

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.06.009

宋成功,王克勤,宋娅丽,等.滇中高原云南松林土壤微生物群落结构及其多样性对氮沉降的响应[J].水土保持学报,2024,38(6):273-283.

SONG Chenggong, WANG Keqin, SONG Yali, et al. Response of microbial community structure and diversity to nitrogen deposition in soils of *Pinus yunnanensis* forest of the Central Yunnan Plateau[J].Journal of Soil and Water Conservation,2024,38(6):273-283.

滇中高原云南松林土壤微生物群落结构及其 多样性对氮沉降的响应

宋成功¹, 王克勤^{1,2}, 宋娅丽^{1,2}, 李晓东¹, 张继国¹, 李芸¹, 邓秋江³

(1.西南林业大学生态与环境学院,昆明 650224;2.国家林业和草原局云南玉溪森林生态系统国家定位观测
研究站,云南 玉溪 653100;3.禄劝彝族苗族自治县林业和草原局,云南 禄劝 651500)

摘要: [目的] 探究氮沉降下滇中高原云南松土壤化学性质及土壤微生物群落多样性和结构组成的变化特征,并分析土壤微生物与土壤化学性质的相关关系,为了解氮沉降下森林土壤生态系统养分循环变化趋势及观测土壤微生态变化提供科学依据。[方法] 选取滇中高原云南松林土壤为研究对象,以 $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 为 N 源,设置对照 CK [$\text{N } 0 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$]、低氮 LN [$\text{N } 10 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$]、中氮 MN [$\text{N } 20 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$]和高氮 HN [$\text{N } 25 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$]4 个不同梯度进行模拟 N 沉降试验,测定分析土壤细菌、真菌群落结构及多样性和土壤 pH、有机碳(TOC)、全氮(TN)、全磷(TP)、铵态氮($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)和硝态氮($\text{NO}_3^- - \text{N}$)的变化特征。[结果] (1)在不同季节下,与 CK 相比各氮处理下土壤 pH、TOC 含量均降低,TN 均升高, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 均在 MN、HN 处升高;(2)细菌和真菌 α 多样性雨季均高于旱季;与 CK 相较细菌 α 多样性在 2 个季节下 LN 处上升,而真菌 α 多样性则在旱季 LN 处上升;(3)在旱季和雨季细菌优势菌门均为变形菌门、酸杆菌门和放线菌门,真菌优势菌门为担子菌门、子囊菌门和被孢菌门;(4)在旱季和雨季,细菌和真菌优势菌属与 pH、TOC、TN、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 呈显著相关关系。[结论] 氮沉降可以为土壤微生物提供 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 等有效养分,但由于氮沉降导致土壤酸化使土壤 TOC 含量降低,影响土壤微生物群落结构。

关键词: 滇中高原; 云南松; 土壤微生物; 氮沉降

中图分类号:S718.54

文献标识码:A

文章编号:1009-2242-(2024)06-0273-11

Response of Microbial Community Structure and Diversity to Nitrogen Deposition in Soils of *Pinus yunnanensis* Forest of the Central Yunnan Plateau

SONG Chenggong¹, WANG Keqin^{1,2}, SONG Yali^{1,2}, LI Xiaodong¹,

ZHANG Jiguo¹, LI Yun¹, DENG Qiujiang³

(1. School of Ecology and Environment, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China;

2. National Positioning Observation and Research Station of Yuxi Forest Ecosystem, National

Forestry and Grassland Administration, Yuxi, Yunnan 653100, China; 3. Forestry and

Grassland Service in Luquan Yi and Miao Autonomous County, Luquan, Yunnan 651500, China)

Abstract: [Objective] To study the characteristics of changes in chemical properties and diversity and structural composition of soil microbial communities in *Pinus yunnanensis* soils on the Central Yunnan Plateau under nitrogen deposition, and to analyze the correlation between soil microorganisms and soil chemical properties, in order to provide a scientific basis for understanding the trend of changes in nutrient cycling in forest soil ecosystems under nitrogen deposition and observing soil microbiological changes.

收稿日期:2024-05-28

修回日期:2024-07-12

录用日期:2024-07-20

网络首发日期(www.cnki.net):2024-10-28

资助项目:云南省农业基础研究联合专项(202301BD070001-059);云南省教育厅科学研究基金项目(2022J0510,2023Y0717);国家自然科学基金地区项目(31960318);云南省自然生态监测网络项目云南玉溪森林生态站运行项目(2022-YN-13);云南玉溪森林生态系统国家长期科研基地项目(2020132550);云南省一流学科建设项目(云教发[2022]73号)

第一作者:宋成功(1999—),男,硕士,主要从事森林生态研究。E-mail:scg19990505@sina.com

通信作者:宋娅丽(1985—),女,博士,副教授,主要从事森林生态系统功能研究。E-mail:songyali19851205@sina.com

[Method] The soil of *P. yunnanensis* forests on the Central Yunnan Plateau was selected as the research object, $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ was used as the N source, and four different gradients were set up for simulated N deposition experiments, including control CK [N 0 g/(m² · a)], low nitrogen LN [N 10 g/(m² · a)], medium nitrogen MN [N 20 g/(m² · a)], and high nitrogen HN [N 25 g/(m² · a)], the structure and diversity of soil bacterial and fungal community were analyzed, and the characteristics of the changes of soil pH, TOC, TN, TP, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ and $\text{NO}_3^- - \text{N}$ were determined. **[Results]** (1) In both the dry and rainy seasons, soil pH and TOC content were reduced, and TN was increased under each N treatment when compared with CK, and both $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ and $\text{NO}_3^- - \text{N}$ were increased at MN and HN compared to CK; (2) Both bacterial and fungal α -diversity were higher in the rainy season than in the dry season; bacterial α -diversity increased at LN under both seasons compared to CK, whereas fungi α -diversity increased at LN in the dry season; (3) In both the dry and rainy seasons, the dominant bacterial phyla were Proteobacteria, Acidobacteria and Actinobacteria, and the dominant fungal phyla were Basidiomycota, Ascomycota and Mortierellomycota; (4) The dominant bacterial and fungal genera were significantly correlated with pH, TOC, TN and $\text{NO}_3^- - \text{N}$ during the dry and wet seasons. **[Conclusion]** Nitrogen deposition can provide soil microorganisms with effective nutrients such as $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ and $\text{NO}_3^- - \text{N}$, but soil acidification due to nitrogen deposition can reduce soil TOC content and affect the structure of soil microbial communities.

Keywords: Central Yunnan Plateau; *Pinus yunnanensis*; soil microorganisms; nitrogen deposition

Received: 2024-05-28

Revised: 2024-07-12

Accepted: 2024-07-20

Online(www.cnki.net): 2024-10-28

长期以来,由于人类活动(化石燃料的燃烧和使用、生物质的燃烧、农药化肥的不合理使用及土地使用类型的改变等)的影响导致全球范围内氮沉降量逐年增加^[1]。每年 1 500 万 t 的氮沉降量已使我国成为仅次于欧洲、北美之后的世界第三大氮沉降区^[2]。森林生态系统作为陆地覆盖面积最大的生态系统之一,容易直接受到氮沉降所带来的各种影响。持续增加的氮沉降使土壤产生酸化、硝化、土壤微生物活性降低、氮饱和及土壤富营养化等不良影响^[3]。土壤微生物作为土壤物质循环和养分转化过程的重要组成部分,其微小的变化将引起一系列生物化学循环的连环反应^[4],而土壤细菌和真菌作为土壤微生物群落中数量最多的群体,对土壤养分循环和土壤肥力变化具有重要作用。

