

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2024.12.012

张丽娜, 管婧婧. 旅游干扰对九龙山国家森林公园植被及土壤微生态环境的影响 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2024, 46(12): 117-126.

旅游干扰对九龙山国家森林公园植被及土壤微生态环境的影响

张丽娜¹, 管婧婧²

1. 湖州职业技术学院 旅游管理学院, 浙江 湖州 313000; 2. 浙江工商大学 旅游与城乡规划学院, 杭州 310018

摘要: 为了明确旅游干扰对森林公园植被及土壤微生态环境的影响, 以浙江九龙山国家森林公园为研究对象, 分析不同旅游干扰强度对植被多样性、土壤理化性状、土壤酶活性及微生物群落结构的影响。结果表明, 随着旅游干扰强度增强, 九龙山国家森林公园植被覆盖度、枯落物厚度、丰富度指数、均匀度指数和多样性指数均逐渐降低。其中, 重度干扰区较未干扰区(CK)分别降低 72.00%、89.47%、63.79%、73.81% 和 55.65% ($p < 0.05$)。在土壤理化性质影响方面, 旅游干扰区明显大于未干扰区(CK)。在重度干扰区内土壤含水量、电导率、有机质、全氮含量、蔗糖酶、磷酸酶、脲酶和过氧化氢酶活性均呈明显下降的趋势, 降低量依次为 24.76%、31.28%、44.09%、43.62%、52.49%、50.58%、65.29% 和 57.36% ($p < 0.05$), 而土壤容质量和全钾含量则分别显著提升了 37.66% 和 61.26% ($p < 0.05$); 随着旅游干扰强度增强, 土壤微生物总量、细菌和放线菌数量逐渐降低, 真菌数量则逐渐上升, 土壤逐渐由“细菌型”向“真菌型”转化; 土壤中纤毛亚门、拟杆菌门、厚壁菌门、接合菌门、浮霉菌门以及疣微菌门的相对丰度不断提升, 但是酸杆菌门、担子菌门、变形菌门、放线菌门、壶菌门以及子囊菌门的相对丰度不断下降; 细菌群中青霉属、消化螺菌属、被孢霉属、链球菌属、镰刀菌属、普氏菌属、假霉样真菌属以及柠檬酸杆菌属的相对丰度不断提升, 但是链孢菌属、支顶孢属、红游动菌属、柄壳孢属、韦荣球菌属、绿僵菌属以及韦荣球菌属的相对丰度不断下降。

关键词: 旅游干扰; 九龙山国家森林公园; 理化性状;

微生物群落结构

中图分类号: Q149

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



文章编号: 1673-9868(2024)12-0117-10

Impact of Tourism Disturbance on Vegetation and Soil Microecological Environment of Jiulongshan Park

ZHANG Lina¹, GUAN Jingjing²

1. School of Tourism and Public Administration, Huzhou Vocational & Technical College, Huzhou Zhejiang 313000, China;

2. School of Tourism & Urban-Rural Planning, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310018, China

Abstract: In order to clarify the impact of tourism disturbance on vegetation and soil microecological envi-

收稿日期: 2023-12-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(72074194)。

作者简介: 张丽娜, 博士, 副教授, 主要从事乡村旅游研究。

ronment of forest parks, the Jiulongshan Park in Zhejiang Province was used as experimental object, and the impact of tourism disturbance on vegetation diversity, soil physical and chemical properties, soil enzyme activity and soil microbial community structure were analyzed. The results showed that the vegetation coverage, litter thickness, richness index, evenness index and diversity index of Jiulongshan National Forest Park gradually decreased with the increase of tourism disturbance intensity, among which, the heavily interference region decreased by 72.00%, 89.47%, 63.79%, 73.81% and 55.65%, respectively compared to the non-disturbance area (CK) ($p < 0.05$). Tourism disturbance had a serious effect on soil physicochemical properties. Compared with CK, soil water content, electrical conductivity, organic matter, total nitrogen, activities of sucrase, phosphatase, urease and catalase were significantly reduced by 24.76%, 31.28%, 44.09%, 43.62%, 52.49%, 50.58%, 65.29% and 57.36%, respectively in the heavily disturbed area ($p < 0.05$), while soil bulk weight and total potassium content were significantly increased by 37.66% and 61.26% ($p < 0.05$), respectively. The total amount of soil microorganisms, bacteria and actinomycetes significantly decreased, while the number of fungi gradually increased with the increase of tourism disturbance intensity, and the soil gradually transformed from ‘bacterial type’ to ‘fungal type’. With the increase of tourism disturbance intensity, the relative abundance of Ciliophora, Bacteroidetes, Firmicutes, Zygomycota, Blastocladiomycota and Verrucomicrobia significantly increased, while the relative abundance of Acidobacteria, Basidiomycota, Proteobacteria, Actinobacteria, Chytridiomycota and Ascomycota significantly decreased. With the increase of tourism disturbance intensity, the relative abundance of *Penicillium*, *Digestibacter*, *Myrothecium*, *Streptococcus*, *Fusarium*, *Prevotella*, *Pseudomonas* and *Citrobacter* significantly increased, while the relative abundance of *Streptomyces*, *Botrytis*, *Rhodospirillum*, *Cladosporium*, *Veillonella*, *Metarhizium* and *Beauver* significantly decreased.

