

### 北京城区PM<sub>2.5</sub>各组分污染特征及来源分析

安欣欣, 曹阳, 王琴, 富佳明, 王陈婧, 景宽, 刘保献



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年5月

第43卷 第5期  
Vol.43 No.5

目次

北京城区 PM<sub>2.5</sub> 各组分污染特征及来源分析 ..... 安欣欣, 曹阳, 王琴, 富佳明, 王陈婧, 景宽, 刘保献 (2251)

基于时空混合效应模型的京津冀 PM<sub>2.5</sub> 浓度变化模拟 ..... 范丽行, 杨晓辉, 宋春杰, 李梦诗, 段继福, 王卫, 李夫星, 李伟妙 (2262)

2000~2018年京津冀城市群 PM<sub>2.5</sub> 时空演变及其与城市扩张的关联 ..... 赵安周, 相恺政, 刘宪锋, 张向蕊 (2274)

海-陆大气交汇作用下青岛冬季天气 PM<sub>2.5</sub> 污染特征与来源解析 ..... 虞雄, 杨凌霄, 张婉, 齐安安, 王滢铭, 王鹏程, 黄琦, 赵彤, 张雄飞, 徐鹏, 张天琪, 王文兴 (2284)

硫酸盐非均相机制对颗粒物污染的影响: 上海典型污染事件的 WRF-Chem 模拟 ..... 张茹涵, 张皓然, 冯伟航, 汤克勤, 马亚平, 王红丽, 黄成, 胡建林, 张宏亮, 李楠 (2294)

省会城市不同功能区大气 PM<sub>2.5</sub> 化学组分季节变化及来源分析 ..... 孙友敏, 范晶, 徐标, 李彦, 韩红, 张桂芹 (2304)

太原市冬季不同污染程度下 PM<sub>2.5</sub> 的化学组成、消光特征及氧化潜势 ..... 任娇, 赵荣荣, 王铭, 张欢欢, 尹诗杰, 薛永刚 (2317)

郑州市冬季大气 PM<sub>2.5</sub> 金属元素来源及健康风险评估 ..... 姚森, 王乾恒, 薛妍, 史来文, 张俊美, 杨书申 (2329)

淄博市冬季 PM<sub>2.5</sub> 载体金属元素污染特征、生态风险评估及来源分析 ..... 白雯宇, 徐勃, 郭丽瑶, 殷宝辉, 马银红, 李丽明, 杨文, 赵雪艳 (2336)

承德市 PM<sub>2.5</sub> 中多环芳烃的季节分布特征、来源解析及健康风险评估 ..... 贺博文, 聂赛赛, 李仪琳, 郭睿瑶, 姚波, 崔建升, 冯亚平, 王帅, 侯晓松 (2343)

珠三角大气中二噁英污染水平与区域迁移 ..... 付建平, 谢丹平, 黄锦琼, 杨艳艳, 冯桂贤, 周长风, 廖海婷, 青亮, 张漫雯, 吴明亮, 张素坤 (2355)

华北平原南部农村地区黑碳气溶胶浓度及来源 ..... 张玲, 孔少飞, 郑煌, 胡亮, 曾昕, 程溢, 祁士华 (2363)

基于模式过程分析技术天津地区 PM<sub>2.5</sub> 污染气象成因分析 ..... 郝团, 蔡子颖, 韩素芹, 杨旭, 樊文雁, 姚青, 邱晓滨 (2373)

基于排放量和大气反应活性的 VOCs 污染源分级控制 ..... 陈鹏, 张月, 邢敏, 李珊珊 (2383)

基于复杂网络的中国臭氧拓扑特征 ..... 菅娜, 陈建华, 李冬, 王迪, 薛志钢 (2395)

基于前体物多情景排放的兰州市 2030 年夏季臭氧预测 ..... 陈天雷, 吴敏, 潘成珂, 常莉敏, 李洪, 刘鹏, 高宏, 黄韬, 马建民 (2403)

基于源反演和气溶胶同化方法天津空气质量模式预报能力改进 ..... 蔡子颖, 唐邈, 肖致美, 杨旭, 朱玉强, 韩素芹, 徐虹, 邱晓滨 (2415)

基于空气质量监测数据的钢铁行业污染源识别方法 ..... 石耀鹏, 胡京南, 褚晰晰, 段青春, 胡丙鑫, 殷丽娜, 吕玲玲 (2427)

重污染天气应对“绩效分级、差异化管控”措施首次实践效果后评估 ..... 曾景海, 王灿 (2436)

黄河流域水污染风险分区 ..... 周夏飞, 曹国志, 於方, 杨威杉, 徐泽升 (2448)

黄河流域甘肃段工业行业水污染物空间排放特征 ..... 李雪迎, 杨曦, 乔琦, 刘丹丹, 张玥, 赵若楠, 白璐 (2459)

黄河沉积物重金属时空分布与污染评价 ..... 王韬轶, 潘保柱, 韩语, 王雨竹, 李晨辉, 杜蕾 (2467)

APCS-MLR 结合 PMF 模型解析厦门杏林湾近郊流域沉积物金属来源 ..... 沈宸宇, 闫钰, 于瑞莲, 胡恭任, 崔建勇, 颜妍, 黄华斌 (2476)

河流底泥 DOM、营养盐与重金属空间分异特征及响应关系 ..... 肖艳春, 于会彬, 宋永会 (2489)

太原市汾河河岸带土壤重金属分布特征、评价与来源解析 ..... 胡杰, 赵心语, 王婷婷, 苟奎贤, 王春玲 (2500)

洪泽湖溶解态有机质与重金属汞的结合特性 ..... 胡斌, 王沛芳, 张楠楠, 包天力, 金秋彤 (2510)

富营养化驱动下西凉湖百年生态演化轨迹 ..... 郑佳楠, 徐敏, 郑文秀, 朱可欣, 王荣, 张恩楼 (2518)

基于 DGT 技术的黄河上游典型水库沉积物氮磷释放与污染源解析 ..... 马玉坤, 朱翔, 庞晴晴, 孔明, 韩天伦, 彭福全, 谢磊, 汪龙眠, 徐斌, 何斐 (2527)

暴雨前后河南北部河流水质分异特征及其污染源解析 ..... 张彦, 邹磊, 梁志杰, 姜明, 李平, 黄仲冬, 齐学斌 (2537)

鄱阳湖流域水葫芦 (*Eichhornia crassipes*) 对水体微塑料的吸附截留效应 ..... 李文刚, 吴希恩, 简敏菲, 刘淑丽, 刘海球, 丁惠君 (2548)

太湖塑料添加剂时空分布和生态风险评估 ..... 刘舒娇, 丁剑楠, 石浚哲, 张军毅, 庄严, 邹华 (2557)

骆马湖表层沉积物微塑料的分布、来源及储量 ..... 姚明轩, 白雪, 徐振佳, 李凤杰, 陆滢, 李畅, 华祖林 (2566)

太湖不同介质中磷的污染特征及其治理启示 ..... 蔡梅, 陆志华, 王元元, 钱旭 (2575)

辽河四平段流域河流沉积物微生物群落多样性和结构分析 ..... 李鹏洋, 安启睿, 王新皓, 孙思宇, 李元乾, 郑娜 (2586)

面源污染诱导嘉陵江沉积物中细菌群落结构与功能异变 ..... 薛玉琴, 徐飞, 刘坤和, 王佳颖, 竹兰萍, 朱志豪, 张拓 (2595)

微塑料对沉积物细菌群落组成和多样性的影响 ..... 李汶璐, 王志超, 杨文煊, 张博文, 李卫平 (2606)

白洋淀冬季沉积物好氧反硝化菌垂直分布特征及群落构建 ..... 张甜娜, 陈召莹, 张紫薇, 周石磊, 孟佳靖, 陈哲, 张一凡, 董宛佳, 崔建升 (2614)

人工诱导水库分层水体提前混合对细菌群落结构和代谢活性的影响 ..... 高悦, 黄廷林, 李楠, 齐允之, 司凡, 杨斌 (2624)

鄱阳湖典型区铜锈环螺体内微塑料分布特征 ..... 江为群, 胡启武, 简敏菲, 邹龙, 刘淑丽 (2633)

负载多壁碳纳米管的多孔 Ti/SnO<sub>2</sub>-Sb-Ni 电极催化氧化双酚 A ..... 符远航, 刘安迪, 黄纬斌, 唐柏彬, 张进忠 (2640)

磁性 Mn<sub>0.6</sub>Zn<sub>0.4</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>@SiO<sub>2</sub> 催化 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 降解亚甲基蓝效能及机制 ..... 徐冬莹, 余静, 郝旗, 杨迎春, 方淑红 (2650)

两种纳米颗粒对沸石吸附环丙沙星的影响 ..... 蒋兰翠, 孟昭福, 刘贤, 刘欣, 王新欣, 曹雪雯 (2662)

AMD 污泥复合材料吸附 As(V) 的机制及其影响因素 ..... 张亚辉, 张瑞雪, 吴攀, 陈世万, 杨艳, 安丽, 傅渝然, 张子豪 (2673)

三氯生及其降解中间产物对活性污泥中微生物群落变化和硝化反硝化功能基因的影响 ..... 卢英源, 董小琦, 彭星然, 贾晓珊 (2685)

污染场地风险管控可持续评价指标体系构建及关键影响因素分析 ..... 李笑诺, 易诗懿, 陈卫平 (2699)

基于生态功能的滨海湿地土壤质量综合评价方法构建及实证分析 ..... 张雪, 孔范龙, 姜志翔 (2709)

铜山矿区周边农田土壤重金属来源解析及污染评价 ..... 陈航, 王颖, 王澍 (2719)

典型铁、锰矿物对稻田土壤砷形态与酶活性的影响 ..... 周一敏, 黄雅媛, 刘凯, 赵儒乐, 李冰玉, 雷鸣 (2732)

两种油菜施肥水溶性壳聚糖修复典型铅污染农田土壤 ..... 孟晓飞, 郑国砥, 陈同斌, 杨俊兴, 郭俊梅, 刘杰 (2741)

基于贝叶斯理论的小麦籽粒镉铅超标风险预测 ..... 王天齐, 李艳玲, 杨阳, 牛硕, 王美娥, 陈卫平 (2751)

紫色土旱坡地油菜/玉米轮作下氮流失的年度变化特征 ..... 徐曼, 高明, 余添, 朱浩宇, 邓华, 王子芳 (2758)

不同原料生物炭的理化特性及其作炭基肥缓释载体的潜力评价 ..... 邢莉彬, 成洁, 耿增超, 张宏伟, 梁宏旭, 王强, 孙倩倩, 李艳 (2770)

木醋液酸化生物炭与氮素配施对盐渍土壤活性氮及氨挥发的影响 ..... 申书伟, 张丹丹, 王敏鸽, 王旭东 (2779)

生物可降解地膜覆盖对关中地区小麦-玉米农田温室气体排放的影响 ..... 郭怡婷, 罗晓琦, 王锐, 陈海心, 冯浩 (2788)

戴云山南坡不同海拔森林土壤微生物群落结构特征和影响因素 ..... 何中声, 王紫薇, 朱静, 陈佳嘉, 谷新光, 江蓝, 陈博, 吴则焰, 刘金福, 陈文伟 (2802)

模拟增温和降雨增加对撂荒地土壤胞外酶活性及计量特征的影响 ..... 王兴, 钟泽坤, 简俊楠, 张硕宏, 杨改河, 任成杰, 冯永忠, 任广鑫, 王晓娇, 韩新辉 (2812)

