

DOI: 10.11931/guihaia.gxzw202402027

杨倩, 张伟, 梁月明, 等. 2025. 土地利用类型和水热条件影响喀斯特地区土壤无机磷和生物有效磷组分的特征 [J]. 广西植物, 45(6): 1006–1018.

YANG Q, ZHANG W, LIANG YM, et al., 2025. Characteristics of soil inorganic phosphorus and bioavailable phosphorus fractions in karst regions, influenced by land use types and hydrothermal conditions [J]. *Guihaia*, 45(6): 1006–1018.

土地利用类型和水热条件影响喀斯特地区土壤无机磷和生物有效磷组分的特征

杨倩¹, 张伟^{2,4}, 梁月明³, 王克林^{2,4}, 胡培雷^{2,4}, 潘复静^{1*}

(1. 桂林理工大学 环境科学与工程学院, 广西环境污染控制理论与技术重点实验室, 广西 桂林 541006; 2. 中国科学院亚热带农业生态研究所, 长沙 410125; 3. 中国地质科学院岩溶地质研究所, 自然资源部岩溶动力学重点实验室, 广西 桂林 541004; 4. 河池环江农田生态系统广西野外科学观测研究站, 广西 环江 547100)

摘要: 为了解喀斯特地区土地利用类型和水热条件影响土壤无机磷和生物有效磷组分的特征, 该研究分析比较了低水热地区重庆南川区、贵州独山县和绥阳县及高水热地区广西环江县、马山县/武鸣区和龙州县的喀斯特地区耕地、人工林和天然林土壤无机磷和生物有效磷组分的变化特征。采用单因素方差分析、双因素方差分析和相关性分析方法, 探讨土地利用类型和水热条件影响下土壤无机磷组分和生物有效磷组分的差异特征及两者之间的关系, 并采用冗余分析方法探究影响土壤生物有效磷组分的关键无机磷组分。结果表明: (1) 土壤无机磷组分受土地利用类型显著影响, 耕地土壤中磷酸二钙 ($\text{Ca}_2\text{-P}$)、磷酸八钙 ($\text{Ca}_8\text{-P}$)、铝结合态磷 (Al-P)、铁结合态磷 (Fe-P)、闭蓄态磷 (O-P) 和磷酸十钙 ($\text{Ca}_{10}\text{-P}$) 的含量均高于人工林和天然林土壤。 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Fe-P 和 O-P 的含量表现为耕地 > 人工林 > 天然林, $\text{Ca}_2\text{-P}$ 和盐酸磷 (HCl-P) 的含量则表现为耕地 > 天然林 > 人工林。(2) 在高水热地区, 天然林土壤 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 和 O-P 的含量显著高于低水热地区, 人工林和天然林土壤的酶提取磷 (Enzyme-P) 含量高于低水热地区。(3) 土壤无机磷组分 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Al-P 、 Fe-P 和 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 的含量与生物有效磷组分 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 和 HCl-P 含量呈显著正相关; 冗余分析表明, $\text{Ca}_2\text{-P}$ 是影响生物有效磷组分的关键组分。综上认为, 土地利用类型和水热条件是影响土壤无机磷组分及生物有效磷组分特征的关键因素, 无机磷组分含量的提高对生物有效磷组分具有正向作用。因此, 应考虑未来气候变化可能对土壤中磷的形态及其有效性产生的影响, 以推进喀斯特生态系统恢复。

关键词: 喀斯特生态系统, 土地利用类型, 水热条件, 无机磷组分, 生物有效磷

中图分类号: Q948 文献标识码: A 文章编号: 1000-3142(2025)06-1006-13

Characteristics of soil inorganic phosphorus and bioavailable phosphorus fractions in karst regions, influenced by land use types and hydrothermal conditions

收稿日期: 2024-06-16 接受日期: 2024-07-22

基金项目: 国家自然科学基金(U20A2011, 42261011, 32271730); 国家重点研发计划项目(2022YFF1300704); 广西重点研发项目(桂科 AB24010051); 中国地质科学院岩溶地质研究所基本科研业务费项目(2023020)。

第一作者: 杨倩(2000—), 硕士研究生, 主要研究方向为喀斯特生态系统恢复, (E-mail) yangq628204@163.com。

* 通信作者: 潘复静, 博士, 副研究员, 主要从事生态恢复及地下生态学研究, (E-mail) panfujing@glut.edu.cn。

YANG Qian¹, ZHANG Wei^{2,4}, LIANG Yueming³, WANG Kelin^{2,4},
HU Peilei^{2,4}, PAN Fujing^{1*}

(1. *Guangxi Key Laboratory of Theory and Technology for Environmental Pollution Control, College of Environmental and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541006, Guangxi, China*; 2. *Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China*; 3. *Karst Dynamics Laboratory, Ministry of Natural Resources, Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin 541004, Guangxi, China*; 4. *Huanjiang Agriculture Ecosystem Observation and Research Station of Guangxi, Guangxi Key Laboratory of Karst Ecological Processes and Services, Huanjiang Observation and Research Station for Karst Ecosystems, Chinese Academy of Sciences, Huanjiang 547100, Guangxi, China*)

Abstract: In order to gain an understanding of the characteristics of soil inorganic phosphorus and bioavailable phosphorus fractions affected by land use types and hydrothermal conditions in karst regions, the characteristics of soil inorganic phosphorus and bioavailable phosphorus fractions in karst regions were analyzed and compared across croplands, artificial forests, and natural forests in low hydrothermal regions (Nanchuan District in Chongqing, Dushan and Suiyang counties in Guizhou) and high hydrothermal regions (Huanjiang County, Mashan County/Wuming District, and Longzhou County in Guangxi). One way analysis of variance, two-factor analysis of variance, and correlation analysis were used to explore the different characteristics and the relationship between soil inorganic phosphorus fractions and bioavailable phosphorus fractions under the influence of land use types and hydrothermal conditions. Redundancy analysis was used to explore the key inorganic phosphorus fractions influencing soil bioavailable phosphorus fractions. The results were as follows: (1) Soil inorganic phosphorus fractions were significantly affected by land use types. The contents of dicalcium phosphate ($\text{Ca}_2\text{-P}$), octacalcium phosphate ($\text{Ca}_8\text{-P}$), phosphorus adsorbed on the Al oxides surfaces (Al-P), phosphorus adsorbed on the Fe oxides surfaces (Fe-P), occluded phosphorus (O-P) and decalcium phosphate ($\text{Ca}_{10}\text{-P}$) in the soils of croplands were found to be higher than those in the soils of artificial forests and natural forests. Furthermore, the contents of $\text{Ca}_8\text{-P}$, Fe-P and O-P exhibited the order of croplands > artificial forests > natural forests, whereas the contents of $\text{Ca}_2\text{-P}$ and phosphorus extracted by hydrochloric acid (HCl-P) demonstrated the order of croplands > natural forests > artificial forests. (2) In high hydrothermal regions, $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ and O-P contents of natural forests soils were significantly higher than in low hydrothermal regions, and phosphorus extracted by enzymes (Enzyme-P) contents of plantation and artificial forests soils were higher than in low hydrothermal regions. (3) Soil inorganic phosphorus fractions $\text{Ca}_2\text{-P}$, $\text{Ca}_8\text{-P}$, Al-P, Fe-P and $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ contents were significantly and positively correlated with bioavailable phosphorus fractions $\text{CaCl}_2\text{-P}$ and HCl-P contents. Redundancy analysis showed that $\text{Ca}_2\text{-P}$ was the key fraction affecting the bioavailable phosphorus fractions. The results indicate that land use types and hydrothermal conditions are key factors influencing the characteristics of soil inorganic phosphorus fractions and bioavailable phosphorus fractions. Increasing the contents of inorganic phosphorus fractions has a positive effect on bioavailable phosphorus fractions. Therefore, consideration should be given to the potential effects of future climate change on the fractions and availability of phosphorus in soil, thereby promoting the restoration of karst ecosystems.

