

海南岛不同林分植物叶片-土壤生态化学计量特征*

陈小花^{1,2} 陈宗铸^{1,2} 吴庭天^{1,2} 雷金睿^{1,2} 李苑菱^{1,2}

(1. 海南省林业科学研究院(海南省红树林研究院), 海南 海口 571100; 2. 海南省热带林业资源监测与应用重点实验室(筹), 海南 海口 571100)

摘要 碳(C)、氮(N)和磷(P)是陆地生态系统中生物地球化学循环的关键元素, 深入认识海南岛典型森林类型植物-土壤系统中的C、N、P生态化学计量对热带地区森林可持续性研究至关重要。研究通过测定原始林和次生林2种林分中植物叶与土壤的C、N、P含量, 掌握热带区域典型森林植物叶和土壤生态化学计量特征。结果显示:(1)2种林分C、N含量差异显著, P含量无明显差异, 其中各林分植物叶C、N、P含量均高于土壤。(2)2种林分C/N、C/P、N/P表现为植物叶>土壤, 其中C/P、N/P在不同林分间均表现为原始林>次生林; 各林型植物叶N/P含量范围为16.11~56.77, 均高于全国森林平均值, 说明2种林型植物的生长倾向于受P的限制。(3)研究范围内植物叶和土壤C含量在2种林分中呈显著正相关, 其余指标无明显相关性。研究结果为了了解热带区域森林生态系统的养分状况和揭示植物与土壤生态化学循环过程提供数据支持。

关键词 生态化学计量学; 森林类型; 养分循环; 海南岛

中图分类号: S718.5 文献标志码: A 文章编号: 2096-2053(2021)05-0102-06

C, N and P Stoichiometric Characteristics of Leaf and Soil for Two Typical Forest in Hainan Island

CHEN Xiaohua^{1,2} CHEN Zongzhu^{1,2} WU Tingtian^{1,2}
LEI Jinrui^{1,2} LI Yuanling^{1,2}

(1. Hainan Academy of Forestry (Hainan Academy of Mangrove), Haikou, Hainan 571100, China; 2. Hainan Key Laboratory of Monitoring and Application of Tropical Forestry Resources(plan), Haikou, Hainan 571100, China)

Abstract Carbon (C), nitrogen (N), and phosphorus (P) are key to biogeochemical cycles in terrestrial ecosystems. Deep understanding the stoichiometry of plant-soil C, N and P is critical for forest sustainability research of tropical area. The characteristics of leaf-soil ecological stoichiometry in the typical forest were studied by measuring the contents of leaf and soil C, N and P concentrations. The results showed that:(1) C and N contents of two forests were significantly different, and no significant difference in P content, among which the contents of C, N and P of leaf were all higher than soil in each forest type. (2) The C/N, C/P and N/P of two forest types basic presented in the order of leaf>soil, among them, C/P and N/P in different forest types were in primary forest>secondary forest. The leaf N/P content of various forest types ranged from 16.11 to 56.77, which were all higher than the average value of national forest. The results indicated that the growth of the two forest type plants tended to be restricted by P. (3) There was a significant positive correlation between the contents of plant leaves

* 基金项目: 海南省林业科学研究院(海南省红树林研究院)基础性科研工作(KYYS-2021-04)。

第一作者: 陈小花(1989—), 女, 助理研究员, 主要从事森林生态研究, E-mail: 965819833@qq.com。

通信作者: 陈宗铸(1977—), 男, 研究员, 主要从事林业信息研究, E-mail: chenzongzhu@126.com。

and soil C in the two forest types, but no significant correlation between the other indexes. The results provide data support for understanding the nutrient status of forest ecosystems in tropical regions and revealing the eco-chemical cycling process of plants and soils.