中国主要城市的城市化对局地增温的贡献 ..... 李宇, 周德成, 闫章美, 张良侠 (2822)

《环境科学》征订启事(2293) 《环境科学》征稿简则(2426) 信息(2585, 2672, 2708)

# 戴云山南坡不同海拔森林土壤微生物群落结构特征和影响因素

何中声<sup>1,2,3,4</sup>, 王紫薇<sup>1,3,4</sup>, 朱静<sup>2,3,4</sup>, 陈佳嘉<sup>2,3,4</sup>, 谷新光<sup>2,3,4</sup>, 江蓝<sup>2,3,4</sup>, 陈博<sup>2,3,4</sup>, 吴则焰<sup>5</sup>, 刘金福<sup>2,3,4</sup>\*, 陈文伟<sup>6</sup>

(1. 福建农林大学计算机与信息学院, 福州 350002; 2. 福建农林大学林学院, 福州 350002; 3. 福建农林大学海峡自然保护区研究中心, 福州 350002; 4. 生态与资源统计福建省高校重点实验室, 福州 350002; 5. 福建农林大学生命科学学院, 福州 350002; 6. 戴云山国家级自然保护区管理局, 德化 362500)

**摘要:** 土壤微生物作为森林生态系统主要驱动力, 是影响生态系统物质循环和养分转化的重要因素. 探讨不同海拔和季节森林土壤微生物群落的分布规律, 对理解土壤生态过程和预测土壤生态系统功能具有重要研究意义. 以戴云山南坡不同海拔森林土壤(海拔 900 ~ 1 500 m)为研究对象, 探讨夏季和冬季不同海拔土壤微生物群落结构和功能多样性, 揭示驱动土壤微生物群落变化的主要因素. 结果表明: ①夏季土壤微生物群落中革兰氏阳性菌含量最高, 冬季土壤真菌含量最高, 海拔 1 200 m 处土壤总磷脂脂肪酸含量均高于其它海拔. 随海拔升高, 冬季土壤微生物群落中土壤真菌群比细菌群占据更大优势. ②冗余分析表明, 夏季 7 个海拔土壤微生物群落磷脂脂肪酸 (PLFA) 含量主要受环境因子和地形因子共同作用, 累计解释量达 56.72%; 冬季土壤微生物群落磷脂脂肪酸含量主要受环境因子驱动, 单独解释量达 52.23%, 环境因子和地形因子累计解释量为 55.37%. ③土壤全碳含量、土壤 pH 和多酚氧化酶是驱动夏季土壤微生物群落变化的主要因子; 土壤有效磷、全钾、全碳含量和土壤 pH 是驱动冬季土壤微生物群落变化的主要因子.

**关键词:** 土壤微生物群落结构; 磷脂脂肪酸 (PLFA); 季节; 海拔; 戴云山

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)05-2802-10 DOI: 10.13227/j.hjx.202108160

## Forest Soil Microbial Community Structure Characteristics and Its Influencing Factors at Different Elevations on the Southern Slope of Daiyun Mountain

HE Zhong-sheng<sup>1,2,3,4</sup>, WANG Zi-wei<sup>1,3,4</sup>, ZHU Jing<sup>2,3,4</sup>, CHEN Jia-jia<sup>2,3,4</sup>, GU Xin-guang<sup>2,3,4</sup>, JIANG Lan<sup>2,3,4</sup>, CHEN Bo<sup>2,3,4</sup>, WU Ze-yan<sup>5</sup>, LIU Jin-fu<sup>2,3,4</sup>\*, CHEN Wen-wei<sup>6</sup>

(1. College of Computer and Information Sciences, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 2. College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 3. Cross-Strait Nature Reserve Research Center, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 4. Key Laboratory of Fujian Universities for Ecology and Resource Statistics, Fuzhou 350002, China; 5. College of Life Sciences, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 6. Daiyun Mountain National Nature Reserve Administration Bureau, Dehua 362500, China)

**Abstract:** Soil microorganisms, as the primary driving force of forest ecosystems, play a vital role in affecting the material cycle and nutrient transformation in ecosystems. It is critical to investigate the distribution of forest soil microbial communities across different elevations and seasons, since this information aids in the understanding of forest soil ecological processes and predicting soil ecosystem functions. Hence, we selected forest soil on the southern slope of Daiyun Mountain (elevation from 900 to 1 500 m) as the research object, aiming to explore the soil microbial community structure and functional diversity at different elevations in the summer and winter seasons. Meanwhile, we sought to elucidate the primary factors influencing the variations in soil microbial communities. The results showed that: ① the contents of soil gram-positive bacteria, gram-negative bacteria, and fungi at the elevation of 1 200 m in the summer season on the southern slope of Daiyun Mountain were significantly higher than those of other elevations; the soil bacterial content reached a maximum at the elevation of 1 300 m. The contents of soil gram-positive bacteria and actinomycetes at the elevation of 1 000 m in the winter season were higher than those at other elevations. By contrast, the content of soil gram-negative bacteria was the highest at the elevation of 900 m. In the winter season, the soil fungal community had a greater preponderance than that of the bacterial community in the soil microbial community with increasing elevation. ② Redundancy analysis demonstrated that the soil PLFA contents along the seven elevations were jointly affected by environmental factors and topographic factors in the summer season, and the cumulative interpretation was 56.72%. The first axis with positive scores was associated with high total phosphorus content and pH, and negative scores were associated with high slope. The second axis with positive scores was associated with high total potassium content, and negative scores were associated with high soil catalase, polyphenol oxidase, sucrose activity, and total carbon content. In the winter season, the soil PLFA contents were mainly influenced by environmental factors with an independent interpretation of 52.23%, and the cumulative interpretation between the environmental and topographic factors was 55.37%. The first axis with negative scores was correlated with low total phosphorus content, total carbon content, and soil pH. The second axis with positive scores was associated with high total potassium content, and negative scores were associated with high soil polyphenol oxidase, catalase, acid phosphatase activity, and aspect. ③ The soil total carbon, pH, and polyphenol oxidase activity were the main factors driving the variations in the soil microbial community in the summer season, whereas the main factors were the soil available phosphorus, total potassium, total

收稿日期: 2021-08-15; 修订日期: 2021-10-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(31700550, 31770678); 福建省自然科学基金项目(2019J01367); 戴云山国家级自然保护区管理局项目(KH1401450)

作者简介: 何中声(1985 ~), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为森林土壤学, E-mail: jxhzs85@fafu.edu.cn

\* 通信作者, E-mail: fjlij@fafu.edu.cn

carbon content, and pH in the winter season.

**Key words:** soil microbial community structure; phospholipid fatty acids (PLFA); seasons; elevations; Daiyun Mountain

土壤微生物是森林生态系统中生物地球化学循环的主要驱动力,在土壤有机质分解,养分循环和有机碳代谢等方面占据重要地位<sup>[1]</sup>. 土壤微生物群落和季节更替具有密切关系,季节通过调节土壤水分、温度和土壤理化性质等多种环境因素<sup>[2]</sup>,导致土壤微生物群落结构呈现明显季节动态<sup>[3]</sup>,从而影响土壤有机质分解和生物地球化学循环<sup>[4,5]</sup>. 季节也通过影响植物物候和植被类型,调节土壤微生物群落. 夏季植物根系活动增强,增加根系周转率和次生代谢物质分泌,从而加速难分解物质分解,为土壤微生物繁殖提供丰富的营养和能量物质;冬季植物生长速度放缓,根系周转率和活力降低,对微生物生长和土壤碳、氮等元素转化具有一定限制作用<sup>[6]</sup>. 土壤微生物作为连通地上-地下的重要媒介,在不同季节土壤微生物-环境之间存在相互作用关系<sup>[7]</sup>. 然而,有研究表明季节变化不是影响土壤微生物群落的主要驱动因子<sup>[8]</sup>. 可见,季节变化对多种土壤因子的改变可能影响土壤微生物群落. 探讨夏季和冬季土壤微生物群落和土壤环境因子间的驱动机制,有助于了解森林土壤微生物群落结构的演变规律.

海拔作为影响土壤微生物群落结构和多样性的重要因素,通过调节森林微气候、土壤理化性质和植被类型等间接驱动土壤微生物变化<sup>[9]</sup>;亦通过影响林木生物量和凋落物质量,改变植物凋落物分解速率、根系周转和根系分泌物等影响土壤微生物多样性<sup>[10-12]</sup>. 不同季节通过调节植物养分吸收、凋落物分解和土壤理化性质,影响不同海拔土壤肥力和植物物候等,进而改变土壤微生物群落结构和组成. 综上,不同海拔土壤微生物群落结构差异可能和季节性动态有关,开展时间尺度(季节)和空间尺度(海拔)下土壤微生物群落变化规律研究,对分析森林土壤生态系统养分循环和生态系统功能具有重要意义.

戴云山位于我国中亚热带和南亚热带地区交界线上,气候、土壤和植被覆盖等具有明显过渡特征,是研究生物多样性和植被演替的理想对象<sup>[13]</sup>. 植被类型和生物群落多样化,形成典型的植被垂直带谱<sup>[14]</sup>,为开展海拔梯度对土壤生物多样性和生态系统影响研究提供天然的实验平台. 土壤微生物作为连接植物和土壤的纽带,与植物地上生产力和地下微环境具有显著相关性,土壤微生物群落结构和组成在其中扮演着重要角色. 因此,研究土壤微生物群落不同时间(季节)和空间(海拔)尺度上的差异

性,对维持地上群落生物多样性至关重要<sup>[15,16]</sup>. 然而,已有对戴云山土壤微生物群落的研究主要从单一角度上解释<sup>[15]</sup>,缺乏环境因素、海拔和季节的综合分析,限制了对不同海拔土壤微生物群落季节变化的理解. 为此,以季节动态下戴云山南坡不同海拔土壤为研究对象,探讨戴云山土壤微生物群落结构在季节和海拔梯度下的变化规律和分类差异,主要解决:①不同海拔梯度夏季和冬季土壤微生物群落分布规律. ②戴云山不同海拔土壤微生物群落随季节变化规律. ③驱动戴云山夏季和冬季土壤微生物群落变化的主要因素. 探究土壤微生物群落随海拔和季节的变化规律和影响因素,以期为戴云山不同海拔土壤微生物群落组成和影响过程提供理论依据.

## 1 研究区概况

戴云山自然保护区(25°38'~25°43'N, 118°05'~118°20'E)位于福建德化县境内,总面积达13 473 hm<sup>2</sup>. 保护区属亚热带海洋性季风气候,年均温15.6~19.5℃,年降水量1 700~2 000 mm,土壤类型主要有山地红壤、山地黄壤、赤红壤、山地黄红壤和泥炭沼泽土. 戴云山山地具有明显的垂直地带性气候梯度<sup>[17]</sup>,最高峰大戴云(海拔1 856 m)素有“闽中屋脊”之称. 研究区植被类型多样,植物区系兼具中、南亚热带性质,主要保护对象是东南沿海典型的山地森林生态系统<sup>[18]</sup>.

## 2 材料与方法

### 2.1 样地设置

于2018年7月选取戴云山南坡海拔900~1 500 m范围内的7个样地采集土壤样品(图1). 选取无人活动或自然干扰少,坡度和坡向相对保持一致区域,根据CTFS(Center For Tropical Forest Science)标准<sup>[19]</sup>,每间隔100 m海拔高度设置一个20 m×30 m样地,每个样地划分3个10 m×20 m小样方,共设置7个样地(图1). 利用GPS定位系统记录每个样方经纬度和海拔等地形因子(表1),并测量样地内胸径≥1 cm的所有物种等<sup>[20]</sup>,物种定名参考文献<sup>[21]</sup>.