Key words: karst ecosystem, land use types, hydrothermal conditions, inorganic phosphorus fractions, bioavailable phosphorus

磷是植物生长必不可少的营养元素(朱永官等,2014)。土壤中磷素的供给状况直接影响着植物的生长发育。土壤磷主要来源于矿物岩石的风化释放和大气输入,随着土壤磷素不断风化消耗,而逐渐成为植物生长的限制性养分(Newman, 1995)。自然状态下土壤中的磷素极易被土壤矿物、氧化铁铝、土壤黏粒等吸附固定,产生不利于

植物吸收的非活性磷,因此全球陆地生态系统普遍存在磷限制(Vitousek et al., 2010)。土壤中的磷只有转化成可溶性的无机磷才能被植物吸收利用(Hedley et al., 1982),因此,土壤磷形态的分布特征在很大程度上决定了磷的生物有效性(Hinojosa et al., 2012; Zhang et al., 2020)。

不同土壤磷形态分布特征受到多种因素的影

响,土壤磷形态的分布特征受控于土壤水分(Sun et al., 2020)、温度(Hou et al., 2018)、养分含量(Fan et al., 2018)及土壤母质(肖华翠等,2021)等非生物因素和植物(Dong et al., 2024)、土壤动物(Wei et al., 2024)、微生物等生物因素(Yang et al., 2023)的共同作用。气候可能是陆地磷循环和有效性的关键预测因子(Hou et al., 2018)。温度和降水量的变化引起的土壤温度和土壤水分的波动,通过影响土壤 pH、土壤养分含量、含水量等非生物因素和土壤微生物、植被种类等生物因素作用于土壤内部磷组分的转化(Zhang et al., 2020; Mariotte et al., 2020; Siddique et al., 2023)。例如,Wang 等(2022)研究发现温度升高可能会导致耕地酸性磷酸酶活性和微生物生物量磷含量下降。Hou 等(2018)认为降水可以通过驱动植物磷吸收对土壤磷有效性产生负面影响;另外,降水增加会降低吸附能力相对更高的富磷细颗粒土的损失。在当前气候变暖的背景下,确定水热变化对土壤磷组分的影响,有利于为解除土壤磷限制提供理论依据。

中国西南喀斯特生态系统是全球最大的脆弱喀斯特区,面积约 54 万 km^2 (Jiang et al., 2014)。喀斯特地区土壤通常蓄水性较差、富含钙镁且 pH 偏高,土壤中的磷主要以稳定的钙结合态磷酸盐存在,磷限制十分严重(Chen et al., 2018)。长时期人类干扰活动的影响,导致土壤养分大量流失,原本脆弱的喀斯特生态系统遭到严重破坏(王克林等,2019)。围绕喀斯特地区石漠化治理与生态恢复,实施了一系列生态保护与生态建设工程,如退耕还林还草等(王克林等,2016)。土壤磷素是喀斯特地区植被生长和生态恢复工程可持续的关键限制因素之一(庞世龙等,2016)。Pan 等(2024)研究发现植被恢复增加了凋落物和土壤养分,促进了土壤磷的有效利用。陈健等(2021)研究发现,相比于人工种植和人工种植后再自然更新的恢复模式,自然更新提高土壤生物有效磷的能力更强。土地利用类型的改变会影响土壤结构与特质(Li et al., 2019)及微生物群落组成等(Siles et al., 2022),从而改变土壤磷素的形态及分布(Fu et al., 2020)。然而,在磷养分限制较为严重的喀斯特地区(潘复静等,2020),不同土地利用类型和水热条件对土壤磷组分特征的影响尚不清楚。因此,迫切需要研究以明晰土地利用类

型与水热条件对土壤磷组分及其有效性的影响。

本研究根据中国西南亚热带地区的水热条件差异选择重庆南川区,贵州独山县和绥阳县,广西环江县、马山县/武鸣区和龙州县作为研究区域。在研究区域内典型喀斯特地区分别选取耕地、人工林和天然林为研究对象,通过测定土壤中无机磷组分与生物有效磷组分,分析两者之间的关系,探讨以下问题:(1)土地利用类型对土壤无机磷和生物有效磷组分的影响;(2)水热条件对土壤无机磷和生物有效磷组分的影响;(3)土壤无机磷中影响生物有效磷的关键组分是什么。基于以上研究,以期揭示不同土地利用类型土壤中各类磷形态的有效性特征及其对水热条件的响应规律,为全球变暖气候背景下喀斯特生态系统的生态恢复可持续性与管理提供科学依据。

1 研究区域与方法

1.1 研究区域

研究区位于中国西南部的重庆市、贵州省和广西壮族自治区($106^{\circ}95' - 108^{\circ}60' \text{ E}$, $22^{\circ}42' - 29^{\circ}11' \text{ N}$),具有典型的亚热带季风气候。在 20 世纪 90 年代之前,由于过度耕作,该地区很大部分生态系统出现了严重退化。为了保护 and 恢复生态环境,我国于 1999 年启动了“退耕还林”计划(GFGP)(Li & Liu, 2022)。自 2002 年以来,西南喀斯特地区作为中国 GFGP 计划的重要部分,主要通过管理(人工林)或自然植被恢复等方式开展生态恢复工作。研究区年平均温度(mean annual temperature, MAT)为 $12.6 \sim 21.7 \text{ }^{\circ}\text{C}$,年平均降水量(mean annual precipitation, MAP)为 $1165 \sim 1612 \text{ mm}$ 。按照 MAT 和 MAP,将研究区划分为低水热地区($\text{MAT} < 16 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $\text{MAP} < 1300 \text{ mm}$)和高水热地区($\text{MAT} > 16 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $\text{MAP} > 1300 \text{ mm}$)。MAT 和 MAP 数据从中国国家气象信息中心(<http://data.cma.cn/>)获取。

2020 年 8—10 月期间进行了实地调查和土壤取样。采样地点位于低水热地区的重庆南川区、贵州绥阳县、独山县和高水热地区的广西环江县、马山县/武鸣区和龙州县(图 1),每个样区分别选取 3 种土地利用类型布设研究样地,均在研究区内典型的喀斯特地形进行采样,包括耕地样地(对照)、人工林样地(人工恢复)、天然林样地(自然恢复)(表 1)。采用以下标准选择样地:(1)土壤

类型均为碳酸盐岩发育的钙质石灰土;(2) 每种土地利用类型的坡向和坡度相似,坡度通常为 $15^{\circ}\sim 20^{\circ}$,朝南或东南;(3) 不同水热梯度下同种土地利用类型的持续(恢复)时间相同。每个地点每一种土地利用类型选择5个 $30\text{ m}\times 30\text{ m}$ 的典型样方,共采集了90个土壤样品。每个样方采用S型取样

法,将土壤样品采集到 10 cm 的深度(去除凋落物后)(蔡鑫淋等,2020),并在收集后混合在一起。去除可见的岩石和根系之后过20目筛。将一部分新鲜土壤样品在 4°C 冰箱中保存,用于土壤生物有效磷组分测定,将土壤的其余部分风干后过100目筛,用于土壤无机磷组分的测定。

