

DOI: 10.20103/j.stxb.202211183343

简尊吉, 雷蕾, 曾立雄, 肖文发, 程瑞梅, 李春蕾. 我国森林土壤全磷密度分布特征. 生态学报, 2023, 43(22): 9256-9265.

Jian Z J, Lei L, Zeng L X, Xiao W F, Cheng R M, Li C L. Distribution of soil total phosphorus density in China's forests. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(22): 9256-9265.

我国森林土壤全磷密度分布特征

简尊吉¹, 雷蕾^{1,2}, 曾立雄^{1,2,*}, 肖文发^{1,2}, 程瑞梅^{1,2}, 李春蕾^{1,2}

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

2 南京林业大学南方现代林业协同创新中心, 南京 210037

摘要: 土壤磷可利用性显著影响森林生产力和固碳能力。了解我国森林土壤全磷密度在土壤、气候和植被等不同环境条件下的分布特征, 为我国森林质量提升和固碳增汇提供理论指导。收集全国森林土壤调查数据和文献数据中 0—20 cm (2571 个样地)、20—40 cm (1305 个样地)、40—60 cm (701 个样地)、60—80 cm (40 个样地) 和 80—100 cm (31 个样地) 土层土壤全磷含量和容重以估算土壤全磷密度, 采用单因素方差分析和 Tukey HSD 法 (或 Mann-Whitney U 法) 检验土壤全磷密度在不同土层、土壤类型、土壤风化程度、气候区、森林起源、森林结构、林龄组、森林类型和树种组之间的差异, 利用线性回归分析探讨土壤全磷密度的纬度和经度变化趋势。结果表明: (1) 我国森林 40—60 cm 土层 (9.02 t/hm²) 土壤全磷密度显著低于表层 0—20 cm (13.81 t/hm²) 和 20—40 cm (10.84 t/hm²) 以及深层 60—80 cm (11.28 t/hm²) 和 80—100 cm (12.76 t/hm²) ($P < 0.001$), 0—60 cm 土层土壤全磷密度表现为中度风化 (11.89—18.86 t/hm²) > 轻度风化 (10.19—11.13 t/hm²) > 重度风化 (5.44—8.89 t/hm²), 在土壤类型间差异显著 ($P < 0.001$), 铁铝土的值最低 (5.44—8.89 t/hm²); (2) 土壤全磷密度随着纬度的增加线性增加, 但随着经度的增加线性降低 (除 0—20 cm 土层), 自热带向北温带也呈增加趋势; (3) 我国森林 0—60 cm 土层土壤全磷密度表现为人工林 (11.54—15.49 t/hm²) 显著高于天然林 (7.14—11.93 t/hm²) 及纯林 (12.16—15.40 t/hm²) 显著高于混交林 (6.06—12.15 t/hm²), 在林龄组和森林类型间差异显著 ($P < 0.001$), 0—20 cm 和 20—40 cm 土层中过熟林 (23.10 t/hm² 和 12.54 t/hm²) 和落叶针叶林 (19.49 t/hm² 和 15.30 t/hm²) 土壤全磷密度最高, 40—60 cm 土层土壤全磷密度随着林龄的增加而降低。总体来看, 我国森林 0—100 cm 土层土壤全磷密度存在明显的空间分布规律, 其在土壤、气候和植被类别间差异显著, 这些生物与非生物因素是影响我国森林土壤全磷高低和分布特征的重要因子; 延长轮伐期和种植混交林是维持和提高我国森林土壤全磷养分可持续利用的重要途径。

关键词: 森林; 全磷密度; 土层; 空间变化; 气候区; 植被差异

Distribution of soil total phosphorus density in China's forests

JIAN Zunji¹, LEI Lei^{1,2}, ZENG Lixiong^{1,2,*}, XIAO Wenfa^{1,2}, CHENG Ruimei^{1,2}, LI Chunlei^{1,2}

1 Ecology and Nature Conservation Institute, Chinese Academy of Forestry; Key Laboratory of Forest Ecology and Environment of National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100091, China

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

Abstract: Soil phosphorus availability significantly affects forest productivity and carbon sequestration capacity. Understanding the distribution characteristics of total phosphorus (TP) density under different environmental conditions such as soil, climate, and vegetation is important to provide theoretical guidance for forest quality improvement and carbon sequestration. However, these distributions of soil TP density in China's forests are still poorly understood. In this study, soil TP content and bulk density at soil depths of 0—20 cm (2571 plots), 20—40 cm (1305 plots), 40—60 cm

基金项目: 中央公益性科研院所基本科研业务费专项资金 (CAFYBB2021QD002)

收稿日期: 2022-11-18; **采用日期:** 2023-09-07

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zlxcaf@163.com

本研究尚不含中国港澳台统计数据。

(701 plots), 60—80 cm (40 plots), and 80—100 cm (31 plots) were collected from national survey data and literature data to estimate soil TP density. Differences in soil TP density in different soil layers, soil types, soil weathering levels, climate zones, forest origins, forest structures, age groups, forest types, and species groups were tested by one-way ANOVA and Tukey HSD (or Mann-Whitney U) method. The latitudinal and longitudinal trends of soil TP density were analyzed by linear regression analysis. The soil TP density of 40—60 cm (9.02 t/hm^2) was significantly lower than that of surface soil such as 0—20 cm (13.81 t/hm^2) and 20—40 cm (10.84 t/hm^2), as well as deep soil such as 60—80 cm (11.28 t/hm^2) and 80—100 cm (12.76 t/hm^2) ($P < 0.001$). It was characterized by a trend of intermediate weathering ($11.89\text{—}18.86 \text{ t/hm}^2$) > slight weathering ($10.19\text{—}11.13 \text{ t/hm}^2$) > strong weathering ($5.44\text{—}8.89 \text{ t/hm}^2$) at each layer of 0—60 cm. There were significant differences in soil TP density among soil types ($P < 0.001$), with the lowest value of Ferrallic soils ($5.44\text{—}8.89 \text{ t/hm}^2$). The soil TP density increased linearly with the increase of latitude, but decreased linearly with the increase of longitude (except for 0—20 cm), and showed an increased tendency from the tropical zone to the north-temperate zone. The soil TP density at each layer of 0—60 cm was significantly higher in planted forests ($11.54\text{—}15.49 \text{ t/hm}^2$) than in natural forests ($7.14\text{—}11.93 \text{ t/hm}^2$) and in pure forests ($12.16\text{—}15.40 \text{ t/hm}^2$) than in mixed forests ($6.06\text{—}12.15 \text{ t/hm}^2$). The soil TP density also showed significant differences among age groups and forest types ($P < 0.001$), with the highest value in over-mature forests (23.10 t/hm^2 and 12.54 t/hm^2) and deciduous coniferous forests (19.49 t/hm^2 and 15.30 t/hm^2) at depths of 0—20 cm and 20—40 cm. But it decreased with the increase of forest age at the depth of 40—60 cm. In conclusion, there was an obviously spatial distribution of TP density at the depth of 0—100 cm in China's forests and there were significant differences in soil TP density among soil, climate, and vegetation types. These biotic and abiotic factors were important to affect the size and distribution characteristics of soil TP in China's forests. Extending the rotation period and planting the mixed forests are important pathways to maintain and improve the sustainable utilization of soil TP in China's forests.

