

DOI: 10.20152/j.np.202312290043

黄耀, 梁彩群, 莫燕妮, 刘畅, 张翔, 郝杰威, 李东海, 戚春林, 张顺卫, 李婧涵, 杨小波. 长期干扰对海南国家公园热带雨林群落木本植物特征的影响. 国家公园(中英文), 2024, 2(4): - .

Huang Y, Liang C Q, Mo Y N, Liu C, Zhang X, Hao J W, Li D H, Qi C L, Zhang S W, Li J H, Yang X B. Impact of long-term disturbance on the characteristics of woody plant communities in the Hainan Tropical Rainforest National Park. National Park, 2024, 2(4): - .

长期干扰对海南国家公园热带雨林群落木本植物特征的影响

黄耀¹, 梁彩群¹, 莫燕妮², 刘畅¹, 张翔¹, 郝杰威¹, 李东海¹, 戚春林¹, 张顺卫¹, 李婧涵¹, 杨小波^{1,*}

1 海南大学生态学院, 海南省热带生态环境修复工程研究中心, 海口 570228

2 海南省林业局生态保护修复处, 海口 570203

摘要:海南热带雨林国家公园成立于 2021 年, 但仍有局部区域的植被因历史原因存在人为干扰。以海南热带雨林国家公园中霸王岭、吊罗山、尖峰岭 3 个片区的热带雨林为例, 采用时空替代法, 调查并分析了 3 个国家公园受不同程度长期干扰群落物种丰富度、多样性和物种组成及其受地形和生物因子的综合影响。结果表明, 长期干扰降低了 3 个国家公园群落的 α 多样性, 增加了 β 多样性。物种组成的相似性沿长期干扰的梯度递减。长期干扰与木本植物物种组成呈负相关关系。长期干扰削弱了木本植物丰富度与地形、生物因子关系, 直接影响木本植物丰富度。需要重点监测公园内受干扰严重的森林群落以维持海南国家公园生物多样性。

关键词: 人类干扰; 濒危植物; 国家公园; 物种组成

Impact of long-term disturbance on the characteristics of woody plant communities in the Hainan Tropical Rainforest National Park

HUANG Yao¹, LIANG Caiqun¹, MO Yanni², LIU Chang¹, ZHANG Xiang¹, HAO Jiewei¹, LI Donghai¹, QI Chunlin¹, ZHANG Shunwei¹, LI Jinghan¹, YANG Xiaobo^{1,*}

1 Center of Eco-Environment Restoration Engineering of Hainan Province, School of Ecology, Hainan University, Haikou 570228, China

2 Department of Ecological Protection and Restoration, Forestry Department of Hainan Province, Haikou 570203, China

Abstract: In the Hainan Tropical Rainforest National Park, established in 2021, certain vegetation areas have been subjected to anthropogenic disturbance due to historical causes. This study examines the tropical rainforest sections in three sub-regions within the park, namely Bawangling, Diaoluoshan, and Jianfengling, and investigates the effects of varying degrees of long-term disturbance on species richness, diversity, composition, as well as the combined impact of topographic and biological factors using the spatio-temporal substitution method. The results indicated that long-term disturbance reduced the α -diversity, while increasing β -diversity. Similarities in species composition decreased along the gradient of long-term disturbance. There was a negative correlation between long-term disturbance and woody plant species composition. Long-term disturbance diminished the relationship between the richness of woody plants and both topographic and biological factors, directly affecting the abundance of these plants. To maintain the biodiversity of the Hainan National Park, it is crucial to

基金项目: 国家自然科学基金地区项目(32260267); 海南省野生动植物保护管理局项目(HD-KYH-2022165); 海南智慧雨林中心项目(HD-KYH-2022088)

收稿日期: 2023-12-29; 采用日期: 2024-05-22

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yanfengxb@163.com

focus on monitoring forest communities that are severely disturbed within the park.

Key Words: anthropocene disturbance; endangered species; national park; species composition

人类活动导致的森林破碎化仍然是威胁热带地区陆地生物多样性的主要驱动力^[1-2]。人类活动改变了大量生物物种的栖息地生境导致物种丰富度和多度急剧下降,物种濒危和灭绝风险增加^[3]。为保护退化森林、实现保护濒危植物在内的自然栖息地和维持生态功能等目标,在多个生物多样性热点地区建立国家森林保护优先区(NFPA)的计划已经被世界多个国家证实为行之有效,兼具生态和社会效益的举措^[2,4-5]。

热带雨林被认为是地球上生物种类最丰富的生态系统,具有不可替代的生态系统服务功能^[6]。海南热带雨林位于热带北缘,是中国分布最集中、保存最好、连片面积最大的大陆海岛型热带雨林^[7]。在过去的几十年里,海南热带雨林面临着人为干扰、过度开发和外来植物入侵的压力。中国政府高度重视海南热带雨林保护工作,于2019年1月审议通过了《海南热带雨林系统试验区国家公园方案》^[8]。海南热带雨林国家公园的目的是保护海南热带雨林现存的生物多样性及濒危物种,特别是海南热带雨林国家公园内的霸王岭、吊罗山和尖峰岭片区,既维持了现存森林生态系统,也保存了大量濒危植物栖息地。

海南热带雨林国家公园中霸王岭、吊罗山和尖峰岭片区(以下简称“BP”、“JP”和“DP”)分别位于海南热带雨林国家公园的西北部、西南部和东南部,有重要的生态系统服务和生态系统功能,也是大量濒危植物的天然保育区^[6]。人类开发和土地利用变化是森林破碎化和退化的重要影响因素之一^[9]。前期研究表明,村庄、道路、观光设施和保护站的前期建设、设备运营和维护以及人类日常生活的长期性干扰(简称“长期干扰”)是植物多样性减少、森林破碎化的重要诱因,对高大的木本植物的影响尤为明显^[10]。除长期干扰外,其他非生物因素,如海拔(和温度密切相关)和坡度,也决定了热带雨林植物物种组成和多样性^[11]。早在2021年国家公园成立前,霸王岭、吊罗山和尖峰岭各片区也存在一定程度的开发^[12]。该地区濒危物种所在森林群落木本植物特征与其生境及长期干扰间的关系尚不清楚。

我们以海南热带雨林国家公园内霸王岭、吊罗山和尖峰岭3个片区受不同干扰程度的濒危植物所在群落为研究对象,探究长期干扰对国家公园濒危植物所在群落中木本植物物种的丰富度、多样性和物种组成的影响。拟解决以下三个问题:(1)不同国家公园植物多样性是否会随着长期干扰程度的增加而减少?(2)物种组成是否在长期干扰梯度上存在显著差异?(3)地形因子、生物因子及长期干扰如何影响木本植物组成和丰富度?

