



农业资源与环境学报

CSCD 核心期刊
中文核心期刊
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

贵州典型茶园土壤剖面磷素形态及有效性

王渊, 舒英格, 张忠梁, 贾宽宽, 任明慧

引用本文:

王渊, 舒英格, 张忠梁, 贾宽宽, 任明慧. 贵州典型茶园土壤剖面磷素形态及有效性[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(2): 384–392.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2022.0196>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

喀斯特山区土壤有机无机磷分级方法的比较研究

陈梦军, 舒英格, 肖盛杨

农业资源与环境学报. 2019, 36(4): 462–470 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0279>

施磷对灌耕草甸土无机磷形态和有效磷的影响

王宇莹, 龚会蝶, 王雪艳, 涂永峰, 宋海英, 陈波浪, 盛建东

农业资源与环境学报. 2023, 40(1): 135–142 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0752>

模拟淋溶条件下沼液对菜田土壤磷素淋洗及其形态的影响

王敏锋, 陈硕, 朱睿, 刘石磊, 陈清, 李吉进, 许俊香

农业资源与环境学报. 2017, 34(4): 368–375 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2016.0289>

不同动物粪肥的磷素形态特征及有效性分析

严正娟, 陈硕, 王敏锋, 宋梓玮, 贾伟, 陈清

农业资源与环境学报. 2015(1): 33–41 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2014.0283>

长期施肥对不同深度稻田土壤团聚体磷素分配的影响

柳开楼, 都江雪, 邬磊, 张文菊, 韩天富, 李文军, 施林林, 余喜初

农业资源与环境学报. 2022, 39(6): 1115–1123 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0583>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

王渊, 舒英格, 张忠梁, 等. 贵州典型茶园土壤剖面磷素形态及有效性[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(2): 384–392.

WANG Y, SHU Y G, ZHANG Z L, et al. Phosphorus forms and availability in soil profiles of typical tea gardens in Guizhou [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2023, 40(2): 384–392.

贵州典型茶园土壤剖面磷素形态及有效性

王渊, 舒英格*, 张忠梁, 贾宽宽, 任明慧

(贵州大学农学院, 贵阳 550025)

摘要: 为了解茶园土壤剖面磷素分布的有效性规律, 采用Bowman–Cole有机磷分级方法、张守敬和Jackson无机磷分级方法, 对贵州省典型茶园土壤剖面磷素形态及其有效性进行研究。结果表明: 茶园土壤剖面各层总无机磷含量占全磷含量的比例为52.19%~68.99%, 以铝磷(Al-P)和铁磷(Fe-P)为主, 占总无机磷含量的比例分别为44.52%~51.51%、28.19%~36.40%; 有机磷以中等活性有机磷(MPo)和中等稳定性有机磷(MRPo)为主, 占总有机磷含量的比例分别为44.26%~60.98%、22.00%~27.99%。土壤垂直剖面各层中有效性磷的来源对应于不同磷素形态, 有效磷的活性磷源有0~20 cm土层的MPo、20~40 cm和80~100 cm土层的Al-P, 重要转换性磷源有0~60 cm土层和80~100 cm土层的MRPo; 潜在的非活性磷源有40~60 cm土层的钙磷(Ca-P)和高稳定性有机磷(HRPo)、60~80 cm土层的闭蓄态磷(O-P)、0~40 cm和80~100 cm土层的HRPo; 活性有机磷(LPo)的贡献源有0~20 cm土层的Al-P、20~80 cm土层的Fe-P及80~100 cm土层的HRPo。综上, 茶园土壤应重视剖面磷素分布规律及有效性的研究, 以促进茶园土壤磷素高效利用。

关键词: 贵州省; 典型茶园; 土壤剖面; 磷素形态; 磷有效性

中图分类号: S153.6; S571.1 文献标志码: A 文章编号: 2095-6819(2023)02-0384-09 doi: 10.13254/j.jare.2022.0196

Phosphorus forms and availability in soil profiles of typical tea gardens in Guizhou

WANG Yuan, SHU Yingge*, ZHANG Zhongliang, JIA Kuankuan, REN Minghui

(College of Agriculture, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: To understand the availability of phosphorus distribution in soil profiles of Guizhou tea gardens, the forms and availability of phosphorus in soil profiles of typical tea gardens in Guizhou Province were studied using the phosphorus classification methods of Bowman–Cole and Chang–Jackson. The results showed that the proportion of inorganic phosphorus in the soil profiles of tea gardens was 52.19%–68.99%, with aluminum phosphorus (Al-P) and ferrophosphorus (Fe-P) as the main contents of 44.52%–51.51% and 28.19%–36.40%, respectively. The organic phosphorus was mainly composed of moderately active organic phosphorus (MPo) and moderately robustness organic phosphorus (MRPo), accounting for 44.26%–60.98% and 22.00%–27.99%, respectively. The sources of available phosphorus in different layers of the vertical profile of soil corresponded to different phosphorus forms. The active phosphorus sources of available phosphorus were MPo in 0–20 cm soil layers, Al-P in 20–40 cm and 80–100 cm soil layers, and MRPo in 0–60 cm soil layer and 80–100 cm soil layer was the important transformable phosphorus sources. The potential non-active phosphorus sources were calcium phosphorus (Ca-P) and highly robustness organic phosphorus (HRPo) in 40–60 cm soil layers. Closed storage phosphorus (O-P) was in 60–80 cm soil layer, and HRPo was in 0–40 cm and 80–100 cm soil layers. The contribution sources of highly active organic phosphorus (LPo) were Al-P in 0–20 cm soil layer, Fe-P in 20–80 cm soil layer, and HRPo in 80–100 cm soil layer. More attention should be paid to the distribution and availability of phosphorus in tea garden soil so that it can be utilized efficiently.