Key words: tourism disturbance; Jiulongshan Park; physical and chemical properties; microbial community structure

随着人们生活水平的提高,旅游人数大幅增加,旅游业发展迅猛,风景区压力剧增,土壤及水体污染、植被破坏等生态环境问题频发^[1-4]。目前,游客踩踏是旅游干扰的主要形式之一,严重破坏生态环境,已受到广泛重视^[5]。土壤是游客踩踏的直接对象,对踩踏行为的反应最为敏感,其健康状况与植被系统生存密切相关,在维系景区生态环境多样性与稳定性方面发挥着重要作用^[6]。因此,开展旅游干扰对景区土壤微生态环境的影响研究具有非常重要的意义。

目前,关于旅游干扰对土壤生态环境的影响研究主要集中于土壤理化性质及土壤酶活性变化方面。张奇志等^[7]研究表明,旅游干扰显著增加了南湾国家森林公园土壤紧实度和容质量,而土壤含水量则显著下降;马剑等^[8]研究表明,随着旅游干扰活动程度升高,表层土壤 pH 值、有机质、全氮含量、全磷含量和全钾含量均逐渐降低;朱芳等^[9]研究表明,旅游干扰显著降低了景区土壤蔗糖酶、尿酶和酸性磷酸酶活性。作为土壤的重要组成部分,微生物表征着土壤的质量水平,在整个物质循环过程中发挥着分解有机物、调控土壤生态环境的活跃作用,并确保土壤具有较强的生产力。土壤微生物群落结构与土壤理化性状密切相关,土壤利用方式和理化性状的改变导致微生物群落结构发生显著变化。通过研究微生物群落结构变化,可全面掌握土壤微生态环境变化,有助于及时进行土壤利用方式、利用强度及理化性状等方面的调整,从而更好地保护生态环境^[10-11]。高通量测序技术在研究微生物群落结构方面具有独特优势,通过构建土壤微生物宏基因组文库进行测序,并运用生物信息学手段分析群落结构组成的方法,已成功用于农田及林地土壤微生物群落结构研究^[12-13]。然而,目前关于旅游干扰对景区土壤微生物群落结构的影响研究较为薄弱,研究方法仍以传统菌落形态鉴定为主,且尚未获得一致结论。

近年来,浙江九龙山国家森林公园由于旅游干扰强度不断增大,植被覆盖度逐年减少,病虫害严重发

生,枯枝死树现象频繁出现.因此,本研究以浙江九龙山国家森林公园为研究对象,分析不同旅游干扰强度对植被多样性、土壤理化性状及微生物群落组成的影响,以期对浙江九龙山国家森林公园生态环境保护、治理及旅游生态管理提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

浙江九龙山国家森林公园位于浙江省平湖市乍浦镇,公园最高海拔 161 m,总面积 437 hm²,年无霜期 225 d,年平均气温 15.7 ℃,年平均降雨量 1 171 mm,属典型的亚热带季风气候.园内森林覆盖率达 84% 以上,蓄积量为 3.5×10⁴ m³,现有植物种类约 150 余种.

1.2 研究方法

1.2.1 实验设计

实验于 2020 年 6 月开始实施,在充分进行九龙山国家森林公园资料调研和实地考察的基础上,选取九龙山国家森林公园主干路旁植被带为研究对象,原始土壤类型为红壤土,氮、磷、钾及有机质含量分别为 0.96 g/kg、1.05 g/kg、19.55 g/kg 和 11.06 g/kg;实验区域植被基本一致,主要以白桦(*Betula platyphylla* Suk.)、木贼(*Equisetum hyemale* L.)、羊胡子苔草(*Carex rigescens*)、乌苏里苔草(*Carex ussuriensis*)、陂囊苔草(*Carex schmidtii*)等植物为主.实验共设置 4 个处理,即无干扰(CK)、轻度干扰(LD)、中度干扰(MD)和重度干扰(HD).以距离旅游主干路远近作为划分旅游干扰强度的依据(距离越近,干扰强度越大),旅游干扰主要在 0 至 90 m 范围内.将干扰程度分为 4 级:离旅游主干路超过 90 m 范围,几乎无游人活动,视作无干扰区(CK);60 m 至 90 m 范围,样地内没有或少有游人活动痕迹,视作轻度干扰区(LD);30 m 至 60 m 范围,有少量游人到达,样地内有一定量的游人活动痕迹,视作中度干扰区(MD);0 至 30 m 范围,有大量游人到达,人为踩踏痕迹较为明显,视作重度干扰区(HD).

1.2.2 测定指标及方法

植被多样性测定方法:按照“S”型曲线在每个处理样地内取 2 m×2 m 的小区 10 个,对区域内枯落物厚度进行检测,同时详细调研多个处理样地的物种密度、高度以及覆盖率,做好记录工作,并结合 Pielou 均匀度指数进行测定.

$$JP = - \sum P_i \ln P_i / \ln S \tag{1}$$

式(1)中, P_i 代表物种重要值(P_i =相对高度+相对密度+相对生物量), S 代表样方内植物物种数目.

根据 Shannon-Wiener 多样性指数

$$H = - \sum P_i \ln P_a \tag{2}$$

得出对应的多样性指数值和重要值.式(2)中, H 代表 Shannon-Wiener 多样性指数, P_a 代表丰富度指数.

$$(D) = 1 - \sum (P_i)^2 \tag{3}$$

式(3)中, (D) 代表 Simpson 优势度指数.

借助五点取样法,按“S”型曲线取各处理样地中 0~30 cm 深度的土壤作为混合土样,并将混合土样分为 3 份:第 1 份进行装袋封口处理后,通过牛肉膏蛋白胨培养基进行培养,同时对样本的土壤含水量进行监测;第 2 份培养基为孟加拉红培养基,对样本进行自然风干处理后,通过孔径为 2 mm 的筛网进行过筛,以便对土壤理化性质进行检测;第 3 份选用改良高氏一号培养基,放置在一 80 ℃超低温冰箱中保存,并对土壤群落结构、微生物种类/总量进行检测.在实际测量过程中应用到多种不同的技术方式:通过烘干法、电极电位法获取土壤含水量和土壤 pH 值,借助 P4 多功能电导仪检测土壤电导率,利用稀释平板法获取

土壤中放线菌、真菌以及细菌总量,并依次运用 NaOH 熔融-钼锑抗比色法、外加热重铬酸钾容量法、火焰分光光度法以及凯氏定氮法测定土壤中全磷、有机质、全钾及全氮的具体含量值,土壤容质量采用环割法测定孔隙度.