1 材料和方法

1.1 研究区概况

海南热带雨林国家公园位于中国最南端的海南岛中南部,主要由5个国家级自然保护区、4个国家级森林公园、4个省级自然保护区和6个省级森林公园组成。其地理坐标为108°24'—110°04'E,18°18'—19°09'N。这个国家公园的海拔大多在700m以上。主要地形类型为圆顶状山地,在边缘和外围地区有一些低矮的山脉和丘陵,河流两岸有一些河谷梯田和平台。大多数天然斜坡都大于20°。土壤类型主要包括红壤和黄红壤,以及部分黄壤和干旱红壤。海南热带雨林国家公园位于热带北部,属热带海洋季风气候^[13]。年平均气温22.5—26℃,最冷月平均气温在19℃左右^[14]。年平均降水量为1759mm,总体上随海拔升高而增加,5—10月降水以下降为主。降水分布不均导致干湿季节明显^[15]。

霸王岭、吊罗山和尖峰岭片区包含了海南国家公园中最大和保存最完好的热带原始森林。这片森林的植物群异常多样,包括多种国家重点保护野生植物和野生动物^[16-17],国家一级保护的野生植物有:闽粤苏铁(*Cycas taiwaniana*)、坡垒(*Hopea hainanensis*)、美花兰(*Cymbidium insigne*)和卷萼兜兰(*Paphiopedilum appletonianum*),二级保护的野生植物有大叶黑桫欏(*Alsophila gigantea*),海南风吹楠(*Horsfieldia hainanensis*),

海南红豆 (*Ormosia pinnata*)、软荚红豆 (*Ormosia semicastrata*) 和山铜材 (*Chunia bucklandioides*); 国家一级保护的野生动物有海南长臂猿 (*Nomascus hainanus*)、海南山鸚鵡 (*Arborophila ardens*) 和海南孔雀雉 (*Polyplectron katsumatae*)^[18] (图 1)。



图 1 霸王岭、吊罗山和尖峰岭濒危物种及其栖息地

Fig.1 Photographs of endangered species community and their habitats in the Bawangling, Diaoluoshan and Jianfengling

1.2 长期干扰调查

根据卫星影像和实地踏查,我们将森林分为未受干扰 (None disturbed, ND), 低干扰 (Low disturbed, LD) 和严重干扰 (Severe disturbed, SD) 三类: (1) 非受干扰森林有高大的树木, 几乎没有人类活动, 距最近的人工建筑 1000m 以外; (2) 低干扰林灌木密度高, 人类活动少, 距最近的人工建筑 300—1000m; (3) 受严重干扰的森林中高大乔木稀少, 树冠开口, 人类活动频率较高 (足迹、盗挖保护植物), 300m 内存在人工建筑。目前的定量数据支持研究区域的这些标准与其他新热带研究中使用的标准相似^[19—20]。

1.3 样地设置与调查

根据 2012—2023 年对 BP、DP 和 JP 的濒危木本物种进行的全面野外调查数据。基于 1.2 中的标准, 2023 年 6—7 月在每个片区的成熟森林、受干扰森林或次生林中布设了 3 个 10m×10m 的样地, 用手持 GPS 记录坐标点。记录木本植物树种、数量、树高、胸径、冠层盖度、生活力和生境条件^[21—22]。所有胸径≥5cm、高度≥3m 的木本树种均定义为乔木层, 其余定义为灌木, 乔木和灌木都视为木本植物。从不同的角度对群落进行了拍照记录。此外, 还记录了海拔、地形、植被类型、草本覆盖度和凋落物厚度 (表 1)。

1.4 数据分析

采用 Hill 指数 (D, 真实多样性指数) 计算所有种 ($q=0$)、常见种 ($q=1$) 和优势种 ($q=2$) 的不同多样性阶 (0、1 和 2) 中森林群落物种 α 和 β 多样性^[23]。木本物种的生长受到微生境中生物和非生物因子的影响^[24]。我们选择 3 个生物因子 (郁闭度、草本盖度和凋落物厚度), 4 个生境因子 (坡度、坡向、坡位和海拔) 和长期干扰作为影响木本植物特征的 3 类指标。直接测量坡度、坡向和高程。东南、南、西南、西、西北、北、东北、东坡向分别赋值为 0—7^[22]。平原、山下、中山和山上的坡位分别赋值为 0—9 (间隔为 3)。长期障碍程度分别为 1—9 (间隔为 4)。NMDS 用于衡量沿长期干扰梯度的物种组成相似性^[25]。通过随机森林 (Random forest) 分析指标间共线性, 筛选后采用典型相关分析 (CCA) 方法比较了地形、生物因子和长期干扰等环境变量对不同采样点地上植被物种组成的影响。同时我们使用变差分析计算不同长期干扰程度、地形因子和生物因子对木本植物丰富度单独及交互影响。所有统计分析均在 R 软件 4.1.2 版本环境中完成^[26]。

表 1 海南热带雨林国家公园霸王岭、吊罗山和尖峰岭片区的样地信息

Table 1 The information of plots in three sub-regions in the Hainan Tropical Rainforest National Park