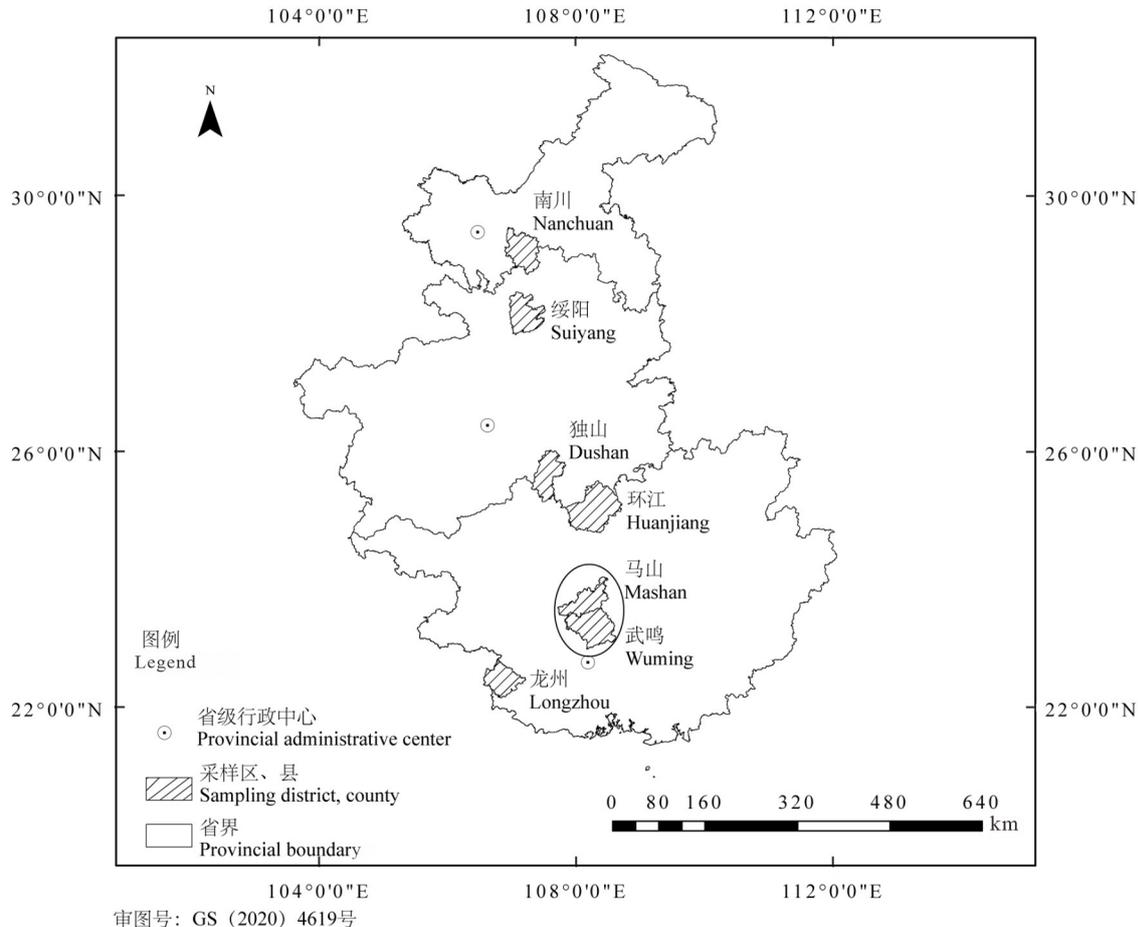


图1 采样点示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sampling site

1.2 土壤无机磷组分测定

按照顾益初和蒋柏藩(1990)描述的方法对土壤无机磷各组分含量进行测定。具体方法如下:称取 1.00 g 过100目筛的风干土样放入 100 mL 离心管中,加入 $50\text{ mL } 0.25\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ NaHCO}_3$ 溶液($\text{pH}=7.5$)。样品振荡 1 h 后,离心提取上清液,使用紫外可见分光光度计,在波长 700 nm 下,采用钼锑抗比色法测定磷酸二钙($\text{Ca}_2\text{-P}$)含量。将经 NaHCO_3 溶液浸提过的剩余土壤用 95% 酒精洗涤2次,然后加

入 $50\text{ mL } 0.5\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ NH}_4\text{Ac}$ 溶液($\text{pH}=4.2$)并混合,静置 4 h ,振荡 1 h ,离心后比色测定磷酸八钙($\text{Ca}_8\text{-P}$)。将经 NH_4Ac 溶液浸提过的剩余土壤用饱和 NaCl 溶液洗涤2次,加入 $0.5\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ NH}_4\text{F}$ 溶液 50 mL ,振荡 1 h ,离心后比色测定铝结合态磷(Al-P)。继续将经 NH_4F 溶液浸提过的剩余土壤用饱和 NaCl 溶液洗涤2次,加入 $0.1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ NaOH-Na}_2\text{CO}_3$ 溶液($\text{pH}=8.2$) 50 mL ,振荡 2 h ,静置 16 h ,振荡 2 h ,离心后测定铁结合态磷(Fe-P)。将经 $\text{NaOH-Na}_2\text{CO}_3$

表 1 研究区样地基本信息

Table 1 Basic information about the sample plots in the study area

水热梯度 Hydrothermal level	土地利用类型 Land use type	年平均温度 MAT (°C)	年平均降水量 MAP (mm)	植被情况 Vegetation condition	恢复年限 Restoration year	样方数量 Number of samples
低水热 Low hydrothermal	耕地 Cropland	12.6~15.36	1 165~1 272	玉米 <i>Zea mays</i>	—	15
	人工林 Artificial forest			杨树、柳杉 <i>Populus tomentosa</i> , <i>Cryptomeria fortunei</i>	18	15
	天然林 Natural forest			尖叶四照花、山矾、乌冈栎、齿叶黄皮、圆果化香树等 <i>Cornus elliptica</i> , <i>Symplocos sumuntia</i> , <i>Quercus phillyreoides</i> , <i>Clausena dunniana</i> , <i>Platycarya strobilacea</i> , et al.	60	15
高水热 High hydrothermal	耕地 Cropland	17.7~21.7	1 385~1 612	玉米 <i>Zea mays</i>	—	15
	人工林 Artificial forest			任豆树 <i>Zenia insignis</i>	18	15
	天然林 Natural forest			罗伞、密榴木、山榄叶柿、米扬噎、干花豆等 <i>Brassaiopsis glomerulata</i> , <i>Milusa balansae</i> , <i>Diospyros siderophylla</i> , <i>Streblus tonkinensis</i> , <i>Fordia cauliflora</i> , et al.	60	15

溶液浸提过的剩余土壤用饱和 NaCl 溶液洗涤 2 次,加入 0.3 mol · L⁻¹ 柠檬酸钠溶液 40 mL 和 1.00 g Na₂S₂O₄, 80 °C 加热 15 min, 离心后取上清液,用强酸消化测定闭蓄态磷(O-P)。最后在剩余土壤中加入 50 mL 0.5 mol · L⁻¹ H₂SO₄ 溶液,振荡 1 h, 离心后采用比色法测定磷酸十钙(Ca₁₀-P)。

1.3 土壤生物有效磷测定

土壤生物有效磷的提取参照 DeLuca 等(2015)的 BBP 方法。具体步骤如下:准确称取 4 份 1.000 0 g 过 20 目筛后的新鲜土壤置于离心管中,然后分别加入 20 mL 提取剂(0.01 mol · L⁻¹ CaCl₂ 溶液、0.01 mol · L⁻¹ Citrate 溶液、0.02 EU · mL⁻¹ 酶(磷酸酶和植酸酶)溶液、1 mol · L⁻¹ HCl 溶液,将样品在 25 °C 恒温振荡箱振荡 3 h 后,以 4 000 r · min⁻¹ 离心 5 min。将上清液收集,采用孔雀绿-磷钼杂多酸分光光度法(朱靖蓉等,2017)分别测定氯化钙磷(CaCl₂-P,用于表征能被根际拦截或扩散的可溶性磷)、柠檬酸磷(Citrate-P,用于表征易被有机酸活化释放的磷)、酶提取磷(Enzyme-P,用于表征易被磷酸酶和植酸酶矿化的有机磷)及盐酸磷(HCl-P,模拟能被氢质子活化的最大潜力磷库)(蔡观,2017)。