Key words ecological stoichiometry; forest type; nutrient cycling; Hainan island

生态化学计量是指对生态相互作用和过程很重要的化学元素的比率。通过化学计量对理解生态系统功能和营养循环是至关重要的^[1]。植物和土壤碳(C),氮(N)和磷(P)化学计量特征是森林生态系统C-N-P耦合循环的重要指标,对提升生态系统的健康状况具有十分重要的意义^[2-3]。由于陆地生态系统组成的复杂性和不均一性,土壤化学计量关系存在很大的变异性^[4]。生态化学计量直接或间接影响着森林生态系统的发展,探析生态化学计量为揭示森林生态系统的养分循环和稳定机制等生态研究提供新的思路^[5]。

C、N、P是植物生长和功能发育不可或缺的3种主要营养元素^[6],同时N和P是陆地生态系统中碳封存的限制因素^[7]。土壤养分含量是陆地生态系统生产力的重要指标^[8],其C、N、P的化学计量平衡对植物生长和调节养分循环以及生态系统功能等方面起重要作用^[9]。以往的研究报道,植被恢复是土壤养分积累的一个主要过程,能促进土壤酶活性而影响土壤微生物群落结构,进而促使生态系统的可持续发展^[10]。C、N、P化学计量学通常被用于研究生态系统不同组成之间的反馈和相互关系,从而探索生物过程中各元素之间的相互作用和平衡^[11]。土壤C/N、C/P和N/P随植被类型及其基质不同而发生变化^[12]。周丽丽等^[3]人研究得出土壤养分元素及化学计量比多呈显著的线性关系,在不同土层深度的土壤C、N、P化学计量特征受影响因素有所差别,且深层土壤养分含量相对较低。植物-土壤系统的化学计量特征在不同植被类型中存在显著差异,植物与土壤N:P的耦合关系表明土壤中C、N、P的浓度通常是平衡的^[13]。此外,关于叶片C:N:P化学计量的研究也颇多^[14-15],叶片N/P比率已被广泛用于预测植物生长的营养限制^[16]。化学计量的稳态是生态化学计量的中心概念,是生物体维持其营养成分相对恒定的能力,而与环境营养状况的变化无关。因此,不同植被类型下的土壤养分动态和生

物学特性具有不同的生态化学计量特征^[17]。

热带林是生物多样性最高、生态功能最强的陆地生态系统,在维护地球生态平衡中具有至关重要的作用^[18]。海南岛是我国面积最大的热带林区,与我国大陆森林植被相比较,具有很高的多样性、特有性和复杂性。根据海南岛全岛中高周低的地势,中部山区主要分布一定面积的原始林和次生林。原始林是最稳定的顶级群落森林,能维持地球的生态平衡;次生林是海南岛常见的天然植物群落,在涵养水源、保持水土和维持生态平衡等方面发挥重要作用。本研究以海南岛原始林和次生林作为研究对象,采用外业调查与内业测定相结合方法对该地区主要植物进行C、N、P化学元素含量测定,初步评估该区主要森林类型的植物和土壤化学计量学特征,目的在于了解植物与土壤之间的耦合关系,以为该区域典型林分的科学评估及后续科学管理提供依据。

1 研究区概况

研究选取了海南岛2种典型林分类型,分别是原始林和次生林。其中原始林研究区域位于海南省吊罗山自然保护区,属于热带海洋季风气候区,年平均气温24.6℃,年均相对湿度85.9%,年均降水量2160 mm,土壤类型为花岗岩或火成岩发育形成的湿润、呈酸性的红壤和山地黄壤,土壤pH为4~9。保护区内植物资源极其丰富,植被类型复杂且多样,既有大面积原始林,又有大面积次生林,本次研究范围以原始林为主^[19-21]。而次生林落于琼中县黎母山保护区,属热带季风气候,常年湿润温暖,雨量充沛。年平均气温23.1℃,年日照1773.5~1918.3 h,年平均风速1.1 m/s,降水量主要集中于5—10月份,约1809 mm。黎母山保护区以丘陵地形为主,植物类型可以分为季雨林、热带沟谷雨林、常绿针阔混交林、高山苔藓矮林。土壤类型主要有黄壤、赤红壤和砖红壤^[22],土壤pH值为4~6。具体如表1所示。

