

热带海岸防护林带不同起源树种叶片— 土壤的生态化学计量特征

杨青青, 杜志瑚

[海南省林业科学研究院(海南省红树林研究院), 海南 海口 571100]

摘要: [目的] 探讨海南岛热带海岸防护林带不同起源树种叶片及土壤生态化学计量特征差异, 为海岸防护林生态修复工作提供理论参考。[方法] 采用样方调查的方法, 调查了海南岛万宁市海岸线 200 m 范围内木麻黄、青皮、拉关木和水椰 4 个树种叶片和土壤 C, N, P 的生态化学计量特征。[结果] ① 不论是红树还是红树植物, 同一类型下, 本土天然树种叶片 C, N, P 含量显著大于或等于外来人工种植树种, 其中青皮叶片 C, N, P 含量分别为 457.04, 16.77 和 1.17 g/kg, 均显著高于木麻黄; ② 从叶片养分变化特征来看, 红树植物的生长可能受到 N 的限制; 而非红树植物的生长可能受到 P 的限制; ③ 从土壤养分变化特征来看, 4 种树种林地土壤 N 元素偏低, 主要限制性元素为 P。[结论] 在海岸生态修复过程中, 可以首选本土天然林树种作为海岸防护林种植优势树种。

关键词: 水椰; 防护林; 叶片; 土壤; 化学计量比

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)02-0156-08

中图分类号: S714

文献参数: 杨青青, 杜志瑚. 热带海岸防护林带不同起源树种叶片—土壤的生态化学计量特征[J]. 水土保持通报, 2023, 43(2): 156-163. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.02.019; Yang Qingqing, Du Zhihu. Leaf and soil ecological stoichiometric characteristics of tree species of different origins in a tropical coastal shelterbelt belt of Hainan Island [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(2): 156-163.

Leaf and Soil Ecological Stoichiometric Characteristics of Tree Species of Different Origins in a Tropical Coastal Shelterbelt Belt of Hainan Island

Yang Qingqing, Du Zhihu

[Hainan Academy of Forestry (Hainan Academy of Mangrove), Haikou, Hainan 571100, China]

Abstract: [Objective] The objective of this study was to determine the differences in ecological stoichiometric characteristics of leaves and soil for different tree species of different origins in a tropical coastal shelterbelt of Hainan Island in order to provide a theoretical reference for the ecological restoration of coastal shelterbelts. [Methods] The ecological stoichiometric characteristics of C, N, and P in the soil and leaves of four species (*Casuarina equisetifolia*, *Vatica mangachapoi*, *Laguncularia racemosa*, and *Nypa fructicans*) within 200 m of the coastline of Wanning City, Hainan Island, were investigated by sampling method. [Results] ① For both non-mangrove and mangrove plants, the C, N, and P contents of the leaves of native natural tree species were significantly greater than or equal to the C, N, and P contents of exotic artificial tree species. The C, N, and P contents of the leaves of *Vatica mangachapoi* were 457.04, 16.77, and 1.17 g/kg, respectively, all of which were significantly higher than the values observed for *Casuarina equisetifolia*. ② In terms of leaf nutrient change characteristics, the growth of water coconut and mangrove plants may be limited by N. However, the growth of casuarina and non-mangrove plants may be limited by P. ③ In terms of soil nutrient change characteristics, N was low and P was the main limiting element in woodland soil for the four tree species. [Conclusion] In the process of coastal ecological restoration, native natural forest species should

收稿日期: 2022-02-12

修回日期: 2022-08-08

资助项目: 海南省林业局专项“海南省第一次全国森林火灾风险普查项目”

第一作者: 杨青青(1992—), 男(汉族), 江西省瑞金市人, 硕士, 林业工程师, 主要从事森林生态系统研究。Email: 624767243@qq.com。

通讯作者: 杜志瑚(1971—), 男(汉族), 海南省乐东县人, 本科, 林业高级工程师, 主要从事林业调查规划工作。Email: 2102225134@qq.com。

be preferred as the dominant species for coastal protection forest planting.

Keywords: water coconut; protection forest; blade; soil; stoichiometric ratio

植物生态化学计量学是生态化学计量学的重要分支,主要研究植物器官元素含量的计量特征,以及它们与环境因子、生态系统功能之间的关系^[1]。碳(C)、氮(N)、磷(P)作为组成植物体的基本元素,对植物的生长发育及其功能运行具有重要意义^[2]。从生态系统地上和地下的角度,来分析土壤养分—植物生态化学计量特征间的耦合关系是生态学中的一个热点问题,但养分在土壤—植物互动中发挥的功能尚不清晰。一些局部地区或针对特定类群的调查研究,在探讨植物生态化学计量特征与土壤因子之间的关系,已获得了一些数据和结论。Manuel等^[3]人研究得出土壤化学计量比(C/N)与森林生态系统多功能性呈负相关,是影响森林生态系统多功能变化的主要环境预测因子;Anvar等^[4]研究发现森林土壤化学计量与土壤微生物多样性密切相关;夏大娟等^[5]人研究认为,滨海湿地盐生植物受N,P共同限制,高盐环境与养分亏缺成为该区植被恢复的限制因子;钟欣孜等^[6]研究发现,鄱阳湖湿地植物叶片N/P化学计量关系具有稳定性特征,不受土壤养分变化的影响。上述研究表明,生态化学计量学为探索森林生态系统养分循环规律和稳定机制提供了重要的方法。

