

不同林龄榿树林地土壤碳氮磷化学计量特征

原雅楠, 李正才, 王 斌, 张雨洁, 黄盛怡

(中国林业科学研究院 亚热带林业研究所, 浙江 杭州 311400)

摘要: 【目的】了解不同林龄榿树 *Torreya grandis* 林地土壤碳、氮、磷质量分数及生态化学计量特征的变化, 为榿树的经营管理和保护提供基础数据。【方法】以浙江省诸暨市香榿 *T. grandis* ‘Merrilli’ 国家森林公园 4 个不同林龄 (0~100、100~300、300~500 和 >500 a) 的榿树为研究对象, 通过野外采集榿树林地不同土层 (0~20、20~40 和 40~60 cm) 的土壤样品, 分析不同林龄榿树林地土壤碳、氮、磷质量分数及化学计量特征的变化。【结果】①不同林龄榿树林地土壤碳、氮质量分数分别为 10.90~24.22、1.22~2.22 g·kg⁻¹, 各土层碳、氮质量分数随林龄变化呈先增加后降低的趋势; 不同林龄榿树林地土壤磷质量分数为 0.24~0.80 g·kg⁻¹, 各土层土壤磷质量分数随林龄变化呈先降低后增加的趋势, 但差异均不显著 ($P>0.05$)。②不同林龄榿树林地土壤碳氮比、氮磷比均值分别为 8.59~10.89、3.06~6.16, 各土层土壤碳氮比、氮磷比随林龄变化呈先增加后降低的趋势, 但差异均不显著 ($P>0.05$); 不同林龄榿树林地土壤碳磷比为 31.54~63.72, 各土层土壤碳磷比随年龄变化也呈先增加后降低的趋势, 部分林龄碳磷比差异显著 ($P<0.05$)。③榿树各林龄林地土壤碳、氮、磷之间有较强的正相关, 碳和氮均达到极显著正相关 ($P<0.01$), 各林龄土壤磷与碳磷比和氮磷比均存在负相关, 碳磷比和氮磷比均达到极显著正相关 ($P<0.01$)。【结论】榿树生长主要受到土壤磷的限制, 因此对榿树林经营时, 可考虑合理添加磷肥来改善土壤肥力, 促进土壤与植物之间养分的良性循环。表 4 参 34

关键词: 榿树; 林龄; 土壤; 碳; 氮; 磷; 化学计量

中图分类号: S718.5 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2021)05-1050-08

Stoichiometric characteristics of soil C, N and P in *Torreya grandis* stands of different ages

YUAN Ya'nan, LI Zhengcai, WANG Bin, ZHANG Yujie, HUANG Shengyi

(Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Hangzhou 311400, Zhejiang, China)

Abstract: 【Objective】 This objective is to investigate the contents and stoichiometric characteristics of soil organic C, total N and total P in *Torreya grandis* stands of different ages, so as to provide basic data for the management and protection of *T. grandis*. 【Method】 *T. grandis* of four different ages (0–100, 100–300, 300–500 and > 500 a) were selected from Zhuji National Forest Park of *T. grandis* ‘Merrilli’ in Zhejiang Province. Soil samples were collected from different soil layers (0–20, 20–40, 40–60 cm) to analyze the content and stoichiometric characteristics of soil C, N, and P in *T. grandis* stands of different ages. 【Result】 (1) The contents of soil organic C and total N at four ages were 10.90–24.22 and 1.22–2.22 g·kg⁻¹ respectively, which increased first and then decreased with forest age, but without significant differences. The contents of soil total P ranged from 0.24 to 0.80 g·kg⁻¹, which decreased first and then increased with forest age, but the differences were not significant ($P>0.05$). (2) The average values of soil C:N and N:P at four ages were 8.59–10.89 and 3.06–6.16 respectively, which increased first and then decreased with forest age, but the differences were not

收稿日期: 2020-12-09; 修回日期: 2021-06-11

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFC0505403)

作者简介: 原雅楠 (ORCID: 0000-0002-3952-5395), 从事森林生态学研究。E-mail: 2711615933@qq.com。通信作者: 李正才 (ORCID: 0000-0002-4371-771X), 副研究员, 博士, 从事森林生态系统碳氮循环研究。E-mail: lizccaf@126.com

significant($P > 0.05$). The soil C:P ratio was 31.54–63.72 at different forest ages, which showed a trend of decreasing first and then increasing with age, and the C:P ratio of some forest ages had significant differences($P < 0.05$). (3) There was a significant positive correlation between soil C, N, and P contents at different forest ages, and extremely significant positive correlation between C and N ($P < 0.01$). There was a significant negative correlation between P and C:P ratio, P and N:P ratio, and an extremely significant positive correlation between C:P ratio and N:P ratio($P < 0.01$). [Conclusion] The growth of *T. grandis* is mainly limited by soil P. Therefore, reasonable addition of P fertilization can be considered to improve soil fertility and nutrient cycling between plant and soil. [Ch, 4 tab. 34 ref.]