表 1 样地概况
Table1 Sample plot survey

保护区 Protected area	地理位置 Geographic location	海拔 /m Altitude	林分类型 Forest type	代表树种 Representative tree species
吊罗山 Diaoluoshan	18°40'N, 109°54'E	100~1 499	原始林 Primeval forest	琼南柿 <i>Diospyros howii</i> 鸭脚木 <i>Schefflera octophylla</i> 岭南青冈 <i>Cyclobalanopsis championii</i> 尖峰润楠 <i>Machilus monticola</i>
黎母山 Limushan	19°07'N, 109°39'E	160~1 444.7	次生林 Secondary forest	罗浮锥 <i>Castanopsis faberi</i> 丛花厚壳桂 <i>Cryptocarya densiflora</i> 黄桐 <i>Endospermum chinense</i> 陆均松 <i>Dacrydium pierrei</i>

2 材料与方法

2.1 样品采集

于 2020 年 5—6 月进行样品采集。在吊罗山国家森林公园保护区和黎母山保护区研究区域内，分别设置 5 m×5 m 的大样方 40 个，在每个大样方内随机布置 4 个 1 m×1 m 的小样方，记录各个小样方的经纬度坐标，每小样方都为单一物种，因调查区域群落结构复杂，采集范围广且树种多样。在每个小样方内使用高枝剪最大可能性采集冠层顶端成熟的叶片（过高树除外），尽可能覆盖小样方的不同部位，采集量鲜重大约在 50~100 g。将采集的叶子混合装在牛皮纸内带回实验室烘干至恒重，用于分析叶片总碳、总氮和总磷含量。

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，挖去表层的枯枝落叶，采集下方 2~10 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 60 目筛子，用于土壤 pH、有机碳、全氮和全磷分析。

2.2 室内分析

土壤和植物叶样品的测定：土壤有机碳含量采用重铬酸钾氧化-分光光度法（HJ 615-2011）^[23]；土壤全氮采用半微量开氏法（NY/T 53-1987）^[24]；土壤全磷采用碱熔法和酸溶法（LY/T 1232-2015）^[25]；pH 采用电位法（NY/T1377-2007）^[26]；叶片全碳参照《陆地生物群落调查观测与分析》^[27]；叶片全氮采用凯氏定氮仪法（NY/T 2017-2011）^[28]；叶片全磷采用电感耦合等离子体发射光谱仪法（GB 5009.268-2016）^[29]。

2.3 数据分析

采用 Microsoft Excel 软件对测定数据进行预处理和制图。统计分析在 SPSS 22.0 中完成，其中采用单因素方差分析法（one-way ANOVA）分析相同组分不同森林类型间 C、N、P 含量及化学计量比的差异性，各组分 C/N、C/P 及 N/P 均以质量比表示，表中数据为平均值 ± 标准差（n=40），显著性水平设定为 $\alpha = 0.05$ ；采用 Pearson 相关分析法分析各森林类型中冠层叶片与土壤间 C、N、P 化学计量特征的相关性。

3 结果与分析

3.1 植物叶片和土壤 C、N、P 含量

如表 2 所示，2 种林分类型植物叶和土壤 C、N、P 含量间存在显著差异（ $P < 0.05$ ）。2 种林型植物叶 C、N、P 平均含量分别为 410.67、15.18、0.63 g/kg；而土壤 C、N、P 平均含量分别为 36.64、1.69、0.21 g/kg。

不同林型间，植物叶 C 含量分别为 412.43、408.91 g/kg，以次生林最高；土壤 C 含量以原始林显著最高（40.94 g/kg），次生林次之（32.34 g/kg）。不同林型 N 含量在植物叶中表现为次生林（17.91 g/kg）显著高于原始林（12.47g/kg）；反之土壤 N 含量表现为原始林显著高于次生林。不同林型 P 含量在植物中存在显著差异（ $P < 0.05$ ），表现为次生林最高（0.74 g/kg），原始林最小（0.52 g/kg）；而土壤 P 含量在不同林型间则无明显差异（ $P > 0.05$ ）。

