

义丰溪湿地植被恢复对土壤理化性质的影响*

吴悦宏 肖泽鑫 纪燕玲 林文欢 朱晓武 许业丰

(汕头市林业科学研究所, 广东 汕头 515041)

摘要 为了解义丰溪湿地植被恢复后土壤理化性质的变化情况, 选取义丰溪红树林湿地为研究对象, 以光滩为对照, 分析不同植被恢复模式下 (无瓣海桑 *Sonneratia apetala* 纯林、无瓣海桑+桐花树 *Aegiceras corniculatum*+秋茄 *Kandelia obovata*+卤蕨 *Acrostichum aureum* 混交林) 土壤 0~30 cm 土层的 pH、有机质、全氮、碱解氮、全磷、有效磷、全钾和速效钾等养分指标的动态变化。结果表明: 植被恢复 20 a 后, 土壤 pH 值显著下降, 土壤有机质、全氮、碱解氮、全磷、有效磷、全钾、速效钾含量显著增加; 不同恢复模式下, 除 pH 值外, 混交林土壤有机质、全氮、碱解氮、全磷、有效磷、全钾和速效钾含量均显著高于纯林 ($P<0.05$), 说明混交林模式的土壤养分含量较高, 植被恢复效果较好。因此, 在后续的红树林营造修复中应采用混交林模式以确保植被的恢复效果。

关键词 义丰溪湿地; 红树林; 植被恢复; 土壤理化性质

中图分类号: S714 文献标志码: A 文章编号: 2096-2053 (2024) 01-0106-06

Effects of Vegetation Restoration on Soil Nutrients in Yifengxi Wetlands

WU Yuehong XIAO Zexin JI Yanling LIN Wenhuan
ZHU Xiaowu XU Yefeng

(Shantou Forestry Research Institute, Shantou, Guangdong 515041, China)

Abstract To understand the changes of soil physicochemical properties after vegetation restoration in the Yifengxi wetland, the mangrove wetland of Yifengxi was selected as the research object, and the tidal flat was used as the control to analyze the dynamic changes of nutrient indexes, such as pH, organic matter, total nitrogen, alkalihydrolyzed nitrogen, total phosphorus, available phosphorus, total potassium, and available potassium in the soil layer of 0–30 cm under different patterns of vegetation restoration (pure forest of *S. apetala*, mixed forest of *Sonneratia apetala*+*Aegiceras corniculatum*+*Kandelia obovate*+*Acrostichum aureum*). The results showed that: after the vegetation restoration, soil pH decreased significantly, and soil organic matter, total nitrogen, alkaline dissolved nitrogen, total phosphorus, effective phosphorus, total potassium and quick-acting potassium increased; under different restoration modes, except for pH, soil organic matter, total nitrogen, alkali hydrolyzed nitrogen, total phosphorus, effective phosphorus, total potassium and available potassium in mixed forests were significantly higher than that in pure forests ($P<0.05$), which indicated that soil nutrient contents in the mixed forest were higher, and the effect of vegetation restoration was better. Therefore, the pattern of mixed forest should be used in the subsequent mangrove restoration to ensure the effect of vegetation restoration.

Key words Yifengxi Wetland; mangrove; vegetation restoration; soil physical and chemical properties