1.4 数据处理和分析方法

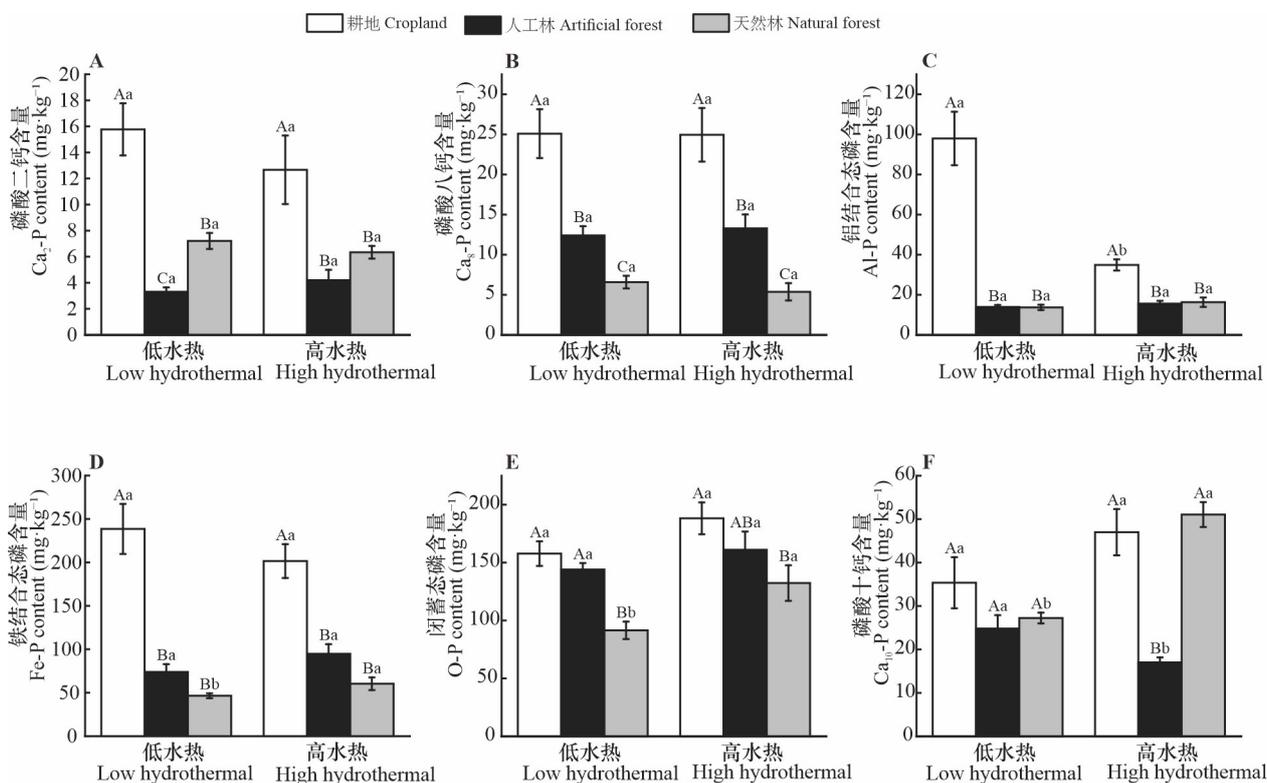
用 Excel 2019 和 SPSS 28 软件对测定的原始

数据进行处理,各项指标在分析前进行正态分布检验,采用单因素方差分析法(one-way ANOVA)和最小显著差异法(least significant difference, LSD),分析不同水热条件下耕地、人工林和天然林 3 种土地利用类型土壤无机磷组分和生物有效性磷组分含量的差异。用 Origin 2023 软件对以上分析结果进行绘图。利用皮尔逊(Pearson)相关分析法对土壤各类无机磷组分与土壤生物有效磷组分之间进行相关性分析,利用双因素方差分析方法(SPSS 28 软件),分析土地利用类型、水热条件及其交互作用对土壤无机磷组分及生物有效磷组分的影响。运用 Canoco 5.0 软件进行冗余分析(redundancy analysis, RDA),以找出影响土壤生物有效磷组分的关键因子。

2 结果与分析

2.1 不同土地利用类型和水热条件下土壤的无机磷组分含量特征

由图 2 可知,喀斯特地区不同土地利用类型下土壤不同无机磷组分含量具有明显差异($P < 0.05$)。无论是在低水热地区还是高水热地区, Ca₈-P、Fe-P 和 O-P 的含量依次表现为耕地>人工林>天然林(图 2: B、D、E), Ca₂-P 含量则是耕地>



不同大写字母代表相同水热条件下不同土地利用类型之间存在显著差异；不同小写字母代表不同水热条件下相同土地利用类型之间存在显著差异 ($P < 0.05$)。下同。

The capital letters indicate significant differences between different land use types under the same hydrothermal condition; lowercase letters indicate significant differences between the same land use type under different hydrothermal conditions ($P < 0.05$). The same below.

图 2 不同水热条件下不同土地利用类型土壤无机磷组分含量

Fig. 2 Soil inorganic phosphorus fraction contents in different land use types under different hydrothermal conditions

天然林 > 人工林 (图 2:A), Al-P 含量表现为耕地显著高于人工林和天然林土壤 ($P < 0.05$) (图 2:C)。在低水热地区,耕地 Al-P 含量显著高于高水热地区 ($P < 0.05$),天然林土壤 O-P 和 Ca₁₀-P 的含量则显著低于高水热地区 ($P < 0.05$)。由表 2 可知, Ca₂-P、Ca₈-P 和 Fe-P 的含量受土地利用类型单因素影响 ($P < 0.01$)。Al-P 和 Ca₁₀-P 的含量受土地利用类型和水热条件单因素影响及两者交互影响 ($P < 0.01$)。O-P 含量受土地利用类型和水热条件 2 个单因素影响 ($P < 0.01$)。

2.2 不同土地利用类型和水热条件下土壤的生物有效磷含量特征

在耕地土壤中 HCl-P 含量显著高于人工林和天然林 ($P < 0.05$) (图 3:D)。天然林土壤中 Citrate-P 含量高于人工林土壤 ($P < 0.05$) (图 3:C)。在低水热地区,Enzyme-P 含量由高到低依次为耕地 > 人工林 > 天然林,而在高水热地区则相反,高水热地区

人工林和天然林土壤中 Enzyme-P 含量均显著高于低水热地区 ($P < 0.05$) (图 3:B)。由表 3 可知, Citrate-P 含量受到土地利用类型单独影响和土地利用类型和水热条件两者的交互影响 ($P < 0.01$), Enzyme-P 含量受到水热条件单因素影响 ($P < 0.01$) 及其和土地利用类型的交互影响 ($P < 0.05$), HCl-P 含量仅受土地利用类型影响 ($P < 0.01$)。

2.3 土壤中各无机磷组分和生物有效磷组分的关系

由表 4 可知,土壤 Ca₂-P、Ca₈-P、Al-P、Fe-P 和 Ca₁₀-P 的含量与 CaCl₂-P 和 HCl-P 的含量呈显著正相关 ($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$), Al-P、O-P 和 Ca₁₀-P 的含量与 Enzyme-P 含量呈显著正相关 ($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$)。HCl-P 含量与 CaCl₂-P 和 Citrate-P 的含量呈显著正相关 ($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$)。Ca₂-P 含量与 Ca₈-P、Al-P、Fe-P 和 Ca₁₀-P 的含量之间呈显著正相关 ($P < 0.01$)。

表 2 土地利用类型、水热条件及其交互作用对土壤各无机磷组分的影响
Table 2 Effects of land use types, hydrothermal conditions and their interactions
on various inorganic phosphorus fractions of soil

无机磷组分 Inorganic phosphorus fraction	土地利用类型 Land use type		水热条件 Hydrothermal condition		土地利用类型×水热条件 Land use type × hydrothermal condition	
	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
磷酸二钙 Ca ₂ -P	26.016	<0.001	0.736	0.394	0.927	0.401
磷酸八钙 Ca ₈ -P	37.907	<0.001	0.008	0.931	0.111	0.895
铝结合态磷 Al-P	34.745	<0.001	11.315	0.001	13.903	<0.001
铁结合态磷 Fe-P	49.678	<0.001	0.003	0.959	1.577	0.214
闭蓄态磷 O-P	14.227	<0.001	9.580	0.003	0.523	0.595
磷酸十钙 Ca ₁₀ -P	10.933	<0.001	5.312	0.024	7.760	<0.001

注: $P < 0.05$ 代表存在显著差异, $P < 0.01$ 代表存在极显著差异。下同。

Note: $P < 0.05$ indicates a significant difference and $P < 0.01$ indicates a highly significant difference. The same below.

以土壤生物有效磷组分为响应变量,以无机磷组分为解释变量进行冗余(RDA)分析,结果表明,第一轴解释了变量的 21.45%,第二轴解释了变量的 6.27%。生物有效磷组分主要受 Ca₂-P(单独解释量为 17.9%, $F = 15.7$, $P = 0.002$)的影响(图 4)。

3 讨论

3.1 土地利用类型对土壤无机磷和生物有效磷组分的影响

土壤各形态无机磷含量受土地利用类型显著影响。研究区耕地土壤中各类无机磷组分(Ca₂-P、Ca₈-P、Al-P、Fe-P、O-P 和 Ca₁₀-P)含量均高于人工林和天然林,可能是由于农民在种植玉米过程中施用磷肥。张春龙等(2022)研究表明,施肥可以增加土壤中各类形态无机磷含量。施入土壤中的无机磷肥会转化为各种形态的无机磷,在一定条件下土壤中的无机磷也会发生相互转化(许琛等,2022)。从无机磷形态来看,一般认为 Ca₂-P 是最重要的有效磷源(查庆南等,2022),Ca₈-P、Fe-P、Al-P 为缓效磷源,Ca₁₀-P 和 O-P 为潜在磷源(沈仁芳和蒋柏藩,1992)。喀斯特地区具有较高的钙含量,土壤中的磷极易被碳酸钙吸附从而转化为难以被植物吸收利用的 Ca₁₀-P(蔡鑫淋等,

2020)。作为难利用磷源的 O-P 尽管含量较高,但很难被转化为其他形态的无机磷被植物吸收利用。这可能是由于 O-P 被氧化铁(Fe₂O₃)胶膜包被,具有极强的抗腐蚀性,因此在一般耕作条件下,O-P 很难再转化释放(李运阳等,2019)。研究区土壤中作为有效磷源的 Ca₂-P 含量较低,而难以被植物直接利用的 Ca₁₀-P 和 O-P 含量则较高,这表明在喀斯特地区,植物仍面临磷素缺乏的问题(陈梦军等,2019)。本研究中,Ca₂-P 含量在天然林土壤中高于人工林土壤。这可能是由于天然林植被物种较为丰富,凋落物较多,凋落物磷含量较高(Liang et al., 2020)。凋落物分解带来的更高磷养分输入增加了天然林土壤的有效磷源含量(Wu et al., 2020)。这说明相比于人工林,天然林土壤更有利于其他形态的磷素转化为有效磷。