Key words: *Torreya grandis*; stand age; soil; C; N; P; stoichiometry

碳、氮、磷在植物的生长发育过程中发挥着重要的作用,生态化学计量学从元素计量的角度出发,利用生态过程中各种化学元素之间的平衡关系,为研究有机体碳、氮、磷等营养元素在生态系统过程中的变化规律和耦合关系提供了新的研究思路和方法,能更好地阐明生态系统各组分(植物和土壤等)养分比例的协调机制^[1-2]。土壤作为生态系统植物生长和发育的基础,为植物的生长和发育提供了所需的养分元素,土壤养分元素的含量和分配对植物的生长和发育起着调控作用,并且影响着植物群落的结构和功能^[3]。迄今为止,一些学者对不同林龄植物土壤化学计量的变化特征进行了研究,探讨了植物在不同发育阶段的养分限制因素和养分利用策略^[4]。崔宁洁等^[5]研究表明:随着马尾松 *Pinus massoniana* 林分林龄的增加,土壤碳、氮、磷含量逐渐增加,林分的生长受到氮、磷的共同制约。曹娟等^[6]研究表明:随着杉木 *Cunninghamia lanceolata* 林龄的增加,土壤有机碳、全氮和全磷含量逐渐增加,土壤有机碳影响着土壤的碳氮比和碳磷比。但是,不同学者的研究结果不尽相同,雷丽群等^[7]研究表明:土壤有机碳、全氮含量均随着马尾松林龄的递增呈先降低后增加的趋势,土壤全磷含量在不同林龄之间无显著变化,林龄对土壤碳氮比、氮磷比有极显著的影响。曾凡鹏等^[8]研究表明:土壤碳、氮和磷含量随着落叶松 *Larix gmelinii* 林分林龄的增加逐渐降低,随着林龄的变化,碳氮比、碳磷比变化显著。由此可见,土壤碳、氮、磷生态化学计量特征随着林龄变化趋势,碳、氮和磷等养分元素间的制约关系仍存在着很大的不确定性,针对不同森林类型需要进一步的研究和探讨。榿树 *Torreya grandis* 系红豆杉科 Taxaceae 常绿乔木,是中国特有的珍稀树种。目前,对榿树的研究主要集中于榿树种质资源调查及分布状况^[9]、榿树种群结构和动态^[10]等方面,更多则是关于榿树嫁接品种香榿 *T. grandis* ‘Merrilli’ 的栽培和管理^[11-12] 研究等。由于榿树的经济价值较小,榿树基本处于自生自灭的状态,严重威胁着榿树种质资源的保存和利用。目前,对榿树的生态化学计量特征的研究较少^[13],对不同林龄榿树林地土壤生态化学计量特征的研究则更加欠缺,因此,榿树种质资源的保护和利用缺少技术支撑。本研究以浙江省诸暨市香榿国家森林公园 4 个不同林龄 (0~100、100~300、300~500 和 >500 a) 的榿树资源为研究对象,通过分析榿树林地土壤碳、氮、磷含量及其化学计量特征的变化规律,探讨不同林龄榿树林地土壤养分元素的分配格局,为榿树古树资源的保护和利用提供基础数据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究地位于浙江省诸暨市赵家镇香榿国家森林公园 (29°21′~29°59′N, 119°53′~120°32′E), 该区属亚热带季风气候, 年均气温为 16.3 °C, 年均降水量为 1 373.6 mm, 年均日照时数为 1 887.6 h。研究区属低山丘陵地貌, 土壤母质为花岗岩, 土壤质地为砂壤土, 土壤类型为微酸性红壤。现存天然次生林乔木树种以木荷 *Schima superba*、青冈 *Cyclobalanopsis glauca* 为主; 林下灌木以豆腐柴 *Premna micrphylla*、朱砂根 *Ardisia crenata*、四川山矾 *Symplocos setchuensis* 等为主; 草本有蕨 *Pteridium aquilinum*、芒萁 *Dicranopteris pedata*、阔叶麦冬 *Liriope palatyphylla* 等。诸暨香榿国家森林公园是中国规模最大的香榿古树集聚地, 据统计, 树龄 100 a 以上的榿树约 4 200 株, 500 a 以上的古树约 1 600 株, 1 000 a 以上的古树约 200 株, 以雌株为主^[13]。