* 基金项目: 广东省科技专项资金项目 (210729106900480), 广东省科技创新战略专项项目 (STKJ202209062)。

第一作者: 吴悦宏 (1974—), 男, 正高级工程师, 主要从事森林培育及生态研究, E-mail: 458431684@qq.com。

植被恢复是缓解土壤侵蚀、保持水土、改善土壤结构性状以及退化生态系统恢复与重建的有效举措^[1]。植被恢复对土壤肥力特征、团聚体结构稳定性等理化性状、固碳潜力以及土壤化学计量特征的影响等一直是退化生态系统研究的热点问题。植被和土壤作为生态系统中两个重要部分，二者之间存在反馈效应，土壤为植被的生长发育提供环境条件和养分基础，而植被恢复过程中植被的组成和不同树种性状的差异又会推动土壤理化性状（诸如，土壤容重和孔隙度等物理性质、土壤微生物、酶以及土壤有机质等养分）朝着不同方向发展^[2]。例如，朱溢远等^[3]研究发现，植被恢复 18 a 后，土壤容重降低，土壤总孔隙度、饱和导水率得到提高，土壤持水性能得到显著改善，且混交林的改善效果最明显；阚海明等^[4]针对退化草地植被恢复 6 a 后的土壤微生物研究发现，无芒雀麦 *Bromus inermis* 和紫花苜蓿 *Medicago sativa* 人工草地恢复的土壤微生物量碳和氮含量以及 OUT 数量明显高于自然演替地；王进等^[5]研究表明，植被恢复后石漠化治理示范区的生态环境得到明显的改善，土壤容重、毛管孔隙度以及田间持水量降低，土壤有机质及氮磷钾养分均得到不同程度的提高。陶吉杨等^[7]对宁南山区 4 种植被恢复模式的土壤酶研究发现，刺槐林土壤的脲酶和蔗糖酶活性较强，而油松 *Pinus tabulaeformis* 林和落叶松 *Larix gmelinii* 林的碱性磷酸酶、过氧化氢酶活性较强。

湿地生态系统是自然界生产力最高的三大系统之一^[8]，处于水陆之间的过渡带，交互作用强烈，而红树林作为湿地生态系统重要的基础物种，在维持全球碳平衡、保护生物多样性等方面具有重要的作用^[9]。红树林植被的恢复重建能改善湿地的生态环境，有助于充分发挥湿地的生态服务功能^[10]。土壤作为红树林湿地能量和物质的交换中心^[11]，研究土壤的理化性状对红树林植被恢复的响应，有助于深入了解湿地生态系统养分循环的机制。然而，目前关于植被恢复对土壤性状的影响多集中于陆地生态系统，针对湿地恢复对土壤性状影响的报道相对较少。土壤理化性状的变化是衡量土壤肥力和质量的重要体现，是表征植被恢复效果的重要标志^[12]。因此，本研究以对义丰溪湿地红树林为研究对象，通过分析不同恢复模式下土壤养分的变化特征，旨在为红树林湿地恢复提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于广东省澄海区义丰溪（116°53'28"~116°53'49"E，23°32'49"~23°33'12"N），属典型的南亚热带季风气候，阳光充足，雨量充沛，高温多雨，雨热同季，年平均气温 18~22℃，最低气温在 0℃以上；最高气温 35~38℃，多出现于 7 月中旬至 8 月初受太平洋副热带高压控制期间。冬季偶有短时霜冻。年日照时数为 1 798~2 623 h，平均 2 176 h。年降雨量 1 300~1 800 mm，多集中在 4—9 月份。义丰溪湿地红树林是 2002 年由澄海区林业局人工种植，后使其自然恢复，形成了无瓣海桑纯林和无瓣海桑+秋茄+桐花+卤蕨两种林分类型。

1.2 样品采集与处理

2022 年 4 月，选取义丰溪红树林无瓣海桑纯林以及无瓣海桑+桐花+秋茄+卤蕨混交林等两种典型的类型为研究对象，以附近光滩为对照，在每种类型林分各选择 3 个 10 m×10 m 的样地，在每个样地中心采用“梅花 5 点采样法”用 PVC 管各采集 5 个 0~30 cm 深的土壤样品 1 kg，共采集 45 份土壤样品。将土壤样品混合均匀后，用塑料袋装回实验室，自然风干后用于土壤理化性质的测定。

土壤理化性质的测定参照《土壤农业化学分析方法》^[13]，pH 值采用玻璃电极法测定；土壤有机碳采用高温外热重铬酸钾氧化-容量法；全氮采用开氏-蒸馏滴定法；全磷和全钾采用氢氧化钠熔融法；碱解氮采用碱解扩散法；有效磷采用盐酸-氟化铵提取-钼锑抗比色法；速效钾采用乙酸铵提取—火焰原子吸收分光光度法。