Citrate-P 和 HCl-P 含量受土地利用类型显著影响。天然林土壤中 Citrate-P 含量显著高于人工林土壤。Citrate-P 是指通过柠檬酸提取的无机磷形态,该形态无机磷易被植物根系或微生物分泌的有机酸活化释放(蔡观等,2017),柠檬酸能够有效从土壤中提取以中等有效性存在的矿物结合态(包括吸附态和沉淀态磷)。这一过程可模拟植物根系和微生物通过分泌有机酸和质子酸化土壤环境,进而通过交换和还原作用活化或转化非活性磷(Wang et al., 2023)。陈健等(2021)研究表明,

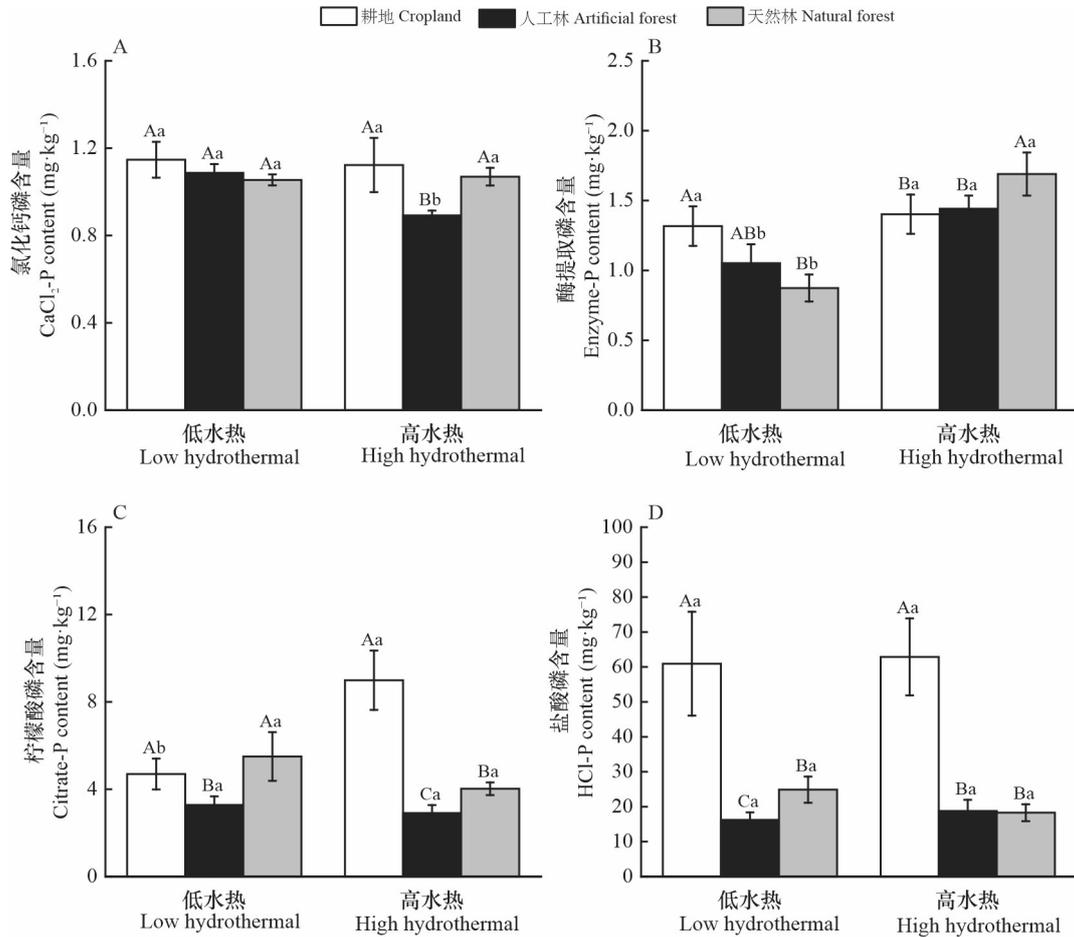


图 3 不同水热条件下不同土地利用类型土壤生物有效磷组分含量

Fig. 3 Soil bioavailable phosphorus fractions in different land use types under different hydrothermal conditions

表 3 土地利用类型、水热条件及其交互作用对土壤生物有效磷组分的影响

Table 3 Effects of land use types, hydrothermal conditions and their interactions on soil bioavailable phosphorus fractions

	土地利用类型 Land use type		水热条件 Hydrothermal condition		土地利用类型×水热条件 Land use type × hydrothermal condition	
	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
氯化钙磷 CaCl ₂ -P	2.312	0.107	1.565	0.215	1.341	0.268
柠檬酸磷 Citrate-P	8.324	<0.001	0.809	0.372	6.460	0.003
酶提取磷 Enzyme-P	0.337	0.715	14.867	<0.001	3.567	0.034
盐酸磷 HCl-P	21.619	<0.001	0.014	0.907	0.268	0.766

植被类型丰富的森林类型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。天然林通常具有更高的生物多样性和更丰富的植被覆盖，根

系相对发达，并且土壤微生物活动更为强烈 (Peng et al., 2012; 王艺雄等, 2022)。因此，相对于人工林，天然林植物根系和微生物可能产生更多的有

表 4 土壤中各无机磷组分与生物有效磷组分间相关性分析

Table 4 Correlation analysis between various inorganic phosphorus fractions and bioavailable phosphorus fractions in soil

组分 Fraction	氯化钙磷 CaCl ₂ -P	柠檬酸磷 Citrate-P	酶提取磷 Enzyme-P	盐酸磷 HCl-P	磷酸二钙 Ca ₂ -P	磷酸八钙 Ca ₈ -P	铝结合态磷 Al-P	铁结合态磷 Fe-P	闭蓄态磷 O-P	磷酸十钙 Ca ₁₀ -P
氯化钙磷 CaCl ₂ -P	1									
柠檬酸磷 Citrate-P	-0.014	1								
酶提取磷 Enzyme-P	0.060	0.123	1							
盐酸磷 HCl-P	0.242 *	0.341 **	-0.167	1						
磷酸二钙 Ca ₂ -P	0.488 **	0.230	0.164	0.613 **	1					
磷酸八钙 Ca ₈ -P	0.296 **	0.120	0.230	0.474 **	0.629 **	1				
铝结合态磷 Al-P	0.408 **	0.075	0.234 *	0.756 **	0.766 **	0.580 **	1			
铁结合态磷 Fe-P	0.314 **	0.214	0.118	0.655 **	0.648 **	0.535 **	0.815 **	1		
闭蓄态磷 O-P	0.090	0.205	0.403 **	0.217	0.168	0.363 **	0.370 **	0.513 **	1	
磷酸十钙 Ca ₁₀ -P	0.404 **	0.054	0.266 *	0.263 *	0.429 **	0.176	0.377 **	0.480 **	0.156	1

注: * 表示相关性在 0.05 级别显著(双尾), ** 表示相关性在 0.01 级别显著(双尾)。

Note: * indicates that the correlation is significant at 0.05 level (two-tailed), and ** indicates that the correlation is significant at 0.01 level (two-tailed).