1.2 研究方法

1.2.1 样株选择和样品采集 2018年9月中旬,通过资料查阅、农户访问、生长锥调查和年轮分析(结合榿树生长状况、形态特征、外观老化程度、树种的生物学特性及相关的调查结果综合分析确定树木的年龄),选择立地条件基本一致的不同年龄段的实生榿树,按0~100、100~300、300~500以及>500 a的树龄梯度选择样本树(参考古树名木的管理方法划分林龄梯度),每个林龄段的样本树各重复4~5株。测定所选样株胸径、树高和林下植被生长情况(包括植物种类、高度、盖度和株树)等基本特征。同时在距离榿树树体50~100 cm左右的树冠下(东南西北4个方位),随机挖取4个土壤剖面(避开粗根系),分别采集0~20、20~40和40~60 cm土层土样,同一土层样品充分混合,去掉可见植物根系、残体和碎石,分别标号后带回实验室,自然风干备用。所有调查样株分布在半径为500 m的范围内,以保证气候、坡度、坡向和成土母质等环境因子基本一致,并且所有选择的样本经营管理措施大体相同(由于样株呈单株分布,因此,不同林龄段林下植被种类和盖度等大体一致。所有选择的调查样株每年地表除草1次,不施肥、不垦覆),整个试验具有可比性,样地基本情况见表1。

表1 调查样地基本情况

林龄/a	平均胸径/cm	平均树高/m	平均坡度/(°)	平均海拔/m	土壤pH	分布情况
0~100	35.56	10	27	512	4.76	单株
100~300	57.11	17	24	532	4.95	单株
300~500	60.19	17	27	472	4.85	单株
>500	99.15	19	36	514	5.25	单株

自然风干后的土样分别过2.00、0.25和0.15 mm筛备用。土壤有机碳(SOC)采用重铬酸钾外加热法测定;土壤全氮(STN)采用浓硫酸消煮,凯氏定氮法测定;土壤全磷采用高氯酸-硫酸法($\text{HClO}_4\text{-H}_2\text{SO}_4$)消煮,钼锑抗比色法测定^[14]。

1.2.2 数据处理 采用Excel 2010对数据进行整理和预处理,利用SPSS 22.0对不同林龄榿树林地土壤碳、氮、磷质量分数及化学计量特征进行单因素方差分析(one-way ANOVA)和显著性分析(LSD检验),采用Pearson分析方法对不同林龄段各土层土壤有机碳、全氮、全磷质量分数及化学计量特征进行相关性分析。

2 结果与分析

2.1 不同林龄榿树林地土壤碳、氮、磷变化特征

由表2可知:不同林龄榿树林地土壤碳质量分数为10.90~24.22 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,同一土层土壤碳质量分数随林龄变化呈先增加后降低的趋势,且在3个土层中,林龄0~100 a的林地土壤碳质量分数均为最低。不同林龄榿树林地土壤氮质量分数为1.22~2.22 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,同一土层土壤氮质量分数随林龄变化也呈先增加后降低的趋势,且在3个土层中,林龄0~100 a的林地土壤氮质量分数也为最低。不同林龄榿树林地土壤磷质量分数为0.24~0.80 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,同一土层土壤磷质量分数随林龄变化呈先降低后增加的趋势,在3个土层中,林龄100~300 a的林地土壤磷质量分数均为最低。但是,同一土层不同林龄榿树林地土壤碳、氮、磷之间均无显著差异。

2.2 不同林龄榿树林地土壤碳、氮、磷化学计量变化特征

由表3可知:不同林龄榿树林地土壤碳氮比均值为8.59~10.89,同一土层不同林龄间土壤碳氮比差异均不显著,且随林龄变化均呈先增加后降低的趋势。不同林龄榿树林地土壤碳磷比为31.54~63.72,同一土层不同林龄间土壤碳磷比随林龄变化也呈先增加后降低的趋势,其中,在土层20~40、40~60 cm中,林龄0~100 a的碳磷比分别显著小于林龄100~300 a($P<0.05$)。不同林龄榿树林地土壤氮磷比为3.06~6.16,同一土层不同林龄间土壤氮磷比随林龄变化呈先增加后降低的趋势,同一土层各林龄段之间土壤氮磷比均无显著差异。

2.3 不同林龄榿树林地土壤碳、氮、磷质量分数及化学计量特征间的相关关系

从表4可见:各林龄榿树林地土壤碳、氮、磷质量分数之间有较强的正相关关系,其中碳和氮达到极显著正相关关系($P<0.01$);碳和磷在榿树林龄>500 a时呈极显著正相关($P<0.01$),在榿树林龄0~100和100~300之间相关显著($P<0.05$);氮和磷在榿树林龄100~300 a时呈显著相关($P<0.05$),在榿树林龄>500 a时呈极显著相关($P<0.01$)。各林龄段土壤磷与碳磷比、氮磷比均为负相关关系,在林龄