目前,氮沉降对土壤细菌、真菌的群落多样性、结构和丰度的影响仍存在一定的差异。适量的氮沉降可以通过改善凋落物质量^[5]、增加土壤当中营养物质^[6]、改善微生物群落之间竞争关系^[7],进而增加土壤微生物活性,提高土壤微生物群落多样性,增加土壤微生物群落丰度。但过量的氮沉降导致土壤当中 H^+ 增加,导致土壤酸化^[8],提高土壤中抑制微生物活性的 Fe^{2+} 、 Al^{3+} 等重金属离子溶解度^[9],使土壤微生物活性降低,群落多样性降低。但也有研究^[10]发现,氮添加对土壤微生物群落多样性及土壤细菌和真菌生物量比例无显著影响。由此可见,氮沉降对土壤微

生物群落结构和组成的影响还受施氮浓度、土地类型、植被类型、气候条件等因素的影响,需要进一步对不同林分类型土壤微生物群落结构和组成展开研究。

高通量测序技术相较于传统的微生物培养技术具有高通量、高灵敏度、高准确性等优势,目前已被广泛应用于环境微生物多样性分析、食品安全检测、医学诊断等领域,为从物种水平深入了解土壤微生物群落结构组成和多样性提供技术支持。云南松(*Pinus yunnanensis*)是我国西南地区特有森林类型,在云南省的分布面积约 $50 \times 10^5 \text{ hm}^2$,占全省林地面积的 52%,是云南现存面积最大的森林类型。因其具有喜光、耐瘠薄、耐干旱、适应性强等特点已成为滇中高原森林群落中的优势种群,且因其木材用途广,在云南的林业生产和生态经济建设中占有重要的地位^[11]。本研究以滇中高原磨盘山云南松林为研究对象,利用高通量测序技术,分析氮沉降下云南松土壤微生物群落结构和多样性的变化特征及土壤养分对其的动态影响,旨在为了解氮沉降下森林土壤生态系统养分循环变化趋势及观测土壤微生态变化提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于滇中磨盘山玉溪森林生态系统国家定位观测研究站($101^\circ 16' 06'' - 101^\circ 16' 12'' \text{ E}$, $23^\circ 46' 18'' - 23^\circ 54' 34'' \text{ N}$),地处云贵高原、横断山脉、青藏高原结合部,平均海拔 2 215.8 m,属亚热带气候,年平均气温 15

℃,年平均降水量 1 050 mm,雨季旱季分明,雨季主要集中在 5—10 月(约 750 mm),旱季主要集中在 1—4,11—12 月(约 300 mm)。土壤以第三纪古红壤、玄武岩红壤和黄棕壤为主,土层厚度以中厚土层为主,部分地区为薄土层。植被具有明显垂直地带性特征,主要分布的森林类型为针叶林(华山松林、云南松林)、亚热带常绿阔叶林和高山矮林(高山栎林)等,森林覆盖率高达 86%。

1.2 试验方法

在云南松林中选取代表性样地,样地基本信息见表 1。于 2018 年 12 月,在样地内设置 3 个 20 m×20 m 标准样地进行群落调查,并在每个样地内随机设置间隔大于 10 m 的 3 m×3 m 小样方 4 个,共计 12 个。根据青藏高原东缘^[12]和华西雨屏区^[13]湿氮沉降

量[2.64~9.50 g/(m²·a)]及我国西南地区干氮沉降量[0.60~5.46 g/(m²·a)]^[14],并结合我国氮沉降年增加量 0.05 g/(m²·a)^[15],以 CO(NH₂)₂ 为 N 源,设置对照 CK [N 0 g/(m²·a)]、低氮 LN [N 10/g(m²·a)]、中氮 MN [N 20 g/(m²·a)]和高氮 HN [N 25 g/(m²·a)]4 个不同梯度进行模拟 N 沉降试验,每个梯度设置 3 个重复。

从 2019 年 1 月至 2022 年 9 月,每月月中旬对各样方进行不同水平 N 沉降处理,共计 36 次(受客观因素影响,2020 年 1—6 月、2021 年 6 月及 2022 年 1—2 月未施氮)。在各 N 浓度水平所需 CO(NH₂)₂ 溶解至 1 000 mL 去离子水中(相当于全年新增降水 1.0 mm),用喷雾器在 3 个氮水平样方中来回均匀喷洒,对照组同时段喷洒 1 000 mL 去离子水。

表 1 云南松林样地基本特征

Table 1 Basic characteristics of the *Pinus yunnanensis* forest sample plots

样地编号	海拔/m	坡向/(°)	林龄/a	郁闭度	密度/(株·hm ⁻²)	平均胸径/cm	平均树高/m
1	2 143	NW52	26	0.60	1 428	22.70	12.20
2	2 148	NW60	28	0.65	1 389	19.50	10.90
3	2 246	NW58	26	0.68	1 495	25.30	12.40

模拟 N 沉降后,分别于 2022 年 4 月(旱季)、2022 年 8 月(雨季)对每个样方进行采样,对每个施 N 梯度的样方采用 5 点取样法采集 0—20 cm 土层土壤样品,充分混匀后经 2 mm 筛去除大块的杂质后,分成 3 份:一份鲜土保存(4 ℃),另一份自然风干后用于土壤化学性质测定,剩余部分置于无菌密封袋中低温(-80 ℃)保存用于 DNA 高通量测序。

土壤化学性质的测定:土壤 pH 采用 pH 计测定($m_{\pm} : V_{\text{水}} = 1 : 2.5$),土壤有机碳(TOC)采用重铬酸钾外加热法测定,土壤全氮(TN)采用凯氏定氮法测定,土壤全磷(TP)采用钼锑抗比色法测定,土壤铵态氮(NH₄⁺-N),硝态氮(NO₃⁻-N)采用氯化钾浸提比色法^[16]测定。

土壤细菌、真菌的测定:采用 OMEGA 试剂盒提取 DNA,并采用琼脂糖电泳检测法,对基因组 DNA 的完整性和浓度进行检验后,细菌以 16Sr RNA 基因 V3-V4 区 341F 和 805R 为引物,真菌以 18S rDNA 基因的 ITS1-ITS2 区 ITS1F 和 ITS2 为引物进行 PCR 扩增,对扩增产物进行回收后通过荧光剂 Qubit3.0 进行定量分析,采用 Illumina MiSeq 测序平台对 PCR 扩增产物进行测序分析。测序工作委托上海生工生物工程有限公司完成。

1.3 数据处理

通过 Origin 2021 软件绘制 OTUs 分析韦恩图、群落组成图、功能预测图,采用 SPSS 2022 软件中单因素方差分析(One-way ANOVA)和最小显著差数法(LSD)分

析土壤养分变化特征及微生物多样性变化特征。

2 结果与分析

2.1 不同季节土壤化学性质变化特征

由表 2 可知,TOC 和 TP 在各处理下均呈显著差异,不同季节下 TOC、TP 在相同施氮处理下均呈显著差异($p < 0.05$)。旱季时,pH、TOC、TP 均随施 N 梯度上升而下降,且相对于 CK 均为显著下降($p < 0.05$),下降最大幅度(均在 HN)分别为 7.36%,37.51%和 41.43%;而 TN 相较 CK 在各施氮处理下均增加,增加最大幅度为 20.41%,NH₄⁺-N 在 NO₃⁻-N 均在 MN、HN 处增加,增加最大幅度均在 HN 处分别为 13.74%和 20.00%。雨季时,各 N 处理下相较 CK,pH 和 TOC 均随施 N 梯度上升而下降,且相对于 CK 均为显著下降($p < 0.05$),下降最大幅度分别为 4.45%和 34.97%,TN 相较 CK 在各施氮处理下均增加,增加最大幅度在 LN(45.65%),TP 和 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 在氮处理下相较 CK 均无显著变化,但与 CK 相较 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 在各氮处理下均增加。整体表现为养分含量雨季高于旱季,pH 雨季降幅低于旱季,施氮处理下土壤酸度增加,TOC 含量降低,氮含量先增加后降低,磷含量无显著变化。