### 2.2 土壤样品采集

于2018年7月中旬(夏季)和2019年1月中旬(冬季)在戴云山南坡不同海拔采集土壤样品. 在每个标准样地采样时,去除地表枯枝落叶等杂物,利用

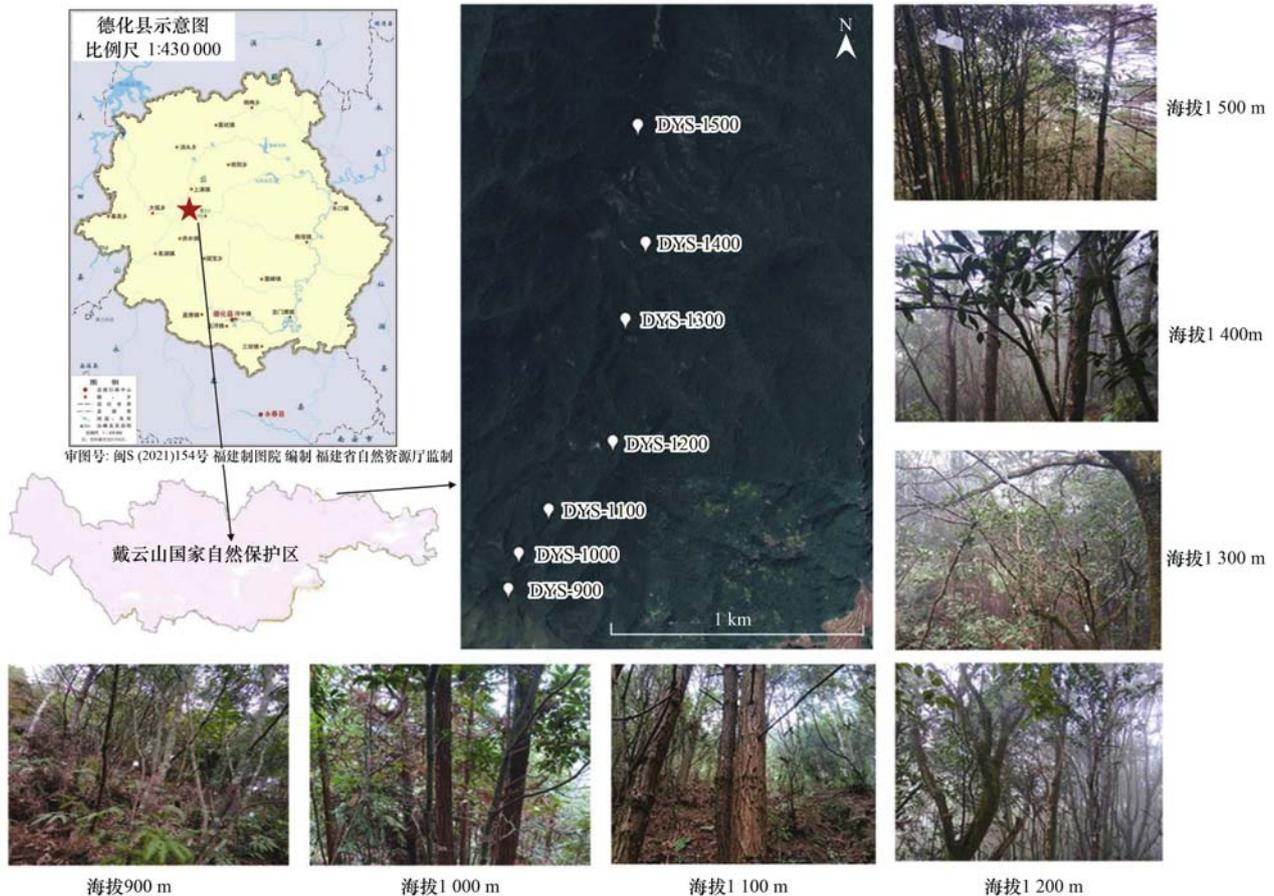


图 1 戴云山样地示意

Fig. 1 Sample plots of Daiyun Mountain

表 1 戴云山样地基本情况<sup>1)</sup>

Table 1 Basic information of sample plots in Daiyun Mountain

样地	经度/E	纬度/N	森林类型	主要树种	海拔/m	坡度/(°)	坡向
DYS-900	118°10'36"	25°38'46"	针阔混交林	青冈 + 杉木	915	28	西南
DYS-1000	118°10'38"	25°38'51"	针阔混交林	杉木 + 青冈	1 001	35	西南
DYS-1100	118°10'43"	25°38'57"	针阔混交林	杉木 + 青冈	1 091	40	南
DYS-1200	118°10'53"	25°39'06"	针阔混交林	杉木 + 红楠	1 201	35	南
DYS-1300	118°10'55"	25°39'22"	针阔混交林	黄山松 + 窄基红褐桧	1 321	35	南
DYS-1400	118°10'58"	25°39'32"	针叶林	黄山松 + 窄基红褐桧	1 411	30	南
DYS-1500	118°10'57"	25°39'47"	针叶林	黄山松 + 映山红	1 501	23	西

1) 青冈: *Cyclobalanopsis glauca*; 杉木: *Cunninghamia lanceolata*; 红楠: *Machilus thunbergii*; 窄基红褐桧: *Eurya rubiginosa* var. *attenuata*; 映山红: *Rhododendron simsii*; 黄山松: *Pinus taiwanensis*

五点取样法采集表层土混合(0~20 cm),共 21 份土壤样品.将土壤样品置于提前准备的无菌袋密封,放入冰盒快速带回实验室,去除可见根系和动植物残体等,过 2 mm 土筛后,一份置于室内通风处风干用于土壤理化性质测定;一份保存于 -20℃ 用于磷脂脂肪酸实验.

### 2.3 土壤理化性质测定

土壤含水量采用烘干法测定;土壤 pH 采用电位法测定;土壤全碳和全氮含量采用碳氮分析仪(Vario MAX cube CN, Elementar Analysensysteme GmbH, Langenselbold, Germany)测定;全磷和全钾

含量采用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES, PE OPTIMA 8000, PerkinElmer, USA)测定;水解氮采用碱解扩散法测定;有效磷含量采用碱熔-钼锑抗比色法测定,具体方法详见文献[22].每份土壤样品设置 3 个重复,且设置空白管作对照.

土壤脲酶活性采用靛酚蓝比色法测定;蔗糖酶活性采用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定;多酚氧化酶活性采用邻苯三酚比色法测定;酸性磷酸酶活性采用磷酸苯二钠比色法测定;过氧化氢酶活性采用高锰酸钾滴定法测定<sup>[23]</sup>.每份土壤样品设置 3 个重复,且每个处理均设置无机质对照组.

## 2.4 土壤微生物群落磷脂脂肪酸 (phospholipid fatty acid, PLFA) 测定

土壤 PLFA 含量测定参考文献 [24], 称取 5 g 新鲜土壤样品和甲醇溶液充分混合, 置于恒温 (37℃) 摇床温育 1 h 后涡旋振荡. 加入醋酸溶液调节 pH 浸提离心, 提取上清液, 将两次溶解含脂肪酸的己烷溶液合并, 氮吹干. 加入 1:1 的正己烷-甲基丁基醚溶液, 静置后使其充分溶解, 过滤到 GC 小瓶, 加入内标 (i19:0), 用气相色谱-质谱联用仪 (GC-MS) 进行 PLFA 检测.

根据不同土壤微生物类群 PLFA 特征图谱, 利用 PLFA 标记法将其类群分 5 类: 革兰氏阳性菌 (gram-positive bacteria,  $G^+$ )、革兰氏阴性菌 (gram-negative bacteria,  $G^-$ )、细菌 (bacteria)、真菌 (fungi) 和放线菌 (actinomycete). 磷脂脂肪酸测算采用峰面法和内标曲线法 [25], 含量用  $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  表示.

## 2.5 数据统计分析

利用 SPSS 22.0 中双因素方差分析不同海拔和季节土壤微生物 PLFA 种类和含量间差异性. 采用蒙特卡罗置换检验 (Monte Carlo permutation test,  $n=999$ ), 将海拔 (ELE)、坡向 (ASP) 和坡度 (SLOP) 作为地形因子解释变量, 土壤含水量 (SWC)、土壤 pH、土壤全碳 (TC)、全氮 (TN)、全磷 (TP)、全钾 (TK)、水解氮 (HN)、有效磷 (AP)、碳氮比 (TC:TN)、脲酶 (SUE)、蔗糖酶 (SSC)、多酚氧化酶

(SPPO)、酸性磷酸酶 (SACP) 和过氧化氢酶 (SCAT) 作为环境因子解释变量, 利用冗余分析 (redundancy analysis, RDA) 提取土壤微生物群落和解释变量之间关系.

基于 Gaussian 和 Quasi 模型, 采用广义线性模型 (generalized linear model, GLM) 分析驱动戴云山土壤微生物群落变化的主要因子. 根据赤池信息量准则 (akaike information criterion, AIC), 采用逐步回归法优化模型, 同时采用方差膨胀因子 (variance inflation factor, VIF) 对回归模型共线性进行诊断 [20].

基于 R 3.5.3, 使用 “mass” 包进行正态分布检验, 对数据不满足正态分布时, 采用 kruskal-wallis 非参数方法, 进行两两样本的秩和检验. RDA 分析利用 “vegan” 包实现, GLM 分析采用 “broom” 和 “glm2” 包实现 [26].

## 3 结果与分析

### 3.1 不同季节下海拔梯度土壤理化性质分析

戴云山不同海拔夏季土壤全磷含量、多酚氧化酶和脲酶活性高于冬季 (表 2); 冬季水解氮、全钾、有效磷含量和蔗糖酶活性高于夏季. 夏季和冬季不同海拔土壤有效磷含量变异系数高于其它土壤环境因子, 分别高达 2.65% 和 0.79%; 土壤 pH 变异系数最低.

表 2 戴云山不同海拔土壤理化性质的季节动态

Table 2 Seasonal dynamics of soil physical and chemical properties at different elevations of Daiyun Mountain

土壤理化性质	夏季			冬季		
	最大值	最小值	变异系数/%	最大值	最小值	变异系数/%
土壤 pH	3.88	3.51	0.04	3.89	3.59	0.03
土壤含水量/%	58.20	33.79	0.20	64.42	28.77	0.21
$\omega$ (水解氮)/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	478.95	225.47	0.35	618.95	309.47	0.18
$\omega$ (全钾)/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	21.07	13.00	0.19	57.49	31.26	0.21
$\omega$ (全磷)/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	1.19	0.41	0.51	0.41	0.16	0.48
$\omega$ (有效磷)/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	1.88	0.21	2.65	12.96	0.09	0.79
$\omega$ (全氮)/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	5.55	2.98	0.28	5.29	3.18	0.14
$\omega$ (全碳)/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	92.78	34.39	0.63	84.58	52.66	0.13
多酚氧化酶/ $\text{mg}\cdot(\text{d}\cdot\text{g})^{-1}$	102.45	65.71	0.18	63.30	26.31	0.26
蔗糖酶/ $\text{mg}\cdot(\text{d}\cdot\text{g})^{-1}$	115.01	39.56	0.50	225.67	80.82	0.32
脲酶/ $\mu\text{g}\cdot(\text{d}\cdot\text{g})^{-1}$	1607.20	291.67	1.50	1063.04	113.12	0.45
酸性磷酸酶/ $\mu\text{mol}\cdot(\text{d}\cdot\text{g})^{-1}$	55.87	33.62	0.19	42.46	10.32	0.31
过氧化氢酶/ $\mu\text{mol}\cdot(\text{d}\cdot\text{g})^{-1}$	94.96	60.27	0.18	115.91	60.69	0.19
碳氮比	19.49	10.78	0.30	22.86	13.30	0.16

### 3.2 土壤微生物群落 PLFA 含量的双因素分析

戴云山不同海拔夏季和冬季土壤微生物群落 PLFA 含量的双因素方差分析表明 (表 3), 海拔对土壤  $G^-$  和放线菌含量具有极其显著影响 ( $P < 0.001$ ), 对总磷脂脂肪酸 (total phospholipid fatty acid, total

PLFA) 含量具有显著影响 ( $P < 0.05$ ). 季节对土壤  $G^+$  含量具有显著影响 ( $P < 0.05$ ); 季节和海拔交互作用对土壤  $G^+$ 、 $G^-$ 、细菌和放线菌含量均有显著影响, 对真菌、总磷脂脂肪酸含量和革兰氏阳性菌/革兰氏阴性菌比值 ( $G^+/G^-$ ) 没有影响.