表 2 不同林龄榿树林地土壤碳、氮、磷的质量分数

Table 2 Soil C, N, and P contents in four ages of *T. grandis*

土层/cm	林龄/a	碳/(g·kg ⁻¹)	氮/(g·kg ⁻¹)	磷/(g·kg ⁻¹)
0~20	0~100	20.21±2.29 a	1.86±0.17 a	0.80±0.48 a
	100~300	24.22±5.83 a	2.22±0.47 a	0.40±0.13 a
	300~500	22.07±1.70 a	2.12±0.29 a	0.53±0.28 a
	>500	21.28±6.80 a	2.02±0.53 a	0.69±0.25 a
20~40	0~100	12.27±1.52 a	1.28±0.21 a	0.46±0.19 a
	100~300	16.75±6.87a	1.61±0.56 a	0.26±0.07 a
	300~500	15.02±1.00 a	1.62±0.34 a	0.36±0.07 a
	>500	14.23±8.50 a	1.44±0.69 a	0.38±0.13 a
40~60	0~100	10.90±2.96 a	1.22±0.26 a	0.33±0.08 a
	100~300	15.20±4.79 a	1.42±0.44 a	0.24±0.06 a
	300~500	15.97±3.21 a	1.55±0.10 a	0.34±0.08 a
	>500	13.16±8.05 a	1.43±0.55 a	0.32±0.14 a

说明：同列不同字母表示同一土层不同林龄间差异显著 ($P<0.05$)

表 3 不同林龄榿树林地土壤碳氮比、碳磷比、氮磷比

Table 3 Ratios of soil C:N, C:P, and N:P in four ages of *T. grandis*

土层/cm	林龄/a	碳氮比	碳磷比	氮磷比
0~20	0~100	10.85±0.65 a	35.03±26.80 a	3.32±2.73 a
	100~300	10.89±0.60 a	62.78±16.33 a	5.80±1.63 a
	300~500	10.47±1.01 a	49.88±25.89 a	4.71±2.37 a
	>500	10.38±0.89 a	31.54±6.21 a	3.06±0.65 a
20~40	0~100	9.66±0.41 a	32.00±18.08 b	3.35±1.96 a
	100~300	10.27±0.71 a	63.72±15.73 a	6.16±1.08 a
	300~500	9.75±1.03 a	47.03±14.61 ab	4.82±1.45 a
	>500	9.34±1.72a	35.03±13.01 ab	3.66±0.82 a
40~60	0~100	8.87±0.75 a	35.27±16.52 b	3.89±1.52 a
	100~300	10.71±0.26 a	62.01±6.22 a	5.79±0.47 a
	300~500	9.88±1.12 a	45.73±15.65 ab	4.62±1.56 a
	>500	8.59±3.11 a	40.51±21.31 ab	4.51±1.09 a

说明：同列不同字母表示同一土层不同林龄间差异显著 ($P<0.05$)

表 4 各林龄榿树林地土壤碳、氮、磷质量分数及化学计量比相关关系

Table 4 Relationship between soil C, N, P contents and stoichiometric in four ages

林龄/a	指标	碳	氮	磷	碳氮比	碳磷比	氮磷比
0~100	碳	1					
	氮	0.979**	1				
	磷	0.715*	0.625	1			
	碳氮比	0.859**	0.746*	0.719*	1		
	碳磷比	-0.002	0.080	-0.687*	-0.102	1	
	氮磷比	-0.120	-0.025	-0.768*	-0.235	0.990**	1
100~300	碳	1					
	氮	0.993**	1				
	磷	0.765*	0.745*	1			
	碳氮比	0.640	0.544	0.558	1		
	碳磷比	0.453	0.457	-0.215	0.279	1	
	氮磷比	0.299	0.329	-0.372	0.025	0.967**	1.000
300~500	碳	1					
	氮	0.904**	1				
	磷	0.290	0.449	1			
	碳氮比	0.384	-0.043	-0.236	1		
	碳磷比	0.446	0.283	-0.698*	0.388	1	
	氮磷比	0.361	0.297	-0.699*	0.156	0.970**	1
>500	碳	1					
	氮	0.987**	1				
	磷	0.812**	0.814**	1			
	碳氮比	0.861**	0.778*	0.582	1		
	碳磷比	0.424	0.355	-0.123	0.670*	1	
	氮磷比	0.017	-0.011	-0.510	0.222	0.870**	1

说明：*表示 $P<0.05$ ，**表示 $P<0.01$

0~100和300~500 a时达显著水平($P < 0.05$), 相关系数分别为-0.687和-0.768。整体上, 各林龄榿树林地土壤化学计量比相关性较弱, 碳磷比和氮磷比相关性均达极显著水平($P < 0.01$), 相关系数分别为0.990、0.967、0.970和0.807。

