

DOI: 10.5846/stxb202007021716

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.

Jian Z J, Ni Y Y, Xu J, Lei L, Zeng L X, Xiao W F. Soil fertility in the *Pinus massoniana* forests of China. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(13): 5279-5288.

中国马尾松林土壤肥力特征

简尊吉¹, 倪妍妍¹, 徐瑾¹, 雷蕾^{1,2}, 曾立雄^{1,2}, 肖文发^{1,2,*}

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

2 南京林业大学南方现代林业协同创新中心, 南京 210037

摘要: 土壤肥力是各因素的综合作用和反映, 也是林地生产力的基础。为了解马尾松分布区林下土壤肥力状况, 利用 499 条文献数据、134 条历史调查数据和 131 条当前调查数据中 0—20 cm 和 20—40 cm 土层的 pH 值、有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷和速效钾, 根据全国第二次土壤普查养分分级标准和内梅罗指数法分别对土壤养分单一指标丰瘠水平和综合肥力状况进行评估, 并分析马尾松天然林与人工林和纯林与混交林间土壤肥力特征的差异, 为马尾松林可持续经营和生产力提高提供科学依据。结果表明: (1) 0—20 cm 和 20—40 cm 土层土壤 pH 值、有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷、速效钾的平均值分别为 4.79 和 4.91、33.78 g/kg 和 19.92 g/kg、1.82 g/kg 和 1.32 g/kg、0.46 g/kg 和 0.40 g/kg、14.49 g/kg 和 15.71 g/kg、88.00 mg/kg 和 59.41 mg/kg、4.94 mg/kg 和 2.38 mg/kg、71.72 mg/kg 和 52.99 mg/kg; (2) 除土壤有机质、全氮和全钾含量外, 两个土层其他土壤养分指标的丰瘠水平在“较缺”水平及其以下; (3) 0—20 cm 土层土壤肥力指数(0.97) 大于 20—40 cm 土层(0.77), 土壤有效磷含量的肥力指数均最小(0.60 和 0.33); (4) 除 20—40 cm 土层 pH 值、碱解氮和速效钾含量外, 其他土壤养分指标和肥力指数均表现为混交林>纯林; 这些指标在天然林与人工林间的差异因指标而异。总体来看, 马尾松林土壤磷和钾养分的供给潜力和能力较弱, 土壤综合肥力状况也偏“贫瘠”, 其中土壤有效磷含量最低, 肥力指数也最小; 0—20 cm 土层的土壤肥力状况优于 20—40 cm 土层, 均受林分起源(天然林与人工林)和林分结构(纯林与混交林)的影响; 但由于指标缺乏(如物理指标)和数据分布不均衡(天然林和混交林少), 土壤肥力的估算以及林分特征对土壤养分和肥力的影响还有待于进一步研究。

关键词: 马尾松; 区域尺度; 养分丰瘠程度; 肥力指数; 磷缺乏

Soil fertility in the *Pinus massoniana* forests of China

JIAN Zunji¹, NI Yanyan¹, XU Jin¹, LEI Lei^{1,2}, ZENG Lixiong^{1,2}, XIAO Wenfa^{1,2,*}

1 Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, 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 fertility is not only the comprehensive function and reflection of various soil properties but also the ability of soil to sustain plant growth and develop forest productivity. Hence, evaluation of soil fertility is of great meaning to improve the forest management. However, soil fertility at regional scale is still poor understood. In this study, soil fertility in the *Pinus massoniana* forests, which were widely distributed in subtropical China, was taken as the research object. The pH value and nutrient contents at soil depth of 0—20 cm and 20—40 cm were collected from 499 published data, 134 historical data and 131 current data. Based on the national nutrient classification standard of the second soil census and the Nemer index, the abundant-poor level of soil nutrient indicators and the status of soil fertility index were evaluated, respectively. The differences of soil fertility between natural forests and planted forests and between pure forests and mixed forests were also analyzed. The study will provide scientific basis for sustainable management and improved productivity of *P. massoniana*

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFD0600201); 国家科技基础性工作专项(2014FY120700)

收稿日期: 2020-07-02; **网络出版日期:** 2021-04-27

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

forests. Across subtropical China, the average values of pH, soil organic matter (SOM), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), total potassium (TK), alkali-hydrolyzable nitrogen (AN), available phosphorus (AP) and available potassium (AK) at soil depth of 0—20 cm and 20—40 cm were 4.79 and 4.91, 33.78 and 19.92 g/kg, 1.82 and 1.32 g/kg, 0.46 and 0.40 g/kg, 14.49 and 15.71 g/kg, 88.00 and 59.41 mg/kg, 4.94 and 2.38 mg/kg, and 71.72 and 52.99 mg/kg, respectively. Except for SOM, TN and TK, the abundant-poor levels of other soil nutrient indicators in two soil layers were at and/or below “relative deficiency” level. The soil fertility index of 0—20 cm (0.97) was greater than that of 20—40 cm (0.77), and the fertility indexes of soil AP content in these two soil layers were the lowest value (0.60 and 0.33, respectively). Except for soil pH value, AN and AK content of 20—40 cm, other indicators and fertility index were characterized by the mixed forests > pure forests, and the differences of these indicators between the natural forest and the planted forest varied with the indicators. In conclusion, the supply potential and capacity of soil phosphorus and potassium elements of *P. massoniana* forests were weak and soil fertility was also close to “poor” level, in which the content and fertility index of soil AP were the lowest value. The soil nutrient and fertility status of 0—20 cm were better than those of 20—40 cm, and these indicators were affected by stand origin (natural versus planted) and stand structure (pure versus mixed). However, due to the lacking indicators (i.e. physical indicator) and uneven data (less data of natural and mixed forests), the evaluation of soil fertility and the influences of stand characteristics on soil nutrient and fertility status need to be further studied.