2.2 不同季节土壤微生物群落差异

由图 1 可知,细菌在旱季时 OTUs 总条数为 2 198 条,雨季为 2 637 条。旱季各处理下 OTUs 条数分别为 1 940(CK),1 975(LN),1 937(MN),1 998(HN);雨季时各氮处理下 OTUs 条数相较 CK 均降低。

表 2 土壤化学性质在旱季、雨季变化特征

Table 2 Characteristics of changes in soil chemical properties during the dry and rainy seasons

季节	处理	pH	有机碳/ (g · kg ⁻¹)	全氮/ (g · kg ⁻¹)	全磷/ (g · kg ⁻¹)	铵态氮/ (mg · kg ⁻¹)	硝态氮/ (mg · kg ⁻¹)
旱季	对照	4.62±0.02Aa	19.01±0.18Aa	0.49±0.08Aa	2.10±0.17Aa	7.28±0.90Aa	0.50±0.12Aa
	低氮	4.44±0.04Ab	16.75±0.17Ab	0.51±0.04Aa	1.75±0.06Aab	6.96±1.46Aa	0.42±0.07Aa
	中氮	4.35±0.03Abc	15.44±0.18Ac	0.59±0.09Aa	1.61±0.03Abc	7.41±1.61Aa	0.55±0.05Aa
	高氮	4.28±0.04Ac	11.88±0.08Ad	0.58±0.09Aa	1.23±0.17Ac	8.28±2.01Aa	0.60±0.07Aa
雨季	对照	4.50±0.01Ba	50.63±0.12Ba	0.46±0.03Aa	0.50±0.05Ba	9.35±3.01Aa	0.66±0.12Aa
	低氮	4.38±0.02Ab	43.72±0.35Bb	0.67±0.14Aa	0.40±0.06Ba	13.32±6.92Aa	0.99±0.23Aa
	中氮	4.32±0.03Ab	37.39±0.43Bc	0.58±0.07Aa	0.41±0.07Ba	19.00±10.74Aa	1.39±0.51Aa
	高氮	4.30±0.04Ab	32.75±0.36Bd	0.53±0.05Aa	0.41±0.04Ba	10.31±2.98Aa	1.85±0.63Aa

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同大写字母表示不同季节相同处理间差异显著($p < 0.05$);不同小写字母表示相同季节不同处理间差异显著($p < 0.05$)。下同。

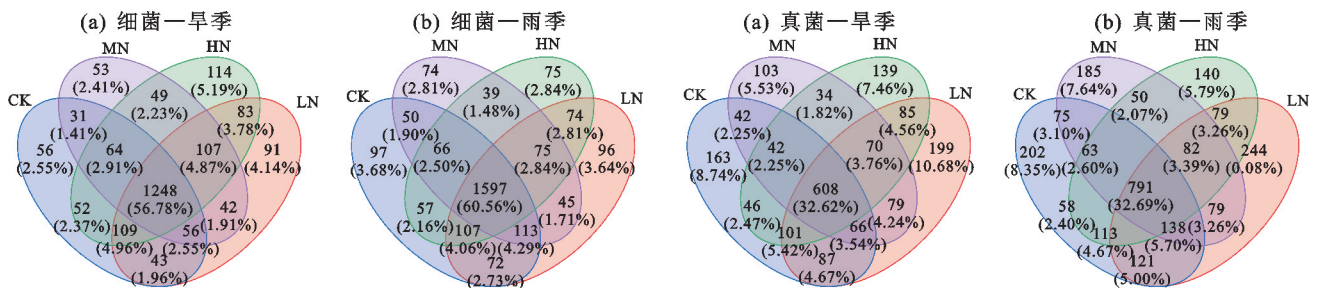


图 1 不同季节土壤细菌、真菌 OTUs 韦恩图

Fig.1 Venn plot of soil bacteria and fungi OTUs in different seasons

真菌旱季时 OTUs 总条数为 2 198 条,雨季为 2 420 条。旱季时,相较 CK, LN 增加 2.53%, MN、HN 分别减少 4.22%, 1.69%; 雨季时,相较 CK, LN 增加 2.15%, MN、HN 分别减少 0.87%, 3.18%。细菌群落不同季节时相同处理下, Shannon 指数和 Chao1 指数均呈现显著性差异($p < 0.05$)(表 3), 即雨季均高于旱季, 分别高 5.06%~7.66%(Shannon 指数)和 15.66%~33.85%(Chao1 指数)。在旱季和雨季下, 相较 CK, LN 对 2 种指数均为促进作用, 但各处理对 2 种指数均无显著影响($p > 0.05$)。真菌群落不同季节, 相同处理下, Shannon

指数在 HN 处理下具有显著差异($p < 0.05$), 表现为雨季高于旱季; Chao1 指数在 LN 处理下无显著差异($p > 0.05$)。在 CK、MN、HN 处均具有显著差异, 且均为雨季高于旱季。在相同季节不同处理下, 旱季时相较 CK, Shannon 在 LN 和 MN 处具有显著促进作用($p < 0.05$), 分别增加 79.69% 和 29.26%, Chao1 指数在不同处理下无显著差异($p > 0.05$); 在雨季时相较 CK, 不同处理对 2 种指数均无显著作用。说明适量的氮沉降促进土壤微生物多样性, 而过量的氮沉降抑制土壤微生物群落多样性。

表 3 土壤微生物群落 α 多样性在旱季、雨季变化特征

Table 3 Characteristics of changes in soil microbial community α-diversity during the dry and rainy seasons

季节	处理	细菌		真菌	
		Shannon 指数	Chao1 指数	Shannon 指数	Chao1 指数
旱季	对照	5.22±0.08Aa	1 505.40±35.63Aa	2.11±0.19Ab	1 111.10±66.18Aab
	低氮	5.39±0.07Aa	1 636.22±82.75Aa	3.79±0.16Aa	1 253.65±50.17Aa
	中氮	5.23±0.01Aa	1 542.21±7.06Aa	3.22±0.19Aa	1 031.4±47.29Ab
	高氮	5.34±0.05Aa	1 640.13±1.25Aa	1.96±0.20Ab	1 148.01±21.17Aab
雨季	对照	5.62±0.04Bab	2 014.97±29.04Bab	3.77±0.19Aa	1 471.87±77.50Ba
	低氮	5.68±0.04Ba	2 092.27±87.38Ba	4.08±0.02Aa	1 433.93±111.46Aa
	中氮	5.51±0.04Bb	1 867.98±53.61Bb	3.68±0.39Aa	1 345.17±75.55Ba
	高氮	5.61±0.06Bab	1 897.03±58.29Bab	3.28±0.16Ba	1 373.51±43.64Ba

2.3 不同季节土壤微生物群落结构变化特征

2.3.1 土壤微生物门水平群落结构变化特征 由图 2 可知,旱季和雨季,共检测出已分类细菌菌门 20 个,其中变形菌门(*Proteobacteria*)、酸杆菌门(*Acidobacteria*)和放线菌门(*Actinobacteria*)为优势菌门(相对丰度均>3%)。其中变形菌门在旱季 CK 处相对丰度最高为 46.42%,最低在雨季 LN 处,为 33.21%,且旱季相对丰度均值低于雨季;相比酸杆菌门相对丰度最高则出现在雨季 CK 处,为 35.93%,最低在旱季 HN 处,为 25.33%,且旱季相对丰度均值高于雨季;放线菌门相对丰度明显低于前 2 个菌门,相对丰度仅为 5.59%~6.81%。相较 CK,各 N 处理下,仅有酸杆菌门在雨季 MN 处和放线菌门在 2 个季节的 LN 处上升外,其余均下降,细菌菌门整体表现出优势菌门与稀有物种并存的规律,且核心菌门具有较高的丰度。

