

肆秩芳华担使命 踔厉扬帆向未来  
——庆祝厦门大学环境学科创立40周年



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年11月

第43卷 第11期  
Vol.43 No.11

目次

厦门大学环境学科创立40周年专栏

|                                             |                                              |
|---------------------------------------------|----------------------------------------------|
| 新污染物共排放对生态环境监测和管理的挑战 .....                  | 王佩, 黄欣怡, 曹致纬, 吴朝阳, 吕永龙 (4801)                |
| 河口-近海环境新污染物的环境过程、效应与风险 .....                | 王新红, 于晓璇, 王思权, 殷笑晗, 钱韦旭, 林晓萍, 吴越, 刘畅 (4810)  |
| 海水痕量营养盐和金属的分子光谱分析方法研究进展 .....               | 袁东星, 黄勇明, 王婷 (4822)                          |
| 环境水体中硫化物的分析方法: 从实验室分析到原位监测 .....            | 李鹏, 林坤德, 袁东星 (4835)                          |
| 环境水体中无机砷现场分析方法研究进展 .....                    | 薄光永, 陈钊英, 弓振斌, 马剑 (4845)                     |
| 海洋痕量元素采样技术和分析方法的发展及展望: 厦门大学痕量元素平台建设进展 ..... | 黄勇明, 周宽波, 陈耀瑾, 张楠, 杨俊波, 戴民汉, 曹知勉, 蔡毅华 (4858) |

|                                        |                                          |
|----------------------------------------|------------------------------------------|
| 聚乙烯微塑料的微生物降解研究进展 .....                 | 骆苑蓉, 钱义谦, 齐雅楠 (4869)                     |
| 水稻土中氮素对微生物固氮的扰动及效应机制 .....             | 王锋, 张静, 周少余, 王鸿辉, 李建, 赵聪媛, 黄鹏, 陈铮 (4876) |
| 中国海洋生态毒理学研究中的毒性测试生物 .....              | 史天一, 洪海征, 王明华, 谭巧国, 史大林 (4888)           |
| 中国油气系统甲烷逸散排放估算 .....                   | 陈春赐, 吕永龙, 贺桂珍 (4905)                     |
| 2015~2020年厦漳泉地区大气氨排放清单及分布特征 .....      | 李香, 吴水平, 姜炳祺, 刘怡靖 (4914)                 |
| 九龙江口微塑料与抗生素抗性基因污染分布特征 .....            | 程宏, 陈荣 (4924)                            |
| 厦门湾沙滩沉积物微塑料污染特征 .....                  | 姚蕊, 刘花台, 李永玉, 刘潇雅, 吴海波, 王新红 (4931)       |
| 九龙江口-厦门湾海域中溶解态痕量金属的时空分布特征与影响机制 .....   | 戚柳倩, 岳新利, 钟灏文, 王棋, 王德利, 陈能汪 (4939)       |
| 福建省流域-近海溶解氧时空格局与低氧调控机制 .....           | 杨艾琳, 杨芳, 李少斌, 余其彪, 陈能汪 (4950)            |
| 厦门西溪河口沉积物活性磷的分布特征及迁移转化机制 .....         | 潘峰, 蔡宇, 郭占荣, 王新红 (4961)                  |
| 改性生物炭固定床对模拟湖水体中 $Mn^{2+}$ 的吸附 .....    | 赵洁, 叶志隆, 王佳妮, 蔡冠竟 (4971)                 |
| 基于表面增强拉曼光谱技术的饮用水中痕量恩诺沙星和环丙沙星快速检测 ..... | 徐婧, 郑红, 卢江龙, 刘国坤 (4982)                  |
| 紫外驱动高级氧化法降解水体中的磷酸三苯酯 .....             | 徐子文, 印红玲, 熊远明, 宋娇娇, 譙杨 (4992)            |

研究报告

|                                                              |                                                 |
|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| 2019年秋季海南省4次臭氧污染过程特征及潜在源区分析 .....                            | 符传博, 陈红, 丹利, 徐文帅 (5000)                         |
| 伊犁河谷夏季 $PM_{2.5}$ 和 $PM_{10}$ 中水溶性无机离子浓度特征和形成机制 .....        | 陈巧, 谷超, 徐涛, 周春华, 张国涛, 赵雪艳, 吴丽萍, 李新琪, 杨文 (5009)  |
| 城区与郊区 $PM_{2.5}$ 污染及传输特征差异性 .....                            | 齐鹏, 周颖, 程水源, 白伟超 (5018)                         |
| 南京北郊 BTESX 特征及健康风险评估 .....                                   | 冯悦政, 安俊琳, 张玉欣, 王俊秀 (5030)                       |
| 我国陆域水体系统表层水中微塑料生态风险评估 .....                                  | 孙晓楠, 陈浩, 贾其隆, 朱奔, 马长文, 叶建锋 (5040)               |
| 东江流域不同空间尺度景观格局对水质影响分析 .....                                  | 陈优良, 邹文敏, 刘星根, 曾金凤, 李丹, 郑汉奕 (5053)              |
| 长江与黄河源丰水期地表水中汞的分布特征、赋存形态及来源解析 .....                          | 刘楠涛, 吴飞, 袁巍, 王训, 王定勇 (5064)                     |
| 青藏高原湖泊水环境特征及水质评价 .....                                       | 刘智琦, 潘保柱, 韩谔, 李刚, 王韬轶 (5073)                    |
| 基于水化学与硫同位素的卡林型金矿区岩溶水文地球化学特征及控制因素 .....                       | 查学芳, 吴攀, 李学先, 陈世万, 黄家琰, 李清光, 陈思睿 (5084)         |
| 丹江口水库真核浮游植物群落分布特征及其与环境因子的关系 .....                            | 贺玉晓, 买思婕, 任玉芬, 李卫国, 赵同谦, 马寅男 (5096)             |
| 铜沸石对磷和重金属的吸附与底泥钝化性能 .....                                    | 王哲, 朱俊, 李雯, 闫德馨, 董雯, 刘玉玲, 李家科 (5106)            |
| 基于宏基因组与宏转录组分析石化废水生物处理系统脱氮功能菌群 .....                          | 章旭, 周佳佳, 周珉, 罗西子, 严新杰, 刘勇弟, 厉巍 (5115)           |
| 寒冷地区 IFAS + 磁混凝污水厂菌群结构和抗生素抗性基因分析 .....                       | 杜文琰, 姚俊芹, 马辉英, 胡渊鑫, 张春雷, 陈银广 (5123)             |
| 中国旱作农田一氧化氮排放及减排: Meta 分析 .....                               | 田政云, 吴雄伟, 吴媛媛, 魏佳楠, 白鹤, 顾立新 (5131)              |
| 硝化抑制剂对我国蔬菜生产产量、氮肥利用率和氧化亚氮减排效应的影响: Meta 分析 .....              | 刘发波, 马笑, 张芬, 梁涛, 黎亮武, 王军杰, 陈新平, 王孝忠 (5140)      |
| 不同施肥措施对热带地区稻菜轮作体系土壤 $CH_4$ 和 $N_2O$ 排放的影响 .....              | 邵晓辉, 汤水荣, 孟磊, 伍延正, 李金秋, 张广林 (5149)              |
| 不同水分条件下土地利用方式对我国热带地区土壤硝化过程及 $NO$ 和 $N_2O$ 排放的影响 .....        | 唐瑞杰, 胡煜杰, 赵彩悦, 赵炎, 袁新生, 汤水荣, 伍延正, 孟磊 (5159)     |
| 基于文献计量分析的长江经济带农田土壤重金属污染特征 .....                              | 刘孝严, 樊亚男, 刘鹏, 吴秋梅, 胡文友, 田康, 黄标 (5169)           |
| 基于 EBK 插值预测和 GDM 模型的襄州区耕地土壤重金属时空分布及来源变化分析 .....              | 高浩然, 周勇, 刘甲康, 程晓明, 郭嵩, 江衍, 谭恒鑫 (5180)           |
| 基于 GIS 对宁夏某铜银矿区周边土壤重金属来源解析 .....                             | 张扣扣, 贺婧, 钟艳霞, 魏琪琪, 陈锋 (5192)                    |
| 老化作用对生物炭钝化白云鄂博矿区碱性土壤中 $Cd^{2+}$ 的影响 .....                    | 王哲, 程俊丽, 卞园, 郑春丽, 王维大, 姜庆宏 (5205)               |
| 磁性氧化铁/桑树杆生物炭的制备及其对砷污染土壤溶解性有机碳和砷形态的影响 .....                   | 芦琳, 颜利玲, 梁美娜, 成官文, 朱宗强, 朱义年, 王敦球 (5214)         |
| 牡蛎壳粉和石灰改良酸性水稻土对磷有效性、形态和酶活性的影响 .....                          | 赵丽芳, 黄鹏武, 杨彩迪, 卢升高 (5224)                       |
| 磷、锌和镉交互作用对小白菜生长和锌镉累积的影响 .....                                | 帅祖华, 刘汉燧, 崔浩, 魏世强 (5234)                        |
| 重庆开州区农地土壤抗生素污染特征及潜在生态环境风险评估 .....                            | 方林发, 叶萃萃, 方标, 范晓霞, 高坤鹏, 李士洋, 陈新平, 肖然 (5244)     |
| 基于 InVEST 和 GeoSoS-FLUS 模型的黄河源区碳储量时空变化特征及其对未来不同情景模式的响应 ..... | 侯建坤, 陈建军, 张凯琪, 周国清, 尤号田, 韩小文 (5253)             |
| 黄土丘陵区不同恢复植被类型的固碳特征 .....                                     | 许小明, 张晓萍, 何亮, 郭晋伟, 薛帆, 邹亚东, 易海杰, 贺洁, 王浩嘉 (5263) |
| 土壤多功能性对微生物多样性降低的响应 .....                                     | 陈桂鲜, 吴传发, 葛体达, 陈剑平, 邓扬悟 (5274)                  |
| 氮添加对不同坡度退化高寒草甸土壤真菌多样性的影响 .....                               | 苏晓雪, 李希来, 李成一, 孙华方 (5286)                       |
| 碳减排背景下我国与世界主要能源消费国能源消费结构与模式对比 .....                          | 李辉, 庞博, 朱法华, 孙雪丽, 徐静馨, 王圣 (5294)                |
| 中国能源消费碳排放的空间化与时空动态 .....                                     | 郝瑞军, 魏伟, 刘春芳, 颜斌斌, 杜海波 (5305)                   |
| 京津冀及周边地区“2+26”城市结构性调整政策的 $CO_2$ 协同减排效益评估 .....               | 杨添祺, 王洪昌, 张辰, 朱金伟, 崔宇韬, 谭玉玲, 束轲 (5315)          |
| 我国塑料污染防治政策分析与建议 .....                                        | 李欢, 朱龙, 沈茜, 贺亚楠, 邓义祥, 安立会 (5326)                |