1.3 数据分析

采用 Microsoft Excel 2016 对数据进行整理，采用 SPSS 22.0 软件进行数据统计分析，采用 Origin 2019 进行制图。用单因素方差分析检验不同植被恢复下土壤各理化指标的差异，若方差齐性，用 LSD（最小显著差异）法进行多重比较；若方差不齐，则用 Tamhanes T2 法进行多重比较。用 Pearson 相关性分析检验各指标间的相关性。

2 结果与分析

2.1 土壤 pH 值与有机质含量的变化

由图 1 可知，植被恢复后，土壤 pH 值和有机

质均表现出显著差异 ($P < 0.05$)。其中土壤 pH 值表现为: 混交林 (4.20) < 纯林 (4.37) < 光滩 (5.85), 且光滩土壤的 pH 值显著高于混交林和纯林, 这表明植被恢复后土壤 pH 值有所下降; 土壤有机质含量表现为: 混交林 (145.89 g/kg) > 纯林 (67.01 g/kg) > 光滩 (24.03 g/kg), 且各处理间均差异显著 ($P < 0.05$), 这说明植被恢复后土壤有机质含量得到恢复。不同恢复模式下, 混交林与纯林间的 pH 值变化无显著差异 ($P > 0.05$), 而土壤有机质则表现为混交林显著高于纯林 ($P < 0.05$)。

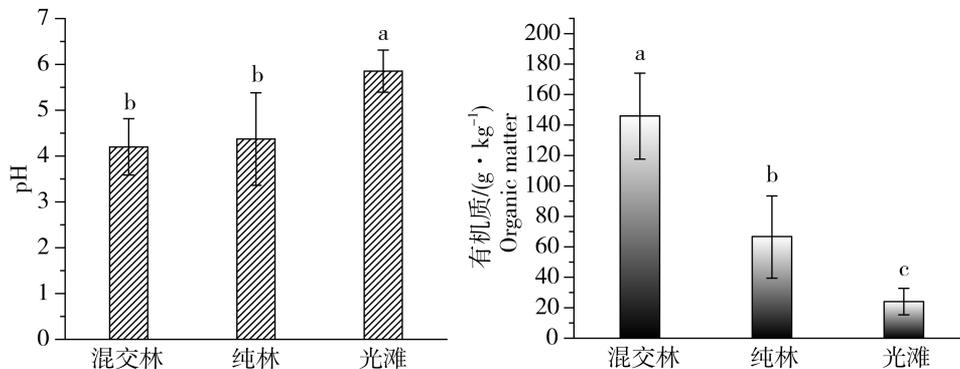
2.2 土壤全氮与碱解氮含量的变化

由图 2 可看出, 土壤全氮和碱解氮含量在植被恢复后显著增加, 且在不同恢复模式下均出现一定程度的差异。土壤全氮含量表现为: 混交林

(4.91 g/kg) > 纯林 (2.27 g/kg) > 光滩 (1.24 g/kg), 且各处理间表现为差异显著 ($P < 0.05$); 土壤碱解氮含量表现为: 光滩 (98.20 mg/kg) < 纯林 (213.22 mg/kg) < 混交林 (455.44 mg/kg), 各处理间均差异显著 ($P < 0.05$)。

2.3 土壤全磷和有效磷含量的变化

如图 3 所示, 植被恢复后, 土壤有效磷和全磷含量均出现不同程度的增加。土壤全磷含量表现为: 混交林 (1.27 g/kg) > 纯林 (0.52 g/kg) > 光滩 (0.43 g/kg), 其中混交林土壤全磷含量显著高于纯林和光滩 ($P < 0.05$); 土壤有效磷含量表现为: 光滩 (5.53 mg/kg) < 纯林 (7.07 mg/kg) < 混交林 (27.93 mg/kg), 其中光滩与纯林之间无显著差异 ($P > 0.05$), 而混交林则显著高于纯林和光滩 ($P < 0.05$)。