由图 3 可知,不同季节时共检测出 15 个真菌门,其中相对丰度最高的前 3 个菌门分别为担子菌门(*Basidiomycota*)、子囊菌门(*Ascomycota*)、被孢菌门(*Mortierellomycota*)相对丰度高达 96.88%以上,其中担子菌门旱季相对丰度均值高于雨季,子囊菌门和被孢菌门相对丰度均值旱季均低于雨季。旱季时各 N 处理下,相较 CK 担子菌门相对丰度均下降,最低为 67.88%(LN),而子囊菌门和被孢菌门相较 CK 则均上升,相对丰度最高均出现在 LN 处理下,分别为 19.91%和 26.76%;雨季时各 N 处理下,相较 CK 担子菌门在 MN 和 HN 处上升(8.03%~22.81%),而子囊菌门和被孢菌门则在 MN 和 HN 处下降(17.08%~49.37%)。

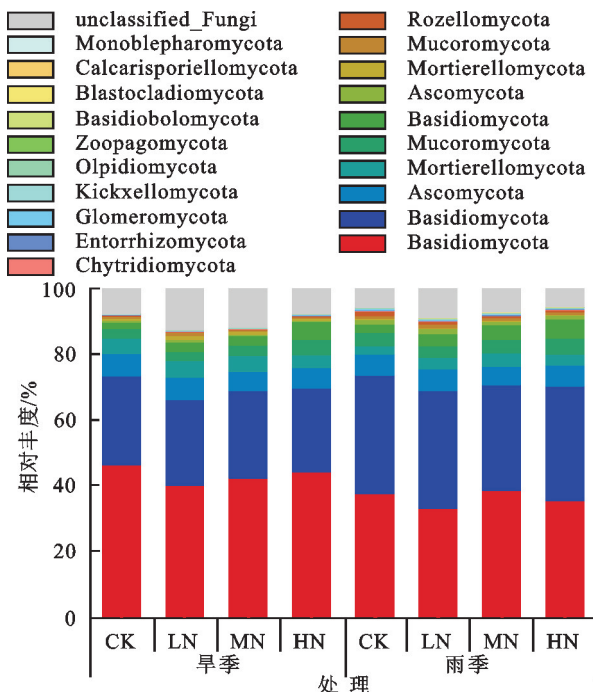


图 2 不同季节土壤细菌门水平相对丰度

Fig.2 Relative abundances of bacterial phyla in different seasons

2.3.2 土壤微生物属水平群落结构变化特征 由图 4a 可知,旱季检测出细菌已分类菌属 151 个(在此展示为相对丰度>0.2%的前 13 个菌属,其余归为 Other),相对丰度占细菌总群落 50.36%~55.28%,其中酸杆菌门亚群 3 个(*Gp1*、*Gp2*、*Gp3*)、大豆根瘤菌属(*Bradyrhizobium*)、伯克氏菌属(*Burkholderia*)为优势菌属(相对丰度>3%),优势菌属在各 N 处理下,相较 CK 除伯克氏菌属在 LN、MN 处上升外,其余均下降。

雨季时,检测出细菌已分类菌属 161 个(在此展示为相对丰度>0.2%的前 15 个菌属,其余归为 Other)(图 4b),相对丰度占细菌总群落 45.78%~51.07%,其中优势种群同样为 *Gp1*、*Gp2*、*Gp3*、大豆根瘤菌、伯克氏菌属,其中 *Gp1* 和 *Gp2* 相对丰度平均值均低于旱季,而 *Gp3*、大豆根瘤菌、伯克氏菌属则均高于旱季。各 N 处理下,相较 CK, *Gp1*、*Gp3* 相对丰度均下降,最大下降幅度均在 LN 处,分别为 17.05%和 32.01%。

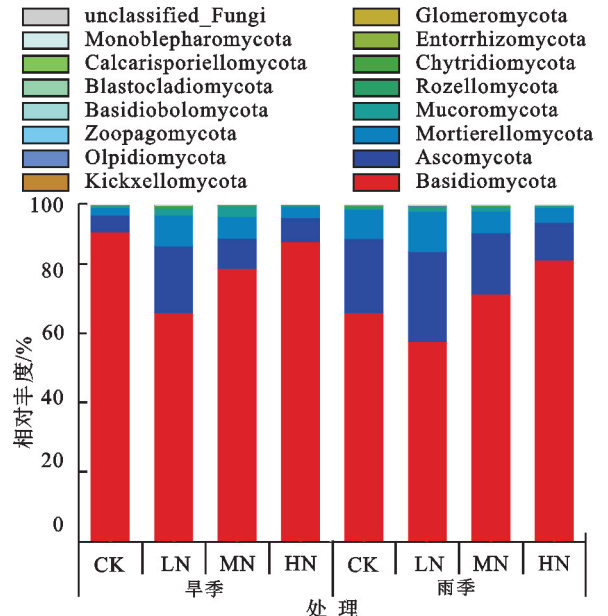


图 3 不同季节土壤真菌门水平相对丰度

Fig.3 Relative abundances of fungal phyla in different seasons

由图 5a 可知,旱季检测出真菌菌属 430 个,在此展示为相对丰度>0.2%的前 19 个,其余归为 Other。各水平处理下,CK 处优势菌属仅有红菇属(*Russula*)、多汁乳菇属(*Lactifluus*)、蜡壳耳属(*Sebacina*);LN 处优势菌属为红菇属、蜡壳耳属、被孢霉属(*Mortierella*)、古根菌属(*Archaeorhizomyces*)和丝盖伞属(*Inocybe*)。其中红菇属相较 CK 大幅下降,由 57.07%下降至 21.68%,蜡壳耳属则由 16.03%上升至 22.04%;MN 处为红菇属(14.63%)、多汁乳菇属(39.40%)、蜡壳耳属(9.08%)、被孢霉属(6.50%)和鹅膏菌属(*Amanita*)(8.96%);HN 处仅有红菇属和被孢霉属,其中红菇属相较 CK,相对丰度大幅上升,由 57.07%增加至 80.77%。

由图 5b 可知,雨季检测出已分类菌属 505 个,此处仅展示相对丰度 >0.2% 的前 20 个菌属,其余归为 Other。其中红菇属、多汁乳菇属、蜡壳耳属、被孢霉属和古根菌属在各水平处理下均为优势菌属,且相较 CK 仅

有红菇属在 LN 处下降,由 30.71% 下降至 16.53%,而多汁乳菇属、蜡壳耳属、被孢霉属和古根菌属相对丰度均在 LN 处上升,上升最大幅度为古根菌属,由 7.14% 增加至 13.31%。

