastern Tibetan Plateau. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2021, 27(5): 8.
- [23] 何家莉, 宋怡珂, 王金牛, 周俊, 王春雅, 查琳, 石凝, 吴彦, 白景文. 岷江源区高山林草交错带土壤碳、氮、磷生态化学计量关系的时空变化. *应用与环境生物学报*, 2021, 27(4): 869-877.
HE J L, SONG Y K, WANG J N, ZHOU J, WANG C Y, ZHA L, SHI N, WU Y, BAI J W. The spatial and temporal variations of soil C, N, P ecological stoichiometry across the alpine forests and grassland ecotone at Minjiang Headwaters. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2021, 27(4): 869-877.
- [24] 陈文年, 吴宁, 罗鹏, 晏兆莉. 岷江上游林草交错带祁连山圆柏群落的物种多样性及乔木种群的分布格局. *应用与环境生物学报*, 2003, 9(3): 221-225.
CHEN W N, WU N, LUO P, YAN Z L. Species diversity and tree population distribution pattern of *Sabina przewalskii* community in the forest grass ecotone of the upper reaches of Minjiang River. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2003, 9(3): 221-225.
- [25] CARTER M R, GREGORICH E G. Soil Sampling and Methods of Analysis. 2th ed. Boca Raton: CRC Press, 2008: 289-302.
- [26] CONDRON L M, NEWMAN S. Revisiting the fundamentals of phosphorus fractionation of sediments and soils. *Journal of Soils and Sediments*, 2011, 11: 830-840.
- [27] FROSSARD E, STEWART J W B, ST ARNAUD R J. Distribution and mobility of phosphorus in grassland and forest soils of Saskatchewan. *Canadian Journal of Soil Science*, 1989, 69(2): 401-416.
- [28] 鲍士旦. 土壤农化分析. 第三版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
BAO S D. Soil and Agrochemistry Analysis. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [29] LUO L, YE H Y, ZHANG D H, GU J D, DENG O P. The dynamics of phosphorus fractions and the factors driving phosphorus cycle in Zoige. *Chemosphere*, 2021, 278: 130501.
- [30] 周俊, 邴海健, 吴艳宏, 孙守琴, 罗辑. 贡嘎山燕子沟土壤磷海拔梯度特征及影响因素. *山地学报*, 2016, 34(4): 385-392.
ZHOU J, BING H J, WU Y H, SUN S Q, LUO J. Variations in soil P biogeochemistry and its impact factors along an altitudinal gradient in the Yanzigou, eastern slope of the Gongga Mountain. *Mountain Research*, 2016, 34(4): 385-392.
- [31] 杨小燕, 陈祥伟. 未开垦干扰黑土土壤磷素形态垂直分布特征. *土壤通报*, 2016, 47(2): 378-383.
YANG X Y, CHEN X W. Vertical distribution of soil phosphorus fractionation in uncultivated black soil. *Chinese Journal of Soil Science*, 2016, 47(2): 378-383.

- [32] SHEN X, CHEN Y M, WANG L F, GUO L, ZHENG H F, ZHANG J, XU Z F, TAN B, ZHANG L, LI H, YOU C M, LIU Y. Mixture of plant functional groups inhibits the release of multiple metallic elements during litter decomposition in alpine timberline ecotone. *Science of the Total Environment*, 2020, 747: 141298.
- [33] TIESSEN H. Phosphorus in the global environment. In: WHITE P J, HAMMOND J P. The Ecophysiology of Plant-Phosphorus Interactions. Dordrecht: Plant Ecophysiology, 1996, 7: 1-2.
- [34] MILLER A J, SCHUUR E, CHADWICK O A. Redox control of phosphorus pools in Hawaiian montane forest soils. *Geoderma*, 2001, 102(3/4): 219-237.
- [35] SHIELS A B, SANFORD R L. Soil nutrient differences between two krummholz-form tree species and adjacent alpine tundra. *Geoderma*, 2001, 102(3): 205-217.