Keywords: Guizhou Province; typical tea garden; soil profile; phosphorus form; availability of phosphorus

收稿日期: 2022-04-12 录用日期: 2022-05-27

作者简介: 王渊(1992—), 男, 贵州纳雍人, 硕士研究生, 从事土壤养分研究。E-mail: 1198735263@qq.com

*通信作者: 舒英格 E-mail: maogen958@163.com

基金项目: 贵阳市科技局重大专项(筑科合同[2011401]01号)

Project supported: The Special Fund for Key Program of Science and Technology of Guiyang, Guizhou Province, China(Zhu Kehe[2011401]01)

磷是植物生长发育所必需的营养元素,其广泛参与植物新陈代谢中光合作用、能量转换及酶活性调节等过程^[1-2]。植物磷素直接来源于土壤,磷在土壤中存在无机态、有机态两种形式,无机磷主要以矿物态形式存在,占土壤磷素的60%~80%;有机磷组分有核酸类、磷脂类及其他有机化合物。土壤磷易与矿物质、有机质及土壤颗粒等物质结合,不同形态磷之间存在繁杂的迁移、转换关系,各形态磷的生物有效性也有所不同^[3]。

土壤类型^[4-5]、土地利用方式^[6-7]的变化影响到植被演替和生物循环,从而影响植物对磷的利用及磷素有效性^[8-9]。吴璐璐等^[4]研究吉林省4种农田土壤类型0~20 cm土层磷素分布及有效性时发现,植物有效性磷来自黑土与白浆土的碳酸氢钠无机磷($\text{NaHCO}_3\text{-Pi}$)、黑钙土与暗棕壤的树脂磷(Resin-Pi)。张倩等^[5]研究陕西省米脂县黄绵土0~100 cm土层剖面无机磷分布特征得出,二钙磷($\text{Ca}_2\text{-P}$)是黄土高原农田土壤有效磷的主体。邱亚群等^[7]研究湖南旱地和水田0~60 cm土层的无机磷分布时得出,红壤拥有丰富的铝磷(Al-P)和铁磷(Fe-P),潮土和紫色土主要以钙磷(Ca-P)为主。杨慧等^[10]分析了广西桂林灵川县4种土地利用方式下土壤0~50 cm土层的无机磷分布,明确 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、八钙磷($\text{Ca}_8\text{-P}$)、 Al-P 、闭蓄态磷(O-P)是土壤有效磷的重要来源,岩溶区水田的全磷活化性高、有效性强。陈冲等^[6]研究珠江三角洲平原3种土地利用方式下水稻土0~120 cm土层的无机磷分布时指出, Al-P 和 Fe-P 是水田、果园和菜地土壤有效磷的主要来源。蔡鑫淋等^[11]对比研究贵州省晴隆县4种土地利用方式下土壤0~20 cm及20 cm至母岩的无机磷特点时得到, Fe-P 、 Ca-P 及 Al-P 与有效磷存在密切联系。杨小燕等^[12]研究黑龙江克山县黑土0~190 cm土层中的磷素分布,发现 $\text{NaHCO}_3\text{-Pi}$ 、氢氧化钠无机磷(NaOH-Pi)和氢氧化钠有机磷(NaOH-Po)对有效磷的贡献最大,各磷素状态均可作为植物吸收利用的重要来源。

茶园作为我国南方重要的土地利用方式之一,已有不少学者对茶园土壤磷素组分及有效性进行了研究。谢国雄等^[13]研究浙江省红壤0~30 cm土层的磷形态及其生物有效性时发现,红壤存在丰富的 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 Al-P 及有机磷, $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 Al-P 为土壤有效磷的主要贡献源。范腊梅等^[14]研究桃源县丘陵红壤0~30 cm土层磷素对茶叶品质的影响时发现, Al-P 、 Fe-P 是土壤有效磷的重要来源,且 Al-P 有效性最高。杨君等^[15]研

究了湖南省6县(市)茶树根际和非根际表层土壤无机磷形态的特征,发现土壤根际存在磷素富集效应,根际土壤各无机磷形态(O-P 除外)是土壤有效磷的主要来源。曹晓霞^[16]研究了黄壤0~40 cm土壤有机磷组分和有效磷的影响,发现有机磷中含量较低的活性有机磷(LPo)、中等活性有机磷(MPo)易被植物吸收利用。

上述土壤磷组分及有效性研究大部分针对土壤剖面0~40 cm土层进行,在茶园土壤剖面上超过40 cm土层进行磷素形态及其有效性的研究鲜有报道。鉴于茶树为多年生灌木,根系分布深广,本研究采用改进后的Bowman-Cole有机磷分级法、张守敬和Jackson无机磷分级方法,以贵州省典型茶园土壤母质层以上的整个土壤剖面为研究对象,对土壤各形态无机磷和有机磷进行研究,探讨各形态磷素在各土壤剖面层次间的分布特征及其有效性,为茶园土壤磷素的管理和科学评价土壤磷有效性、实现磷素高效利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

选择贵州省黔东南雷山县、黔南都匀市、黔西南普安县、黔中花溪区和开阳县、黔北湄潭县和凤岗县($105^{\circ}05'\sim 108^{\circ}02'\text{E}$, $25^{\circ}46'\sim 28^{\circ}06'\text{N}$)7个区域内典型茶园土壤进行研究,采样点位分布见图1。研究区平均海拔为1 144.83 m,为亚热带湿润季风气候区,雨热同期、四季分明,贵州省大多数茶产业主要分布在这些区域,平均植茶年限约24年,普遍于每年3月施一次茶叶专用复混肥, $\text{N-P}_2\text{O}_5\text{-K}_2\text{O}\geq 16\%$, SOM (有机质) $\geq 20\%$,再于当年12月施1次商品有机肥(主要是饼油和各类家畜粪便类有机肥), $\text{N-P}_2\text{O}_5\text{-K}_2\text{O}\geq 6\%$, $\text{SOM}\geq 45\%$,每亩(667 m^2)施肥100 kg,施于茶行间15 cm深的施肥沟内。

1.2 样品采集和制备

于2019年11月选择花溪区、开阳县、湄潭县、凤岗县、普安县、都匀市和雷山县7个区域内27个具有代表性、分布面积最大的茶园进行土壤剖面采样。根据随机的取样原则,避开堆肥、田埂、路沿等特殊区域,每个区域布设3个采样点,遵循布设样点的生态学重复原则,选择靠近茶树根系5~20 cm位置每间隔20 cm自下而上采集0~100 cm土壤剖面样(其中雷山县1个点位、都匀市4个点位土壤厚度不足80 cm,因而仅采集至母质层),每个样品采集1 kg左右土壤,共采集土壤样品130个。采回的土壤样品置于室内自