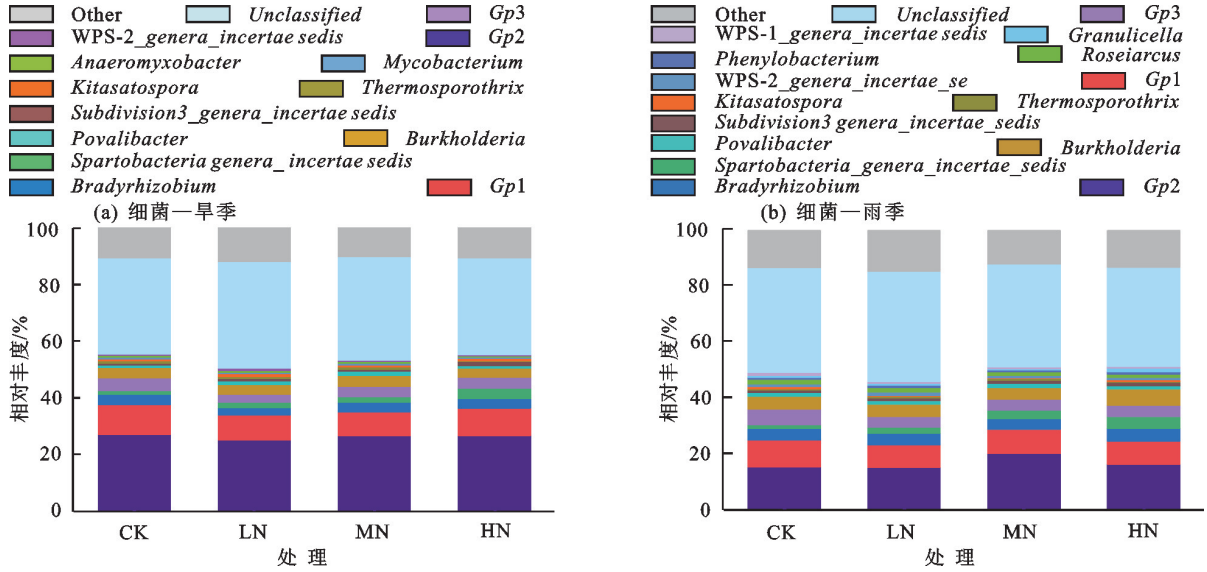


图 4 不同季节土壤细菌属水平相对丰度

Fig.4 Relative abundances of soil bacterial genera in different seasons

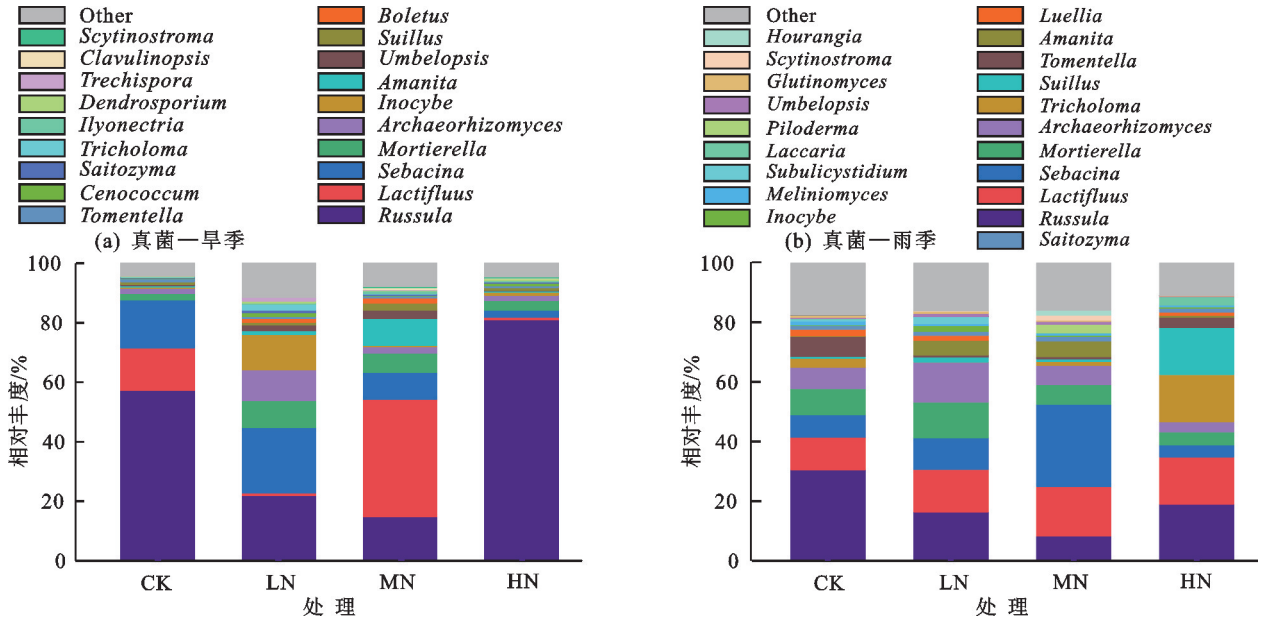


图 5 不同季节土壤真菌属水平相对丰度

Fig.5 Relative abundances of soil fungal genera in different seasons

2.3.3 土壤微生物功能 经过 KEGG 数据库对比和注释,共获得 6 种细菌一级功能,其中代谢功能占 50% 以上。共检测到 41 种二级功能,其中相对丰度最多的前 10 种功能见图 6a,相对丰度均 >3%,在旱季和雨季,相较 CK 各细菌功能均无显著性变化。通过 FUNGuild 方法预测土壤真菌功能,根据营养型可分为 7 类,在旱季和雨季共生型均为相对丰度最高的营养型。在旱季共生型在施氮后呈先降低后升高的趋势,即相较于 CK 在 LN 和 MN 处降低,在 HN 处

升高,而在雨季则表现为在 MN 处与 CK 相较无显著变化,在 LN 和 HN 处均降低。

2.4 不同季节土壤微生物群落结构及土壤化学性质的相关关系

由图 7 可知,土壤微生物优势菌属及土壤环境因子进行 Mantel 检验分析后,土壤微生物优势菌属与 TOC、pH、TN、NO₃⁻-N 呈显著相关 ($p < 0.05$),旱季时仅有 Gp3 与 TOC 呈显著正相关。雨季时则有 Gp3、Gp2、古根菌属与 TOC 呈显著正相关,而伯克氏菌属与 TOC 呈

显著负相关($p < 0.05$); *Gp1*、*Gp3*、红菇属与 pH 呈显著正相关,棉革菌属、鹅膏菌属则与 pH 呈显著负相关;仅有 *Gp2* 与 TN 呈显著负相关($p < 0.05$);大豆根瘤菌属、

红菇属、多汁乳菇属、被孢霉属与 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 呈显著相关($p < 0.05$),其中仅有大豆根瘤菌属呈正相关,其余均为负相关。