样地编号 Plots	经度(E) Longitude	纬度(E) Latitude	植被类型 Vegetation type	干扰状况 Disturbances	优势种 Dominant species	濒危种 Endangered species
BP01	109.2°	19.1°	低地雨林	无	罗浮锥 <i>Castanopsis fabri</i>	软荚红豆 <i>Ormosia semicastrata</i>
BP02	109.1°	19.1°	低地雨林	无	银珠 <i>Peltophorum dasyrrhachis</i> var. <i>tonkinensis</i>	坡垒 <i>Hopea hainanensis</i>
BP03	109.2°	19.1°	山地雨林	无	胡颓子叶柯 <i>Lithocarpus elaeagnifolius</i>	翠柏 <i>Calocedrus macrolepis</i>
BP04	109.2°	19.1°	低地雨林	轻度	海南风吹楠 <i>Horsfieldia hainanensis</i>	海南风吹楠 <i>Horsfieldia hainanensis</i>
BP05	109.2°	19.0°	山地雨林	轻度	思茅松 <i>Pinus kesiya</i> var. <i>langbianensis</i>	翠柏 <i>Calocedrus macrolepis</i>
BP06	109.2°	19.0°	山地雨林	轻度	岭南青冈 <i>Quercus championii</i>	海南油杉 <i>Keteleeria hainanensis</i>
BP07	109.1°	19.1°	低地雨林	重度	烟斗柯 <i>Lithocarpus corneus</i>	海南红豆 <i>Ormosia pinnata</i>
BP08	109.1°	19.0°	低地雨林	重度	海南风吹楠 <i>Horsfieldia hainanensis</i>	海南风吹楠 <i>Horsfieldia hainanensis</i>
BP09	109.1°	19.0°	山地雨林	重度	银珠 <i>Peltophorum dasyrrhachis</i> var. <i>tonkinensis</i>	驼峰藤 <i>Merrillanthus hainanensis</i>
DP01	109.9°	18.7°	低地雨林	无	黄葛树 <i>Ficus virens</i>	美丽火桐 <i>Firmiana pulcherrima</i>
DP02	109.9°	18.7°	低地雨林	无	海南蕈树 <i>Altingia obovata</i>	光叶红豆 <i>Ormosia glaberrima</i>
DP03	109.9°	18.7°	低地雨林	无	木莲 <i>Manglietia fordiana</i>	石碌含笑 <i>Michelia shiluensis</i>
DP04	109.8°	18.7°	低地雨林	轻度	陆均松 <i>Dacrydium pectinatum</i>	缘毛红豆 <i>Ormosia howii</i>
DP05	109.9°	18.7°	低地雨林	轻度	柬埔寨子楝树 <i>Decaspermum montanum</i>	青梅 <i>Vatica mangachapoi</i>
DP06	109.9°	18.7°	低地雨林	轻度	石碌含笑 <i>Michelia shiluensis</i>	石碌含笑 <i>Michelia shiluensis</i>
DP07	109.9°	18.7°	低地雨林	重度	海南蕈树 <i>Altingia obovata</i>	凹叶红豆 <i>Ormosia emarginata</i>
DP08	109.9°	18.7°	低地雨林	重度	保亭梭罗 <i>Reevesia bottingensis</i>	苦梓 <i>Gmelina hainanensis</i>
DP09	109.9°	18.7°	山地雨林	重度	青梅 <i>Vatica mangachapoi</i>	青梅 <i>Vatica mangachapoi</i>
JP01	108.9°	18.7°	低地雨林	无	山铜材 <i>Chunia bucklandioides</i>	坡垒 <i>Hopea hainanensis</i>
JP02	109.0°	18.7°	低地雨林	无	软荚红豆 <i>Ormosia semicastrata</i>	软荚红豆 <i>Ormosia semicastrata</i>
JP03	108.9°	18.7°	低地雨林	无	托盘青冈 <i>Quercus patelliformis</i>	海南紫荆木 <i>Madhuca hainanensis</i>
JP04	108.8°	18.7°	低地雨林	轻度	短药蒲桃 <i>Syzygium globiflorum</i>	肥荚红豆 <i>Ormosia fordiana</i>
JP05	108.9°	18.7°	低地雨林	轻度	山铜材 <i>Chunia bucklandioides</i>	山铜材 <i>Chunia bucklandioides</i>
JP06	108.9°	18.7°	低地雨林	轻度	陆均松 <i>Dacrydium pectinatum</i>	软荚红豆 <i>Ormosia semicastrata</i>
JP07	109.0°	18.7°	低地雨林	重度	油楠 <i>Sindora glabra</i>	油楠 <i>Sindora glabra</i>
JP08	108.8°	18.7°	低地雨林	重度	望谟崖摩 <i>Aglaia lawii</i>	望谟崖摩 <i>Aglaia lawii</i>
JP09	108.9°	18.7°	山地雨林	重度	马占相思 <i>Acacia mangium</i>	巴戟天 <i>Morinda officinalis</i>

BP:国家公园霸王岭片区 Bawangling park; DP:国家公园吊罗山片区 Diaoluoshan park; JP:国家公园尖峰岭片区 Jianfengling park

2 结果与分析

2.1 长期干扰下国家公园濒危植物所在群落特征

国家公园内植物群落木本物种多样性指数结果表明,不同片区森林群落的木本物种 α 和 β 多样性存在显著差异(图 2)。BP 和 JP 群落的木本植物全物种 α 多样性和常见种 α 多样性最高,且均显著高于 DP 群落,但三者优势种 α 多样性无显著差异(图 2)。DP 群落的木本物种 β 多样性显著高于 BP 和 JP 群落(图 2)。

图 3 可以看出,长期干扰显著影响了国家公园森林群落的木本植物 α 和 β 多样性。ND 和 LD 群落的所有物种、常见种和优势种的 α 多样性显著高于 SD 群落,而 ND 和 LD 群落的所有物种、常见种和优势种的 β 多样性无显著差异(图 3)。LD 群落的木本物种 β 多样性与 ND 和 SD 群落没有显著差异,但 ND 群落木本物种的 β 多样性显著低于 SD(图 3)。

2.2 长期干扰下国家公园森林群落木本植物物种组成

长期干扰显著影响了国家公园森林群落物种组成(图 4)。长期干扰影响下,ND 和 LD、SD 森林群落木本植物物种组成间差异明显增加,而 SD 和 LD 的物种组成差异较小。