中国海南岛临近热带气旋多发区,常受台风袭扰。自20世纪50年代以来,当地政府有关部门积极实施沿海防护林建设工程和红树林生态修复工程,大部分海岸基干林带得到了修复和闭环。海南岛海岸带防护林修复的主要方法有2种:①尽量采用近自然修复技术新增乡土树种天然林的面积,主要是红树林、青皮林等;②通过新造林增加人工林的面积,新造人工林树种比较常见有木麻黄、拉关木等。研究海南岛海岸防护林带生态修复工程主要先锋树种叶片及土壤生态化学计量特征,有利于探明该地区不同类型森林养分循环规律和稳定机制,可为海岸区域森林生态系统修复工程的实施提供理论指导。目前,对于热带海岸防护林带生态修复工程主要先锋树种叶片及土壤生态化学计量特征的研究报道还较为鲜少,特别是对于外来树种人工林和乡土树种天然林的比较。鉴于此,本研究以海南万宁石梅湾海岸带外来树种人工林(木麻黄人工林、拉关木人工林)和乡土树种天然林(青皮天然林、水椰红树林)为研究对象,测定树冠层叶片、土壤的C,N,P含量,研究旨在揭示外来树种人工林和乡土树种天然林主要树种叶片—土壤C,N,P化学计量的变化差异,准确评估海岸防护林养

分供应及限制情况,研究结果可为中国乃至全球海岸防护林生态修复工作提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区域位于万宁市石梅湾青皮林自然保护区(经度110.18,纬度18.60)。研究样地分布于海岸线向内陆延伸200 m范围内,是具有代表性的沿海防护林基干林带。气候类型为热带海洋性季风气候,年平均气温24.5℃,无寒潮与霜冻,年平均降水量2032 mm,降水集中在5—10月,年均日照时间2230 h。森林的主要类型按起源分有天然林和人工林,天然林主要树种是青皮(*Vatica mangachapoi*)、水椰(*Nypa fructicans*),人工林主要树种是木麻黄(*Casuarina equisetifolia*)、拉关木(*Laguncularia racemosa*)。青皮是海南乡土濒危树种、国家Ⅱ级重点保护野生植物,是东南亚热带常绿季雨林的特征种、建群种和优势种,其在生态、经济等方面都具有极高的价值,该区青皮林是目前国内唯一的保存最完整、面积最大的滨海青皮林群落;水椰是典型的热带海岸真红树植物、国家Ⅱ级重点保护野生植物,在我国仅天然分布于海南岛;木麻黄作为海南沿海防护林的主要造林树种之一,原产于澳大利亚,具有良好抗逆能力与水土保持功效;拉关木是使君子科拉关木属真红树植物,是海南红树林植被恢复工程的主要外来引种树种之一,原产于美洲东岸和非洲西部的沿海滩涂,具有较强的繁殖力和扩张性^[7]。木麻黄和青皮生长在沿海沙壤地带,而拉关木和水椰生长在沿海港湾泥沼地带。

1.2 植物样品采集

(1) 样方设置。于2020年5月在青皮林自然保护区范围内,根据森林资源分布情况,选取31个典型的小样方(5 m×5 m),记录各个小样方的经纬度坐标,每个小样方都为单一物种(表1)。

(2) 叶片采集。在每个小样方内使用高枝剪采集冠层顶端成熟的叶片,尽可能覆盖小样方的不同部位(采集树冠4个方位的叶片),采集量鲜重大约50~100 g。将采集的叶子混合装在牛皮纸内带回实验室,用烘干箱先杀青3~5 min,然后调温80℃烘干至恒重,最后用粉碎机粉碎后用于分析叶片总碳、总氮和总磷含量。

表 1 研究树种基本情况

Table 1 The basic information of studied tree species

起源	树种	科名	属名	生活型	类型	小样方量/个
天然	青皮	龙脑香科	青梅属	常绿乔木	非红树	19
天然	水椰	棕榈科	水椰属	常绿灌木	红树	3
人工	木麻黄	木麻黄科	木麻黄属	常绿乔木	非红树	6
人工	拉关木	使君子科	拉关木属	小乔木	红树	3

1.3 土壤样品采集

土壤样品的采集与叶片采集同时进行。在每个小样方内采用小铁锹采集土样,挖去表层(0~5 或 10 cm)的枯枝落叶,采集下方 0—10 cm 的土壤(鲜重约 500 g),装到样品袋内,贴上标签,带回实验室。将土壤样品进行自然风干,挑去活体根系,过 0.25 mm 筛,用于土壤 C,N,P 含量的分析。