Key Words: *Pinus massoniana*; regional scale; abundant-poor level of nutrients; fertility index; phosphorus deficiency

土壤肥力是土壤物理、化学和生物性质的综合作用和反映,是土壤的基本属性和本质特征,是衡量土壤质量的有效手段,也是林地生产力的基础^[1-2]。土壤肥力高低显著影响植被生长和分布、群落组成和结构及生产力水平,反过来植被的生长及分布等会影响土壤养分的分布及循环^[3-5]。土壤肥力主要体现在土壤有机质、氮、磷、钾等指标,以及影响这些养分指标的土壤变量(如 pH)^[1]。目前,客观评价土壤综合肥力状况主要采用相关分析法^[6]、灰色关联度法^[7]、主成分法^[8-9]、内梅罗指数法^[10-12]等。不同评价方法采用的数学方法、评价侧重点和指标选取不同,其表征的平均结果反映的意义也有所不同^[6]。其中,内梅罗指数法主要考虑的是指标最小值对土壤肥力的限制性,反映了植物生长最小因子定律,能更好地指导土壤的改良和利用^[1]。另外,参照全国第二次土壤普查分级标准,可以将土壤养分含量分为不同等级,从而直观地分析土壤养分概况^[10-13]。因此,两者结合对土壤肥力进行评价,能够更好地反映土壤肥力状况,有利于森林土壤养分的科学经营和管理^[2,6]。

马尾松(*Pinus massoniana*)是我国重要用材树种和亚热带地区荒坡造林的主要先锋树种之一,其面积约为 0.08 亿 hm^2 , 占我国森林总面积(2.2 亿 hm^2)的 3.6%^[14], 同时在保持水土、涵养水源、维持区域生态平衡等方面发挥巨大作用。然而,我国马尾松林的净初级生产力仅为 $5.65 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ^[15], 如何维持或提高生产力是马尾松林管理面临的主要挑战。土壤肥力显著影响马尾松林生物量和生产力^[15], 但目前关于马尾松林(尤其是人工林)土壤肥力特征及其与经营活动的关系等现有的研究结论各有不同^[6-7, 16-19]。研究结论的不同,主要源于林分尺度的研究,以及林分起源、林分组成和结构特征的差异,特别是林分组成、林下植被种类、凋落物、根分泌物、林木选择性吸收和元素归还速率等的差异会导致林分土壤养分贮量及有效性不同^[16, 20]。但是,在马尾松树种的分布区尺度,即便是过去传统的南带、中等、北带^[21]这一“带”的尺度上,关于马尾松林下土壤肥力总体特征的系统调查研究报道很少;在马尾松树种分布区尺度看马尾松人工林与天然林及纯林与混交林间肥力差异的研究也鲜见报道。这就难以科学综合评估我国马尾松林的生产力及其限制因素和可持续发展潜力。因此,在树种分布区尺度对我国马尾松林的总体土壤肥力特征及其与林分特征的关系进行评价分析,具有重要的科学价值和现实意义。

本研究通过对我国马尾松分布区不同土层土壤 pH 和养分含量的调查和测定,以全国第二次土壤普查养

分分级标准为依据,在树种分布尺度,分析马尾松林单个土壤养分指标的丰瘠水平;根据内梅罗肥力指数,评估土壤综合肥力状况;同时分析人工林与天然林、纯林与混交林间土壤养分含量和肥力指数的差异,旨在揭示马尾松林的总体土壤肥力状况,为探索我国马尾松林生产力的形成、维持与提高的路径提供科学依据和指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

马尾松分布区域主要位于秦岭—淮河以南、四川盆地以东、雷州半岛以北^[21],地理范围为 21.85°N—33.50°N, 102.00°E—122.00°E,海拔 1500 m 以下,包括我国南方地区的 14 个省市自治区,即广西、江西、湖北、湖南、贵州、福建、重庆、浙江、广东、四川、安徽、陕西、河南、江苏。该区域属于亚热带季风气候区,受来自太平洋东南季风和印度洋西南季风的影响,1980—2012 年间的年平均气温 8.9—27.5℃,年平均降水量 755—2500 mm,雨热同期,但降水季节分配不均,夏季降水多。该区域地带性植被在 20 世纪中叶大都遭到人为破坏,现存植被以次生常绿阔叶—落叶混交林或人工纯林及混交林为主,其中,马尾松天然林面积 552.38 万 hm²,主要为次生萌发或飞籽成林的混交林;马尾松人工林面积 251.38 万 hm²,多为人工栽植或飞播而形成的纯林^[14]。根据中国土壤分类系统,该区域马尾松林下常见土壤类型是红壤和黄壤^[21]。

1.2 数据获取

1.2.1 文献数据

通过文献检索发现,1990 年前涉及马尾松林下土壤养分指标的文献较少,相关数据(如地理位置、林分、土壤等信息)不完整。因此,本研究仅利用 1990—2019 年已出版的马尾松林下 0—40 cm 土壤数据建立文献数据库,土壤指标包括:有机碳或有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷、速效钾、pH 值。测定方法是:有机碳或有机质由重铬酸钾法测定,全氮和碱解氮分别由凯氏定氮法和碱解扩散法测定,全磷和有效磷分别由碱溶和双酸浸提—钼锑抗比色法测定,全钾和速效钾分别由碱溶和乙酸铵浸提—火焰光度计法测定,pH 值 1:2.5(V:V)的水浸—电位法测定。通过中国知网数据库(<http://www.cnki.net/>)和 ISI Web of Science 数据库(<http://apps.webofknowledge.com>)分别对 1990—2019 年的中文和英文文献进行检索,检索关键词为“马尾松(*Pinus massoniana*)”和“土壤碳/氮/磷/钾(soil carbon/nitrogen/phosphorus/potassium)”。采用以下标准进行文献筛选:(1)马尾松年龄(主要是人工林)在 5 年以上;(2)林下土壤未受施肥、火烧和其他污染的影响,如果有类似试验,仅对对照样地的数据被引用;(3)文献至少包括 2 个土壤养分指标;(4)有具体的样地位置或地理坐标。对于每一篇文献,收集样地的地理位置(纬度、经度和海拔)、林分特征(起源、结构和年龄)、土壤类型、土壤 pH 和养分含量数据。当仅有土壤有机碳数据时,土壤有机质以土壤有机碳×1.724 进行估算。所有的数据主要从表格或文本中收集,当所需的数据在图中时,利用 GetData 软件(<http://getdata-graph-difitizer.com>)进行提取。因此,文献数据库包括 210 篇文章中 498 个调查样地。