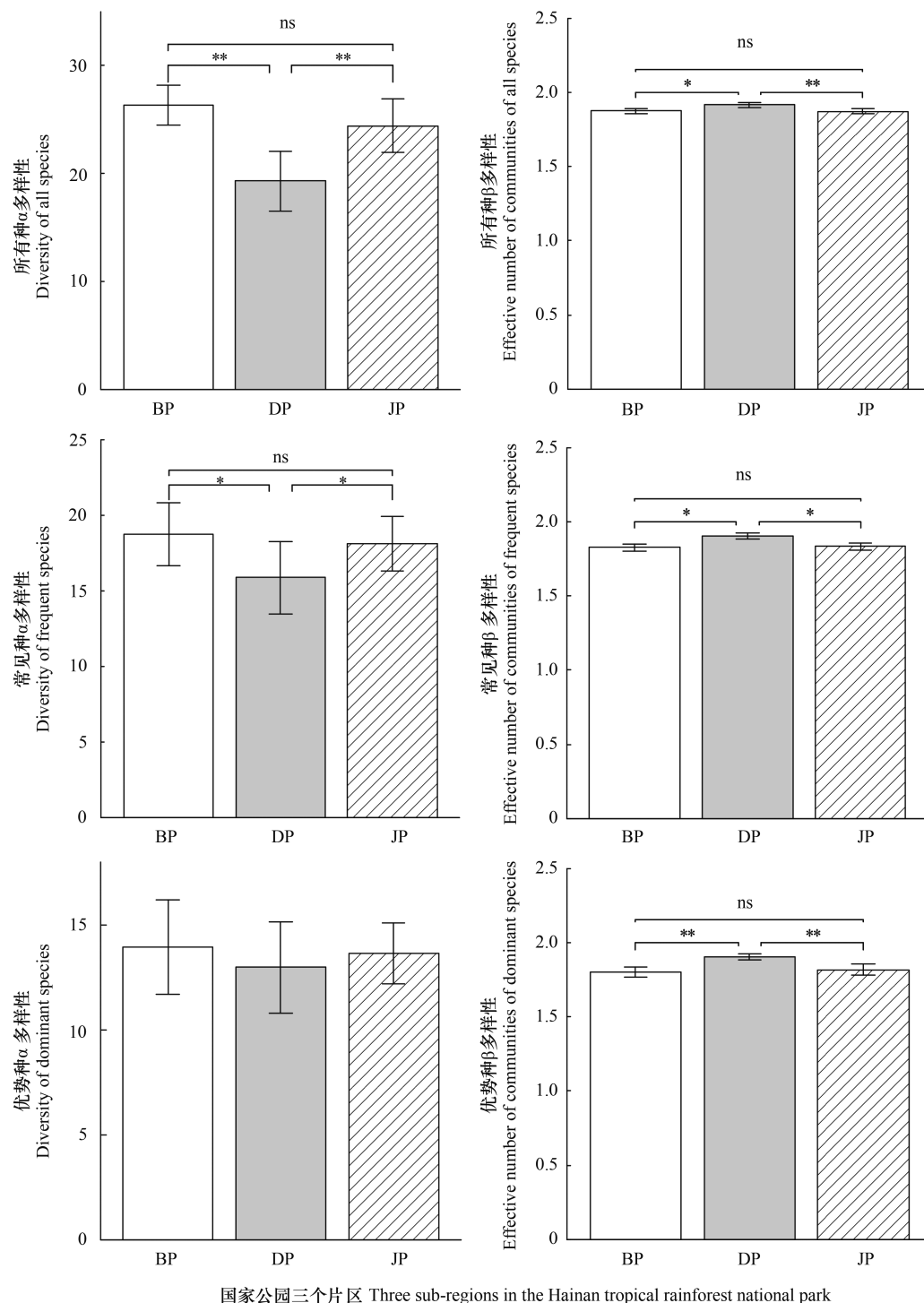


图2 霸王岭、吊罗山和尖峰岭片区森林群落木本植物真多样性指数分析

Fig.2 Bar plots of the true diversity parameters of woody species in three sub-regions

上3图为 α 多样性指数,下3图为 β 多样性指数;Non-S:不显著($P > 0.05$),*:显著($P < 0.05$),**:非常显著($P < 0.01$),***:极显著($P < 0.001$);BP:国家公园霸王岭片区 Bawangling park;DP:国家公园吊罗山片区 Diaoluoshan park;JP:国家公园尖峰岭片区 Jianfengling park

2.3 国家公园植物群落木本植物与生境因子关系

国家公园不同片区森林群落的木本植物组成与生境之间存在显著相关性(图5)。BP群落的木本物种组成主要和长期干扰呈显著负相关,和坡度、海拔呈显著正相关;DP群落的木本物种组成主要和坡度、坡向呈显