1.4 样品 C,N,P 分析

(1) 土壤样品指标的测定。土壤有机碳含量采用重铬酸钾氧化—分光光度法(HJ615-2011)^[8];全氮采用半微量开氏法(NY/T53-1987)^[9];全磷采用碱熔法和酸溶法(LY/T1232-2015)^[10];pH 值采用电位法(NY/T1377-2007)^[11]。

(2) 叶片样品指标的测定。叶片全碳参照《陆地生物群落调查观测与分析》^[12];全氮采用凯氏定氮仪法(NY/T2017-2011)^[13];全磷采用电感耦合等离子体发射光谱仪法(GB5009.268-2016)^[14]。

1.5 数据分析

运用 Excel 2010 和 SPSS 20.0 统计分析软件对测定数据进行整理,分析不同树种叶片和土壤 C,N,P 含量以及 C/N,C/P,N/P。所有统计数据以平均值及标准误差表示,采用单因素方差分析(one-way ANOVA)的最小显著差异(LSD)法对不同树种叶片

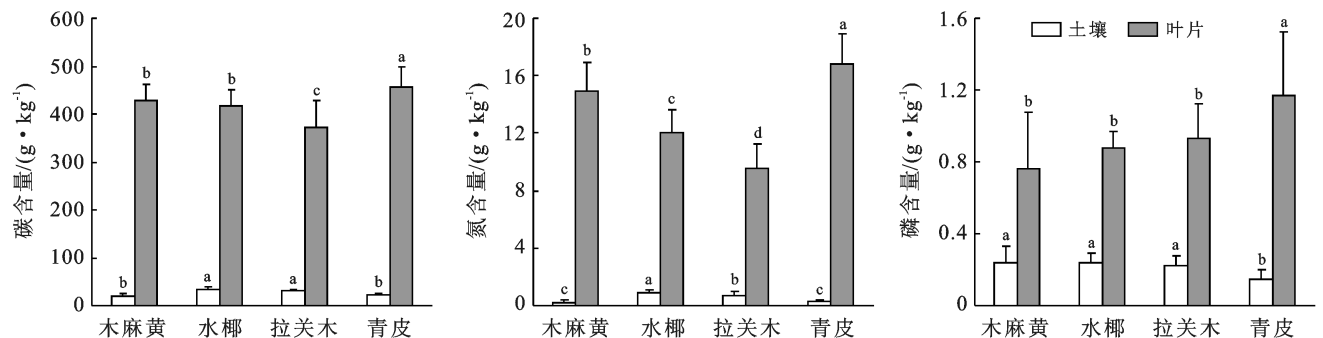
和土壤相对应的 C,N,P 含量以及 C/N,C/P,N/P 进行差异性检验,显著性水平设定为 $\alpha=0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 不同树种叶片—土壤的 C,N,P 含量

如图 1 所示,4 个树种叶片 C 含量变化范围为 297.00~558.00 g/kg,均值为 440.85 g/kg,表现为:青皮>木麻黄>水椰>拉关木,土壤 C 含量变化范围为 11.86~39.50 g/kg,均值为 22.76 g/kg,表现为:水椰>拉关木>青皮>木麻黄。4 个树种叶片 C 含量均大于土壤 C 含量。

4 个树种叶片 N 含量变化范围为 7.08~25.46 g/kg,均值为 15.39 g/kg,表现为:青皮>木麻黄>水椰>拉关;土壤 N 含量变化范围为 0.02~1.29 g/kg,均值为 0.33 g/kg,表现为:水椰>拉关木>青皮>木麻黄。4 个树种叶片 N 含量均大于土壤 N 含量。4 个树种叶片 P 含量变化范围为 0.42~1.86 g/kg,均值为 1.04 g/kg,青皮显著高于木麻黄、水椰、拉关木,且木麻黄、水椰、拉关木之间差异不显著;土壤 P 含量变化范围为 0.06~0.42 g/kg,均值为 0.18 g/kg,木麻黄、水椰、拉关木显著高于青皮,且木麻黄、水椰、拉关木之间差异不显著。4 个树种叶片 P 含量均高于土壤 P 含量。



注:不同小写字母表示在同一叶片或土壤中碳、氮、磷含量在 4 个不同林分间的差异($p < 0.05$)。下同。

图 1 不同树种叶片和土壤的碳、氮和磷含量

Fig.1 Carbon, nitrogen and phosphorus contents in leaves and soil of different tree species

2.2 不同树种叶片—土壤的 C,N,P 生态化学计量特征

如图 2 所示,4 个树种叶片的 C/P,N/P 在各林

分中均高于土壤,反之 C/N 在土壤中高于叶片。4 个树种叶片的 C/N 变化范围为 15.67~49.14,均值为 29.71,水椰、拉关木显著高于青皮、木麻黄,但是水椰