# 氮添加对不同坡度退化高寒草甸土壤真菌多样性的影响

苏晓雪, 李希来\*, 李成一, 孙华方

(青海大学农牧学院, 西宁 810016)

**摘要:** 为明确不同坡度退化高寒草甸土壤真菌多样性对外源氮添加的响应规律, 选取三江源区果洛州不同坡度退化程度相近的高寒草甸, 进行外源氮添加试验, 探讨不同氮添加水平: 低等量氮添加 (LN,  $2 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ )、中等量氮添加 (MN,  $5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ) 和高等量氮添加 (HN,  $10 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ) 对不同坡度退化草地土壤真菌多样性的影响。结果表明: ①土壤中真菌分布类群集中于子囊菌门 (Ascomycota)、担子菌门 (Basidiomycota)、被孢霉门 (Mortierellomycota) 和球囊菌门 (Glomeromycota), 其中优势菌门为子囊菌门和担子菌门。子囊菌门、根肿黑粉门和油壶菌门等相对丰度在不同坡度间差异显著 ( $P < 0.05$ )。而同一坡度不同氮添加处理下真菌各门丰度变化差异均不显著。②优势属为被孢霉属和 *Archaeorhizomyces*, 它们对不同坡度和不同氮添加水平的响应无差异性。③已鉴定 95 个菌属在不同坡度间存在显著差异 ( $P < 0.05$ )。④一些相对丰度  $< 1\%$  的属在同一坡度不同水平氮添加间存在显著差异 ( $P < 0.05$ )。⑤  $\alpha$  和  $\beta$  多样性分析整体表现为在不同坡度和不同氮添加水平下土壤真菌群落无差异性。表明退化高寒草甸土壤真菌对外源氮添加的响应不敏感。

**关键词:** 草地退化; 外源氮输入; 真菌多样性; 高通量测序; 坡度

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)11-5286-08 DOI: 10.13227/j.hjks.202201259

## Effect of Nitrogen Addition on Soil Fungal Diversity in a Degraded Alpine Meadow at Different Slopes

SU Xiao-xue, LI Xi-lai\*, LI Cheng-yi, SUN Hua-fang

(College of Agriculture and Animal Husbandry, Qinghai University, Xining 810016, China)

**Abstract:** This study proposed nitrogen addition experiments to analyze the effects of exogenous nitrogen addition on soil fungal diversity in alpine meadow. All the experiments were performed in degraded alpine meadow with two different slopes (gentle slope and steep slope) in Guoluo Prefecture of the Sanjiangyuan Region, and the sequence and analysis of ITS of soil fungi were performed using MiSeq PE250 sequencing technology. Comparative analysis was carried out with three nitrogen addition levels on soil fungal diversity in degraded grassland with different slopes, which included low nitrogen (LN,  $2 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ), middle nitrogen (MN,  $5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ), and high nitrogen (HN,  $10 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ). The results showed that: ① the distribution groups of fungi in the soil were Ascomycota, Basidiomycota, Mortierellomycota, and Glomeromycota, and the dominant bacteria was Ascomycota. ② The dominant genera were *Mortierella* and *Archaeorhizomyces*, and there were no differences in response to different slopes and nitrogen addition levels. ③ A total of 95 genera (*Gibberellum*, *Preussia*, etc.) were identified and significantly differed between two different slopes ( $P < 0.05$ ). ④ Bacteria with a relative abundance less than 1% had significant differences in nitrogen addition at different levels on the same slope ( $P < 0.05$ ). ⑤ In addition, the analyses of  $\alpha$  and  $\beta$  diversities showed that soil fungal community structure was stable under different slopes and nitrogen addition levels. Exogenous nitrogen supplementation significantly improved the relative abundance of non-dominant fungal communities without destroying soil fungal community structure.

**Key words:** degraded grassland; nitrogen addition; fungal diversity; high-throughput sequencing; slope

高寒草甸是青藏高原的主体植被类型, 广泛分布于青藏高原东部, 也是高原畜牧业的主产区<sup>[1]</sup>。近年来, 由于气候变化和人类活动的影响, 高寒草甸出现了不同程度的退化, 大面积的优良草地退化为裸地或“黑土滩”, 草地沙化和盐碱化现象加剧<sup>[2]</sup>, 在三江源区尤其严重<sup>[3,4]</sup>, 这一变化无疑会对整个高寒生态平衡造成非常严重的影响<sup>[5]</sup>。氮添加是改善并维持退化草地生态系统营养物质平衡的重要管理措施, 有助于退化草地的恢复<sup>[6,7]</sup>。退化草地氮添加在改变植被群落和土壤养分的同时, 将会影响草地土壤微生物多样性<sup>[8]</sup>。土壤微生物群落包括土壤真菌和细菌两个重要组成部分。其中, 土壤真菌群落是生态系统中具有功能多样化的类群, 参与很多生态过程, 并影响着植物生长和土壤健康<sup>[9]</sup>, 在各种类型的陆地生态系统中发挥着举足轻重的作用。迄

今为止, 施氮对退化草地土壤真菌多样性的影响研究领域十分薄弱, 且对草地土壤微生物多样性的影响效应仍存在不确定性。有研究表明, 土壤真菌对养分和管理措施等的影响比细菌对土壤环境的变化更为敏感<sup>[10]</sup>。受土壤真菌培养分离技术的限制, 试验获取的结果只能反映极少量的土壤微生物信息<sup>[11]</sup>, 因此给研究者带来了巨大的挑战。近年来, 随着高通量测序技术的发展和改进, 使土壤微生物学研究得到了长足的进步。有研究认为氮添加可改变草地土壤真菌群落结构<sup>[12]</sup>, 另有研究则报道, 真菌对氮添

收稿日期: 2022-01-25; 修订日期: 2022-03-10

基金项目: 国家自然科学基金联合基金项目 (U21A20191); 青海省自然科学基金创新团队项目 (2020-ZJ-904); 三江源国家公园联合研究专项 (LHZX-2020-08); 高等学校学科创新引智计划项目 (D18013); 青海省科技创新创业团队项目

作者简介: 苏晓雪 (1992~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为高寒生态恢复和环境保护, E-mail: 13897465586@163.com

\* 通信作者, E-mail: xilai-li@163.com

加响应无差异<sup>[13]</sup>. 因此, 有关外源氮输入对退化草地土壤真菌特性影响效应的研究迫切需要开展. 加之三江源区地形复杂, 沟壑纵横, 缓坡和陡坡等不同类型地形分布跨度很大. 真菌群落结构组成及多样性可能因退化草地坡度的不同而存在差异. 利用高通量测序技术研究不同坡度退化高寒草地施氮处理对土壤真菌多样性的影响有着极其重要的意义. 鉴于此, 本文以三江源区退化高寒草地为研究对象, 通过高通量测序技术和 Qiime 平台, 探究不同坡度中度退化的高寒草地土壤微真菌群落组成结构对不同水平氮添加措施的响应特征, 研究结果将有助于探索高寒草地土壤质量变化规律, 以期高寒退化草地的科学施肥、生态安全评价及可持续发展提供参考依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概述

研究样地位于青海省果洛藏族自治州玛沁县大武镇(34°25′20.41″N, 100°19′55.72″E, 平均海拔为 3 768 m), 属大陆性寒润气候. 年均气温为 -3.9℃, 年均降水量 528.8 mm. 土壤类型为高山草甸土. 原生草甸由于过度放牧, 啮齿动物作用及气候变化等干扰至中度退化<sup>[14]</sup>. 缓坡和陡坡试验点的植物群落主要由莎草科、禾本科、毒草类和杂草类组成, 种类有矮生嵩草 (*Kobresia humilis*)、高山嵩草 (*Kobresia pygmaea*)、垂穗披碱草 (*Elymus nutans*)、草地早熟禾 (*Poa pratensis*)、细叶亚菊 (*Ajania tenuifolia*)、伏毛铁棒锤 (*Aconitum flavum*)、黄帚橐吾 (*Ligularia virgaurea*)、刺参 (*Oplopanax elatus*) 和狼毒大戟 (*Euphorbia fischeriana*) 等.