3.2 植物叶片和土壤 C、N、P 化学计量比

2 种林分类型植物叶片、土壤 C、N、P 化学计量比间存在显著差异（ $P < 0.05$ ）（图 2）。结

表 2 2 种林分类型植物叶与土壤 C、N、P 含量
Table2 C, N and P contents in leaf and soil in two forest types

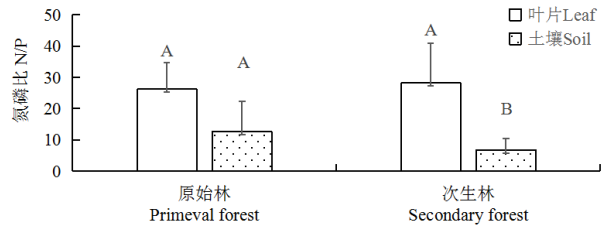
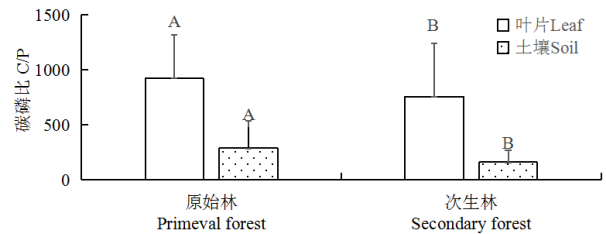
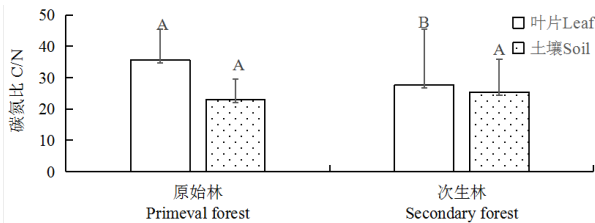
林分类型 Forest type	项目 Item	含量 / (g · kg ⁻¹) Content		
		碳 C	氮 N	磷 P
原始林 Primeval forest	植物叶	408.91 ± 31.20A	12.47 ± 2.52B	0.52 ± 0.13B
	土壤	40.94 ± 11.10A	1.95 ± 0.92A	0.20 ± 0.08A
次生林 Secondary forest	植物叶	412.43 ± 19.35A	17.88 ± 4.53A	0.74 ± 0.28A
	土壤	32.34 ± 5.59B	1.42 ± 0.42B	0.22 ± 0.05A

注：表中数据为平均值 ± 标准差，不同大写字母表示同一组分不同林型间差异显著（ $P < 0.05$ ）。

Note: mean ± SD, different capital letters indicate significant differences among different forest types of the same component ($P < 0.05$).

果显示，本研究中 2 种林型 C/N、C/P、N/P 表现为植物叶 > 土壤。2 种林型植物叶和土壤 C/N 均值分别为 31.60、24.21，C/P 均值分别为 841.53、225.16。植物叶 C/N 表现为原始林显著高于次生林；植物叶、土壤 C/P 均表现为次生林 < 原始林，且 2 种林型间差异显著。

2 种林型植物叶 N/P 在 16.11 ~ 56.77 间，均值为 27.17；土壤 N/P 在 2.22 ~ 27.86 间，均值为 9.76，原始林显著高于次生林（ $P < 0.05$ ）。



注：大写字母代表叶片和土壤的 C、N、P 化学计量比在不同林分类型间的差异性（平均值 ± 标准差）。Note: differences in C, N and P stoichiometric ratios of leaf and soil represented by uppercase letters among different stand types (mean ± SD).

图 2 2 种林分植物叶与土壤化学计量比

Fig.2 The stoichiometric ratio of leaf and soil in two forest types

表 3 2 种林分植物叶和土壤 C、N、P 含量及化学计量比相关性
Table3 Correlation of leaf and soil C,N,P contents and stoichiometric ratio in two forest types

元素 Element	组分 Component	林分类型 Forest type		总体 Overall
		原始林 Primeval forest	次生林 Secondary forest	
C	植物叶与土壤	0.395*	0.280	0.298**
N	植物叶与土壤	0.273	-0.006	-0.120
P	植物叶与土壤	0.191	-0.073	0.111
C/N	植物叶与土壤	0.237	-0.272	-0.194
C/P	植物叶与土壤	0.165	-0.061	0.167
N/P	植物叶与土壤	0.136	0.035	0.003

注：* 表示显著相关关系（ $P < 0.05$ ）；** 表示极显著相关关系（ $P < 0.01$ ）。Note: * indicates significant correlation; ** indicates a very significant correlation.