Key Words: forest; total phosphorus density; soil layer; spatial change; climatic zone; vegetation difference

陆地生态系统尤其是森林碳汇功能及其对全球“碳中和”的贡献已成为全球共识。磷是陆地生态系统植被生长所必需的大量元素之一。植被从土壤中吸收磷元素而维持其功能,但全球气候变暖和人类活动加剧显著地改变了陆地生态系统磷的循环与平衡^[1-2],反过来影响陆地生态系统功能的发挥^[3-4]。传统观点认为,磷是热带亚热带生态系统和古老年龄土壤中森林生产力和固碳能力的限制因子^[5-6],但近年来的研究结果发现温带森林生态系统也存在磷限制作用^[7-8],因此,全球森林生态系统磷限制现象越来越普遍。估算土壤磷含量和密度分布特征有助于理解其对陆地生态系统功能的影响。目前已有研究分析了全球和区域尺度土壤磷含量和磷库的大小及其分布特征^[9-11],但土壤磷元素受到母质、土壤、气候、植被等一系列因素的综合影响^[11-13],其不同环境条件下的分布特征也将存在差异,而相应的研究还鲜见报道。

不同尺度和方法研究结果表明,我国森林生态系统具有较高的固碳潜力^[14-16],在应对全球气候变暖过程中发挥着不可或缺的作用。但目前尚缺乏我国森林生态系统土壤磷密度分布特征的系统分析,这不利于科学评估我国森林生态系统磷循环及其对森林生态系统功能的作用,因此,揭示不同环境条件下我国森林土壤磷密度分布特征显得十分必要。我国森林类型多样,分布广泛,从热带到北温带,从东部湿润区到西北半干旱和干旱区,几乎涵盖了所有的土壤类型,为分析环境因子对土壤磷密度分布特征的影响提供了理想的研究场所。本研究收集和整理了我国森林土壤调查数据和文献数据中的全磷含量和容重,估算了我国森林 0—100 cm 不同土层土壤全磷密度,并分析了 0—60 cm 各土层土壤全磷密度在土壤风化程度、土壤类型、气候区、森林起源、森林结构、森林类型、龄组和树种组等之间的差异,旨在揭示我国森林土壤全磷密度在不同环境条件下的分布特征,为我国森林质量提升和固碳增汇提供数据支撑和理论指导。

1 数据来源和研究方法

1.1 数据来源

本研究使用的土壤全磷含量和容重来自 2 个方面:一是 2010 年 7 月—2018 年 10 月全国森林土壤调查数据,其系统地调查了我国主要森林类型不同土层土壤理化性质,样地大小为 100 m²或 400 m²;二是 2010 年—2019 年公开发表的我国森林土壤全磷含量和容重数据,其采用以下标准进行文献筛选:(1)文献必须同时包括全磷含量和容重 2 个指标,(2)土壤取样过程中明确划分了土壤层次,(3)林下土壤未受施肥、火灾和其他污染的影响,如果有类似试验,仅对对照样地数据被引用^[17], (4)具体样地位置或地理坐标被标注。在收集和整理全磷含量和容重时,还收集和整理了每个样地的地理位置(如经度、纬度、海拔和所属省份)、森林特征(如树种、起源、结构、类型和龄组)和土壤类型等信息。由此,本研究共收集到 0—20 cm、20—40 cm、40—60 cm、60—80 cm、80—100 cm 土层调查数据 2063、1051、558、36、27 条,文献数据 579、288、143、4、4 条。

1.2 数据处理

为避免土壤全磷含量和容重异常值对土壤磷密度估算结果的影响,本研究采用介于 0.4—2 g/cm³的容重^[18]和 0—4 g/kg 的全磷含量^[11]来估算不同土层全磷密度^[9]。剔除全磷含量和容重异常值后,共获得 0—20 cm 土层 2571 个样地,20—40 cm 土层 1305 个样地,40—60 cm 土层 701 个样地,60—80 cm 土层 40 个样地和 80—100 cm 土层 31 个样地相应土壤指标。

在分析过程中,通过中国土壤科学数据库(<https://vbd3.soi.csdb.cn/>)土壤分类系统将土壤类型重分类为 12 个土纲,即铁铝土、淋溶土、半淋溶土、钙层土、初育土、水成土、半水成土、盐碱土、人为土、高山土、干旱土和漠土;并根据中国土壤发生分类和世界土壤资源参比基础交叉检索表^[19]将土壤类型进一步划分成轻度、中度和重度 3 个风化程度等级^[9]。依照中国科学院地理科学与资源研究所资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/>)提供的我国气候区划底图,将本研究中所有样地重分类为高原气候区、北温带、中温带、南温带、北亚热带、中亚热带、南亚热带和热带 8 类气候区。按照主要树种龄级与龄组划分标准将林龄分为幼龄林、中龄林、近熟林、成熟林和过熟林 5 类,按照植物叶片特征将所有样地划分为常绿阔叶林、常绿针叶林、针阔混交林、落叶阔叶林和落叶针叶林 5 种类型。此外,将我国森林分为人工林与天然林 2 种起源,纯林与混交林 2 种结构;选择我国主要造林树种,即杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、落叶松(*Larix spp.*)、马尾松(*Pinus massoniana*)、杨树(*Populus spp.*)、云南松(*Pinus yunnanensis*)、桉树(*Eucalyptus spp.*)、柏木(*Cupressus funebris*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、湿地松(*Pinus elliotii*)、华山松(*Pinus armandii*)^[20],将其划分为纯林与混交林 2 种类型。按照上述原则将本研究中的所有样地分类后,探讨不同土层、土壤类型、土壤风化程度、气候区、森林起源、森林结构、森林类型、林龄组和树种组之间土壤全磷密度的分布特征与差异。