3 讨论

3.1 不同林龄段实生榿树林地土壤碳、氮、磷质量分数

本研究中, 不同林龄实生榿树林地0~60 cm土层碳质量分数为10.90~24.22 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 且不同林龄之间差异不显著, 这与张芸等^[15]对4个林龄杉木林土壤碳含量的研究结果一致。并且, 随着榿树林龄的增加, 土壤碳质量分数呈先升高后降低的趋势, 且在林龄0~100 a最低。杨好运等^[16]对柑橘 *Citrus reticulata*、胡士达^[17]对闽楠 *Phoebe bournei* 的研究结果表明: 土壤碳质量分数从大到小依次为幼林龄、成熟林、近成熟林。与其研究结果不同的原因可能是, 地表凋落物的分解是土壤有机碳的主要来源, 林分总生物量、碳储量和养分储量随林龄的增加呈增大趋势^[18], 相对于林龄100~300、300~500和>500 a的榿树, 0~100 a榿树处于生长初期, 个体生长旺盛, 凋落物数量也相对较少, 而林龄100~300和300~500 a的榿树, 树冠郁闭度高, 冠幅和树高逐渐增大, 产生的凋落物数量较多, 林龄>500 a的榿树生长开始衰退, 林冠开始稀疏, 凋落物回归到地表的数量减少, 导致归还到土壤的养分元素减少。

随着榿树林龄的增加, 土壤氮与碳的质量分数变化趋势大体一致, 呈先增加后降低的趋势, 并且相对稳定, 与苗娟等^[19]对不同林龄云南松 *Pinus yunnanensis* 土壤碳氮质量分数有一致的变化趋势, 说明林龄 ≤ 500 a的榿树生长较为旺盛, 对土壤氮素的需求较高, 因此土壤氮未出现积累^[20]。

整体上, 榿树林龄增加对土壤磷质量分数均未产生显著影响, 土壤磷质量分数随林龄增加呈先下降后升高的趋势。但曹娟等^[21]研究表明: 杉木土壤磷含量随林龄增加呈先升高后降低的趋势。这可能是因为, 在林龄0~100 a的榿树树体相对较小, 个体生长旺盛, 对土壤氮的需求较大, 而对磷的需求相对较少, 所以土壤氮质量分数最低, 而土壤磷质量分数较高; 而林龄100~300和300~500 a的榿树, 随着树体的增加, 凋落物的分解基本上能够满足植物体对氮的需求, 所以土壤氮变化相对平稳; 在林龄100~300和300~500 a的榿树, 由于种子结实量增加, 榿树对磷的需求量增加, 所以导致土壤磷质量分数下降。

3.2 不同林龄实生榿树林地土壤碳、氮、磷生态化学计量特征

土壤碳、氮、磷等养分元素的循环过程是相互耦合和相互影响的, 土壤中碳氮比、碳磷比等存在一定的比例关系。土壤碳氮比是衡量土壤碳、氮的平衡状况和土壤氮素矿化能力的重要指标, 碳氮比较低时, 有利于提升土壤微生物的分解能力, 表明土壤有机质矿化速率加强^[22-23], 超过微生物所需的氮被释放到土壤中, 从而有利于土壤氮的增加; 而碳氮比较高时, 由于存在氮受限, 微生物分解能力下降, 进而促进了土壤碳的积累^[24-25]。本研究榿树林地土壤碳氮比为8.59~10.89, 变化幅度较小, 且均低于中国土壤平均值(11.9)和世界土壤平均值(13.3)^[26], 说明研究区榿树林地土壤微生物分解能力强, 土壤有机质矿化速率快。YANG等^[27]对39个森林林龄序列的土壤碳氮数据的统计分析表明: 土壤碳氮比随着林龄序列的变化相对恒定。森林土壤中碳、氮元素主要来自于凋落物的分解, 土壤微生物严格按照元素计量比分解凋落物, 使得土壤中的碳氮比相对稳定^[28]。

土壤有机质的分解速率受到土壤磷有效性的影响, 因此, 土壤碳磷比可作为微生物分解土壤有机质释放磷的指标, 较低的碳磷比是磷有效性高的指标之一^[29]。林龄0~100、300~500和>500 a的榿树林地土壤碳磷比均小于中国土壤平均值(61)^[30], 而林龄100~300 a的榿树林地土壤碳磷比稍高于中国土壤平均值(61), 有利于榿树林地微生物对磷的净矿化作用。不同林龄段榿树土壤碳磷比差异并不显著, 但相对来说, 林龄100~300和300~500 a的榿树林地土壤碳磷比较高, 说明随着榿树林龄的增加, 榿树土壤中磷质量分数下降。磷是影响研究区榿树林地土壤碳磷比生态计量比的关键因素, 因此, 榿树整个生长和发育过程对磷需求大, 如果土壤磷没有得到及时的补充, 则林地处于磷过度消耗的状态。土壤氮磷比可作为指示土壤养分供应情况的指标^[31], 可以直接反映土壤肥力并间接表明植物营养状况^[32], 也可以反映土壤中氮的限制与饱和状况^[33]。除了林龄100~300 a的榿树林地土壤氮磷比高于全国土壤平均值(5.2)外, 其他林龄段氮磷比均低于全国土壤平均值, 并且氮磷比与磷呈负相关关系, 这与任悦等^[34]对