3.3 植物叶和土壤 C、N、P 及其化学计量比相关性

对 2 种林分植物叶、土壤各组分间 C、N、P 含量及其化学计量比进行 Pearson 相关分析 (表 3), 结果表明: 除了原始林植物叶与土壤 C 含量呈显著正相关 ($P < 0.05$), 其余 C、N、P 含量及其化学计量比在植物叶和土壤之间 Pearson 相关性不显著。综合分析结果与林分单独分析结果基本一致, 植物叶与土壤 C 呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 其余元素相关性不显著。以上表明植物叶与土壤养分之间的相关性不是很突出, 因为土壤 C、N 养分主要来源于凋落物的分解, 凋落物来源于植物叶的自然脱落, 可以认为植物叶对土壤养分的形成起到间接作用。

2 种林分植物叶与土壤主要元素 N、P 间相关关系分析结果表明 (图 3): 2 种林分植物叶片中 N 和 P 含量呈显著正相关关系 ($R^2=0.7702$, $P < 0.001$); 土壤中 N 和 P 含量无明显相关性 ($R^2=0.1889$, $P > 0.05$), 但分别求算原始林和次生林土壤 N、P 间相关关系结果显示, 原始林土壤中 N 和 P 含量无明显相关性 ($R^2=0.1709$, $P > 0.05$), 次生林土壤中 N 和 P 含量呈显著正相关关系 ($R^2=0.5045$, $P < 0.001$); 2 种林分 N、P 含量在植物叶和土壤中存在较大变异。

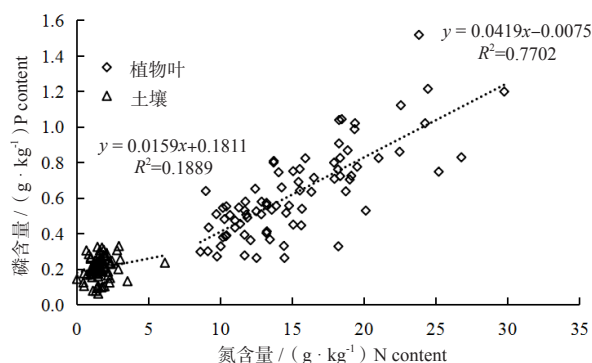


图 3 植物叶和土壤 N、P 含量相关关系

Fig.3 The correlation between N and P contents in leaf and soil

3 讨论与结论

本研究对海南岛不同森林类型土壤和植物叶 C、N、P 化学计量特征进行分析。研究表明, 土壤 C、N、P 化学计量特征是林地土壤肥力和养分循环变化的响应指标^[30-31], 其 C、N 通过影响微生物活性来调控有机质分解速率, 进而影响土壤碳

氮循环。An 等^[32]人研究表明, C/N 与有机质分解速率呈负相关, 本研究中, 各林分土壤 C/N 分别为 23.05 (原始林)、25.36 (次生林), 均高于我国和全球土壤 C/N 平均水平 (11.9, 14.3)。结合何高迅等^[33]人的研究结论, 当土壤 C/N 较高时, 越有利于有机物的积累。因此认为该区土壤有机质的分解速率较慢, 养分循环的速度被限制, 尚属于有机物的积累周期。土壤 C/P 是表征土壤的磷素有效性的指标^[34], 可以衡量微生物对土壤有机质的矿化, 本研究中, 2 种林分土壤 C/P 平均值为 225.16, 高于全国平均值 (61)^[35]。王绍强等^[4]人指出, 当 C/P 较高时容易出现微生物与植被竞争性吸收土壤有效 P 的现象。土壤 N、P 是植物生长发育所必需的矿质养分, N/P 是养分限制的预测因子, 同时也是 N 饱和的判断指标^[36], 原始林和次生林土壤 N/P 平均值分别为 12.70、6.83, 均高于我国和全球森林土壤平均水平 (3.9, 5.9)^[35]。当土壤 N/P < 10 时, 植被生长受 N 限制^[37], 因此认为次生林植被生长过程倾向于受土壤 N 的限制。