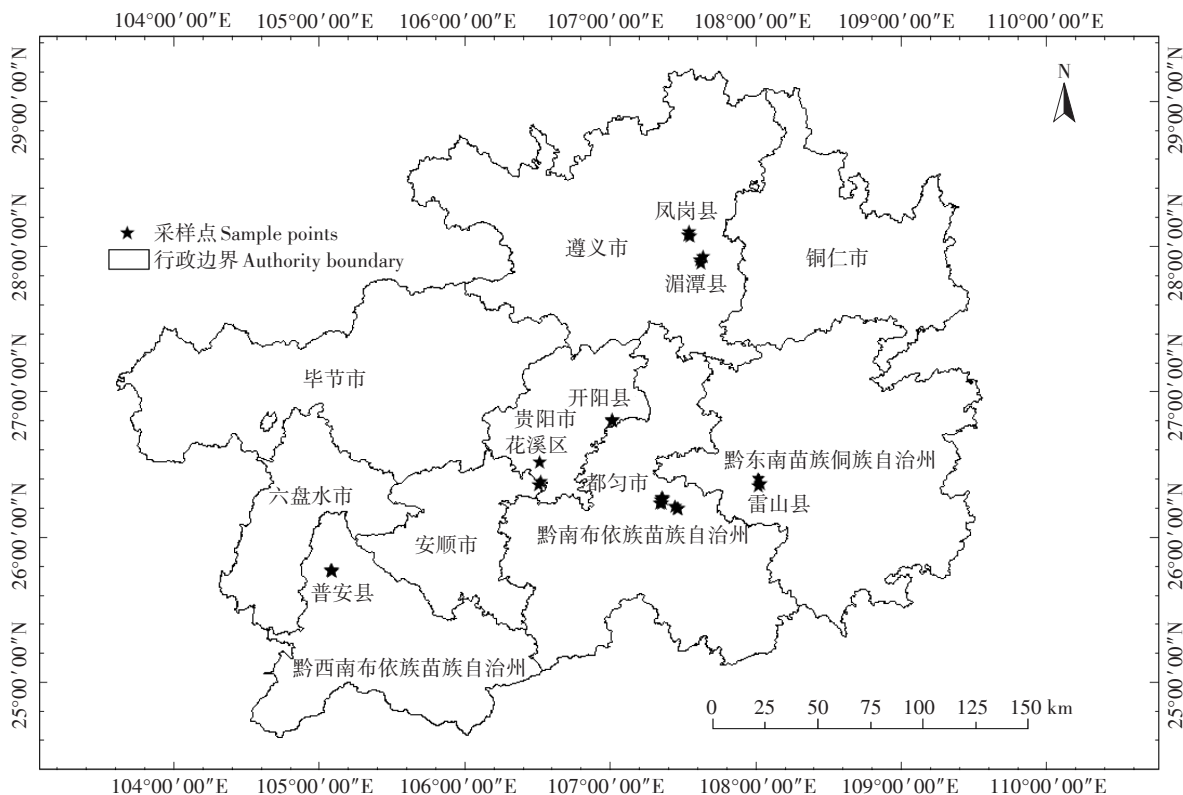


图1 研究区样点分布图

Figure 1 Distribution map of sample points in the study area

然风干,研磨制成0.149 mm和2 mm两种规格的样品,装自封袋备用。

1.3 测定方法

土壤pH值采用蒸馏水浸提(土水比为1:2.5)电位法^[17]测定,土壤有机质(SOM)采用重铬酸钾容量法^[17]测定,土壤全磷(TP)采用HClO₄-H₂SO₄三酸消解法^[17]测定,有效磷(AP)采用Bray法^[17-18]测定。土壤磷分级测定方法如下:

张守敬和Jackson无机磷分级方法^[19-20]是依据无机磷酸盐与化学浸提剂结合差异而提出的适用于中性或酸性土壤无机磷的分级方法,铝磷(Al-P)使用1.0 mol·L⁻¹ NH₄F和0.5 mol·L⁻¹ NH₄F(pH 8.2)进行浸提;铁磷(Fe-P)使用0.1 mol·L⁻¹ NaOH和1.5 mL H₂SO₄进行浸提;闭蓄态磷(O-P)使用0.3 mol·L⁻¹ 柠檬酸钠和Na₂SO₄-NaOH共同浸提,再使用10 mL H₂SO₄:HClO₄:HNO₃ (1:2:7)浸提;钙磷(Ca-P)使用0.5 mol·L⁻¹ (0.5H₂SO₄)浸提;总无机磷(Pi)为各无机磷组分之和。

Bowman-Cole有机磷分级法^[21]是根据土壤有机磷与酸碱浓度差异的水解量而提出的有机磷分级方法,活性有机磷(LPo)使用0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃(pH 8.5)浸提;中等活性有机磷(MPo)使用1 mol·L⁻¹ H₂SO₄溶

解的磷加上0.5 mol·L⁻¹ NaOH溶解的磷浸提;中等稳定性有机磷(MRPo,在pH 1~1.5时不发生沉淀的部分富里酸磷)和高稳定性有机磷(HRPo,pH 1~1.5发生沉淀的部分胡敏酸磷)则使用0.5 mol·L⁻¹ NaOH进行浸提;总有机磷(Po)为各有机磷组分之和。

1.4 数据处理与分析

采用Microsoft Excel 2010对实验数据进行整理统计,使用ArcGIS 10.2进行研究区采样点位图的绘制,使用IBM SPSS Statistics单因素方差分析(One-way analysis of variance)中的LSD法检验土壤不同剖面层次磷素及磷组分之间在 $P<0.05$ 水平上的差异显著性,再使用IBM SPSS Statistics 25进行Pearson相关性分析(Correlate Pearson)和通径分析(Path analysis)确定各个土层间的有效磷与各组分磷素之间的关联性。

2 结果与分析

2.1 不同剖面层无机磷素形态特征

由图2可知,在0~100 cm五层土壤各剖面层(0~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm)中,总无机磷含量占全磷含量的平均比例分别为52.19%、66.08%、

68.99%、60.58%、54.39%。在各无机形态的磷素中,不同土层Ca-P含量相比于其他无机磷形态含量均最低,在0~100 cm土壤各剖面层的平均含量分别为28.73、27.75、24.25、27.17、29.21 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,但各土层间无显著差异。Al-P是土壤无机磷的主要组分,在0~100 cm土壤各剖面层的平均含量分别占总无机磷的44.52%、46.09%、51.38%、47.34%、51.51%,各土层间无显著差异。Fe-P含量在0~100 cm五层土壤剖面中分别占总无机磷含量的36.40%、33.83%、30.10%、30.55%、28.19%,除了在0~20 cm土层与20~40 cm土层之间无显著差异外,其他层次间均差异显著。O-P含量在土壤各剖面层中无显著差异。