沙地樟子松 *Pinus sylvestris* var. *mongolica* 的研究结果一致。不同林龄榿树林地土壤磷为 $0.24\sim 0.80\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 除了林龄 $0\sim 100\text{ a}$, 土层 $0\sim 20\text{ cm}$ 的磷稍高于全国平均值 ($0.78\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 外^[34], 其余均低于全国平均值。结合中国亚热带红壤区磷普遍较低的问题, 综合分析认为: 榿树整个生长阶段林地土壤主要受到磷限制, 因此对榿树经营时, 可以合理施加磷肥来改善土壤肥力状况。亚热带红壤无机磷主要以铝结合态磷 (Al-P)、铁结合态磷 (Fe-P)、钙磷 (Ca-P) 为主, 而植物可以吸收利用的有效态磷较少, 人工林生长后期, 生长往往受到磷元素的限制。HUANG 等^[33] 研究表明: 鼎湖山 3 种不同森林类型根际土壤酸性磷酸酶的活性随着林龄的增加呈增加趋势, 根际土壤有效磷的含量也随之下降。表明在亚热带红壤区, 随着林木的生长, 磷受限将加剧, 在人工林发育中后期应适当增施磷肥, 以保证林木的良好生长, 促进土壤与植物的良性养分循环。研究区亚热带红壤磷整体上处于低水平, 导致土壤氮、磷元素失衡, 从而影响林木的生长发育和生态系统物质及能量循环。

3.3 不同林龄土壤碳、氮、磷质量分数及化学计量特征相关性分析

由相关性分析可知: 不同林龄段榿树林地土壤碳、氮质量分数均表现出极强的正相关关系, 这是因为氮会影响土壤对碳的固定, 土壤碳和氮有很强的依存性^[33]。各林龄段榿树林地土壤碳和磷也表现出很强的相关性。各林龄段榿树林地土壤碳氮比与碳的相关性均大于碳氮比与氮的相关性, 说明各林龄榿树土壤碳氮比主要受碳的影响, 氮磷比更多受到磷的影响。

4 结论

本研究同一土层不同林龄段榿树林地土壤碳、氮、磷质量分数差异不显著, 同一土层不同林龄段之间碳氮比、氮磷比差异也不显著, 碳磷比在部分林龄段差异显著, 榿树整个生长阶段土壤磷质量分数低于全国平均值, 表明榿树林地土壤主要受磷的限制, 因此对榿树林地经营时, 可以合理添加磷肥来改善土壤肥力。

5 参考文献

- [1] YANG Cao, CHEN Yunming. Ecosystem C:N:P stoichiometry and carbon storage in plantations and a secondary forest on the Loess Plateau, China [J]. *Ecol Eng*, 2017, **105**: 125 – 132.
- [2] WANG Anjing, WANG Wenjie, SU Hongyan, *et al.* Effect of forest and farm on vertical patterns of soil carbon, nitrogen and other parameters in Northeast China [J]. *Bull Bot Res*, 2012, **32**(3): 331 – 338.
- [3] 阎恩荣, 王希华, 郭明, 等. 浙江天童常绿阔叶林、常绿针叶林与落叶阔叶林的 C:N:P 化学计量特征 [J]. *植物生态学报*, 2010, **34**(1): 48 – 57.
YAN Enrong, WANG Xihua, GUO Ming, *et al.* C:N:P stoichiometry across evergreen broad-leaved forests, evergreen coniferous forests and deciduous broad-leaved forests in the Tiantong region, Zhejiang Province, eastern China [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2010, **34**(1): 48 – 57.
- [4] FAN Houbao, WU Jianping, LIU Wenfei, *et al.* Linkages of plant and soil C:N:P stoichiometry and their relationships to forest growth in subtropical plantations [J]. *Plant Soil*, 2015, **392**(1/2): 127 – 138.
- [5] 崔宁洁, 刘小兵, 张丹桔, 等. 不同林龄马尾松 *Pinus massoniana* 人工林碳氮磷分配格局及化学计量特征 [J]. *生态环境学报*, 2014, **23**(2): 188 – 195.
CUI Ningjie, LIU Xiaobing, ZHANG Danju, *et al.* The distribution pattern of carbon, nitrogen and phosphorus and the stoichiometry characteristics of *Pinus massoniana* plantation in different ages [J]. *Ecol Environ Sci*, 2014, **23**(2): 188 – 195.
- [6] 曹娟, 闫文德, 项文化, 等. 湖南会同 3 个林龄杉木人工林土壤碳、氮、磷化学计量特征 [J]. *林业科学*, 2015, **51**(7): 1 – 8.
CAO Juan, YAN Wende, XIANG Wenhua, *et al.* Stoichiometry characterization of soil C, N, and P of Chinese fir plantations at three different ages in Huitong, Hunan Province, China [J]. *Sci Silv Sin*, 2015, **51**(7): 1 – 8.
- [7] 雷丽群, 卢立华, 农友, 等. 不同林龄马尾松人工林土壤碳氮磷生态化学计量特征 [J]. *林业科学研究*, 2017, **30**(6): 954 – 960.
LEI Liqun, LU Lihua, NONG You, *et al.* Stoichiometry characterization of soil C, N and P of *Pinus massoniana* plantations at different age stages [J]. *For Res*, 2017, **30**(6): 954 – 960.