和拉关木之间、青皮和木麻黄之间差异不显著。土壤 C/N 变化范围为 27.33~682.13,均值为 133.98,表现为:木麻黄>青皮>拉关木>水椰。4 个树种叶片 C/P 变化范围为 251.12~1 057.82,均值为 476.40,其中木麻黄 C/P 显著高于其余建群种。土壤 C/P 变化

范围为 44.76~407.34,均值为 141.08;以木麻黄林最低,且显著低于其余林分。4 个树种叶片 N/P 变化范围为 7.60~41.95,均值为 16.70,以木麻黄最高,显著高于其余建群种。土壤 N/P 变化范围为 0.12~6.07,均值为 1.81,其中红树林显著高于木麻黄林和青皮林。

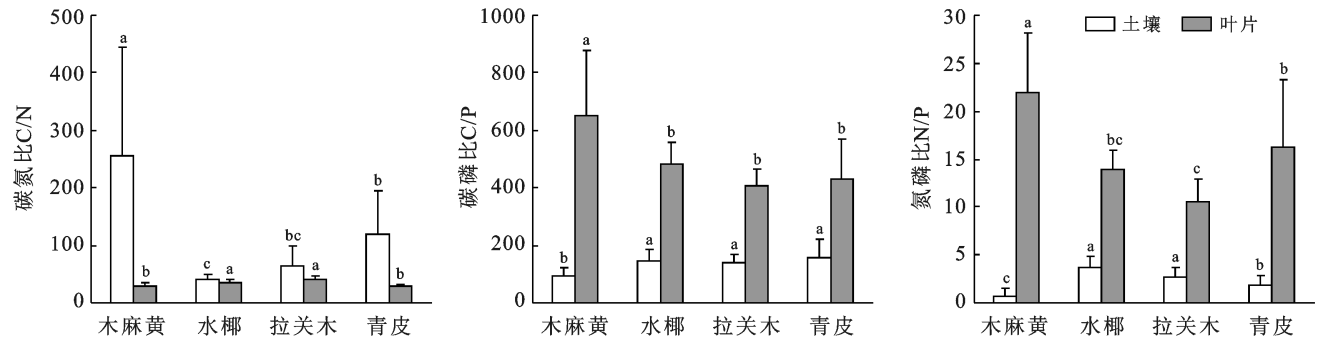


图 2 不同林分建群种和土壤的 C/N,C/P 和 N/P 特征

Fig.2 C/N, C/P and N/P characteristics of different tree species and soil

2.3 不同树种叶片 C,N,P 及化学计量之间的相关性

对该区 4 个树种的叶片 C,N,P 及化学计量比(C/N,C/P,N/P)进行相关性分析(表 2)。总体来看,非红树树种(木麻黄、青皮)叶片 C,N,P 及化学计量比(C/N,C/P,N/P)之间的相关性更为紧密,青皮

树表现尤为突出,其叶片 C,N,P 及化学计量比之间均表现出显著相关性。红树树种(水椰、拉关木)叶片 C,N,P 及化学计量比(C/N,C/P,N/P)之间的存在部分显著相关性,其中叶片化学计量比(C/N,C/P,N/P)之间的相关性较为紧密。

表 2 4 个树种叶片 C,N,P 及其化学计量比变化特征

Table 2 Leaf C, N, P and their stoichiometric ratios of four tree species

树种	指标	全氮	全磷	碳氮比	碳磷比	氮磷比
木麻黄	全碳	-0.259	-0.086	0.642**	0.445*	0.148
	全氮	1	0.544**	-0.895**	-0.540**	-0.150
	全磷	—	1	-0.434*	-0.857**	-0.844**
	碳氮比	—	—	1	0.603**	0.151
	碳磷比	—	—	—	1	0.872**
青皮	全碳	-0.184	0.535**	0.626**	-0.254*	-0.471**
	全氮	1	-0.261*	-0.833**	0.251*	0.591**
	全磷	—	1	0.429**	-0.919**	-0.883**
	碳氮比	—	—	1	-0.277*	-0.624**
	碳磷比	—	—	—	1	0.888**
水椰	全碳	-0.039	-0.445	0.600	0.740*	0.244
	全氮	1	0.200	-0.813**	-0.159	0.705*
	全磷	—	1	-0.330	-0.924**	-0.547
	碳氮比	—	—	1	0.492	-0.474
	碳磷比	—	—	—	1	0.518
拉关木	全碳	0.566	0.758*	0.326	-0.081	-0.239
	全氮	1	0.374	-0.581	0.011	0.464
	全磷	—	1	0.265	-0.706*	-0.637*
	碳氮比	—	—	1	-0.008	-0.720*
	碳磷比	—	—	—	1	0.691*