### 1.2 试验设计

2019 年 5 月初, 分别在缓坡地 (gentle slope, G) 和陡坡地 (steep slope, S) 选取 50 m × 50 m 退化高寒草地作为研究样地. 样地坡面朝向西偏北 12.3°, 其中陡坡地坡度 27°, 缓坡地坡度 8°. 采用随机区组试验设计, 设置 16 个 5 m × 5 m 样方进行不同梯度氮添加处理试验 (图 1), 缓坡陡坡试样小区布置情况一致. 氮添加水平包括对照 (CK): 0 g · (m<sup>2</sup> · a)<sup>-1</sup>; 低等量氮添加 (low nitrogen, LN): 2 g · (m<sup>2</sup> · a)<sup>-1</sup>; 中等量氮添加 (middle nitrogen, MN): 5 g · (m<sup>2</sup> · a)<sup>-1</sup>; 高等量氮添加 (high nitrogen, HN): 10 g · (m<sup>2</sup> · a)<sup>-1</sup>. 样方间缓冲带 2.5 m, 样地设置完成后在天气降雨前进行氮添加 (NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>, 粒装, 含氮量 35%) 处理, 以降低肥料损耗, 保证试验效果.

### 1.3 样品采集与分析

于 2019 年 8 月植物生长旺盛期在不同处理样

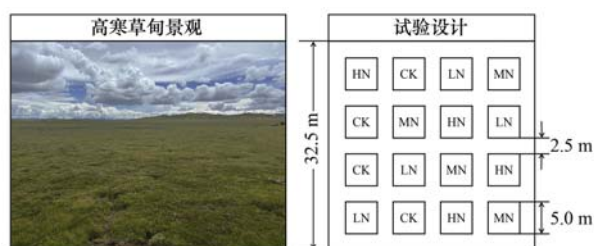


图 1 试验设计

Fig. 1 Experimental design

地内按照 5 点取样法选择 5 个规格为 10 cm × 10 cm 的样方. 采样工具经 75% 浓度酒精消毒, 取重量相当的 0 ~ 10 cm 土层土壤进行混匀, 去除杂质后再取一定量土壤装入无菌管, 每个样品各取样 10 g, 液氮罐冻存, 带回实验室后立即密封用大体积干冰运输送样检测.

委托北京奥维森基因科技有限公司测定, 采用高通量测序扩增 ITS1 区域进行土壤真菌测定. 真菌 OTUs 注释采用 Unite (Release 7.2, <http://unite.ut.ee/index.php>) 数据库<sup>[15]</sup>. 试验步骤、测序原始数据的处理、α 多样性 (Chao1、Goods coverage、Observed species 和 Shannon 指数) 计算和群落结构差异分析详见文献<sup>[16]</sup>.

β 多样性采用非度量多维尺度法 (NMDS) 进行分析<sup>[17]</sup>.

### 1.4 数据分析与作图

本研究分析平台为 Qiime 平台, 通过 R 语言及 qvalue 包进行 Kruskal-Wallis 检验分析同一坡度不同氮添加处理以及不同坡度土壤真菌的 OTUs、真菌门和属的丰度差异. 值小于 0.05 即视为有差异的 OTUs 或物种. 通过 SPSS Statistics 20.0 统计分析软件进行双因素方差分析 (Two-way ANOVA) 和多重比较 (Duncan) 分析检验氮添加和坡度对土壤样品 OTUs 数目、土壤真菌多样性和丰富度的影响. 通过独立样本 t 检验法分析同一处理不同坡度间 α 多样性的差异.

Venn 图、物种组成柱状图、NMDS 和 Network 分析由 R 语言中的 vegan、ggplot2、igraph 和 psych 包等完成.

## 2 结果与分析

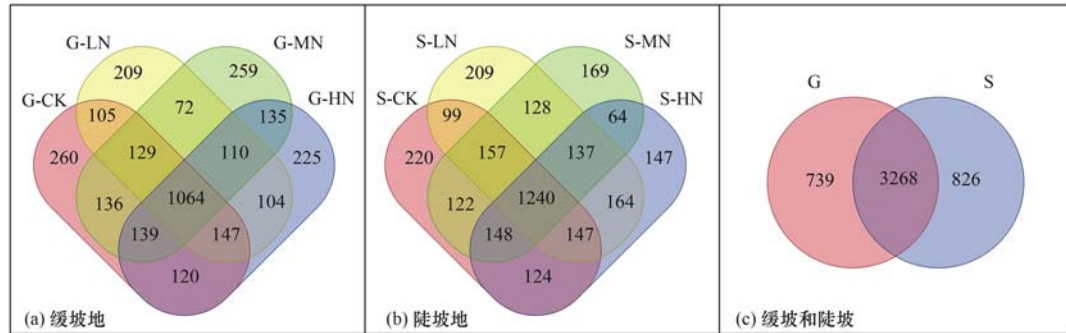
### 2.1 韦恩图分析

从韦恩图可以看出, 在缓坡地, 各样地的土壤样品共有 OTUs 为 1 064, 比例为 33.1%. CK、LN、MN 和 HN 特有的 OTUs 数目分别为 260、209、259 和 225 个 [图 2(a)]. 在陡坡区, 各样地的土壤样品共有 OTUs 为 1 240, 比例为 37.9%. CK、LN、MN 和 HN 特有的 OTUs 数目分别为 220、209、169 和 147



个[图 2(b)]; 缓坡地与陡坡地土壤样品共有 OTUs 为 3 268, 缓坡、陡坡特有的 OTUs 数目分别为 739 个和 826 个[图 2(c)]. 对 OTUs 从门到种依次进行

分类, 总共获得分类学谱系中已鉴定真菌群落物种 17 门(phylum)、49 纲(class)、130 目(order)、271 科(family)、557 属(genus)和 1 061 种(species).



G-CK 为缓坡地对照, G-LN、G-MN 和 G-HN 分别为缓坡地低、中和高水平氮添加处理;  
S-CK 为陡坡地对照, S-LN、S-MN 和 S-HN 分别为陡坡地低、中和高水平氮添加处理; G 为缓坡地, S 为陡坡地

图 2 不同坡度氮添加处理真菌 OTUs 韦恩图

Fig. 2 Venn diagram of fungal OTUs under different slopes and nitrogen addition treatments

## 2.2 土壤真菌群落多样性分析

真菌群落丰富度及多样性分析结果如表 1 所示.  $\alpha$  多样性分析结果表明, 不同坡度不同处理下土壤真菌测序观测深度均大于 0.99, 测序结果能够真实反映土壤中真菌的存在情况. 土壤真菌丰富度指数 (Chao1) 介于 1 319 ~ 1 603, 观测物种数介于 1 003 ~ 1 230, Shannon 多样性指数介于 6.60 ~ 7.40.

缓坡地中随着施氮量的递增, Chao1 指数、观测物种数和 Shannon 指数的平均值呈现先减后增趋势, CK 到 LN 再到 MN 出现持续减少, HN 处理呈增加趋势. 其中, CK 处理所对应的 Chao1 指数、观测物种数和 Shannon 指数最大, 分别为 1 478、1 114 和 7.36, MN 处理所对应的 Chao1 指数、观测物种数和 Shannon 指数最小, 分别为 1 319、1 003 和 6.60. Chao1 指数和观测物种数由高到低依次为: CK > HN > LN > MN, Shannon 多样性指数由高到低依次为: CK > LN > HN > MN (图 3). 在陡坡地中随着施氮量

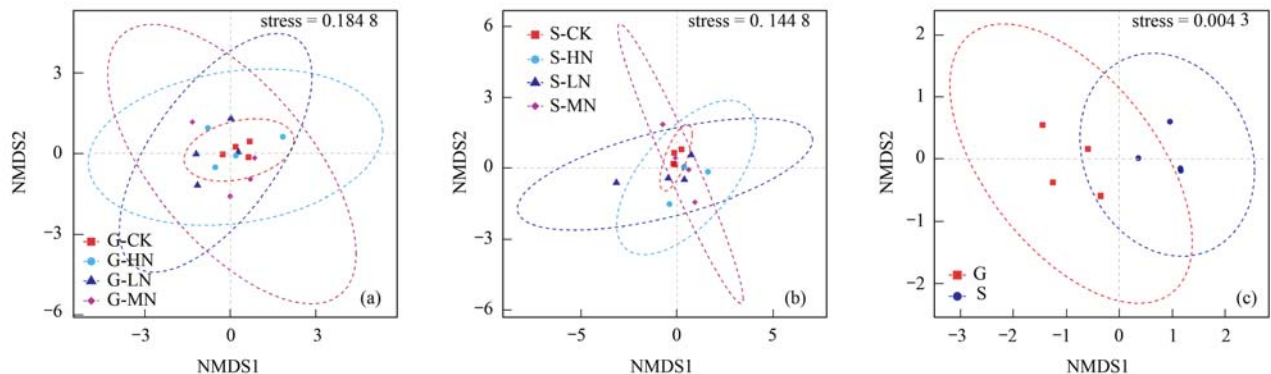
的增加, Chao1 指数由高到低依次为: LN > CK > MN > HN, 观测物种数为: LN > CK > HN > MN, Shannon 指数为: CK > MN > LN > HN.

