

西沙群岛主要岛屿不同植被类型对土壤理化性质的影响

王森浩^{1,2}, 朱怡静^{1,2}, 王玉芳^{1,2}, 毛鹏^{1,2}, 刘楠¹, 简曙光¹, 朱丽薇¹, 刘慧¹, 张炜^{1*}

(1. 中国科学院华南植物园, 中国科学院退化生态系统植被恢复与管理重点实验室, 广东省应用植物学重点实验室, 广州 510650; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为了解海岛植被恢复过程中植物群落对土壤理化性质的影响, 对西沙群岛的永兴岛和东岛上不同植被群落的土壤主要理化性质进行测定。结果表明, 随着岛屿植被由藤草经灌木向乔木群落的过渡, 土壤含水量由 5.9% 显著升高至 14.2%; 土壤微生物生物量碳、生物量氮分别由 176.2 和 41.2 mg kg⁻¹ 显著升高至 391.5 和 98.8 mg kg⁻¹; 而 pH 呈下降趋势。这表明随着植被的恢复, 海岛土壤质量不断提高, 生态系统渐趋稳定。

关键词: 西沙群岛; 植被恢复; 生态保护; 植物群落; 土壤; 土壤微生物

doi: 10.11926/jtsb.4013

Effect of Vegetation Types on Soil Physicochemical Property in East Island and Yongxing Island of Xisha Islands

WANG Sen-hao^{1,2}, ZHU Yi-jing^{1,2}, WANG Yu-fang^{1,2}, MAO Peng^{1,2}, LIU Nan¹, JIAN Shu-guang¹, ZHU Li-wei¹, LIU Hui¹, ZHANG Wei^{1*}

(1. *Key Laboratory of Vegetation Restoration and Management of Degraded Ecosystems, and Guangdong Provincial Key Laboratory of Applied Botany, South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China*; 2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: In order to understand the effect of vegetation types on soil physicochemical property in Island, the soil physicochemical property in East Island and Yongxing Island of Xisha Islands under three vegetation types were determined. The results showed that in the processes of vegetation types from herbaceous and vines, shrubs to trees community, the soil water content increased significantly from 5.9% to 14.15%, and microbial biomass carbon and nitrogen also increased from 176.2 and 41.2 mg kg⁻¹ to 391.5 and 98.8 mg kg⁻¹, respectively. Meanwhile, the soil pH decreased with changes in vegetation types. So, it was suggested that soil quality in Islands enhanced gradually with vegetation recovery, and the island ecosystem became more stable.

Key words: Xisha Islands; Vegetation restoration; Ecosystem protection; Plant community; Soil; Soil microbe

随着社会经济的快速发展, 陆地资源与能源日益紧缺, 海洋及岛屿开发利用已成为人们应对资源压力的重要战略^[1-2]。海岛不仅拥有丰富的渔业及

磷矿资源, 还是一些特有物种的天然储存库^[3]。为了合理开发海岛资源, 并维持资源获取与生态保护的平衡, 已有大量研究对海岛的现有资源进行了调

收稿日期: 2018-11-03

接受日期: 2019-02-01

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC1403002); 中国科学院 A 类战略性先导科技专项(XDA13020500); 广东省自然科学基金项目(2017A030313168)资助

This work was supported by the National Key Research and Development Project (Grant No. 2016YFC1403002); the Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (Grant No. XDA13020500); and the Natural Science Foundation in Guangdong Province (Grant No. 2017A030313168).

作者简介: 王森浩(1994~), 男, 博士研究生, 研究方向为森林生态系统养分循环。E-mail: wangsenhao@scbg.ac.cn

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: zhangwei@scbg.ac.cn

查,包括植被^[4-6]、生物多样性^[7-8]和土壤特性^[9-10]等,并对海岛资源的经济效益及其开发过程中所面临的风险进行了评估^[3,11],以期为海岛资源的可持续性利用提供理论依据。

海岛孤立于海洋之中,缺少与大陆间进行物质与能量交换的廊道,是相对独立的生态系统^[12]。海岛经过草本植物和蕨类入侵、草本植物定居、灌木与乔木定居等阶段,逐渐演替为具有一定植被群落的生境^[13]。由于海岛面积较小,生物多样性有限,生态系统稳定性差,易受到自然灾害及人类活动的干扰。目前已有学者对受干扰海岛的恢复进行了研究,包括海岛植被恢复的条件^[14]、海岛适生植物的筛选及其生理适应机制等^[15-17],但对于海岛恢复过程中各阶段植被群落下土壤的理化特性变化和微生物响应状况研究较少。

在植被恢复过程中,土壤与植被长期相互作用,其主要理化特性的变化显示出对植物群落的适应。土壤水分是植物水分的直接来源,土壤含水量不仅直接影响着蒸腾作用和光合作用等植物生理生态过程,还影响着土壤养分的有效性及其微生物活动。酸碱度同样是土壤重要理化指标之一,直接影响土壤养分的存在状态、有效性和迁移速率,也影响着土壤微生物数量、组成及活性^[18]。氮作为生物体赖以生存的主要元素,不仅会影响植物的生长发育,还与植物的防御反应、繁殖和存活密切相关^[19]。氮素供应对群落演替至关重要,有研究报道土壤氮素的缺乏可能是高寒草甸植被演替与草场退化的重要原因之一^[20]。土壤有机质是土壤养分供给的重要来源,其在土壤中的含量影响着土壤结构、保水保肥及对污染等干扰的缓冲能力,并在一定程度上与土壤肥力呈正相关关系。土壤微生物具有促进植物生长、促进腐殖酸形成、减少病原细菌侵染的作用^[21-22],而土壤微生物生物量碳和氮作为土壤中养分的活性部分,既可以促进土壤有机质和养分的转化与循环,又可以作为植物有效养分的储备库。在海岛植被恢复过程中,土壤主要理化性质如何改变以响应不断变化的植物群落,已经成为当今海岛开发利用及生态恢复过程中亟待研究的重要问题之一。