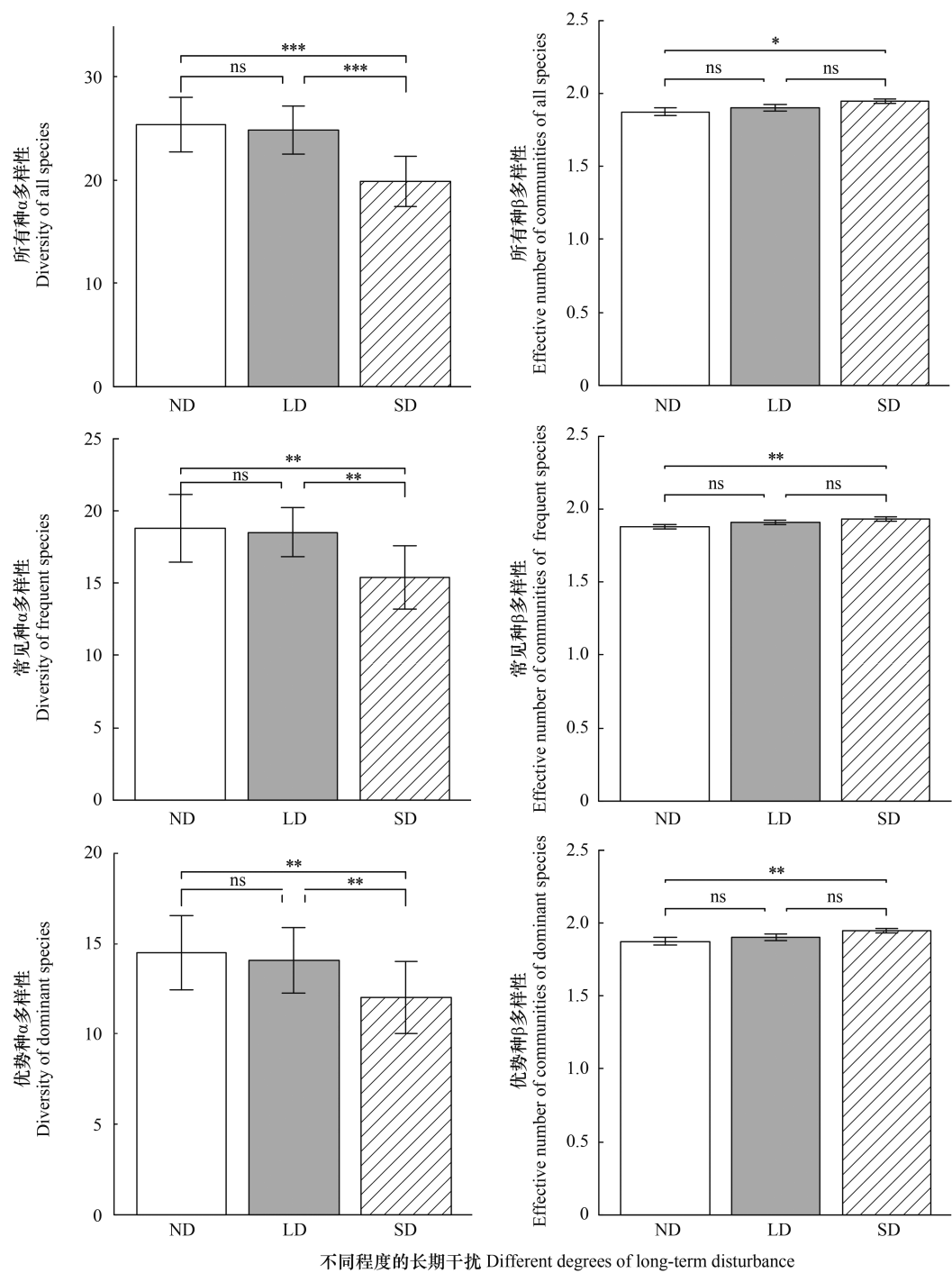


图3 不同干扰程度的国家公园内森林群落木本植物真多样性指数分析

Fig.3 Bar plots of the true diversity parameters of woody species along chronic disturbance in the Hainan Tropical Rainforest National Park

上3图为α多样性指数,下3图为β多样性指数;Non-S:不显著($P > 0.05$),*:显著($P < 0.05$),**:非常显著($P < 0.01$),***:极显著($P < 0.001$);ND:无干扰 Non-disturbed,LD:轻干扰 Low-disturbed,SD:强干扰 Severe-disturbed

著正相关,和草本植物盖度呈显著负相关;JP 群落的木本物种组成主要和长期干扰呈显著正相关,和坡度、海拔及坡向呈显著负相关。环境变量的排列检验表明,3 个片区植物群落的郁闭度与木本物种组成没有显著的相关性(图 6)。

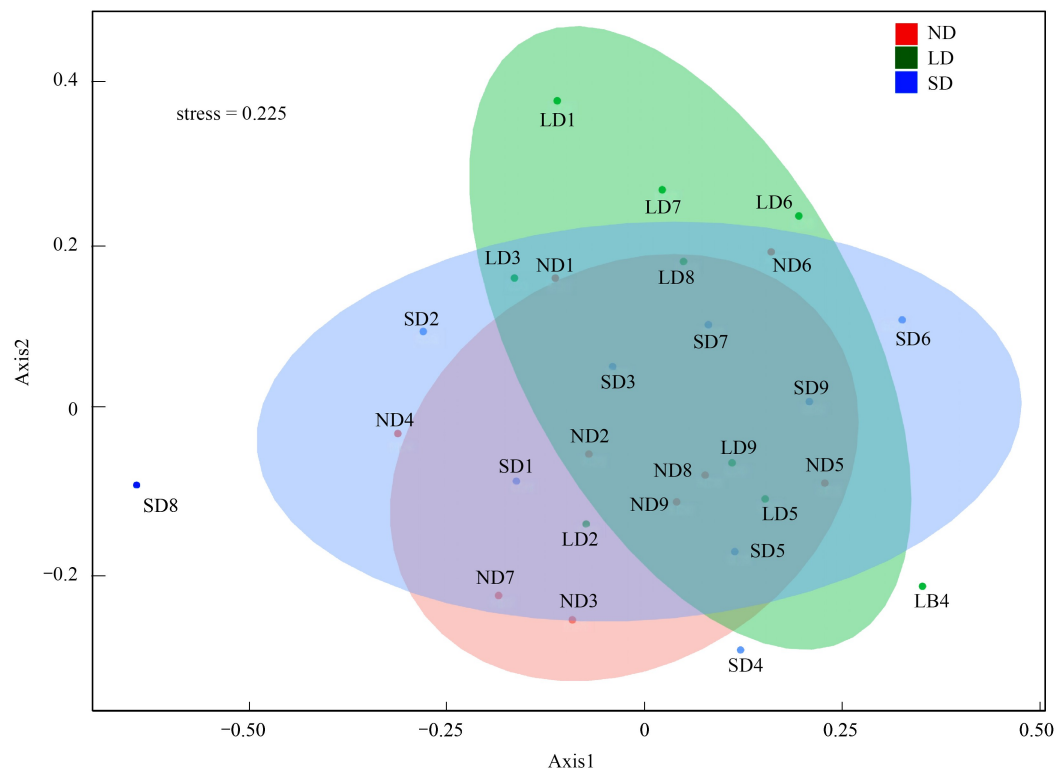


图 4 海南热带雨林国家公园内受不同干扰程度的植物群落木本植物物种组成差异

Fig.4 The difference of woody species composition along chronic disturbance in the Hainan Tropical Rainforest National Park

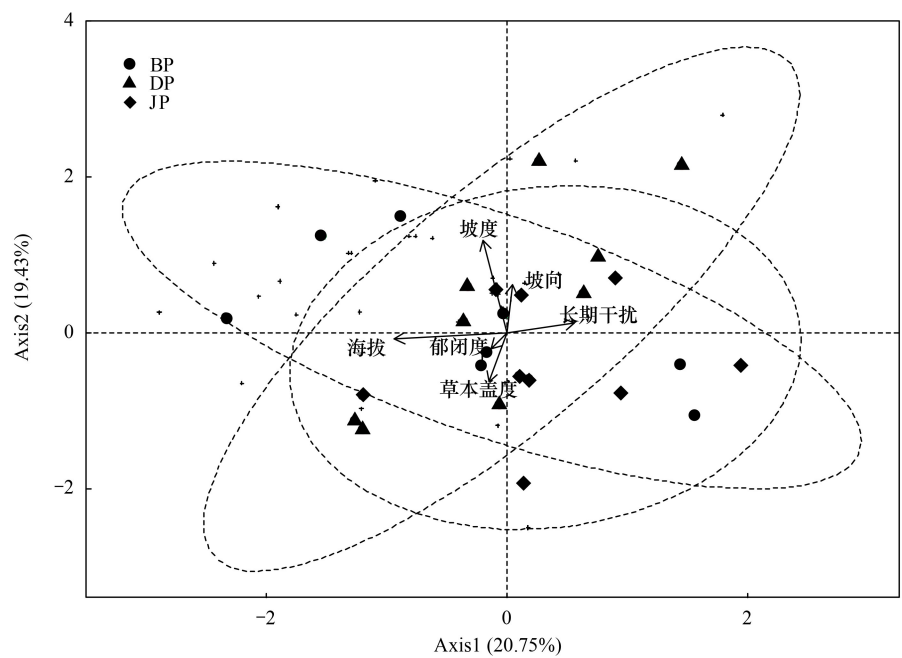


图 5 霸王岭、吊罗山和尖峰岭片区木本物种和生境的关系

Fig.5 Canonical correlation analysis of the correlation between the woody species composition of three sub-regions and environmental variables