1.3 统计分析

利用 Excel 2003 对数据进行整理和计算。采用 R Studio 对数据进行统计分析与作图。采用单因素方差分析和 Tukey HSD 法(或 Mann-Whitney U 法)进行土壤全磷密度在不同土层、土壤类型、土壤风化程度、气候区、森林起源、森林结构、森林类型、林龄组和树种组之间的差异分析,显著性差异水平为 $P=0.05$ 。利用线性回归分析探讨了土壤全磷密度随纬度和经度的变化趋势。为了减弱极小值和极大值对不同环境条件下土壤全磷密度大小和分布特征的影响,本研究中图表数据同时呈现了平均值与中位数。

2 结果与分析

2.1 不同土层、土壤类型和土壤风化程度的土壤全磷密度分布特征

土壤全磷密度在 0—20 cm 土层介于 0.04—102.87 t/hm²,在 20—40 cm 土层介于 0.03—132.15 t/hm²,在 40—60 cm 土层介于 0.30—63.30 t/hm²,在 60—80 cm 土层介于 1.11—19.94 t/hm²,在 80—100 cm 土层介于 4.31—18.83 t/hm²。土壤全磷密度在土层间差异显著($P<0.001$;图 1),具体表现为 0—20 cm(13.81 t/hm²)>

80—100 cm (12.76 t/hm^2) > 60—80 cm (11.28 t/hm^2) > 20—40 cm (10.84 t/hm^2) > 40—60 cm (9.02 t/hm^2), 0—20 cm 土层比 40—60 cm 土层高 53%。土壤全磷密度在土壤风化程度间差异显著 ($P < 0.001$; 图 1), 0—20 cm、20—40 cm、40—60 cm 土层土壤全磷密度的平均值表现为中度风化 (18.86 t/hm^2 、 12.58 t/hm^2 、 11.89 t/hm^2) > 轻度风化 (11.13 t/hm^2 、 10.19 t/hm^2 、 10.44 t/hm^2) > 重度风化 (8.89 t/hm^2 、 7.55 t/hm^2 、 5.44 t/hm^2)。土壤全磷密度在土壤类型(土纲)间也存在显著差异 ($P < 0.001$; 图 1), 铁铝土土纲 0—20 cm、20—40 cm、40—60 cm 土层土壤全磷密度最低, 其平均值分别 8.89 t/hm^2 、 7.55 t/hm^2 、 5.44 t/hm^2 。由于水成土、干旱土和漠土的土壤全磷含量和容重数据缺失, 本文未检验其土壤全磷密度分布特征。

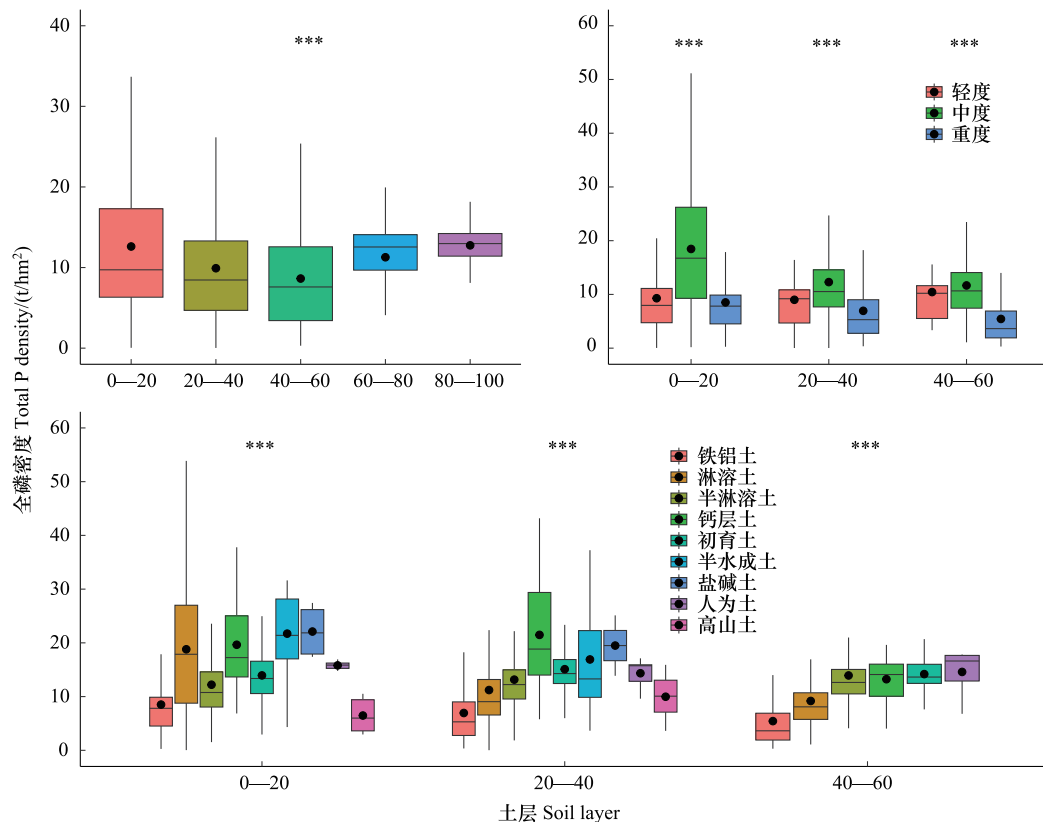


图 1 土壤全磷密度在土层、土壤风化程度和土纲之间的差异

Fig.1 Differences in soil total phosphorus (P) density in different soil layers, weathering levels, and orders

*** 表示在 0.001 水平下显著

2.2 土壤全磷密度的空间变化和气候区分布特征

随着纬度升高, 0—60 cm 各土层土壤全磷密度线性增加 ($P < 0.001$); 随着经度增加, 0—20 cm 土层土壤全磷密度线性增加 ($P < 0.001$), 20—40 cm、40—60 cm 土层土壤全磷密度线性下降 ($P < 0.01$ 和 $P < 0.001$) (图 2)。土壤全磷密度在不同气候带间差异显著 ($P < 0.001$), 0—20 cm 土层间差异更明显, 热带地区森林土壤全磷密度最低 (图 2)。0—20 cm、20—40 cm、40—60 cm 土层中, 高原气候区土壤全磷密度平均值分别为 17.34 t/hm^2 、 14.60 t/hm^2 、 14.34 t/hm^2 , 北温带为 30.04 t/hm^2 (20—40 cm 和 40—60 cm 土层数值缺失), 中温带为 21.94 t/hm^2 、 15.58 t/hm^2 、 8.25 t/hm^2 , 南温带为 14.68 t/hm^2 、 14.49 t/hm^2 、 13.65 t/hm^2 , 北亚热带为 12.26 t/hm^2 、 10.36 t/hm^2 、 11.33 t/hm^2 , 中亚热带为 10.06 t/hm^2 、 9.64 t/hm^2 、 7.87 t/hm^2 , 南亚热带为 7.43 t/hm^2 、 6.56 t/hm^2 、 5.30 t/hm^2 , 热带为 5.41 t/hm^2 、 4.22 t/hm^2 、 3.79 t/hm^2 。