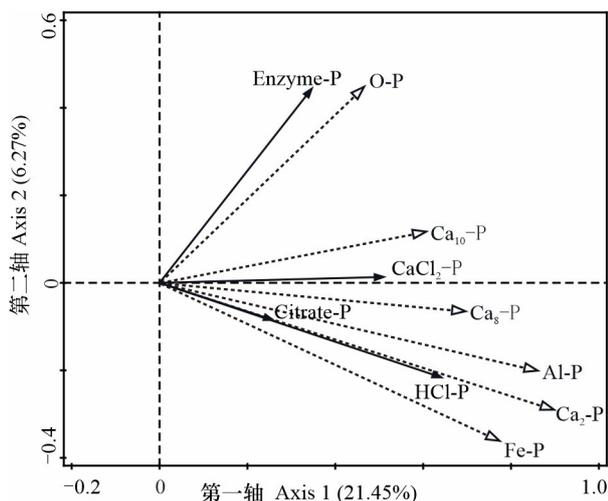
机酸, Citrate-P 积累量更高。相比于人工林和天然林, 耕地土壤中较高的 HCl-P 含量可能是由于耕作时肥料的投入添加所致。陈利军等(2020)研究同样发现长期施用有机物料可以显著提高土壤中 HCl-P 含量。

3.2 水热条件对土壤无机磷组分和生物有效磷组分的影响

在本研究中, 高水热地区天然林土壤 Ca₁₀-P 和 O-P 含量显著高于低水热地区。造成这种现象的原因可能是: (1) 高水热地区较高的 MAT 和 MAP 有助于加速土壤中的风化过程。与低水热地区土壤相比, 高水热地区气候更加温暖潮湿, 土壤往往风化程度更高(Gong et al., 2021), 这促进了风化作用导致的磷释放(Arenberg & Arai, 2019)。风化导致岩石和矿物质的分解和破碎, 尤其是磷酸盐矿物的溶解, 促进溶解态磷的释放(Horton, 2015)。这些溶解态磷可以被土壤颗粒表面吸附, 进而转化为难溶态磷酸盐。此外, 在温暖和湿润的环境中, 植物生长季节较长, 植被覆盖较为茂盛

(Ren et al., 2023)。生物的新陈代谢和尸体分解过程产生的大量有机酸, 具有较强的腐蚀能力, 化学风化和生物风化作用都十分强烈(王永壮等, 2018), 这促进了钙结合态磷和闭蓄态磷的形成。(2) 高水热地区较高的温度有利于土壤矿化过程的进行。Hou 等(2018)报道土壤有机磷对温度变化敏感, MAT 对土壤有机磷含量有负向影响。Dixon 等(2016)的研究表明, MAT 通过增加土壤风化作用对土壤磷有效性产生负面影响, 高温下有利于磷矿化, 促进土壤中的有机磷转化为无机磷。生成的无机磷(如磷酸根离子)有可能与土壤中的铝、铁、钙等元素结合, 形成磷酸盐。尤其在喀斯特地区土壤钙含量高, 促进了 Ca₁₀-P 的形成。而 Ca₁₀-P 和 O-P 具有相对稳定的结构, 通常在土壤中被认为是一种较为固定的磷储备形式。高水热地区土壤中更高的 Ca₁₀-P 和 O-P 说明高温和高湿促进了土壤中难溶态无机磷酸盐的形成。

在高水热地区, 人工林和天然林土壤 Enzyme-P 显著高于低水热地区。Enzyme-P 是土壤中不能



Ca₂-P. 磷酸二钙; **Ca₈-P.** 磷酸八钙; **Al-P.** 铝结合态磷; **Fe-P.** 铁结合态磷; **O-P.** 闭蓄态磷; **Ca₁₀-P.** 磷酸十钙; **CaCl₂-P.** 氯化钙磷; **Citrate-P.** 柠檬酸磷; **Enzyme-P.** 酶提取磷; **HCl-P.** 盐酸磷。

Ca₂-P. Dicalcium phosphate; **Ca₈-P.** Octacalcium phosphate; **Al-P.** Phosphorus adsorbed on the Al oxides surfaces; **Fe-P.** Phosphorus adsorbed on the Fe oxides surfaces; **O-P.** Occluded phosphorus; **Ca₁₀-P.** Decalcium phosphate; **CaCl₂-P.** Phosphorus extracted by calcium chloride; **Citrate-P.** Phosphorus extracted by citric acid; **Enzyme-P.** Phosphorus extracted by enzymes; **HCl-P.** Phosphorus extracted by hydrochloric acid.

图4 土壤生物有效磷组分与无机磷组分的冗余分析
Fig. 4 Redundancy analysis of soil bioavailable phosphorus fractions and inorganic phosphorus fractions

供植物直接吸收利用的有机磷形态(陈迎港等, 2023), 需要在微生物、动物和植物等产生的磷酸酶或植酸酶的催化作用下矿化为无机磷形态, 才能被植物吸收利用(郑威, 2023)。Enzyme-P 含量在不同水热条件下形成的差异可能是由于高水热地区较高的温度促进了土壤矿物质分解, 温度升高促进土壤矿物质分解、有机质矿化和铵态氮硝化作用。有机质分解产生大量有机酸, 这些有机酸能够与土壤矿物结合, 占据土壤中部分磷的吸附位点, 从而降低土壤矿物对土壤磷的固定, 促进土壤磷的转化, 提高其生物有效性(Braschi et al., 2003)。因此, 适宜的升温作用有利于土壤中酶促反应的进行, 固定态磷释放和向生物有效磷转化(甘国渝等, 2022)。

3.3 土壤无机磷组分和生物有效磷组分的相关性

本研究中, CaCl₂-P 和 HCl-P 的含量与 Ca₂-P、

Ca₈-P、Al-P、Fe-P 和 Ca₁₀-P 的含量呈正相关关系。Sánchez-Alcalá 等(2015)研究表明, 土壤中 CaCl₂-P 含量与植物的磷吸收量有显著的正相关关系, 通常作为衡量土壤磷有效性的指标。由此可见, 无机磷组分中的 Ca₂-P、Ca₈-P、Al-P、Fe-P 和 Ca₁₀-P 含量可能是影响土壤磷有效性的主要组分。HCl-P 表示可通过植物和微生物分泌的氢质子可溶解的潜在磷库, 其生物可利用性相对较低(Wang et al., 2023)。在研究区土壤中, HCl-P 含量普遍较高, 这可能是因为喀斯特地区土壤具有较高的钙含量和 pH(舒世燕等, 2010), 导致有效磷与土壤矿物紧密结合形成较为稳定的 HCl-P(Tian et al., 2022)。Ca₂-P、Ca₈-P、Al-P、Fe-P 和 Ca₁₀-P 这些磷形态通常被认为是结合态磷, 与土壤颗粒或矿物结合较紧密, 需要经过一定的化学和生物过程才能被转化为更容易被植物吸收的形态(Abolfazli et al., 2012)。HCl-P 含量与 Ca₂-P、Ca₈-P、Al-P、Fe-P 和 Ca₁₀-P 的含量之间呈正相关, 这表明无机磷 Ca₂-P、Ca₈-P、Al-P、Fe-P 和 Ca₁₀-P 组分可能是影响 HCl-P 形成和转化的关键因素。

冗余分析表明, 生物有效磷组分主要受 Ca₂-P 的影响。各无机磷组分中 Ca₂-P 是有效磷和 CaCl₂-P 的主要来源(焦亚鹏等, 2020)。Mehmood 等(2014)研究表明, Ca₂-P 的生物有效性高于其他形态的无机磷组分, 并且植物吸收磷含量与 Ca₂-P 呈显著正相关。张倩等(2011)研究发现陕北黄土高原农田土壤中, Ca₂-P 是速效磷的主要磷源。王宇莹等(2023)对灌耕草甸土壤无机磷形态的研究发现 Ca₂-P、Ca₈-P、Al-P 和 O-P 与有效磷呈显著正相关($P < 0.05$), 其贡献顺序为 Ca₂-P > Ca₈-P > Al-P > O-P。本研究同样发现作为衡量磷有效性的 CaCl₂-P 与 Ca₂-P 的正相关性高于其他无机磷组分。因此, Ca₂-P 是影响生物有效磷的关键无机磷组分。

4 结论

(1) 耕地土壤中各无机磷组分含量均高于人工林和天然林土壤, 施肥是造成耕地土壤无机磷含量较高的主要原因; 天然林 Ca₂-P 含量高于人工林, 表明自然恢复有利于提高喀斯特地区土壤中有效态磷的含量。(2) 在高水热地区, 天然林土壤 Ca₁₀-P 和 O-P 的含量显著高于低水热地区, 人工林和天然林土壤的 Enzyme-P 含量高于低水热地

区,表明水热条件变化是影响土壤磷形态特征分布的关键因素。(3)土壤无机磷组分 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Al-P 、 Fe-P 和 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 与生物有效性磷组分 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 和 HCl-P 之间存在显著正相关关系,表明土壤中较高的无机磷含量促进了生物有效磷的形成。

参考文献:

- ABOLFAZLI F, FORGHANI A, NOROUZI M, 2012. Effects of phosphorus and organic fertilizers on phosphorus fractions in submerged soil [J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 12(2): 349–362.
- ARENBERG MR, ARAI Y, 2019. Uncertainties in soil physicochemical factors controlling phosphorus mineralization and immobilization processes [J]. *Advances in Agronomy*, 154: 153–200.
- BRASCHI I, CIAVATTA C, GIOVANNINI C, et al., 2003. Combined effect of water and organic matter on phosphorus availability in calcareous soils [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 67: 67–74.
- CAI G, HU YJ, WANG TT, et al., 2017. Characteristics and influencing factors of biologically-based phosphorus fractions in the farmland soil [J]. *Environment Science*, 38(4): 1606–1612. [蔡观, 胡亚军, 王婷婷, 等, 2017. 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 [J]. *环境科学*, 38(4): 1606–1612.]
- CAI XL, SHU YG, CHEN MJ, 2020. Distribution characteristics and influencing factors of inorganic phosphorus in soil profiles during ecological restoration in karst mountain areas [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 40(2): 107–114. [蔡鑫淋, 舒英格, 陈梦军, 2020. 喀斯特山区生态恢复中土壤剖面无机磷形态分布特征及其影响因素 [J]. *水土保持通报*, 40(2): 107–114.]
- CHEN H, LI DJ, XIAO KC, et al. 2018. Soil microbial processes and resource limitation in karst and non-karst forests [J]. *Functional Ecology*, 32(5): 1400–1409.
- CHEN J, LIU S, SHI ZM, et al., 2021. Effects of three forest restoration pathways on soil biologically based phosphorus in the subalpine of western Sichuan [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 41(7): 2698–2708. [陈健, 刘顺, 史作民, 等, 2021. 川西亚高山三种森林恢复途径对土壤生物有效磷的影响 [J]. *生态学报*, 41(7): 2698–2708.]
- CHEN LJ, JIANG YJ, WANG HT, et al., 2020. Effects of three forest restoration pathways on soil biologically based phosphorus in the subalpine of western Sichuan [J]. *Soils*, 52(3): 451–457. [陈利军, 蒋瑀霁, 王浩田, 等, 2020. 长期施用有机物料对旱地红壤磷组分及磷素有效性的影响 [J]. *土壤*, 52(3): 451–457.]
- CHEN MJ, SHU YG, XIAO SY, 2019. Methods of soil organic and inorganic phosphorus fractionation in karst areas [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 36(4): 462–470. [陈梦军, 舒英格, 肖盛杨, 2019. 喀斯特山区土壤有机无机磷分级方法的比较研究 [J]. *农业资源与环境学报*, 36(4): 462–470.]
- CHEN YG, PAN JH, WANG YL, et al., 2023. Distribution characteristics of phosphorus form in tea garden soil profile based on bioavailability [J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 55(4): 102–110. [陈迎港, 潘继花, 王艳玲, 等, 2023. 基于生物有效性的茶园土壤剖面磷素形态分布特征研究 [J]. *山东农业科学*, 55(4): 102–110.]
- DELUCA TH, GLANVILLE HC, HARRIS M, et al., 2015. A novel biologically-based approach to evaluating soil phosphorus availability across complex landscapes [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 88: 110–119.
- DIXON JL, CHADWICK OA, VITOUSE PM, et al., 2016. Climate-driven thresholds for chemical weathering in postglacial soils of New Zealand [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 121(9): 1619–1634.
- DONG RS, HU W, BU LY, 2024. Legume cover crops alter soil phosphorus availability and microbial community composition in mango orchards in karst areas [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 364: 108906.
- FAN YX, LIN F, YANG LM, et al., 2018. Decreased soil organic P fraction associated with ectomycorrhizal fungal activity to meet increased P demand under N application in a subtropical forest ecosystem [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 54: 149–161.
- FU DG, WU XN, DUAN CQ, et al., 2020. Response of soil phosphorus fractions and fluxes to different vegetation restoration types in a subtropical mountain ecosystem [J]. *Catena*, 193: 104663.
- GAN GY, CHEN X, ZHU H, et al., 2022. Hydrothermal effects on phosphorus bioavailability in different soils [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 41(4): 58–66. [甘国渝, 陈曦, 朱海, 等, 2022. 水热耦合对不同土地利用类型土壤磷生物有效性的影响 [J]. *灌溉排水学报*, 41(4): 58–66.]
- GONG SH, WANG SJ, BAI XY, et al., 2021. Response of the weathering carbon sink in terrestrial rocks to climate variables and ecological restoration in China [J]. *Science of the Total Environment*, 750: 141525.
- GU YC, JIANG BF, 1990. Method for determination of inorganic phosphorus classification in calcareous soils [J]. *Soils* (2): 101–102, 110. [顾益初, 蒋柏藩, 1990. 石灰性土壤无机磷分级的测定方法 [J]. *土壤* (2): 101–102, 110.]
- HEDLEY MJ, STEWART JWB, CHAUHAN BS, 1982. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 46(5): 970–976.
- HINOJOSA MB, PARRA A, RAMÍREZ DA, et al., 2012. Effects of drought on soil phosphorus availability and fluxes in a burned Mediterranean shrubland [J]. *Geoderma*, 191: 61–69.
- HORTON F, 2015. Did phosphorus derived from the weathering

- of large igneous provinces fertilize the Neoproterozoic ocean? [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 16(6): 1723–1738.
- HOU EQ, CHEN CR, LUO YQ, et al., 2018. Effects of climate on soil phosphorus cycle and availability in natural terrestrial ecosystems [J]. *Global Change Biology*, 24(8): 3344–3356.
- JIANG ZC, LIAN YQ, QIN XQ, 2014. Rocky desertification in Southwest China: Impacts, causes, and restoration [J]. *Earth-Science Reviews*, 132: 1–12.
- JIAO YP, QI P, WANG XJ, et al., 2020. Effects of nitrogen and phosphorus fertilization on inorganic phosphorus forms of typical farmland soil in the dry farming area of the Loess Plateau [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 26(8): 1459–1472. [焦亚鹏, 齐鹏, 王晓娇, 等, 2020. 氮磷配施对黄土高原旱作农业区典型农田土壤无机磷形态的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 26(8): 1459–1472.]
- LI HQ, LIAO XL, ZHU HS, et al., 2019. Soil physical and hydraulic properties under different land uses in the black soil region of Northeast China [J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 99(4): 406–419.
- LI SD, LIU MC, 2022. The development process, current situation and prospects of the conversion of farmland to forests and grasses project in China [J]. *Journal of Resources and Ecology*, 13(1): 120–128.
- LI YY, HE YH, SUN TW, et al., 2019. Inorganic phosphorus forms and availability of chernozem in Western Jilin Province [J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 41(5): 585–591. [李运阳, 何允华, 孙庭伟, 等, 2019. 吉林省西部黑钙土无机磷形态及有效性研究 [J]. *吉林农业大学学报*, 41(5): 585–591.]
- LIANG YM, LI MJ, PAN FJ, et al., 2020. Alkaline phosphomonoesterase-harboring microorganisms mediate soil phosphorus transformation with stand age in Chinese *Pinus massoniana* plantations [J]. *Frontiers in Microbiology*, 11: 571209.
- MARIOTTE P, CRESSWELL T, JOHANSEN MP, et al., 2020. Plant uptake of nitrogen and phosphorus among grassland species affected by drought along a soil available phosphorus gradient [J]. *Plant and Soil*, 448: 121–132.
- MEHMOOD A, AKHTAR M, KHALID A, et al., 2014. Relationship of phosphorus uptake with its fractions in different soil parent materials [J]. *International Journal of Plant & Soil Science*, 4: 45–53.
- NEWMAN EI, 1995. Phosphorus inputs to terrestrial ecosystems [J]. *Journal of Ecology*, 83(4): 713–726.
- PAN FJ, WANG KL, ZHANG W, et al., 2020. Seasonal changes and rhizosphere effects of soil nutrients and enzymatic activities in two vegetation successions of karst ecosystem [J]. *Journal of Guilin University Technology*, 40(1): 209–217. [潘复静, 王克林, 张伟, 等, 2020. 喀斯特不同恢复阶段植物根际土养分和酶活性的季节性变化和根际效应 [J]. *桂林理工大学学报*, 40(1): 209–217.]
- PAN FJ, YU X, CHEN M, et al., 2024. Vegetation recovery reshapes the composition and enhances the network connectivity of phoD-harboring microorganisms to promote P availability in a karst ecosystem [J]. *Science of the Total Environment*, 918: 170561.
- PANG SL, OU ZY, SHEN WH, et al., 2016. Edaphic characteristics of different regeneration patterns in karst mountainous areas of Guangxi [J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 36(7): 60–66. [庞世龙, 欧芷阳, 申文辉, 等, 2016. 广西喀斯特地区不同植被恢复模式土壤质量综合评价 [J]. *中南林业科技大学学报*, 36(7): 60–66.]
- PENG WX, SONG TQ, ZENG FP, et al., 2012. Relationships between woody plants and environmental factors in karst mixed evergreen-deciduous broadleaf forest, southwest China [J]. *Journal of Food, Agriculture and Environment*, 10(1): 890–896.
- REN HY, WEN ZM, LIU YY, et al., 2023. Vegetation response to changes in climate across different climate zones in China [J]. *Ecological Indicators*, 155: 110932.
- SÁNCHEZ-ALCALÁ I, DEL CAMPILLO MC, TORRENT J, 2015. Critical Olsen P and CaCl₂-P levels as related to soil properties: results from micropot experiments [J]. *Soil Use and Management*, 31(2): 233–240.
- SHEN RF, JIANG BF, 1992. Morphological distribution of inorganic phosphorus in calcareous soils and its effectiveness [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 29(1): 80–86. [沈仁芳, 蒋柏藩, 1992. 石灰性土壤无机磷的形态分布及其有效性 [J]. *土壤学报*, 29(1): 80–86.]
- SHU SY, WANG KL, ZHANG W, et al., 2010. Soil alkaline phosphatase activity at different vegetation succession stages in karst peak-cluster depression [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 29(9): 1722–1728. [舒世燕, 王克林, 张伟, 等, 2010. 喀斯特峰丛洼地植被不同演替阶段土壤磷酸酶活性 [J]. *生态学杂志*, 29(9): 1722–1728.]
- SIDDIQUE MBA, KHALID A, DITTA A, et al., 2023. Climate change variables modify microbial community structure and soil enzymes involved in nitrogen and phosphorus metabolism [J]. *Rhizosphere*, 28: 100793.
- SILES JA, STARKE R, MARTINOVIC T, et al., 2022. Distribution of phosphorus cycling genes across land uses and microbial taxonomic groups based on metagenome and genome mining [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 174: 108826.
- SUN F, SONG CJ, WANG M, et al., 2020. Long-term increase in rainfall decreases soil organic phosphorus decomposition in tropical forests [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 151: 108056.
- TIAN JH, LU X, CHEN QQ, et al., 2022. Phosphorus fertilization affects soybean rhizosphere phosphorus dynamics and the bacterial community in karst soils [J]. *Plant and Soil*, 475(1): 137–152.
- VITOUSEK PM, PORDER S, HOULTON BZ, et al., 2010. Terrestrial phosphorus limitation: mechanisms, implications, and nitrogen–phosphorus interactions [J]. *Ecological Applications*, 20(1): 5–15.
- WANG KL, YUE YM, CHEN HS, et al., 2019. The comprehensive treatment of karst rocky desertification and its