利用 FastDNA © SPIN Kit for Soil 试剂盒对土壤 DNA 进行快速提取,并通过琼脂糖凝胶测定具体质量,借助 Multiskan SkyHigh nanodrop 超微量分光光度获得对应浓度;将土壤总 DNA 作为模板,采用 Miseq 测序平台,结合引物 F341-R806,扩增 V3-V4 区,实现高通量测序.按照土壤检测标准,对 PCR 反应体系进行科学设置:12.25 μ L 灭菌超纯水、各 0.5 μ L 正/反向引物、2 μ L DNA 模板、2 μ L dNTPs (浓度为 2.5 mmol/L)、0.25 μ L Taq 酶(浓度为 5U/ μ L)、2.5 μ L 10 $\times$ PCR buffer,反应程序依次为 4 min 预变性(95 $^{\circ}$ C)—30 s 变性(95 $^{\circ}$ C)—30 s 退火(55 $^{\circ}$ C)—30 s 延展(72 $^{\circ}$ C),整个反应过程重复 30 次,最终在 72 $^{\circ}$ C 下进行 6 min 的延伸处理.对 PCR 扩增产物利用琼脂糖凝胶电泳(浓度为 1%)进行检测,结合不同浓度 DNA 回收结果,以 1:1 的比例开展等量混合处理,由生工生物工程(上海)股份有限公司统一完成测序处理.结合土壤总 DNA 模板,在进行真菌高通量测序过程中,结合通用引物 ITS1、ITS4 来扩增真菌 ITS 区.土壤细菌反应体系与 PCR 反应体系基本相同,2 min 预变性(98 $^{\circ}$ C)—15 s 变性(98 $^{\circ}$ C)—30 s 退火(55 $^{\circ}$ C)—30 s 延展(72 $^{\circ}$ C),整个反应过程重复 30 次,最终在 72 $^{\circ}$ C 下进行 6 min 的延伸处理.结合细菌回收方式完成 PCR 产物回收处理,以 1:1 的比例对最终产物进行等量混合后测序.

1.3 数据分析

采用 QIIME 软件对原始测序数据进行去杂和组装,利用 UPARES 软件对有效数据在相似度 97% 以上水平进行生物信息统计分析,并基于细菌 Silva 数据库和真菌 Unite 数据库统计各处理群落组成;采用 EXCEL 2010 软件对实验数据进行统计、计算及作图;SPSS 16.0 软件进行统计,以及 Duncan 法进行差异显著性分析.

2 结果与分析

2.1 不同干扰强度对植被多样性的影响

由表 1 可知,旅游干扰对浙江九龙山国家森林公园的植被多样性影响显著,植被覆盖度、枯落物厚度、丰富度指数、均匀度指数、多样性指数和优势度指数变化分别为 20%~92%、0.4~3.8 cm、2.1~5.8、0.22~0.84、1.06~2.39 和 0.69~0.84.在干扰强度不断增大的过程中,九龙山国家森林公园在枯落物厚度及植被覆盖度方面呈现出逐渐下降的趋势,而且相应的均匀度、优势度、多样性以及丰富度等多项指数也不断降低.与未受干扰区(CK)相比,重度干扰区(SD)的枯落物厚度及植被覆盖度降低了 89.47%、72%,且均匀度、多样性以及丰富度依次下降了 63.79%、73.81%和 55.65%,差异均具有统计学意义($p<0.05$),但是优势度指数变化水平则不具有统计学意义($p>0.05$).由此表明,旅游干扰可显著降低九龙山国家森林公园的植被覆盖度和枯落物厚度,同样会使丰富度、均匀度和多样性 3 项指数下降,而对优势度指数则无显著影响.

表 1 旅游干扰对九龙山国家森林公园植被多样性的影响

干扰强度	覆盖度/ %	枯落物厚度/ cm	丰富度指数	均匀度指数	多样性指数	优势度指数
对照 CK	92a	3.8a	5.8a	0.84a	2.39a	0.84a
轻度干扰 LD	83a	3.2a	5.1a	0.73a	2.16a	0.82a
中度干扰 MD	58b	1.6b	3.3b	0.49b	1.83b	0.78a
重度干扰 SD	20c	0.4c	2.1c	0.22c	1.06c	0.76a

注:表中同一列小写字母均表示差异具有统计学意义($p<0.05$).下同.

2.2 不同干扰强度对土壤理化性状的影响

由表 2 可知,旅游干扰显著影响浙江九龙山国家森林公园土壤理化性状,土壤容质量、pH 值、含水量、电导率、有机质、全氮、全磷和全钾变化分别为 1.025~1.411 g/cm³、7.83~8.58、7.05%~9.37%、62.5~92.4 μs/cm²、6.05~10.82 g/kg、0.53~0.94 g/kg、0.93~1.06 g/kg 和 19.36~31.22 g/kg. 随着干扰强度增强,九龙山国家森林公园土壤含水量、电导率、有机质、全氮、全磷含量均逐渐降低,而 pH 值、容质量和全钾含量则逐渐上升. 与未受干扰区(CK)相比,重度干扰区(SD)的土壤容质量和全钾含量分别上升 37.66%和 61.26%,含水量、电导率、有机质和全氮含量分别降低 24.76%、31.28%、44.09%和 43.62%,差异均具有统计学意义($p<0.05$),但是土壤全磷含量、pH 值变化不明显,差异不具有统计学意义($p>0.05$). 由此表明,旅游干扰可显著提升九龙山国家森林公园的土壤容质量、全钾含量,同时也使全氮含量、有机质、电导率及含水量大幅下降,但是不会明显影响全磷含量及 pH 值.

