

DOI: 10.11686/cyxb2024223

http://cyxb.magtech.com.cn

王守兴, 周华坤, 欧立鹏, 等. 三江源不同草地类型植被及土壤微生物多样性与土壤因子特征的研究. 草业学报, 2025, 34(4): 16-26.

WANG Shou-xing, ZHOU Hua-kun, OU Li-peng, *et al.* Vegetation and soil microbial diversity and their relationships with soil factors in different grassland types of the three river headwaters region. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(4): 16-26.

三江源不同草地类型植被及土壤微生物多样性与土壤因子特征的研究

王守兴^{1,2}, 周华坤³, 欧立鹏^{1,2}, 李成先^{1,2}, 王雁鹤^{1,2}, 宁晓春^{1,2}, 谷强^{1,2}, 魏代军^{1,2}, 杨明新^{1,2,4*}

(1. 中国地质调查局西宁自然资源综合调查中心, 青海 西宁 810000; 2. 黄河源水资源与生态系统过程野外科学观测研究站, 青海 玛多 813500; 3. 中国科学院西北高原生物研究所, 青海省寒区恢复生态学重点实验室, 青海 西宁 810008; 4. 自然资源要素耦合过程与效应重点实验室, 北京 100055)

摘要: 草地生物多样性是保持草地生态系统功能和稳定性的基础, 了解不同草地类型植被和土壤微生物多样性及其影响因素, 有助于制定科学的保护和修复策略。以三江源不同草地类型为研究对象, 通过野外植被群落调查和扩增子测序相结合, 探讨了不同草地类型的植被和土壤微生物多样性特征, 并分析了其与土壤环境因子的关系。结果表明, 三江源地区的高寒草甸、高寒草原和温性草原在植被群落特征、土壤微生物多样性特征以及土壤理化性质方面存在显著差异。高寒草甸具有较高的植被覆盖度和生物量 ($P < 0.05$), 而温性草原则具有最大的植被高度 ($P < 0.05$)。在土壤真菌方面, 高寒草甸 Faith's s -pd 指数显著大于温性草原和高寒草原 ($P < 0.05$), 而 Simpson 和 Shannon-Wiener 指数显著小于温性草原和高寒草原 ($P < 0.05$); 在土壤细菌方面, 高寒草原的 Chao1 指数和 Faith's s -pd 指数显著小于温性草原和高寒草甸 ($P < 0.05$), 而 Simpson 和 Shannon-Wiener 指数差异不显著 ($P > 0.05$)。土壤环境因子对不同草地类型的植被和土壤微生物群落具有显著影响, 其中土壤 pH、有机碳 (SOC) 含量和全氮 (N) 含量是主要影响因子。研究结果为三江源地区不同草地类型的生物多样性保护和生态修复提供了理论依据。

关键词: 三江源; 植被特征; 土壤微生物; 物种多样性; 高通量测序

Vegetation and soil microbial diversity and their relationships with soil factors in different grassland types of the three river headwaters region

WANG Shou-xing^{1,2}, ZHOU Hua-kun³, OU Li-peng^{1,2}, LI Cheng-xian^{1,2}, WANG Yan-he^{1,2}, NING Xiao-chun^{1,2}, GU Qiang^{1,2}, WEI Dai-jun^{1,2}, YANG Ming-xin^{1,2,4*}

1. Xining Center of Natural Resources Comprehensive Survey, China Geological Survey, Xining 810000, China; 2. Field Scientific Observatory of Water Resources and Ecosystem Processes of the Yellow River Source, Maduo 813500, China; 3. Key Laboratory of Restoration Ecology for Cold Regions Laboratory in Qinghai, Northwest of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008, China; 4. Key Laboratory of Coupling Processes and Effects of Natural Resource Elements, Beijing 100055, China

Abstract: Grassland biodiversity is the basis for maintaining the function and stability of grassland ecosystems. Understanding the diversity of vegetation and soil microorganisms in different grassland types and their influencing

收稿日期: 2024-06-11; 改回日期: 2024-08-22

基金项目: 中国地质调查局项目 (DD20220959, DD20230094) 和中国地质调查局自然资源综合调查指挥中心科技创新基金 (KC20220018) 资助。