经双因素方差分析, 同一坡度不同处理间 Chao1 指数、观测物种数和 Shannon 指数差异均不显著. 不同坡度间 Chao1 指数和观测物种数差异显著 ( $P < 0.05$ ). 由于坡度水平 < 3 无法进行多重比较, 因此可采用独立样本  $t$  检验分析同一处理不同坡度间的差异性, 结果表明, 除 HN 处理下不同坡度观测物种数差异显著 ( $P < 0.05$ ), 其他处理下 Chao1 指数和观测物种数均不显著. 同时, 非度量多维尺度法 (NMDS) 分析结果表明 (图 3), 同一坡度不同处理, 不同坡度不同处理组与组之间相交, 表明组间土壤真菌差异均不明显.

## 2.3 土壤真菌群落结构组成分析

### 2.3.1 土壤真菌群落门水平结构组成

真菌群落门水平结构组成聚类分析如图 4 所示. 缓坡地 G-CK、G-HN、G-LN、G-MN 和陡坡地 S-



(a)缓坡地氮添加 NMDS 分析, (b)陡坡地氮添加 NMDS 分析, (c)缓坡和陡坡(CK、LN、MN 和 HN)NMDS 分析

图 3 OTUs 水平 NMDS 分析

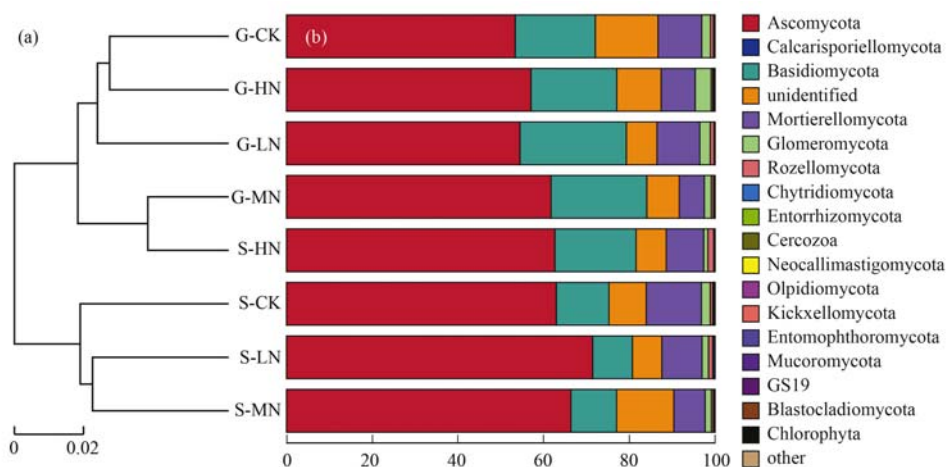
Fig. 3 NMDS analysis at OTUs level

表 1 土壤样本中真菌丰富度和 Shannon 多样性指数<sup>1)</sup>

Table 1 Fungal richness and Shannon index in soil samples

| 坡度 | 处理 | Chao1 指数       | 观测深度             | 观测物种数          | Shannon 指数     |
|----|----|----------------|------------------|----------------|----------------|
| 缓坡 | CK | 1478 ± 122 Aa  | 0.990 ± 0.000 Aa | 1 114 ± 84 Aa  | 7.36 ± 0.52 Aa |
|    | LN | 1 385 ± 109 Aa | 0.990 ± 0.001 Aa | 1 013 ± 99 Aa  | 6.73 ± 0.71 Aa |
|    | MN | 1 319 ± 336 Aa | 0.991 ± 0.003 Aa | 1 003 ± 192 Aa | 6.60 ± 0.60 Aa |
|    | HN | 1 464 ± 183 Aa | 0.990 ± 0.001 Aa | 1 090 ± 113 Ab | 6.65 ± 0.68 Aa |
| 陡坡 | CK | 1 594 ± 178 Aa | 0.993 ± 0.001 Aa | 1 226 ± 130 Aa | 7.40 ± 0.26 Aa |
|    | LN | 1 603 ± 78 Aa  | 0.992 ± 0.001 Aa | 1 230 ± 74 Aa  | 6.75 ± 1.34 Aa |
|    | MN | 1 579 ± 175 Aa | 0.993 ± 0.002 Aa | 1 161 ± 97 Aa  | 6.88 ± 0.59 Aa |
|    | HN | 1 516 ± 147 Aa | 0.993 ± 0.001 Aa | 1 171 ± 36 Aa  | 6.53 ± 0.95 Aa |

1) 不同大写字母表示同一坡度不同处理间真菌丰富度及多样性的差异,不同小写字母表示不同坡度同一处理间真菌丰富度及多样性的差异



(a) 样本间层次聚类分析, (b) 样品的群落结构柱状图; 横坐标为物种在该样本中的相对丰度(%) , 图例为样本名称; 图中显示的是相对丰度 1% 以上的物种信息, 下同

图 4 门水平样本聚类分析

Fig. 4 Sample cluster analysis at phylum level

HN 聚为一支,陡坡地 S-CK、S-LN 和 S-MN 聚为一支,共聚为两支.缓坡地与陡坡地 OTUs 所含序列的丰度划分较为清楚,证明土壤真菌群落门水平存在差异性.退化高寒草甸不同氮添加处理真菌门水平已鉴定真菌分布类群多集中于子囊菌门(Ascomycota)、担子菌门(Basidiomycota)、被孢霉门(Mortierellomycota)和球囊菌门(Glomeromycota),且土壤真菌优势菌均为子囊菌门,其次是担子菌门.缓坡地,子囊菌门丰度最高的为 MN(61.7%),HN(57.1%)、LN(54.5%)和 CK(53.4%)次于 MN.相对于 CK,LN、MN 和 HN 处理下子囊菌门丰度比例分别增加 1.1、8.3 和 3.7 个百分点.在陡坡地,子囊菌门丰度由高到低依次为 LN(71.5%)、MN(66.4%)、CK(63.0%)和 HN(62.7%),相对于 CK,LN 和 MN 子囊菌门丰度分别增加 8.5 个和 3.4 个百分点,HN 子囊菌门丰度减少 0.3 个百分点.缓坡地与陡坡地之间相比,陡坡地子囊菌门丰度(65.9%)高于缓坡地子囊菌门丰度(56.7%).担子菌门相对丰度在缓坡地 CK、LN、MN 和 HN 处理下依次为 18.7%、24.8%、22.4%和 20.0%,与 CK 相

比,LN、MN 和 HN 担子菌门丰度分别增加 6.1、3.7 和 1.3 个百分点.担子菌门相对丰度在陡坡地 CK、LN、MN 和 HN 处理下依次为 12.3%、9.3%、10.6%和 18.9%,与 CK 相比,LN 和 MN 担子菌门丰度分别减少 3 个和 1.7 个百分点,HN 担子菌门丰度增加 6.6 个百分点.缓坡地与陡坡地担子菌门丰度分别为 21.5%和 12.8%,缓坡地担子菌门丰度高于陡坡地.经 Kruskal-Wallis 检验,同一坡度不同氮添加处理下真菌各门丰度变化差异均不显著(表 2),而不同坡度间子囊菌门、根肿黑粉门(Entorrhizomycota)、油壶菌门(Olpidiomyces)、壶菌门(Chytridiomycota)和担子菌门存在显著差异( $P < 0.05$ ),表现为缓坡地担子菌门丰度显著高于陡坡地,而缓坡地子囊菌门丰度显著低于陡坡地(相对丰度  $> 10\%$ ).

2.3.2 土壤真菌群落属水平结构组成

根据真菌属水平样本聚类分析结果可知,G-CK、S-CK、S-MN 和 S-HN 聚为一支,G-LN、S-LN、G-MN 和 G-HN 聚为一支,被孢霉属(*Mortierella*)和 *Archaeorhizomyces* 为优势属,相对丰度分别为 6%~

表 2 坡度和氮添加下各真菌门 Kruskal-Wallis 检验结果<sup>1)</sup>

Table 2 Kruskal-Wallis test results of fungal phyla under different slopes and nitrogen addition

| 真菌门                    | P 值        |            |          |
|------------------------|------------|------------|----------|
|                        | 缓坡不同氮添加水平间 | 陡坡不同氮添加水平间 | 缓坡地与陡坡地间 |
| Kickxellomycota        | 0.33       | 0.87       | 0.11     |
| Chytridiomycota        | 0.37       | 0.52       | 0.04     |
| Mortierellomycota      | 0.42       | 0.30       | 0.77     |
| unidentified           | 0.46       | 0.25       | 0.39     |
| Olpidiomycota          | 0.49       | 0.39       | 0.04     |
| Blastocladiomycota     | 0.54       | 0.54       | 0.88     |
| Entorrhizomycota       | 0.54       | 0.73       | 0.02     |
| Ascomycota             | 0.63       | 0.60       | 0.02     |
| Cercozoa               | 0.65       | 0.63       | 0.77     |
| Rozellomycota          | 0.66       | 0.78       | 0.39     |
| Glomeromycota          | 0.66       | 0.36       | 0.08     |
| Basidiomycota          | 0.75       | 0.79       | 0.04     |
| Chlorophyta            | 0.76       | 0.54       | 0.54     |
| Calcarisporiellomycota | 0.76       | 0.54       | 0.88     |
| Mucoromycota           | 0.77       | 0.79       | 0.14     |
| GS19                   | 0.81       | 0.07       | 0.31     |
| Neocallimastigomycota  | 0.81       | 0.18       | 0.06     |
| Entomophthoromycota    | —          | 0.20       | 0.54     |