表 2 九龙山国家森林公园在旅游干扰下的土壤理化性质变化

干扰强度	容质量/ (g·cm ⁻³)	pH 值	含水量/ %	电导率/ (μs·cm ⁻²)	有机质/ (g·kg ⁻¹)	全氮/ (g·kg ⁻¹)	全磷/ (g·kg ⁻¹)	全钾/ (g·kg ⁻¹)
对照 CK	1.025c	7.83a	9.37a	92.4a	10.82a	0.94a	1.06a	19.36d
轻度干扰 LD	1.201c	8.19a	9.11a	75.6b	9.56a	0.88a	0.95a	21.66c
中度干扰 MD	1.286b	8.35a	8.28b	62.5b	7.23b	0.73b	0.93a	27.02b
重度干扰 SD	1.411a	8.58a	7.05c	63.5b	6.05c	0.53c	0.96a	31.22a

2.3 不同干扰强度对土壤酶活性的影响

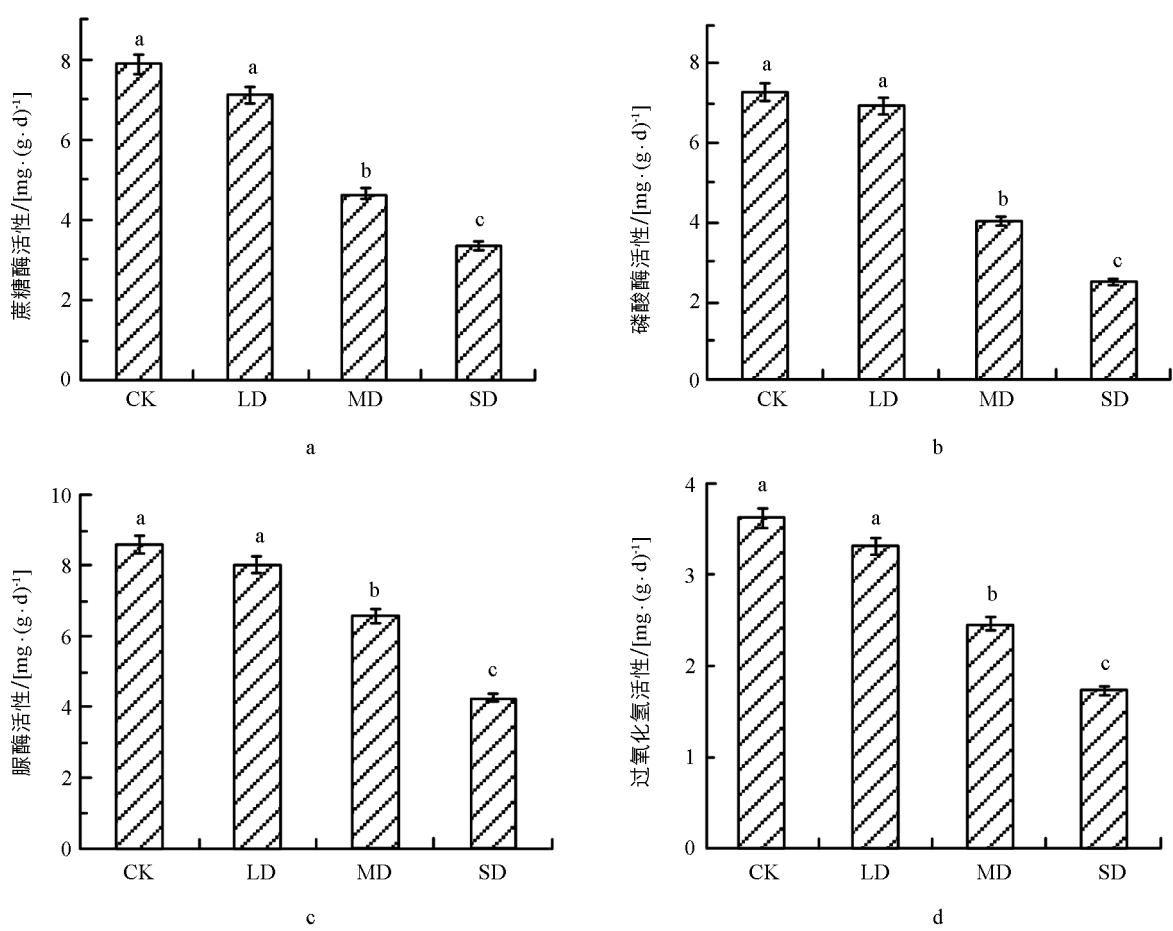
由图 1 可知,随着旅游干扰强度增强,浙江九龙山国家森林公园土壤蔗糖酶、磷酸酶、尿酶和过氧化氢酶活性均表现为逐渐降低的趋势. 与未受干扰区相比(CK),轻度干扰区(LD)土壤酶活性变化差异均不具有统计学意义($p>0.05$);中度干扰区(MD)土壤蔗糖酶、磷酸酶、尿酶和过氧化氢酶活性分别显著降低 32.04%、23.72%、44.63%和 40.99%($p<0.05$);而重度干扰区(SD)的土壤蔗糖酶、磷酸酶、尿酶和过氧化氢酶活性则分别降低 52.49%、50.58%、65.29%和 57.36%,差异均具有统计学意义($p<0.05$). 由此表明,旅游干扰可显著降低九龙山国家森林公园土壤蔗糖酶、磷酸酶、尿酶和过氧化氢酶活性.