表3 土壤特征微生物类群双因素方差分析<sup>1)</sup>

Table 3 Two-way ANOVA analysis of soil microbial groups

特征微生物类群	因子	df	F	P
G <sup>+</sup>	季节	1	5.69	0.024*
	海拔	6	4.91	0.002**
	季节×海拔	6	4.03	0.005**
G <sup>-</sup>	季节	1	3.03	0.093
	海拔	6	6.38	<0.001***
	季节×海拔	6	5.28	0.001***
细菌	季节	1	0.14	0.714
	海拔	6	1.74	0.148
	季节×海拔	6	3.77	0.007**
真菌	季节	1	1.44	0.24
	海拔	6	2.13	0.081
	季节×海拔	6	0.77	0.599
放线菌	季节	1	0.36	0.552
	海拔	6	12.55	<0.001***
	季节×海拔	6	2.52	0.044*
G <sup>+</sup> /G <sup>-</sup>	季节	1	0.61	0.442
	海拔	6	1.45	0.233
	季节×海拔	6	1.41	0.245
总磷脂脂肪酸	季节	1	3.31	0.079
	海拔	6	3.03	0.021*
	季节×海拔	6	2.22	0.071

1) \* 表示显著相关,  $P < 0.05$ ; \*\* 表示极显著相关,  $P < 0.01$ ; \*\*\* 表示极其显著相关,  $P < 0.001$

表4 季节动态下微生物群落各海拔梯度 PLFA 变化<sup>1)</sup>/μg·g<sup>-1</sup>Table 4 Changes in PLFA in microbial communities at different altitudes under seasonal dynamics/μg·g<sup>-1</sup>

季节	特征微生物类型	海拔/m						
		900	1 000	1 100	1 200	1 300	1 400	1 500
夏季	G <sup>+</sup>	26.21 ± 6.01c	39.38 ± 5.59bc	37.30 ± 7.67bc	98.96 ± 4.32a	41.28 ± 18.76b	60.80 ± 11.46bc	42.00 ± 7.99bc
	G <sup>-</sup>	9.91 ± 0.91c	20.70 ± 5.75bc	30.20 ± 1.98bc	99.94 ± 21.30a	43.86 ± 7.24b	30.17 ± 2.99bc	22.48 ± 2.90bc
	细菌	6.70 ± 1.8b	13.17 ± 2.30b	10.00 ± 1.57b	20.61 ± 1.10ab	31.93 ± 11.65a	14.00 ± 1.17b	19.58 ± 6.80ab
	真菌	22.78 ± 16.68b	37.48 ± 9.27b	24.08 ± 4.65b	77.05 ± 7.30a	33.16 ± 16.60b	27.62 ± 14.11b	32.38 ± 7.22b
	放线菌	0b	9.35 ± 1.69a	0b	0b	0b	0b	0b
	G <sup>+</sup> /G <sup>-</sup>	2.78 ± 0.83a	2.19 ± 0.53ab	1.27 ± 0.32ab	1.06 ± 0.18b	0.90 ± 0.32b	2.03 ± 0.41ab	1.88 ± 0.32ab
	总磷脂脂肪酸	177.65 ± 49.17c	277.18 ± 19.79bc	267.01 ± 46.40bc	480.30 ± 38.76a	318.96 ± 53.94b	314.15 ± 43.27bc	206.56 ± 30.53bc
冬季	G <sup>+</sup>	33.09 ± 14.93b	72.50 ± 17.45a	39.60 ± 2.25ab	48.48 ± 10.08ab	20.36 ± 10.44b	16.82 ± 6.03b	22.23 ± 6.61b
	G <sup>-</sup>	41.00 ± 15.49a	38.73 ± 7.77a	37.04 ± 13.83a	37.70 ± 10.38a	18.73 ± 10.71a	8.04 ± 1.04a	13.40 ± 4.24a
	细菌	17.52 ± 3.77a	12.13 ± 2.16ab	14.72 ± 5.42ab	21.98 ± 2.57a	4.65 ± 0.50b	15.70 ± 4.37ab	23.27 ± 2.79a
	真菌	80.18 ± 43.57a	26.25 ± 14.26a	48.17 ± 1.30a	93.16 ± 39.47a	20.83 ± 12.34a	43.66 ± 18.70a	30.49 ± 8.44a
	放线菌	1.85 ± 1.85b	12.19 ± 5.10a	0b	0b	0b	0b	0b
	G <sup>+</sup> /G <sup>-</sup>	0.71 ± 0.14a	2.06 ± 0.62a	1.37 ± 0.43a	1.43 ± 0.31a	1.18 ± 0.79a	2.17 ± 0.84a	1.74 ± 0.18a
	总磷脂脂肪酸	290.76 ± 104.02ab	298.24 ± 66.19ab	250.74 ± 39.47ab	339.21 ± 95.35a	108.34 ± 55.36b	149.37 ± 45.51ab	222.34 ± 32.68ab

1) 不同小写字母表示不同海拔间差异显著 ( $P < 0.05$ )

### 3.4 不同季节土壤微生物群落和土壤因子的解释

冗余分析表明,夏季土壤环境因子对土壤微生物群落解释量达 35.38%,地形因子解释量为 21.34%,共同解释量为 19.33%,未解释部分占 23.95% [图 2(a)].冬季,环境因子对不同海拔土壤微生物群落解释量高于夏季,为 52.23%,地形因子解释差异变量 3.14%,两者共同解释量为 0.42%,未解释变量占 44.21% [图 2(b)].夏季 RDA 一轴 (RDA1) 和二轴 (RDA2) 分别解释戴云山南坡土壤微生物类群变量的 65.13% 和 5.95% [图 2(c)];夏季土壤 pH、全磷含量和坡度与 RDA1 具有显著相关性,土壤多酚氧化酶、过氧化氢酶、蔗糖酶活

### 3.3 夏季和冬季海拔梯度下土壤微生物群落 PLFA 含量分布格局

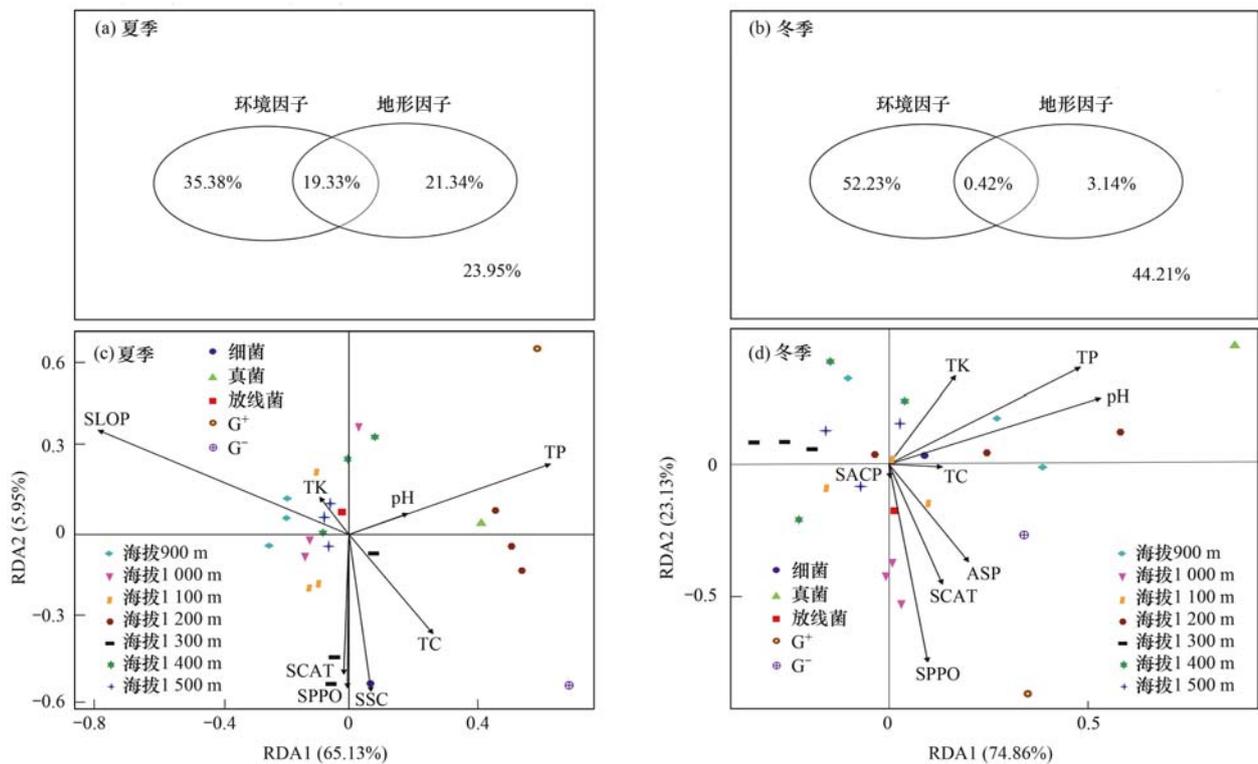
戴云山南坡不同海拔夏季 1 200 m 处土壤 G<sup>+</sup>、G<sup>-</sup> 和真菌含量显著高于其它海拔;细菌含量在海拔 1 300 m 达最大值;海拔 900 ~ 1 000 m 处 G<sup>+</sup>/G<sup>-</sup> 和放线菌含量最盛,而放线菌仅存在于海拔 1 000 m;不同海拔土壤总磷脂脂肪酸含量随海拔升高呈先增后减趋势,海拔 1 200 m 处达最大值,海拔 900 m 处最小。

冬季不同海拔对土壤 G<sup>+</sup>、细菌、放线菌和总磷脂脂肪酸含量具有显著影响,对土壤 G<sup>-</sup>、真菌含量和 G<sup>+</sup>/G<sup>-</sup> 具有显著影响 (表 4). 土壤 G<sup>-</sup> 含量在海拔 900 m 处达最大值,海拔 1 400 m 最低. 冬季海拔 1 000 m 处的 G<sup>+</sup> 和放线菌含量高于其它海拔;放线菌仅在海拔 900 m 和 1 000 m 处存在. 冬季不同海拔土壤 G<sup>+</sup>/G<sup>-</sup> 间无显著差异性,海拔 1 400 m 处土壤 G<sup>+</sup>/G<sup>-</sup> 高于其它海拔. 海拔 1 500 m 土壤细菌含量显著高于其它海拔,真菌和总磷脂脂肪酸含量在海拔 1 200 m 达最大值。