1) 差异显著水平  $\alpha = 0.05$

13% 和 1% ~ 16%, 其中被孢霉属属于被孢霉门, *Archaeorhizomyces* 为子囊菌门 (图 5). 经 Kruskal-Wallis 检验, 上述菌属对不同坡度的响应无差异性, 且在同一坡度不同氮添加水平间差异不显著. 不同

坡度各菌属存在显著差异 ( $P < 0.05$ ), 如子囊菌门赤霉菌属, 在缓坡地、陡坡地相对丰度均大于 1%, 表现为陡坡地赤霉菌属相对丰度显著高于缓坡地. 不同坡度真菌属对不同水平氮添加的响应不同. 经 Kruskal-Wallis 检验, 在缓坡地, *Fibroporia*、*Holtermanniella*、湿伞属 (*Hygrocybe*)、*Gorgomyces*、*Pustularia*、*Holocotylon*、*Cystofilobasidium*、*Synchytrium* 和 *Antennariella* 这 9 个属在不同水平氮添加间差异显著 ( $P < 0.05$ ). 在陡坡地, *Sporormia*、丛赤壳属 (*Nectria*)、*Clathrus*、*Sclerotinia*、*Leohumicola*、*Acremonium*、*Alternaria*、*Chrysosporium* 和 *Ophiosphaerella* 等 23 个属在不同水平氮添加间差异显著 ( $P < 0.05$ ). 说明氮添加对真菌优势属相对丰度的影响不显著, 而对一些丰度较低的属 (相对丰度  $< 1\%$ ) 有显著影响. 随后取相对丰度均大于 0.1% 的真菌属, 缓坡地中选择 *Holtermanniella* 和湿伞属, 陡坡地中选择 *Sporormia* 和丛赤壳属 (表 3), 进行 Kruskal-Wallis 单因素 AVOVA 多重比较检验不同处理间的差异 (表 4), 在缓坡地, 与对照相比, 低水平氮添加显著降低了 *Holtermanniella* 的相对丰度 ( $P < 0.05$ ), 中水平氮添加 *Holtermanniella* 相对丰度显著高于低水平氮添加 ( $P < 0.05$ ). 低水平氮添加湿伞属相对丰度显著高于中、高水平氮添加下湿伞属相对丰度 ( $P < 0.05$ ). 在陡坡地, 与对照相比,

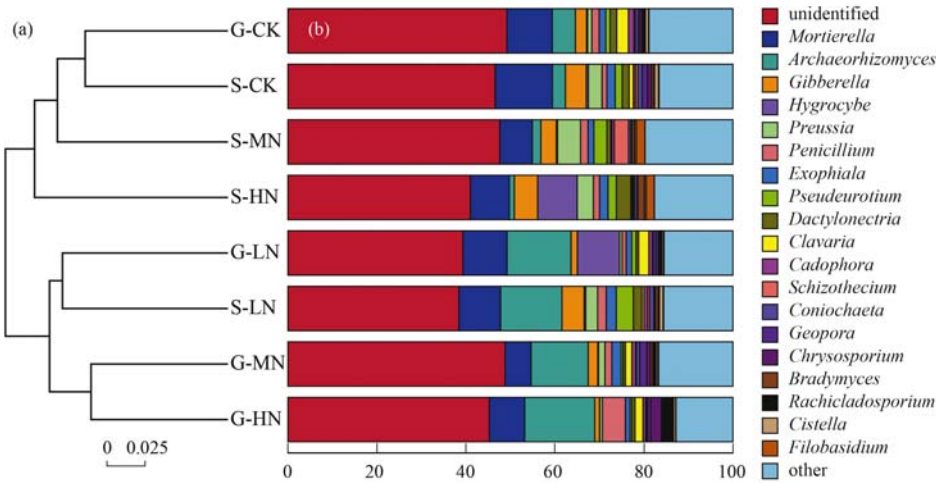


图 5 属水平样本聚类分析

Fig. 5 Sample cluster analysis at genus level

表 3 不同坡度氮添加处理土壤真菌属<sup>1)</sup>

Table 3 Soil fungi with different slopes treated by nitrogen addition

| 坡度 | 真菌属                    | 相对丰度/%      |              |             |             |
|----|------------------------|-------------|--------------|-------------|-------------|
|    |                        | CK          | LN           | MN          | HN          |
| 缓坡 | <i>Holtermanniella</i> | 0.68 ± 0.62 | 0.13 ± 0.05  | 0.31 ± 0.14 | 0.24 ± 0.11 |
|    | <i>Hygrocybe</i> (湿伞属) | 0.23 ± 0.19 | 7.91 ± 14.56 | 0.09 ± 0.13 | 0.06 ± 0.05 |
| 陡坡 | <i>Sporormia</i>       | 0.42 ± 0.23 | 0.08 ± 0.02  | 0.76 ± 1.21 | 0.11 ± 0.07 |
|    | <i>Nectria</i> (丛赤壳属)  | 0.42 ± 0.10 | 0.28 ± 0.07  | 0.39 ± 0.17 | 0.76 ± 0.25 |

1) 表内只显示相对丰度  $> 0.1\%$  的真菌属



表 4 不同坡度氮添加处理 Kruskal-wallis 单因素 AVOVA 多重比较<sup>1)</sup>

| Table 4 Multiple comparisons of Kruskal-wallis single factor AVOVA treated by nitrogen addition at different slopes |                         | P 值       |           |           |           |           |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 坡度                                                                                                                  | 真菌属                     | CK vs. LN | CK vs. MN | CK vs. HN | LN vs. MN | LN vs. HN | MN vs. HN |
| 缓坡                                                                                                                  | <i>Holtermanniella</i>  | 0.004     | 0.458     | 0.158     | 0.031     | 0.137     | 0.504     |
|                                                                                                                     | <i>Hygrocybe</i> ( 湿伞属) | 0.298     | 0.169     | 0.110     | 0.016     | 0.008     | 0.824     |
| 陡坡                                                                                                                  | <i>Sporormia</i>        | 0.005     | 0.414     | 0.021     | 0.045     | 0.603     | 0.137     |
|                                                                                                                     | <i>Nectria</i> ( 丛赤壳属)  | 0.207     | 0.603     | 0.137     | 0.458     | 0.006     | 0.045     |

1) 差异显著水平  $\alpha=0.05$

低、高水平氮添加下 *Sporormia* 相对丰度显著降低 ( $P<0.05$ ), 低水平氮添加 *Sporormia* 相对丰度显著高于中水平氮添加 ( $P<0.05$ ). 而丛赤壳属相对丰度表现为低、中水平氮添加显著低于高水平氮添加 ( $P<0.05$ ).

3 讨论

土壤微生物对生态环境的变化响应十分敏感<sup>[18]</sup>, 且不同微生物类群拥有不同生态学功能<sup>[19]</sup>. 本研究中, 高寒草甸土壤真菌门组成的主导类群与大多数研究结果基本一致<sup>[20,21]</sup>, 缓坡与陡坡退化高寒草甸在施氮处理下土壤真菌门组成包括子囊菌门、担子菌门、被孢霉门和球囊菌门等. 土壤真菌优势菌为子囊菌门, 其次为担子菌门. 其中, 大多数子囊菌门、担子菌门营养方式为腐生型或共生型<sup>[22,23]</sup>, 代表着不同类型的土壤有机质分解者<sup>[24,25]</sup>. 本研究结果表明同一坡度的中度退化高寒草甸经不同氮添加处理子囊菌门的相对丰度变化存在差异; 缓坡地子囊菌门的相对丰度升高; 陡坡地低、中水平氮添致使子囊菌门丰度分别升高, 而高水平氮添加子囊菌门丰度减少. 有研究表明, 土壤氮含量高可增加子囊菌门的相对丰度<sup>[26]</sup>, 本研究整体表现为施氮后子囊菌门的相对丰度增加, 这与前人的研究结果基本相符. 相较于担子菌门, 缓坡地氮添加会增加担子菌门的相对丰度, 陡坡地低、中水平氮添加担子菌门丰度出现降低现象, 而高水平氮添加增加了担子菌门丰度. 中度退化高寒草甸氮添加处理下土壤各真菌门水平组成类群丰度变化差异均不显著, 在真菌属水平, 氮添加对真菌优势属相对丰度的影响不显著, 但对于丰度较低的属有显著影响, 且不同坡度施氮后真菌属在各处理间存在显著差异的变化类群有所不同. 例如缓坡中, *Holtermanniella* 和湿伞属在不同施氮下存在差异; 陡坡中, *Sporormia* 和丛赤壳属在不同施氮下存在差异; 其中, 湿伞属、*Sporormia* 属和丛赤壳属对施氮没有一致表现; 而 *Holtermanniella* 表现为施氮后丰度均有所下降; 在低水平氮添加处理下丰度显著下降. 鉴于上述现象, 笔者推测 *Holtermanniella* 对氮添加表

现为厌氮性. 由于各门中存在显著差异的属丰度较小, 且各类群对氮添加的响应变化不一致, 故弱化了真菌门对施氮处理的敏感性. 本研究试验结果与内蒙古典型草原土壤真菌群落结构分析试验结果相比较<sup>[27]</sup>, 得出结论较为一致. 上述研究利用高通量测序技术对内蒙古典型草原土壤真菌群落结构进行了分析, 探究氮添加对土壤微生物群落结构的影响, 结果表明土壤各真菌门对氮添加响应不敏感, 大多数真菌属对氮添加响应不敏感, 只有一些稀有属对氮添加有响应. 不同坡度土壤真菌类群组成存在显著差异. 相对于缓坡地, 陡坡地子囊菌门显著富集, 担子菌门略有匮乏, 包括已鉴定 95 个属在不同坡度间存在显著差异. 存在该现象的原因与诸多因子有关. 山地植被群落中, 包括坡度、坡向、坡位和海拔等地形因子控制着植被的分布, 其不仅控制着太阳辐射和降水的空间分布格局, 还在土壤、水分和养分方面存在着空间异质性<sup>[28~30]</sup>. 有研究表明, 影响澜沧江源区高寒草甸植物组成和结构的地形因子由强至弱依次为坡度、坡位、海拔和坡向, 即表明坡度是影响该区高寒草甸植物分布的最重要的地形因子<sup>[31]</sup>. 不同坡度的土壤水分含量<sup>[32]</sup> 和土壤养分<sup>[33]</sup> 等存在差异, 致使不同坡度间土壤真菌群落组成发生变化.