2.4 不同干扰强度对土壤微生物数量的影响

由表 3 可以看出,旅游干扰对浙江九龙山国家森林公园微生物数量变化具有显著影响,微生物总量、细菌、真菌、放线菌数量、细菌/真菌比值和放线菌/真菌比值变化分别为 1.57 ×10⁷~1.73×10⁷ cfu/g、7.12 ×10⁷~8.42×10⁶ cfu/g、3.16 ×10⁶~4.26×10⁶ cfu/g、4.27×10⁶~5.68×10⁶ cfu/g、1.67~2.66 和 1.00~1.80. 随着干扰强度增强,土壤微生物总量、细菌、放线菌数量、细菌/真菌比值和放线菌/真菌比值均逐渐降低,而真菌数量则逐渐上升. 与未受干扰区相比(CK),重度干扰区(SD)土壤微生物总量、细菌、放线菌数量、细菌/真菌比值和放线菌/真菌比值分别降低 9.33%、15.44%、24.82%、37.22%和 44.44%,而真菌数量则提升 34.81%,差异均具有统计学意义($p<0.05$). 由此表明,旅游干扰显著降低了九龙山国家森林公园土壤细菌、放线菌数量,提升了真菌数量,细菌/真菌和放线菌/真菌比值显著降低.

表 3 旅游干扰对九龙山国家森林公园土壤微生物数量的影响

干扰强度	微生物总量/ (×10 ⁷ cfu/g)	细菌/ (×10 ⁶ cfu/g)	真菌/ (×10 ⁶ cfu/g)	放线菌/ (×10 ⁶ cfu/g)	细菌/真菌	放线菌/真菌
对照 CK	1.73a	8.42a	3.16c	5.68a	2.66a	1.80a
轻度干扰 LD	1.69a	8.18a	3.32c	5.42a	2.46a	1.63a
中度干扰 MD	1.63b	7.65b	3.81b	4.85b	2.01b	1.27b
重度干扰 SD	1.57c	7.12c	4.26a	4.27c	1.67c	1.00c



CK: 对照; LD: 轻度干扰; MD: 中度干扰; SD: 重度干扰。图中不同字母表示差异达到显著差异水平($p < 0.05$), 下同。

图 1 旅游干扰对九龙山国家森林公园土壤酶活性的影响

2.5 不同干扰强度对土壤微生物群落结构的影响

2.5.1 细菌群落结构

由图 2a、图 2b 可知, 旅游干扰对浙江九龙山国家森林公园土壤细菌群落结构产生明显的影响, 优势细菌相对丰度发生显著变化。随着干扰强度增强, 土壤中酸杆菌门、放线菌以及变形菌门的相对丰度不断下降, 但是绿弯菌门、拟杆菌门、厚壁菌门、拟杆菌门、浮霉菌门以及疣微菌门的相对丰度不断提升。与未受干扰区相比(CK), 重度干扰区(SD)的土壤中酸杆菌门、变形菌门以及放线菌门的相对丰度均不断下降, 下降幅度为 21.82%、22.40%和 16.77%, 但是疣微菌门、浮霉菌门、绿弯菌门、厚壁菌门以及拟杆菌门的相对丰度均显著提升, 提升幅度分别为 30.26%、57.79%、80.80%、74.67%和 133.4%, 差异具有统计学意义($p < 0.05$); 随着干扰强度增强, 韦荣球菌属、红游动菌属以及乳球菌属的相对丰度不断下降, 但是消化螺菌属、柠檬酸杆菌属、普氏菌属以及链球菌属的相对丰度有所提升。与未受干扰区相比(CK), 重度干扰区(SD)土壤红游动菌属、韦荣球菌属和乳球菌属分别提升 14.63%、32.17%和 40.39%, 而柠檬酸杆菌属(*Citrobacter*)、链球菌属(*Streptococcus*)、普氏菌属(*Prevotella*)和消化螺菌属(*Nitrospira*)相对丰度则分别提升 46.68%、87.62%、119.86%和 211.11%, 差异均具有统计学意义($p < 0.05$)。由此表明, 旅游干扰对浙江九龙山国家森林公园土壤微生物细菌群落结构产生显著影响, 细菌优势菌群相对丰度发生显著变化。

2.5.2 真菌群落结构

由图 2c、图 2d 可知, 旅游干扰明显影响了九龙山国家森林公园土壤真菌群落结构, 优势真菌相对丰度发生显著变化。随着干扰强度增强, 纤毛亚门和接合菌门的相对丰度不断增大, 同时球囊菌门、担