注: * 表示显著相关性($p < 0.05$); ** 表示极显著相关($p < 0.01$)。下同。

2.4 不同树种土壤 C,N,P 及化学计量之间的相关性

不同林分类型土壤相关性的分析结果详见表 3。4 种林分类型均表现为土壤 N 与土壤 C 呈显著 ($p < 0.05$) 及极显著正相关 ($p < 0.01$); 土壤 C/N 与土壤 N 呈极显著负相关 ($p < 0.01$); 土壤 C/P 与土壤 P 呈显著及极显著负相关 ($p < 0.01$); 土壤 N/P 与土壤 C,N 呈极显著正相关 ($p < 0.01$), 与土壤 C/N 呈极显著负相关 (水椰土壤除外)。不同林分类型土壤相关性分析也存在差异, 表现为木麻黄和拉关木土壤 P 与土壤 C 呈显著及极显著正相关; 拉关木土壤 P 与土壤 N 呈极显著正相关; 木麻黄和拉关木土壤 C/N 与土壤 C,P 呈极显著负相关; 青皮林土壤 C/P 与土壤 C 呈极显著正相关; 拉关木土壤 C/P 与土壤 N 呈显著负相关, 与土壤 C/N

呈极显著正相关; 青皮林土壤 N/P 与土壤 P 呈显著负相关, 与土壤 C/P 呈极显著正相关; 水椰土壤 N/P 与土壤 C/P 呈极显著正相关; 拉关木土壤 N/P 与土壤 P 呈极显著正相关。

2.5 不同树种叶片与土壤 C,N,P 及化学计量特征的相关性

对该区 4 个树种叶片及其土壤 C,N,P 及化学计量比进行相关性分析 (表 4)。结果表明, 水椰叶片及其土壤 C,N,P 及化学计量比之间无显著相关性, 其余林分类型 (建群种) 叶片及其土壤 C,N,P 及化学计量比之间存在少量显著相关性, 其中拉关木的叶片 TC 与土壤 C,N,P 及其化学计量之间均存在显著及极显著相关。

表 3 不同树种林地土壤 C,N,P 及其化学计量比变化特征

Table 3 Changes of soil C, N, P and their stoichiometric ratios in woodland of different tree species

林分	指标	全氮	全磷	碳氮比	碳磷比	氮磷比
木麻黄林	有机碳	0.808**	0.434*	-0.541**	0.162	0.744**
	全氮	1	0.284	-0.587**	0.166	0.957**
	全磷	—	1	-0.610**	-0.777**	0.095
	碳氮比	—	—	1	0.305	-0.570**
	碳磷比	—	—	—	1	0.341
青皮林	有机碳	0.344**	0.088	0.056	0.508**	0.345**
	全氮	1	0.181	-0.672**	-0.019	0.865**
	全磷	—	1	-0.139	-0.725**	-0.238*
	碳氮比	—	—	1	0.201	-0.627**
	碳磷比	—	—	—	1	0.372**
水椰林	有机碳	0.723*	0.044	-0.159	0.601	0.664*
	全氮	1	0.353	-0.767**	0.190	0.660*
	全磷	—	1	-0.519	-0.754*	-0.437
	碳氮比	—	—	1	0.267	-0.343
	碳磷比	—	—	—	1	0.804**
拉关木林	有机碳	0.852**	0.849**	-0.710*	-0.404	0.817**
	全氮	1	0.933**	-0.875**	-0.640*	0.980**
	全磷	—	1	-0.920**	-0.809**	0.875**
	碳氮比	—	—	1	0.854**	-0.885**
	碳磷比	—	—	—	1	-0.590

3 讨论

3.1 不同树种叶片碳磷钾含量和化学计量比变化特征及其影响因子

叶片是植物光合作用的重要器官。有研究认为, 叶片 C 含量高表明植物防御能力较强^[15]。研究区域 4 个树种叶片 C 含量平均水平为 440.85 g/kg, 低于全球植物叶片 C 含量平均水平 (461.6 g/kg)^[16], 这一结果说明该区域主要树种植物 C 储存能力一般、防御能

力较差, 这与外来树种 (拉关木、木麻黄) 的速生特性有一定的关联。4 个树种叶片 C 含量均表现为: 青皮 > 木麻黄 > 水椰 > 拉关木, 可以总结为 2 个特点: ①非红树植物的叶片 C 含量明显高于红树林植物; ②不论是红树还是红树植物, 同一类型下, 本土天然树种要高于外来人工种植树种。以往的研究发现, 叶片 N 含量与光合速率、呼吸速率和生产率之间存在正相关关系, 叶片 N,P 含量之间存在强烈的耦合关系, 叶片 P 含量调控植物生理过程 (尤其是生长速率) 和叶片 N-生产率

之间的关系^[17]。而 4 个植物叶片 N,P 含量平均水平为 15.39 和 1.04 g/kg,均低于全球植物叶片 N(20.6 g/kg)与 P(2.0 g/kg)的平均含量^[18],也低于我国植物叶片 N(20.2 g/kg)与 P(1.5 g/kg)的平均含量^[19],一定程度上说明这 4 类植物生长能力不强。对比发现,非红树植物中青皮叶片 N,P 含量高于外来树种木麻