2.3 不同森林起源、森林结构、林龄组、森林类型和树种组的土壤全磷密度分布特征

土壤全磷密度在森林起源、森林结构、林龄组和森林类型间差异显著 ($P < 0.001$; 图 3)。0—20 cm、20—

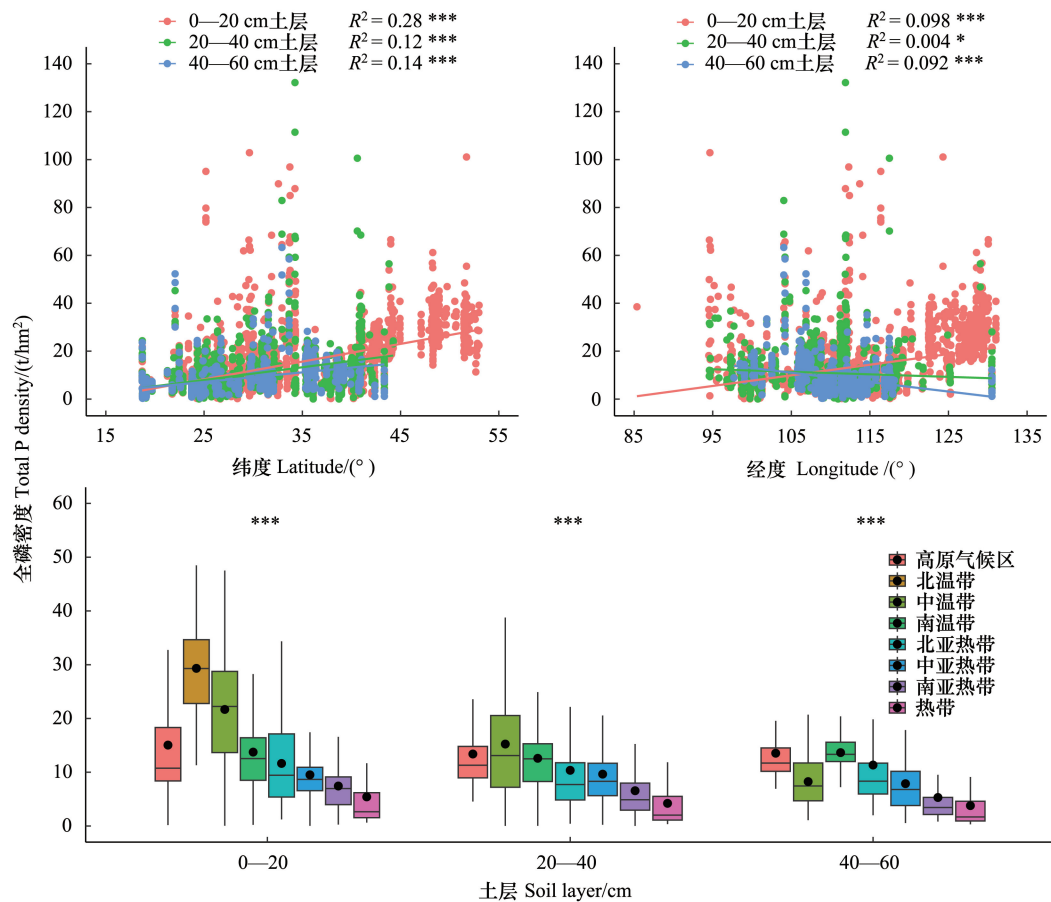


图2 土壤全磷密度的空间变化及在气候区之间的差异

Fig.2 Spatial changes of soil total phosphorus (P) density and its differences in different climatic zones

* 和 *** 分别表示在 0.05 和 0.001 水平下显著

40 cm、40—60 cm 土层土壤全磷密度为人工林>天然林和纯林>混交林,其平均值在人工林中分别为 15.49 t/hm²、12.14 t/hm²、11.54 t/hm²,在天然林中分别为 11.93 t/hm²、9.51 t/hm²、7.14 t/hm²;在纯林中分别为 15.40 t/hm²、13.58 t/hm²、12.16 t/hm²,在混交林中分别为 12.15 t/hm²、8.30 t/hm²、6.06 t/hm²。0—20 cm 和 20—40 cm 土层土壤全磷密度为过熟林最高 (23.10 t/hm²和 12.54 t/hm²),两个土层其他林龄组土壤全磷密度的平均值分别为:幼龄林 12.73 t/hm²和 10.43 t/hm²,中龄林 13.15 t/hm²和 11.03 t/hm²,近熟林 13.19 t/hm²和 7.00 t/hm²,成熟林 13.74 t/hm²和 10.57 t/hm²;40—60 cm 土层土壤全磷密度为幼龄林最高 (10.93 t/hm²),过熟林最低 (5.76 t/hm²)。0—20 cm、20—40 cm、40—60 cm 土层土壤全磷密度在常绿阔叶林中最低 (7.21 t/hm²、5.44 t/hm²、4.62 t/hm²),在落叶针叶林中最高 (19.49 t/hm²、15.30 t/hm²、12.12 t/hm²);0—20 cm 土层为针叶林 (13.90 t/hm²) 小于阔叶林 (14.03 t/hm²),20—40 cm 和 40—60 cm 土层为针叶林 (12.62 t/hm²和 12.27 t/hm²) 大于阔叶林 (10.26 t/hm²和 7.46 t/hm²)。

土壤全磷密度在主要造林树种间差异显著 ($P < 0.001$; 表 1),0—20 cm 土层为杨树 (22.20 t/hm²)>柏木 (21.20 t/hm²)>落叶松 (18.52 t/hm²)>油松 (13.90 t/hm²)>华山松 (13.01 t/hm²)>马尾松 (11.15 t/hm²)>杉木 (9.10 t/hm²)>桉树 (8.28 t/hm²)>云南松 (7.47 t/hm²)>湿地松 (6.56 t/hm²),20—40 cm 土层为柏木 (33.50 t/hm²)>杨树 (16.91 t/hm²)>油松 (16.18 t/hm²)>落叶松 (13.93 t/hm²)>华山松 (11.66 t/hm²)>马尾松 (9.55 t/hm²)>杉木 (9.26 t/hm²)>湿地松 (7.79 t/hm²)>桉树 (7.50 t/hm²)>云南松 (7.04 t/hm²),40—60 cm 土层为杨树 (12.95 t/hm²)>油松 (12.89 t/hm²)>落叶松 (11.42 t/hm²)>马尾松 (11.25 t/hm²)>杉木 (9.29 t/hm²)>华