性、全碳和全钾含量与 RDA2 具有显著相关性. 冬季 RDA1 和 RDA2 分别解释戴云山南坡土壤微生物类群变量的 74.86% 和 23.13% [图 2(d)];土壤 pH、全磷和全碳含量与 RDA1,多酚氧化酶和酸性磷酸酶活性与 RDA2 均具有显著相关性. 综上,地形因子和环境因子共同影响土壤微生物群落,且夏季和冬季环境因子对戴云山南坡不同海拔土壤微生物类群的驱动作用高于地形因子。

### 3.5 季节动态下不同海拔土壤微生物优势驱动因子分析

广义线性分析表明 (图 3),夏季土壤 G<sup>+</sup>、G<sup>-</sup>、放线菌含量和 G<sup>+</sup>/G<sup>-</sup> 与土壤 pH 具有显著负效应;



G<sup>+</sup> 表示革兰氏阳性菌, G<sup>-</sup> 表示革兰氏阴性菌, ASP 表示坡向, SLOP 表示坡度, TP 表示全磷, TC 表示全碳, TK 表示全钾, SACP 表示酸性磷酸酶, SCAT 表示过氧化氢酶, SPPO 表示多酚氧化酶, SSC 表示蔗糖酶, 下同

图2 冗余分析夏季和冬季土壤微生物与环境因子和地形因子关系

Fig. 2 Redundancy analysis on relationship of soil microbiological and environmental and topographic factors in summer and winter seasons

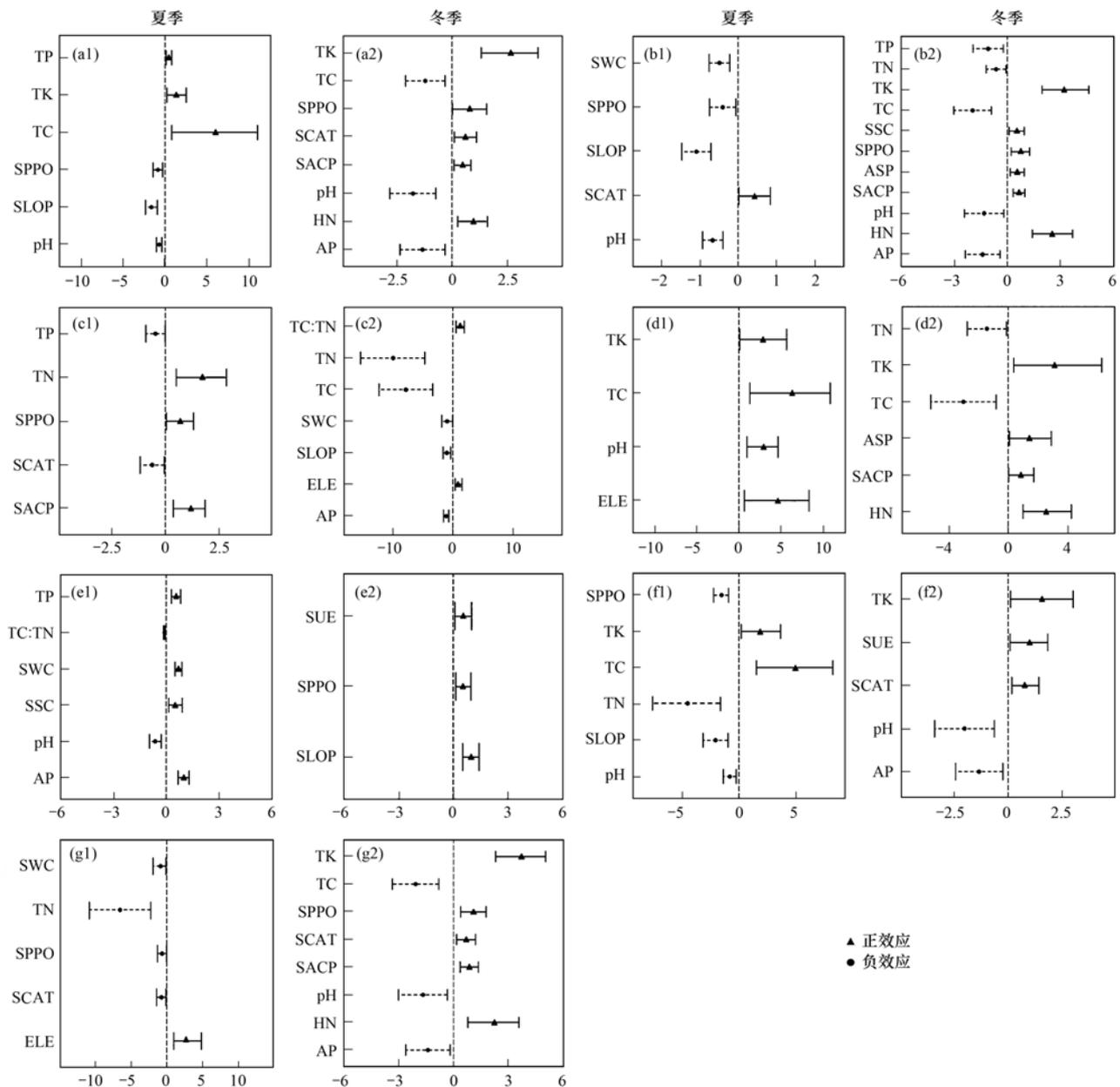
土壤 G<sup>+</sup>、真菌含量和 G<sup>+</sup>/G<sup>-</sup> 与全碳、全钾具有显著正效应; 土壤细菌含量与多酚氧化酶活性具有显著正效应; 土壤 G<sup>+</sup>、G<sup>-</sup> 和总磷脂脂肪酸含量与多酚氧化酶活性具有显著负效应; G<sup>-</sup> 和总磷脂脂肪酸含量与土壤含水量具有显著负效应. 土壤全氮和细菌含量具有显著正效应, 与 G<sup>+</sup>/G<sup>-</sup> 和总磷脂脂肪酸含量具有显著负效应.

冬季土壤 G<sup>+</sup>、G<sup>-</sup>、总磷脂脂肪酸含量和 G<sup>+</sup>/G<sup>-</sup> 与土壤 pH 具有显著负效应; 土壤 G<sup>+</sup>、G<sup>-</sup>、真菌、总磷脂脂肪酸含量和 G<sup>+</sup>/G<sup>-</sup> 与土壤全钾具有显著正效应; G<sup>+</sup>、G<sup>-</sup>、细菌、真菌和总磷脂脂肪酸含量与土壤全碳具有显著负效应; 土壤多酚氧化酶与 G<sup>+</sup>、G<sup>-</sup>、放线菌和总磷脂脂肪酸含量具有显著正效应; 土壤 G<sup>+</sup>、G<sup>-</sup>、真菌和总磷脂脂肪酸含量与土壤酸性磷酸酶活性具有显著正效应; 土壤过氧化氢酶活性与 G<sup>+</sup>、总磷脂脂肪酸含量和 G<sup>+</sup>/G<sup>-</sup> 具有显著正效应; 土壤脲酶活性与土壤放线菌含量和 G<sup>+</sup>/G<sup>-</sup> 具有显著正效应; 土壤有效磷与 G<sup>+</sup>、G<sup>-</sup>、细菌、总磷脂脂肪酸含量和 G<sup>+</sup>/G<sup>-</sup> 具有显著负效应. 综上, 戴云山南坡不同海拔和季节土壤微生物群落变化受土壤环境影响, 且是多个土壤因子综合作用的结果.

## 4 讨论

### 4.1 季节动态下土壤微生物 PLFA 含量变化

季节动态通过影响植被覆盖状况而改变土壤理化性质等, 间接影响了森林土壤微生物群落<sup>[27]</sup>. 不同季节植物凋落物量和根系分泌有机物质变化, 导致土壤中参与养分循环的功能性微生物类群结构和多样性产生差异, 从而影响不同海拔土壤微生物群落<sup>[28-31]</sup>. 戴云山夏季海拔 1 100 m 以下土壤 G<sup>+</sup> 和 G<sup>-</sup> 含量低于冬季; 而海拔高于 1 200 m 处土壤 G<sup>+</sup> 和 G<sup>-</sup> 含量高于冬季, 可能和季节动态下不同海拔森林的土壤温度有关. 戴云山属于亚热带季风气候区, 夏季高温多雨, 土壤温度过高, 降低了植物根表面的吸收效率和根际土壤酶活性, 从而间接改变了土壤微生物群落功能多样性和代谢活动, 导致夏季海拔 1 100 m 以下土壤微生物低于冬季; 而土壤温度过低, 植物根系活力下降, 参与土壤微生物功能转化和养分循环的酶活性随之减弱, 导致冬季海拔 1 200 m 以上森林土壤微生物 G<sup>+</sup> 和 G<sup>-</sup> 含量降低. 除海拔 1 000 m 和 1 300 m 外, 夏季其它海拔的土壤细菌含量高于冬季, 可能是夏季和冬季植被覆盖差异性影响凋落物分解速率<sup>[15]</sup>, 其分解有机质释放的氮和磷养分元素, 调节了土壤养分循环, 间接



(a) 革兰氏阳性菌( $G^+$ ), (b) 革兰氏阴性菌( $G^-$ ), (c) 细菌(bacteria), (d) 真菌(fungi), (e) 放线菌(actinomycete), (f) 革兰氏阳性菌/革兰氏阴性菌( $G^+/G^-$ ), (g) 总磷脂脂肪酸(total PLFA), ASP表示坡向, ELE表示海拔, SLOP表示坡度, TP表示全磷, TC表示全碳, TK表示全钾, TN表示全氮, AP表示有效磷, HN表示水解氮, SWC表示土壤含水量, SACP表示酸性磷酸酶, SCAT表示过氧化氢酶, SPPO表示多酚氧化酶, SSC表示蔗糖酶, TC:TN表示碳氮比, SUE表示脲酶, 横坐标表示95%的置信区间

图3 广义线性模型分析夏季和冬季土壤微生物与土壤环境因子和地形因子间关系

Fig. 3 Generalized linear model analysis of relationships among soil microorganisms and soil environmental and topographic factors in summer and winter seasons

导致细菌在不同环境生长状况不同. Grishkan 等<sup>[32]</sup>的研究表明土壤有机质含量对土壤微生物群落的影响高于宏观环境(气候)因素. 戴云山南坡冬季土壤细菌和有效磷含量呈负相关, 可能是冬季土壤有效磷含量相对较低, 低磷含量限制了土壤微生物分解有机质<sup>[19]</sup>, 在一定程度上影响了细菌微生物结构多样性, 导致土壤微生物生物量累积发生变化<sup>[28]</sup>, 和 Li 等<sup>[33]</sup>的研究结果一致. 戴云山南坡土壤微生物的季节动态变化也证实了土壤微生物群落受有效磷含

量的季节影响, 且含量高低直接驱动土壤微生物的空间分布格局. 邓娇娇等<sup>[34]</sup>的研究表明季节通过改变土壤全碳含量间接影响土壤微生物群落组成. 广义线性分析表明戴云山南坡土壤全碳含量是驱动夏季和冬季真菌变化的主要因子. 夏季海拔1 000、1 300和1 500 m处土壤真菌含量高于冬季, 其它海拔夏季土壤真菌含量低于冬季, 表明土壤微生物群落对外界环境变化具有较强敏感性. 季节交替引起黏土矿物的收缩和膨胀, 改变了土壤理化性质, 间接驱

动了土壤微生物群落多样性变化<sup>[35]</sup>. 不同季节森林凋落物导致土壤全碳含量复杂化, 冬季极端环境降低了土壤微生物群落多样性, 且冬季土壤养分含量降低, 导致土壤微生物遭受养分胁迫的压力增强, 从而抑制土壤微生物累积. 土壤理化性质改变土壤酶活性, 且土壤酸性磷酸酶活性和土壤磷元素含量密切相关<sup>[36]</sup>. 冬季海拔1 100 ~ 1 400 m处土壤  $G^+/G^-$  和总磷脂脂肪酸含量高于夏季, 可能是戴云山南坡不同季节土壤微生物通过利用土壤酸性磷酸酶中磷元素应对戴云山低磷环境, 保证植物根系可最大化吸收土壤磷等养分资源, 从而维持戴云山植物多样性.