- [8] 曾凡鹏, 迟光宇, 陈欣, 等. 辽东山区不同林龄落叶松人工林土壤-根系 C:N:P 生态化学计量特征[J]. 生态学杂志, 2016, **35**(7): 1819 – 1825.
ZENG Fanpeng, CHI Guangyu, CHEN Xin, *et al.* The stoichiometric characteristics of C, N and P in soil and root of larch (*Larix* spp.) plantation at different stand ages in mountainous region of eastern Liaoning Province, China [J]. *Chin J Ecol*, 2016, **35**(7): 1819 – 1825.
- [9] 程晓建, 黎章矩, 喻卫武, 等. 榿树的资源分布与生态习性[J]. 浙江林学院学报, 2007, **24**(4): 383 – 388.
CHENG Xiaojian, LI Zhangju, YU Weiwu, *et al.* Distribution and ecological characteristics of *Torreya grandis* in China [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2007, **24**(4): 383 – 388.
- [10] 江波, 周先容, 尚进, 等. 中国特有植物巴山榿树的种群结构与动态[J]. 生态学报, 2018, **38**(3): 1016 – 1027.
JIANG Bo, ZHOU Xianrong, SHANG Jin, *et al.* Population structure and dynamics of *Torreya fargesii* Franch., a plant endemic to China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2018, **38**(3): 1016 – 1027.
- [11] 吴连海, 吴黎明, 倪荣新, 等. 香榿栽培经济效益分析[J]. 浙江农林大学学报, 2013, **30**(2): 299 – 303.
WU Lianhai, WU Liming, NI Rongxin, *et al.* Economic benefits of *Torreya grandis* ‘Merrillii’ plantings [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2013, **30**(2): 299 – 303.
- [12] 张雨洁, 王斌, 李正才, 等. 不同树龄香榿土壤有机碳特征及其与土壤养分的关系[J]. 西北植物学报, 2018, **38**(8): 149 – 157.
ZHANG Yujie, WANG Bin, LI Zhengcai, *et al.* Relationships between soil organic carbon characteristics and soil nutrients for different tree-age *Torreya grandis* [J]. *Acta Bot Boreali-Occident Sin*, 2018, **38**(8): 149 – 157.
- [13] 原雅楠, 李正才, 王斌, 等. 榿树种内 C、N、P 生态化学计量特征研究[J]. 林业科学研究, 2019, **32**(6): 73 – 79.
YUAN Ya’nan, LI Zhengcai, WANG Bin, *et al.* Stoichiometric characteristics of C, N and P in different varieties of *Torreya grandis* [J]. *For Res*, 2019, **32**(6): 73 – 79.
- [14] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [15] 张芸, 李惠通, 张辉, 等. 不同林龄杉木人工林土壤 C:N:P 化学计量特征及其与土壤理化性质的关系[J]. 生态学报, 2019, **39**(7): 2520 – 2531.
ZHANG Yun, LI Huitong, ZHANG Hui, *et al.* C:N:P stoichiometry and its relationship with the soil physicochemical properties of different aged Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantations [J]. *Acta Ecol Sin*, 2019, **39**(7): 2520 – 2531.
- [16] 杨好运, 贾国梅, 杜祥运, 等. 不同林龄柑橘园碳氮磷分配及生态化学计量特征研究[J]. 湖北农业科学, 2016, **55**(6): 1402 – 1405.
YANG Haoyun, JIA Guomei, DU Xiangyun, *et al.* Study on the distribution of carbon, nitrogen and phosphorus and the ecological stoichiometry in citrus plantation of different stand age [J]. *Hubei Agric Sci*, 2016, **55**(6): 1402 – 1405.
- [17] 胡士达. 不同林龄闽楠人工林生态化学计量特征研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2017.
HU Shida. *Studies on Ecological Stoichiometry of Phoebe Plantation in Different Ages*[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2017.
- [18] 陈东升, 孙晓梅, 张守攻. 不同年龄日本落叶松人工林生物量、碳储量及养分特征[J]. 应用生态学报, 2016, **27**(12): 3759 – 3768.
CHEN Dongsheng, SUN Xiaomei, ZHANG Shougong. Biomass, carbon storage and nutrient characteristics in *Larix kaempferi* plantations at different stand ages [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2016, **27**(12): 3759 – 3768.
- [19] 苗娟, 周传艳, 李世杰, 等. 不同林龄云南松林土壤有机碳和全氮积累特征[J]. 应用生态学报, 2014, **25**(3): 625 – 631.
MIAO Juan, ZHOU Chuanyan, LI Shijie, *et al.* Accumulation of soil organic carbon and total nitrogen in *Pinus yunnanensis* forests at different age stages [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2014, **25**(3): 625 – 631.
- [20] 许宇星, 王志超, 竹万宽, 等. 雷州半岛不同林龄桉树人工林土壤化学计量特征[J]. 云南农业大学学报(自然科学版), 2019, **34**(3): 124 – 131.
XU Yuxing, WANG Zhichao, ZHU Wankuan, *et al.* Soil ecological stoichiometric characteristics of *Eucalyptus urophylla*×*E. grandis* in different ages on the Leizhou Peninsula [J]. *J Yunnan Agric Univ Nat Sci*, 2019, **34**(3): 124 – 131.
- [21] 曹娟, 闫文德, 项文化, 等. 湖南会同不同年龄杉木人工林土壤磷素特征[J]. 生态学报, 2014, **34**(22): 6519 – 6527.