作者简介: 王守兴 (1991-), 男, 青海西宁人, 本科。E-mail: wangshx717@163.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: YMxin@bjfu.edu.cn

factors can help to formulate scientific conservation and restoration strategies. In this study, we investigated the characteristics of vegetation and soil microbial diversity of different grassland types and analyzed their relationships with soil environmental factors by combining field vegetation community surveys and amplicon sequencing, for different grassland types in the Three-River Headwaters Region. It was found that alpine meadows, alpine steppe and temperate steppe in the Three-River Headwaters Region had significant differences in vegetation community characteristics, soil microbial diversity characteristics and soil physicochemical properties. Alpine meadows had higher vegetation cover and biomass ($P < 0.05$), while temperate steppe had the greatest vegetation height ($P < 0.05$). For soil fungi, the Faith's $s\text{-pd}$ index was significantly greater in alpine meadows than in temperate steppe and alpine steppe ($P < 0.05$), whereas the Simpson and Shannon—Wiener indices were significantly lower than in temperate steppe and alpine steppe ($P < 0.05$); and for soil bacteria, the Chao1 and Faith's $s\text{-pd}$ indices were significantly lower in alpine steppe than in temperate steppe and alpine meadows ($P < 0.05$), while the differences between Simpson and Shannon—Wiener indices were not significant ($P > 0.05$). Soil environmental factors had significant effects on vegetation and soil microbial communities in the different grassland types, among which pH, soil organic carbon content and soil total nitrogen content were one of the main factors of influence. The results of this study provide a theoretical basis for biodiversity conservation and ecological restoration of different types of grasslands in the Three-River Headwaters Region.

Key words: the three river headwaters region; vegetation characteristics; soil microorganism; species diversity; high-throughput sequencing

草地生物多样性是保持草地生态系统功能和稳定性的基础,对牧草生产、维持生态平衡、提供生态系统服务等方面有着至关重要的作用^[1-2],植被多样性和土壤微生物多样性作为生物多样性的重要组成部分,二者相互影响着草地生态系统的结构和功能^[3-4]。了解不同类型草地植被和土壤微生物多样性及其影响因素,有助于制定科学的保护和管理策略以及维护草地生态系统的健康和功能^[5]。三江源作为全球研究生物多样性重要的地区之一^[6],生物多样性研究对保护三江源区生态系统的原真性和完整性,维护生态安全和可持续发展等方面具有重要意义^[7]。

三江源地处青藏高原腹地,因其复杂的地形地貌和独特的水热条件,造就了具有特色的草地生态系统,因而植被群落多样性一直备受关注^[8-9]。对三江源不同类型草地研究发现,三江源高寒草地植被种类简单,植被群落多样性指数较低,且植被群落结构与土壤环境存在显著差异,植被多样性与土壤因子耦合协调度整体较低^[10-11]。植被多样性研究过程中发现,湿度对植被多样性影响最大,大气压力和氧气分压对物种多样性也有显著影响^[12]。也有研究表明,过度放牧是造成草地物种多样性降低的主要原因^[13-15],适当的禁牧能有效增加草地植被的高度、盖度、生物量和物种多样性^[16-17]。然而,以往对不同类型草地研究中,多以高寒草甸和高寒草原为研究对象,作为三江源地区重要草地类型之一的温性草原关注不高。

在生物多样性研究中,土壤微生物多样性的研究也是一个备受关注的焦点。目前,土壤微生物多样性在草地退化、栽培草地及与土壤、气候、人工干预之间关系的研究较多^[18-20]。对青藏高原高寒草地的研究显示,土壤微生物多样性主要受土壤性质控制,且pH对多样性变化的贡献最大,其次是海拔和年均温^[21-23]。同时草地土壤温度升高和水分减少对微生物多样性起主导作用,且微生物多样性与生态系统功能过程之间存在正相关^[19]。但对于三江源区不同草地类型土壤微生物多样性差异研究的偏少,尤其是对占比最大的高寒草甸、高寒草原和温性草原土壤微生物多样性差异不明晰。

基于以上研究基础,本研究以三江源不同草地类型为对象,通过野外植被群落调查和扩增子测序相结合,探讨不同草地类型植被多样性和微生物多样性特征,分析不同草地类型植被和土壤微生物与土壤环境之间的关系,为三江源地区不同类型草地的生物多样性保护和生态修复提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

三江源是黄河、长江和澜沧江的发源地,被誉为“中华水塔”,是高寒地区生物多样性分布最集中的地区之一,素有“高寒生物种质资源库”之称,也是生态脆弱和气候变化敏感区。三江源位于青藏高原腹地,以山地地貌为主,平均海拔4400 m,年均气温为 $-5.6\sim 3.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,年降水量为262.2~772.8 mm,主要集中在6—9月,年蒸发量为730~1700 mm,陆地蒸发量约为360 mm,具有温度低、降水少、蒸发量大等特点,属于青藏高原气候系统^[24]。