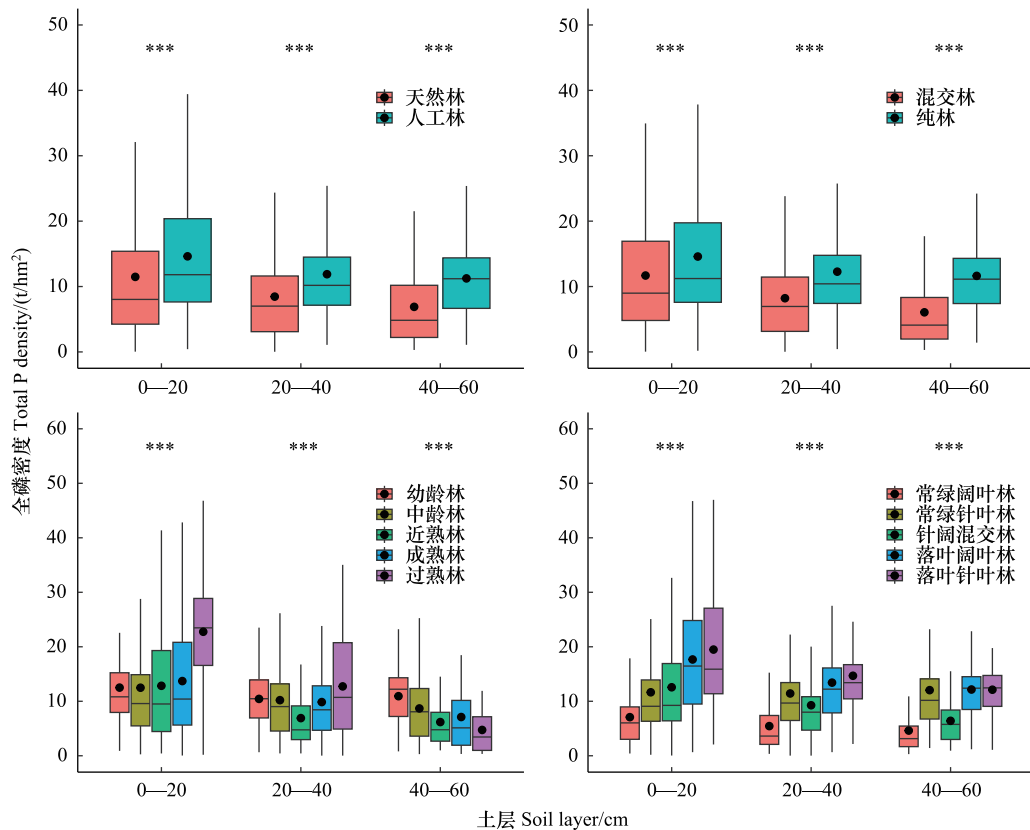


图3 土壤全磷密度在森林起源、森林结构、林龄组和森林类型之间的差异

Fig.3 Differences in soil total phosphorus (P) density in different forest origins, forest structures, age groups, and forest types

*** 表示在 0.001 水平下显著

山松 (8.30 t/hm^2) > 桉树 (6.62 t/hm^2) > 云南松 (5.45 t/hm^2)。土壤全磷密度在纯林与混交林中的主要造林树种组间也表现出显著差异 (表 1), 但其在同一树种不同森林结构间的分布特征则表现不同: 杨树、杉木为纯林 > 混交林, 华山松、湿地松为混交林 > 纯林; 落叶松、马尾松在 0—20 cm 土层为混交林 > 纯林, 在 20—40 cm 和 40—60 cm 土层则是纯林 > 混交林; 桉树在 0—20 cm 和 20—40 cm 土层为混交林 > 纯林, 在 40—60 cm 土层为纯林 > 混交林; 油松在 0—20 cm 和 20—40 cm 土层为纯林 > 混交林, 在 40—60 cm 土层为混交林 > 纯林。

3 讨论

土壤的形成与发育是母质、生物、气候、地形、时间等多种因素综合作用的结果^[21]。我国森林分布区横跨东西、纵贯南北, 森林类型多样, 分布范围广泛, 气候差异明显, 从热带到北温带, 从东部湿润区到西北半干旱和干旱区, 几乎涵盖了所有的母质和土壤类型, 这些因素驱动着土壤养分在不同土层、土壤类型、土壤风化程度、气候区、森林起源、森林结构、森林类型、林龄组和树种组之间的分布和差异。

自然界土壤中的磷元素, 主要来自成土母质的风化和动植物残体的归还, 其含量高低取决于母质类型、风化程度和淋失作用^[21]。本研究中, 我国森林土壤全磷密度随着土壤深度的增加先下降后上升 (图 1), 与先前“我国森林土壤全磷含量随着土壤深度的增加而显著下降”的结果^[12]不同, 导致这种差异的原因在于不同研究土壤层次划分不同。我国森林 40—60 cm 土层土壤全磷密度显著低于 0—20 cm 土层和 80—100 cm 土层土壤全磷密度 (图 1), 这是因为深层成土母质的风化作用释放了磷酸盐^[22]和地表植被凋落物通过分解作用归还了植物体中磷元素^[23—24], 补充了土壤深层和表层的磷含量。实际上, 成土母质风化程度高的土壤并不意味着土壤磷含量也高。例如, 我国森林分布区内重度风化的土壤类型和处于高级风化成土阶段的铁铝土土

纲,其土壤全磷密度较低(图1)。这与我国陆地生态系统土壤全磷密度在不同土壤风化程度和土壤类型的分布特征相似^[9-10],但不同于全球尺度的相应分布特征^[11]。我国铁铝土集中分布在我国南部及东南部的部分地区,其也是我国土壤重度风化程度中的主要土壤类型。这些分布区域常年高温多雨,有利于成土物质的彻底风化和植物繁茂生长;但反过来,成土母质风化过程中释放的磷酸盐离子和凋落物层分解过程中归还的磷元素,在湿润条件下易遭受降水的淋溶作用而流失^[25],以及被植物快速生长所吸收、利用与储存^[26],往往导致土壤磷含量降低。

表1 我国主要造林树种人工林土壤全磷密度在林分结构间的分布特征

Table 1 Distribution of soil total phosphorus density among stand structures in main afforestation species forests