- regional restoration effects [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 39 (20): 7432–7440. [王克林, 岳跃民, 陈洪松, 等, 2019. 喀斯特石漠化综合治理及其区域恢复效应 [J]. *生态学报*, 39(20): 7432–7440.]
- WANG KL, YUE YM, MA ZL, et al., 2016. Research and demonstration on technologies for rocky desertification treatment and ecosystem services enhancement in karst peak-cluster depression regions [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 36 (22): 7098–7102. [王克林, 岳跃民, 马祖陆, 等, 2016. 喀斯特峰丛洼地石漠化治理与生态服务提升技术研究 [J]. *生态学报*, 36(22): 7098–7102.]
- WANG W, LI YH, GUAN PT, et al., 2022. How do climate warming affect soil aggregate stability and aggregate-associated phosphorus storage under natural restoration? [J]. *Geoderma*, 420: 115891.
- WANG WM, CHEN Y, ZHANG FH, et al., 2023. Cotton-maize intercropping increases rhizosphere soil phosphorus bioavailability by regulating key phosphorus cycling genes in northwest China [J]. *Applied Soil Ecology*, 182: 104734.
- WANG YX, ZHANG HF, LI Q, et al., 2022. Effect of nitrogen addition on soil phosphorus fractions in the *Phyllostachys edulis* plantation [J]. *Journal of Zhejiang A & F University*, 39(4): 695–704. [王艺雄, 张华锋, 李全, 等, 2022. 氮添加对毛竹林土壤磷组分的影响 [J]. *浙江农林大学学报*, 39(4): 695–704.]
- WANG YY, GONG HD, WANG XY, et al., 2023. Effects of phosphorus application on inorganic phosphorus forms and available phosphorus in irrigated meadow soil [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 40 (1): 135–142. [王宇莹, 龚会蝶, 王雪艳, 等, 2023. 施磷对灌耕草甸土无机磷形态和有效磷的影响 [J]. *农业资源与环境学报*, 40(1): 135–142.]
- WANG YZ, CHEN X, SHI Y, et al., 2018. Review on the effects of low-molecular-weight organic acids on soil phosphorus activation and mechanisms [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 37(7): 2189–2198. [王永壮, 陈欣, 史奕, 等, 2018. 低分子量有机酸对土壤磷活化及其机制研究进展 [J]. *生态学杂志*, 37(7): 2189–2198.]
- WEI K, WANG JG, YUAN CY, et al., 2024. Relationships of bacterial-feeding nematodes, phosphatase-producing bacteria, phosphatase activity and their effects on soil organic phosphorus mineralization under straw return [J]. *Applied Soil Ecology*, 196: 105280.
- WU HL, XIANG WH, CHEN L, et al., 2020. Soil phosphorus bioavailability and recycling increased with stand age in Chinese fir plantations [J]. *Ecosystems*, 23(5): 973–988.
- XIAO HC, LI JW, XIA Y, et al., 2021. Characteristics of phosphorus fractions and their driving factors in forest soils with different parent materials in the mid-subtropics, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 32 (1): 16–22. [肖华翠, 李靖雯, 夏允, 等, 2021. 中亚热带不同母质发育森林土壤磷组分特征及其影响因素 [J]. *应用生态学报*, 32(1): 16–22.]
- XU C, SHEN SS, HE Z, et al., 2022. Effects of long-term application of inorganic phosphate fertilizer to soil phosphorus pools in yellow-mud soil paddy fields [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 41 (11): 2506–2514. [许琛, 沈素素, 何竹, 等, 2022. 长期施无机磷肥对黄泥土稻田土壤磷库的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 41(11): 2506–2514.]
- YANG JJ, SHI JX, JIANG LH, et al., 2023. Co-occurrence network in core microorganisms driving the transformation of phosphorous fractionations during phosphorus recovery product used as soil fertilizer [J]. *Science of the Total Environment*, 871: 162081.
- ZHA QN, SHEN H, LI HY, et al., 2022. High-P wheat straw increases the availability and turnover of phosphorus in lime concretion black soil [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 28(11): 2001–2010. [查庆南, 申昊, 李虹颖, 等, 2022. 高磷小麦秸秆提高砂姜黑土磷有效性并促进土壤磷素的转化 [J]. *植物营养与肥料学报*, 28(11): 2001–2010.]
- ZHANG CL, LI B, HUANG R, et al., 2022. Effects of long-term application of swine manure on soil phosphorus content and inorganic phosphorus components [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 41(10): 2241–2249. [张春龙, 李冰, 黄容, 等, 2022. 长期施用猪粪对土壤磷含量及无机磷组分的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 41(10): 2241–2249.]
- ZHANG HZ, SHI LL, LU HB, et al., 2020. Drought promotes soil phosphorus transformation and reduces phosphorus bioavailability in a temperate forest [J]. *Science of the Total Environment*, 732: 139295.
- ZHANG Q, ZHANG SX, LIU K, et al., 2011. Inorganic phosphorus fractionation and availability on different kinds of planting conditions of soil in Northern Shaanxi [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 29 (4): 133–136. [张倩, 张素霞, 刘克, 等, 2011. 陕北不同土地利用类型下土壤无机磷形态分布及有效性研究 [J]. *干旱地区农业研究*, 29(4): 133–136.]
- ZHENG W, 2023. Study on soil phosphorus availability of Chinese fir plantations [D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology: 1–87. [郑威, 2023. 杉木人工林土壤生物有效磷研究 [D]. 长沙: 中南林业科技大学: 1–87.]
- ZHU JR, WEN YJ, SONG SH, et al., 2017. Determination of phosphate in water by the complexes of malachite green-phosphomolybdate spectrophotometry [J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 54(8): 1559–1565. [朱靖蓉, 温云杰, 宋书会, 等, 2017. 利用孔雀绿-磷钼杂多酸分光光度法测定水样中微量磷酸盐 [J]. *新疆农业科学*, 54(8): 1559–1565.]
- ZHU YG, DUAN GL, CHEN BD, et al., 2014. Mineral weathering and element cycling in soil-microorganism-plant system [J]. *Science China Earth Sciences*, 44(6): 1107–1116. [朱永官, 段桂兰, 陈保冬, 等, 2014. 土壤-微生物-植物系统中矿物风化与元素循环 [J]. *中国科学: 地球科学*, 44(6): 1107–1116.]