本研究对我国西沙群岛的主要岛屿(永兴岛、东岛)不同植被类型下土壤进行采样,分析其主要理化特性,探究植物群落变化对土壤特性的影响差异性,以期为海岛生态规划和植被恢复过程中植物定居、生长、恢复研究提供参考。

1 材料和方法

1.1 采样地概述

本研究地位于西沙群岛的永兴岛(112°20' E, 16°50' N)和东岛(112°43'13"~112°44'22" E, 16°39'34"~16°40'31" N),面积分别为 2.6 和 1.7 km²,约占西沙群岛总面积的 34.2%和 22.4%,是西沙群岛陆地面积较大、植被较好的岛屿(中建岛面积虽达 1.0 km²,但植被稀疏),其中东岛植被条件最好,且有中国鸟类密度最大的自然保护区(西沙东岛白鹳鸟保护区)。这些岛屿均属热带珊瑚岛,受热带海洋性季风气候影响,雨量充沛,年降雨量在 1 500 mm 左右,干湿季节分明,年均气温 26.5℃^[18-20]。西沙群岛处于高温多雨的气候带中,加之面积狭小,海拔较低,地形简单,常面临暴雨强风的影响,导致其植被恢复更多受到土壤质地和水分状况的影响。位于海岛边缘的沙堤易受到盐雾及沙埋的影响,主要生长着矮小稀疏的藤草和灌丛群落,由外至内植被盖度和高度逐渐增加^[6],形成以草海桐(*Scaevola sericea*)、抗风桐(*Ceodes grandis*)和椰子(*Cocos nucifera*)等为优势种的乔木群落。

将西沙群岛主要岛屿(永兴岛和东岛)上的植被划分为 3 个类型:藤草、灌木及乔木群落。采集的土壤分别来自藤草群落[厚藤(*Ipomoea pescaprae*)、海刀豆(*Canavalia rosea*)、盐地鼠尾粟(*Sporobolus virginicus*)]、灌木群落[银毛树(*Tournefortia argentea*)、海巴戟(*Morinda citrifolia*)、水芫花(*Pemphis acidula*)、海人树(*Suriana maritima*)和草海桐]和乔木群落[抗风桐、橙花破布木(*Cordia subcordata*)、椰子](表 1)。2016 年 6 月,在 3 种植物的每种植物下随机选择 5 个点,用内径 3.5 cm 的土钻钻取 0~10 cm 层土壤样品,然后将 5 个土壤样品混合,共取得 11 种植物下的 26 个土壤样品(因同种植物分布在不同岛屿,草藤本 $n=7$,灌木 $n=11$,乔木 $n=8$)。草藤本植被类型直接在植物下采样;灌木和乔木类型选择距离植株 1.5 m、冠幅可覆盖到的地方采集土壤样品。将土壤样品置于 4℃恒温箱内带回中国科学院华南植物园实验室,去除植物残体和大块砂石,过 2 mm 筛后存放在 4℃冰箱内待测。

1.2 测定方法

依照国家标准方法^[23]测定土壤理化指标。含水量(烘干法)、铵态氮(氯化钾浸提-靛酚蓝比色法)、

表 1 不同植被类型的土壤采样地

Table 1 Soil sampling sites from different vegetation types

群落类型 Community type	物种 Species	采样地 Sampling site
藤草群落 Herbaceous and vine	厚藤 <i>Ipomoea pescaprae</i>	永兴岛和东岛 Yongxing Island, East Island
	海刀豆 <i>Canavalia rosea</i>	永兴岛和东岛 Yongxingdao, Dongdao
	盐地鼠尾粟 <i>Sporobolus virginicus</i>	永兴岛和东岛 Yongxingdao, Dongdao
灌木群落 Shrub	海人树 <i>Suriana maritima</i>	东岛 Dongdao
	银毛树 <i>Tournefortia argentea</i>	东岛 Dongdao
	海巴戟 <i>Morinda citrifolia</i>	永兴岛和东岛 Yongxingdao, Dongdao
	水芫花 <i>Pemphis acidula</i>	东岛 Dongdao
	草海桐 <i>Scaevola sericea</i>	永兴岛和东岛 Yongxingdao, Dongdao
乔木群落 Tree	抗风桐 <i>Ceodes grandis</i>	永兴岛和东岛 Yongxingdao, Dongdao
	橙花破布木 <i>Cordia subcordata</i>	永兴岛 Yongxingdao
	椰子 <i>Cocos nucifera</i>	永兴岛和东岛 Yongxingdao, Dongdao

土壤酸碱度(pH 计, METTLER TOLEDO FE 20K)、有机质(重铬酸钾氧化-外加热法)、土壤总氮(半微量开氏法)、土壤总磷(硫酸高氯酸-钼锑抗比色法)、硝态氮(2 mol L⁻¹ KCl 浸提, 紫外分光光度计测定)^[24]、土壤微生物量碳氮(氯仿熏蒸法)。土壤有效氮含量即为土壤铵态氮与硝态氮含量之和。