1.2.2 调查数据

(1)历史调查数据 利用全国森林土壤调查数据中与马尾松有关的 0—40 cm 土壤数据建立历史数据库,土壤指标包括:有机质、全氮、全磷、全钾和 pH 值。测定方法是:有机质含量由重铬酸钾法测定,全氮由凯氏定氮法测定,全磷和全钾由硝酸+高氯酸+氢氟酸混合溶液消解—等离子发射光谱仪(IRIS Intrepid II XSP, Thermo Fisher Scientific, USA)测定,pH 值由 1:2.5(体积分数)的水浸—电位法(HI2221, Hanna, Italy)测定。土壤有机质以土壤有机碳×1.724 进行估算。历史数据库包括 134 个调查样地,样地大小为 100 m²或 400 m²。调查时间为 2012 年 1 月—2018 年 4 月。

(2)当前调查数据 利用区域马尾松林调查数据中 0—40 cm 土壤数据建立当前数据库,土壤指标包括:有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷、速效钾和 pH 值。测定方法是:有机碳和全氮含量采用干烧法—元素分析仪(Euro EA, Hekatech Gabh, Germany)测定,全磷和全钾含量采用硝酸+高氯酸+氢氟酸混合溶液消解—等离子发射光谱仪测定,速效氮含量采用碱解扩散法测定,有效磷含量采用双酸浸提—连续流动分析仪

(Analytical AA3 Auto Analyzer, SEAL, Germany)测定,速效钾含量采用乙酸铵浸提—等离子发射光谱仪测定,pH 值由 1:2.5(V:V)的水浸—电位法测定。土壤有机质以土壤有机碳 $\times 1.724$ 进行估算。当前数据库包括 131 个调查样地,样地大小为 600 m²。调查时间为 2018 年 8 月—2019 年 5 月。

1.3 数据处理

1.3.1 土壤养分含量丰瘠水平

结合全国第二次土壤普查养分分级标准^[1,10-13]对马尾松林下土壤有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷和速效钾含量的平均值进行单一指标丰瘠水平评价。该分级标准将土壤养分含量分为 6 个水平:丰富、较丰富、中等、较缺、缺和极缺,其已在土壤养分含量丰瘠水平评价中被广泛应用^[10-12]。

1.3.2 内梅罗肥力指数

采用修正的内梅罗指数法^[1]对马尾松林土壤肥力进行综合评价,此方法已在土壤肥力评价的研究中被广泛应用^[1,6,10-12]。土壤肥力综合评价应尽量多地考虑与肥力有关的土壤指标^[1],参考其他研究结果^[10-12],本研究选择指标包括 pH 值、有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷和速效钾。为了便于比较分析,仅包含这 8 个土壤指标的研究样地被应用于内梅罗肥力指数计算。为了消除土壤指标量纲和单位的影响,本研究根据全国第二次土壤普查养分分级标准^[1,10-13]划定了内梅罗评定方法中土壤指标分级标准(表 1),对不同土壤养分指标进行标准化(或分肥力指数计算)。土壤养分指标标准化和内梅罗综合肥力指数计算公式参考文献^[1,10-12]。当肥力指数 ≥ 2.7 ,说明土壤很肥沃;当 $2.7 >$ 肥力指数 ≥ 1.8 ,说明土壤肥沃;当 $1.8 >$ 肥力指数 ≥ 0.9 ,说明土壤肥力中等;当肥力指数 < 0.9 ,说明土壤贫瘠^[1]。

表 1 内梅罗指数法中土壤指标的分级标准值

Table 1 Grading standards for various soil indicators in the Nemorow index

土壤指标 Soil indicator	分级值 Grading value			土壤指标 Soil indicator	分级值 Grading value		
	X_a	X_c	X_p		X_a	X_c	X_p
pH (≤ 7.0)	4.5	5.5	6.5	全钾 TK/(g/kg)	10	15	20
有机质 SOM/(g/kg)	10	20	30	碱解氮 AN/(mg/kg)	60	90	120
全氮 TN/(g/kg)	0.75	1	1.5	有效磷 AP/(mg/kg)	5	10	20
全磷 TP/(g/kg)	0.4	0.6	0.8	速效钾 AK/(mg/kg)	50	100	150

X_a 、 X_c 、 X_p 分别为土壤养分指标标准化中第三级、第二级和第一级分级的阈值^[1,10-13];SOM: 有机质 Soil organic matter; TN: 全氮 Total nitrogen; TP: 全磷 Total phosphorus; TK: 全钾 Total potassium; AN: 碱解氮 Alkali-hydrolyzable nitrogen; AP: 有效磷 Available phosphorus; AK: 速效钾 Available potassium

1.4 统计分析

利用 Excel 2003 对数据进行整理和计算。采用 SPSS 19.0 对数据进行统计分析。由于数据库中土壤指标(如有机质、全氮、全磷和全钾)测定方法不同(两类测定方法),且两组独立数据不服从正态分布(Kolmogorov-Smirnov 检验, $P < 0.05$),利用 Mann-Whitney U 检验的结果表明,同一指标两组独立数据间差异不显著($P > 0.05$),因此,数据库中的所有土壤数据可以合并一起来进行统计分析。利用 Mann-Whitney U 检验进行土壤养分指标和肥力指数在 0—20 cm 土层与 20—40 cm 土层、人工林与天然林、纯林与混交林间的差异性分析。应用 Origin 9.0 进行作图。图表中数据为均值 \pm 标准误。

2 结果与分析

2.1 土壤 pH 和养分含量及其丰瘠水平

由表 2 可知,马尾松林下 0—20 cm 土层土壤 pH 值、有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷和速效钾含量的平均值分别为 4.79、33.78 g/kg、1.82 g/kg、0.46 g/kg、14.49 g/kg、88.00 mg/kg、4.94 mg/kg 和 71.72 mg/kg,变异系数依次为 16.33%、72.20%、122.22%、143.26%、85.64%、65.87%、190.61% 和 116.18%;20—40 cm 土层土壤 pH 值、有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷和速效钾含量的平均值分别为 4.91、19.92 g/kg、1.32 g/kg、

