

杉木混交林的土壤生态化学计量及其林分结构影响因子研究^{*}

龚益广¹ 徐明锋² 谢正生³ 黄益强⁴
梁育兴¹ 王 凯¹ 李春永¹

(1. 广东省德庆林场, 广东 肇庆 526600; 2. 广东省森林培育与保护利用重点实验室/广东省林业科学研究院, 广东 广州 510520; 3. 华南农业大学文博馆, 广东 广州 510642; 4. 肇庆市农业科学研究所, 广东 肇庆 526070)

摘要 杉木 *Cunninghamia lanceolata* 纯林的长期经营容易出现土壤退化、地力减弱、生物多样性下降等一系列生态问题。营造杉木阔叶混交林是平衡森林经营经济效益与生态效益的有益尝试。研究采用单因素方差分析、非参数 Spearman 相关分析等统计方法, 分析了粤西杉木阔叶混交林地土壤的理化特性, 探讨林地土壤碳、氮、磷等养分保持的杉木阔叶混交林模式。结果表明: 土壤有机碳含量、碳氮比、碳磷比在不同杉木混交林模式间有极显著差异, 氮磷比没有差异。各土壤生态化学计量在不同杉木混交林间的变化趋势并不一致。土壤有机碳含量、碳氮比在不同杉木林地土壤中的占比间有显著差异, 其余无显著差异。纯杉木林的土壤有机碳含量、碳氮比、碳磷比均最低, 氮磷比最高。土壤生态化学计量与土壤化学因子相关性较强, 与土壤物理因子相关性较弱。其中, 与土壤化学因子中全氮含量、碱解氮含量的相关性较强, 与土壤物理因子中的毛管持水量有一定的相关关系。土壤有机碳含量、碳氮比、碳磷比、氮磷比在不同树木高度级下均无显著差异; 氮磷比, 土壤有机碳含量、碳磷比、碳氮比在不同径级间均有显著差异, 并且随着林木径级升高, 土壤有机碳含量、碳氮比、碳磷比呈现出显著升高趋势, 氮磷比呈现出降低趋势。杉木混交林对比杉木纯林能明显提高土壤有机碳含量, 积累土壤养分, 改良土壤性状。其中, 混交比例为 1:1 的杉木和火力楠 *Michelia macclurei* 混交林表现更优。

关键词 杉木混交林; 阔叶树; 土壤生态化学计量; 土壤有机碳含量; 碳氮比; 森林土壤

中图分类号: S714 文献标志码: A 文章编号: 2096-2053 (2022) 01-0018-10

Soil Ecological Stoichiometry in *Cunninghamia lanceolata* Mixed Forests and Influencing Factors of Stand Structure

GONG Yiguang¹ XU Mingfeng² XIE Zhengsheng³ HUANG Yiqiang⁴
LIANG Yuxing¹ WANG Kai¹ LI Chunyong¹

(1. Deqing Forest Farm of Guangdong Province, Zhaoqing, Guangdong 526600, China; 2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Silviculture, Protection and Utilization/Guangdong Academy of Forestry, Guangzhou, Guangdong 510520, China; 3. South China Agricultural Museum & Archives, South China Agricultural University, Guangzhou, Guangdong 510642, China; 4. Zhaoqing Institute of Agricultural Sciences, Zhaoqing, Guangdong 526070, China)

Abstract The pure *Cunninghamia lanceolata* forest with long-term high-frequency rotation is prone to a series of ecological problems such as soil degradation, soil fertility depletion and biodiversity decline. Therefore,

基金项目: 广东省森林生态综合示范园(省德庆林场森林质量提升示范园)项目。

第一作者: 龚益广(1970—), 男, 高级工程师, 主要从事森林经营和森林防火等工作, E-mail: 123306521@qq.com。

通信作者: 谢正生(1965—), 男, 副教授, 主要从事森林生态学、自然科普教育等研究工作, E-mail: zsxie@scau.edu.cn。

it is a beneficial attempt to build a *C. lanceolata* and broad-leaved trees mixed forest to balance economic and ecological benefits. In this study, we used statistical methods such as one-way analysis of variance and non-parametric Spearman correlation analysis to analyze the soil physical and chemical properties in *C. lanceolata* mixed forests in western Guangdong, and explored the mixed pattern of *C. lanceolata* that was beneficial to maintaining soil carbon, nitrogen, phosphorus and other nutrient factors. The results showed that there were significant differences in soil organic carbon content(SOC content), C/N and C/P among different *C. lanceolata* mixed patterns, but no differences in N/P. The trends of soil ecological stoichiometry were not consistent among different *C. lanceolata* mixed forests. SOC content, C/N had significant differences among different proportions of *C. lanceolata*, while the others had no significant differences. SOC content, C/N and C/P were the lowest in pure *C.lanceolata* forest, while N/P was the highest. Soil ecological stoichiometry had strong correlation with soil chemical factors, especially with total nitrogen content and available nitrogen content. However, the correlation between soil ecological stoichiometry and soil physical factors was weak, and it was mainly related to capillary moisture capacity. SOC content, C/N, C/P and N/P had no significant differences at different height classes. In addition to N/P, SOC content, C/P and C/N had significant differences among different DBH classes, and with the increase of DBH class, SOC content, C/N and C/P showed a significant increasing trend, while N/P showed a decreasing trend. Conclusion: Compared with pure *C. lanceolata* forest, *C.lanceolata* mixed forest could significantly increase SOC content, accumulate soil nutrients and improve soil properties. Among them, *C. lanceolata* and *Michelia macclurei* mixed forest with the ratio of 1:1 had better performance.