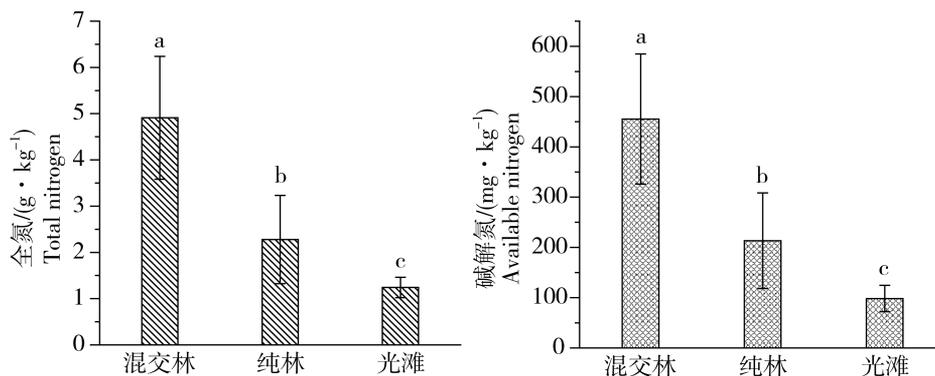


注: 不同小写字母代表不同植被恢复模式之间该属性差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: Different lowercase letters represent significant differences ($P < 0.05$) in this attribute between different vegetation restoration modes.

图 1 义丰溪不同植被恢复模式土壤 pH 和有机质变化

Fig. 1 Changes in soil pH and organic matter under different vegetation restoration modes in Yifengxi



注: 不同小写字母代表不同植被恢复模式之间该属性差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: Different lowercase letters represent significant differences ($P < 0.05$) in this attribute between different vegetation restoration modes.

图 2 义丰溪不同植被恢复模式下土壤全氮和碱解氮含量变化

Fig. 2 Changes in soil total nitrogen and available nitrogen content under different vegetation restoration modes in Yifengxi

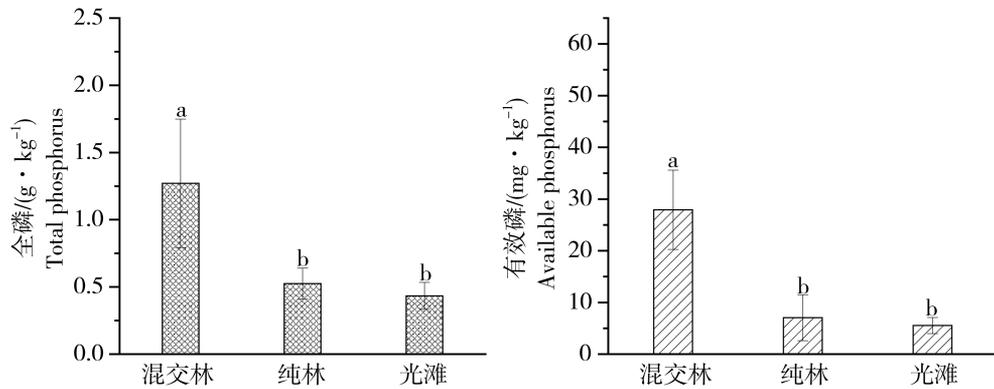
2.4 土壤全钾和速效钾含量的变化

由图 4 可看出，土壤全钾和速效钾含量在造林后均有所增加，且不同恢复模式下均表现一定的差异。土壤全钾含量表现为：光滩 (14.19 g/kg) < 纯林 (16.53 g/kg) < (19.59 g/kg)，且各处理间差异显著 ($P < 0.05$)；不同植被恢复模式下土壤速效钾含量表现为：光滩 (199.69 mg/kg) < 纯林 (300.52 mg/kg) < 混交林 (481.21 mg/kg)，各处理间均差异显著 ($P < 0.05$)。