0.40 g/kg、15.71 g/kg、59.41 mg/kg、2.38 mg/kg 和 52.99 mg/kg, 变异系数依次为 15.37%、82.73%、133.79%、142.10%、70.85%、83.13%、234.52%、88.69%。除土壤 pH 值和全钾含量外,其他各土壤养分指标均表现为 0—20 cm 土层>20—40 cm 土层,其中 0—20 cm 土层土壤有机质和有效磷含量是 20—40 cm 土层的 1.7 倍和 2.1 倍。除全磷含量外,土壤 pH 值和养分指标在土层间差异显著($P<0.05$)(表 2)。土壤 pH 值的变异系数最小,有效磷含量的变异系数最高。

从表 2 也可以看出,马尾松林 0—20 cm 土层和 20—40 cm 土层土壤有机质含量分别处于“较丰富”和“较缺”水平,全氮含量分别处于“较丰富”和“中等”水平,全磷和速效钾含量均处于“较缺”水平,全钾含量分别处于“较缺”和“中等”水平,碱解氮含量分别处于“较缺”和“缺”水平,有效磷含量分别处于“缺”和“极缺”水平。

表 2 马尾松林不同土层土壤养分描述性统计特征

Table 2 Descriptive statistical characteristics of soil nutrients in different soil layers of *Pinus massoniana* forests

土层 Soil layer	项目 Project	pH	有机质 SOM/ (g/kg)	全氮 TN/ (g/kg)	全磷 TP/ (g/kg)	全钾 TK/ (g/kg)	碱解氮 AN/ (mg/kg)	有效磷 AP/ (mg/kg)	速效钾 AK/ (mg/kg)
0—20 cm	样地数	611	725	719	635	477	432	481	455
	平均值	4.79	33.78	1.82	0.46	14.49	88.00	4.94	71.72
	中位数	4.61	28.45	1.30	0.32	12.61	77.31	2.25	56.10
	标准差	0.78	24.39	2.23	0.65	12.41	57.96	9.42	83.33
	标准误	0.03	0.91	0.08	0.03	0.57	2.79	0.43	3.91
	最小值	3.52	0.55	0.05	0.03	0.13	0.08	0.02	0.32
	最大值	8.34	154.20	25.00	9.73	147.89	575.42	78.65	929.40
	变异系数/%	16.33	72.20	122.22	143.26	85.64	65.87	190.61	116.18
	丰瘠水平	—	较丰富	较丰富	较缺	较缺	较缺	缺	较缺
20—40 cm	样地数	344	413	405	377	311	279	287	287
	平均值	4.91	19.92	1.32	0.40	15.71	59.41	2.38	52.99
	中位数	4.77	15.84	0.83	0.32	13.82	49.00	1.19	43.25
	标准差	0.75	16.48	1.76	0.57	11.13	49.38	5.59	47.00
	标准误	0.04	0.81	0.09	0.03	0.63	2.96	0.33	2.77
	最小值	3.59	0.98	0.05	0.02	0.35	0.06	0.05	0.50
	最大值	8.25	148.02	13.92	9.00	105.31	452.43	75.18	440.30
	变异系数/%	15.37	82.73	133.79	142.10	70.85	83.13	234.52	88.69
	丰瘠水平	—	较缺	中等	较缺	中等	缺	极缺	较缺
差异性	0.002	<0.001	<0.001	0.090	0.029	<0.001	<0.001	<0.001	

2.2 土壤肥力指数

由表 3 可知,马尾松林下 0—20 cm 土层土壤肥力指数(0.97)高于 20—40 cm 土层(0.77),0—20 cm 土层土壤肥力状况属于“中等”,20—40 cm 土层属于“贫瘠”。0—20 cm 土层和 20—40 cm 土层各土壤指标肥力大小顺序分别为:有机质>全氮>碱解氮>全钾>pH>速效钾>全磷>有效磷,有机质>全钾>全氮>pH>碱解氮>速效钾>全磷>有效磷。除土壤 pH 值和全钾外,其他各土壤养分指标的分肥力指数均表现为 0—20 cm 土层>20—40 cm 土层,其中 0—20 cm 土层土壤有效磷分肥力指数(0.60)是 20—40 cm 土层(0.33)的 1.8 倍,在两土层中均最小。

表 3 马尾松林不同土层土壤肥力指数评价

Table 3 Evaluation of soil fertility index in different soil layers of *Pinus massoniana* forests

土层/cm Soil layer	样地数 No. of plot	土壤指标标准化值 Normalized value of soil indicator								肥力指数 Fertility index	
		pH	有机质 SOM	全氮 TN	全磷 TP	全钾 TK	碱解氮 AN	有效磷 AP	速效钾 AK	值 Value	评价 Evaluation
0—20	228	1.38	2.42	2.20	0.99	1.51	1.77	0.60	1.23	0.97	中等
20—40	177	1.46	1.77	1.61	0.82	1.66	1.08	0.33	1.04	0.77	贫瘠

2.3 土壤养分含量和肥力指数在人工林与天然林和纯林与混交林间的差异

由图 1 可知,马尾松天然林 0—20 cm 土层有机质 ($P<0.001$) 和全氮 ($P<0.05$) 含量,0—20 cm 土层和 20—40 cm 土层全钾含量 ($P<0.001$) 均显著高于马尾松人工林,0—20 cm 土层和 20—40 cm 土层全磷含量 ($P<0.001$) 均显著低于马尾松人工林。其他土层各指标在人工林与天然林间无显著差异,除 20—40 cm 土层有机质及 0—20 cm 土层和 20—40 cm 土层有效磷含量外,总体上表现为人工林>天然林。