2.4 长期干扰和生境对国家公园森林群落木本植物丰富度的影响

通过变差分析得知(图7),轻度的长期干扰会降低地形和生物因子对国家公园森林群落木本植物丰富度的影响,和地形、生物因子的联合效应影响增强,干扰的直接影响占比增加;随着干扰程度加剧,长期干扰对国家公园森林群落木本植物丰富度的直接影响显著增加。

3 讨论

根据表1,选取了海南热带雨林国家公园三个片区具有代表性的不同海拔、植被和长期干扰程度的样地。三个片区的木本物种多样性存在显著差异(图2)。国家公园的3个片区样地共有332种木本物种,BP、DP和JP分别有163、133和146种木本植物种。相较于其他生态系统,海南热带雨林生态系统的木本植物丰富度

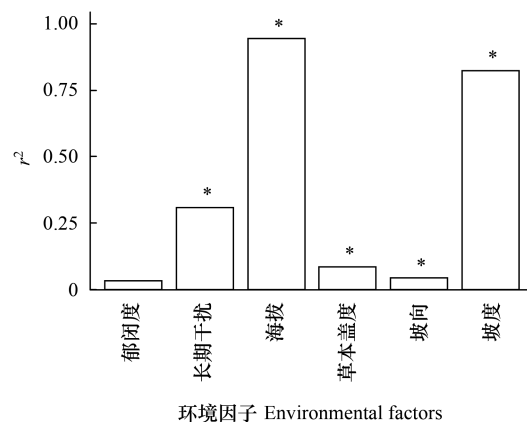


图6 环境变量的 Monte Carlo 排列检验

Fig.6 Monte Carlo permutation test of environmental variables

* :显著 ($P < 0.05$)

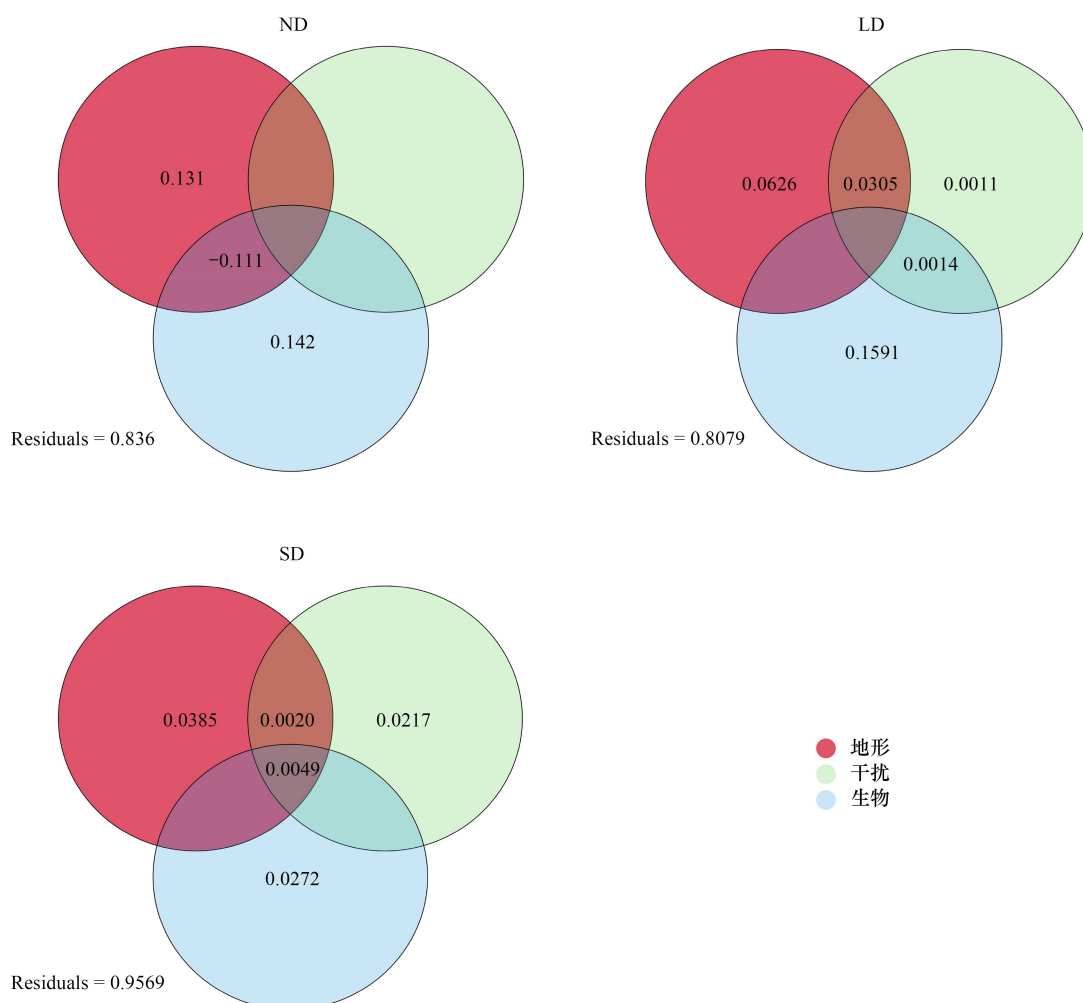


图7 长期干扰-地形-生物因子对国家公园森林群落木本植物丰富度的影响

Fig.7 Effects of chronic disturbance-topographical-biotic factors on the species richness of woody species in the Hainan Tropical Rainforest National Park

更为丰富^[27-28]。BP 和 JP 群落的木本植物 α 多样性显著高于 DP 群落,但 β 多样性显著低于 DP 群落(图 2)。前人研究结果也表明霸王岭和尖峰岭片区木本植物丰富度比吊罗山更高^[29-30]。生境和气候对植物的生长发育至关重要。相较于吊罗山片区,霸王岭和尖峰岭片区温度适宜、降水丰富、微生境温和,植物多样性相对较高^[31]。此外,近 70 年的气候表明,霸王岭和尖峰岭片区的日照时常高于吊罗山国家公园^[32],这可能使霸王岭和尖峰岭片区木本植物多样性高于吊罗山片区。