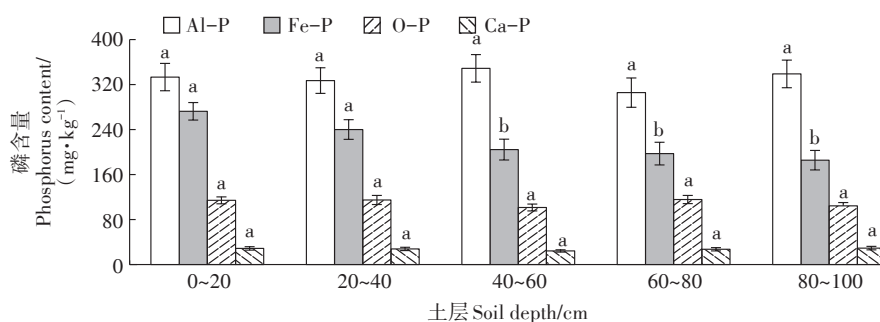
2.2 不同剖面层有机磷素形态特征

茶园土壤不同剖面层有机磷形态特征见图3。在0~100 cm土壤各层的有机磷总含量分别占土壤磷素总量的47.81%、33.92%、31.01%、39.42%、45.61%。LPo在0~100 cm土壤各剖面中的含量相比于其他有机磷形态均偏低,分别为7.32、6.18、5.39、6.33、4.91

$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,除了80~100 cm土层外,其他各层间均无显著差异($P>0.05$)。MPo是土壤各层中含量最高的有机磷组分,在0~100 cm土壤各剖面层中含量分别占总有机磷的44.26%、50.35%、59.21%、60.98%、53.98%,但除了在40~60 cm土层与80~100 cm土层存在显著差异外($P<0.05$),在其他剖面层之间无显著差异。MRPo在0~100 cm土壤各层的平均含量分别占总有机磷的27.99%、27.86%、22.00%、22.54%、27.89%,但除了在0~20 cm土层与80~100 cm土层中存在显著差异外($P<0.05$),其他剖面层之间无显著差异。各土层中HRPo含量在有机磷组分中仅次于MPo。

2.3 土壤有效磷与不同剖面层各磷组分含量的相关性

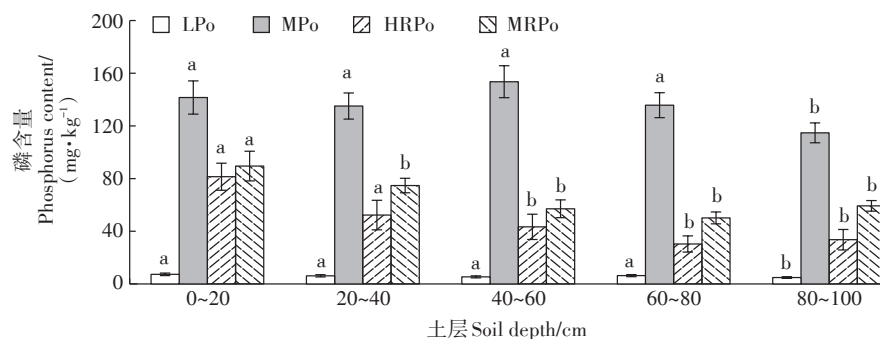
土壤理化性质影响土壤磷的形态、有效性及供应潜力,通过对土壤各剖面层不同形态磷组分与有效磷之间的相关性分析(表1)发现,土壤各层的磷形态与土壤有效磷相关性各不相同。0~20 cm土层的MPo与有效磷(AP)存在显著相关性,而与其他磷形态相关性不显著,表明茶园表层土的MPo有效性最高,且



Al-P为铝磷;Fe-P为铁磷;O-P为闭蓄态磷;Ca-P为钙磷。不同土壤剖面层间的小写字母表示同一磷组分的差异显著($P<0.05$)。下同。
Al-P, aluminum phosphorus; Fe-P, ferrophosphorus; O-P, closed storage phosphorus; Ca-P, calcium phosphorus. Different lowercase letters for the same phosphorus component indicate significant difference among soil profiles at $P<0.05$ level. The same below.

图2 不同土壤剖面层各无机磷组分含量

Figure 2 Contents of various inorganic phosphorus components in different soil profiles



LPo为活性有机磷;MPo为中等活性有机磷;HRPo为高稳定性有机磷;MRPo为中等稳定性有机磷。
LPo, highly active organic phosphorus; MPo, moderately active organic phosphorus; HRPo, highly robustness organic phosphorus; MRPo, moderately robustness organic phosphorus.

图3 不同土壤剖面各有机磷组分含量

Figure 3 Contents of various organic phosphorus components in different soil profiles

最容易发生转换从而相互补充。在 20~40 cm 土层 Al-P 与有效磷的相关系数最高,且仅有 Al-P 与有效磷显著相关,说明该土层 Al-P 是有效性最高的磷素。在 40~60 cm 土层中,LPo 与有效磷呈极显著正相关,Ca-P 与有效磷呈极显著负相关,说明 LPo 是有效性较高的磷组分,易发生转换补充,而稳定性相对强的 Ca-P 转化最强(相关性最高),但有效性低。在 60~80 cm 土层的 Al-P、Ca-P、LPo、TP 及 Pi 与有效磷具有相关性,但只有 Al-P、TP 和 Pi 与有效磷的相关性达到

极显著水平,且 Al-P 的相关系数最高,表明 Al-P 是该土层有效性最高的磷源。在 80~100 cm 土层的 LPo、MPo、Al-P、TP、Pi 及 Po 与有效磷存在显著正相关,但只有 Al-P 与有效磷的相关系数最高,表明 Al-P 是该土层土壤活性磷源,较易转化补充为有效磷,而其他磷素组分(LPo、MPo、TP、Pi 及 Po)是土壤重要的磷源。

由于土壤 40~100 cm 土层中至少存在两种磷素形态与有效磷具有极显著相关性($P<0.01$),而双因素

表1 不同土壤剖面各磷素组分与有效磷相关性

Table 1 Pearson correlation of phosphorus components in soil profiles and available phosphorus