土壤微生物多样性指数是用来评价微生物群落丰富度和多样性, 较高的多样性指数与微生物丰富度和多样性呈正相关<sup>[34]</sup>. 目前关于氮添加影响土壤微生物多样性的研究报道指出, 氮添加降低了草地生态系统土壤微生物的多样性<sup>[35]</sup>. 本研究结果表明氮添加对土壤真菌丰富度和多样性影响不显著. 笔者之前的研究结果: 土壤细菌丰富度和多样性整体上呈现出随着施氮量增加先减少后增加的趋势, 中等量氮添加显著降低了土壤细菌丰富度和多样性, 高水平氮添加显著抑制了土壤细菌的丰富度和多样性的下降, 但施氮土壤细菌丰富度和多样性都小于未施氮<sup>[16]</sup>. 上述现象表明土壤细菌对养分和管理措施等的响应比真菌对土壤环境的变化更加敏感, 同时也验证了氮添加会降低草地生态系统土壤微生物多样性这一结论. 外源氮施入会引起土壤微生物物



种间发生竞争,其中对氮具有较高利用率的微生物类群在氮添加后迅速吸收氮素生长,抑制其他类群的生长与繁殖,致使部分土壤微生物类群减少,进而降低了土壤微生物多样性<sup>[36]</sup>.本研究氮添加对不同坡度退化高寒草甸植被恢复及土壤细菌多样性的影响结论,强调在退化高寒草地的恢复中,中水平  $5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$  氮添加能显著降低土壤细菌多样性,虽有利于地上植被的生长,但却降低了土壤微生物生态系统的稳定性.而高水平  $10 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$  氮添加不仅可提高退化草地的生产力,还可以抑制土壤细菌多样性的显著下降,可维持土壤微生物生态系统的稳定.同时,本研究得出氮添加对不同坡度退化高寒草甸土壤真菌多样性影响不显著,外源氮添加的促进效应依赖于坡度,更适宜于缓坡退化高寒草地的植被恢复<sup>[16, 37]</sup>.

土壤真菌在科、属和种水平上未鉴定出的物种较多,但目前关于微生物属水平类群的研究较少.未来研究将应围绕稀有属是否可以作为指示菌属,来反映氮添加对退化高寒草甸土壤微生物群落结构的影响开展研究,不同真菌属类群拥有的生态学功能还有待进一步探索.

#### 4 结论

不同坡度退化高寒草甸土壤真菌群落中子囊菌门、根肿黑粉门、油壶菌门、壶菌门和担子菌门,以及包括赤霉菌属、*Preussia* 和 *Pseudeurotium* 等已鉴定 95 个属存在显著差异.同一坡度不同施氮处理对土壤真菌群落结构和多样性无显著影响.虽然不同坡度退化草地土壤真菌群落结构组成存在差异,但不同氮添加水平下不同坡度的土壤真菌群落结构均无显著差异,说明高寒草甸土壤真菌对外源氮添加的响应不敏感.

#### 参考文献:

- [1] 李文宇, 张扬建, 沈若楠, 等. 氮磷共限制青藏高原高寒草甸生态系统碳吸收[J]. 应用生态学报, 2022, **33**(1): 51-58.  
Li W Y, Zhang Y J, Shen R N, *et al.* Ecosystem carbon uptake was co-limited by nitrogen and phosphorus in alpine meadow on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, **33**(1): 51-58.
- [2] 王一博, 王根绪, 沈水平, 等. 青藏高原高寒区草地生态环境系统退化研究[J]. 冰川冻土, 2005, **27**(5): 633-640.  
Wang Y B, Wang G X, Shen Y P, *et al.* Degradation of the eco-environmental system in alpine meadow on the Tibetan Plateau [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2005, **27**(5): 633-640.
- [3] Jiang C, Zhang L B. Climate change and its impact on the eco-environment of the three-rivers headwater region on the Tibetan Plateau, China [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2015, **12**(10): 12057-12081.
- [4] Shao Q Q, Cao W, Fan J W, *et al.* Effects of an ecological conservation and restoration project in the Three-River Source Region, China [J]. Journal of Geographical Sciences, 2017, **27**(2): 183-204.
- [5] 王晓芬, 马源, 张格非, 等. 高寒草甸退化阶段植物群落多样性与系统多功能性的联系[J]. 草地学报, 2021, **29**(5): 1053-1060.  
Wang X F, Ma Y, Zhang G F, *et al.* Relationship between plant community diversity and ecosystem multifunctionality during alpine meadow degradation [J]. Acta Agrestia Sinica, 2021, **29**(5): 1053-1060.
- [6] 刘卓艺, 王晓光, 魏海伟, 等. 氮素补给对呼伦贝尔草甸草原退化草地牧草产量和品质的影响[J]. 应用生态学报, 2019, **30**(9): 2992-2998.  
Liu Z Y, Wang X G, Wei H W, *et al.* Effects of nitrogen supplementation on forage yield and quality of a degraded grassland in Hulunbuir, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, **30**(9): 2992-2998.
- [7] 刘学敏, 罗久富, 邓东周, 等. 氮添加对不同退化程度高寒草地生态系统的影响[J]. 草业科学, 2018, **35**(12): 2773-2783.  
Liu X M, Luo J F, Deng D Z, *et al.* Effect of nitrogen addition on alpine grassland ecosystems degraded to different extents [J]. Pratacultural Science, 2018, **35**(12): 2773-2783.
- [8] 何亚婷, 齐玉春, 董云社, 等. 外源氮输入对草地土壤微生物特性影响的研究进展[J]. 地球科学进展, 2010, **25**(8): 877-885.  
He Y T, Qi Y C, Dong Y S, *et al.* Advances in the influence of external nitrogen input on soil microbiological characteristics of grassland ecosystem [J]. Advances in Earth Science, 2010, **25**(8): 877-885.
- [9] Klauauf S, Inselsbacher E, Zechmeister-Boltenstern S, *et al.* Molecular diversity of fungal communities in agricultural soils from Lower Austria [J]. Fungal Diversity, 2010, **44**(1): 65-75.
- [10] Thormann M N. Diversity and function of fungi in peatlands: A carbon cycling perspective [J]. Canadian Journal of Soil Science, 2006, **86**(S1): 281-293.
- [11] 尹亚丽, 王玉琴, 李世雄, 等. 围封对退化高寒草甸土壤微生物群落多样性及土壤化学计量特征的影响[J]. 应用生态学报, 2019, **30**(1): 127-136.  
Yin Y L, Wang Y Q, Li S X, *et al.* Effects of enclosing on soil microbial community diversity and soil stoichiometric characteristics in a degraded alpine meadow [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, **30**(1): 127-136.
- [12] 张海芳, 刘红梅, 赵建宁, 等. 贝加尔针茅草原土壤真菌群落结构对氮素和水分添加的响应[J]. 生态学报, 2018, **38**(1): 195-205.  
Zhang H F, Liu H M, Zhao J N, *et al.* Response of soil fungal community structure to nitrogen and water addition in *Stipa baicalensis* steppe [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, **38**(1): 195-205.
- [13] 施瑶, 王忠强, 张心昱, 等. 氮磷添加对内蒙古温带典型草原土壤微生物群落结构的影响[J]. 生态学报, 2014, **34**(17): 4943-4949.  
Shi Y, Wang Z Q, Zhang X Y, *et al.* Effects of nitrogen and phosphorus addition on soil microbial community composition in temperate typical grassland in Inner Mongolia [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, **34**(17): 4943-4949.
- [14] Lu X Y, Yan Y, Sun J, *et al.* Carbon, nitrogen, and phosphorus storage in alpine grassland ecosystems of Tibet;