长期干扰对海南热带雨林国家公园木本物种丰富度和组成有显著影响。长期干扰下国家公园森林群落的木本植物 α 多样性下降,受重度干扰群落中的木本植物 α 多样性下降更显著(图 3)。与未受干扰的群落相比,重度长期干扰的群落木本物种 β 多样性显著增加(图 3),表明长期干扰可能显著降低了木本物种丰富度、植物物种组成的差异增加。人类干扰会导致森林破碎化,引起原始森林群落生物量和物种丧失^[33]。受人类干扰的森林群落物种丧失是植物多样性下降、森林群落间物种差异增加的根本原因。这种现象在霸王岭和尖峰岭片区森林群落尤为明显,这可能是由于霸王岭和尖峰岭片区是两个旅游开发时间较早、程度较高的国家公园,森林群落受到长期干扰的影响更大^[34-35]。国家公园森林群落受到干扰后,未受干扰和受到严重干扰的样地木本植物物种组成也发生了显著的变化(图 4),这表明长期干扰导致木本植物物种减少是森林群落物种组成差异性增加的根本原因。而人类干扰导致植物物种丧失是森林群落退化的潜在信号^[36]。可以推测,长期干扰会导致国家公园森林群落中一些木本植物物种消失、群落物种组成异质性增加,可能会导致现有森林群落发生退化。

国家公园森林群落的木本植物组成受海拔、坡度、坡向和灌木数量的显著影响(图 5 和 6)。海拔能够表征气候因子的潜在变化,是影响生物多样性的一个重要指标。海拔引起的温、湿度等小气候变化是影响森林群落物种组成的重要因素^[37]。国家公园森林群落木本植物组成均和海拔呈负相关,表明海拔越高木本植物多样性越低,这和目前的主流研究结果一致^[38]。且森林群落植物种受到长期干扰的时间越久,其负面效应越明显。

我们的研究结果表明,海南国家公园木本植物丰富度可由地形因子、生物因子和长期干扰轻度干扰的组合来解释(图 7)。未受干扰的森林群落木本植物丰富度受地形和生物因子的独立影响显著(图 7-ND)。海拔影响小气候温度、降水等,高海拔植物种类、多样性可能会显著降低^[39]。草本盖度、凋落物厚度等生物因子也是影响木本植物丰富度的关键因素,可能是较茂密的草本和厚厚的凋落物层拦截木本植物种子而无法进入土壤中导致其无法存活^[40]。轻度长期干扰对木本植物丰富度的直接影响不显著,但和地形、生物因子的联合效应对木本植物丰富度的影响显著增强。而随着干扰程度加剧,严重长期干扰对木本植物丰富度的直接影响显著增强,生物和地形因子的影响显著变弱,表明长期干扰能够削弱木本植物丰富度与环境因子的关联性。

4 总结

历史遗留的长期干扰对海南国家公园森林群落木本植物多样性产生了负面影响,木本植物种类和多样性的丧失、群落间物种组成差异变大,国家公园内部分森林群落退化风险可能增加。国家公园森林群落的木本植物组成受长期干扰的负面影响,开发时间早、开发程度高的片区内该现象更明显。生物因子、地形因子和长期干扰间相互作用对海南热带雨林国家公园原生森林群落木本植物丰富度变化具有较好的解释。长期干扰削弱了木本植物丰富度与地形、生物因子之间的关系,严重长期干扰对木本植物丰富度具有直接影响。后续海南热带雨林国家公园的人工建筑、道路规划应更为谨慎,减少人类干扰的影响。对已经受到严重影响的区域,也应进行长期监测。

参考文献(References):

- [1] Lamb D, Erskine P D, Parrotta J A. Restoration of degraded tropical forest landscapes. *Science*, 2005, 310(5754): 1628-1632.
- [2] Watson J E M, Dudley N, Segan D B, Hockings M. The performance and potential of protected areas. *Nature*(7525), 2014, 515: 67-73.
- [3] Di Marco M, Venter O, Possingham H P, Watson J E M. Changes in human footprint drive changes in species extinction risk. *Nature*