Key words *Cunninghamia lanceolata* mixed forest; broad-leaved tree; soil ecological stoichiometry; soil organic carbon content; C/N; forest soil

土壤 C、N、P 是植物生长发育的养分来源^[1], 是植物赖以生存的物质基础^[2-3], 其生态化学计量比反映植物的生态适应策略^[4-6]。生态化学计量是研究多重化学元素平衡与生态系统能量平衡的科学^[7-8], 开展人工林土壤生态化学计量有利于掌握林地土壤养分情况, 了解林地承载力和生产力, 开展林地评级和人工种植林木的风险效益评估研究等。目前, 土壤生态化学计量的影响因子研究主要集中于林分类型^[9-10]、经营时间^[11-12]、不同干扰方式^[13-14]等, 其中林分类型在许多研究中已被证实是影响土壤生态化学计量的重要因子^[9-10, 15-16]。

杉木是我国南方的主要造林树种, 栽培面积大^[17-19], 具有生长快、材质好、产量高等特点^[20]。杉木人工林在带来巨大经济利益的同时, 也因其较差的自肥能力而出现养分不平衡^[20]、生产力降低^[21]、地力衰退^[22]等生态问题, 影响了林地的可持续经营^[23]。目前, 关于杉木林的相关生态化学计量研究主要集中在杉木人工林^[17, 24], 而对杉木阔叶树混交林的研究较少, 特别是缺乏对林龄超过 20 年的杉木阔叶树混交林开展土壤生态化学计量研究。在杉木人工林开展的生态化学计量研

究也主要针对土壤酶^[25-26]、土壤微生物^[27]、凋落物^[28-29]、杉木器官^[30-31]等, 针对土壤碳氮磷的研究较少。纵然是少数研究杉木人工林土壤碳氮磷的文献, 其内容也主要集中于氮沉降^[32-34]、不同林龄^[35-36]、不同海拔^[37]等对土壤生态化学计量的影响, 而研究不同杉木阔叶树混交林土壤生态化学计量的文献尚鲜见。

本研究开始于 1983 年, 植物、土壤调查时间是 2008 年, 间隔 25 年, 杉木已处于成熟林阶段, 火力楠 *Michelia macclurei*、木荷 *Schima superba*、檫木 *Sassafras tzumu* 等几个阔叶树也已进入近熟林或成熟林阶段, 杉木阔叶树混交林进入了生长稳定状态, 林分中的土壤化学循环也处于相对稳定状态。此时, 开展不同杉木混交林的土壤生态化学计量研究, 可为杉木林改造、杉木混交林可持续经营提供有力的数据支撑和理论指导依据。本研究旨在回答以下问题: (1) 不同杉木混交林的土壤生态化学计量差异如何? (2) 不同杉木占比的经营模式对土壤生态化学计量的影响。(3) 土壤生态化学计量与土壤因子的关系。(4) 林分组成与结构因子对土壤生态化学计量的影响如何?

1 材料与方法

1.1 研究地概况

研究样地位于广东省西江中游。地属南亚热带季风气候区,夏季高温多雨,冬季凉爽干燥,年平均气温 21.6℃,2月低温、月均温 12.9℃,7月高温、月均温 29.1℃,极端最高温和最低温分别为 38.8℃和 0.6℃。年降雨量为 1 400~1 700 mm,年蒸发量平均为 1 244.9 mm,相对湿度为 73%~85%。现有植被以杉木、马尾松 *Pinus massoniana*、尾叶桉 *Eucalyptus urophylla*、木荷、湿地松 *Pinus elliotti*、马占相思 *Acacia mangium*、火力楠、樟木、红锥 *Castanopsis hystrix* 等人工栽植树种为优势种。林下植被优势种主要为芒萁 *Dicranopteris pedata*、芒 *Miscanthus sinensis*、乌毛蕨 *Blechnum orientale*、粽叶芦 *Thysanolaena latifolia*、鸭脚木 *Schefflera heptaphylla*、玉叶金花 *Mussaenda pubescens* 等。研究样地为丘陵地貌,海拔在 200~500 m,坡度在 25°~35°。土壤为页岩发育的赤红壤,土层深厚,土壤质地为壤土,透水性好^[38-40]。

1.2 样地设置

1983 年在西江流域开展的杉木与阔叶树混交试验。试验地原为杉木林采伐迹地,炼山常规造林。样地坡向西南,坡度 25°~30°。林分混交阔叶树种为木荷、樟木和火力楠。每种阔叶树与杉木混交比例为 2 杉 1 阔和 1 杉 1 阔的行间混交模式。每种杉阔混交模式设有 2 个重复的试验小区,每试验区面积为 400 m²,共计 12 个试验小区,此外在试验区周围设有 3 个纯杉木对照区。每一小区周围设有 2~5 m 的保护带。造林株行距为 1.7 m×1.7 m。

1.3 调查取样

植物样方调查时间在 2008 年 11 月。在每一小区内,每一树种固定观测 21 株,对观测株编号挂牌,并调查林木的胸径、树高等。

土壤取样与植物样方调查同步进行。土壤取样方法为:在每一小区内,沿对角线设置 3 个有代表性的采样点,采集 0~30 cm 的土层土样,并将土样均匀混合取样,带回实验室制样,过筛后进行化学性质分析测定。

1.4 项目测定

土壤测定的化学指标有 pH、土壤有机碳 (Soil organic carbon, SOC) 含量、全氮 (Total N, TN) 含量、全磷 (Total P, TP) 含量、全钾 (Total K, TK) 含量、碱

解氮 (Available N, AvN) 含量、速效磷 (Available P, AvP) 含量、速效钾 (Available K, AvK) 含量^[41]。

土壤样品的部分物理性质采用环刀法进行测定。测定指标有土壤容重 (Bulk Density, BD)、总孔隙度 (Bulk porosity, BP)、毛管持水量 (Capillary Moisture Capacity, CMC)、毛管孔隙度 (Capillary Porosity, CP)、非毛管孔隙度 (Non-capillary Porosity, NCP)、自然含水量 (Natural Moisture Content, NMC)、通气孔隙度 (Aeration Porosity, AP)^[41]。

1.5 数据分析

植物样方调查后,经统计,所有样方的平均树高为 9.37~15.80 m,胸径为 11.05~18.55 cm。对树高 (Height, *H*)、胸径 (Diameter at Breast Height, DBH) 进行分级,树高分级 (*H* class) 为:高度级 1 为 9 m ≤ *H* < 11 m,高度级 2 为 11 m ≤ *H* < 13 m,高度级 3 为 13 m ≤ *H* < 16 m。胸径分级 (DBH class) 为:径阶 1 为 11 cm ≤ DBH < 13.5 cm,径阶 2 为 13.5 cm ≤ DBH < 16 cm,径阶 3 为 16 cm ≤ DBH < 19 cm。

采用单因素方差分析研究土壤生态化学计量在不同林型、不同杉木占比林分、不同高度级、不同径级间的差异,并用 Kruskal-Wallis test 进行检验。Kruskal-Wallis test 是一种适用野外生态学数据分析的非参数检验方法^[42]。对不同处理两两之间进行 Duncan test 多重比较。