有关植物 C/N、C/P 的作用, 可以归纳为 2 个方面, 一是表征植物吸收 N、P 和同化 C 的效率^[38], 二是可以反映土壤 N、P 的供应状况。邢雪荣等人^[39]的研究得出土壤养分供应与植物光合代谢生理过程有紧密关系, 植物在养分元素供应不足或过剩的情况下会表现出较高或较低的养分利用效率。本研究中热带地区 2 种林分植物叶片 C/N 和 C/P 平均值分别为 31.88 和 840.74, 同时高于全球平均水平的 22.5 和 232^[40]和温带针阔混交林的 24.7 和 321^[41]。由此认为该区植物的 N 和 P 利用率相对较高^[42], 因为热带地区土壤养分元素相对缺乏, 有研究也表明植物在土壤养分缺乏时提高养分利用率是植物适应养分贫瘠状况时的生存策略^[43]。而在不同林分内, 植物叶 C/N、C/P 基本表现为次生林 < 原始林, 与张雨鉴等^[44]人研究结果相一致。本研究中 2 种林分植物叶 N/P 范围为 16.11 ~ 56.77, 均值为 27.17, 均高于全国森林平均值的 16, 总体认为海南岛 2 种林分对 N 和 P 元素的利用率较高。

随着植物的生长, 其内部生理生化会应对外界环境变化而逐渐形成自我调节能力, 植物 C、N、P 含量也会发生改变, 但因植物生理生化过程的内在联系, C、N、P 之间存在明显的相关性^[45], 前人刘小菊等^[46]和陈小雪等^[47]也得出植

物和土壤 C、N 间相互促进、协同增长的正相关关系。本研究结果显示,海南岛 2 种林分植物叶和土壤 N、P 含量基本呈现出极显著正相关,说明养分元素在植物和土壤中具有明显的耦合性,在植物与土壤之间紧密关联、相互作用。而原始林土壤 N、P 含量间无明显相关性,这也表明了土壤养分含量在不同地理界限位置具有不一致的相关关系,何家莉等^[48]研究指出土壤养分受生长期阶段和生物地理界线及其交互作用的显著影响,其中土壤 TP 含量在生物地理界限间无明显差异。此外,不同林型植物叶和土壤 C/N、C/P 没有表现出一致的变化规律,这与不同林型生态系统的植物构成相对复杂,且各植物 C 同化能力及养分需求差异较大有关^[49],同时高温、高降水及快速的植物生长可以提高土壤养分间的正相关关系^[48]。

综上所述,研究结果为了解海南岛原始林和次生林生态系统植物叶-土壤养分状况和养分循环特征提供了基础数据,对今后热带林区的保护和恢复具有一定的实践指导意义。但为考虑环境因子等对化学计量特征的影响,下一步将结合地形、温度、降雨、物种结构等因子对不同森林类型“植物叶-凋落叶-土壤”三者之间耦合关系进行系统研究。