1.3 数据分析

数据用 SPSS (IBM V19)进行单因素方差分析, 以 $P < 0.05$ 表示差异显著; 采用 Excel 2013 作图。

2 结果和分析

单因素方差分析表明, 除土壤微生物量碳外, 其余所有土壤性质指标在不同岛屿间均不存在显著差异($P > 0.05$), 但不同植被类型土壤主要理化性质指标呈现差异性。

2.1 土壤理化性质

从图 1 可见, 乔木群落的土壤含水量为 14.2%,

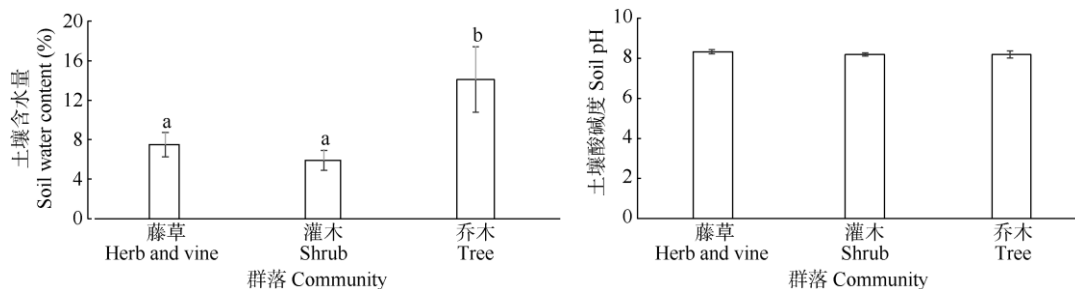


图 1 不同植被的土壤含水量和 pH。柱上不同字母表示差异显著($P < 0.05$)。下图同。

Fig. 1 Soil water content and pH in different vegetation types in Islands. Different letters upon column indicate significant difference at 0.05 level. The same is followed Figures.

显著高于藤草群落(5.9%)与灌丛群落(6.8%) ($P < 0.05$)。不同植物群落的土壤均呈碱性, pH 约为 8.18~8.36, 乔木群落较藤草群落低, 但差异不显著。从图 2 可见, 乔木群落的土壤有效氮含量(15.1 mg kg⁻¹)显著高于灌木群落(8.4 mg kg⁻¹)和藤草群落(3.2 mg kg⁻¹) ($P < 0.05$), 全氮含量亦较高, 但未达显著差异。随着植被类型由藤草本群落经灌木群落向乔木群落变化, 土壤总磷含量呈现下降趋势, 但差异不显著, 土壤有机质含量呈现上升趋势, 但差异亦不显著($P > 0.05$)。

2.2 土壤微生物量及其影响因素

草藤本群落土壤中的微生物生物量碳、生物量氮分别为 176.2 与 41.2 mg kg⁻¹, 在乔木群落中显著升高至 391.5 和 98.8 mg kg⁻¹ (图 3)。相关分析表明, 土壤微生物生物量碳与土壤含水量、土壤铵态氮含量、硝态氮含量及全氮含量呈极显著正相关关系($P < 0.01$), 土壤微生物生物量氮与 pH 呈显著负相关($P < 0.05$), 与土壤有机质含量、土壤铵态氮含量、硝态氮含量及全氮含量呈极显著正相关关系($P < 0.01$) (表 2)。

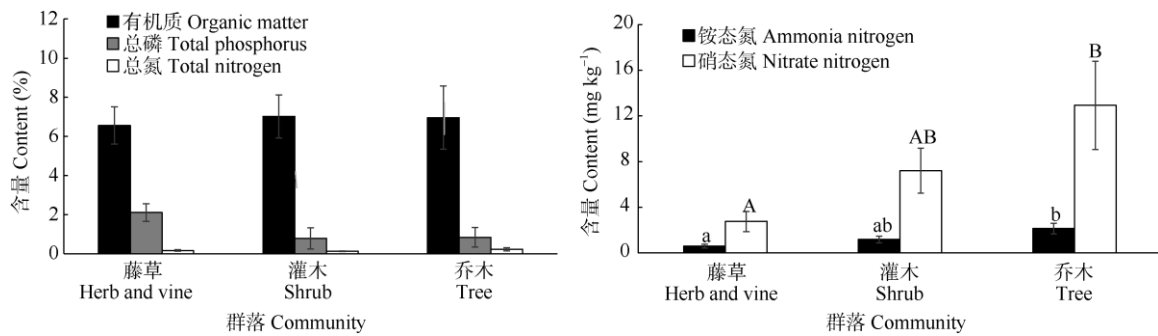


图 2 不同植被的土壤养分含量

Fig. 2 Soil nutrient contents in different vegetation types in Islands

表 2 土壤微生物量碳、生物量氮与土壤理化性质间的相关系数(*r*)Table 2 Correlation coefficient (*r*) between soil microbial biomass carbon, nitrogen contents and soil physicochemical properties

土壤理化性质 Soil physicochemical property	微生物量碳 Microbial biomass carbon		微生物量氮 Microbial biomass nitrogen	
	<i>r</i>	<i>P</i>	<i>r</i>	<i>P</i>
含水率 Water content	0.71	<0.001**	-	>0.05
pH	-	>0.05	-0.44	<0.05*
有机质 Organic matter	-	>0.05	0.51	<0.01**
铵态氮 NH ₄ ⁺ -N	0.58	<0.01**	0.56	<0.01**
硝态氮 NO ₃ ⁻ -N	0.61	<0.001**	0.83	<0.001**
全氮 Total nitrogen	0.58	<0.01**	0.52	<0.01**
全磷 Total phosphorus	-	>0.05	-	>0.05