杉木混交林土壤生态化学计量特征、不同处理间的土壤生态化学计量差异性 (单因素方差分析和 Duncan test 多重比较)、土壤因子与土壤生态化学计量的非参数 Spearman 相关分析等在 Excel 2013 软件进行数据整理,在 Statistica 12.0 软件进行统计分析和做图。

2 结果与分析

2.1 土壤生态化学计量分布特征

杉木混交林的土壤生态化学计量总体特征见表 1。从平均值来看,土壤有机碳含量为 28.56 g·kg⁻¹,全氮含量 0.06 g·kg⁻¹,全磷含量 0.55 g·kg⁻¹。碳氮比高达 524.95,主要原因是全氮含量过低,有机碳含量较高。从变异系数来看,土壤有机碳含量、碳氮比、碳磷比、氮磷比的变异系数均超过 34%,说明杉木混交林的土壤生态化学计量的空间变异较大,全磷含量的变异系数小,说明其空间变异较小。

不同杉木混交林的土壤生态化学计量特征见表2。土壤有机碳含量在混交比例1:1的杉木和火力楠混交林中最高,混交比例2:1的杉木和木荷混交林次之,纯杉木林最低,混交比例1:1的杉木和火力楠混交林与混交比例为2:1的杉木和火力楠混交林的土壤有机碳含量差异较大,不同混交比例的杉木和木荷混交林的土壤有机碳含量也差异较大,而不同混交比例的杉木与檫木的土壤有机碳含量差异较小。碳氮比、碳磷比不同林分的变化情况与土壤有机碳含量的变化情况较为一致。氮磷比在不同林分的变化较小,最大为纯杉木林,最小为混交比例1:1的杉木和木荷混交林。在空间变异方面,土壤有机碳含量在混交比例1:1的杉木和火力楠混交林、混交比例2:1的杉木和木荷混交林内的空间分布差异较小,而在混交比例1:1的杉木和檫木混交林、混交比例

1:1的杉木和木荷混交林、纯杉木林内的空间分布差异较大。碳氮比的空间分布差异较小,最大的为混交比例2:1的杉木和檫木混交林,最小为2:1的杉木和木荷混交林。碳磷比在纯杉木林内的空间分布差异最大,而在混交比例1:1的杉木和火力楠混交林、混交比例2:1的杉木和木荷混交林中较低。氮磷比同样也在纯杉木林内的空间分布差异最大,而在混交比例2:1的杉木和木荷混交林中最小。

不同杉木占比下的土壤生态化学计量特征见表3。土壤有机碳含量、碳氮比、碳磷比、氮磷比分别在杉木占比为2/3、1/3、2/3、1时的最大,在1、2/3、1、1/3时最小。从空间变异来看,土壤有机碳含量、碳氮比、碳磷比、氮磷比分别在杉木占比为1/3、1/3、1、1时的空间分布差异最大,在2/3、1、2/3、2/3时空间分布差异最小。不同土

表 1 杉木混交林土壤生态化学计量总体特征

Table 1 The overall characteristics of soil ecological stoichiometry in *Cunninghamia lanceolata* mixed forest

土壤指标 Soil index	平均值 Mean	中位数 Median	最小值 Minimum	最大值 Maximum	标准差 SD	变异系数 /%CV
土壤有机碳含量/(g·kg ⁻¹)SOC content	28.56	27.27	11.97	41.67	10.55	36.93
碳氮比 C/N	524.95	493.66	256.14	1 136.64	200.35	38.17
碳磷比 C/P	51.30	51.09	23.04	83.06	17.51	34.13
氮磷比 N/P	0.10	0.10	0.06	0.20	0.04	37.19
全氮含量/(g·kg ⁻¹)TN content	0.06	0.05	0.03	0.09	0.02	29.82
全磷含量/(g·kg ⁻¹)TP content	0.55	0.55	0.41	0.75	0.07	12.95

表 2 不同杉木混交林的土壤生态化学计量特征

Table 2 Soil ecological stoichiometry in different *Cunninghamia lanceolata* mixed forests

林型 Forest type	土壤有机碳含量/(g·kg ⁻¹) SOC content		碳氮比 C/N		碳磷比 C/P		氮磷比 N/P	
	平均值 Mean	变异系数 /%CV	平均值 Mean	变异系数 /%CV	平均值 Mean	变异系数 /%CV	平均值 Mean	变异系数 /%CV
1	39.95 ± 0.68	3.40	821.1 ± 118.60	28.89	64.25 ± 4.21	13.12	0.08 ± 0.01	33.38
2	19.76 ± 3.15	31.85	490.98 ± 52.94	21.57	34.22 ± 4.61	26.95	0.07 ± 0.01	17.23
3	30.53 ± 5.48	35.90	488.72 ± 47.17	19.30	54.07 ± 8.29	30.68	0.11 ± 0.01	23.08
4	21.70 ± 1.73	15.97	367.23 ± 47.90	26.08	41.50 ± 3.69	17.77	0.12 ± 0.02	33.49
5	39.32 ± 1.07	5.47	658.39 ± 57.68	17.52	69.30 ± 4.82	13.90	0.11 ± 0.01	11.85
6	32.17 ± 4.65	28.92	518.67 ± 83.42	32.17	58.54 ± 10.12	34.57	0.11 ± 0.01	20.11
7	16.52 ± 2.63	31.83	329.52 ± 40.18	24.39	37.25 ± 7.99	42.88	0.13 ± 0.04	62.38

注: 1. 混交比例为1:1的杉木和火力楠混交林; 2. 混交比例为1:1的杉木和木荷混交林; 3. 混交比例为1:1的杉木和檫木混交林; 4. 混交比例为2:1的杉木和火力楠混交林; 5. 混交比例为2:1的杉木和木荷混交林; 6. 混交比例为2:1的杉木和檫木混交林; 7. 纯杉木林。

Note: 1. *Cunninghamia lanceolata* and *Michelia macclurei* mixed forest with the ratio of 1:1. 2. *C. lanceolata* and *Schima superba* mixed forest with the ratio of 1:1. 3. *C. lanceolata* and *Sassafras tzumu* mixed forest with the ratio of 1:1. 4. *C. lanceolata* and *Michelia macclurei* mixed forest with the ratio of 2:1. 5. *C. lanceolata* and *Schima superba* mixed forest with the ratio of 2:1. 6. *C. lanceolata* and *Sassafras tzumu* mixed forest with the ratio of 2:1. 7. Pure *C. lanceolata* forest.