土层 Soil depth/ cm	磷素 Phosphorus components	Fe-P	O-P	Ca-P	HRPo	MRPo	MPo	LPo	TP	Pi	Po	AP
0~20	Al-P	0.052	0.048	-0.235	0.321	0.564**	0.135	0.409*	0.759**	0.810**	0.485*	0.186
	Fe-P		0.165	0.022	0.102	0.049	0.175	0.193	0.462*	0.590**	0.17	-0.044
	O-P			-0.132	0.303	0.115	0.288	0.239	0.376	0.311	0.356	0.197
	Ca-P				-0.099	-0.278	0.218	-0.288	-0.096	-0.102	-0.063	0.296
	HRPo					0.247	-0.004	0.327	0.525**	0.36	0.593**	-0.299
	MRPo						0.392*	0.157	0.680**	0.470*	0.764**	0.188
	MPo							0.169	0.528**	0.278	0.705**	0.454*
	LPo								0.460*	0.444*	0.354	0.059
	TP									0.908**	0.843**	0.216
	Pi										0.539**	0.196
	Po											0.182
20~40	Al-P	0.27	-0.147	-0.124	0.314	0.295	0.337	0.294	0.716**	0.770**	0.465*	0.387*
	Fe-P		0.241	0.059	0.294	0.411*	0.592**	0.416*	0.791**	0.764**	0.672**	0.166
	O-P			0.416*	-0.085	0.061	0.152	0.081	0.247	0.301	0.097	0.042
	Ca-P				-0.029	-0.28	0.281	-0.314	0.076	0.132	-0.041	-0.158
	HRPo					0.279	0.103	0.399*	0.446*	0.342	0.539**	-0.13
	MRPo						0.141	0.399*	0.581**	0.404*	0.781**	0.238
	MPo							0.02	0.665**	0.595**	0.652**	0.054
	LPo								0.444*	0.406*	0.417*	0.343
	TP									0.960**	0.860**	0.298
	Pi										0.683**	0.344
	Po											0.15
40~60	Al-P	0.041	-0.007	-0.303	0.181	-0.091	0.031	0.202	0.496**	0.733**	0.040	0.285
	Fe-P		0.492**	0.196	0.780**	0.346	0.206	0.554**	0.704**	0.684**	0.455*	0.298
	O-P			0.344	0.418*	0.463*	0.006	0.2220	0.449*	0.470*	0.253	0.170
	Ca-P				0.109	0.141	0.185	-0.251	0.123	0.011	0.201	-0.531**
	HRPo					0.410*	0.23	0.403*	0.727**	0.646**	0.539**	0.138
	MRPo						0.336	0.053	0.523**	0.218	0.664**	0.303
	MPo							-0.188	0.612**	0.149	0.896**	-0.223
	LPo								0.306	0.478*	-0.005	0.513**
	TP									0.841**	0.794**	0.226
	Pi										0.339	0.371
	Po											-0.023

注:**表示在 0.01 水平(双尾)相关性显著;*表示在 0.05 水平(双尾)相关性显著。下同。

Note:**indicates significant correlation at a level of 0.01(two-tailed);*indicates significant correlation at a level of 0.05(two-tailed). The same below.

续表 1 不同土壤剖面层各磷素组分与有效磷相关性
Continued table 1 Pearson correlation of phosphorus components in soil profiles and available phosphorus

土层 Soil depth/ cm	磷素 Phosphorus components	Fe-P	O-P	Ca-P	HRPo	MRPo	MPo	LPo	TP	Pi	Po	AP
60~80	Al-P	-0.189	-0.175	-0.549**	0.115	0.291	-0.029	0.263	0.515**	0.609**	0.162	0.786**
	Fe-P		0.535**	0.317	0.319	0.296	0.518**	0.304	0.680**	0.631**	0.610**	0.105
	O-P			0.409*	0.397*	0.067	0.349	0.342	0.489**	0.463*	0.420*	-0.021
	Ca-P				0.06	-0.221	0.373	-0.065	0.010	-0.063	0.175	-0.468*
	HRPo					0.288	0.055	0.145	0.463*	0.393*	0.502**	0.034
	MRPo						0.117	0.144	0.527**	0.422*	0.628**	0.299
	MPo							0.299	0.573**	0.419*	0.776**	0.053
	LPo								0.488**	0.480*	0.375	0.413*
	TP									0.967**	0.809**	0.570**
	Pi										0.632**	0.663**
	Po											0.204
80~100	Al-P	0.024	-0.226	-0.354	0.133	-0.015	0.155	0.263	0.682**	0.763**	0.123	0.624**
	Fe-P		0.070	0.083	0.306	0.252	0.115	0.337	0.640**	0.628**	0.299	0.018
	O-P			0.112	-0.072	-0.096	-0.220	-0.334	-0.031	0.061	-0.204	-0.262
	Ca-P				-0.144	-0.25	0.202	-0.079	-0.127	-0.118	-0.074	-0.284
	HRPo					0.519**	0.242	0.523**	0.502**	0.260	0.716**	0.377
	MRPo						0.113	0.143	0.378	0.090	0.758**	0.096
	MPo							0.509**	0.417*	0.174	0.681**	0.457*
	LPo								0.499**	0.342	0.539**	0.397*
	TP									0.921**	0.591**	0.539**
	Pi										0.229	0.448*
	Po											0.418*

注:**表示在 0.01 水平(双尾)相关性显著;*表示在 0.05 水平(双尾)相关性显著。下同。
Note:**indicates significant correlation at a level of 0.01(two-tailed);*indicates significant correlation at a level of 0.05(two-tailed). The same below.

相关性分析无法表明它们之间的复杂关系,故对剖面各层磷素形态进行通径分析。通径分析将各磷素形态因子对有效磷的影响分解为直接效应(直接通径系数)和该因子通过其他磷素因子而产生的效应(间接通径系数)两部分,而这两部分的代数和既表示相关系数,又表示该磷素因子和其他磷素因子对有效磷的联合贡献程度(表 2)。

在 40~60 cm 土层,Ca-P 对有效磷的直接通径系数为-0.612,表现为负效应,Fe-P 通过 Ca-P 对有效磷的间接通径系数为-0.120,且 Ca-P 与有效磷的相关性达到极显著水平($P<0.01$),且通径系数最大,表明 Ca-P 是 40~60 cm 土层土壤有效磷的潜在磷源。在 60~80 cm 土层,Al-P 对有效磷的直接通径系数为 0.836,Fe-P 通过 Al-P 对有效磷的间接通径系数为 0.158,Al-P 与有效磷的相关性达到极显著水平($P<0.01$),说明 60~80 cm 土层土壤有效磷的重要磷源是 Al-P。在 80~100 cm 土层,Al-P 对有效磷的直接通径系数为

0.567,MPo 通过 Al-P 对有效磷的间接通径系数为 0.088,且 Al-P 与有效磷的相关性达到极显著水平($P<0.01$),说明 Al-P 是 80~100 cm 土层土壤有效磷的重要磷源。

3 讨论

3.1 不同剖面层磷素形态含量特征

采用 Bowman-Cole 有机磷分级方法、张守敬和 Jackson 无机磷分级方法提取土壤磷素,对贵州省典型茶园土壤剖面进行磷素的分级。在无机磷中,Al-P 是土壤各磷素中最容易受土壤性质、环境条件影响的形态,也是与植物有效性相关的成分,可称作土壤活性磷^[22-23]。本研究结果表明,在茶园 0~100 cm 五层土壤剖面层中,无机磷含量占全磷含量的平均比例别为 52.19%、66.08%、68.99%、60.58%、54.39%,在黄壤茶园中,无机磷含量占土壤全磷含量的比例最高,且表现为表层土最高的规律。Fe-P 和 Al-P 是土壤剖面无