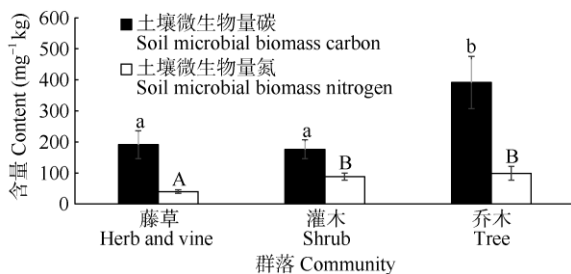
*: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$ 

图 3 不同植被的土壤微生物量碳和土壤微生物量氮含量

Fig. 3 Soil microbial biomass carbon and nitrogen contents in different vegetation types in Islands

3 讨论和结论

本研究中乔木群落下的土壤含水量显著高于藤草群落和灌木群落,这与滇西北亚高山地区植被演替对土壤物理性质的研究结果一致^[25]。随着植被从藤草群落经灌木群落演替到乔木群落,植被盖度增加,地上部分生物量明显升高,一方面,增加的枯枝落叶提高了土壤表面的腐殖质含量,对土壤水分起到蓄积作用^[25],同时减少强降雨对地表的冲刷,减缓地表径流;另一方面,植物盖度的

增加可以有效减弱阳光对地表的直射,由于乔木冠层距地面较高,可以缓解阳光对地表的加热,同时减弱强风对地表蒸发的加剧,从而使乔木群落下具有更高的土壤含水量。

西沙群岛的成土母质是贝壳碎屑、砂及鸟粪磷矿等,在高温多雨的气候和植物腐殖质作用下形成以钙磷为主的钙质石灰土^[5]。本研究中随着藤草群落向灌木群落和乔木群落演替,土壤 pH 降低但差异不显著。有关喀斯特地区植被自然恢复的研究表明,由草灌木阶段演替至次生林阶段,土壤可由弱碱性演变为弱酸性^[26]。这表明随着演替的进行,区域内主要植被类型发生变化,土壤的 pH 会有所下降,可能的原因是:一方面与藤草群落和灌木群落比较,乔木群落会产生较厚的凋落物层,分解时产生的有机盐使表层土壤 pH 降低^[27];另一方面海岛上草藤本植物相对于乔木而言生长在更靠近海岛边缘的地方,更易受到盐雾和海水的影响,从而具有更高的 pH。

在不同植物群落土壤中,乔木具有显著较高的有效氮含量和相对较高但未达显著的全氮含量。这与前人的研究报道一致,喀斯特地区由草地至乔木

林的正向演替可以有效改善土壤的氮素状况^[28-29]; 黄土高原子午岭地区在弃耕地、草本群落阶段、灌木群落阶段、先锋乔木群落阶段、混交林过渡群落阶段至顶级群落的演替过程中, 全氮含量与有效氮含量比初期分别增加了 106% 和 29%^[25]。在原生裸地阶段, 缺乏植被使得土壤水分与养分状况极差, 尤其缺乏氮素, 而其初期定居者一般具有固氮能力, 当富氮的凋落物被分解后, 氮素进入土壤并累积起来, 为后来物种定居创造更适宜的养分条件, 加快植被类型变化, 从而促进演替的发生^[30]。自然条件下海岛生态系统中, 生物固氮广泛存在。陈永妍等对滨海植物的根际氮素转化相关微生物的研究表明, 在滨海盐碱土壤中, 4 种常见滨海植物对固氮菌都有强烈的根际效应^[31]。本研究中乔木群落下土壤的全氮与有效氮含量与草藤本群落和灌木群落相比均呈升高趋势, 可能在于植物根际对固氮菌强烈的生长刺激作用使得土壤中累积了从大气中获得的可利用氮。前期研究表明乔木叶片具有更高的全氮含量^[32], 本研究也表明乔木叶片的全氮含量显著高于灌木及草藤本(未发表数据), 穿透雨对叶片氮素的淋溶及凋落物的淋溶分解使得乔木群落下土壤全氮含量及有效氮含量均较高。

土壤有机质含量在藤草群落、灌木群落至乔木群落的恢复过程呈升高趋势, 但不同植被类型间的差异不显著。有研究表明, 随着群落正向演替的发生, 草地通常转变为森林, 土壤有机质(或有机碳)逐渐增加^[25,28-29]。而本研究中土壤有机质含量在植被类型间变化不大的原因可能是, 与陆地森林生态系统相比, 海岛生态系统生产力的限制因素仍然是氮元素, 氮元素的缺乏可能影响了植物凋落物的质量及凋落物的分解, 从而使得乔木群落下土壤有机质含量仅有升高的趋势。

本研究中对不同植物群落下土壤微生物量进行比较, 乔木群落显著高于草藤本或灌木植被。以往研究也有类似的结果报道, 高喜等^[33]报道喀斯特地区土壤微生物生物量碳在不同植被类型间表现为林地>灌木丛>草丛; 梁月明等^[34]报道, 土壤微生物生物量碳在植被不同恢复阶段差异显著, 原生林或次生林土壤微生物生物量碳和氮均显著高于灌木丛或草丛。本研究中土壤微生物生物量碳和生物量氮的增加可能与土壤湿度增加及 pH 降低有关。大部分研究表明, 土壤微生物生物量碳、氮与土壤有机质、全氮、全磷等土壤养分呈显著正相关^[21,35-36]。