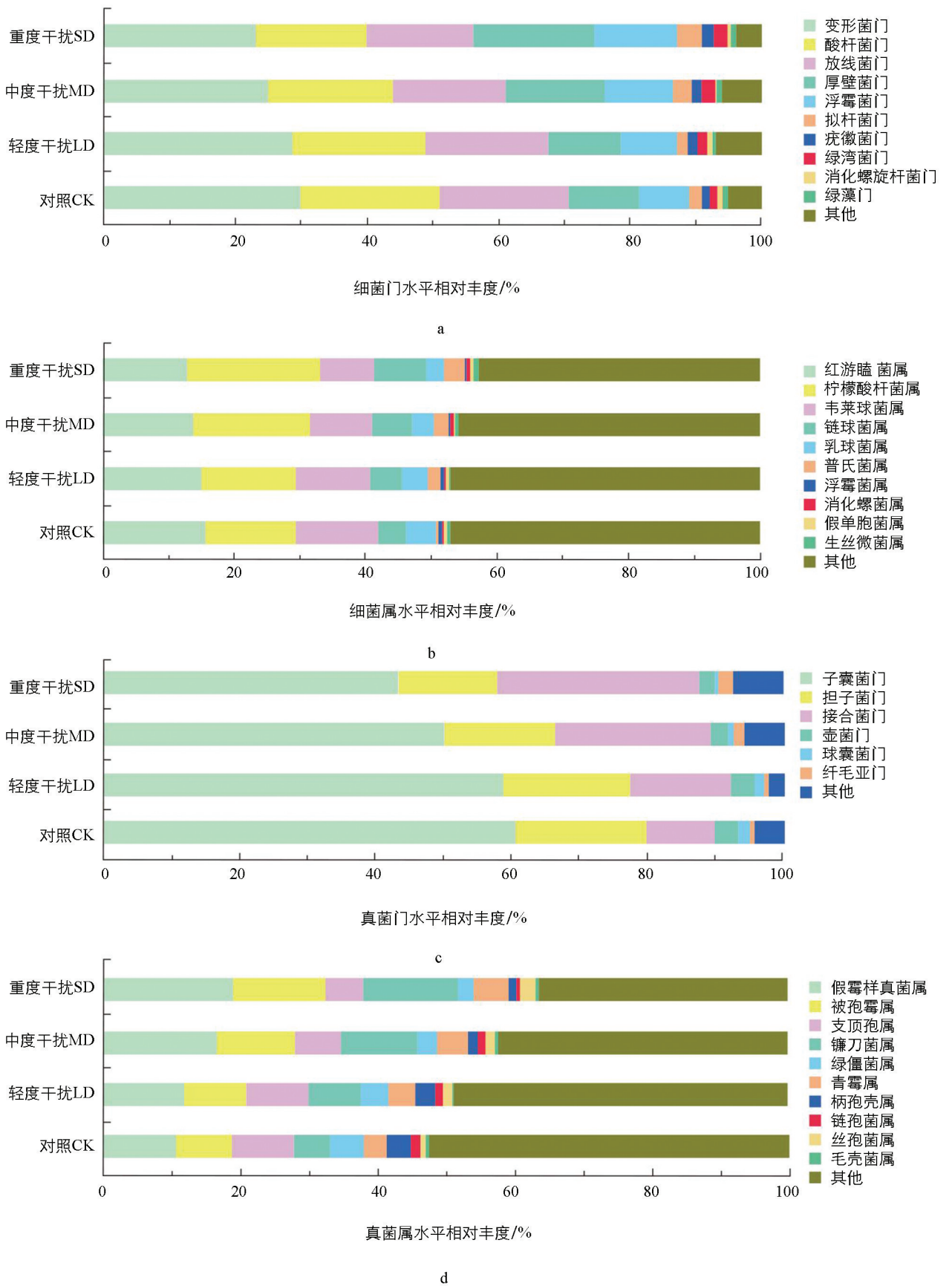


图 2 旅游干扰对九龙山国家森林公园土壤微生物群落结构的影响

子菌门、子囊菌门以及壶菌门的相对丰度不断下降,与未受干扰区相比(CK),重度干扰区(SD)土壤中的球囊菌门、子囊菌门、壶菌门以及担子菌门的相对丰度有所降低,降低幅度依次为 58.79%、27.92%、44.03%和 25.07%,但是纤毛亚门、接合菌门的相对丰度分别提升 191.23%和 181.97%,差异均具有统计学意义($p < 0.05$);随着干扰强度增强,链孢菌属、支顶菌属、柄孢菌属以及绿僵菌属的相对丰度不断下降,但是镰刀菌属、被孢霉属、青霉属以及假霉样真菌属的相对丰度则逐渐升高.与未受干扰区相比(CK),重度干扰区(SD)土壤中的链孢菌属、绿僵菌属、土壤支顶孢属以及柄孢壳属的相对丰度明显降低,依次降低了 50%、52.56%、38.70%和 71.02%,但土壤中青霉属、假霉样真菌属、镰刀菌属以及被孢霉属的相对丰度则呈现出明显增大的趋势,依次是 47.47%、82.49%、160.04%和 68.95%,差异均具有统计学意义($p < 0.05$).由此表明,旅游干扰对浙江九龙山国家森林公园土壤真菌群落结构产生明显影响,真菌优势菌群相对丰度发生显著变化.

3 讨论

植被多样性与土壤生态环境紧密相关,轻度和重度干扰都会显著降低植被多样性,而中度干扰则对植被多样性具有一定的提升作用^[14-16].本研究结果表明,随着旅游干扰强度增强,九龙山国家森林公园植被覆盖度、枯落物厚度、丰富度指数、均匀度指数和多样性指数均逐渐降低,而优势度指数变化差异则不具有统计学意义($p > 0.05$).本结果与“中度干扰假说”^[16]不符,其原因可能是旅游景区气候、环境及植被群落组成存在较大差异所致,也可能是中度干扰设置区域离主干道过近,导致干扰强度过大,具体原因尚待进一步研究;类似结果也出现在人为干扰下润楠次生林乔木层^[17]和旅游干扰下历山亚高山草甸植物区域^[18];优势物种较普通物种在适应气候、土壤环境和生存策略方面存在竞争优势,是旅游干扰未造成优势物种发生变化的主要原因^[15].