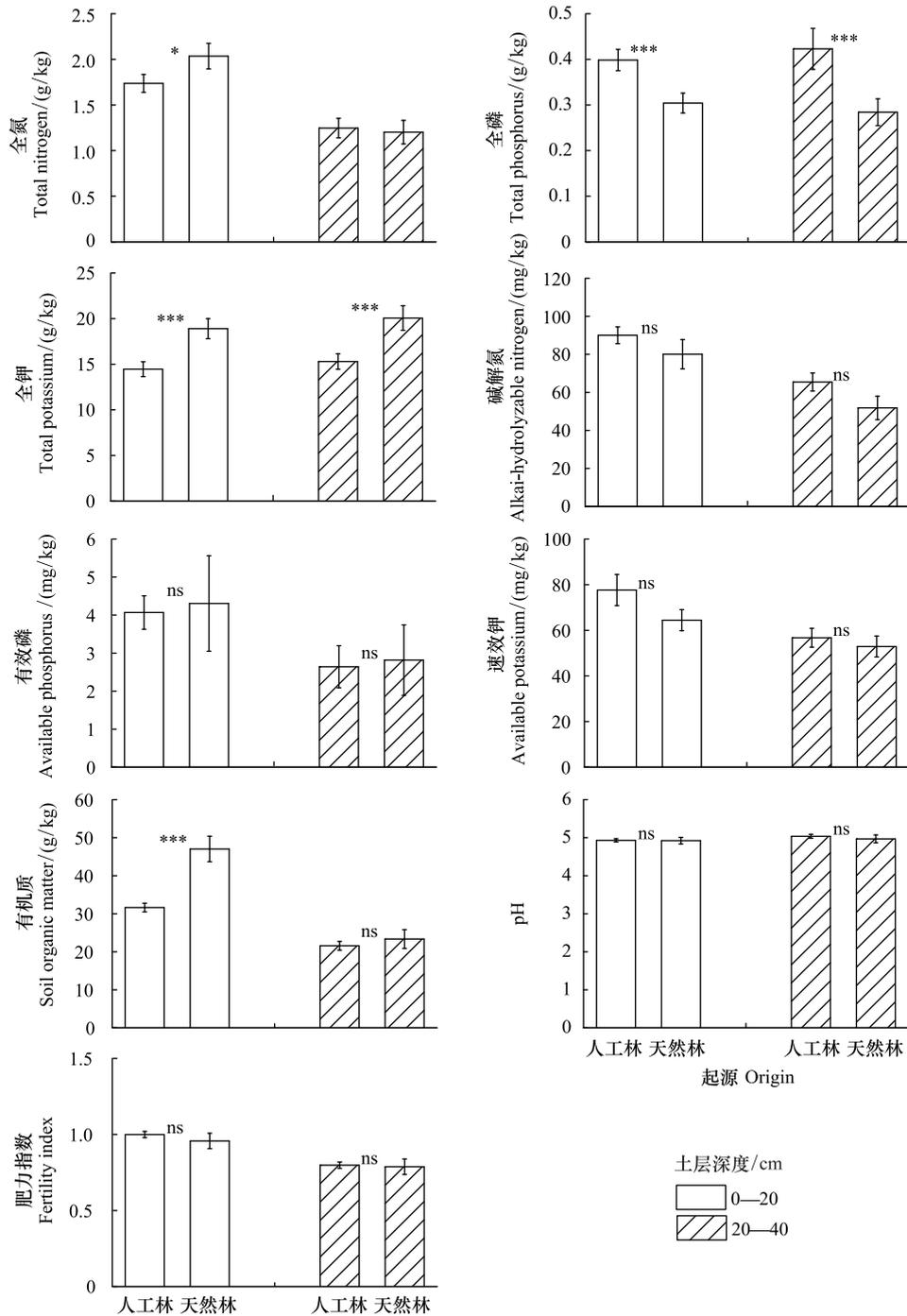


图 1 土壤养分含量和肥力指数在人工林与天然林间的差异

Fig.1 Differences of soil nutrient contents and fertility index between planted forests and natural forests

ns: 不显著, no significant, *、** 和 *** 分别表示在 0.05、0.01 和 0.001 水平下显著

由图 2 可知,马尾松混交林 0—20 cm 土层有机质($P<0.001$)、全氮($P<0.01$)、全钾($P<0.05$) 含量和肥力指数($P<0.05$), 0—20 cm 土层和 20—40 cm 土层有效磷含量($P<0.001$) 均显著高于马尾松纯林, 20—40 cm 土层速效钾含量($P<0.05$) 和 pH 值($P<0.001$) 均显著低于马尾松纯林。其他土层各指标在纯林与混交林间无显著差异,除 20—40 cm 土层碱解氮含量外,总体上表现为混交林>纯林。

3 讨论

3.1 马尾松林土壤肥力特征分析

土壤的形成与发育是母质、生物、气候、地形、时间等多种因素共同作用的结果^[22]。马尾松分布区地理跨度大、南北气候差异明显,土壤和母质类型多样化^[21];马尾松林下植被物种多样性^[23]以及马尾松林年凋落量^[24]和凋落物分解率^[25]的空间变异性较大。这些因素驱动着土壤养分空间变化。本研究中,土壤养分指标均具有较高的空间变异性(变异系数 65%—235%),其中有效磷含量最高(表 2)。其他研究也有类似结果^[11-12,26]。这可能是因为在酸性土壤中,有效磷易与活性铝、铁、磷酸钙形成磷酸铝铁而沉淀;也因在强酸性土壤中大量的三氧化二铁存在,易形成胶膜包被在磷肥的表面而形成闭蓄态磷^[26]。马尾松林下 0—20 cm 土层和 20—40 cm 土层土壤 pH 值与有效磷含量显著正相关($r=0.248$ 和 0.173 , $P<0.01$)间接证实了上述机制。

土壤既是植物生长发育的载体,也为植物生长发育提供营养来源。土壤有机质、全氮、全磷和全钾等含量体现了土壤养分供给的潜力,碱解氮、有效磷和速效钾等含量体现了土壤供给的能力^[22]。根据全国第二次土壤普查标准,马尾松林土壤养分指标的丰瘠水平因土层而异,其中土壤有效养分指标的丰瘠水平均在“较缺”水平及其以下(表 2),说明马尾松林土壤速效养分(尤其是磷和钾)供给能力较弱。研究区域和生态系统的不同,导致土壤养分单一指标的丰瘠水平不尽相同,但均发现土壤全磷含量处于“较缺”水平及其以下^[10-12]。马尾松林 0—20 cm 土层和 20—40 cm 土层土壤全磷含量也处于“较缺”水平(表 2)。土壤磷主要源于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、风化和淋失程度^[22]。亚热带地区温暖的气候条件加快了土壤母质的风化及磷元素的解吸,而强降水量却加速了土壤磷的淋溶^[27-30],且亚热带地区磷流失量高于全国平均值^[31],因此土壤磷流失严重。另外,我国南方土壤中磷元素与粘土矿物之间的化学作用使得磷元素更易与土壤中的金属元素紧密结合,形成难以被植物利用的难溶性磷^[26,32],导致马尾松林 0—20 cm 土层和 20—40 cm 土层有效磷含量仅分别为 4.49 mg/kg 和 2.38 mg/kg,分别处于“缺”和“极缺”水平(表 2)。因此,马尾松林严重缺磷。