- CAO Juan, YAN Wende, XIANG Wenhua, *et al.* Characteristics of soil phosphorus in different aged stands of Chinese fir plantations in Huitong, Hunan Province [J]. *Acta Ecol Sin*, 2014, **34**(22): 6519 – 6527.
- [22] MAJDA H, OHRVIK J. Interactive effects of soil warming and fertilization on root production, mortality in Norway spruce stand in Northern Sweden [J]. *Global Change Biol*, 2004, **10**(2): 182 – 188.
- [23] BATJES N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world [J]. *Eur J Soil Sci*, 1996, **47**(2): 151 – 163.
- [24] NCUFCLDT H, DA SILVA J E, AYARZA M A, *et al.* Land-use effects on phosphorus fractions in Cerrado oxisols [J]. *Biol Fertil Soils*, 2000, **31**(1): 30 – 37.
- [25] BENGTTSSON G, BENGTTSON P, MANSSON K F. Gross nitrogen mineralization, immobilization, and nitrification rates as a function of soil C/N ratio and microbial activity [J]. *Soil Biol Biochem*, 2003, **35**(1): 143 – 154.
- [26] 曹小玉, 李际平, 杨静, 等. 不同龄组杉木林土壤碳、氮、磷的生态化学计量特征[J]. 土壤, 2019, **51**(2): 290 – 296.
CAO Xiaoyu, LI Jiping, YANG Jing, *et al.* Stoichiometric characterization of soil C, N, and P of different age-group Chinese fir plantations [J]. *Soils*, 2019, **51**(2): 290 – 296.
- [27] YANG Yuanhe, LUO Yiqi, FINZI A C. Carbon and nitrogen dynamics during forest stand development: a global synthesis [J]. *New Phytol*, 2011, **190**(4): 977 – 989.
- [28] YANG Yuanhe, FANG Jingyun, GUO Dali, *et al.* Vertical patterns of soil carbon, nitrogen and carbon: nitrogen stoichiometry in Tibetan grasslands [J]. *Biogeosci Discuss*, 2010, **7**(1): 1 – 24.
- [29] 王绍强, 于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征[J]. 生态学报, 2008, **28**(8): 3937 – 3947.
WANG Shaoqiang, YU Guirui. Ecological stoichiometry characteristics of ecosystem carbon, nitrogen and phosphorus elements [J]. *Acta Ecol Sin*, 2008, **28**(8): 3937 – 3947.
- [30] TIAN Hanqin, CHEN Guangsheng, CHI Zhang, *et al.* Pattern and variation of C:N:P ratios in China's soils: a synthesis of observational data [J]. *Biogeochemistry*, 2010, **98**(1 – 3): 139 – 151.
- [31] TESSIER J T, RAYNAL D J. Use of nitrogen to phosphorus ratios in plant tissue as an indicator of nutrient limitation and nitrogen saturation [J]. *J Appl Ecol*, 2003, **40**: 523 – 534.
- [32] YANG Cao, CHEN Yunming. Coupling of plant and soil C:N:P stoichiometry in black locust (*Robinia pseudoacacia*) plantations on the Loess Plateau, China [J]. *Trees*, 2017, **31**: 1559 – 1570.
- [33] HUANG Wenjuan, LIU Juxiu, WANG Yingping, *et al.* Increasing phosphorus limitation along three successional forests in southern China [J]. *Plant Soil*, 2013, **364**(1/2): 181 – 191.
- [34] 任悦, 高广磊, 丁国栋, 等. 沙地樟子松人工林叶片-枯落物-土壤氮磷化学计量特征[J]. 应用生态学报, 2019, **30**(3): 36 – 43.
REN Yue, GAO Guanglei, DING Guodong, *et al.* Stoichiometric characteristics of nitrogen and phosphorus in leaf-litter-soil system of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2019, **30**(3): 36 – 43.