黄;红树植物中水椰叶片 N 含量高于拉关木,但 P 含量略低。综上所述,乡土树种更有助于改善林地土壤的理化性质,这与张祖峰^[20]研究结论基本一致。前人还证实了树种混交提高林分生产力的假说^[21-22]。下一步可深入开展海岸地区乡土—外来树种种植模式下的林分土壤理化性质变化研究。

表 4 各树种叶片和土壤 C,N,P 及其化学计量特征的相关性分析

Table 4 Correlation analysis of leaf and soil C, N, P and their stoichiometric characteristics of different trees

树种	指标	土壤						
		有机碳	全氮	全磷	碳氮比	碳磷比	氮磷比	
木麻黄	叶片	全碳	0.293	0.376	-0.014	-0.110	0.154	0.382
		全氮	-0.220	-0.339	-0.031	0.227	-0.086	-0.354
		全磷	-0.062	-0.158	0.450*	-0.265	-0.546**	-0.248
		碳氮比	0.358	0.461*	0.069	-0.240	0.107	0.458*
		碳磷比	0.149	0.308	-0.459*	0.171	0.616**	0.417*
		氮磷比	-0.059	0.055	-0.629**	0.402	0.690**	0.192
青皮	叶片	全碳	-0.244*	-0.107	0.033	-0.111	-0.240*	-0.181
		全氮	0.311**	0.208	0.202	-0.142	-0.017	0.124
		全磷	-0.117	-0.294*	-0.110	0.206	0.036	-0.249*
		碳氮比	-0.298**	-0.089	-0.098	-0.013	-0.128	-0.098
		碳磷比	0.063	0.293*	0.219	-0.278*	-0.173	0.173
		氮磷比	0.207	0.334**	0.217	-0.246*	-0.080	0.226
水椰	叶片	全碳	0.015	0.107	0.556	-0.077	-0.495	-0.399
		全氮	-0.051	0.254	-0.014	-0.288	-0.053	0.169
		全磷	0.375	0.147	-0.208	0.092	0.393	0.304
		碳氮比	0.110	-0.088	0.371	0.155	-0.244	-0.352
		碳磷比	-0.252	-0.003	0.401	-0.161	-0.503	-0.359
		氮磷比	-0.324	0.127	0.107	-0.344	-0.314	-0.043
拉关木	叶片	全碳	0.635*	0.846**	0.811**	-0.788**	-0.674*	0.827**
		全氮	0.528	0.781**	0.658*	-0.587	-0.453	0.750*
		全磷	0.440	0.665*	0.551	-0.712*	-0.514	0.746*
		碳氮比	0.039	-0.039	0.099	-0.137	-0.216	-0.038
		碳磷比	0.015	-0.091	0.059	0.199	0.011	-0.233
		氮磷比	0.082	0.043	0.044	0.171	0.140	-0.055

植物体内 C,N,P 组成及分配是一个有机联系的整体,正是由于 C,N,P 的耦合作用制约了生态系统的主要过程,使有机体内形成一定的内稳态机制,对植物的生长发育和生产力而言,其氮磷比数值在一定程度上可以作为森林植物养分元素限制的判断性指标^[23]。通常将植物 N/P<14 和植物 N/P>16 作为两个评价等级,当氮磷比的值低于 14 时,认为植物生长面临 N 限制,而高于 16 时则被认为受 P 限制^[24-25]。此外叶片 C/N,C/P 在一定程度上分别反映了植物的 N 和 P 利用效率^[26]。本研究中,水椰和拉关木叶片 N/P 平均水平分别为 13.84 和 10.58,低于 14,说明水椰和拉关木生长可能受到 N 的限制;木

麻黄和青皮叶片 N/P 平均水平分别为 21.93 和 16.29,高于 16,说明两者的生长可能受到 P 的限制。4 种植物上层树冠叶片的 C/N 和 C/P 均值为 29.71 和 476.40,均高于全球陆生植物叶片水平(C/N=22.5±10.6; C/P=232±145),说明该区 4 种植物对 N 和 P 元素的利用效率较高,与前人对该区植物树冠下层叶片的研究结论一致^[27]。