壤生态化学计量指标在不同杉木占比情况下的变化情况不一致。

2.2 不同林分组成间土壤生态化学计量的差异

不同杉木混交林的土壤生态化学计量差异性如图 1 所示。土壤有机碳含量、碳氮比在不同杉木混交林间有极显著差异，碳磷比在不同杉木混交林间有显著差异，而氮磷比没有差异。土壤有机碳含量从林型 1 到林型 7 呈现出波动状，其中林型 1 和 5 的含量高，林型 2 和 7 的含量低。碳氮比随着林型从 1 到 7，呈现出先降低，再升高，再降低的规律，林型 1 的最高，林型 7 的最低。碳磷比的变化规律与土壤有机碳含量较为一致，也是林型 1 和 5 的高，林型 2 和 7 的低。氮磷比在不同林型的变化波动较小。

不同杉木占比下的林分土壤生态化学计量差

异性如图 2 所示。土壤有机碳含量、碳氮比在不同杉木占比间有显著差异，其余无显著差异。土壤有机碳含量随着杉木占比的升高呈现先升高后降低的趋势，在杉木占比 2/3 时，含量最高，纯杉木时，含量最低。碳氮比随着杉木占比升高呈现出降低的趋势，在杉木占比 1/3 时，最高，纯杉木时，最低。碳磷比的变化规律与土壤有机碳含量一致，纯杉木时最低。氮磷比则是随着杉木占比升高呈现出升高的趋势，在纯杉木林时最高。

2.3 土壤因子与土壤生态化学计量的关系

土壤生态化学计量与土壤化学因子的关系见表 4。土壤有机碳含量与全氮、全钾含量有显著相关关系，与碱解氮含量、全磷含量、碳氮比、碳磷比有极显著相关关系。碳氮比与全钾含量有显著相关关系，与全磷含量、土壤有机碳含量、碳

表 3 不同杉木占比下的林分土壤生态化学计量特征

Table 3 Soil ecological stoichiometry in different proportions of *Cunninghamia lanceolata*

杉木占比 The proportion of <i>Cunninghamia lanceolata</i>	土壤有机碳含量 /(g · kg ⁻¹) SOC content		碳氮比 C/N		碳磷比 C/P		氮磷比 N/P	
	平均值 Mean	变异系数 /%CV	平均值 Mean	变异系数 /%CV	平均值 Mean	变异系数 /%CV	平均值 Mean	变异系数 /%CV
1/2	30.08 ± 3.14	36.16	600.27 ± 62.87	36.28	50.85 ± 4.89	33.34	0.09 ± 0.01	30.77
2/3	31.06 ± 2.67	29.73	514.77 ± 49.28	33.16	56.44 ± 4.96	30.42	0.11 ± 0.01	22.51
1	16.52 ± 2.63	31.83	329.52 ± 40.18	24.39	37.25 ± 7.99	42.88	0.13 ± 0.04	62.38

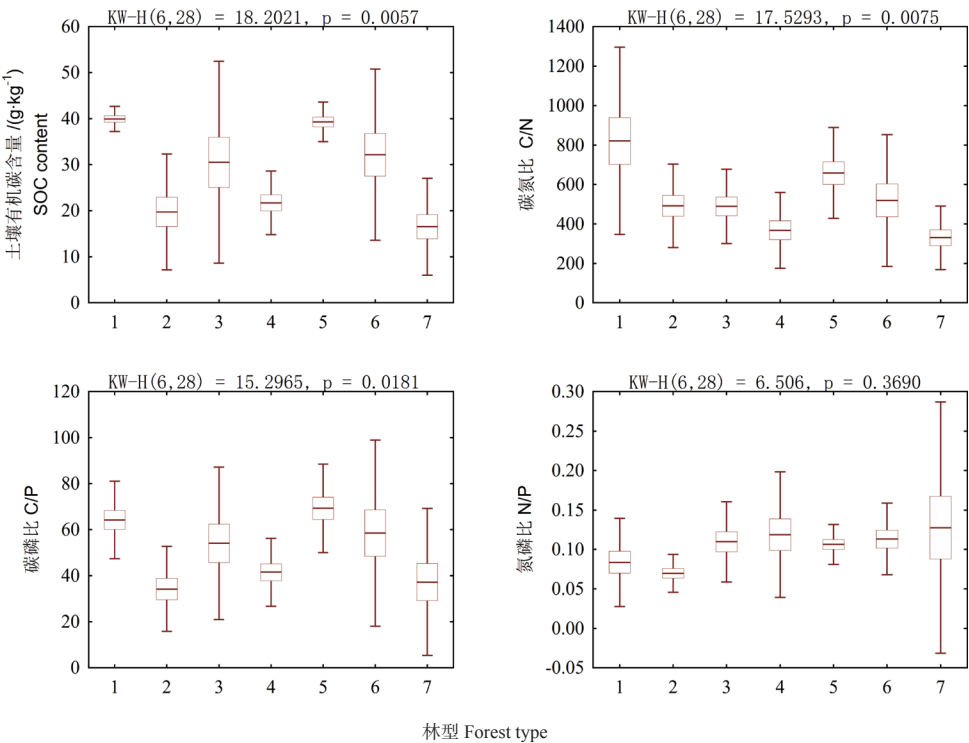


图 1 不同杉木混交林的土壤生态化学计量差异性

Figure 1 The differences of soil ecological stoichiometry in different *Cunninghamia lanceolata* mixed forests

磷比有极显著相关关系。碳磷比与全氮含量、碱解氮、土壤有机碳含量、碳氮比、氮磷比有极显著相关关系。氮磷比与速效钾含量有显著相关关系，与全氮含量、碱解氮含量、碳磷比有极显著相关关系。总的来说，土壤生态化学计量与全氮含量、碱解氮含量的相关性较强，与全磷含量、全钾含量的相关性次之，与 pH 无显著相关性。

土壤生态化学计量与土壤物理因子的关系见表 5。土壤有机碳含量与毛管持水量有显著相关关系，碳氮比与毛管持水量、毛管孔隙度有极显著相关关系，其他两两间均无显著相关关系。总的来说，土壤生态化学计量与土壤物理性质的相关性较弱，主要与毛管持水量有一定的相关关系。