三江源区主要草地类型有高寒草甸、高寒草原和温性草原,分别占三江源区总面积的68.14%、24.58%和4.42%^[25-26]。其中高寒草甸原生植被以莎草科高山嵩草(*Carex parvula*)、矮生嵩草(*Carex alataensis*)和冷地早熟禾(*Poa araratica*)等^[27]为优势种;高寒草原原生植被以禾本科紫花针茅(*Stipa purpurea*)为建群种,常伴生有草地早熟禾(*Poa pratensis*)、鹅绒委陵菜(*Argentina anserina*)、黑褐嵩草(*Carex atrofusca*)等^[28];温性草原主要分布在三江源东部地区,以西北针茅(*Stipa sareptana*)、芨芨草(*Neotrinia splendens*)、青海固沙草(*Orinus kokonorica*)为原生植被优势种^[29]。

1.2 数据采集方法

本研究于2023年8月植物生长盛期开展了野外调查,调查期间将高寒草甸、高寒草原、温性草原的建群种作为3种原生草地类型的判断依据进行样地布设,样地尽量设在建群种比较明显、植被长势均匀且具有代表性的地段,每个草地类型均设置了6个样地(图1),每个样地随机布设3个1 m×1 m的标准样方,对样方内植被进行分种调查,详细记录每个物种的覆盖度、高度、多度、频度等基础信息,用刈割法采集地上生物量待烘干24 h后称取其干重^[30-31]。土壤理化性质样品采集选用直径7 cm土钻,在每个样方内随机钻取3钻0~20 cm深度土壤并混合,过2 mm筛后的土壤样品用密封袋保存并进行编号,用于土壤pH、全氮(total nitrogen)、全磷(total phosphorus)、全钾(total potassium)、有机碳(soil organic carbon, SOC)含量测定。土壤微生物取样用直径3 cm的土钻钻取0~20 cm土层样品,每个样方取3个重复,混合后取适量的土壤装入无菌管,在冰箱中低温冷冻保存。

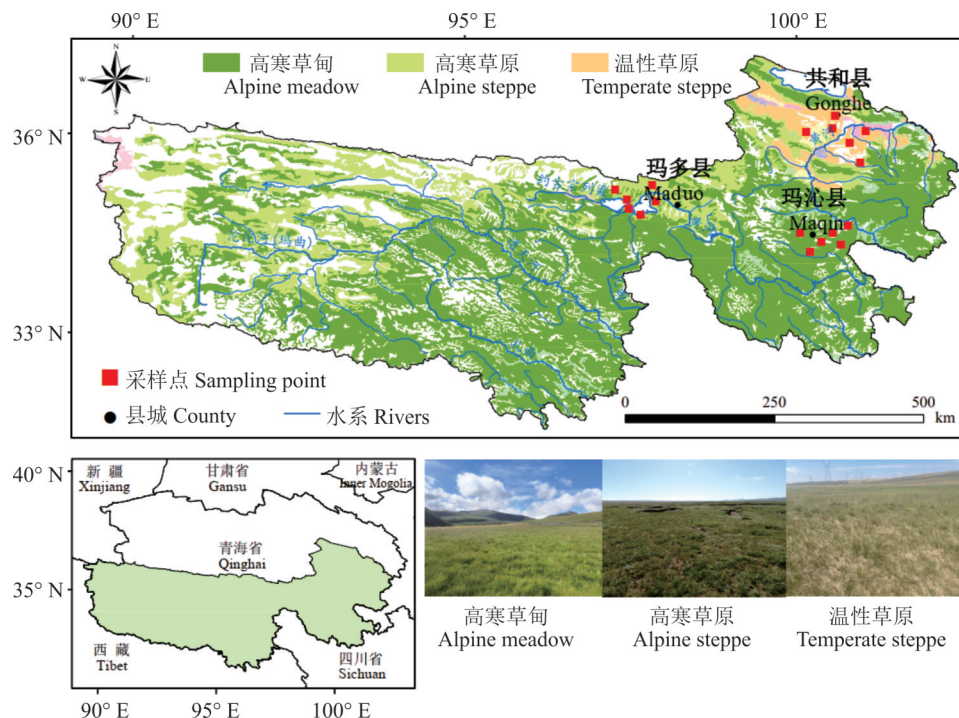


图1 研究区位置及样地分布

Fig. 1 Location and distribution of study area plots

基于自然资源部标准地图服务网站GS(2019)1822号标准地图制作,底图无修改。Based on the standard map service website of the Ministry of Natural Resources drawing number: GS (2019)1822, the base drawing has not been modified.