土壤肥力是反映养分效应及森林系统生产力的综合指标^[12],通过内梅罗指数法计算的土壤肥力指数,既反映了限制植物生长最小因子定律,又综合考虑了各指标^[1,10-12]。马尾松林下 0—20 cm 土层和 20—40 cm 土层土壤肥力指数分别为 0.97 和 0.77(表 3),总体来看,土壤综合肥力状况偏“贫瘠”。土壤有效磷含量的肥力指数也最小(表 3),表明土壤有效磷含量高低是马尾松林土壤肥力高低的主要影响因子。然而,本研究仅通过数个土壤化学指标来计算土壤肥力指数,缺乏土壤物理和生物指标;同时,满足土壤肥力指数计算所需指标的样地较少且空间分布不均匀,这些导致本研究中的土壤肥力指数仅在一定程度上代表马尾松林土壤肥力状况。

3.2 土壤深度对马尾松林土壤肥力特征的影响

本研究中,除土壤 pH 和全钾含量外,其他各土壤养分指标和肥力指数均表现为 0—20 cm 土层>20—40 cm 土层(表 2 和表 3),且大多数指标在土层间差异显著($P<0.05$),表明土壤深度显著影响土壤肥力状况。土壤养分往往具有“表聚性”^[8,12,33-34]。表层土是土壤动物和微生物最活跃的土壤层次,是进行植物—凋落物—土壤养分内循环的主要场所^[22]。土壤养分元素被植物体(主要是根和叶)所吸收,通过凋落物分解和根系周转等过程归还土壤,造成表层土壤养分(尤其是速效养分)含量往往更高^[35-36],这在本研究中也证实(表 2)。有研究表明,马尾松细根(<2 mm)主要分布在表层土(0—30 cm)^[37],其周转可以改善土壤理化性质^[36]。然而,不管是林分尺度还是区域尺度,马尾松林深层(40 cm 以下)土壤肥力特征还知之甚少。另外,马尾松分

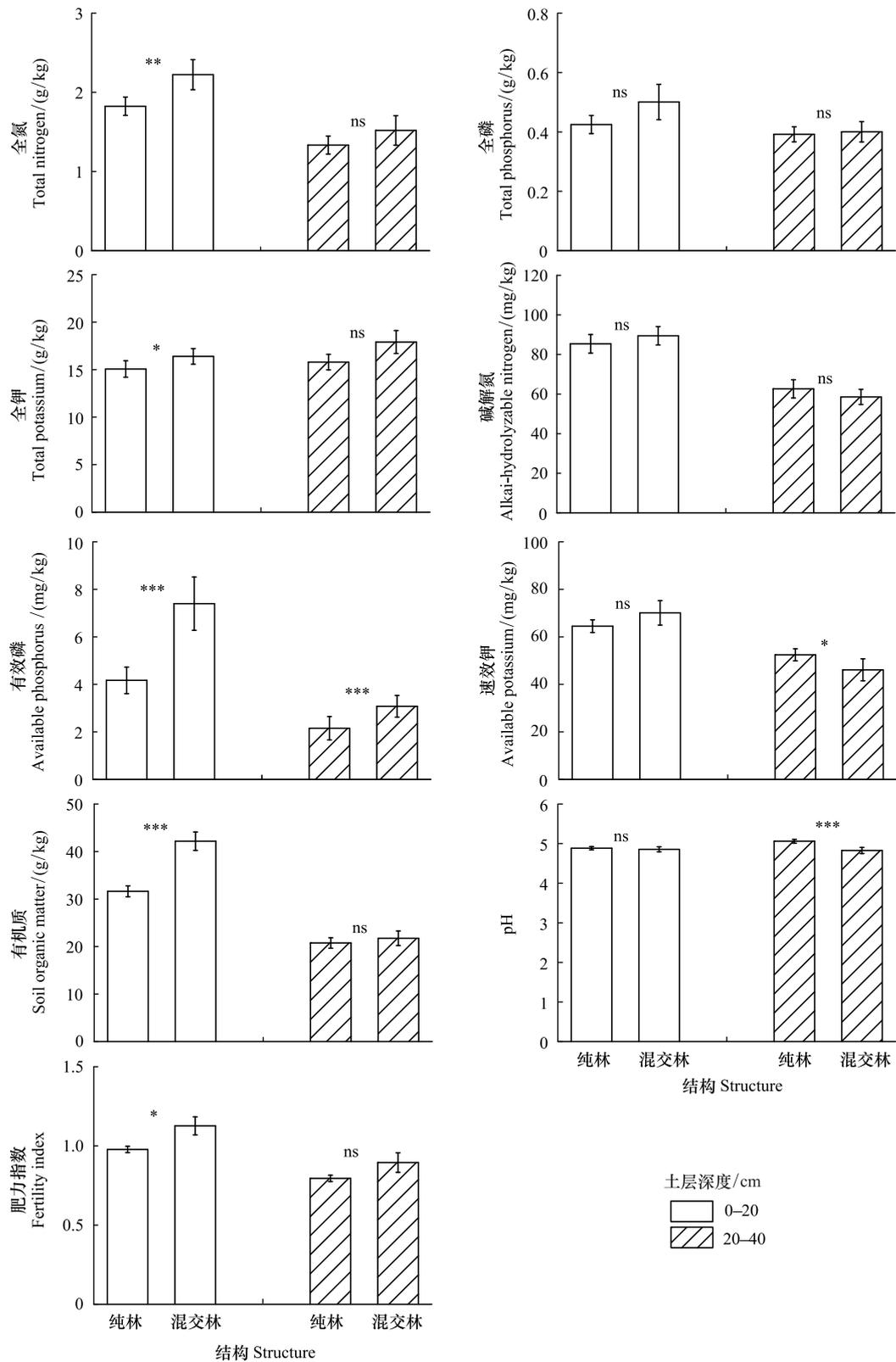


图 2 土壤养分含量和肥力指数在纯林与混交林间的差异

Fig.2 Differences of soil nutrient contents and fertility index between pure forests and mixed forests