2.5 土壤各理化性质间相关性分析

由表 1 可看出，土壤 pH 值与土壤有机质、全氮、全钾以及碱解氮含量呈负相关 ($P < 0.05$)；土壤有机质除与土壤有效磷呈正相关之外 ($P <$

0.05)，与其余各养分元素均呈极显著正相关 ($P < 0.01$)；土壤全氮含量除与土壤有效磷呈正相关外 ($P < 0.05$)，与其余各养分指标均呈极显著正相关 ($P < 0.01$)；土壤全磷除与 pH 值不相关 ($P > 0.05$) 外，与其余各养分指标均呈正相关 ($P < 0.05$)；土壤全钾含量除与 pH 值呈负相关 ($P > 0.05$) 外，与全磷呈正相关 ($P < 0.05$)，与其余各指标呈极显著正相关 ($P < 0.01$)；土壤碱解氮含量与有机质、全氮、全磷、全钾含量均呈极显著正相关 ($P < 0.01$)；土壤有效磷与有机质、全氮、全磷、碱解氮和速效钾呈正相关 ($P < 0.05$)；土壤速效钾含量除与 pH、全钾含量不相关外，与其余各指标呈极显著正相关 ($P < 0.01$)。

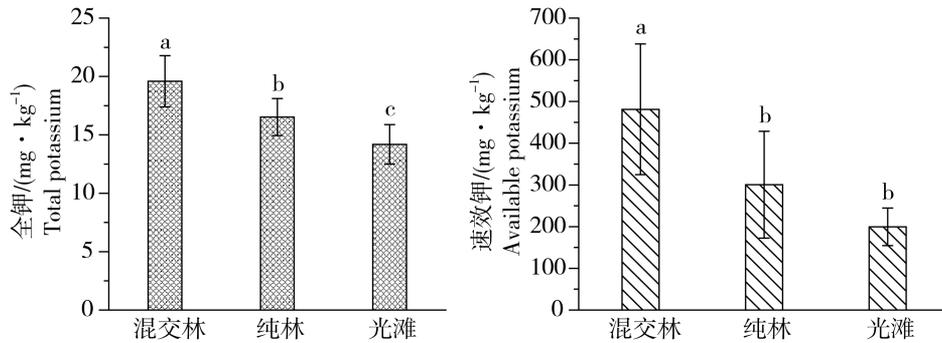


注：不同小写字母代表不同植被恢复模式之间该属性差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: Different lowercase letters represent significant differences ($P < 0.05$) in this attribute between different vegetation restoration modes.

图 3 义丰溪不同植被恢复模式下土壤全磷和有效磷变化

Fig. 3 Changes in soil total phosphorus and available phosphorus under different vegetation restoration modes in Yifengxi



注：不同小写字母代表不同植被恢复模式之间该属性差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: Different lowercase letters represent significant differences ($P < 0.05$) in this attribute between different vegetation restoration modes.

图 4 义丰溪不同植被恢复模式下土壤全钾和速效钾含量变化

Fig. 4 Changes in soil total potassium and available potassium content under different vegetation restoration modes in Yifengxi

表1 不同理化性质间相关性分析

Table 1 Correlation analysis between different physical and chemical properties

指标 Index	pH	有机质 Organic matter	全氮 Total nitrogen	全磷 Total phosphorus	全钾 Total potassium	碱解氮 Available nitrogen	有效磷 Available phosphorus	速效钾 Available potassium
pH	1							
有机质	-0.531**	1						
全氮	-0.403*	0.955**	1					
全磷	0.066	0.492**	0.569**	1				
全钾	-0.441*	0.657**	0.701**	0.416*	1			
碱解氮	-0.420*	0.934**	0.986**	0.508**	0.724**	1		
有效磷	0.172	0.372*	0.430*	0.937**	0.260	0.368*	1	
速效钾	0.148	0.494**	0.520**	0.529**	0.267	0.484**	0.494**	1

注：*表示不同理化性质在0.05水平上差异显著；**表示在0.01水平上差异显著。

Note: * indicates significant differences in different physical and chemical properties at the 0.05 level; ** indicates significant differences at the 0.01 level.