1.3 分析方法

1.3.1 土壤理化性质测试分析 采用玻璃电极法测定土壤 pH 值;采用重铬酸钾氧化—外加热法测定 SOC 含量,每批次样品分析时做空白试验 3 个;采用硫酸—加速剂消解,凯氏法测定土壤 N 含量;采用 NaOH 碱熔,钼锑抗分光光度法测定土壤 P 含量;采用 NaOH 碱熔,火焰光度计法测定土壤 K 含量^[32]。

1.3.2 土壤微生物测序 采集的样品过筛后,根据 CTAB 试验操作说明,在 2 mL 离心管中加入样本 0.25 g,从土壤样品中提取总 DNA。采用通用引物 515F 和 806R 扩增土壤中的 16S rRNA 基因 V4 区^[33],采用通用引物 ITS5-1737F 和 ITS2-2043R 扩增土壤 ITS 基因 1-5F 区^[34],扩增子测序基于 Illumina Miseq 测序平台进行。

1.4 多样性计算方法

参照方精云等^[35]的方法,选用 Shannon—Wiener 指数 (Shannon—Wiener index, H)、Simpson 指数 (Simpson index, D)、Pielou 指数 (Pielou index, E)、Chao1 指数 (Chao1 index, C)^[36]、Faith's-pd 指数 (Faith's-pd index, PD_{Faith})^[37] 进行多样性分析,计算公式如下:

重要值 (important value, IV) = (相对盖度 + 相对高度 + 相对频度) / 3

$$H = - \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i$$

$$D = 1 - \sum_{i=1}^S P_i^2$$

$$E = \frac{H}{\ln S}$$

$$C = S_{\text{obs}} + N_1(N_1 - 1) / (2(N_2 + 1))$$

$$PD_{\text{Faith}} = \sum_{i=1}^n B_i$$

式中: P_i 为样方中第 i 种植被在群落中所占的重要值; S 为种 i 所在样方的物种总数; S_{obs} 为观测到的代表序列 (operational taxonomic units, OTU) 数; N_1 为只有 1 条序的 OTU 数; N_2 为只有 2 条序的 OTU 数; n 为系统发育树中分支的数量; B_i 为第 i 个分支的长度。

1.5 数据处理

所有原始数据统计在 Excel 2010 完成,使用 SPSS 22.0 进行单因素方差分析 (one-way analysis of variance) 和 Duncan 多重比较检验,在 $P < 0.05$ 差异水平上检测差异显著性;利用 Origin 2021 和 Canoco 5 进行制图。

2 结果与分析

2.1 不同草地类型植被群落多样性特征

不同草地类型植被群落特征存在显著差异 ($P < 0.05$),高寒草甸覆盖度和生物量最高,温性草原植被高度最大 (表 1)。对比物种多样性指数发现,Simpson 和 Shannon—Wiener 指数在 3 种草地类型中均为高寒草甸 > 高寒草原 > 温性草原 ($P < 0.05$),Pielou 指数在高寒草甸和高寒草原间差异不显著 ($P > 0.05$),而与温性草原之间差异显著 ($P < 0.05$)。高寒草甸拥有最高水平的物种多样性和相对均衡的物种分布,高寒草原次之,而温性草原的物种多样性水平最低。

2.2 不同草地类型土壤微生物特征

2.2.1 土壤微生物多样性特征 土壤微生物的测序深度指数 (Good's coverage) 均在 0.99 以上,说明样本中的土壤细菌基本上能够反映土壤中的真实情况。结果显示,土壤真菌 Chao1 指数在不同草地类型中差异不显著 ($P > 0.05$);Faith's-pd 指数为高寒草甸 > 高寒草原 > 温性草原,高寒草甸与温性草原之间差异显著 ($P < 0.05$),而高寒草原与温性草原、高寒草甸之间差异不显著 ($P > 0.05$);Simpson 指数为高寒草原 > 温性草原 > 高寒草甸 ($P < 0.05$);Shannon—Wiener 指数为高寒草甸 < 高寒草原、温性草原 ($P < 0.05$,图 2A)。土壤细菌 Chao1 指数为高寒草原 < 高寒草甸、温性草原 ($P < 0.05$,图 2B);Faith's-pd 指数为高寒草原 < 温性草原、高寒草甸 ($P < 0.05$);Simpson 指数和 Shannon—Wiener 指数在 3 种草地类型之间差异不显著 ($P > 0.05$,图 2B)。