3.2 不同优势树种森林土壤碳磷钾含量和化学计量比变化特征及其影响因子

植物地上部分元素特征通常与土壤养分含量具有一定相关性^[28]。有研究表明,不同植物种对于土壤养分的响应可以在叶片磷组分的分配方式上得到

体现,并且不同的叶片磷组分再分配模式反映了植物对于环境的适应能力强弱^[29]。本研究中,4种林分表层土壤 C 含量变化范围为 11.86~39.50 g/kg,不同林分平均 C 含量依次为:水椰>拉关木>青皮林>木麻黄林,其中水椰和拉关木土壤 C 含量高于全国表层土壤 C 含量水平(24.56 g/kg),这与红树林特殊的生长区位有关,滩涂浅滩是陆地向海洋过渡的特殊生态系统,滩涂土壤养分较沿海沙地丰富。土壤 N 含量变化范围为 0.02~1.29 g/kg,4种林分土壤平均 N 含量大小排序与土壤平均 C 含量一致,均低于热带雨林季雨林区域表层土壤(0—20 cm)平均氮含量(砖红壤=2.75 g/kg)^[30],其中水椰中叶片、土壤的 N 含量均高于拉关木,说明在土壤母质一致下,土壤全 N 含量因植物不同而存在差异;此外,对比陈毅青等^[23]研究发现,同属沙壤土的青皮林和木麻黄林的氮含量,均呈现出:叶片>凋落物>土壤的关联性,其中,土壤 N 含量与土壤 C 含量显著相关,这与前人的研究结果一致^[31]。4种林分土壤 P 含量变化范围为 0.06~0.42 g/kg,不同林分平均 P 含量依次为:水椰=木麻黄林>拉关木>青皮林,均明显低于全球土壤全 P 水平(2.8 g/kg)。究其原因,与研究区高温多雨等气候有关,有研究表明,降水和温度是影响土壤养分、风化速率变化的关键影响因子,当降水过多和温度较高时,会加大土壤养分淋溶强度和促进风化,促使土壤母质中磷元素的淋失^[32]。以上对比发现,青皮林较木麻黄林更具有丰富的养分含量,水椰较拉关木养分含量丰富,说明相同区域不同树种林地土壤养分含量受多种因素共同影响。

土壤 C/N 和 C/P 可以作为土壤 C, N, P 养分的衡量指标^[30,33]。本研究中,4种林分土壤 C/N 介于 27.33~682.13 之间,均值为 133.98,明显高于中国和世界土壤碳氮比的平均值(11.90 和 13.33)^[34],说明该研究区域土壤有机碳的积累速率大于分解速率,属于有机碳积累发生过程,积累强度大小依次为木麻黄林、青皮林、拉关木、水椰。4种林分土壤 C/P 均值大小依次为青皮(156.27)、水椰(143.35)、拉关木(141.88)、木麻黄(90.88),均高于中国的土壤碳磷比平均水平(61),有研究指出,当土壤碳磷比越大,微生物活性就越高,进而吸收土壤中有效磷,从而提高土壤对磷的固定作用,降低土壤磷的有效性^[35]。从中得知,该研究区 4种林分土壤限制性元素为磷。4种林分土壤 N/P 均值大小依次为水椰(3.65)、拉关木(2.76)、青皮(1.78)、木麻黄(0.70),均低于中国土壤氮磷比的平均值(5.2)^[36],这与该区土壤 N 元素含量低有关。

4 结论

(1) 青皮树叶片 C, N, P 含量分别为 457.04, 16.77 和 1.17 g/kg,显著高于木麻黄林;水椰叶片 C, N 含量(416.60, 12.04 g/kg)高于拉关木。由此认为,相较于外来人工树种,本土天然树种叶片 C, N, P 含量偏大,说明乡土天然树种的生长光合效率、防御能力等方面要优于外来人工树种。

(2) 不同类型植物生长的限制元素存在差异,其中水椰、拉关木红树植物的生长可能受到 N 的限制;而木麻黄、青皮非红树植物的生长可能受到 P 的限制。

(3) 海岸带地区土壤母质元素受降水、气温影响较大,从 4 种树种林地的土壤碳氮磷元素含量来看,初步判断该区土壤母质的限制元素是磷。

[参 考 文 献]

- [1] 田地,严正兵,方精云.植物生态化学计量特征及其主要假说[J].植物生态学报,2021,45(7):682-713.
- [2] Sterner R W, Elser J J. Ecological Stoichiometry: The Biology of Elements From Molecules to The Biosphere [M]. Princeton: Princeton University Press, 2002.
- [3] Manuel E L, Manuel D B. Plant diversity and soil stoichiometry regulates the changes in multifunctionality during pine temperate forest secondary succession [J]. Science of the Total Environment, 2019, 697 (20): 134204.1-134204.9.
- [4] Sanaei A, Sayer E J, Yuan Z, et al. Soil Stoichiometry mediates links between tree functional diversity and soil microbial diversity in a temperate forest [J]. Ecosystems, 2021,25(6):1-17.
- [5] 夏大娟,刘秋蓉, Liliann Zou,等.滨海盐生植物叶片 $\delta^{13}C$ 与主要养分元素化学计量的关系[J].生态学报,2020,40(7):2215-2224.
- [6] 钟欣孜,吴翠,崔浩,等.土壤养分变化对鄱阳湖湿地植物叶片氮磷及其化学计量关系的影响[J].生态学杂志,2018,37(10):2913-2919.
- [7] 刘强,张颖,钟才荣,等.外来红树植物拉关木入侵性研究[J].湖北农业科学,2019,58(21):60-64,67.
- [8] 环境保护部.HJ615-2011 土壤有机碳的测定:[S].北京:中国环境科学出版社,2011.
- [9] 农牧渔业部.NY/T53-1987 土壤全氮测定法:[S].北京:中国标准出版社,1987.
- [10] 国家林业局.LY/T1232-2015 森林土壤磷的测定[S].北京:中国标准出版社,2015.
- [11] 行业标准—农业.NY/T1377-2007 土壤 pH 的测定[S].北京:中国标准出版社,2007.
- [12] 董鸣.陆地生物群落调查观测与分析[M].北京:中国标