- Communications, 2018, 9: 4621.
- [4] Margules C R, Pressey R L, Williams P H. Representing biodiversity: data and procedures for identifying priority areas for conservation. *Journal of Biosciences*, 2002, 27(4): 309-326.
- [5] Veríssimo A, Cochrane M A, Souza C Jr, Salomão R. Priority areas for establishing national forests in the Brazilian Amazon. *Conservation Ecology*, 2002, 6(1): art4.
- [6] Zong L P. The path to effective national park conservation and management: Hainan Tropical Rainforest National Park System Pilot Area. *International Journal of Geoheritage and Parks*, 2020, 8(4): 225-229.
- [7] 许涵, 李意德, 林明献, 吴建辉, 骆土寿, 周璋, 陈德祥, 杨怀, 李广建, 刘世荣. 海南尖峰岭热带山地雨林 60ha 动态监测样地群落结构特征. *生物多样性*, 2015, 23(2): 192-201.
- [8] 中国国家公园管理局. 海南热带雨林系统国家公园试点项目. 2019.
- [9] Schemske D W, Husband B C, Ruckelshaus M H, Goodwillie C, Parker I M, Bishop J G. Evaluating approaches to the conservation of rare and endangered plants. *Ecology*, 1994, 75(3): 584-606.
- [10] Ribeiro-Neto J D, Arnan X, Tabarelli M, Leal I R. Chronic anthropogenic disturbance causes homogenization of plant and ant communities in the Brazilian Caatinga. *Biodiversity and Conservation*, 2016(5), 25: 943-956.
- [11] Williams-Linera G, Lorea F. Tree species diversity driven by environmental and anthropogenic factors in tropical dry forest fragments of central Veracruz, Mexico. *Biodiversity and Conservation*, 2009, 18(12): 3269-3293.
- [12] 李意德. 中国海南岛热带森林及其生物多样性保护研究. 北京: 中国林业出版社, 2002.
- [13] 方精云, 李意德, 朱彪, 刘国华, 周光益. 海南岛尖峰岭山地雨林的群落结构、物种多样性以及在世界雨林中的地位. *生物多样性*, 2004, 12(1): 29-43.
- [14] 周璋, 李意德, 林明献, 陈德祥, 许涵, 骆土寿. 1980-2005 年海南岛尖峰岭热带山地雨林区气候突变与异常的初步研究. *气象与环境学报*, 2009, 25(3): 66-72.
- [15] 许格希, 罗水兴, 郭泉水, 裴顺祥, 史作民, 朱莉, 朱妮妮. 海南岛尖峰岭 12 种热带常绿阔叶乔木展叶期与开花期对气候变化的响应. *植物生态学报*, 2014, 38(6): 585-598.
- [16] 罗文, 莫世琴, 陈焕强, 许涵. 海南尖峰岭国家森林公园古树现状调查分析. *福建林业科技*, 2020, 47(2): 101-105.
- [17] 杨小波, 陈宗铸, 李东海. 海南植被志-第三卷. 北京: 科学出版社, 2023.
- [18] 莫锦华, 姬云瑞, 许涵, 李迪强, 刘芳. 海南尖峰岭国家级自然保护区森林动态监测样地鸟类和兽类多样性. *生物多样性*, 2021, 29(6): 819-824.
- [19] Jara-Guerrero A, González-Sánchez D, Escudero A, Espinosa C I. Chronic disturbance in a tropical dry forest: disentangling direct and indirect pathways behind the loss of plant richness. *Frontiers in Forests and Global Change*, 2021, 4: 723985.
- [20] Huang Y, Cai H Y, Jian S G, Wang J, Kollmann J, Hui D, Zhang L, Lu H F, Ren H. Spatial variation of soil seed banks along a gradient of anthropogenic disturbances in tropical forests on coral islands. *Journal of Environmental Management*, 2023, 344: 118512.
- [21] Lai P Y, Jim C Y, Tang G D, Hong W J, Zhang H. Spatial differentiation of heritage trees in the rapidly-urbanizing city of Shenzhen, China. *Landscape and Urban Planning*, 2019, 181: 148-156.
- [22] Xie C P, Chen L, Luo W, Jim C Y. Species diversity and distribution pattern of venerable trees in tropical Jianfengling National Forest Park (Hainan, China). *Journal for Nature Conservation*, 2024, 77: 126542.
- [23] Chao A, Gotelli N J, Hsieh T C, Sander E L, Ma K H, Colwell, R K., Ellison A M. Rarefaction and extrapolation with Hill numbers: a framework for sampling and estimation in species diversity studies. *Ecological Monographs*, 2014, 84(1): 45-67.
- [24] Cao J H, Li B, Qi R, Liu T L, Chen X, Gao B Q, Liu K, Baskin C C, Zhao Z G. Negative impacts of human disturbances on the seed bank of subalpine forests are offset by climatic factors. *Science of the Total Environment*, 2022, 851(Pt 2): 158249.
- [25] Minchin P R. An evaluation of the relative robustness of techniques for ecological ordination. *Vegetatio*, 1987, 69(1): 89-107.
- [26] R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2022.
- [27] Shi X, Sun J, Wang J, Lucas-Borja M E, Pandey A, Wang T, Huang Z. Tree species richness and functional composition drive soil nitrification through ammonia-oxidizing archaea in subtropical forests. *Soil Biol. Biochem.* 2023, 187: 109211.
- [28] Zeller L, Förster A, Keye C, Meyer P, Roschak C, Ammer C. What does literature tell us about the relationship between forest structural attributes and species richness in temperate forests? - A review. *Ecological Indicators*, 2023, 153: 110383.
- [29] 杨青青, 陈小花. 海南热带雨林国家公园吊罗山植被群落物种多样性对海拔梯度的响应规律. *热带林业*, 2023, 51(3): 4-8, 15.

- [30] 姚杰, 丁易, 黄继红, 许玥, 臧润国. 海南霸王岭热带山地雨林 6hm² 森林动态监测样地物种组成与群落特征. 陆地生态系统与保护学报, 2023, 3(3): 1-12.
- [31] Liu H D, Chen Q, Liu X, Xu Z Y, Dai Y C, Liu Y, Chen Y F. Variation patterns of plant composition/diversity in *Dacrydium pectinatum* communities and their driving factors in a biodiversity hotspot on Hainan Island, China. *Global Ecology and Conservation*, 2020, 22: e01034.
- [32] 吴胜安, 邢彩盈, 朱晶晶. 海南岛气候特征分析. 热带生物学报, 2022, 13(4): 315-323.
- [33] Nunes M H, Jucker T, Riutta T, Svátek M, Kvasnica J, Rejžek M, Matula R, Majalap N, Ewers R M, Swinfield T, Valbuena R, Vaughn N R, Asner G P, Coomes D A. Recovery of logged forest fragments in a human-modified tropical landscape during the 2015-16 El Niño. *Nature Communications*, 2021, 12: 1526.
- [34] 祝常悦, 钟旭凯, 王昱心, 范朋飞. 海南热带雨林国家公园旗舰种海南长臂猿保护的历史与未来. 国家公园: 中英文, 2023, 1(4): 213-222.
- [35] 陈圣天, 付晖, 付广, 陈杰. 海南省 5 个国家级自然保护区景观格局时空变化比较研究. 西北林学院学报, 2023, 38(1): 181-189.
- [36] Donoso I, Sorensen M C, Blendinger P G, Kissling W D, Neuschulz E L, Mueller T, Schleuning M. Downsizing of animal communities triggers stronger functional than structural decay in seed-dispersal networks. *Nature Communications*, 2020, 11: 1582.
- [37] Gao J, Liu Y H. Climate stability is more important than water – energy variables in shaping the elevational variation in species richness. *Ecology and Evolution*, 2018, 8(14): 6872-6879.
- [38] McCain C M, Colwell R K. Assessing the threat to montane biodiversity from discordant shifts in temperature and precipitation in a changing climate. *Ecology Letters*, 2011, 14(12): 1236-1245.
- [39] Zhong Y L, Sun Y D, Xu M F, Zhang Y, Wang Y Q, Su Z Y. Spatially destabilising effect of woody plant diversity on forest productivity in a subtropical mountain forest. *Scientific Reports*, 2017, 7: 9551.
- [40] Rodríguez-Calcerrada J, Nanos N, del Rey M C, de Heredia U L, Escribano R, Gil L. Small-scale variation of vegetation in a mixed forest understorey is partly controlled by the effect of overstorey composition on litter accumulation. *Journal of Forest Research*, 2011, 16(6): 473-483.