参考文献

- [1] 贺金生, 韩兴国. 生态化学计量学: 探索从个体到生态系统的统一化理论[J]. 植物生态学报, 2010, 34(1): 2-6.
- [2] 乔阳. 亚热带常绿阔叶林土壤碳、氮、磷化学计量特征及其影响因素[D]. 上海: 华东师范大学, 2020.
- [3] 周丽丽, 李树斌, 王万萍, 等. 福建漳江口 4 种红树植物叶片碳氮磷化学计量及养分重吸收特征[J]. 应用与环境生物学报, 2020, 26(3): 674-680.
- [4] 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(8): 3937-3947.
- [5] 解晗, 万一峰, 崔红娜, 等. 华北落叶松人工林主要草本植物 N、P 生态化学计量特征研究: 以燕山北部山地为例[J]. 林业资源管理, 2020(4): 58-65.
- [6] VITOUSEK P M, STEPHEN P, HOULYTON B Z, et al. Terrestrial phosphorus limitation: mechanisms, implications, and nitrogen-phosphorus interactions[J]. Ecological Applications, 2010, 20(1): 5-15.
- [7] ÅGREN G I, ANDERSSON F O. Terrestrial ecosystem ecology: Principles and Application[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2012, 88(3): 363-364.
- [8] HUSTON M A, WOLVERTON S. The global distribution of net primary production: Resolving the paradox[J]. Ecological Monographs, 2019, 79(3): 343-377.
- [9] 金晓明, 于良斌, 张颖琪, 等. 群落演替对呼伦贝尔草地两种优势植物繁殖分配及生态化学计量的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(3): 787-793.
- [10] JBI Y L, WANG K, WANG J. Effect of different inoculation treatments on AM fungal communities and the sustainability of soil remediation in Daliuta coal mining subsidence area in northwest China[J]. Applied Soil Ecology, 2018, 132: 107-113.
- [11] DE SOYUZA OLIVEIRA F J, VIEIRA J N, DA SILVA, et al. Assessing the effects of 17 years of grazing exclusion in degraded semi-arid soils: Evaluation of soil fertility, nutrients pools and stoichiometry[J]. Journal of Arid Environments, 2019, 166: 1-10.
- [12] ZECHMEISTER B S, KEIBLINGER K M, MOOSHAMMER M, et al. The application of ecological stoichiometry to plant-microbial-soil organic matter transformations[J]. Ecological Monographs, 2015, 85(2): 133-155.
- [13] LI X, BI Y L, DU S Z, et al. Response of ecological stoichiometry and stoichiometric homeostasis in the plant-litter-soil system to re-vegetation type in arid mining subsidence areas[J]. Journal of Arid Environments, 2021, 184: 104298. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104298>
- [14] HAN W X, FANG J Y, REICH P B, et al. Biogeography and variability of eleven mineral elements in plant leaves across gradients of climate, soil and plant functional type in China[J]. Ecology Letters, 2011, 14(8): 788-796.
- [15] SARDANS J, ALONSO R, JANSSENS I A, et al. Foliar and soil concentrations and stoichiometry of nitrogen and phosphorus across European Pinus sylvestris forests: Relationships with climate, N deposition and tree growth[J]. Functional Ecology, 2016, 30(5): 676-689.
- [16] KOERSEIMAN W, MEULEMAN A F. The vegetation N: P ratio: a new tool to detect the nature of nutrient limitation[J]. Journal of Applied Ecology, 1996, 33: 1441-1450.
- [17] LI J W, LIU Y L, HAI X Y, et al. Dynamics of soil microbial C: N: P stoichiometry and its driving mechanisms following natural vegetation restoration after farmland abandonment[J]. Science of the Total Environment, 2019, 693, 133613. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133613>
- [18] 臧润国, 路兴慧, 丁易, 等. 海南岛热带天然林主要类型的生物多样性与群落组成[M]. 北京: 高等教育出版社,