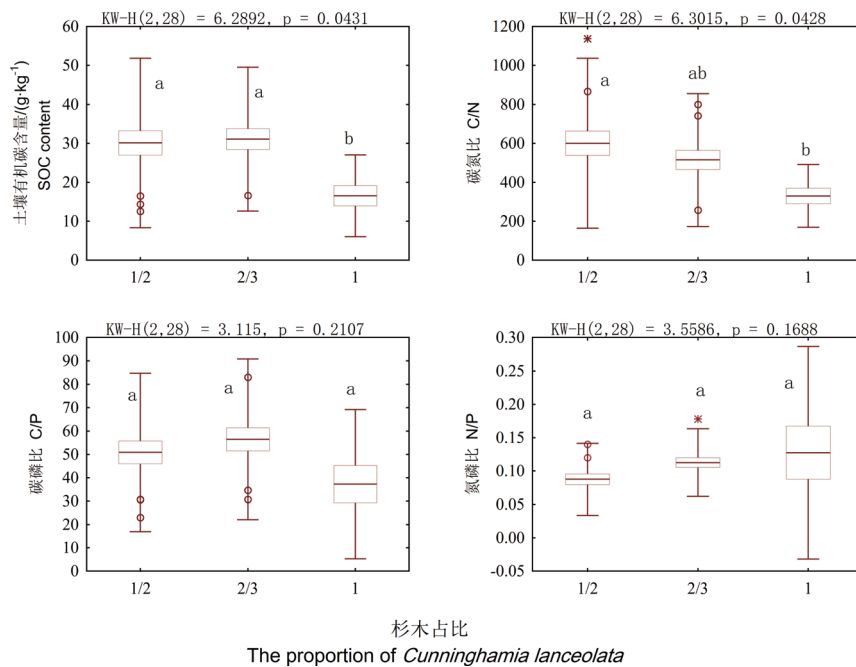


Figure 2 The differences of soil ecological stoichiometry in different proportions of *Cunninghamia lanceolata*

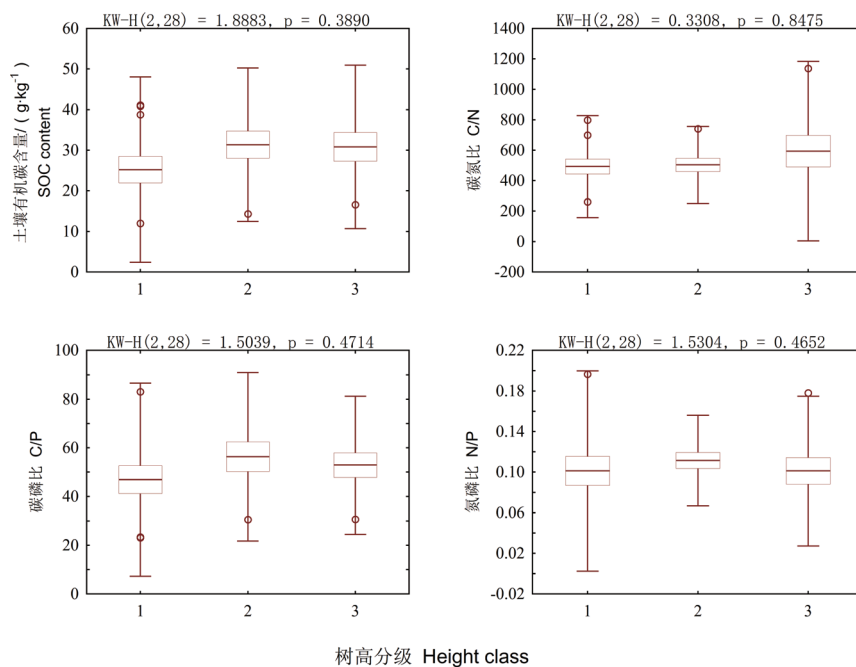


Figure 3 The differences of soil ecological stoichiometry in different height classes of *Cunninghamia lanceolata*

2.4 林分结构因子对土壤生态化学计量的影响

林木不同高度级下土壤生态化学计量差异性如图 3 所示。土壤有机碳含量、碳氮比、碳磷比、氮磷比在不同高度级下均无显著差异。土壤有机碳含量随着高度级升高,呈现先较快的升高,后微弱降低的趋势。碳氮比随着高度级升高,呈现先微弱升高,后较快升高的趋势。碳磷比变化趋势与土壤有机碳含量较为一致。氮磷比随着高度级升高,呈现先微弱升高,后微弱降低趋势。

林木不同径级下土壤生态化学计量差异性如图 4 所示。土壤有机碳含量、碳磷比在不同径级间有极显著差异,碳氮比在不同径级间有显著差异,而氮磷比没有显著差异。土壤有机碳含量随着径级升高,呈现出显著升高的趋势。碳氮比随着径级升高,呈现出先微弱升高,再显著升高的

趋势。碳磷比随着径级升高,呈现出先显著升高,再微弱升高的趋势。氮磷比随着径级升高,呈现出先微弱升高,再微弱降低的趋势。

3 结论与讨论

本研究中,杉木混交林的土壤生态化学计量,从平均值来看,相比较土壤有机碳、全氮、全磷含量的全国土壤平均水平(分别是 11.12、1.06、0.65 g·kg⁻¹)^[4, 43],土壤有机碳含量明显大于全国土壤平均水平,全氮含量则远低于平均水平,全磷含量则接近平均水平。土壤有机碳含量平均值为 28.56 g·kg⁻¹,而亚热带土壤有机碳含量平均值为 11.96 g·kg^{-1[43]}。土壤有机碳含量远高于平均水平,而土壤有机碳主要来源于地表凋落物,间接说明杉木混交林地表积累了较多的

表 4 土壤生态化学计量与土壤化学因子的非参数相关分析
Table 4 Nonparametric correlation analysis between soil ecological stoichiometry and soil chemical factors

土壤化学因子 Soil chemical factor	土壤有机碳含量/(g·kg ⁻¹) SOC content	碳氮比 C/N	碳磷比 C/P	氮磷比 N/P
pH	0.29	0.02	0.31	0.34
全氮含量 TN content	0.39*	-0.18	0.52**	0.95**
碱解氮含量 AvN content	0.54**	0.06	0.50**	0.65**
全磷含量 TP content	0.48**	0.55**	0.17	-0.27
速效磷含量 AvP content	0.28	0.08	0.18	0.31
全钾含量 TK content	0.43*	0.46*	0.37	0.02
速效钾含量 AvK content	0.30	-0.05	0.22	0.41*
土壤有机碳含量 SOC content	1.00	0.78**	0.92**	0.34
碳氮比 C/N	0.78**	1.00	0.67**	-0.22
碳磷比 C/P	0.92**	0.67**	1.00	0.53**
氮磷比 N/P	0.34	-0.22	0.53**	1.00

注:星号表示显著水平,**P*<0.05;***P*<0.01。
Note: asterisks indicate significant level, * *P*<0.05. ** *P*<0.01.