土壤容质量、紧实度、电导率、pH 值、含水量等理化性质均受到旅游干扰的影响^[19].本研究结果表明,随着干扰强度增强,九龙山国家森林公园土壤 pH 值、含水量、电导率、有机质、全氮含量、全磷含量均逐渐降低,而容质量和全钾含量则逐渐上升.本研究结果与王舒甜等^[5]、陈婷等^[19]的结果一致,旅游践踏导致土壤紧实度增加是土壤容质量提高的主要原因.枯落物输入量及土壤胶体状况与土壤持水、保水能力密切相关,旅游活动严重降低了枯落物厚度、破坏了土壤胶体状况,进而影响枯落物及土壤蓄水功能,加剧土壤板结和水土流失,显著降低土壤含水量.土壤 pH 值上升主要原因有:① 由于人为踩踏造成蓄水功能降低,加剧土壤板结和水土流失,部分无机酸和有机酸可能随水土流失导致土壤碱性增强^[20];② 土壤垃圾成分侵入也可能是导致 pH 值升高的原因之一.通气性减弱导致土壤活性降低,同时地表枯落物减少导致植物归还量降低是造成土壤有机质含量降低的主要原因.土壤中全氮含量、全磷含量随旅游干扰强度增强而逐渐降低,可能是由于:① 土壤氮、磷元素主要来源于有机质分解,有机质含量降低会导致全氮含量、全磷含量下降^[21];② 土壤中负责有机质分解的微生物丰度降低会造成有机质分解变缓,造成全氮含量、全磷含量下降;③ 土壤中的氮多以易溶于水的铵态氮(NH_4^{4+})和硝态氮(NO_3^{-})形式存在,人为踩踏造成水土流失也是土壤氮含量降低的主要原因之一^[9,22].土壤全钾含量随旅游干扰强度增强而逐渐升高,该原因未知,尚待进一步研究.

土壤酶是土壤的重要组成部分,参与土壤肥力形成,是考量土壤生物学活性的重要指标.本研究结果表明,随着旅游干扰强度增强,浙江九龙山国家森林公园土壤蔗糖酶、磷酸酶、尿酶和过氧化氢酶活性均逐渐降低,从而导致养分含量降低、土壤质量下降.本结果与王舒甜等^[5]、李武陵^[23]的研究结果较为一致,其原因可能是旅游践踏导致土壤容质量增加、通气性降低、pH 值升高等理化性质变化降低了土壤蔗糖酶、尿酶和磷酸酶活性所致,而土壤微生物群落结构变化(图 2)则是过氧化氢酶活性降低的主要原因.

土壤微生物是土壤生态环境的重要组成部分,与土壤理化性状、土壤酶活性等密切相关.旅游干扰

不仅会降低植物多样性,而且会对土壤微生物群落结构带来显著影响。本研究结果表明,随着干扰强度增强,土壤微生物总量、细菌和放线菌数量逐渐降低,而真菌数量则逐渐上升,土壤逐渐由“细菌型”向“真菌型”转化。土壤中的微生物大部分具有好氧属性,旅游践踏会导致土壤容质量提升和通气性降低,是造成土壤微生物数量减少的主要因素^[24]。旅游践踏导致土壤有机质和含水量降低可能是造成土壤由“细菌型”向“真菌型”转化的主要原因:① 土壤有机质缺乏常引起土壤微生态系统破坏,导致微生物种群结构失衡,细菌、放线菌等有益微生物数量降低、真菌数量增多^[25];② 真菌自身具有菌丝、孢子等特殊生理结构,赋予其在干旱环境的生存能力明显强于细菌和放线菌^[26]。在 4 种处理中,土壤微生物优势菌门主要包括变形菌门、酸杆菌门、放线菌门、厚壁菌门、浮霉菌门、子囊菌门、担子菌门和接合菌门。随着干扰强度增强,变形菌门、酸杆菌门、放线菌门、子囊菌门和担子菌门的相对丰度逐渐降低,而厚壁菌门、浮霉菌门和接合菌门相对丰度则逐渐升高。在属水平上,优势菌属主要包括细菌红游动菌属、韦荣球菌属、乳球菌属和真菌支顶孢属、绿僵菌属、柄孢壳属和链孢菌属相对丰度逐渐降低,而细菌柠檬酸杆菌属、链球菌属、普氏菌属、消化螺菌属和真菌假霉样真菌属、被孢霉属、镰刀菌属、青霉属相对丰度则逐渐升高。变形菌门含有根瘤菌属和消化螺旋菌属等大量有益菌,在土壤氮、磷循环中发挥重要作用;土壤中分解木质素和纤维素的细菌多属于放线菌门和酸杆菌门,在提高土壤养分、促进物质循环方面作用显著。放线菌门部分细菌还具有一定的共生固氮和解磷功能。担子菌门和子囊菌门均是土壤有机质的主要分解者,在养分循环中扮演着重要角色^[27-28]。担子菌门和子囊菌门真菌丰度降低可能是对景区土壤枯落物归还量降低的响应,而变形菌门、消化螺旋杆菌门、放线菌门、酸杆菌门丰富度降低是造成土壤碳、氮、磷等营养元素含量进一步降低的重要原因。

4 结论

旅游干扰已经严重影响到了浙江九龙山国家森林公园景区土壤微生态环境。重度干扰区土壤容质量和全钾含量分别显著上升 37.66%和 61.26%,而含水量、电导率、有机质、全氮含量、蔗糖酶、磷酸酶、尿酶和过氧化氢酶活性则分别显著降低 24.76%、31.28%、44.09%、43.62%、52.49%、50.58%、65.29%和 57.36%,微生物群落结构发生明显改变,导致植被盖度和多样性指数显著下降。为了保障九龙山国家森林公园的可持续发展,建议采取如下几点措施:① 在道路旁和人为活动密集区设置警示标语,提醒游人切勿践踏;② 在旅游干扰强度较大的区域多对土壤进行翻动和增施有机肥,改善土壤理化性状和肥力;③ 适当增加旅游干扰强度较大区域的植物多样性,从而增加枯落物含量,提高土壤养分;④ 在旅游密集时间,适当控制游客数量。

参考文献:

[1] 刘光荣. 旅游干扰对庐山风景区微生物多样性的影响 [J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2015, 46(2): 274-279.