- 准出版社,1996.
- [13] 农业标准.NY/T2017-2011 植物中氮、磷、钾的测定[S].北京:中国标准出版社,2011.
- [14] 国家卫生和计划生育委员会.GB5009.268-2016 食品安全国家标准食品中多元素的测定[S].北京:中国标准出版社,2016.
- [15] Wright I J, Reich P B, Westoby M, et al. The worldwide leaf economics spectrum[J]. *Nature*, 2004, 428(6985):821-827.
- [16] Reich P B, Oleksyn J. Global patterns of plant leaf N and P in relation to temperature and latitude [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2004, 101(30):11001-11006.
- [17] Reich P B, Oleksyn J, Wright I J. Leaf phosphorus influences the photosynthesis-nitrogen relation: A cross-biome analysis of 314 species [J]. *Oecologia*, 2009, 160, 207-212.
- [18] Elser J J, Fagan W F, Denno R F, et al. Nutritional constraints in terrestrial and freshwater food webs [J]. *Nature*, 2000, 408(6812): 578-580.
- [19] 吴统贵,陈步峰,肖以华,等.珠江三角洲 3 种典型森林类型乔木叶片生态化学计量学[J]. *植物生态学报*, 2010, 34(1):58-63.
- [20] 张祖峰.珍贵乡土树种与桉树混交对生物量、碳储量及土壤理化性质的影响[D].广西 南宁:广西大学,2020.
- [21] 谭许脉,张文,肖纳,等.杉木林改造成乡土阔叶林对林下植物物种组成和多样性的影响[J]. *生态学报*, 2022, 42(7):2931-2942.
- [22] Huang Xueman, Liu Shirong, You Yeming, et al. Microbial community and associated enzymes activity influence soil carbon chemical composition in *Eucalyptus urophylla* plantation with mixing N-2-fixing species in subtropical China [J]. *Plant and Soil*, 2017, 414(1/2): 199-212.
- [23] 刘岑薇,郑向丽,王俊宏,等.陆生和水域生态系统植物的 C, N, P 生态化学计量特征研究综述[J]. *中国农学通报*, 2017, 33(17):70-75.
- [24] Cernusak L A, Winter K, Tumer B L. Leaf nitrogen to phosphorus ratios of tropical trees: Experimental assessment of physiological and environmental controls [J]. *New Phytologist*, 2010, 185(3):770-779.
- [25] Jia Jia, Bai Junhong, Wang Wei, et al. Changes of biogenic elements in *Phragmites australis* and *Suaeda salsa* from salt marshes in Yellow River delta, China [J]. *Chinese Geographical Science*, 2018, 28(3): 411-419.
- [26] Dijkstra F A, Carrillo Y, Aspinwall M J, et al. Water nitrogen and phosphorus use efficiencies of four tree species in response to variable water and nutrient supply [J]. *Plant and Soil*, 2016, 406(1/2):187-199.
- [27] 陈毅青,陈宗铸,陈小花,等.石梅湾 3 种植物叶片与其群落凋落物 C, N, P 生态化学计量特征研究[J]. *林业资源管理*, 2020(4):66-73.
- [28] Lambers H, Mougél C, Jaillard B, et al. Plant-microbe-soil interactions in the rhizosphere: An evolutionary perspective [J]. *Plant and Soil*, 2009, 321(1/2):83-115.
- [29] 严理.不同植物叶片磷组分特征及其与土壤养分的关系[D].广西 南宁:广西大学,2019.
- [30] 张春华,王宗明,居为民,等.松嫩平原玉米带土壤碳氮比的时空变异特征[J]. *环境科学*, 2011, 32(5): 1407-1414.
- [31] 陈小花,杨青青,余雪标,等.热带海岸典型森林类型土壤有机碳储量和碳氮垂直分布特征[J]. *热带作物学报*, 2017, 38(1):38-44.
- [32] Reich P B, Oleksyn J. Global patterns of plant leaf N and P in relation to temperature and latitude [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2004, 101(30):11001-11006.
- [33] Raich J W, Tufekcioglu A. Vegetation and soil respiration: Correlations and controls [J]. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1):71-90.
- [34] 王绍强,于贵瑞.生态系统碳氮磷元素的化学生态化学计量学特征[J]. *生态学报*, 2008, 28(8):3937-3947.
- [35] 张健,郭倩,孙一铭,等.武夷山不同海拔毛竹林土壤碳氮磷的生态化学计量特征[J]. *福建农林大学学报(自然科学版)*, 2022, 51(3):367-373.
- [36] Hanqin Tian, Guangsheng Chen, 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.