表1 不同草地类型植被群落特征和多样性特征

Table 1 Vegetation characteristics and diversity characteristics of different types of grassland

特征指标 Characteristic index	高寒草原 Alpine steppe	温性草原 Temperate steppe	高寒草甸 Alpine meadow
盖度 Coverage (%)	69.61±8.82b	58.56±14.70c	91.13±6.76a
高度 Height (cm)	3.49±0.75c	19.99±7.24a	8.31±4.62b
生物量 Biomass (g·m ⁻²)	98.66±17.65c	197.51±63.61b	251.41±101.40a
Simpson 指数 Simpson index	0.87±0.02b	0.74±0.10c	0.93±0.02a
Shannon—Wiener 指数 Shannon—Wiener index	2.15±0.16b	1.57±0.42c	2.89±0.27a
Pielou 指数 Pielou index	0.95±0.02a	0.89±0.04b	0.95±0.02a
优势种 Dominant species	紫花针茅 <i>S. purpurea</i> 、早熟禾 <i>P. annua</i> 、 青藏薹草 <i>Carex moorcroftii</i>	芨芨草 <i>N. splendens</i> 、西北针 茅 <i>S. sareptana</i>	高山嵩草 <i>C. parvula</i> 、藏嵩草 <i>C. tibetiko- bresia</i> 、高原毛茛 <i>Ranunculus tanguticus</i>

注：同行不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)，下同。

Note: Different lowercase letters in the same row indicate significant differences ($P < 0.05$), the same below.

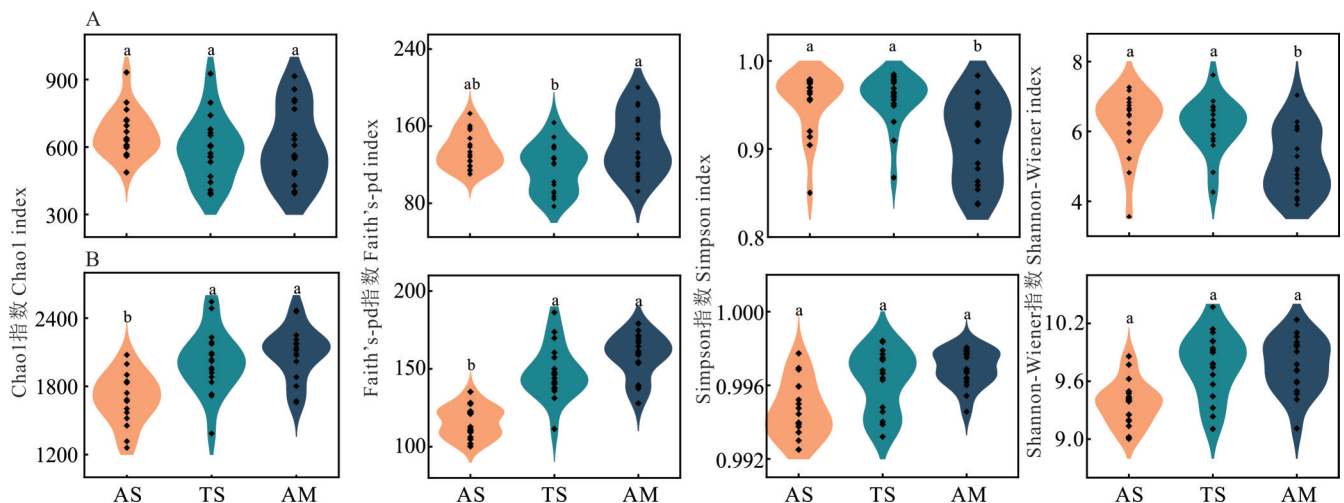


图2 不同草地类型土壤微生物群落多样性指数

Fig. 2 Diversity indices of soil microbial communities in different grassland types

AS: 高寒草原 Alpine steppe; TS: 温性草原 Temperate steppe; AM: 高寒草甸 Alpine meadow; A: 真菌 Fungi; B: 细菌 Bacteria; 下同 The same below. 不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$) The different small letters mean the significant differences at $P < 0.05$.