ns: 不显著, no significant, *, ** 和 *** 分别表示在 0.05、0.01 和 0.001 水平下显著

布区尺度 0—20 cm 土层土壤有机质、全氮和全磷的平均含量(表 2), 低于我国陆地生态系统 0—10 cm 土层^[27]和我国东部森林生态系统 0—20 cm 土层^[28]相应指标平均含量。土壤有机质和全氮含量低, 可能与我国马尾松主要在贫瘠的荒坡(或裸地)上造林, 土壤养分本底值较低有关。本研究中马尾松人工林所占比例高达 85%, 有研究表明马尾松人工林土壤有机质含量和碳库显著低于次生林^[38]。土壤全磷含量较低, 可能是因为马尾松凋落物分解速率低于相似区域其他物种凋落物分解率^[25,39], 凋落物中磷元素归还到土壤中的较少。

3.3 林分特征对马尾松林土壤肥力特征的影响

森林土壤肥力特征与构成林分树种及树种组成、林分结构、林分起源等林分因子密切相关^[6,20,34,40]。总体来看, 马尾松林林分起源(人工林与天然林)和林分结构(纯林与混交林)显著影响土壤有机质、全氮、全磷和全钾等, 表现为天然林>人工林(除全磷外)(图 1)和混交林>纯林(图 2)。在马尾松分布区尺度, 马尾松天然林以混交林为主, 人工林则以纯林为主, 因此林分起源与林分结构间土壤养分含量的高低相似。其他研究也表明, 不管是天然林还是人工林, 马尾松混交林林下土壤养分含量高于纯林^[16,20,34,38,40-41]。这些结果表明营造马尾松与其他树种的混交林有利于改善林下土壤理化性质。在气候环境基本一致的情况下, 凋落物分解过程是土壤养分的重要控制因子^[22]。马尾松混交林(天然林)中物种较丰富, 尤其是阔叶乔木和灌木的存在, 加快了凋落物分解和养分释放^[25,39,42], 使归还到土壤中的养分含量也随之增大; 而马尾松纯林(人工林)凋落物以针叶为主, 针叶凋落物含有大量单宁、蜡质、树脂等难分解的物质和较高的木质素等, 限制了凋落物养分归还速率^[43]。这些原因也导致土壤速效养分含量和肥力指数表现为混交林>纯林(图 2)。但马尾松人工林全磷、碱解氮和速效钾含量以及肥力指数高于天然林(图 1), 目前尚不清楚其形成机制。由于马尾松不同林分起源和结构的数据分布不均匀(天然林和混交林数据少), 其对天然林与人工林和纯林与混交林间土壤养分含量和肥力指数的差异性检验存在一定的影响, 因此, 林分特征如何影响马尾松林土壤肥力(尤其是区域尺度)还有待于进一步研究。

4 结论

(1) 我国马尾松树种分布区林下土壤养分含量均具有较高的空间变异性(变异系数 65%—235%), 土壤有效磷的变异系数最高。

(2) 马尾松林土壤养分单一指标的丰瘠水平因土层而异, 土壤全磷、全钾、碱解氮、有效磷和速效钾含量均在“较缺”水平及其以下, 土壤磷和钾养分的供给潜力和能力较弱。

(3) 马尾松林土壤综合肥力状况偏“贫瘠”, 土壤有效磷含量的肥力指数最小。

(4) 土壤深度和林分特征显著影响马尾松林土壤养分含量和肥力指数, 总体上表现为 0—20 cm 土层>20—40 cm 土层和混交林>纯林。因此, 营造马尾松与其他树种的混交林有利于马尾松林土壤理化性质的改善。

参考文献(References):

- [1] 阚文杰, 吴启堂. 一个定量综合评价土壤肥力的方法初探. 土壤通报, 1994, 25(6): 245-247.
- [2] Bastida F, Zsolnay A, Hernández T, García C. Past, present and future of soil quality indices: a biological perspective. *Geoderma*, 2008, 147(3/4): 159-171.
- [3] Nagati M, Roy M, Manzi S, Richard F, Desrochers A, Gardes M, Bergeron Y. Impact of local forest composition on soil fungal communities in a mixed boreal forest. *Plant and Soil*, 2018, 432(1/2): 345-357.
- [4] Crawford K M, Bauer J T, Comita L S, Eppinga M B, Johnson D J, Mangan S A, Queenborough S A, Strand A E, Suding K N, Umbanhowar J, Bever J D. When and where plant-soil feedback may promote plant coexistence: a meta-analysis. *Ecology Letters*, 2019, 22(8): 1274-1284.
- [5] Qiao L L, Li Y Z, Song Y H, Zhai J Y, Wu Y, Chen W J, Liu G B, Xue S. Effects of vegetation restoration on the distribution of nutrients, glomalin-related soil protein, and enzyme activity in soil aggregates on the Loess Plateau, China. *Forests*, 2019, 10(9): 796.
- [6] 冯嘉仪, 储双双, 王婧, 吴道铭, 莫其锋, 曾曙才. 华南地区 5 种典型林分类型土壤肥力综合评价. 华南农业大学学报, 2018, 39(3): 73-81.
- [7] 覃其云, 曹继钊, 李军, 黄开勇, 唐健. 马尾松人工幼林土壤肥力变化及其综合评价研究. 中南林业科技大学学报, 2013, 33(3): 64-69.