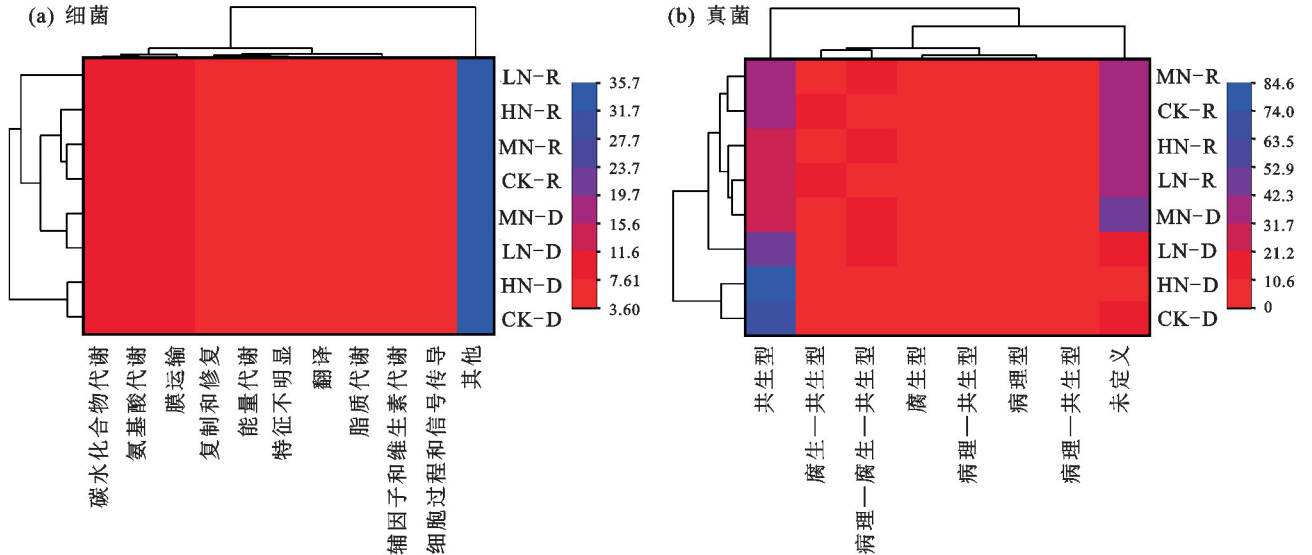


图 6 土壤微生物功能

Fig.6 Soil microbial functions

3 讨论

氮沉降是改变土壤环境因子含量的重要因素。本研究发现,在旱季和雨季氮沉降均降低土壤 pH 和 TOC 含量。土壤 pH 降低可能是由于氮沉降使土壤硝化作用增强释放 H^+ 导致土壤酸化^[17],与张雪等^[18]对马尾松(*Pinus massoniana* Lamb.)施氮处理研究结果一致。本文还发现,雨季土壤 pH 下降幅度(4.45%)低于旱季(7.36%),可能是由于增水可缓解干旱年份氮添加的土壤酸化趋势,尿素作为氮源,水解消耗 H^+ 减缓土壤酸化。而土壤 TOC 含量的降低可能是由于土壤酸化使微生物活性降低,微生物残体吸附有机矿物质能力下降,进而使微生物有机质分解能力降低,且植物生长需求较大,最终导致土壤 TOC 含量降低^[19]。本研究中,施氮后不同季节下土壤 TN 含量均上升,可能是由于外源 N 的添加,为植物生长提供充足的养分,在植物生长和光合作用作用下,植物凋落物的量增多,返还给土壤的养分增加^[20];但在 HN 处出现下降趋势,可能是由于长时间高浓度氮添加,导致土壤氮素淋溶,增加氮素的损失。相较 CK,各 N 处理下,土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 均升高,但在旱季时 LN 低于 CK 可能是由于 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 均是植物吸收利用的有效形式^[21],旱季时降雨减少、气温降低,土壤有机质分解速率下降,土壤肥力降低^[22],适量(LN)的 N 添加增加土壤氮素的有效性,促进植物吸收利用,使 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量降低;同时,外源氮添加刺激微生物活动

及数量增长,氮矿化作用增强释放 NH_4^+ 和 NO_3^- ,使 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量增加^[23]。

适量的氮沉降可促进土壤微生物 α 多样性,过量的氮沉降则抑制土壤微生物 α 多样性。土壤微生物 α 多样性是指示土壤微生物群落多样性的重要指标,可以较为直观地反映土壤微生物群落在氮沉降处理下的群落变化,其中 Shannon 指数和 Chao1 指数表示土壤微生物群落的多样性和丰度^[24]。本研究中, LN 促进细菌和真菌在不同季节的 Shannon 指数和 Chao1 指数,而在 HN 下则表现为抑制,是由于适量的氮沉降为土壤微生物的生长和繁殖提供营养和能量^[25],而过量的氮沉降改变土壤中氮的有效性,导致微生物多样性的降低,但由于土壤当中氮含量增加,硝化作用增强导致土壤酸化使土壤微生物活性降低^[26]仍为主要作用,且本研究中氮源为尿素,作为有机氮肥在被植物吸收转化当中更容易残留到土壤当中,加剧土壤的酸化,导致微生物多样性降低。

土壤环境的变化引起土壤微生物群落结构发生改变。本研究发现,在旱季和雨季细菌优势菌门均为变形菌门、酸杆菌门和放线菌门,是由于这 3 种菌门生态幅相对较宽,对环境有很好的适应能力^[27],其他研究^[28]中的土壤细菌优势菌门也为这 3 种菌门。变形菌门属于富营养型细菌,一般在有效碳较多的土壤中具有较高丰度^[29],而在本研究中变形菌门在各氮处理下相比 CK 均呈下降趋势,是由于本试验中土壤 TOC 含量随施氮浓度增加而下降,而同属于富营养

型菌门的放线菌门在雨季和旱季中均在 LN 处理下相对丰度上升,是由于适量的施氮增加土壤当中可供放线菌门利用的养分。而本研究中真菌在旱季和雨

季优势菌门均为担子菌门、子囊菌门和被孢菌门,与谢欢等^[30]对福建亚热带地区杉木(*Cunninghamia lanceolata*)的施氮研究中的土壤真菌优势菌门一致。

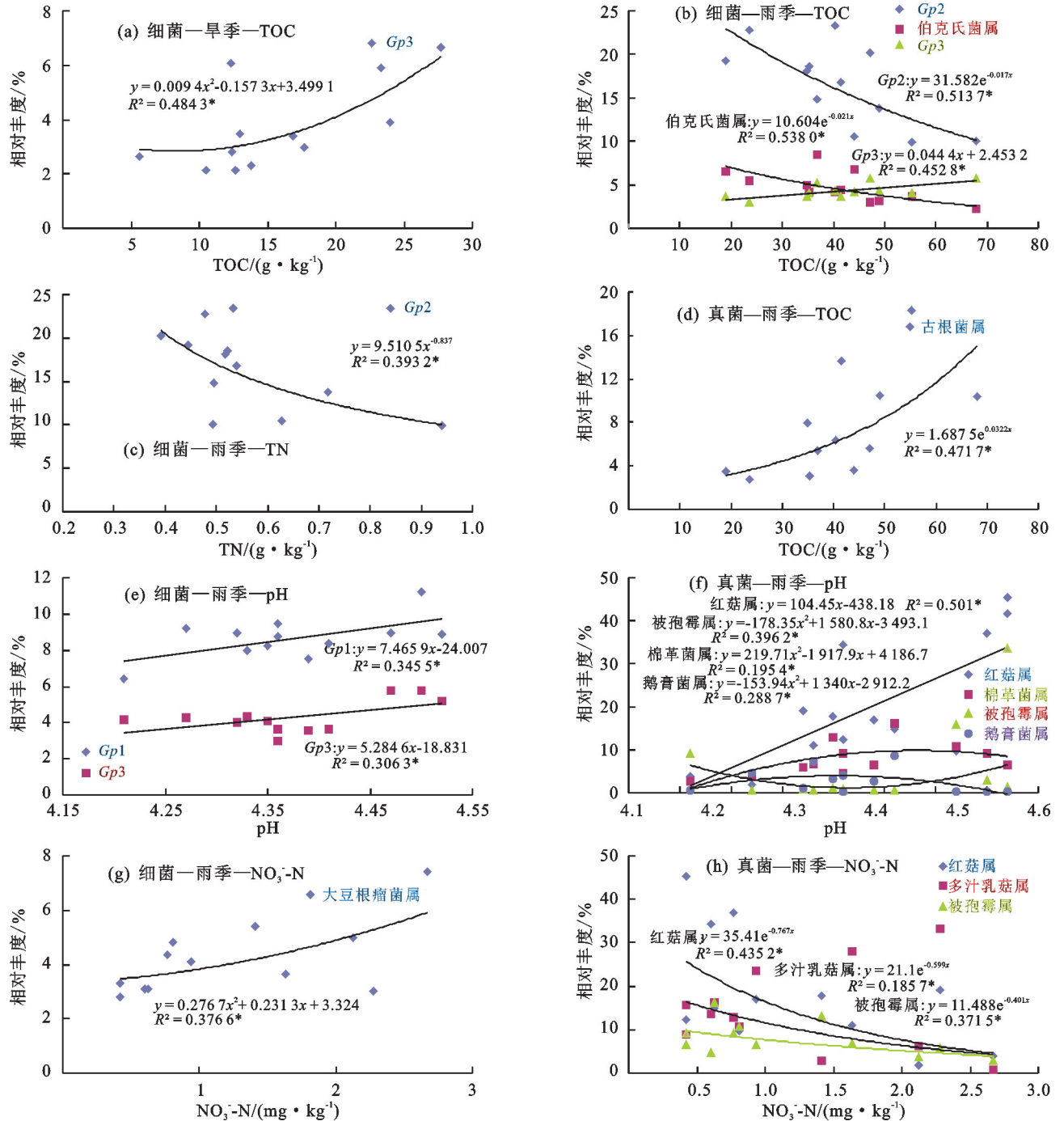


图 7 不同季节土壤微生物优势菌属与土壤化学性质相关性

Fig.7 Correlations between dominant soil microbial genera and soil chemical properties in different seasons