表2 不同土壤剖面各磷素组分与有效磷通径分析

Table 2 Path analysis of phosphorus component in soil profiles and available phosphorus in soil

土层 Soil depth/cm	因变量 Dependent variable	因子 Factor	相关系数 Correlation coefficient	直接通径系数 Direct path coefficient	间接通径系数 Indirect path coefficient			
					Ca-P	Fe-P	Al-P	MPo
40~60	AP	Ca-P	-0.531**	-0.612		0.082	—	—
		Fe-P	0.298	0.418	-0.120		—	—
60~80	AP	Al-P	0.786**	0.836	—	-0.050		—
		Fe-P	-0.021	0.263	—		0.158	—
80~100	AP	Al-P	0.624**	0.567	—	—		0.057
		MPo	0.457*	0.369	—	—	0.088	

注: 剩余通径系数 $Pe_{40-60}=0.392$, $Pe_{60-80}=0.417$, $Pe_{80-100}=0.467$; 决定系数 $R^2_{40-60}=0.846$, $R^2_{60-80}=0.826$, $R^2_{80-100}=0.782$ 。

Note: The coefficient of residual diameter $Pe_{40-60}=0.392$, $Pe_{60-80}=0.417$, $Pe_{80-100}=0.467$. Coefficient of determination $R^2_{40-60}=0.846$, $R^2_{60-80}=0.826$, $R^2_{80-100}=0.782$.

机磷的主要组分,分别占土壤剖面总无机磷含量的28.19%~36.40%、44.52%~51.51%,与陈冲等^[6]的研究结果不同,分析认为是由于水稻土及土地利用类型存在差别,水稻土中集聚大量的还原性铁,造成土壤Fe-P含量较高,而本研究区温湿交替,叠加植茶因素,使茶园酸性环境土壤Fe-P和Al-P含量增加。与其他剖面层次相比,表层土的无机磷组分含量最高,但除了Fe-P具有显著差异外($P<0.05$),其他的无机磷形态无显著差异,与邱亚群等^[7]的研究一致。

在有机磷中,土壤的LPo和MPo属于较易矿化可被植物吸收利用的磷形态^[23-24]。本研究表明,在土壤剖面中,MPo含量较高,为135.11~153.56 mg·kg⁻¹,在0~100 cm五层土壤剖面层中的MPo含量占总有机磷含量的平均比例在44.26%~60.98%之间,MPo在各剖面的比例变化不大。MPo与0~20 cm土层的MRPo显著相关($P<0.05$),表层土的MRPo会发生活化,向活性更高的MPo转化,这与王非非等^[25]研究的中等活性有机磷的变化一致。MPo与20~40 cm土层和60~80 cm土层的Fe-P具有极显著相关性($P<0.01$),20~40 cm土层和60~80 cm土层的Fe-P是MPo转化的重要途径。

LPo含量在土壤剖面中含量仅为4.91~7.32 mg·kg⁻¹,但在各土层中的相关性不同,LPo与0~20 cm土层的Al-P呈显著相关($P<0.05$),土壤LPo主要来自表层土壤Al-P。LPo与20~40 cm土层的MRPo、HRPo及Fe-P呈显著相关($P<0.05$),但与Fe-P相关系数最高,土壤LPo主要来自Fe-P。LPo与40~60 cm土层的HRPo呈显著相关($P<0.05$),与Fe-P存在极显著相关性($P<0.01$),土壤LPo主要来自Fe-P。LPo与80~100 cm的HRPo和MPo存在极显著相关性($P<0.01$),但与HRPo相关系数最高,土壤LPo主要来自HRPo。有研究表明LPo易被植物吸引利用^[16],说明这些土壤层中的

Al-P、Fe-P及HRPo皆可被茶树吸收利用。有机磷组分含量整体表现为MPo>MRPo>HRPo>LPo,与谢国雄等^[13]对有机磷的研究结论一致,与曹晓霞^[16]的研究结果不一致,这主要因为研究区温湿多雨,处于中高海拔,且表层残枝落叶的集聚分解及地带性黄壤风化淋溶作用影响茶树根系分泌乙酸、琥珀脂、柠檬酸等有机酸^[26-27],促进土壤Al-P、Fe-P的活化以及富里酸磷、胡敏酸磷的转化^[28],使活性相对较强的MPo和MRPo大量形成。

3.2 土壤剖面各层有机磷和无机磷与有效磷的相关性及有效性

在土壤各剖面层中,土壤有效磷与土壤剖面各层磷形态之间具有不同的相关性。有效磷有效性最高的磷源为0~20 cm土层的MPo($P<0.05$),20~40 cm土层的Al-P($P<0.05$),40~60 cm土层的Ca-P和LPo($P<0.01$),60~80 cm土层的Al-P、TP和Pi($P<0.01$),80~100 cm土层的Al-P和TP($P<0.01$)。由各磷素形态含量的差异和磷素组分的相关性可知,双因素相关性分析不能较好地描述各磷形态对土壤磷素有效性的贡献,故对40~100 cm土壤剖面各层磷素形态进行通径分析,得到的相关性系数、直接通径系数及间接通径系数可反映茶园土壤各磷形态的相对有效性(表2),经变量剔除后,土壤不同土层中留存的磷素组分各异,Al-P、Fe-P、Ca-P、MPo被保留下来,它们是40~100 cm不同土壤剖面层中对土壤有效磷贡献较大的磷素形态。

在40~60 cm土层中,Ca-P是对有效磷贡献最大的潜在无机磷源,在茶园酸性土壤中,Ca-P主要以有效性最低的Ca₁₀-P及有效性相对较低的Ca₈-P存在,同时部分Ca₁₀-P和Ca₈-P向Ca₂-P转化,成为可供应茶树吸收的有效磷源^[29-30]。在60~100 cm土层,Al-P