表 5 土壤生态化学计量与土壤物理因子的非参数相关分析
Table 5 Nonparametric correlation analysis between soil ecological stoichiometry and soil physical factors

土壤物理因子 Soil physical factor	土壤有机碳含量 SOC content/(g·kg ⁻¹)	碳氮比 C/N	碳磷比 C/P	氮磷比 N/P
自然含水量 NMC	0.02	-0.13	0.21	0.41
土壤容重 BD	-0.45	-0.50	-0.36	0.06
毛管持水量 CMC	0.62*	0.71**	0.45	-0.21
总空隙度 BP	0.45	0.50	0.36	-0.06
毛管孔隙度 CP	0.48	0.67**	0.27	-0.44
非毛管孔隙度 NCP	0.16	0.03	0.27	0.36
通气孔隙度 AP	0.45	0.50	0.36	-0.06

注:星号表示显著水平,**P*<0.05;***P*<0.01。
Note: asterisks indicate significant level, * *P*<0.05. ** *P*<0.01.

凋落物。同属南亚热带的鼎湖山自然保护区处于演替后期的季风常绿阔叶林、演替中期的针阔混交林和演替初期的马尾松林的土壤有机碳含量分别为 28.29 、 35.97 、 $16.34 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ [44]。杉木混交林土壤有机碳含量平均值超过了有六七十年历史的马尾松林，低于上百年历史的季风常绿阔叶林和针阔混交林，但杉木混交林发育历史仅有 24 年，这表明了杉木混交林在土壤有机碳含量积累上具有明显的积极作用，但也不排除造林前的迹地炼山的原因。其中，混交比例为 1:1 的杉木和火力楠混交林、2:1 的杉木和木荷混交林的土壤有机碳含量丰富，均超过 $39 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，而杉木纯林的含量仅有 $16.52 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。其他研究同样表明，阔叶林的土壤有机碳含量高于针叶纯林含量。比如，孟庆权等 [15] 对中亚热带格氏栲天然林的研究表明，土壤有机碳含量表现为格氏栲天然林 ($53.74 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 格氏栲人工林 ($47.63 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 杉木人工林 ($28.05 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)；曹小玉等 [35] 对湖南省永州市金洞林场的杉木纯林研究发现，从幼龄林到过熟林的土壤有机碳含量最高的仅有 $14.74 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，平均值为 $13.28 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

杉木混交林的全氮含量平均值为 $0.06 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，远低于亚热带全氮含量的平均值 ($1.11 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) [43]，

这可能是由于研究样地长期多轮的杉木连载经营，杉木属于较为速生的树种，从土壤中吸收了大量的氮元素，导致土壤全氮含量低。杉木混交林的全磷含量平均值为 $0.55 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，与亚热带全磷含量平均值接近 ($0.59 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) [43]，明显高于曹小玉等 [35] 的杉木纯林含量 ($0.30 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)，也高于相邻的鼎湖山保护区内的季风常绿阔叶林含量 ($0.23 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) [45]，这说明杉木混交林模式有利于土壤全磷含量的累积。碳氮比、碳磷比、氮磷比平均值在杉木混交林中分别为 524.95、51.3、0.1，在亚热带的平均值分别为 12.1、78、6.4，在鼎湖山保护区内的季风常绿阔叶中平均值分别为 14.24、141.38、9.91 [45]，在湖南省永州市金洞林场的杉木纯林中的平均值分别为 7.85、51.17、6.44 [35]。杉木混交林中的碳氮比过高，氮磷比过低，主要原因是全氮含量太低。杉木混交林中的碳磷比 (51.30) 与曹小玉等 [35]、张莎莎等 [37] 研究中的杉木林地 (51.17 和 46.05) 较为一致，但明显低于梁国华等 [45] 研究的鼎湖山亚热带常绿阔叶林 (141.38)。在杉木混交林中，1:1 的杉木和火力楠混交林、2:1 的杉木和木荷混交林的碳磷比较高，分别为 64.25、69.3，杉木纯林的碳磷比较低，为 37.25。虽然杉木阔叶混交模式比杉木纯林模式的