本研究中, 土壤微生物生物量碳与土壤含水量显著正相关($P < 0.001$), 这与干旱区荒漠生态系统土壤湿度与微生物量存在显著正相关关系的研究结果一致^[37-38]。微生物生物量碳、氮与土壤水分关系的研究报道虽较多, 但至今仍无确定性结论^[39-41]。结合本研究结果, 对于海岛或荒漠等土壤湿度较低的生态系统, 土壤含水量的升高对微生物量的增加具有显著的促进作用, 水分可能是调控微生物活性的重要因素。

本研究中土壤微生物量氮与土壤酸碱度呈显著负相关, 与路海玲等关于盐胁迫条件下农田生态系统土壤微生物量氮与土壤 pH 值存在显著负相关的研究结果一致, 可能是因为随着盐分的升高, 土壤养分各项指标逐渐降低, 同时可对微生物细胞造成渗透压胁迫, 抑制土壤微生物活性、并降低其种群数量^[42]。土壤微生物量碳、微生物量氮与土壤有效氮、全氮或有机质呈显著正相关关系, 与前人的研究结果基本一致^[39,43-44]。本研究中土壤微生物生物量碳氮与土壤全磷未见显著相关性。与陆地森林常受到磷的限制相比, 本地土壤形成于珊瑚礁与鸟粪磷矿, 磷供应相对比氮供应充足, 氮素而非磷素更易成为限制微生物量及活性的因素。

海岛面积较小, 生态系统相对脆弱、植物群落结构简单。在海岛植被恢复过程中, 由藤草群落经灌丛至乔木群落, 不同植被类型下土壤含水量上升、酸碱度下降, 可提高土壤微生物活性, 土壤微生物活性增强又可促进其土壤理化性质的改善及增加养分循环速率, 有利于提高生态系统稳定性。海岛土壤具有富磷少氮的特性, 恢复早期适当引种豆科植物或添加有机质可改善土壤氮素状况及水分条件, 从而降低氮素对土壤微生物的限制, 提高海岛生态系统快速恢复能力。

参考文献

- [1] LUO Q, LIU H, WU G L, et al. Using functional traits to evaluate the adaptability of five plant species on tropical coral islands [J]. *Acta Ecol Sin*, 2018, 38(4): 1256-1263. doi: 10.5846/stxb201612152597.
罗琦, 刘慧, 吴桂林, 等. 基于功能性状评价 5 种植物对热带珊瑚岛环境的适应性 [J]. *生态学报*, 2018, 38(4): 1256-1263. doi: 10.5846/stxb201612152597.
- [2] YANG H, SU T, DAI X J. Suitability evaluation of land resources of non-resident islands in Shanghai [J]. *J Shanghai Ocean Univ*, 2012, 21(1): 92-96.