#### 4.2 不同海拔土壤微生物 PLFA 含量分布格局

不同海拔通过改善土壤理化性质和养分循环进程, 影响土壤微生物群落功能多样性和代谢活动. 戴云山南坡不同海拔土壤微生物的分布格局表明, 夏季海拔1 200 m处土壤微生物量分布较多( $G^+$ 、 $G^-$ 、真菌和总磷脂脂肪酸含量), 可能是戴云山保护区拥有古老的植物类群, 海拔1 200 m群落处于发展阶段, 森林植被具有较高的资源生产力, 植物通过根系分泌有机物质为土壤微生物生长提供丰富营养物质<sup>[37]</sup>, 促进土壤微生物群落多样性. 戴云山南坡海拔1 300 m处土壤细菌含量高于其它海拔, 可能是土壤细菌群落喜欢生长在相对湿润和中性偏碱土壤环境中<sup>[38]</sup>. 戴云山自然保护区土壤 pH(3.51 ~ 3.88) 随海拔升高呈下降趋势, 土壤酸化严重, 抑制了土壤细菌生长和繁殖<sup>[39]</sup>. 凋落物分解有机质释放养分是土壤营养物质的来源, 是驱动土壤微生物代谢活动的主要因素<sup>[2]</sup>. 戴云山南坡海拔900 m处植物根系从土壤中吸收大量营养物质传输给地上枝叶, 提高叶片新陈代谢能力; 叶凋落物通过分解或化感作用释放氮和磷养分元素归还给土壤, 影响土壤养分转化和流动, 为土壤微生物生长和繁殖提供了高营养和易分解的底物<sup>[34]</sup>. 土壤温度随海拔升高呈下降趋势, 夏季温度高, 土壤水分蒸发快, 阳光可直射透过林冠和地表稀少的草本层加快土壤温度的上升, 也会限制  $G^-$  生长<sup>[32]</sup>, 从而影响土壤  $G^+/G^-$ . 研究表明海拔1 000 m处土壤放线菌含量达最大值, 与马进鹏等<sup>[40]</sup>对贺兰山的研究结果不一致, 可能是戴云山南坡低海拔受人为干扰活动强烈<sup>[41]</sup>, 导致土壤孔隙降低, 间接影响土壤微生物群落功能多样性的空间分布<sup>[42]</sup>.

土壤微生物类群特定含量下降幅度不同, 导致土壤微生物对环境变化的响应能力也存在显著差异. 冬季海拔1 000 m处土壤  $G^+$  含量最高,  $G^-$  含量在海拔900 m处达最大值, 表明冬季土壤  $G^+$  和  $G^-$

适合生长在低海拔区域. 戴云山南坡低海拔土壤温度较高于其它海拔, 适宜的土壤温度范围促进根系生长<sup>[15]</sup>, 增加根系分泌有机物质速率, 从而增加了低海拔区域土壤微生物生物量. 土壤真菌养分循环途径为慢周转方式, 土壤微生物底物循环时间长, 导致在高海拔营养相对贫瘠区域, 土壤真菌群落更易受环境因素影响<sup>[43]</sup>, 导致土壤真菌在海拔1 200 m含量最高. 海拔1 500 m处土壤细菌含量高于其它海拔, 可能和植被类型差异性有关. 不同海拔植被种类组成和垂直结构有明显差异, 影响土壤理化性质, 进而影响了土壤微生物群落结构<sup>[44]</sup>. 高海拔地区植物多样性较高, 高水平植物多样性会刺激根系的新陈代谢活动, 导致土壤有机化合物多样化, 影响土壤微生物群落结构<sup>[45]</sup>. Bahram 等<sup>[37]</sup>的研究表明, 植被对土壤微生物环境条件的影响可能改变不同海拔高度土壤微生物多样性分布格局. 戴云山保护区海拔1 300 m以下为针阔混交林, 海拔1 400 m以上为针叶林, 森林主要优势树种通过根系周转和分泌物组成等直接或间接改变土壤微生物群落结构<sup>[46,47]</sup>. 冬季海拔1 400 m处土壤  $G^+/G^-$  高于其它海拔, 也证实了植被类型差异影响了凋落物分解速率, 从而改变了不同海拔土壤微生物群落功能多样性<sup>[48]</sup>. 土壤理化性质空间变异特征影响了不同海拔土壤微生物群落 PLFA 含量, 戴云山土壤微生物随海拔升高绝对优势种从  $G^+$  转化为真菌, 也证实了不同海拔环境因素变化限制了土壤微生物群落的空间分布.

## 5 结论

戴云山南坡不同海拔和季节更替通过影响土壤理化性质和酶活性, 改变土壤微生物群落结构. 夏季和冬季土壤微生物群落主要受土壤环境因子影响, 土壤 pH 和全碳含量是驱动夏季土壤微生物群落变化的主要因子; 土壤有效磷、全钾、土壤 pH 和全碳含量是驱动冬季土壤微生物群落变化的主要因子. 因此, 探讨不同海拔戴云山土壤微生物群落季节变化的影响机制, 对全球气候变暖背景下维持戴云山土壤生态平衡和生态系统保护具有重要研究价值.

### 参考文献:

- [1] Liu M H, Sui X, Hu Y B, *et al.* Microbial community structure and the relationship with soil carbon and nitrogen in an original Korean pine forest of Changbai Mountain, China [J]. *BMC Microbiology*, 2019, **19**(1), doi: 10.1186/s12866-019-1584-6.
- [2] 郑裕雄, 曹际玲, 杨智杰, 等. 氮沉降对亚热带常绿阔叶天然林不同季节土壤微生物群落结构的影响[J]. *土壤学报*, 2018, **55**(6): 1534-1544.  
Zheng Y X, Cao J L, Yang Z J, *et al.* Impacts of nitrogen deposition on soil microbial community structure in subtropical natural evergreen broad-leaved forest relative to season[J]. *Acta*

- Pedologica Sinica, 2018, **55**(6): 1534-1544.
- [ 3 ] 王薪琪, 韩轶, 王传宽. 帽儿山不同林龄落叶阔叶林土壤微生物生物量及其季节动态[J]. 植物生态学报, 2017, **41**(6): 597-609.  
Wang X Q, Han Y, Wang C K. Soil microbial biomass and its seasonality in deciduous broadleaved forests with different stand ages in the Mao'ershan region, Northeast China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2017, **41**(6): 597-609.
- [ 4 ] Grosso F, Iovieno P, Alfani A, *et al.* Structure and activity of soil microbial communities in three Mediterranean forests[J]. Applied Soil Ecology, 2018, **130**: 280-287.
- [ 5 ] Dong W Y, Zhang X Y, Dai X Q, *et al.* Changes in soil microbial community composition in response to fertilization of paddy soils in subtropical China[J]. Applied Soil Ecology, 2014, **84**: 140-147.
- [ 6 ] 王璐璐, 马大龙, 李森森, 等. 扎龙湿地土壤微生物群落结构的季节变化特征[J]. 应用与环境生物学报, 2018, **24**(1): 166-171.  
Wang L L, Ma D L, Li S S, *et al.* Seasonal variation characteristics of soil microbial community structure in Zhalong wetland[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2018, **24**(1): 166-171.
- [ 7 ] Crowther T W, van den Hoogen J, Wan J, *et al.* The global soil community and its influence on biogeochemistry[J]. Science, 2019, **365**(6455), doi: 10.1126/science.aav0550.
- [ 8 ] Siles J A, Cajthaml T, Minerbi S, *et al.* Effect of altitude and season on microbial activity, abundance and community structure in Alpine forest soils[J]. FEMS Microbiology Ecology, 2016, **92**(3), doi: 10.1093/femsec/fiw008.
- [ 9 ] Shigyo N, Umeki K, Hirao T. Seasonal dynamics of soil fungal and bacterial communities in cool-temperate montane forests[J]. Frontiers in Microbiology, 2019, **10**, doi: 10.3389/fmicb.2019.01944.
- [ 10 ] Smith A P, Marín-Spiotta E, Balsler T. Successional and seasonal variations in soil and litter microbial community structure and function during tropical postagricultural forest regeneration: a multiyear study[J]. Global Change Biology, 2015, **21**(9): 3532-3547.
- [ 11 ] 王朋, 管云云, 肖文娅, 等. 林窗对根际和非根际土壤化学性质季节变化的影响[J]. 西南林业大学学报, 2017, **37**(5): 88-97.  
Wang P, Guan Y Y, Xiao W Y, *et al.* Effects of canopy gaps on the physical and chemical properties of rhizosphere and bulk soil with seasonal changes[J]. Journal of Southwest Forestry University, 2017, **37**(5): 88-97.
- [ 12 ] 吴则焰, 林文雄, 陈志芳, 等. 武夷山不同海拔植被带土壤微生物 PLFA 分析[J]. 林业科学, 2014, **50**(7): 105-112.  
Wu Z Y, Lin W X, Chen Z F, *et al.* Phospholipid fatty acid analysis of soil microbes at different elevation of Wuyi Mountains[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2014, **50**(7): 105-112.
- [ 13 ] 吴玥, 赵盼盼, 林开森, 等. 戴云山黄山松林土壤碳组分的海拔变化特征及影响因素[J]. 生态学报, 2020, **40**(16): 5761-5770.  
Wu Y, Zhao P P, Lin K M, *et al.* Elevation gradient characteristics and impact factors of soil carbon fractions in the *Pinus taiwanensis* Hayata forests of Daiyun Mountain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, **40**(16): 5761-5770.
- [ 14 ] 郑世群, 刘金福, 冯雪萍, 等. 戴云山不同类型植物群落的物种多样性与稳定性研究[J]. 西北林学院学报, 2016, **31**(6): 50-57, 64.  
Zheng S Q, Liu J F, Feng X P, *et al.* Species diversity and stability of different plant communities in Daiyun Mountain[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2016, **31**(6): 50-57, 64.
- [ 15 ] 赵盼盼, 周嘉聪, 林开森, 等. 不同海拔对福建戴云山黄山松林土壤微生物生物量和土壤酶活性的影响[J]. 生态学报, 2019, **39**(8): 2676-2686.  
Zhao P P, Zhou J C, Lin K M, *et al.* Effects of different altitudes on soil microbial biomass and enzyme activities in *Pinus taiwanensis* forests on Daiyun Mountain, Fujian province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, **39**(8): 2676-2686.
- [ 16 ] Lazzaro A, Hilfiker D, Zeyer J. Structures of microbial communities in Alpine soils: seasonal and elevational effects[J]. Frontiers in Microbiology, 2015, **6**, doi: 10.3389/fmicb.2015.01330.
- [ 17 ] 师永辉, 毛学刚, 刘秀铭, 等. 亚热带山地垂直地带土壤的磁性特征及其环境响应[J]. 地球物理学报, 2020, **63**(9): 3420-3430.  
Shi Y H, Mao X G, Liu X M, *et al.* Magnetic characteristics and environmental responses of vertical zonal soils in the subtropical Mountains[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2020, **63**(9): 3420-3430.
- [ 18 ] 裴瑶瑶, 戴锦奇, 陈文伟, 等. 湿润亚热带山地表土植硅体指示的垂直植被变化——以福建戴云山为例[J]. 地球环境学报, 2021, **12**(1): 57-67.  
Pei Y Y, Dai J Q, Chen W W, *et al.* Indication of topsoil phytoliths for the vertical vegetation change—a case study from Daiyun Mountain, Fujian province, China[J]. Journal of Earth Environment, 2021, **12**(1): 57-67.
- [ 19 ] Jiang L, He Z S, Liu J F, *et al.* Elevation gradient altered soil C, N, and P stoichiometry of *Pinus taiwanensis* forest on Daiyun Mountain[J]. Forests, 2019, **10**(12), doi: 10.3390/f10121089.
- [ 20 ] 李梦佳, 何中声, 江蓝, 等. 戴云山物种多样性与系统发育多样性海拔梯度分布格局及驱动因子[J]. 生态学报, 2021, **41**(3): 1148-1157.  
Li M J, He Z S, Jiang L, *et al.* Distribution pattern and driving factors of species diversity and phylogenetic diversity along altitudinal gradient on the south slope of Daiyun Mountain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, **41**(3): 1148-1157.
- [ 21 ] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志[EB/OL]. <http://www.iplant.cn/frps>, 2021-09-04.
- [ 22 ] 国家林业局. 中华人民共和国林业行业标准, 森林土壤分析方法[M]. 北京: 中国标准出版社, 1999. 1275-1999.
- [ 23 ] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- [ 24 ] Frostegård Å, Bååth E, Tunlio A. Shifts in the structure of soil microbial communities in limed forests as revealed by phospholipid fatty acid analysis[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1993, **25**(6): 723-730.
- [ 25 ] 蔚杰, 成斌, 贺学礼, 等. 磷脂脂肪酸(PLFA)法检测内蒙古沙化梁地不同坡位羊柴(*Hedysarum laeve* Maxim)根围土壤微生物群落结构[J]. 河北农业大学学报, 2019, **42**(1): 57-64.  
Yu J, Cheng B, He X L, *et al.* Characteristics of soil microbial community structure in the rhizosphere of *Hedysarum laeve* Maxim revealed by phospholipid fatty acid (PLFA)[J]. Journal of Hebei Agricultural University, 2019, **42**(1): 57-64.
- [ 26 ] R Development Core Team. The R project for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria[EB/OL]. <https://www.R-project.org/>, 2021-09-04.
- [ 27 ] 李南洁, 曾清苹, 何丙辉, 等. 缙云山柑橘林土壤微生物磷脂脂肪酸(PLFAs)及酶活性的季节变化特征[J]. 环境科学,