在各氮沉降处理下,旱季时担子菌门相对丰度随施 N 梯度上升而增加,而子囊菌门和被孢菌门则在 LN 处达到最高后下降,是由于担子菌门偏好木质素和纤维素等难降解的有机物^[31],而氮沉降在 MN、HN 处抑制云南松木质素和纤维素的分解^[32],为担子菌门生存提供养分;子囊菌门和被孢霉菌门在 LN 处上升,是由于适量的氮沉降提供它们生长的有效养

分^[33]。且真菌优势菌门在土壤环境中不仅参与各类腐殖质的形成和分解,还具有氨化和硝化作用,特别是对酸性环境下有机质的转化起着重要作用。本研究中土壤细菌功能虽在施氮处理下与 CK 相较无明显变化,但共生型真菌作为真菌功能丰度最高的营养型,在施氮处理下具有明显的变化,因为共生型真菌与宿主之间存在频繁的代谢互动,可以提高宿主植物

对氮磷养分的吸收。

本研究发现,旱季和雨季的细菌和真菌优势菌属与 pH、TOC、TN、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 呈显著相关。刘晶晶等^[34]研究发现,土壤微生物群落丰度与 pH、TOC、TN、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 等土壤化学性质具有显著相关性。在氮沉降下,土壤细菌优势菌属相对丰度下降,是由于土壤 pH 和 TOC 含量下降,土壤酸化和养分含量降低,使土壤细菌活性降低,导致土壤优势菌属相对丰度下降,与邓玉峰等^[35]在江西省红壤研究所的模拟 N 沉降试验结果一致;而真菌优势菌属受土壤 pH 下降的影响则较小,甚至表现为增长的结果,是因为真菌适应 pH 范围较宽,在微酸性环境下也能很好地生活,与邓娇娇等^[36]研究结果一致。氮沉降下因土壤化学性质的改变导致土壤优势菌属发生改变,但是土壤微生物的生长发育是一个极其复杂的过程,除氮沉降的影响外,还受到气候类型、太阳辐射强度、海拔高度等多种因素影响,因此,在氮沉降的基础上增加土壤环境因素的影响,可以更全面了解土壤微生物与氮沉降之间的响应机制。

4 结论

雨季降水缓解干旱时氮沉降导致的土壤酸化趋势,氮沉降增加土壤 TN、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量,为植被生长提供充足的养分,由于土壤酸化导致微生物活性降低,使土壤 TOC 含量降低。真菌群落结构和多样性相较于细菌更容易受到 N 沉降的影响,且细菌相较真菌更易受土壤酸化的影响,N 沉降能够通过改变土壤理化性质影响土壤微生物的群落组成和多样性。

参考文献:

- [1] ZUCCARINI P, ASENSIO D, SARDANS J, et al. Effects of nitrogen deposition on soil enzymatic activity and soil microbial community in a Mediterranean holm oak forest[J]. *Geoderma*, 2023, 430: e116354.
- [2] 黄幸然,郭萍萍,吴旺旺,等.模拟氮沉降增加对不同树种土壤微生物群落结构的影响[J]. *生态学杂志*, 2016, 35(6): 1420-1426.
- HUANG X R, GUO P P, WU W W, et al. Influence of simulated nitrogen deposition enhancement on soil microbial community of different tree species[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, 35(6): 1420-1426.
- [3] 刘春华,吴东梅,刘雨晖,等.氮沉降对米槠天然林土壤有机碳及微生物群落结构的影响[J]. *林业科学研究*, 2021, 34(2): 42-49.
- LIU C H, WU D M, LIU Y H, et al. Effects of nitrogen deposition on soil organic carbon and soil microbial communities in a natural *Castanopsis carlesii* forest [J]. *Forest Research*, 2021, 34(2): 42-49.
- [4] LI Y B, BEZEMER T M, YANG J J, et al. Changes in litter quality induced by N deposition alter soil microbial communities[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, 130: 33-42.
- [5] 隋心,张荣涛,杨立宾,等.模拟氮沉降对三江平原小叶章湿地土壤细菌多样性的影响[J]. *草业科学*, 2016, 33(4): 589-598.
- SUI X, ZHANG R T, YANG L B, et al. Effect of simulation nitrogen depositions on bacterial diversity of *Deyeuxia angustifolia* in wetland of Sanjiang Plain[J]. *Pratacultural Science*, 2016, 33(4): 589-598.
- [6] HU Z K, DELGADO-BAQUERIZO M, FANIN N, et al. Nutrient-induced acidification modulates soil biodiversity-function relationships [J]. *Nature Communications*, 2024, 15(1): e2858.
- [7] YANG A, SONG B, ZHANG W X, et al. Chronic enhanced nitrogen deposition and elevated precipitation jointly benefit soil microbial community in a temperate forest[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2024, 193: e109397.
- [8] SHI L L, ZHANG H Z, LIU T, et al. An increase in precipitation exacerbates negative effects of nitrogen deposition on soil cations and soil microbial communities in a temperate forest[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 235: 293-301.
- [9] 郝亚群,谢麟,陈岳民,等.中亚热带地区氮沉降对杉木幼林土壤细菌群落多样性及组成的影响[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(1): 53-58.
- HAO Y Q, XIE L, CHEN Y M, et al. Effects of nitrogen deposition on diversity and composition of soil bacterial community in a subtropical *Cunninghamia lanceolata* plantation[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(1): 53-58.
- [10] 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.
- [11] 张乃木,王克勤,宋娅丽,等.施 N 对云南松凋落叶和枝早期分解过程中养分动态变化的影响[J]. *中南林业科技大学学报*, 2023, 43(3): 135-144.
- ZHANG N M, WANG K Q, SONG Y L, et al. Effects of N application on nutrient dynamics in *Pinus yunnanensis* forest during the early decomposition of