- 杨红, 苏婷, 戴小杰. 上海市无居民岛土地资源开发适宜性研究 [J]. 上海海洋大学学报, 2012, 21(1): 92–96.
- [3] SHI H H, ZHENG W, DING D W, et al. Valuation and ecosystem services of typical island [J]. *Marin Environ Sci*, 2009, 28(6): 743–748.
- 石洪华, 郑伟, 丁德文, 等. 典型海岛生态系统服务及价值评估 [J]. *海洋环境科学*, 2009, 28(6): 743–748.
- [4] WANG G M, YE B. Floristic composition and diversity of typical plant community in Zhoushan Archipelago, east China [J]. *Chin J Ecol*, 2017, 36(2): 349–358. doi: 10.13292/j.1000-4890.201702.037.
- 王国明, 叶波. 舟山群岛典型植物群落物种组成及多样性 [J]. *生态学杂志*, 2017, 36(2): 349–358. doi: 10.13292/j.1000-4890.201702.037.
- [5] XING F W, WU D L, LI Z X, et al. Study on the flora and vegetation of Nansha Islands, China [J]. *Guihaia*, 1994, 14(2): 151–156.
- 邢福武, 吴德邻, 李泽贤, 等. 我国南沙群岛的植物与植被概况 [J]. *广西植物*, 1994, 14(2): 151–156.
- [6] REN H, JIAN S G, ZHANG Q M, et al. Plants and vegetation on South China Sea Islands [J]. *Ecol Environ Sci*, 2017, 26(10): 1639–1648. doi: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2017.10.001.
- 任海, 简曙光, 张倩娟, 等. 中国南海诸岛的植物和植被现状 [J]. *生态环境学报*, 2017, 26(10): 1639–1648. doi: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2017.10.001.
- [7] TONG Y, JIAN S G, CHEN Q, et al. Vascular plant diversity of the Paracel Islands, China [J]. *Biodiv Sci*, 2013, 21(3): 364–374. doi: 10.3724/SP.J.1003.2013.11222.
- 童毅, 简曙光, 陈权, 等. 中国西沙群岛植物多样性 [J]. *生物多样性*, 2013, 21(3): 364–374. doi: 10.3724/SP.J.1003.2013.11222.
- [8] ZHENG J M, FANG X, ZHU X P, et al. Wild plant germplasm and biodiversity in Dayu Island, Pingtan [J]. *J Anhui Agric Univ*, 2016, 43(4): 640–645.
- 郑俊鸣, 方笑, 朱雪平, 等. 平潭大屿岛植物资源及其多样性研究 [J]. *安徽农业大学学报*, 2016, 43(4): 640–645.
- [9] LIANG Y E, ZHU S Q, CHEN Y H, et al. Characteristics of hilly soil in Nan'ao Island [J]. *Ecol Sci*, 1993, 12(2): 47–54.
- 梁永杰, 朱世清, 陈研华, 等. 南澳岛丘陵土壤特性 [J]. *生态科学*, 1993, 12(2): 47–54.
- [10] ZHANG X L. The genetic properties and classification of soil in islets of Zhejiang Province [J]. *J Zhejiang Normal Univ (Nat Sci)*, 2001, 24(4): 385–388. doi: 10.3969/j.issn.1001-5051.2001.04.017.
- 张雪林. 浙江省海岛土壤发生特征及其分类 [J]. *浙江师大学报(自然科学版)*, 2001, 24(4): 385–388. doi: 10.3969/j.issn.1001-5051.2001.04.017.
- [11] WANG C Y, ZHANG J, XIN H M, et al. Ecological risk assessment of island exploitation based on landscape pattern [J]. *Acta Ecol Sin*, 2008, 28(6): 2811–2817.
- 王常颖, 张杰, 辛红梅, 等. 基于景观格局的海岛开发潜在生态风险评价 [J]. *生态学报*, 2008, 28(6): 2811–2817.
- [12] XIAO J M, YANG S Y. Application of the PSR model to the assessment of island ecosystem [J]. *J Xiamen Univ (Nat Sci)*, 2007, 46(S1): 191–196.
- 肖佳媚, 杨圣云. PSR 模型在海岛生态系统评价中的应用 [J]. *厦门大学学报(自然科学版)*, 2007, 46(S1): 191–196.
- [13] WHITTAKER R J. *Island Biogeography: Ecology, Evolution, and Conservation* [M]. New York: Oxford University Press, 1998: 1–285.
- [14] REN H, LI P, ZHOU H C, et al. The restoration of degraded island ecosystems [J]. *Ecol Sci*, 2001, 20(1/2): 60–64.
- 任海, 李萍, 周厚诚, 等. 海岛退化生态系统的恢复 [J]. *生态科学*, 2001, 20(1/2): 60–64.
- [15] CAO C, JIAN S G, REN H, et al. The ecophysiological characteristics of *Pemphis acidula*: A tropical beach plant [J]. *Ecol Environ Sci*, 2017, 26(12): 2064–2070. doi: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2017.12.010.
- 曹策, 简曙光, 任海, 等. 热带海滨植物水荦花(*Pemphis acidula*)的生理生态学特性 [J]. *生态环境学报*, 2017, 26(12): 2064–2070. doi: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2017.12.010.
- [16] LIN Y X, LIU H, HE P C, et al. Physiological and biochemical responses of three species to environment stresses of tropical coral islands [J]. *J Trop Subtrop Bot*, 2017, 25(6): 562–568. doi: 10.11926/jtsb.3755.
- 林忆雪, 刘慧, 贺鹏程, 等. 三种适生植物对热带珊瑚岛胁迫生境的生理生化响应 [J]. *热带亚热带植物学报*, 2017, 25(6): 562–568. doi: 10.11926/jtsb.3755.
- [17] XU B B, LIU N, REN H, et al. Stress resistance biological characteristics of *Scaevola sericea* in paracel islands [J]. *Guihaia*, 2018, 38(10): 1277–1285. doi: 10.11931/guihaia.gxzw201711012.
- 徐贝贝, 刘楠, 任海, 等. 西沙群岛草海桐的抗逆生物学特性 [J]. *广西植物*, 2018, 38(10): 1277–1285. doi: 10.11931/guihaia.gxzw201711012.
- [18] WANG T P. Effects of different improvement measures on physicochemical characteristics of meadow alkali soil [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2010: 15–16.
- 王天平. 不同改良措施对碱化草甸土壤理化性状的影响 [D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2010: 15–16.
- [19] PANG S T, DONG Y H. Impact of nitrogen fertilizer on plant-herbivore-natural enemy tritrophic interactions [J]. *Chin J Bio Control*, 2013, 29(1): 124–132.
- 庞淑婷, 董元华. 氮肥对植物-植食性昆虫-天敌三级营养关系的影响