- 2017, **38**(1): 309-317.
- Li N J, Zeng Q P, He B H, *et al.* Seasonal variations of soil microbial PLFAs and soil enzyme activity under the Citrus plantation in Mt. Jinyun, Chongqing [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(1): 309-317.
- [28] 高静, Muhammad S, 岳琳艳, 等. 藏北高原草甸土壤固碳微生物群落特征随海拔和季节的变化[J]. *生态学报*, 2018, **38**(11): 3816-3824.
- Gao J, Muhammad S, Yue L Y, *et al.* Changes in CO<sub>2</sub>-fixing microbial community characteristics with elevation and season in alpine meadow soils on the northern Tibetan Plateau [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(11): 3816-3824.
- [29] Cui Y X, Bing H J, Fang L C, *et al.* Diversity patterns of the rhizosphere and bulk soil microbial communities along an altitudinal gradient in an alpine ecosystem of the eastern Tibetan plateau [J]. *Geoderma*, 2019, **338**: 118-127.
- [30] 熊星烁, 蔡宏宇, 李耀琪, 等. 内蒙古典型草原植物叶片碳氮磷化学计量特征的季节动态[J]. *植物生态学报*, 2020, **44**(11): 1138-1153.
- Xiong X S, Cai H Y, Li Y Q, *et al.* Seasonal dynamics of leaf C, N and P stoichiometry in plants of typical steppe in Nei Mongol, China [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2020, **44**(11): 1138-1153.
- [31] 覃鑫浩, 梁艳, 陈超凡, 等. 南亚热带不同树种人工林对土壤细菌群落多样性的影响[J]. *林业科学研究*, 2021, **34**(4): 120-127.
- Qin X H, Liang Y, Chen C F, *et al.* Effects of different tree species plantations on soil bacterial community diversity in south subtropical China [J]. *Forest Research*, 2021, **34**(4): 120-127.
- [32] Grishkan I, Nevo E. Spatiotemporal dynamics of culturable microfungi in soil of Mount Hermon, Israel [J]. *Plant Biosystems- An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology*, 2012, **146**(S1): 150-163.
- [33] Li G X, Xu G R, Shen C C, *et al.* Contrasting elevational diversity patterns for soil bacteria between two ecosystems divided by the treeline [J]. *Science China Life Sciences*, 2016, **59**(11): 1177-1186.
- [34] 邓娇娇, 朱文旭, 周永斌, 等. 不同土地利用模式对辽东山区土壤微生物群落多样性的影响[J]. *应用生态学报*, 2018, **29**(7): 2269-2276.
- Deng J J, Zhu W X, Zhou Y B, *et al.* Effects of different land use patterns on the soil microbial community diversity in montane region of eastern Liaoning province, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, **29**(7): 2269-2276.
- [35] 杨东伟, 章明奎, 张鹏启, 等. 水田改果园后土壤微生物学特性演变[J]. *土壤学报*, 2018, **55**(1): 182-193.
- Yang D W, Zhang M K, Zhang P Q, *et al.* Evolution of soil in microbiology after reclamation of paddy into orchard [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, **55**(1): 182-193.
- [36] 林惠瑛, 元晓春, 周嘉聪, 等. 海拔梯度变化对武夷山黄山松林土壤磷组分和有效性的影响[J]. *生态学报*, 2021, **41**(14): 5611-5621.
- Lin H Y, Yuan X C, Zhou J C, *et al.* Effects of different elevational gradients on soil phosphorus fractions and availability in *Pinus taiwanensis* forest on Wuyi Mountain [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, **41**(14): 5611-5621.
- [37] Bahram M, Hildebrand F, Forslund S K, *et al.* Structure and function of the global topsoil microbiome [J]. *Nature*, 2018, **560**(7717): 233-237.
- [38] Wang H, Yang J P, Yang S H, *et al.* Effect of a 10°C-elevated temperature under different water contents on the microbial community in a tea orchard soil [J]. *European Journal of Soil Biology*, 2014, **62**: 113-120.
- [39] 郑裕雄, 曹际玲, 杨智杰, 等. 米楮天然林和桔园土壤微生物群落结构的季节性变化[J]. *生态环境学报*, 2019, **28**(10): 1991-1998.
- Zheng Y X, Cao J L, Yang Z J, *et al.* Seasonal variation of soil microbial community structure in *Castanopsis carlesii* natural forest and orange orchard [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, **28**(10): 1991-1998.
- [40] 马进鹏, 庞丹波, 陈林, 等. 贺兰山不同海拔植被下土壤微生物群落结构特征研究[J]. *生态学报*, 2022, **42**(2): 667-676.
- Ma J P, Pang D B, Chen L, *et al.* Characteristics of soil microbial community structure under vegetation at different altitudes in Helan Mountains [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, **42**(2): 667-676.
- [41] 裴广廷, 孙建飞, 贺同鑫, 等. 长期人为干扰对桂西北喀斯特草地土壤微生物多样性及群落结构的影响[J]. *植物生态学报*, 2021, **45**(1): 74-84.
- Pei G T, Sun J F, He T X, *et al.* Effects of long-term human disturbances on soil microbial diversity and community structure in a karst grassland ecosystem of northwestern Guangxi, China [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2021, **45**(1): 74-84.
- [42] 钟娇娇, 陈杰, 陈倩, 等. 秦岭山地天然次生林群落 MRT 数量分类、CCA 排序及多样性垂直格局[J]. *生态学报*, 2019, **39**(1): 277-285.
- Zhong J J, Chen J, Chen Q, *et al.* Quantitative classification of MRT, CCA ordination, and species diversity along elevation gradients of a natural secondary forest in the Qinling Mountains [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(1): 277-285.
- [43] 黄春萍, 吴福忠, 张健, 等. 高寒森林溪流微生物群落结构的季节性变化[J]. *生态学报*, 2018, **38**(1): 298-308.
- Huang C P, Wu F Z, Zhang J, *et al.* Seasonal variation of microbial community in forest streams of the high-frigid area [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(1): 298-308.
- [44] 马婧婧, 刘耘华, 盛建东, 等. 新疆草地优势种植物相对生物量沿海拔梯度变化特征[J]. *草业学报*, 2021, **30**(8): 25-35.
- Ma J J, Liu Y H, Sheng J D, *et al.* Changes of relationships between dominant species and their relative biomass along elevational gradients in Xinjiang grasslands [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2021, **30**(8): 25-35.
- [45] Zhang Y, Li C, Wang M L. Linkages of C: N: P stoichiometry between soil and leaf and their response to climatic factors along altitudinal gradients [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, **19**(4): 1820-1829.
- [46] Lladó S, López-Mondéjar R, Baldrian P. Drivers of microbial community structure in forest soils [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2018, **102**(10): 4331-4338.
- [47] 孟苗婧, 郭晓平, 张金池, 等. 海拔变化对凤阳山针阔混交林地土壤微生物群落的影响[J]. *生态学报*, 2018, **38**(19): 7057-7065.
- Meng M J, Guo X P, Zhang J C, *et al.* Effects of altitude on soil microbial community in Fengyang Mountain coniferous and broad-leaved forest [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(19): 7057-7065.
- [48] 龙健, 赵畅, 张明江, 等. 不同坡向凋落物分解对土壤微生物群落的影响[J]. *生态学报*, 2019, **39**(8): 2696-2704.
- Long J, Zhao C, Zhang M J, *et al.* Effect of litter decomposition on soil microbes on different slopes [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(8): 2696-2704.