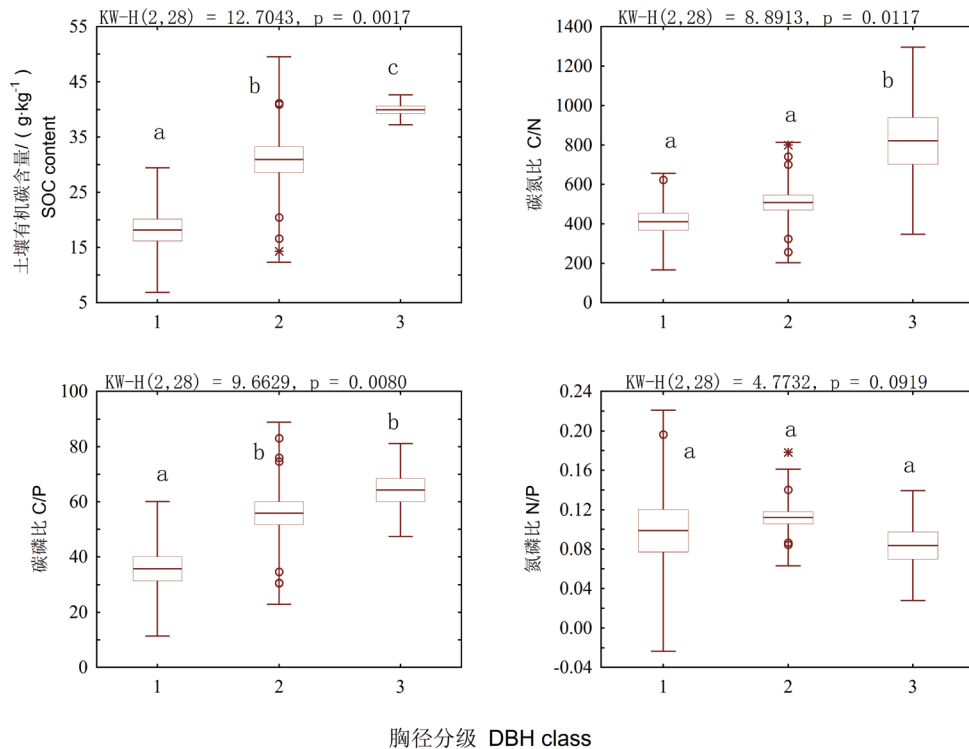


图 4 不同级下土壤生态化学计量的差异性

Figure 4 The differences of soil ecological stoichiometry in different DHB classes of *Cunninghamia lanceolata*

碳磷比高,但比同纬度带的其他常绿阔叶林^[15,45]低,主要原因可能是杉木混交林中的全磷含量明显高于常绿阔叶林。

相关性分析可以揭示土壤物理因子与土壤C、N、P含量及其生态化学计量之间的协调关系,有助于对土壤养分做出更合理的解释^[46]。杉木混交林的土壤生态化学计量与全氮含量相关性较强,这与其他杉木纯林^[35]、针阔混交林^[47]的研究一致^[35],但与鼎湖山季风常绿阔叶林^[15]的研究不同。杉木混交林土壤生态化学计量和全磷含量的相关性与其他杉木纯林、针阔混交林、季风常绿阔叶林的不相同^[35,45,47]。另外,本研究中土壤生态化学计量各指标间的相关性较其他的研究结果弱^[35,45,47]。土壤生态化学计量在不同树高级下均无显著差异,但在不同径级间有显著变化(氮磷比除外),这说明林分结构中树木胸径对土壤生态化学计量影响更为主要。

林分组成的改变会引起凋落物数量和质量、土壤结构等变化,从而影响土壤碳、氮、磷含量^[48-49]。杉木的叶片多为厚革质,富含大量的木质素、纤维素等难分解物质,而阔叶树种凋落物反之^[25],杉木阔叶树混交林中,阔叶树凋落物更易于分解,促进了土壤养分转化速率,杉木混交林对比杉木林能明显提高土壤有机碳,更好的调节土壤生态化学计量,其中,混交比例为1:1的杉木和火力楠混交林表现更优。

土壤有机碳含量、碳氮比、碳磷比在不同杉木混交林模式间有极显著差异,而氮磷比没有差异。各土壤生态化学计量在不同杉木混交林间的变化趋势并不一致。土壤生态化学计量与土壤化学因子相关性较强,与土壤物理因子相关性较弱。其中,与土壤化学因子中全氮含量、碱解氮含量的相关性较强,与土壤物理因子中的毛管持水量有关。土壤有机碳含量、碳氮比、碳磷比在不同树木高度级下均无显著差异,而在不同径级间均有显著差异。随着林木径级升高,土壤有机碳含量、碳氮比、碳磷比呈现出显著升高趋势,氮磷比呈现出降低趋势。杉木混交林对比杉木纯林能明显提高土壤有机碳含量,积累土壤养分,改良土壤性状。其中,混交比例为1:1的杉木和火力楠混交林表现更优。

参考文献

- [1] 孙小东, 志英, 杨红玲, 等. 中国北方典型风沙区土壤碳氮磷化学计量特征[J]. 中国沙漠, 2018, 38(6): 1209-1218.
- [2] 张珂, 苏永中, 王婷, 等. 荒漠绿洲区不同种植年限人工梭梭林土壤化学计量特征[J]. 生态学报, 2016, 36(11): 3235-3243.
- [3] 勾啸, 张蒙, 李海滨. 广东莲花山不同海拔梯度下森林土壤养分和化学计量特征[J]. 林业与环境科学, 2019, 35(3): 82-86.
- [4] 魏亚娟, 党晓宏, 汪季, 等. 不同演化阶段白刺灌丛沙堆土壤生态化学计量特征[J]. 水土保持学报, 2021, 35(2): 377-384.
- [5] HAN W, FANG J, GUO D. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China[J]. New Phytologist, 2005, 168(2): 377-385.
- [6] 谭琳, 刘梦芸, 甘先华, 等. 深圳市级自然保护区土壤化学计量特征与植物多样性的相关性[J]. 林业与环境科学, 2020, 36(6): 20-25.
- [7] 秦娟, 孔海燕, 刘华. 马尾松不同林型土壤C、N、P、K的化学计量特征[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2016, 44(2): 68-76.
- [8] 孙红斌, 王佐霖, 朱子维, 等. 深圳市坝光湿地园银叶树群落优势树种与土壤生态化学计量特征分析[J]. 林业与环境科学, 2018, 34(6): 15-20.
- [9] 刘若莎, 王冬梅. 黄土高原高寒区不同人工林土壤养分及生态化学计量特征[J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(1): 88-95.
- [10] 温晨, 杨智姣, 杨磊, 等. 半干旱黄土小流域不同植被类型植物与土壤生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2021, 41(5): 1824-1834.
- [11] 张继辉, 蔡道雄, 卢立华, 等. 不同林龄柚木人工林土壤生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2020, 40(16): 5718-5728.
- [12] 段春燕, 徐广平, 沈育伊, 等. 桂北不同林龄桉树人工林土壤生态化学计量特征[J]. 林业资源管理, 2018(6): 117-124.
- [13] 方昕, 郭雪莲, 郑荣波, 等. 不同放牧干扰对滇西北高原泥炭沼泽土壤生态化学计量特征的影响[J]. 水土保持研究, 2020, 27(2): 9-14.
- [14] 熊梅, 乔茅蓉, 杨阳, 等. 不同载畜率下短花针茅和土壤生态化学计量特征研究[J]. 草业学报, 2021, 30(2): 212-219.
- [15] 孟庆权, 葛露露, 林宇, 等. 格氏栲天然林及人工林和杉木人工林生活叶-凋落叶-土壤生态化学计量特征[J]. 西北林学院学报, 2019, 34(6): 8-15.
- [16] 张亚冰, 吕文强, 易武英, 等. 贵州月亮山5种森林类型