3 结论与讨论

对义丰溪湿地植被恢复后不同植被模式下的土壤理化性质进行综合分析得出以下结论：植被恢复后，土壤pH值下降，土壤有机质等养分含量增加，有效性养分提高。不同植被恢复模式对土壤养分的影响存在差异，其中无瓣海桑混交林模式对土壤养分的恢复效果最显著，在后续的红树林人工恢复中应尽可能考虑混交林模式。

植被恢复过程中对土壤肥力以及质量的影响反映了地下生境和地上部分具有密切的关系^[14]。本研究中，两种植被恢复模式下的土壤pH值相较于光滩均有所下降，且呈酸性，这与多数研究结果^[15-17]一致，土壤出现酸化有以下几点原因：一方面红树植物凋落物富含硫，经分解作用形成大量的硫酸；另一方面，厌氧菌等土壤微生物在转换有机质的过程中也会产生酸性物质；此外，红树植物凋落物分解后产生的单宁酸也有助于土壤酸化^[18]。

植被恢复后，不同功能性状的树种结构和组成会导致凋落物的质量和数量以及分解程度的差异，从而影响土壤环境^[19]。本研究中，种植红树林后，土壤有机质含量相较于光滩有所增加，这表明植被恢复可以改善红树林土壤肥力状况。一般而言，随着植被恢复的年限增加，林下物种多样性的增加以及植被凋落物的分解和输入为土壤

提供了丰富的有机质来源，此外，红树植物强大的根系也能网罗大量有机碎屑，进一步增加土壤有机质的来源^[20]。因此，与光滩相比，植被恢复后的土壤有机质含量较高。而不同恢复模式下，混交林的土壤有机质含量显著高于纯林（ $P < 0.05$ ），这可能是由于混交林物种丰富，无瓣海桑为高大乔木，桐花树和秋茄为灌木或小乔木，而卤蕨为草本，生态位重叠小，能充分的利用地上和地下空间，凋落物来源也就丰富，林分的生产率和归还量高^[21]。

土壤氮素的来源有凋落物分解、生物固氮以及大气降水三个途径^[22]；土壤磷素的主要来源为凋落物分解和岩石的风化作用^[23]；土壤钾素则主要受母质组成、土壤质地以及淋溶作用影响^[24]。本研究中，土壤氮磷钾养分元素含量在植被恢复后均高于光滩，这可能是植被恢复后，大量凋落物的输入导致土壤养分增加。且本研究中，土壤有机质均与氮磷钾呈极显著正相关（ $P < 0.01$ ），且各养分元素之间存在正相关（ $P < 0.05$ ），这说明土壤氮磷钾养分元素的含量受凋落物的分解影响较大且各元素间存在协同促进的作用。此外，土壤微生物的活性和数量也随着植被恢复而增加。这也说明植被恢复后有助于改善土壤结构并促进土壤养分的积累。本研究中，混交林的土壤氮磷钾养分均显著高于纯林，这可能是相较于纯林，混交林凋落物来源和种类丰富，微生物多样性丰富、

活性增加, 加速凋落物分解的分解速度, 导致混交林土壤养分总体较高^[25]。而光滩的土壤全磷、有效磷和速效钾的含量与纯林无显著差异 ($P > 0.05$), 进一步表明混交林对于土壤养分的恢复效果要优于纯林。