树种 Species	结构 Structure	全磷密度 Total phosphorus density/(t/hm ²)		
		0—20 cm	20—40 cm	40—60 cm
杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	纯林	9.44±0.44 (8.51)	9.45±0.64 (8.04)	10.21±1.39 (7.59)
	混交林	8.36±0.56 (7.57)	8.80±0.88 (7.81)	5.52±0.76 (5.68)
	平均值	9.10±0.35 (8.19)	9.26±0.52 (7.89)	9.29±1.15 (7.54)
落叶松 <i>Larix</i> spp.	纯林	18.49±0.83 (14.88)	15.04±0.99 (13.74)	12.60±0.59 (12.58)
	混交林	18.65±1.65 (13.89)	9.73±1.23 (9.21)	6.19±1.15 (5.76)
	平均值	18.52±0.74 (14.88)	13.93±0.85 (13.12)	11.42±0.60 (12.03)
马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	纯林	9.13±0.93 (6.97)	10.62±1.59 (9.18)	16.80±6.24 (7.63)
	混交林	16.58±3.84 (8.96)	8.22±0.75 (8.36)	5.70±1.11 (4.82)
	平均值	11.15±1.26 (7.36)	9.55±0.95 (8.95)	11.25±3.41 (7.31)
杨树 <i>Populus</i> spp.	纯林	22.43±2.58 (18.35)	20.02±2.07 (15.35)	13.98±0.67 (13.64)
	混交林	21.96±1.37 (22.67)	7.60±2.18 (7.44)	10.63±2.76 (11.96)
	平均值	22.20±1.48 (20.59)	16.91±1.97 (13.68)	12.95±1.00 (12.67)
云南松 <i>Pinus yunnanensis</i>	纯林	7.47±1.49 (7.27)	7.04±1.48 (7.29)	5.45
	混交林	—	—	—
	平均值	7.47±1.49 (7.27)	7.04±1.48 (7.29)	5.45
桉树 <i>Eucalyptus</i> spp.	纯林	7.96±0.64 (7.84)	6.70±0.64 (6.78)	6.82±0.95 (6.21)
	混交林	9.21±0.82 (9.01)	9.66±1.21 (10.10)	5.90±0.49 (5.55)
	平均值	8.28±0.52 (8.09)	7.50±0.62 (6.95)	6.62±0.75 (5.88)
柏木 <i>Cupressus funebris</i>	纯林	17.21±5.91 (12.11)	28.94±11.82 (28.94)	17.82
	混交林	41.14	42.61	—
	平均值	21.20±6.26 (14.09)	33.50±8.21 (40.76)	17.82
油松 <i>Pinus tabulaeformis</i>	纯林	14.07±1.07 (12.31)	16.89±1.93 (12.19)	11.98±1.37 (12.24)
	混交林	13.48±1.21 (14.61)	14.82±1.91 (13.48)	14.41±1.67 (14.81)
	平均值	13.90±0.84 (12.46)	16.18±1.42 (12.67)	12.89±1.07 (12.56)
湿地松 <i>Pinus elliotii</i>	纯林	6.08±0.47 (5.75)	6.51±0.97 (5.20)	—
	混交林	6.87±0.98 (5.46)	8.28±1.39 (6.16)	—
	平均值	6.56±0.62 (5.75)	7.79±1.04 (6.16)	—
华山松 <i>Pinus armandii</i>	纯林	11.09±1.20 (9.89)	8.85±1.85 (6.96)	6.26±0.56 (6.26)
	混交林	15.65±4.48 (13.85)	14.48±4.04 (15.66)	10.33±5.20 (10.33)
	平均值	13.01±2.01 (9.89)	11.66±2.27 (8.12)	8.30±2.44 (6.26)
差异性(<i>P</i> 值)	纯林	<0.001	<0.001	0.0632
Difference (<i>P</i> -value)	混交林	<0.001	<0.001	<0.001
	树种	<0.001	<0.001	0.0095

表中数值为平均值±标准误,括号中数值为中位数,符号“—”表示无数值

气候特征是影响我国陆地生态系统土壤全磷密度^[10]和森林生态系统土壤全磷含量^[12]空间分布的主要因素。我国森林各土层土壤全磷密度随着纬度的增加而显著增加,但随着经度的增加而显著降低(除0—20 cm土层外)(图2),这与我国森林土壤全磷含量的空间分布特征保持一致^[12]。相似地,我国森林土壤全磷密

度从南部热带气候区到北部北温带气候区表现出明显下降的趋势(图2)。这些空间或气候分布模式可以归因于我国森林分布主要受亚洲季风环流和青藏高原隆起的地形影响,导致我国温度和降水量从低纬度热带地区到中高纬度温带地区逐渐减少。我国森林0—20 cm 土层土壤全磷密度随着经度的增加而显著增加(图2),这可能与我国森林分布的地理区位有关。我国东北部森林($>40^{\circ}\text{E}$, $>120^{\circ}\text{E}$)是我国森林分布的最东端和最北端,该地区气候特征是低温少雨,在此条件下,低温通过降低植物生长速率和减少土壤微生物活性等直接或间接促进土壤全磷含量的积累^[27-29]。