## CONTENTS

Chemical Characteristics and Source Apportionment of PM <sub>2.5</sub> in Urban Area of Beijing .....	AN Xin-xin, CAO Yang, WANG Qin, <i>et al.</i> (2251)
Modeling of PM <sub>2.5</sub> Concentrations in the Beijing-Tianjin-Hebei Region Using a Space-time Linear Mixed Effects Model .....	FAN Li-hang, YANG Xiao-hui, SONG Chun-jie, <i>et al.</i> (2262)
Spatio-temporal Evolution Patterns of PM <sub>2.5</sub> and Relationship with Urban Expansion in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration from 2000 to 2018 .....	ZHAO An-zhou, XIANG Kai-zheng, LIU Xian-feng, <i>et al.</i> (2274)
Characteristics and Source Analysis of PM <sub>2.5</sub> in Qingdao in Winter Under the Action of Sea-Land-Atmosphere Convergence .....	TUO Xiong, YANG Ling-xiao, ZHANG Wan, <i>et al.</i> (2284)
Impacts of Heterogeneous Uptake Pathway on Sulfate Formation: A Case Study in Shanghai Based on WRF-Chem .....	ZHANG Ru-han, ZHANG Hao-ran, FENG Wei-hang, <i>et al.</i> (2294)
Source Apportionment and Seasonal Changes in PM <sub>2.5</sub> Chemical Components from Different Functional Areas of a Provincial Capital City .....	SUN You-min, FAN Jing, XU Biao, <i>et al.</i> (2304)
Chemical Compositions, Light Extinction Effect, and Oxidative Potential of PM <sub>2.5</sub> Under Different Pollution Levels During Winter in Taiyuan .....	REN Jiao, ZHAO Rong-rong, WANG Ming, <i>et al.</i> (2317)
Source Apportionment and Health Risk Assessment of Metal Elements in Ambient PM <sub>2.5</sub> in the Winter of Zhengzhou .....	YAO Sen, WANG Qian-heng, XUE Yan, <i>et al.</i> (2329)
Characteristics, Ecological Risk Assessment, and Sources of the Polluted Metallic Elements in PM <sub>2.5</sub> During Winter in Zibo City .....	BAI Wen-yu, XU Bo, GUO Li-yao, <i>et al.</i> (2336)
Seasonal Distribution Characteristics, Source Analysis, and Health Risk Evaluation of PAHs in PM <sub>2.5</sub> in Chengde .....	HE Bo-wen, NIE Sai-sai, LI Yi-lin, <i>et al.</i> (2343)
Pollution Level and Regional Migration of PCDD/Fs in Ambient Air from Pearl River Delta, China .....	FU Jian-ping, XIE Dan-ping, HUANG Jin-qiong, <i>et al.</i> (2355)
Concentrations and Sources of Black Carbon Aerosols in Rural Areas of Southern North China Plain .....	ZHANG Ling, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i> (2363)
Research on Causes of Severely Polluted Weather in Tianjin Based on Process Analytical Technology .....	HAO Jian, CAI Zi-ying, HAN Su-qin, <i>et al.</i> (2373)
Classification Control of Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission Pollution Sources Based on Emission Amounts and Atmospheric Reactivity .....	CHEN Peng, ZHANG Yue, XING Min, <i>et al.</i> (2383)
Complex Networks Reveal the Characteristics of Ozone in China .....	YING Na, CHEN Jian-hua, LI Dong, <i>et al.</i> (2395)
Ozone Simulation of Lanzhou City Based on Multi-scenario Emission Forecast of Ozone Precursors in the Summer of 2030 .....	CHEN Tian-lei, WU Min, PAN Cheng-ke, <i>et al.</i> (2403)
Improvement of Environmental Model Prediction Based on Inversion and Aerosol Assimilation .....	CAI Zi-ying, TANG Miao, XIAO Zhi-mei, <i>et al.</i> (2415)
Method of Identifying Air Pollution from Iron and Steel Industry Based on Ambient Air Quality Monitoring Data Analysis .....	SHI Yao-peng, HU Jing-nan, CHU Yang-xi, <i>et al.</i> (2427)
Assessment of "Differentiated Response Requirement Based on Performance Grading" Policy During Heavy Air Pollution Alert .....	ZENG Jing-hai, WANG Can (2436)
Risk Zoning of Water Pollution in the Yellow River Basin .....	ZHOU Xia-fei, CAO Guo-zhi, YU Fang, <i>et al.</i> (2448)
Emission Characteristics of Industrial Water Pollutants in Gansu Section of the Yellow River Basin .....	LI Xue-ying, YANG Xi, QIAO Qi, <i>et al.</i> (2459)
Spatial-temporal Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in Sediments of the Yellow River .....	WANG Tao-yi, PAN Bao-zhu, HAN Xu, <i>et al.</i> (2467)
APCS-MLR Combined with PMF Model to Analyze the Source of Metals in Sediment of Xinglin Bay Suburban Watershed, Xiamen .....	SHEN Chen-yu, YAN Yu, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (2476)
Spatial Differentiation Characteristics and Response Relationship of DOM, Nutrients, and Heavy Metals in River Sediments .....	XIAO Yan-chun, YU Hui-bin, SONG Yong-hui (2489)
Distribution Characteristics, Evaluation, and Source Analysis of Heavy Metals in Soils of Fenhe Riparian Zone in Taiyuan City .....	HU Jie, ZHAO Xin-yu, WANG Ting-ting, <i>et al.</i> (2500)
Binding Affinity Between Heavy Metal Hg and Dissolved Organic Matter in Hongze Lake .....	HU Bin, WANG Pei-fang, ZHANG Nan-nan, <i>et al.</i> (2510)
Ecosystem Evolutionary Trajectory of Lake Xiliang over the Past Century Driven by Eutrophication .....	ZHENG Jia-nan, XU Min, ZHENG Wen-xiu, <i>et al.</i> (2518)
Sediment Release and Pollution Source Analysis of Typical Reservoirs in the Upper Reaches of the Yellow River Based on DGT Technology .....	MA Yu-shen, ZHU Xiang, PANG Qing-qing, <i>et al.</i> (2527)
Differential Characteristics and Source Identification of Water Quality of the Rivers in Northern Henan Before and After Rainstorm .....	ZHANG Yan, ZOU Lei, LIANG Zhi-jie, <i>et al.</i> (2537)
Adsorption and Interception Effects of <i>Eichhornia crassipes</i> on Microplastics in Water of the Poyang Lake Basin .....	LI Wen-gang, WU Xi-en, JIAN Min-fei, <i>et al.</i> (2548)
Spatiotemporal Distribution and Ecological Risk Assessment of Plastic Additives in Taihu Lake .....	LIU Shu-jiao, DING Jian-nan, SHI Jun-zhe, <i>et al.</i> (2557)
Distribution Characteristics, Sources, and Storage of Microplastics in Surface Sediments of Luoma Lake .....	YAO Ming-xuan, BAI Xue, XU Zhen-jia, <i>et al.</i> (2566)
Pollution Characteristics of Phosphorus in Different Media in Taihu Lake and Its Treatment Enlightenment .....	CAI Mei, LU Zhi-hua, WANG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (2575)
Analysis on Diversity and Structure of Microbial Community in River Sediment of Siping Section of Liaohe River .....	LI Peng-yang, AN Qi-rui, WANG Xin-hao, <i>et al.</i> (2586)
Non-point Source Pollution (NPS) Induces Structural and Functional Variation in Bacterial Communities in Sediments of Jialing River .....	XUE Yu-qin, XU Fei, LIU Kun-he, <i>et al.</i> (2595)
Effects of Microplastics on Bacterial Community Composition and Diversity in Sediments .....	LI Wen-lu, WANG Zhi-chao, YANG Wen-huan, <i>et al.</i> (2606)
Vertical Distribution Characteristics and Community Construction of Aerobic Denitrification Bacteria from the Sediments of Baiyangdian Lake During the Winter Freezing Period .....	ZHANG Tian-na, CHEN Zhao-ying, ZHANG Zi-wei, <i>et al.</i> (2614)
Effect of Induced Mixing on Bacterial Community Structure and Metabolic Activity in Reservoir .....	GAO Yue, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2624)
Distribution Characteristics of Microplastics in <i>Bellamyia aeruginosa</i> in Typical Area of Poyang Lake .....	JIANG Wei-qun, HU Qi-wu, JIAN Min-fei, <i>et al.</i> (2633)
Electrocatalytic Oxidation of Bisphenol A by Porous Ti/SnO <sub>2</sub> -Sb-Ni Electrode Loaded with Multi-wall Carbon Nanotubes .....	FU Yuan-hang, LIU An-di, HUANG Wei-bin, <i>et al.</i> (2640)
Efficiency and Mechanism of Degradation of Methylene Blue with H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> Catalyzed by Magnetic Mn <sub>0.6</sub> Zn <sub>0.4</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> @SiO <sub>2</sub> .....	XU Dong-ying, YU Jing, HAO Qi, <i>et al.</i> (2650)
Effect of Two Types of Nanoparticles on the Adsorption of Ciprofloxacin on Zeolite .....	JIANG Lan-cui, MENG Zhao-fu, LIU Xian, <i>et al.</i> (2662)
Adsorption Mechanisms and Effect Factors of As(V) by AMD Sludge Composite Material .....	ZHANG Ya-hui, ZHANG Rui-xue, WU Pan, <i>et al.</i> (2673)
Shifts in Microbial Community and Variation in Functional Genes for Nitrification and Denitrification in Activated Sludge Affected by Triclosan and Its Transformed Intermediates .....	LU Ying-yuan, DONG Xiao-qi, PENG Xing-xing, <i>et al.</i> (2685)
Construction of Sustainability Evaluation Index System for Contaminated Site Risk Management and Analysis on Key Influential Factors .....	LI Xiao-nuo, YI Shi-yi, CHEN Wei-ping (2699)
Construction and Empirical Analysis of a Comprehensive Evaluation Method of Coastal Wetland Soil Quality Based on Ecological Functions .....	ZHANG Xue, KONG Fan-long, JIANG Zhi-xiang (2709)
Source Analysis and Pollution Assessment of Heavy Metals in Farmland Soil Around Tongshan Mining Area .....	CHEN Hang, WANG Ying, WANG Shu (2719)
Effects of Typical Iron and Manganese Minerals on Arsenic Speciation and Enzyme Activities in Paddy Soil .....	ZHOU Yi-min, HUANG Ya-yuan, LIU Kai, <i>et al.</i> (2732)
Phytoremediation Efficiency of Two Cultivars of <i>Brassica napus</i> L. Under Water-soluble Chitosan Treatment in Typical Pb-contaminated Farmland Soils .....	MENG Xiao-fei, ZHENG Guo-di, CHEN Tong-bin, <i>et al.</i> (2741)
Risk Prediction of Cadmium and Lead in Wheat Grains Based on Bayes Theorem .....	WANG Tian-qi, LI Yan-ling, YANG Yang, <i>et al.</i> (2751)
Interannual Variation Characteristics of Nitrogen Loss Under Rapeseed/Maize Rotation in Purple Soil Sloping Field .....	XU Man, GAO Ming, YU Luo, <i>et al.</i> (2758)
Physicochemical Properties of Biochars Prepared from Different Feedstocks and Evaluation of Its Potential as A Slow-release Carriers for Biochar-based Fertilizers .....	XING Li-bin, CHENG Jie, GENG Zeng-chao, <i>et al.</i> (2770)
Effects of Combined Application of Wood Vinegar-Acidified Biochar and Nitrogen on Active Nitrogen and Ammonia Volatilization in Saline Soil .....	SHEN Shu-wei, ZHANG Dan-dan, WANG Min-ge, <i>et al.</i> (2779)
Effects of Biodegradable Plastic Film Mulching on Greenhouse Gas Emissions Under Wheat-Maize Rotation System in the Guanzhong Plain .....	GUO Yi-ting, LUO Xiao-qi, WANG Rui, <i>et al.</i> (2788)
Forest Soil Microbial Community Structure Characteristics and Its Influencing Factors at Different Elevations on the Southern Slope of Daiyun Mountain .....	HE Zhong-sheng, WANG Zi-wei, ZHU Jing, <i>et al.</i> (2802)
Effects of Simulated Warming and Increased Precipitation on Soil Extracellular Enzyme Activity and Enzymatic Stoichiometry of Abandoned Grassland .....	WANG Xing, ZHONG Ze-kun, JIAN Jun-nan, <i>et al.</i> (2812)
Contribution of Urbanization to Local Warming in Major Cities of China .....	LI Yu, ZHOU De-cheng, YAN Zhang-mei, <i>et al.</i> (2822)