2.2.2 土壤微生物群落特征 本研究的3种草地类型土壤样本累计读取出真菌分属40门,其中温性草原共有26个门,高寒草甸36个门,高寒草原28个门。所有土壤真菌群落中,除去相对丰度 $<1\%$ 的真菌群落,共统计到5个真菌群落(图3A)。主要优势群落为子囊菌门、担子菌门、灰孢菌门、球囊菌门、壶菌门。对比优势群落在不同草地类型中的丰度差异发现,子囊菌门、灰孢菌门、壶菌门在3种类型草地中差异不显著($P > 0.05$),而担子菌门在高寒草甸中丰度最高,高寒草原中最低($P < 0.05$),球囊菌门在温性草原中丰度最高,高寒草原中最低($P < 0.05$)。累计读取出细菌51门,其中温性草原共有47个门,高寒草甸49个门,高寒草原40个门。所有土壤细菌群落中,除去相对丰度 $<1\%$ 的细菌群落,共统计到10个细菌群落(图3B)。对比3种草地类型发现,高寒草甸土壤中变形菌门、疣微菌门、硝化螺旋菌门丰度较高;高寒草原土壤中放线菌门、绿弯菌门、芽单胞菌门、拟杆菌门、浮霉菌门丰度较高;温性草原土壤中酸杆菌门、古菌门丰度较高。同时除了变形菌门、拟杆菌门在不同草地类型中差异不显著($P > 0.05$),其余优势细菌群落表现出显著差异($P < 0.05$)。