- [8] 麻泽宇, 王丹, 戴伟, 张毓涛, 戴奥娜. 阿尔泰山不同海拔梯度天然冷杉林土壤特征及肥力综合评价. 水土保持研究, 2016, 23(5): 134-140.
- [9] Pulido M, Schnabel S, Contador J F L, Lozano-Parra J, Gómez-Gutiérrez Á. Selecting indicators for assessing soil quality and degradation in rangelands of Extremadura (SW Spain). *Ecological Indicators*, 2017, 74: 49-61.
- [10] 杨皓, 胡继伟, 黄先飞, 范明毅, 李婕玲. 喀斯特地区金刺梨种植基地土壤肥力研究. 水土保持研究, 2015, 22(3): 50-55.
- [11] 周伟, 王文杰, 张波, 肖路, 吕海亮, 何兴元. 长春城市森林绿地土壤肥力评价. 生态学报, 2017, 37(4): 1211-1220.
- [12] 高郟, 李江荣, 卢杰, 郑维列, 陈甲瑞, 王建科, 段斐. 色季拉山急尖冷杉林不同坡向土壤养分及肥力研究. 生态学报, 2020, 40(4): 1331-1341.
- [13] 全国土壤普查办公室. 中国土壤普查技术. 北京: 农业出版社, 1992.
- [14] 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.
- [15] Huang X, Huang C B, Teng M J, Zhou Z X, Wang P C. Net primary productivity of *Pinus massoniana* dependence on climate, soil and forest characteristics. *Forests*, 2020, 11(4): 404.
- [16] 李明军, 杜明凤, 聂朝俊. 马尾松人工林地力维护研究进展. 世界林业研究, 2014, 27(5): 31-36.
- [17] 何佩云, 丁贵杰, 湛红辉. 连栽马尾松人工林土壤肥力比较研究. 林业科学研究, 2011, 24(3): 357-362.
- [18] 蔡琼, 丁贵杰. 黔中地区一、二代马尾松人工林土壤微生物数量及生物活性研究. 林业科学研究, 2013, 26(2): 247-251.
- [19] 杨承栋, 孙启武, 焦如珍, 卢立华. 大青山一二代马尾松土壤性质变化与地力衰退关系的研究. 土壤学报, 2003, 40(2): 267-273.
- [20] 詹学齐. 马尾松林冠下套种阔叶树 20 年间土壤肥力变化. 北京林业大学学报, 2018, 40(6): 55-62.
- [21] 洪伟, 吴承祯. 马尾松人工林经营模式及其应用. 北京: 中国林业出版社, 1999.
- [22] Chapin III F S, Matson P A, Vitousek P M. *Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology*. 2nd ed. New York, USA: Springer Science & Business Media, 2011.
- [23] 曹梦, 潘萍, 欧阳勋志, 臧颖, 宁金魁, 郭丽玲, 李杨. 飞播马尾松林林下植被组成、多样性及其与环境因子的关系. 生态学杂志, 2018, 37(1): 1-8.
- [24] 黄承才, 葛滢, 朱锦茹, 袁位高, 戚连忠, 江波, 沈琪, 常杰. 浙江省马尾松生态公益林凋落物及与群落特征关系. 生态学报, 2005, 25(10): 2507-2513.
- [25] 宋新章, 江洪, 马元丹, 余树全, 周国模, 彭少麟, 窦荣鹏, 郭培培. 中国东部气候带凋落物分解特征——气候和基质质量的综合影响. 生态学报, 2009, 29(10): 5219-5226.
- [26] 蒋俊, 王晓学, 屠乃美, 洗超凡, 高婷, 欧阳志云, 郑华. 中国东部土壤生物化学性质空间分异及质量评价. 生态环境学报, 2014, 23(4): 561-567.
- [27] Tian H Q, Chen G S, Zhang C, Melillo J M, Hall C A S. Pattern and variation of C:N:P ratios in China's soil: a synthesis of observational data. *Biogeochemistry*, 2010, 98(1/3): 139-151.
- [28] Chen L Y, Li P, Yang Y H. Dynamic patterns of nitrogen: phosphorus ratios in forest soils of China under changing environment. *Journal of Geophysical Research*, 2016, 121(9): 2410-2421.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] Liu X, Sheng H, Jiang S Y, Yuan Z W, Zhang C S, Elser J J. Intensification of phosphorus cycling in China since the 1600s. *Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America*, 2016, 113(10): 2609-2614.
- [32] 曹升, 胡华英, 张虹, 周垂帆, 刘博. 我国南方人工林土壤有效磷匮乏原因及对策分析. 世界林业研究, 2019, 32(3): 78-84.
- [33] 刘飞鹏, 储双双, 裴向阳, 莫罗坚, 陈颖颖, 曾曙才. 华南 3 种人工林土壤有机质和养分含量及其综合评价. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2014, 38(2): 81-85.
- [34] 樊星火, 葛红艳, 张参参, 邓文平, 陈伏生, 卜文圣. 江西省生态公益林典型林分土壤肥力状况研究. 北京林业大学学报, 2018, 40(11): 84-92.
- [35] Sayer E J. Using experimental manipulation to assess the roles of leaf litter in the functioning of forest ecosystems. *Biological Reviews*, 2006, 81(1): 1-31.
- [36] 葛晓改, 黄志霖, 程瑞梅, 曾立雄, 肖文发, 谭本旺. 三峡库区马尾松人工林凋落物和根系输入对土壤理化性质的影响. 应用生态学报, 2012, 23(12): 3301-3308.
- [37] 程瑞梅, 王瑞丽, 肖文发, 封晓辉, 刘泽彬, 葛晓改, 王晓荣, 张炜银. 三峡库区马尾松根系生物量的空间分布. 生态学报, 2012, 32(3): 823-832.
- [38] Xie J S, Guo J F, Yang Z J, Huang Z Q, Chen G S, Yang Y S. Rapid accumulation of carbon on severely eroded red soils through afforestation in subtropical China. *Forest Ecology and Management*, 2013, 300: 53-59.
- [39] 葛晓改, 曾立雄, 肖文发, 黄志霖, 周本智. 三峡库区森林凋落叶化学计量学性状变化及与分解速率的关系. 生态学报, 2015, 35(3): 779-787.
- [40] 和丽萍, 李贵祥, 孟广涛, 柴勇, 李星云. 高黎贡山不同森林类型土壤肥力状况研究. 水土保持研究, 2015, 22(6): 116-121.
- [41] 游秀花. 马尾松天然林不同演替阶段土壤理化性质的变化. 福建林学院学报, 2005, 25(2): 121-124.
- [42] 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.
- [43] He W, Ma Z Y, Pei J, Teng M J, Zeng L X, Yan Z G, Huang Z L, Zhou Z X, Wang P C, Luo X, Xiao W F. Effects of predominant tree species mixing on lignin and cellulose degradation during leaf litter decomposition in the Three Gorges reservoir, China. *Forests*, 2019, 10(4): 360.