是对有效磷贡献最大的活性无机磷素形态,酸性土壤环境可以有效促进土壤交换性铝、腐植酸铝及酸溶性铝含量增加^[31],提升了土壤中 Al-P 的有效性^[32]。此外,Al-P 与 60~80 cm 土层的 O-P 存在极显著负相关 ($P<0.01$),说明该层 O-P 有效性较低,但 O-P 与 Al-P 存在相互转化关系。HRPo 与 20~40 cm 土层和 60~80 cm 土层的 LPo、TP 及 Po 相关,与 20~60 cm 土层和 80~100 cm 土层的 TP 和 Po 呈极显著正相关 ($P<0.01$),表明 HRPo 与 LPo、TP 及 Po 存在相互转化关系,胡敏酸结合态的 HRPo 可作为潜在的磷源^[33],孙元宏等^[34]研究表明胡敏酸结合态磷素存在最高的有效性。MRPo 是土壤中相对较稳定的有机磷,相关性分析表明其与 0~20 cm 土层的 Al-P 和 80~100 cm 土层的 HRPo 呈显著正相关 ($P<0.01$),与 20~40 cm 土层的 Fe-P、40~60 cm 土层的 O-P 和 HRPo 显著相关 ($P<0.05$),表明 MRPo 在 0~20 cm 土层可作为有效磷源,而在其他剖面层则充当潜在磷源,这间接反映出不同土壤剖面层中会有部分难溶性的 MRPo 发生活化,转换为其他有效性相对较高的磷形态,从而提高磷的有效性^[35]。

4 结论

贵州省典型茶园供试土壤剖面(0~100 cm)磷素分布主要表现为以下特征:

(1)土壤剖面总无机磷含量占全磷含量的平均比例为 52.19%~68.99%,且土壤剖面无机磷形态以 Al-P 和 Fe-P 为主,分别占总无机磷含量的比例为 44.52%~51.51% 和 28.19%~36.40%;土壤剖面有机磷以中等活性有机磷和中等稳定性有机磷为主,分别占总有机磷含量的比例为 44.26%~60.98% 和 22.00%~27.99%。

(2)土壤垂直剖面各层中有效磷的来源对应于不同磷素形态,有效磷的活性磷源在 0~20 cm 土层是中等活性有机磷,在 20~40 cm 和 80~100 cm 土层是 Al-P,重要转换性有效磷源在 0~60 cm 土层和 80~100 cm 土层是中等稳定性有机磷;40~60 cm 土层的 Ca-P 和高稳定性有机磷、60~80 cm 土层的 O-P、0~40 cm 和 80~100 cm 土层的高稳定性有机磷是茶园土壤潜在的非活性磷源;活性有机磷主要贡献源有 0~20 cm 土层的 Al-P、20~80 cm 土层的 Fe-P 及 80~100 cm 土层的高稳定性有机磷。

参考文献:

[1] AUNG K M, TAKEO Y K, TAKAHIDE Z, et al. Effects of organic-ma-

- nure application on growth, grain yield, and nitrogen, phosphorus, and potassium recoveries of rice variety Manawthuka in paddy soils of differing fertility[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2011, 42(4):457-474.
- [2] MAO Q G, CHEN H, WANG C, et al. Effect of long-term nitrogen and phosphorus additions on understory plant nutrients in a primary tropical forest[J]. *Forests*, 2021(6):803-814.
- [3] HUANG L M, JIA X X, ZHANG G L, et al. Soil organic phosphorus transformation during ecosystem development: A review[J]. *Plant and Soil*, 2017, 417(1):17-42.
- [4] 吴璐璐, 柳小琪, 张泽兴, 等. 吉林省典型土壤磷素形态及有效性[J]. 西北农业学报, 2021, 30(5):737-745. WU L L, LIU X Q, ZHANG Z X, et al. Forms and availability of phosphorus in typical soil of Jilin Province[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalia Sinica*, 2021, 30(5):737-745.
- [5] 张倩, 张素霞, 刘克, 等. 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, 2011, 29(4):133-136. ZHANG Q, ZHANG S X, LIU K, et al. Inorganic phosphorus fractionation and availability on different kinds of plating conditions of soil in northern Shaanxi[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2011, 29(4):133-136.
- [6] 陈冲, 贾重建, 卢瑛, 等. 珠江三角洲平原土壤磷剖面分布及形态特征研究[J]. 土壤通报, 2015, 46(5):1025-1033. CHEN C, JIA C J, LU Y, et al. Studies on P distribution and fractions in soil profile of cultivated land in Pearl River Delta Plain[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2015, 46(5):1025-1033.
- [7] 邱亚群, 甘国娟, 刘伟, 等. 湖南典型土壤磷素剖面分布特征及其流失风险[J]. 中国农学通报, 2012, 28(8):223-227. QIU Y Q, GAN G J, LIU W, et al. The study of distribution characteristics of phosphorus of typical soil in Hunan and its loss risk[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2012, 28(8):223-227.
- [8] 梁威, 邵学新, 吴明, 等. 杭州湾滨海湿地不同植被类型沉积物磷形态变化特征[J]. 生态学报, 2012, 32(16):5025-5033. LIANG W, SHAO X X, WU M, et al. Phosphorus fraction in the sediments from different vegetation type in Hangzhou bay coastal wetlands[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(16):5025-5033.
- [9] 刘方, 刘元生, 卜通达, 等. 贵州喀斯特山区植被演替对土壤有效性氮磷含量及酶活性的影响[J]. 中国岩溶, 2012, 31(1):31-35. LIU F, LIU Y S, BU T D, et al. Impact of vegetation community succession on soil available N, P and enzyme activity of soil in Karst hill of Guizhou Province[J]. *Carsologica Sinica*, 2012, 31(1):31-35.
- [10] 杨慧, 曹建华, 孙蕾, 等. 岩溶区不同土地利用类型土壤无机磷形态分布特征[J]. 水土保持学报, 2010, 24(2):135-140. YANG H, CAO J H, SUN L, et al. Fractions and distribution of inorganic phosphorus in different land use types in Karst area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(2):135-140.
- [11] 蔡鑫淋, 舒英格, 陈梦军. 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, 2020, 40(2):107-114. CAI X L, SHU Y G, CHEN M J. Distribution characteristics and influencing factors of inorganic phosphorus in soil profiles during ecological restoration in Karst mountainous areas[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2020, 40(2):107-114.
- [12] 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[J]. 土壤通报, 2016, 47(2):378-383. YANG X Y, CHEN X W. Verti-