参考文献

- [1] 乐易迅, 胡敏杰, 肖琳, 等. 河口湿地红树林植被恢复对土壤养分动态的影响[J]. 水土保持学报, 2022, 36(3): 333-337.
- [2] 姜丽娜, 马洁, 刘建康, 等. 毛乌素沙地不同植被恢复措施下土壤理化性质空间分布特征[J]. 水土保持通报, 2022, 42(5): 1-7.
- [3] 朱溢远, 岩晓莹, 郭天崎, 等. 黄土高原沟壑区陡坡地典型植被不同恢复年限土壤物理性质比较研究: 以陕西长武王东沟为例[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2022, 41(5): 1033-1040.
- [4] 阚海明, 庞卓, 陈超, 等. 北京西北浅山区退化草地植被恢复对土壤微生物群落多样性的影响[J]. 草地学报, 2022, 30(6): 1350-1358.
- [5] 王进, 刘子琦, 张国, 等. 喀斯特石漠化治理不同恢复模式土壤养分分布特征: 以贵州花江示范区为例[J]. 西南农业学报, 2019, 32(7): 1578-1585.
- [6] 陶吉杨, 谭军利, 郑飞龙, 等. 宁南山区植被恢复模式对土壤主要酶活性、微生物多样性及土壤养分的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2022, 40(3): 207-217.
- [7] 朱耀军, 郭菊兰, 武高洁. 红树林湿地有机碳研究进展[J]. 生态学杂志, 2012, 31(10): 2681-2687.
- [8] 杨荣, 塞那, 苏亮, 等. 内蒙古包头黄河湿地土壤碳氮磷含量及其生态化学计量学特征[J]. 生态学报, 2020, 40(7): 2205-2214.
- [9] 李庆芳, 章家恩, 刘金苓, 等. 红树林生态系统服务功能研究综述[J]. 生态科学, 2006, 25(5): 472-475.
- [10] 牛红苹, 冯建祥, 殷祚云, 等. 广州南沙滨海湿地人工红树林植物生长量及多样性研究[J]. 林业与环境科学, 2023, 39(2): 6-16.
- [11] 端金霞, 李海文, 李志文, 等. 惠东港口海龟国家级自然保护区土壤理化性质[J]. 林业与环境科学, 2022, 38(5): 21-28.
- [12] 袁媛, 张鹤, 武杼华, 等. 植被恢复对毛乌素沙地土壤pH和养分含量的影响[J]. 土壤通报, 2021, 52(1): 148-156.
- [13] 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.
- [14] 喻阳华, 钟欣平, 郑维, 等. 喀斯特森林不同演替阶段植物群落物种多样性、功能性状、化学计量及其关联[J]. 生态学报, 2021, 41(6): 2408-2417.
- [15] 韩维栋, 高旭东. 湛江湾红树林土壤理化性质的研究[J]. 中国农学通报, 2013, 29(31): 27-31.
- [16] 龚子同, 张效朴. 中国的红树林与酸性硫酸盐土[J]. 土壤学报, 1994, 31(1): 86-94.
- [17] 管东生, 覃朝锋. 广东和海南红树林的生物地球化学特征[J]. 热带亚热带土壤科学, 1998, 7(4): 267-271.
- [18] 徐海, 陈少波, 张素霞, 等. 红树林土壤基本特征及发展前景[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(4): 1496-1497, 1504.
- [19] 李鹏, 刘晓君, 刘苑秋, 等. 退化红壤区不同植被恢复模式的土壤养分空间分布特征[J]. 中南林业科技大学学报, 2023, 43(8): 113-124.
- [20] 陈粤超, 王占印, 许方宏, 等. 不同类型的红树林土壤养分和生态化学计量特征比较[J]. 桉树科技, 2016, 33(1): 32-37.
- [21] 庞圣江, 张培, 贾宏炎, 等. 桂西北不同森林类型土壤生态化学计量特征[J]. 中国农学通报, 2015, 31(1): 17-23.
- [22] 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.
- [23] 徐波, 朱忠福, 李金洋, 等. 九寨沟自然保护区不同森林类型土壤养分特征[J]. 应用与环境生物学报, 2016, 22(5): 767-772.
- [24] 邓小军, 朱柳霏, 宋贤冲, 等. 猫儿山自然保护区不同林分类型土壤生态化学计量特征[J]. 土壤通报, 2022, 53(2): 366-373.
- [25] 字洪标, 向泽宇, 王根绪, 等. 青海不同林分土壤微生物群落结构(PLFA)[J]. 林业科学, 2017, 53(3): 21-32.