- [36] FABRE A, GAUQUELIN T, VILASANTE F, ORTEGA A, PUIG H. Phosphorus content in five representative landscape units of the Lomas de Arequipa (Atacama Desert-Peru). *Catena*, 2006, 65(1): 80-86.
- [37] 吴彦, ONIPCHENKO V G. 雪被对川西高山植被坡向性分异的影响. *生态学报*, 2007, 27(12): 5120-5129.
WU Y, ONIPCHENKO V G. The impact of snow-cover on alpine vegetation type of different aspects in the west of Sichuan Province. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(12): 5120-5129.
- [38] ALLISON S D, VITOUSEK P M. Responses of extracellular enzymes to simple and complex nutrient inputs. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37(5): 937-944.
- [39] TIAN H Q, CHEN G S, ZHANG C, MELILLO J, HALL C A S. Pattern and variation of C : N : P ratios in China's soils: A synthesis of observational data. *Biogeochemistry*, 2010, 98: 139-151.
- [40] MEASON D F, IDOL T W, FRIDAY J B, SCOWCROFT P G. Effects of fertilisation on phosphorus pools in the volcanic soil of a managed tropical forest. *Forest Ecology and Management*, 2009, 258(10): 2199-2206.
- [41] BLANCO J A, IMBERT J B, CASTILLO F J. Thinning affects *Pinus sylvestris* needle decomposition rates and chemistry differently depending on site conditions. *Biogeochemistry*, 2011, 106: 397-414.
- [42] 贝昭贤, 张秋芳, 郑蔚, 杨柳明, 陈岳民, 杨玉盛. 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*, 2018, 38(3): 1106-1113.
BEI Z X, ZHANG Q F, ZHENG W, YANG L M, CHEN Y M, YANG Y S. Effects of simulated warming on soil phosphorus availability in subtropical Chinese fir plantation. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(3): 1106-1113.
- [43] 张鑫, 谷会岩, 陈祥伟. 择伐干扰对小兴安岭阔叶红松林土壤磷形态及有效性的影响. *应用生态学报*, 2018, 29(2): 441-448.
ZHANG X, GU H Y, CHEN X W. Effects of selective cutting on soil phosphorus forms and availability in Korean pine broadleaved forest in Xiaoxing'an Mountains of China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(2): 441-448.
- [44] XIAO H L, ZHENG X J. Effects of soil warming on some soil chemical properties. *Soil and Environmental Sciences*, 2000, 4(2): 316-321.
- [45] ZHANG H Z, SHI L L, LU H B, SHAO Y H, LIU S R, FU S L. Drought promotes soil phosphorus transformation and reduces phosphorus bioavailability in a temperate forest. *Science of the Total Environment*, 2020, 732: 139295.
- [46] TIESSEN H, MOIR J O. Characterization of Available P by Sequential Extraction. 2th ed. Boca Raton: CRC Press, 2007: 293-306.
- [47] 冯德枫, 包维楷. 土壤碳氮磷化学计量比时空格局及影响因素研究进展. *应用与环境生物学报*, 2017, 23(2): 400-408.
FENG D F, BAO W K. Review of the temporal and spatial patterns of soil C : N : P stoichiometry and its driving factors. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2017, 23(2): 400-408.
- [48] XIAO R, BAI J H, GAO H F, HUANG L B, DENG W. Spatial distribution of phosphorous in marsh soils from a typical land/inland water ecotone along a hydrological gradient. *Catena*, 2012, 98: 96-103.
- [49] 张静静, 刘尊驰, 鄢创, 王云霞, 刘凯, 时新荣, 袁志友. 土壤pH值变化对3种草原类型土壤碳氮磷生态化学计量特征的影响. *草业学报*, 2021, 30(2): 69-81.
ZHANG J J, LIU Z C, YAN C, WANG Y X, LIU K, SHI X R, YUAN Z Y. Effects of soil pH on soil carbon, nitrogen, and phosphorus ecological stoichiometry in three types of steppe. *Acta Prataculturae Sinica*, 2021, 30(2): 69-81.

(责任编辑 王芳)