- effects of grazing exclusion[J]. *Ecology and Evolution*, 2015, **5** (19): 4492-4504.
- [15] Altschul S F, Madden T L, Schäffer A A, *et al.* Gapped BLAST and PSI-BLAST: a new generation of protein database search programs[J]. *Nucleic Acids Research*, 1997, **25** (17): 3389-3402.
- [16] 李成一, 李希来, 杨元武, 等. 氮添加对不同坡度退化高寒草甸土壤细菌多样性的影响[J]. *草业学报*, 2020, **29** (12): 161-170.
- Li C Y, Li X L, Yang Y W, *et al.* Effect of nitrogen addition on soil bacterial diversity in alpine degraded grasslands of differing slope[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2020, **29** (12): 161-170.
- [17] Rivas M N, Burton O T, Wise P, *et al.* A microbiota signature associated with experimental food allergy promotes allergic sensitization and anaphylaxis[J]. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 2013, **131** (1): 201-212.
- [18] Wardle D A, Bardgett R D, Klironomos J N, *et al.* Ecological linkages between aboveground and belowground biota [J]. *Science*, 2004, **304** (5677): 1629-1633.
- [19] Liu J S, Zhang X, Wang H, *et al.* Long-term nitrogen fertilization impacts soil fungal and bacterial community structures in a dryland soil of Loess Plateau in China[J]. *Journal of Soil and Sediments*, 2018, **18** (4): 1632-1640.
- [20] 尹亚丽, 李世雄, 马玉寿. 人工补播对退化高寒草甸土壤真菌群落特征的影响[J]. *草地学报*, 2020, **28** (6): 1791-1797.
- Yin Y L, Li S X, Ma Y S. Effects of replanting on soil fungal community characteristics in degraded alpine meadow[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2020, **28** (6): 1791-1797.
- [21] 赵兴鸽, 张世挺, 牛克昌. 青藏高原高寒草甸土壤真菌多样性与植物群落功能性状和土壤理化特性的关系[J]. *应用与环境生物学报*, 2020, **26** (1): 1-9.
- Zhao X G, Zhang S T, Niu K C. Relationships between soil fungal diversity, plant community functional traits, and soil attributes in Tibetan alpine meadows[J]. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2020, **26** (1): 1-9.
- [22] Nie S, Lei X M, Zhao L X, *et al.* Fungal communities and functions response to long-term fertilization in paddy soils[J]. *Applied Soil Ecology*, 2018, **130**: 251-258.
- [23] Nguyen N H, Song Z W, Bates S T, *et al.* FUNGuild: An open annotation tool for parsing fungal community datasets by ecological guild[J]. *Fungal Ecology*, 2016, **20**: 241-248.
- [24] Ma A Z, Zhuang X L, Wu J M, *et al.* Ascomycota members dominate fungal communities during straw residue decomposition in Arable soil[J]. *PLoS One*, 2013, **8** (6), doi: 10.1371/journal.pone.0066146.
- [25] Vandenkoornhuyse P, Baldauf S L, Leyval C, *et al.* Extensive fungal diversity in plant roots[J]. *Science*, 2002, **295** (5562), doi: 10.1126/science.295.5562.2051.
- [26] Paungfoo-Lonhienne C, Yeoh Y K, Kasinadhuni N R P, *et al.* Nitrogen fertilizer dose alters fungal communities in sugarcane soil and rhizosphere[J]. *Scientific Reports*, 2015, **5**, doi: 10.1038/srep08678.
- [27] 杨越. 氮添加对草地生态系统土壤微生物群落的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2019.
- Yang Y. Effects of nitrogen addition on soil microbial community in grassland ecosystem[D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2019.
- [28] Parker A J. The topographic relative moisture index: an approach to soil-moisture assessment in mountain terrain [J]. *Physical Geography*, 2013, **3** (2): 160-168.
- [29] McDonald D J, Cowling R M, Boucher C. Vegetation-environment relationships on a species-rich coastal mountain range in the fynbos biome (South Africa) [J]. *Vegetatio*, 1996, **123** (2): 165-182.
- [30] Cantón Y, Del Barrio G, Solé-Benet A, *et al.* Topographic controls on the spatial distribution of ground cover in the Tabernas badlands of SE Spain[J]. *CATENA*, 2004, **55** (3): 341-365.
- [31] 张昌顺, 谢高地, 包维楷, 等. 地形对澜沧江源区高寒草甸植物丰富度及其分布格局的影响[J]. *生态学杂志*, 2012, **31** (11): 2767-2774.
- Zhang C S, Xie G D, Bao W K, *et al.* Effects of topographic factors on the plant species richness and distribution pattern of alpine meadow in source region of Lancang River, Southwest China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, **31** (11): 2767-2774.
- [32] 何福红, 黄明斌, 党廷辉. 黄土高原沟壑区小流域土壤水分空间分布特征[J]. *水土保持通报*, 2002, **22** (4): 6-9.
- He F H, Huang M B, Dang Y H. Soil water distribution characteristics in Wangdonggou watershed in gully region of Loess Plateau[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2002, **22** (4): 6-9.
- [33] 宋轩, 李立东, 寇长林, 等. 黄水河小流域土壤养分分布及其与地形的关系[J]. *应用生态学报*, 2011, **22** (12): 3163-3168.
- Song X, Li L D, Kou C L, *et al.* Soil nutrient distribution and its relations with topography in Huangshui River drainage basin [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, **22** (12): 3163-3168.
- [34] Caporaso J G, Kuczynski J, Stombaugh J, *et al.* QIIME allows analysis of high-throughput community sequencing data [J]. *Nature Methods*, 2010, **7** (5): 335-336.
- [35] Wang C, Liu D W, Bai E. Decreasing soil microbial diversity is associated with decreasing microbial biomass under nitrogen addition[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, **120**: 126-133.
- [36] Bobbink R, Willems J H. Increasing dominance of *Brachypodium pinnatum* (L.) beauv. in chalk grasslands: a threat to a species-rich ecosystem[J]. *Biological Conservation*, 1987, **40** (4): 301-314.
- [37] 李成一, 梁德飞, 李希来, 等. 氮添加对不同坡度退化高寒草地植被恢复的影响[J]. *青海大学学报*, 2020, **38** (4): 1-6.
- Li C Y, Liang D F, Li X L, *et al.* Effect of nitrogen addition on vegetation restoration of different slope degraded alpine grassland [J]. *Journal of Qinghai University*, 2020, **38** (4): 1-6.