- 2019.
- [19] 张晓琳, 王帅, 王旭, 等. 海南吊罗山自然保护区土壤有机碳贮量研究[J]. 热带作物学报, 2014, 35(2): 362-368.
- [20] 崔乙斌, 廖立国, 赵俊福, 等. 吊罗山低地森林不同地形土壤的呼吸变化[J]. 热带生物学报, 2020, 11(2): 231-237.
- [21] 韩天宇, 沈燕, 王旭, 等. 海南吊罗山低地雨林群落特征分析[J]. 林业与环境科学, 2019, 35(3): 43-49.
- [22] 秦鑫婷. 海南黎母山自然保护区苔藓植物区系研究[D]. 海口: 海南大学, 2020.
- [23] 环境保护部. 土壤有机碳的测定: HJ 615-2011[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2011.
- [24] 农牧渔业部. 土壤全氮测定法: NY/T 53-1987[S]. 北京: 中国标准出版社, 1987.
- [25] 国家林业局. 森林土壤磷的测定: LY/T 1232-2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [26] 行业标准-农业. 土壤pH的测定: NY/T 1377-2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [27] 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: 3-18.
- [28] 农业标准. 植物中氮、磷、钾的测定: NY/T 2017-2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [29] 国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中多元素的测定. GB 5009.268-2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [30] 张光德, 赵传燕, 戎战磊, 等. 祁连山中部不同植被类型土壤生态化学计量特征研究[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2019, 55(4): 533-540.
- [31] 唐婕, 肖可菁, 林熙, 等. 南澳岛不同林分土壤理化特性[J]. 林业与环境科学, 2021, 37(2): 105-110.
- [32] AN H, LI G Q. Effects of grazing on carbon and nitrogen in plants and soils in a semiarid desert grassland, China[J]. Journal of Arid Land, 2015, 7(3): 341-349.
- [33] 何高迅, 王越, 彭淑娴, 等. 滇中退化山地不同植被恢复下土壤碳氮磷储量与生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2020, 40(13): 4425-4435.
- [34] CLEVELAND C C, LIPTZIN D. C : N: P stoichiometry in soil: is there a "Redfield ratio" for the microbial biomass[J]. Biogeochemistry, 2007, 85(3): 235-252.
- [35] TIAN H Q, CHEN G S, ZHANG C, 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.
- [36] ZHAO F Z, SUN J, REN C J, et al. Land use change influences soil C, N, and P stoichiometry under Grain-to-Green Program in China[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 10195. doi: 10.1038/srep10195.
- [37] BUI E N, HENDERSON B L C. N: P stoichiometry in Australian soils with respect to vegetation and environmental factors[J]. Plant and Soil, 2013, 373(1/2): 553-568.
- [38] 高三平, 李俊祥, 徐明策, 等. 天童常绿阔叶林不同演替阶段常见种叶片N、P化学计量学特征[J]. 生态学报, 2007(3): 947-952.
- [39] 邢雪荣, 韩兴国, 陈灵芝. 植物养分利用效率研究综述[J]. 应用生态学报, 2000(5): 785-790.
- [40] ELSER J J, FAGANN W F, DENNO R F, et al. Nutritional constraints in terrestrial and freshwater food webs[J]. Nature, 2000, 408(6812): 578-580.
- [41] 王晶苑, 王绍强, 李纫兰, 等. 中国四种森林类型主要优势植物的C: N: P化学计量学特征[J]. 植物生态学报, 2011, 35(6): 587-595.
- [42] VITOUSEK P. Nutrient cycling and nutrient use efficiency[J]. The American Naturalist, 1982, 119(4): 553-572.
- [43] BOWMAN W D. Accumulation and use of nitrogen and phosphorus following fertilization in two alpine tundra communities[J]. Oikos, 1994, 70(2): 261-270.
- [44] 张雨鉴, 王克勤, 宋娅丽, 等. 滇中亚高山森林植物叶-凋落叶-土壤生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2020, 40(21): 1-11.
- [45] 曾德慧, 陈广生. 生态化学计量学: 复杂生命系统奥秘的探索[J]. 植物生态学报, 2005(6): 141-153.
- [46] 刘小菊, 单奇, 李园园. 喀纳斯泰加林林下72种植物叶片的碳、氮、磷化学计量特征[J]. 生态环境学报, 2020, 29(7): 1302-1309.
- [47] 陈小雪, 李红丽, 董智, 等. 滨海盐碱地土壤化学计量特征与群落物种多样性及其相关关系[J]. 水土保持研究, 2020, 27(6): 37-45: 59.
- [48] 何家莉, 宋怡珂, 王金牛, 等. 岷江源区高山林草交错带土壤碳、氮、磷生态化学计量关系的时空变化[J/OL]. 应用与环境生物学报: 1-12[2021-09-09]. <https://doi.org/10.19675/j.cnki.1006-687x.2020.04055>.
- [49] ELSER J J, STERNER R W, GOROKHOVA E, et al. Biological stoichiometry from genes to ecosystems[J]. Ecology Letters, 2020, 3(6): 540-550.