2.3 不同草地类型土壤理化性质特征

对不同草地类型土壤pH、SOC、N、P、K含量分析对比发现(表2),高寒草甸pH最低,土壤偏酸性,高寒草原

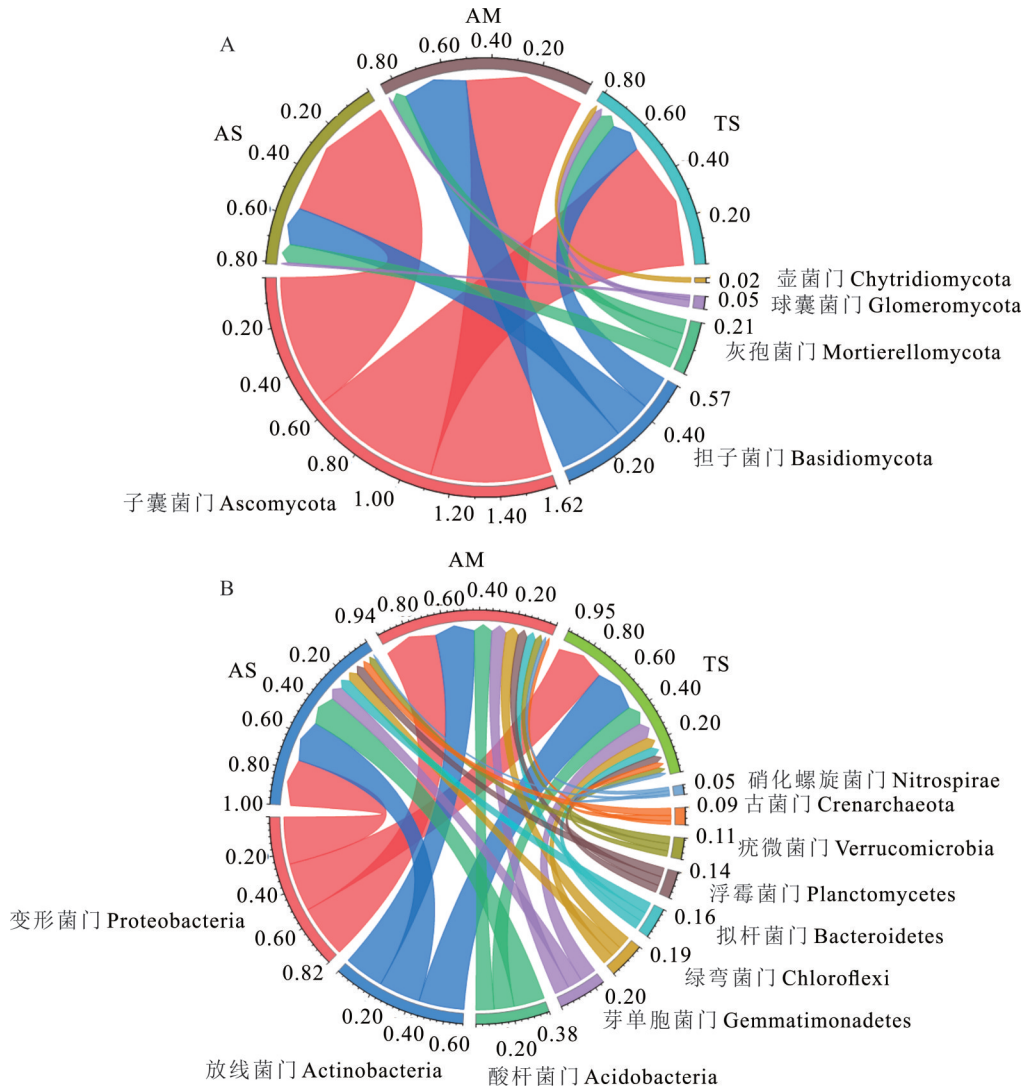


图 3 不同草地类型土壤微生物群落组成

Fig. 3 Composition of soil microbial community in different grassland types

和温性草原土壤偏碱性,高寒草甸与高寒草原和温性草原之间差异显著($P < 0.05$);土壤 SOC 和 N 含量在高寒草甸中最高,在温性草原中含量最低($P < 0.05$);P 含量在高寒草原中最高,高寒草甸中最低,但无显著差异($P > 0.05$);K 含量为高寒草甸 $>$ 温性草原 $>$ 高寒草原($P < 0.05$)。

2.4 不同草地类型土壤微生物群落与土壤环境因子的相关分析

土壤理化特征作为植被群落生长及土壤微生物群落丰度的重要影响因素,通过冗余分析(redundancy analysis, RDA)(图 4),探讨了不同草地类型植被多样性及微生物多样性与土壤理化特征之间的关系。

RDA 分析表明:第一、二轴的解釋率分别为 85.82%,13.97%,累计解釋率达 99.79%。排序结果可信,能够较好地解释细菌群落与土壤理化因子的关系。分析结果显示:土壤细菌多样性指数与土壤 K、N 和 SOC 含量呈正相

表 2 不同草地类型土壤理化性质

Table 2 Analysis of physical and chemical properties of different types of grassland soils

理化指标	高寒草原	温性草原	高寒草甸
Physicochemical indicators	Alpine steppe	Temperate steppe	Alpine meadow
pH	8.53±0.13a	8.56±0.17a	6.22±0.27b
SOC ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	15.82±4.14b	8.27±5.80c	40.86±16.95a
N ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	1.97±0.45b	1.52±0.64c	5.02±0.65a
P ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	1.88±0.30a	1.70±0.33a	1.68±0.30a
K ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	16.34±1.12c	18.42±1.67b	19.48±0.55a

SOC: 土壤有机碳 Soil organic carbon; N: 土壤全氮 Total nitrogen; P: 土壤全磷 Total phosphorus; K: 土壤全钾 Total potassium.

关,其中K含量的影响最大($P<0.05$);土壤真菌多样性指数与土壤N、pH和SOC含量呈正相关,土壤N含量影响最大($P<0.05$);土壤K、N和SOC含量显著影响植被群落多样性($P<0.05$)。土壤理化特征中土壤K含量对植被多样性和土壤微生物多样性影响最大,其贡献率达32.7%($P<0.05$),其次是pH和N,贡献率分别为30.6%和24.8%($P<0.05$)。

3 讨论

3.1 不同草地类型植被及土壤微生物多样性特征

三江源地区不同类型草地植被及微生物群落组成和结构不同,植被高度、覆盖度、地上生物量、多样性指数等指标特征具有显著差异。本研究结果显示,3种不同类型草地中高寒草甸生物量、盖度、多样性指数及Pielou均匀度指数最高,高寒草原次之,温性草原最低。Tang等^[38]研究显示,高寒草甸植被多样性最高,杨学亭等^[39]对祁连山不同草地类型的土壤理化性质和植被特征研究发现高寒草甸植被多样性最高,其次为高寒草原,本研究结果与之一致。三江源区高寒草甸的水分条件比高寒草原和温性草原相对稍好、物种组成也较丰度、群落结构相对稳定、生物量较高^[40],高寒草原和温性草原由于土壤水分下降会引起植被群落生产力降低,造成物种多样性降低^[27,41],说明环境因子(水热条件)对植被及微生物多样性和结构分布特征有着一定的调控作用。

进一步分析不同类型草地土壤细菌和真菌群落组成,发现本研究的3种草地类型中变形菌门、放线菌门、酸杆菌门、疣微菌门为优势细菌群,子囊菌门、担子菌门和灰孢菌门为真菌优势菌群,与该区域前人研究结果基本相同。Fu等^[42]对藏北高原高寒草甸的研究显示,变形菌门和放线菌门为优势细菌;赵文等^[43]对三江源地区退化高寒草甸土壤研究发现,高寒草甸土壤优势真菌为子囊菌门、担子菌门和被孢霉菌门;赵兴鸽等^[44]研究表明青藏高原高寒草甸土壤真菌优势菌为子囊菌门、担子菌门等;李海云等^[45]以祁连山中段高寒草甸为研究对象,发现厚壁菌门、放线菌门、变形菌门和酸杆菌门为细菌优势菌,真菌结果显示优势菌为放线菌门、变形菌门和酸杆菌门,本研究结果与其基本相同。根据前人研究结合本次结果说明土壤微生物群落分布和组成在大尺度上有差异,但是优势群落没有显著的差异。本研究中发现变形菌门和子囊菌门是各草地类型中丰度最大的类群,通过进一步的分析显示,SOC和N含量与变形菌门丰度呈显著正相关;pH与子囊菌门丰度呈显著正相关。