## CONTENTS

|                                                                                                                                                                                                       |                                                                         |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| Challenges Regarding the Co-emission of Emerging Pollutants to Eco-environmental Monitoring and Management .....                                                                                      | WANG Pei, HUANG Xin-yi, CAO Zhi-wei, <i>et al.</i> (4801)               |
| Environmental Process, Effects and Risks of Emerging Contaminants in the Estuary-Coastal Environment .....                                                                                            | WANG Xin-hong, YU Xiao-xuan, WANG Si-quan, <i>et al.</i> (4810)         |
| Research Progress of Analytical Methods with Molecular Spectroscopy for Determination of Trace Nutrients and Metals in Seawaters .....                                                                | YUAN Dong-xing, HUANG Yong-ming, WANG Ting (4822)                       |
| Research Progress on the Determination of Sulfide in Natural Waters: From Laboratory Analysis to In-Situ Monitoring .....                                                                             | LI Peng, LIN Kun-de, YUAN Dong-xing (4835)                              |
| Advances in On-site Analytical Methods for Inorganic Arsenic in Environmental Water .....                                                                                                             | BO Guang-yong, CHEN Zhao-ying, GONG Zhen-bin, <i>et al.</i> (4845)      |
| Advances and Prospect of Sampling Techniques and Analytical Methods for Trace Elements in the Ocean; Progress of Trace Element Platform Construction in Xiamen University .....                       | ..... HUANG Yong-ming, ZHOU Kuan-bo, CHEN Yao-jin, <i>et al.</i> (4858) |
| Biodegradation of Polyethylene Microplastic: A Review .....                                                                                                                                           | ..... LUO Yuan-rong, QIAN Yi-qian, QI Ya-nan (4869)                     |
| Mechanism and Environmental Effect on Nitrogen Addition to Microbial Process of Arsenic Immobilization in Flooding Paddy Soils .....                                                                  | WANG Feng, ZHANG Jing, ZHOU Shao-yu, <i>et al.</i> (4876)               |
| Toxicity Testing Organisms for Marine Ecotoxicological Research in China .....                                                                                                                        | SHI Tian-yi, HONG Hai-zheng, WANG Ming-hua, <i>et al.</i> (4888)        |
| Estimating Methane Fugitive Emissions from Oil and Natural Gas Systems in China .....                                                                                                                 | CHEN Chun-ci, LÜ Yong-long, HE Gui-zhen (4905)                          |
| Atmospheric NH <sub>3</sub> Emission Inventory and Its Tempo-spatial Changes in Xiamen-Zhangzhou-Quanzhou Region from 2015 to 2020 .....                                                              | LI Xiang, WU Shui-ping, JIANG Bing-qi, <i>et al.</i> (4914)             |
| Distribution of Microplastic and Antibiotic Resistance Gene Pollution in Jiulong River Estuary .....                                                                                                  | CHENG Hong, CHEN Rong (4924)                                            |
| Pollution Characteristics of Microplastics in Sediments of Xiamen Bay Beach .....                                                                                                                     | YAO Rui, LIU Hua-tai, LI Yong-yu, <i>et al.</i> (4931)                  |
| Spatial and Temporal Distribution and Influencing Factors of Dissolved Trace Metals in Jiulong River Estuary and Xiamen Bay .....                                                                     | QI Liu-qian, YUE Xin-li, ZHONG Hao-wen, <i>et al.</i> (4939)            |
| Spatiotemporal Characteristics of Dissolved Oxygen and Control Mechanism of Hypoxia (Low Oxygen) in the Watershed-Coastal System in Fujian Province .....                                             | ..... YANG Ai-lin, YANG Fang, LI Shao-bin, <i>et al.</i> (4950)         |
| Distribution, Migration, and Transformation Mechanism of Labile Phosphorus in Sediments of Xixi River Estuary, Xiamen .....                                                                           | PAN Feng, CAI Yu, GUO Zhan-rong, <i>et al.</i> (4961)                   |
| Adsorption of Mn <sup>2+</sup> by Modified Biochar Fixed Bed in Simulated Lakes and Reservoir Waters .....                                                                                            | ZHAO Jie, YE Zhi-long, WANG Jia-ni, <i>et al.</i> (4971)                |
| Rapid Detection of Trace Enrofloxacin and Ciprofloxacin in Drinking Water by SERS .....                                                                                                               | XU Jing, ZHENG Hong, LU Jiang-long, <i>et al.</i> (4982)                |
| Degradation of Triphenyl Phosphate in Water by UV-driven Advanced Oxidation Processes .....                                                                                                           | XU Zi-wen, YIN Hong-ling, XIONG Yuan-ming, <i>et al.</i> (4992)         |
| Characteristics and Potential Sources of Four Ozone Pollution Processes in Hainan Province in Autumn of 2019 .....                                                                                    | FU Chuan-bo, CHEN Hong, DAN Li, <i>et al.</i> (5000)                    |
| Characterization and Formation Mechanism of Water-soluble Inorganic Ions in PM <sub>2.5</sub> and PM <sub>10</sub> in Summer in the Urban Agglomeration of the Ili River Valley .....                 | ..... CHEN Qiao, GU Chao, XU Tao, <i>et al.</i> (5009)                  |
| Difference in PM <sub>2.5</sub> Pollution and Transport Characteristics Between Urban and Suburban Areas .....                                                                                        | QI Peng, ZHOU Ying, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (5018)               |
| Characteristics and Health Risk Assessment of BTEX in the Northern Suburbs of Nanjing .....                                                                                                           | FENG Yue-zheng, AN Jun-lin, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (5030)          |
| Ecological Risk Assessment of Microplastics Occurring in Surface Water of Terrestrial Water Systems across China .....                                                                                | SUN Xiao-nan, CHEN Hao, JIA Qi-long, <i>et al.</i> (5040)               |
| Scale Effects of Landscape Pattern on Water Quality in Dongjiang River Source Watershed .....                                                                                                         | CHEN You-liang, ZOU Wen-min, LIU Xing-gen, <i>et al.</i> (5053)         |
| Mercury Speciation, Distribution, and Potential Sources in Surface Waters of the Yangtze and Yellow River Source Basins of Tibetan Plateau During Wet Season .....                                    | ..... LIU Nan-tao, WU Fei, YUAN Wei, <i>et al.</i> (5064)               |
| Water Environmental Characteristics and Water Quality Assessment of Lakes in Tibetan Plateau .....                                                                                                    | LIU Zhi-qi, PAN Bao-zhu, HAN Xu, <i>et al.</i> (5073)                   |
| Karst Hydrogeochemical Characteristics and Controlling Factors of Carlin-type Gold Mining Area Based on Hydrochemistry and Sulfur Isotope .....                                                       | ..... ZHA Xue-fang, WU Pan, LI Xue-xian, <i>et al.</i> (5084)           |
| Characteristics of Eukaryotic Phytoplankton Community Structure and Its Relationship with Environmental Factors in Danjiangkou Reservoir .....                                                        | HE Yu-xiao, MAI Si-jie, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (5096)                |
| Adsorption of Phosphate and Heavy Metals by Lanthanum Modified Zeolite and Its Performance in Sediment Inactivation .....                                                                             | WANG Zhe, ZHU Jun, LI Wen, <i>et al.</i> (5106)                         |
| Metagenomic and Metatranscriptomic Analysis of Nitrogen Removal Functional Microbial Community of Petrochemical Wastewater Biological Treatment Systems .....                                         | ..... ZHANG Xu, ZHOU Jia-jia, ZHOU Min, <i>et al.</i> (5115)            |
| Bacterial Community Structure and Antibiotic Resistance Gene Changes in IFAS + Magnetic Coagulation Process Wastewater Treatment Plant in Cold Regions .....                                          | ..... DU Wen-yan, YAO Jun-qin, MA Hui-ying, <i>et al.</i> (5123)        |
| Nitric Oxide Emissions from Chinese Upland Cropping Systems and Mitigation Strategies: A Meta-analysis .....                                                                                          | ..... TIAN Zheng-yun, WU Xiong-wei, WU Yuan-yuan, <i>et al.</i> (5131)  |
| Impact of Nitrification Inhibitors on Vegetable Production Yield, Nitrogen Fertilizer Use Efficiency and Nitrous Oxide Emission Reduction in China: Meta Analysis .....                               | ..... LIU Fa-bo, MA Xiao, ZHANG Fen, <i>et al.</i> (5140)               |
| Effect of Different Fertilization Treatments on Methane and Nitrous Oxide Emissions from Rice-Vegetable Rotation in a Tropical Region, China .....                                                    | ..... SHAO Xiao-hui, TANG Shui-rong, MENG Lei, <i>et al.</i> (5149)     |
| Effects of Land-use Conversion on Soil Nitrification and NO & N <sub>2</sub> O Emissions in Tropical China Under Different Moisture Conditions .....                                                  | TANG Rui-jie, HU Yu-jie, ZHAO Cai-yue, <i>et al.</i> (5159)             |
| Characteristics of Heavy Metal Pollution in Farmland Soil of the Yangtze River Economic Belt Based on Bibliometric Analysis .....                                                                     | LIU Xiao-yan, FAN Ya-nan, LIU Peng, <i>et al.</i> (5169)                |
| Spatial and Temporal Distribution and Source Variation of Heavy Metals in Cultivated Land Soil of Xiangzhou District Based on EBK Interpolation Prediction and GDM Model .....                        | ..... GAO Hao-ran, ZHOU Yong, LIU Jia-kang, <i>et al.</i> (5180)        |
| Identification of Soil Heavy Metal Sources Around a Copper-silver Mining Area in Ningxia Based on GIS .....                                                                                           | ZHANG Kou-kou, HE Jing, ZHONG Yan-xia, <i>et al.</i> (5192)             |
| Effect of Aging on Stabilization of Cd <sup>2+</sup> Through Biochar Use in Alkaline Soil of Bayan Obo Mining Area .....                                                                              | WANG Zhe, CHENG Jun-li, BIAN Yuan, <i>et al.</i> (5205)                 |
| Preparation of Magnetic Iron Oxide/Mulberry Stem Biochar and Its Effects on Dissolved Organic Carbon and Arsenic Speciation in Arsenic-Contaminated Soils .....                                       | ..... LU Lin, YAN Li-ling, LIANG Mei-na, <i>et al.</i> (5214)           |
| Effects of Oyster Shell Powder and Lime on Availability and Forms of Phosphorus and Enzyme Activity in Acidic Paddy Soil .....                                                                        | ZHAO Li-fang, HUANG Peng-wu, YANG Cai-di, <i>et al.</i> (5224)          |
| Effects of Interaction of Zinc and Cadmium on Growth and Cadmium Accumulation of <i>Brassica campestris</i> L. ....                                                                                   | SHUAI Zu-ping, LIU Han-yi, CUI Hao, <i>et al.</i> (5234)                |
| Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Antibiotics in Vegetable Field in Kaizhou, Chongqing .....                                                                                | FANG Lin-fa, YE Ping-ping, FANG Biao, <i>et al.</i> (5244)              |
| Temporal and Spatial Variation Characteristics of Carbon Storage in the Source Region of the Yellow River Based on InVEST and GeoSoS-FLUS Models and Its Response to Different Future Scenarios ..... | ..... HOU Jian-kun, CHEN Jian-jun, ZHANG Kai-qi, <i>et al.</i> (5253)   |
| Carbon Sequestration Characteristics of Different Restored Vegetation Types in Loess Hilly Region .....                                                                                               | XU Xiao-ming, ZHANG Xiao-ping, HE Liang, <i>et al.</i> (5263)           |
| Response of Soil Multifunctionality to Reduced Microbial Diversity .....                                                                                                                              | CHEN Gui-xian, WU Chuan-fa, GE Ti-da, <i>et al.</i> (5274)              |
| Effect of Nitrogen Addition on Soil Fungal Diversity in a Degraded Alpine Meadow at Different Slopes .....                                                                                            | SU Xiao-xue, LI Xi-lai, LI Cheng-yi, <i>et al.</i> (5286)               |
| Comparative Energy Consumption Structure and Mode between China and Major Energy-Consuming Countries Under the Background of Carbon Emission Reduction .....                                          | ..... LI Hui, PANG Bo, ZHU Fa-hua, <i>et al.</i> (5294)                 |
| Spatialization and Spatio-temporal Dynamics of Energy Consumption Carbon Emissions in China .....                                                                                                     | HAO Rui-jun, WEI Wei, LIU Chun-fang, <i>et al.</i> (5305)               |
| Carbon Dioxide Mitigation Co-effect Analysis of Structural Adjustment Measures in the "2 + 26" Cities in the Jing-Jin-Ji Region and Its Surroundings .....                                            | ..... YANG Tian-qi, WANG Hong-chang, ZHANG Chen, <i>et al.</i> (5315)   |
| Policy Analysis in Plastic Pollution Governance and Recommendations in China .....                                                                                                                    | LI Huan, ZHU Long, SHEN Qian, <i>et al.</i> (5326)                      |