森林土壤养分特征与构成林分树种、森林起源、林龄组、森林类型和森林结构等植被因子也密切相关。总体来看,我国森林土壤全磷密度在森林起源间表现为人工林>天然林(图3),这与“全球尺度造林减少土壤全磷含量和储量”的结论^[30]不相符。一种解释是与造林树种组成有关。研究表明,阔叶树种造林后土壤有机质、全氮和全磷等养分恢复效果低于同一树种天然林或次生林^[31],而针叶树种造林后土壤全磷和速效钾等养分恢复效果优于同一树种天然林或次生林^[32]。这种解释被“相比于天然林,人工林(包括纯林和混交林)增强了土壤对磷的吸附作用,从而能够更快的恢复土壤供磷能力”的结论^[33]支持。我国造林以针叶树种为主^[20],可能是造成我国森林土壤全磷密度表现为人工林高于天然林的主要原因。另一个可能的原因是与土壤体积有关,人工林土壤有机质较低,容重较高^[31-32],进而计算的土壤磷密度也会偏高。需要注意的是,尽管本研究尽可能地排除施肥、火烧等干扰的影响,但人工林土壤全磷含量受造林初期施肥、火灾等的影响不可忽视(如调查或文献中未明确标注时)。例如,我国人工林幼龄林(13.76 t/hm^2)0—20 cm 土层土壤全磷密度明显高于天然林幼龄林(8.53 t/hm^2),中林龄和近熟林以及其他土层也发现类似结果(篇幅有限,数据未给出);其他研究也发现人工林生长早期和中期土壤全磷密度高于天然林生长早期和中期^[34],这些是导致我国森林土壤全磷密度表现为人工林高于天然林的重要原因。我国森林纯林土壤全磷密度显著高于混交林(图3),与meta分析“混交林土壤全磷含量高于纯林”的结论^[35]不完全一致。导致不同研究存在差异的原因还不甚清楚。实际上,不同树种土壤全磷密度在森林结构间的分布特征存在差异(表1)以及森林结构间土壤容重的差异^[35],可能与上述不同研究结果有关。我国主要造林树种间以及同一树种不同森林结构间(表1)和森林类型间(图3)土壤全磷密度的差异,与不同树种凋落物的分解速率差异有关。在气候环境相似条件中,凋落物分解过程中的养分释放是土壤养分高低的重要调控因子^[21]。先前研究表明,阔叶树或针阔混交林中混合凋落叶的分解速率和养分释放率高于针叶树^[23-24],使归还到土壤中的养分含量也随之增加。我国主要造林树种林下土壤全磷密度总体上表现混交林大于纯林(表1),说明种植混交林有利于土壤全磷养分的积累。此外,本研究中,我国森林表层(0—40 cm)土壤全磷密度在中龄林中最低值,过熟林中最高(图3)。这不同于先前的全国尺度研究结果^[34],但与少数森林生态系统(如马尾松和杉木人工林)土壤全磷含量随着林龄的增加先下降后上升的趋势一致^[13,36],由此说明延长森林轮伐期有利于全磷养分的归还和可持续利用。之所以我国森林表层土壤全磷密度随着林龄增加呈先下降后增加的趋势,一种可能的解释是,植被早期快速生长消耗了土壤中的大量磷,此时凋落物分解归还的磷未能完全弥补植物吸收消耗的磷,土壤磷含量下降;反之,随着晚期植被生长减缓,此时森林群落中积累了大量凋落物,其分解过程中释放的磷元素也在土壤中不断累积,土壤磷含量增加。我国森林40—60 cm 土层土壤全磷密度随着林龄的增加而下降(图3),其原因是晚期植被生长更易从深层土壤中吸收和利用磷元素^[34],同时植被生长过程中也会将深层土壤中磷元素通过根系吸收作用迁移至表层^[9],过熟林0—20 cm 土层土壤中全磷密度高于40—60 cm 土层。

值得注意的是,本研究中各种土壤、气候和植被类别间的数据分配不均,其对理解土壤全磷密度的分配特征以及变量间的交互效应存在一定的影响,因此,有必要进一步开展土壤、气候和植被类别间土壤全磷密度差异的系统调查与研究。

4 结论

(1)我国森林土壤全磷密度空间分布规律明显。从热带到北温带,土壤全磷密度逐渐减少,热带和亚热

带低纬度地区土壤磷缺乏,0—20 cm 土层土壤全磷密度在不同气候区差异更明显;从表层 0—20 cm 到深层 80—100 cm,土壤全磷密度先降低后增加,40—60 cm 土层是最低值,0—20 cm 土层比 40—60 cm 土层高 53%。

(2)我国森林 0—20 cm 和 20—40 cm 土层土壤全磷密度随着林龄的增加先降低后增加,近熟林中存在较低值;适当延长森林轮伐期,将有利于土壤全磷养分的归还和可持续利用。

(3)不同森林类型土壤全磷密度的特征,0—20 cm 土层针叶林小于阔叶林,20—40 cm 和 40—60 cm 土层针叶林大于阔叶林,0—60 cm 土层均为人工林>天然林和纯林>混交林。我国主要造林树种林下土壤全磷密度总体上表现混交林>纯林,种植混交林有利于土壤全磷养分的积累。

(4)土壤类型是影响我国森林土壤全磷密度的重要因素,重度风化土壤和铁铝土土纲的土壤全磷密度较低。

致谢:感谢湖北秭归三峡库区森林生态系统国家定位观测研究站对野外工作和室内分析的支持。

参考文献 (References):

- [1] Peñuelas J, Poulter B, Sardans J, Ciais P, van der Velde M, Bopp L, Boucher O, Godderis Y, Hinsinger P, Llusia J, Nardin E, Vicca S, Obersteiner M, Janssens I A. Human-induced nitrogen-phosphorus imbalances alter natural and managed ecosystems across the globe. *Nature Communications*, 2013, 4: 2934.
- [2] Reinhard C T, Planavsky N J, Gill B C, Ozaki K, Robbins L J, Lyons T W, Fischer W W, Wang C J, Cole D B, Konhauser K O. Evolution of the global phosphorus cycle. *Nature*, 2017, 541(7637): 386-389.
- [3] Wieder W R, Cleveland C C, Smith W K, Todd-Brown K. Future productivity and carbon storage limited by terrestrial nutrient availability. *Nature Geoscience*, 2015, 8(6): 441-444.
- [4] Jian Z J, Ni Y Y, Lei L, Xu J, Xiao W F, Zeng L X. Phosphorus is the key soil indicator controlling productivity in planted Masson pine forests across subtropical China. *Science of the Total Environment*, 2022, 822: 153525.
- [5] Vitousek P M, Porder S, Houlton B Z, Chadwick O A. Terrestrial phosphorus limitation: mechanisms, implications, and nitrogen-phosphorus interactions. *Ecological Applications*, 2010, 20(1): 5-15.
- [6] Lang F, Bauhus J, Frossard E, George E, Kaiser K, Kaupenjohann M, Krüger J, Matzner E, Polle A, Prietzel J, Rennenberg H, Wellbrock N. Phosphorus in forest ecosystems: new insights from an ecosystem nutrition perspective. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2016, 179(2): 129-135.
- [7] Du E Z, Terrer C, Pellegrini A F A, Ahlström A, van Lissa C J, Zhao X, Xia N, Wu X H, Jackson R B. Global patterns of terrestrial nitrogen and phosphorus limitation. *Nature Geoscience*, 2020, 13(3): 221-226.
- [8] Hou E Q, Luo Y Q, Kuang Y W, Chen C R, Lu X K, Jiang L F, Luo X Z, Wen D Z. Global meta-analysis shows pervasive phosphorus limitation of aboveground plant production in natural terrestrial ecosystems. *Nature Communications*, 2020, 11: 637.
- [9] Zhang C, Tian H Q, Liu J Y, Wang S Q, Liu M L, Pan S F, Shi X Z. Pools and distributions of soil phosphorus in China. *Global Biogeochemical Cycles*, 2005, 19(1): GB1020.
- [10] 汪涛, 杨元合, 马文红. 中国土壤磷库的大小、分布及其影响因素. *北京大学学报: 自然科学版*, 2008, 44(6): 945-952.
- [11] He X J, Augusto L, Goll D S, Ringeval B, Wang Y P, Helfenstein J, Huang Y Y, Yu K L, Wang Z Q, Yang Y C, Hou E Q. Global patterns and drivers of soil total phosphorus concentration. *Earth System Science Data*, 2021, 13(12): 5831-5846.
- [12] Zhu J, Wu A C, Zhou G Y. Spatial distribution patterns of soil total phosphorus influenced by climatic factors in China's forest ecosystems. *Scientific Reports*, 2021, 11: 5357.
- [13] Jian Z J, Lei L, Ni Y Y, Xu J, Xiao W F, Zeng L X. Soil clay is a key factor affecting soil phosphorus availability in the distribution area of Masson pine plantations across subtropical China. *Ecological Indicators*, 2022, 144: 109482.
- [14] Cai W X, He N P, Li M X, Xu L, Wang L Z, Zhu J H, Zeng N, Yan P, Si G X, Zhang X Q, Cen X Y, Yu G R, Sun O J. Carbon sequestration of Chinese forests from 2010 to 2060: spatiotemporal dynamics and its regulatory strategies. *Science Bulletin*, 2022, 67(8): 836-843.
- [15] Tian H L, Zhu J H, Jian Z J, Ou Q X, He X, Chen X Y, Li C Y, Li Q, Liu H Y, Huang G S, Xiao W F. The carbon neutral potential of forests in the Yangtze River economic belt of China. *Forests*, 2022, 13(5): 721.
- [16] 朱建华, 田宇, 李奇, 刘华妍, 郭学媛, 田惠玲, 刘常富, 肖文发. 中国森林生态系统碳汇现状与潜力. *生态学报*, 2023, 43(9):