- leaf and twig litter[J]. Journal of Central South University of Forestry and Technology, 2023, 43(3): 135-144.
- [12] 张英, 张常洪, 汪其同, 等. 氮沉降下西南山地针叶林根际和非根际土壤微生物养分限制特征差异[J]. 植物生态学报, 2022, 46(4): 473-483.
ZHANG Y, ZHANG C H, WANG Q T, et al. Difference of microbial nutrient limiting characteristics in rhizosphere and bulk soil of coniferous forests under nitrogen deposition in southwest mountain, China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2022, 46(4): 473-483.
- [13] 胡峻嶒, 陈蕙心, 周世兴, 等. 模拟氮沉降对华西雨屏区天然常绿阔叶林凋落叶分解过程中 K、Ca、Mg 元素释放的影响[J]. 林业科学研究, 2020, 33(3): 124-131.
HU J X, CHEN H X, ZHOU S X, et al. Effects of simulated nitrogen deposition on the releases of potassium, calcium, and magnesium during litter decomposition in a natural evergreen broadleaved forest in the rainy area of Western China[J]. Forest Research, 2020, 33(3): 124-131.
- [14] 周慧娴, 沈傲, 崔寅平, 等. 区域氮干沉降分布特征的数值模拟[J]. 环境科学学报, 2022, 42(10): 129-137.
ZHOU H X, SHEN A, CUI Y P, et al. Numerical simulation of distribution characteristics of regional nitrogen dry deposition[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2022, 42(10): 129-137.
- [15] 肖春艳, 胡情情, 陈晓舒, 等. 基于文献计量的大气氮沉降研究进展[J]. 生态学报, 2023, 43(3): 1294-1307.
XIAO C Y, HU Q Q, CHEN X S, et al. Research progress of atmospheric nitrogen deposition based on bibliometrics[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(3): 1294-1307.
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
BAO S D. Soil and Agricultural Chemistry Analysis [M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [17] 高浩诚, 牧仁, 焦婷, 等. 施氮对高寒垂穗披碱草草地根际、非根际土壤肥力的影响[J]. 水土保持学报, 2023, 37(6): 276-282.
GAO H C, MU R, JIAO T, et al. Effects of nitrogen application on rhizosphere and non-rhizosphere soil fertility of alpine *Elymus nutans* grassland[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(6): 276-282.
- [18] 张雪, 梅莉, 宋利豪, 等. 模拟氮沉降对马尾松土壤微生物群落结构及温室气体释放的影响[J]. 生态学报, 2019, 39(6): 1917-1925.
ZHANG X, MEI L, SONG L H, et al. Effects of simulated nitrogen deposition on microbial community and greenhouse gases emission of *Pinus massoniana* soil [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(6): 1917-1925.
- [19] 简俊楠, 刘伟超, 朱玉帆, 等. 短期氮添加对黄土高原人工刺槐林土壤有机碳组分的影响[J]. 环境科学, 2023, 44(5): 2767-2774.
JIAN J N, LIU W C, ZHU Y F, et al. Effects of short-term nitrogen addition on soil organic carbon components in *Robinia pseudoacacia* L. plantation[J]. Environmental Science, 2023, 44(5): 2767-2774.
- [20] 刘永万, 白炜, 尹鹏松, 等. 外源氮素添加对长江源区高寒沼泽草甸土壤养分及植物群落生物量的影响[J]. 草地学报, 2020, 28(2): 483-491.
LIU Y W, BAI W, YIN P S, et al. Effects of exogenous nitrogen addition on soil nutrients and plant community biomass in alpine swamp meadow in the headwaters region of the Yangtze River[J]. Acta Agrestia Sinica, 2020, 28(2): 483-491.
- [21] 卢朝阳, 马维伟, 杜佳团, 等. 尕斯库勒地区沼泽草甸生长季土壤碳氮组分对增温施氮的响应[J]. 水土保持学报, 2024, 38(2): 316-325.
LU Z Y, MA W W, DU J N, et al. Response of growing season soil carbon and nitrogen components to warming and nitrogen addition in marshy meadows of the Gahai wetland area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(2): 316-325.
- [22] 吴雪梅, 杨雪岩, 林媛媛, 等. 刺槐和油松枯落叶腐殖质化对气候温湿变化的响应[J]. 草地学报, 2021, 29(8): 1738-1747.
WU X M, YANG X Y, LIN Y Y, et al. Response of humification of *Robinia pseudoacacia* and *Pinus tabulaeformis* litter to climate temperature and humidity changes [J]. Acta Agrestia Sinica, 2021, 29(8): 1738-1747.
- [23] 吕晶花, 赵旭燕, 陆梅, 等. 氮沉降下纳帕海草甸植被与土壤变化对微生物生物量碳氮的影响[J]. 应用生态学报, 2023, 34(6): 1525-1532.
LYU J H, ZHAO X Y, LU M, et al. Effects of vegetation and soil changes on microbial biomass carbon and nitrogen in the Napahai meadow under N deposition[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023, 34(6): 1525-1532.
- [24] CAO M M, ZHENG X, CUI L N, et al. Soil bacterial communities are more sensitive to short-term nitrogen deposition than fungal communities in subtropical Chinese fir forests[J]. Forest Ecology and Management, 2023, 549: e121490.
- [25] 聂江文, 王幼娟, 吴邦魁, 等. 施氮对冬种紫云英不还田条件下稻田土壤微生物数量与结构的影响[J]. 生态学杂志, 2018, 37(12): 3617-3624.
NIE J W, WANG Y J, WU B K, et al. Effects of nitrogen application on the abundance and community of soil microbes in paddy field under the condition of no returning

- Chinese milk vetch[J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(12):3617-3624.
- [26] YANG Y, CHENG H, GAO H, et al. Response and driving factors of soil microbial diversity related to global nitrogen addition [J]. Land Degradation and Development, 2020, 31(2):190-204.
- [27] 杨立宾, 隋心, 崔福星, 等. 汤旺河国家公园不同演替阶段森林土壤细菌多样性变化规律[J]. 环境科学研究, 2019, 32(3):458-464.
- YANG L B, SUI X, CUI F X, et al. Soil bacterial diversity between different forest successional stages in Tangwanghe National Park[J]. Research of Environmental Sciences, 2019, 32(3):458-464.
- [28] 鲁连欣, 王克勤, 李珠宇, 等. 等高反坡台阶整地对不同耕作系统根土微生态的影响[J]. 水土保持学报, 2024, 38(2):326-338.
- LU L X, WANG K Q, LI Z Y, et al. Effects of contour reverse-slope terrace on the microecology of rhizosphere in different farming systems[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(2):326-338.
- [29] 赵雯, 王丹丹, 热依拉·木民, 等. 阿尔山地区兴安落叶松林土壤微生物群落结构[J]. 生物多样性, 2023, 31(2):155-166.
- ZHAO W, WANG D D, REYILA M M, et al. Soil microbial community structure of *Larix gmelinii* forest in the Aershan area[J]. Biodiversity Science, 2023, 31(2):155-166.
- [30] 谢欢, 张秋芳, 曾泉鑫, 等. 氮添加对杉木苗期磷转化和分解类真菌的影响[J]. 植物生态学报, 2022, 46(2):220-231.
- XIE H, ZHANG Q F, ZENG Q X, et al. Effects of nitrogen addition on phosphorus transformation and decomposition fungi in seedling stage of *Cunninghamia lanceolata* [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2022, 46(2):220-231.
- [31] YANG Y, QIU K Y, XIE Y Z, et al. Geographical, climatic, and soil factors control the altitudinal pattern of rhizosphere microbial diversity and its driving effect on root zone soil multifunctionality in mountain ecosystems[J]. Science of the Total Environment, 2023, 904:e166932.
- [32] 肖文贤, 宋娅丽, 王克勤, 等. 氮添加对滇中高原森林凋落物养分残留及其持水性的影响[J]. 水土保持学报, 2023, 37(3):319-329.
- XIAO W X, SONG Y L, WANG K Q, et al. Influence of nitrogen addition on nutrient residues and water holding capacity of forest litter in central Yunnan Plateau, China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(3):319-329.
- [33] HE D, XIANG X J, HE J S, et al. Composition of the soil fungal community is more sensitive to phosphorus than nitrogen addition in the alpine meadow on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Biology and Fertility of Soils, 2016, 52(8):1059-1072.
- [34] 刘晶晶, 李金花, 季燕, 等. 辉河湿地河岸带土壤微生物群落组成与土壤理化关系[J]. 草地学报, 2023, 31(5):1393-1405.
- LIU J J, LI J H, JI Y, et al. Relationship between soil microbial community composition and soil physico-chemical properties in riparian zone of Huihe wetland [J]. Acta Agrestia Sinica, 2023, 31(5):1393-1405.
- [35] 邓玉峰, 田善义, 成艳红, 等. 模拟氮沉降下施石灰对休耕红壤优势植物根际土壤微生物群落的影响[J]. 土壤学报, 2019, 56(6):1449-1458.
- DENG Y F, TIAN S Y, CHENG Y H, et al. Effects of liming on rhizosphere soil microbial communities of dominant plants in fallowed red soil under simulated nitrogen deposition[J]. Acta Pedologica Sinica, 2019, 56(6):1449-1458.
- [36] 邓娇娇, 朱文旭, 张岩, 等. 辽西北风沙区不同人工林土壤真菌群落结构及功能特征[J]. 林业科学研究, 2020, 33(1):44-54.
- DENG J J, ZHU W X, ZHANG Y, et al. Studies on soil fungal community composition and function characteristics of different plantations of sandy area, northwest Liaoning Province [J]. Forest Research, 2020, 33(1):44-54.