[2] 罗昌国,袁启凤,陈守一,等. 杂草管理方式对李园及其邻近天然林土壤真菌生态功能的影响 [J]. 南方农业学报, 2023, 54(8): 2369-2378.

[3] 杨芷毓,张兴,张洪运,等. 苏州市城市公园常见植物功能性状对热环境的响应机制研究 [J]. 东北农业大学学报, 2023, 54(7): 14-24.

[4] 韩煜,王琦,赵伟,等. 草原区露天煤矿周边植物多样性和土壤养分关系研究 [J]. 东北农业大学学报, 2023, 54(9): 23-33.

[5] 王舒甜,张金池,郑丹扬,等. 钟山风景区土壤环境对人为踩踏扰动的响应 [J]. 林业科学, 2017, 53(8): 9-16.

[6] 李鹏,濮励杰,章锦河. 旅游活动对土壤环境影响的国内研究进展 [J]. 地理科学进展, 2012, 31(8): 1097-1105.

[7] 张奇志. 旅游干扰对南湾国家森林公园土壤和空气质量的影响 [J]. 西部林业科学, 2018, 47(2): 112-116.

[8] 马剑,刘贤德,何晓玲,等. 旅游干扰对祁连山风景区土壤性质的影响 [J]. 土壤, 2016, 48(5): 924-930.

- [9] 朱芳,白卓灵. 旅游干扰对鄱阳湖国家湿地公园植被及土壤特性的影响 [J]. 水土保持研究, 2015, 22(3): 33-39.
- [10] 铁展畅, 罗明, 阿不都克尤木, 等. 塔吉克斯坦不同土地利用方式对土壤微生物群落功能多样性的影响 [J]. 干旱区地理, 2014, 37(5): 1019-1028.
- [11] 廖远行, 舒英格, 王昌敏, 等. 喀斯特地区不同植被类型土壤微生物量磷、碱性磷酸酶及植酸酶的变化特征 [J]. 南方农业学报, 2023, 54(6): 1762-1770.
- [12] 汤涤洛, 涂修亮, 付聪, 等. 基于高通量测序的苕麻根际土壤真菌群落结构 [J]. 西南农业学报, 2018, 31(10): 2160-2164.
- [13] FRENCH K E, TKACZ A, TURNBULL L A. Conversion of Grassland to Arable Decreases Microbial Diversity and Alters Community Composition [J]. Applied Soil Ecology, 2017, 110: 43-52.
- [14] 盛芝露, 黄晓霞, 蔡兴元, 等. 玉龙雪山牦牛坪景区路径沿线的植被及土壤特征分析 [J]. 草业学报, 2016, 25(2): 1-9.
- [15] BARNS S M, TAKALA S L, KUSKE C R. Wide Distribution and Diversity of Members of the Bacterial Kingdom Acidobacterium in the Environment [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1999, 65(4): 1731-1737.
- [16] CONNELL J H, SLATYER R O. Mechanisms of Succession in Natural Communities and Their Role in Community Stability and Organization [J]. The American Naturalist, 1977, 111(982): 1119-1144.
- [17] 郝建锋, 朱云航, 王德艺, 等. 人为干扰对川西北谢家山润楠次生林群落结构和物种多样性的影响 [J]. 生态与农村环境学报, 2016, 32(1): 76-82.
- [18] 张桂萍, 张峰, 茹文明. 旅游干扰对历山亚高山草甸植物多样性的影响 [J]. 生态学报, 2008, 28(1): 407-415.
- [19] 陈婷, 李国华, 王燕铭. 旅游活动对香山公园草地生态环境的影响 [J]. 水土保持研究, 2015, 22(3): 280-285.
- [20] SCHMIDT M W I, TORN M S, ABIVEN S, et al. Persistence of Soil Organic Matter as an Ecosystem Property [J]. Nature, 2011, 478(7367): 49-56.
- [21] VERGUTZ L, MANZONI S, PORPORATO A, et al. Global Resorption Efficiencies and Concentrations of Carbon and Nutrients in Leaves of Terrestrial Plants [J]. Ecological Monographs, 2012, 82(2): 205-220.
- [22] 潘忠成, 袁溪, 李敏. 降雨强度和坡度对土壤氮素流失的影响 [J]. 水土保持学报, 2016, 30(1): 9-13.
- [23] 李武陵. 旅游干扰对鄱阳湖国家湿地公园土壤酶活性及水质的影响 [J]. 水土保持研究, 2015, 22(3): 61-66.
- [24] 郭金瑞, 宋振伟, 朱平, 等. 长期不同种植模式对东北黑土微生物群落结构与土壤理化性质的影响 [J]. 土壤通报, 2016, 47(2): 353-359.
- [25] 赵文慧, 马垒, 徐基胜, 等. 秸秆与木本泥炭短期施用对潮土有机质及微生物群落组成和功能的影响 [J]. 土壤学报, 2020, 57(1): 153-164.
- [26] VALADE S, LEMIALE V, ROUX A, et al. Life-Threatening Complications and Outcomes in Patients with Malignancies and Severe Pulmonary Embolism [J]. Thrombosis Research, 2015, 135(4): 610-615.
- [27] 高秀宏, 李敏, 卢萍, 等. 呼和浩特市大青山白桦根际土壤细菌群落结构研究 [J]. 生态学报, 2019, 39(10): 3586-3596.
- [28] YELLE D J, RALPH J, LU F C, et al. Evidence for Cleavage of Lignin by a Brown Rot Basidiomycete [J]. Environmental Microbiology, 2008, 10(7): 1844-1849.