3442-3457.

- [17] 简尊吉,倪妍妍,徐瑾,雷蕾,曾立雄,肖文发. 中国马尾松林土壤肥力特征. 生态学报, 2021, 41(13): 5279-5288.
- [18] 柴华,何念鹏. 中国土壤容重特征及其对区域碳储量估算的意义. 生态学报, 2016, 36(13): 3903-3910.
- [19] Shi X Z, Yu D S, Xu S X, Warner E D, Wang H J, Sun W X, Zhao Y C, Gong Z T. Cross-reference for relating Genetic Soil Classification of China with WRB at different scales. *Geoderma*, 2010, 155(3/4): 344-350.
- [20] 国家林业和草原局. 中国森林资源报告-2014-2018. 北京: 中国林业出版社, 2019.
- [21] Chapin III F S, Matson P A, Vitousek P. *Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology*. New York, USA: Springer Science & Business Media. 2011.
- [22] Porder S, Ramachandran S. The phosphorus concentration of common rocks—a potential driver of ecosystem P status. *Plant and Soil*, 2013, 367(1): 41-55.
- [23] Johnson D W, Turner J. Nutrient cycling in forests: a historical look and newer developments. *Forest Ecology and Management*, 2019, 444: 344-373.
- [24] Zeng L X, He W, Teng M J, Luo X, Yan Z G, Huang Z L, Zhou Z X, Wang P C, Xiao W F. Effects of mixed leaf litter from predominant afforestation tree species on decomposition rates in the Three Gorges Reservoir, China. *Science of the Total Environment*, 2018, 639: 679-686.
- [25] Hou E Q, Chen C R, Luo Y Q, Zhou G Y, Kuang Y W, Zhang Y G, Heenan M, Lu X K, Wen D Z. Effects of climate on soil phosphorus cycle and availability in natural terrestrial ecosystems. *Global Change Biology*, 2018, 24(8): 3344-3356.
- [26] Yu Z P, Wang M H, Huang Z Q, Lin T C, Vadeboncoeur M A, Searle E B, Chen H Y H. Temporal changes in soil C-N-P stoichiometry over the past 60 years across subtropical China. *Global Change Biology*, 2018, 24(3): 1308-1320.
- [27] Siebers N, Sumann M, Kaiser K, Amelung W. Climatic effects on phosphorus fractions of native and cultivated North American grassland soils. *Soil Science Society of America Journal*, 2017, 81(2): 299-309.
- [28] 唐立涛,刘丹,罗雪萍,胡雷,王长庭. 青海省森林土壤磷储量及其分布格局. 植物生态学报, 2019, 43(12): 1091-1103.
- [29] Mou X M, Wu Y N, Niu Z Q, Jia B, Guan Z H, Chen J, Li H, Cui H Y, Kuzyakov Y, Li X G. Soil phosphorus accumulation changes with decreasing temperature along a 2300 m altitude gradient. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2020, 301: 107050.
- [30] Deng Q, McMahon D E, Xiang Y Z, Yu C L, Jackson R B, Hui D F. A global meta-analysis of soil phosphorus dynamics after afforestation. *New Phytologist*, 2017, 213(1): 181-192.
- [31] 彭舜磊,陈昌东,李磊,廖秉华,赵干卿. 宝天曼自然保护区栓皮栎林人工恢复与天然恢复效果比较. 水土保持研究, 2016, 23(6): 265-270.
- [32] 杨媛媛,陈奇伯,黎建强,刘佩琪,李霁航,王红. 滇中高原不同起源华山松林地土壤质量分析. 土壤通报, 2017, 48(2): 263-269.
- [33] 李海瑜,杨振景,王树力. 水曲柳人工林与天然林间土壤磷吸附解吸特性差异. 东北林业大学学报, 2021, 49(3): 93-98.
- [34] Yu Z, Zhou G Y, Liu L, Manzoni S, Ciais P, Goll D, Peñuelas J, Sardans J, Wang W T, Zhu J, Li L, Yan J H, Liu J X, Tang X L. Natural forests promote phosphorus retention in soil. *Global Change Biology*, 2022, 28(4): 1678-1689.
- [35] Chen X L, Chen H Y H, Chang S X. Meta-analysis shows that plant mixtures increase soil phosphorus availability and plant productivity in diverse ecosystems. *Nature Ecology & Evolution*, 2022, 6(8): 1112-1121.
- [36] Wu H L, Xiang W H, Chen L, Ouyang S, Xiao W F, Li S G, Forrester D I, Lei P F, Zeng Y L, Deng X W, Zeng L X, Kuzyakov Y. Soil phosphorus bioavailability and recycling increased with stand age in Chinese fir plantations. *Ecosystems*, 2020, 23(5): 973-988.