- 响 [J]. 中国生物防治学报, 2013, 29(1): 124–132.
- [20] CAO G M, WU Q, LI D, et al. Effects of nitrogen supply and demand status of soil and herbage system on vegetation succession and grassland degradation in alpine meadow [J]. *Chin J Ecol*, 2004, 23(6): 25–28.
- 曹广民, 吴琴, 李东, 等. 土壤-牧草氮素供需状况变化对高寒草甸植被演替与草地退化的影响 [J]. 生态学杂志, 2004, 23(6): 25–28.
- [21] ZANG Y F, HAO M D, ZHANG L Q, et al. Effects of wheat cultivation and fertilization on soil microbial biomass carbon, soil microbial biomass nitrogen and soil basal respiration in 26 years [J]. *Acta Ecol Sin*, 2015, 35(5): 1445–1451. doi: 10.5846/stxb201305070967.
- 臧逸飞, 郝明德, 张丽琼, 等. 26 年长期施肥对土壤微生物量碳、氮及土壤呼吸的影响 [J]. 生态学报, 2015, 35(5): 1445–1451. doi: 10.5846/stxb201305070967.
- [22] XU Y C, SHEN Q R, RAN W. Effects of zero-tillage and application of manure on soil microbial biomass C, N, and P after sixteen years of cropping [J]. *Acta Pedol Sin*, 2002, 39(1): 89–96. doi: 10.11766/trxb200103110113.
- 徐阳春, 沈其荣, 冉炜. 长期免耕与施用有机肥对土壤微生物生物量碳、氮、磷的影响 [J]. 土壤学报, 2002, 39(1): 89–96. doi: 10.11766/trxb200103110113.
- [23] LIU G S. Soil Physical and Chemical Analysis & Description of Soil Profiles [M]. Beijing: Standards Press of China, 1996: 27–80.
- 刘光崧. 土壤理化分析与剖面描述 [M]. 北京: 中国标准出版社, 1996: 27–80.
- [24] BREMNER J M, MULVANEY C S. Nitrogen-total [M]// *Methods of Soil Analysis, Part 2. Chemical and Microbiological Properties*. Madison, Wisconsin, USA: Soil Science Society of America, 1982: 595–624.
- [25] WANG K B, CHEN M L, QIN J, et al. Plant species diversity and the relation with soil properties in natural succession process in Ziwuling area [J]. *Acta Bot Boreali-Occid Sin*, 2007, 27(10): 2089–2096. doi: 10.3321/j.issn:1000-4025.2007.10.025.
- 王凯博, 陈美玲, 秦娟, 等. 子午岭植被自然演替中植物多样性变化及其与土壤理化性质的关系 [J]. 西北植物学报, 2007, 27(10): 2089–2096. doi: 10.3321/j.issn:1000-4025.2007.10.025.
- [26] SI B, YAO X H, REN H D, et al. A study on soil physical and chemical properties in the process of vegetation succession in Karst area in central Guizhou [J]. *Acta Agric Univ Jiangxi*, 2008, 30(6): 1122–1125. doi: 10.3969/j.issn.1000-2286.2008.06.035.
- 司彬, 姚小华, 任华东, 等. 黔中喀斯特植被恢复演替过程中土壤理化性质研究 [J]. 江西农业大学学报, 2008, 30(6): 1122–1125. doi: 10.3969/j.issn.1000-2286.2008.06.035.
- [27] ZHAO J X. Studies on the soil pH and plant growth [J]. *Inner Mongolia Agric Sci Technol*, 2003, 33(6): 33,42. doi: 10.3969/j.issn.1007-0907.2003.06.019.
- 赵军霞. 土壤酸碱性对植物的生长 [J]. 内蒙古农业科技, 2003, 33(6): 33, 42. doi: 10.3969/j.issn.1007-0907.2003.06.019.
- [28] WANG Y, WANG K L, ZOU D S, et al. Effects of vegetation succession on soil quality in Karst Region of Guangxi, China [J]. *J Soil Water Conserv*, 2007, 21(6): 130–134. doi: 10.3321/j.issn:1009-2242.2007.06.030.
- 王韵, 王克林, 邹冬生, 等. 广西喀斯特地区植被演替对土壤质量的影响 [J]. 水土保持学报, 2007, 21(6): 130–134. doi: 10.3321/j.issn:1009-2242.2007.06.030.
- [29] ZHANG W, WANG K L, LIU S J, et al. Soil nutrient accumulation and its affecting factors during vegetation succession in karst peak-cluster depressions of South China [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2013, 24(7): 1801–1808.
- 张伟, 王克林, 刘淑娟, 等. 喀斯特峰丛洼地植被演替过程中土壤养分的积累及影响因素 [J]. 应用生态学报, 2013, 24(7): 1801–1808.
- [30] SONG C J, MA K M, FU B J, et al. A review on the functions of nitrogen-fixers in terrestrial ecosystems [J]. *Acta Ecol Sin*, 2009, 29(2): 869–877. doi: 10.3321/j.issn:1000-0933.2009.02.040.
- 宋成军, 马克明, 傅伯杰, 等. 固氮类植物在陆地生态系统中的作用研究进展 [J]. 生态学报, 2009, 29(2): 869–877. doi: 10.3321/j.issn:1000-0933.2009.02.040.
- [31] CHEN Y Y, QIU C H, CHU Q Y, et al. Rhizosphere effect and distribution of microorganisms related from four strand plants [J]. *Hubei Agric Sci*, 2014, 53(3): 562–564,568. doi: 10.3969/j.issn.0439-8114.2014.03.016.
- 陈永妍, 仇慈欢, 储秋燕, 等. 四种滨海植物根际微生物分布及根际效应研究 [J]. 湖北农业科学, 2014, 53(3): 562–564,568. doi: 10.3969/j.issn.0439-8114.2014.03.016.
- [32] LIU Z F, LIU G H, FU B J, et al. Dynamics of soil microbial biomass C, N along restoration chronosequences in pine plantations [J]. *Acta Ecol Sin*, 2007, 27(3): 1011–1018.
- 刘占锋, 刘国华, 傅伯杰, 等. 人工油松林(*Pinus tabulaeformis*)恢复过程中土壤微生物生物量 C、N 的变化特征 [J]. 生态学报, 2007, 27(3): 1011–1018.
- [33] GAO X, WAN S, CAO J H, et al. Comparative investigation of soil microbial activity in the Karst and Non-Karst Areas [J]. *Earth Environ*, 2012, 40(4): 499–504.
- 高喜, 万珊, 曹建华, 等. 岩溶区与非岩溶区土壤微生物活性的对比研究 [J]. 地球与环境, 2012, 40(4): 499–504.
- [34] LIANG Y M, HE X Y, SU Y R, et al. Dynamic changes of soil