- cal distribution of soil phosphorus fractionation in uncultivated black soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2016, 47(2):378-383.
- [13] 谢国雄, 阮弋飞, 郭奇峰. 茶园红壤磷素形态组成特点及其影响因素研究[J]. 农学学报, 2021, 11(9):38-44. XIE G X, RUAN Y F, WU Q F. Study on phosphorus forms and influencing factors in tea garden red soil[J]. *Journal of Agriculture*, 2021, 11(9):38-44.
- [14] 范腊梅, 何电源, 廖先苓. 茶园土壤中磷素状态对茶叶品质的影响[J]. 中国茶叶, 1988(2):28-29. FAN L M, HE D Y, LIAO X L. Effects of phosphorus status in soil of tea garden on tea quality[J]. *China Tea*, 1988(2):28-29.
- [15] 杨君, 周卫军, 杨威, 等. 茶树根际与非根际土壤磷形态变化特征[J]. 水土保持通报, 2013, 33(4):216-220. YANG J, ZHOU W J, YANG W, et al. Characteristics of phosphorus forms in rhizosphere and non-rhizosphere soil of tea plantation[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2013, 33(4):216-220.
- [16] 曹晓霞. 腐植酸对名山区老冲积黄壤有机磷组分及速效磷的影响研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2014:37-38. CAO X X. Study on the effects of humic acid on organic phosphorus fractions and available phosphorus in old alluvial yellow soil in Mingshan District[D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2014:37-38.
- [17] 鲍士旦, 江荣风, 杨超光. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000:25-75. BAO S D, JIANG R F, YANG C G. Methods for soil agrochemical analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000:25-75.
- [18] BRAY R H, KURTZ L T. Determination of total, organic, and available forms of phosphorus in soils[J]. *Soil Science*, 1945, 59(1):39-46.
- [19] CHANG S C, JACKSON M L. Fractionation of soil phosphorus[J]. *Soil Science*, 1957, 59(1):39-45.
- [20] 陈梦军, 舒英格, 肖盛杨. 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, 2019, 36(4):462-470. CHEN M J, SHU Y G, XIAO S Y. Methods of soil organic and inorganic phosphorus fractionation in Karst areas[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(4):462-470.
- [21] BOWMAN R, COLE C V. An exploratory method for fractionation of organic phosphorus from grassland soils[J]. *Soil Science*, 1978, 125(2):95-101.
- [22] 高敏, 王治江, 许耀照, 等. 3个冬油菜品种不同生育时期土壤磷素特征[J]. 草原与草坪, 2020, 40(2):9-16. GAO M, WANG Z J, XU Y Z, et al. Characteristics of soil phosphorus in different growth stages of three winter rape[J]. *Grassland and Turf*, 2020, 40(2):9-16.
- [23] 阮宇成, 陈瑞锋. 铝磷对茶树生长及养分吸收的影响[J]. 中国茶叶, 1986(1):2-5. RUAN Y C, CHEN R F. Effects of aluminum-phosphorus on growth and nutrient absorption of tea[J]. *China Tea*, 1986(1):2-5.
- [24] 王留芳, 陈婵, 朱小叶, 等. 中亚热带不同植被恢复阶段林地土壤磷库特征[J]. 水土保持学报, 2019, 33(1):178-185. WANG L F, CHEN C, ZHU X Y, et al. Characteristics of soil phosphorus pool at different vegetation restoration stages in the mid-subtropical region of China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(1):178-185.
- [25] 王非非, 谢修鸿, 窦文涛, 等. 珙春苹果梨园不同土壤剖面有机磷分布特征[J]. 北方园艺, 2016(6):156-159. WANG F F, XIE X H, DOU W T, et al. Distribution characteristics of organic phosphorus components in soil profile of apple-pear orchard in Hunchun City[J]. *Northern Horticulture*, 2016(6):156-159.
- [26] 张鹏, 谢修鸿, 李翠兰, 等. 我国几种地带性土壤中磷素形态的研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2019, 39(10):3210-3216. ZHANG P, XIE X H, LI C L, et al. Forms of phosphorus in several zonal soils of China[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2019, 39(10):3210-3216.
- [27] 吴起鑫, 韩贵琳. 三峡库区兰陵溪消落带土壤磷分布特征及生物可利用性评价[J]. 生态学杂志, 2018, 37(3):779-785. WU Q X, HAN G L. Distribution and bio-availability of soil phosphorus at the riparian zone of Lanlingxi watershed in the Three Gorges[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, 37(3):779-785.
- [28] 王小东, 狄岚, 华小菊. 高铝低磷对油茶生长及其根系分泌有机酸的影响[J]. 福建林业科技, 2021, 48(1):12-17. WANG X D, DI L, HUA X J. Effects of high-Al and low-P stress on the growth of *Camellia oleifera* abel. and organic acid exudation from roots[J]. *Journal of Fujian Forestry Science and Technology*, 2021, 48(1):12-17.
- [29] 王艳玲, 王杰, 赵兰坡, 等. 黑土无机磷形态及其有效性研究[J]. 水土保持学报, 2004(3):85-89. WANG Y L, WANG J, ZHAO L P, et al. Study on forms of inorganic phosphorus and their usefulness in black soils in Jilin Province[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004(3):85-89.
- [30] 齐鹏, 王晓娇, 焦亚鹏, 等. 施磷对陇中黄土高原春小麦耕层土壤磷组分及有效性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2021, 39(5):99-106. QI P, WANG X J, JIAO Y P, et al. Effects of phosphorus application on phosphorus composition and availability of spring wheat topsoil on the Loess Plateau of Longzhong[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2021, 39(5):99-106.
- [31] 崔瑶, 辜夕容, 严宁珍, 等. 缙云山4种林分土壤无机磷与活性铝的含量及分布[J]. 生态学报, 2022, 42(5):1727-1738. CUI Y, GU X R, YAN N Z, et al. Content and distribution of inorganic phosphorus and labile aluminum in soil of four forest types in Jinyun Mountain[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(5):1727-1738.
- [32] 颜晓军, 苏达, 郑朝元, 等. 长期施肥对酸性土壤磷形态及有效性的影响[J]. 土壤, 2020, 52(6):1139-1144. YAN X J, SU D, ZHENG C Y, et al. Effects of long-term fertilization on phosphorus forms and availability in acidic soil[J]. *Soils*, 2020, 52(6):1139-1144.
- [33] 张雅蓉, 高明, 黄容. 三峡库区消落带土壤无机磷的生物有效性[J]. 水土保持学报, 2014, 28(3):222-226. ZHANG Y R, GAO M, HUANG R. Bio-availability of soil inorganic phosphorus in the Hydro-fluctuation of Three Gorges Reservoir[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(3):222-226.
- [34] 孙元宏, 李翠兰, 曹志远, 等. 土壤腐殖物质组分结合态磷素有效性的研究[J]. 土壤通报, 2021, 52(2):369-378. SUN Y H, LI C L, CAO Z Y, et al. Availability of phosphorus associated with soil humic substance[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2021, 52(2):369-378.
- [35] 黄运湘, 王翠红, 张杨珠. 湖南省几种主要母质类型菜园土壤的磷素状况[J]. 农业现代化研究, 2009, 30(4):505-508. HUANG Y X, WANG C H, ZHANG Y Z. Phosphorus status in vegetable soils derived from 3 types of parent materials in Hunan Province[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2009, 30(4):505-508.