- 土壤生态化学计量特征研究[J].热带亚热带植物学报, 2016, 24(6): 617-625.
- [17] 邱勇斌, 凌高潮, 郑文华, 等.间伐对杉木人工林不同组分碳、氮、磷含量及其生态化学计量关系的影响[J].林业科学研究, 2019, 32(4): 64-69.
- [18] 陈春如, 安伟莉, 高艳芳, 等.粤北不同密度杉木林下植被的物种多样性比较[J].林业与环境科学, 2020, 36(5): 73-78.
- [19] 张伟红, 王润辉, 郑会全, 等.南岭山区杉木大径材高效培育土壤调查分析[J].林业与环境科学, 2018, 34(4): 48-53.
- [20] 索沛衡, 杜大俊, 王玉哲, 等.杉木连栽对土壤氮含量和氮转化酶活性的影响[J].森林与环境学报, 2019, 39(2): 113-119.
- [21] 何贵平, 徐金良, 徐永勤, 等.不同立地杉木家系幼林生长差异[J].浙江农林大学学报, 2018, 35(3): 453-458.
- [22] 姜俊, 刘宪钊, 贾宏炎, 等.杉木人工林近自然化改造对林下植被多样性和土壤理化性质的影响[J].北京林业大学学报, 2019, 41(5): 170-177.
- [23] 宋思梦, 周扬, 张健.不同立地类型杉木人工林叶片的碳氮磷生态化学计量特征[J].西北农林科技大学学报(自然科学版), 2021(6): 2-17.
- [24] 胡小燕, 段爱国, 张建国, 等.广西大青山杉木人工林碳氮磷生态化学计量特征[J].生态学报, 2020, 40(4): 1207-1218.
- [25] 孙思怡, 卢胜旭, 陆宇明, 等.杉木林下套种阔叶树对土壤生态酶活性及其化学计量比的影响[J].林业科学研究, 2021, 34(1): 106-113.
- [26] 张星星, 杨柳明, 陈忠, 等.中亚热带不同母质和森林类型土壤生态酶化学计量特征[J].生态学报, 2018, 38(16): 5828-5836.
- [27] 王涛, 万晓华, 程蕾, 等.杉木采伐迹地营造阔叶树种对土壤微生物生态化学计量特征的影响[J].应用生态学报, 2020, 31(11): 3851-3858.
- [28] 王书丽, 黄立君, 袁希, 等.氮添加和升温对杉木林凋落物分解及碳氮磷化学计量特征的影响[J].生态学杂志, 2020, 39(9): 2842-2850.
- [29] 沈芳芳, 吴建平, 樊后保, 等.杉木人工林凋落物生态化学计量与土壤有效养分对长期模拟氮沉降的响应[J].生态学报, 2018, 38(20): 7477-7487.
- [30] 王瑞祺, 罗丽莹, 孙嘉伟, 等.会同成熟杉木器官C:N:P生态化学计量的动态特征[J].中南林业科技大学学报, 2020, 40(4): 64-71.
- [31] 吕文强, 周传艳, 闫俊华, 等.贵州省喀斯特地区4种典型人工林叶片化学计量特征[J].浙江农林大学学报, 2016, 33(6): 984-990.
- [32] 廖珂, 沈芳芳, 刘文飞, 等.长期氮沉降下杉木人工林凋落物与土壤的C、N、P化学计量特征[J].广西植物, 2020, 40(11): 1551-1562.
- [33] 王巧, 张君波, 雷赵枫, 等.模拟氮沉降和磷添加对杉木生态化学计量学特征的影响[J].生态学杂志, 2019, 38(2): 368-375.
- [34] 沈芳芳, 李燕燕, 刘文飞, 等.长期氮沉降对杉木人工林叶、枝氮磷养分再吸收的影响[J].植物生态学报, 2018, 42(9): 926-937.
- [35] 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.
- [36] 陈安娜, 王光军, 陈婵, 等.亚热带不同林龄杉木林叶-根-土氮磷化学计量特征[J].生态学报, 2018, 38(11): 4027-4036.
- [37] 张莎莎, 李爱琴, 王会荣, 等.不同海拔杉木人工林土壤碳氮磷生态化学计量特征[J].生态环境学报, 2020, 29(1): 97-104.
- [38] 张栋, 杨振意, 李国新, 等.华南地区7种阔叶树种早期生长表现[J].湖南林业科技, 2011, 38(6): 26-29.
- [39] 何朝阳, 龚益广.西江林场植物资源利用规划[J].科技资讯, 2008(2): 186.
- [40] 钱志能, 龚益广, 李国新.西江林场杉木的经济轮伐期[J].中南林学院学报, 2006, 26(5): 117-119.
- [41] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京: 中国农业出版社, 2005.
- [42] HE S Y, ZHONG Y L, SUN Y D, et al.Topography-associated thermal gradient predicts warming effects on woody plant structural diversity in a subtropical forest[J].Scientific Reports, 2017, 7(1): 1-10.
- [43] TIAN H, CHEN G, ZHANG C.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.
- [44] 张慧玲, 吴建平, 熊鑫, 等.南亚热带森林土壤碳库稳定性与碳库管理指数对模拟酸雨的响应[J].生态学报, 2018, 38(2): 657-667.
- [45] 梁国华, 张德强, 卢雨宏, 等.鼎湖山季风常绿阔叶林土壤C: N: P生态化学计量特征对长期模拟酸雨的响应[J].生态环境学报, 2018, 27(5): 844-851.
- [46] 周晓兵, 陶冶, 吴林, 等.塔克拉玛干沙漠南缘荒漠绿洲过渡带不同土地利用影响下土壤化学计量特征[J].生态学报, 2019, 39(3): 969-980.
- [47] 冼伟光, 周丽, 唐洪辉, 等.不同林龄针阔混交林土壤生态化学计量特征[J].广东林业科技, 2015, 31(1): 1-6.
- [48] Juan C, álvarez Y, Angelina M Y, et al.Variation in vegetation structure and soil properties related to land use history of old-growth and secondary tropical dry forests in northwest Mexico[J].Forest Ecology and Management, 2008, 256(3): 355-366.
- [49] QUIDEAU S.Vegetation control on soil organic matter dynamics[J].Organic Geochemistry, 2001, 32(2): 247-252.