- microbial properties in Karst peak-cluster depression area during vegetation restoration [J]. *Chin J Ecol*, 2010, 29(5): 917–922.
- 梁月明, 何寻阳, 苏以荣, 等. 喀斯特峰丛洼地植被恢复过程中土壤微生物特性 [J]. *生态学杂志*, 2010, 29(5): 917–922.
- [35] YANG H J, XIAO Q M, LIU A Y. Soil microbial diversity and its action [J]. *J Nanhua Univ (Nat Sci)*, 2005, 19(4): 21–26,31. doi: 10.3969/j.issn.1673-0062.2005.04.006.
- 杨海君, 肖启明, 刘安元. 土壤微生物多样性及其作用研究进展 [J]. *南华大学学报(自然科学版)*, 2005, 19(4): 21–26,31. doi: 10.3969/j.issn.1673-0062.2005.04.006.
- [36] ZHANG H Y, XIAO Y H, ZHANG X D, et al. Microbial biomass as an indicator for evaluation of soil fertility properties [J]. *Chin J Soil Sci*, 2006, 37(3): 422–425. doi: 10.3321/j.issn:0564-3945.2006.03.002.
- 张海燕, 肖延华, 张旭东, 等. 土壤微生物量作为土壤肥力指标的探讨 [J]. *土壤通报*, 2006, 37(3): 422–425. doi: 10.3321/j.issn:0564-3945.2006.03.002.
- [37] LI D P, CHEN L J, WU Z J, et al. Dynamics of microbial biomass N in different fertilized black soil and its related factors [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2004, 15(10): 1891–1896.
- 李东坡, 陈利军, 武志杰, 等. 不同施肥黑土微生物量氮变化特征及相关因素 [J]. *应用生态学报*, 2004, 15(10): 1891–1896.
- [38] JIA G M, WANG C Y, CAO J, et al. Microbial biomass in soil during secondary forest succession in Ziwuling, northwest China [J]. *J Lanzhou Univ (Nat Sci)*, 2007, 43(1): 80–83. doi: 10.3321/j.issn:0455-2059.2007.01.017.
- 贾国梅, 王春燕, 曹靖, 等. 子午岭次生林恢复演替中土壤微生物量的变化动态 [J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2007, 43(1): 80–83. doi: 10.3321/j.issn:0455-2059.2007.01.017.
- [39] YANG K, ZHU J J, ZHANG J X, et al. Seasonal dynamics of soil microbial biomass C and N in two larch plantation forests with different ages in northeastern China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2009, 29(10): 5500–5507. doi: 10.3321/j.issn:1000-0933.2009.10.039.
- 杨凯, 朱教君, 张金鑫, 等. 不同林龄落叶松人工林土壤微生物生物量碳氮的季节变化 [J]. *生态学报*, 2009, 29(10): 5500–5507. doi: 10.3321/j.issn:1000-0933.2009.10.039.
- [40] LI S L, FANG X, XIANG W H, et al. Soil microbial biomass carbon and nitrogen concentrations in four subtropical forests in hilly region of central Hunan Province, China [J]. *Sci Silv Sin*, 2014, 50(5): 8–16. doi: 10.11707/j.1001-7488.20140502.
- 李胜蓝, 方晰, 项文化, 等. 湘中丘陵区 4 种森林类型土壤微生物生物量碳氮含量 [J]. *林业科学*, 2014, 50(5): 8–16. doi: 10.11707/j.1001-7488.20140502.
- [41] GUAN H Y, WANG Q, ZHAO X, et al. Seasonal patterns of soil microbial biomass C and impacting factors in two typical arid desert vegetation regions [J]. *Arid Land Geog*, 2015, 38(1): 67–75.
- 管海英, 王权, 赵鑫, 等. 两种典型荒漠植被区土壤微生物量碳的季节变化及影响因素分析 [J]. *干旱区地理*, 2015, 38(1): 67–75.
- [42] LU H L, MENG Y L, ZHOU L L, et al. Effects of salt stress on soil microbial biomass and soil nutrients in cotton field [J]. *J Soil Water Conserv*, 2011, 25(1): 197–201.
- 路海玲, 孟亚利, 周玲玲, 等. 盐胁迫对棉田土壤微生物量和土壤养分的影响 [J]. *水土保持学报*, 2011, 25(1): 197–201.
- [43] WANG F Q, TIAN L Q, SONG A D, et al. Seasonal dynamics of microbial biomass carbon and nitrogen in soil of *Robinia pseudoacacia* forests and near-naturally restored vegetation in northern China [J]. *Sci Silv Sin*, 2015, 51(3): 16–24. doi: 10.11707/j.1001-7488.20150303.
- 王凤芹, 田丽青, 宋安东, 等. 华北刺槐林与自然恢复植被土壤微生物量碳、氮含量四季动态 [J]. *林业科学*, 2015, 51(3): 16–24. doi: 10.11707/j.1001-7488.20150303.
- [44] CHENG Y, AN S S, MA Y F. Soil microbial biomass and enzymatic activities in the Loess Hilly Area of Ningxia under different slope positions [J]. *Res Soil Water Conserv*, 2010, 17(5): 148–153.
- 成毅, 安韶山, 马云飞. 宁南山区不同坡位土壤微生物生物量和酶活性的分布特征 [J]. *水土保持研究*, 2010, 17(5): 148–153.