3.2 土壤环境因子对不同类型草地土壤微生物多样性的影响

草地生态系统的重要纽带就是植被—土壤—微生物的相互作用和反馈,植被凋零分解和根系分泌作用促进植被与微生物之间营养传输和协同生长,植被与微生物之间的相互选择在生态系统中反映出了植被群落与土壤的演替方向^[42]。研究表明草地植被多样性不仅受土壤特征影响,还与地形地貌、海拔、坡度、温度等因子有关^[46]。Ahmad等^[47]对喜马拉雅地区草地研究表明,植被多样性与温度、降水、太阳辐射等温度变量呈正相关,但海拔是对物种丰富度和多样性格局最主要的影响因素。周华坤等^[27]在三江源的研究也证实这一结论。此外,本研究还发现,高寒草甸的生物量最高,这是因为本研究的高寒草甸所在区域,年降水量相对最高,土壤含水量较高,植被生长环境较好,地上生物量中可食牧草的占比较高。这一点在张小燕等^[48]和Zuo等^[49]的研究中得到了证实。

土壤理化性质的变化会对微生物群落特征产生影响^[50],有研究表明^[22,51]pH与微生物多样性具有显著的相关性,土壤pH、SOC等土壤性质是微生物结构和活性的关键驱动因素,土壤pH在解释土壤细菌群落多样性和组成方面具有关键作用^[52]。本研究通过测定三江源3种不同类型草地土壤理化性质和利用高通量测序技术对土壤微

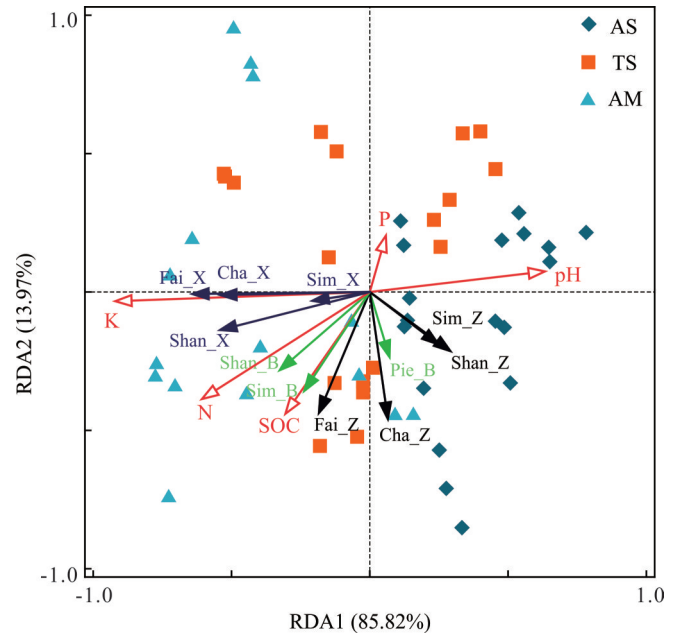


图4 土壤微生物群落与土壤理化因子间的RDA分析

Fig. 4 RDA analysis between soil microbial community and soil physicochemical factors

生物群落变化进行探究,结果显示不同类型草地土壤理化性质差异显著,除了pH和P含量在高寒草甸中最低之外,其余各指标的含量在高寒草甸中均为最高,对植被群落多样性和土壤微生物多样性影响较大的土壤理化因子为pH、P、N、K,这一结果与前人结果基本一致。pH被广泛认为是影响生物多样性和丰富性最主要的因子^[22,53],且有研究表明植被群落多样性和pH呈负相关^[27],高寒草甸具有相对较高的物种丰富度,而植被多样性的增加同时也会促进土壤微生物多样性的提高^[54]。限制植被生长发育的土壤因子为P和K^[55],植被的生长发育程度与土壤微生物含量之间有直接或间接的反馈效应,微生物群落多样性和丰度受土壤P的影响比较大^[23],本研究中高寒草甸土壤P含量在3种草地类型中的含量较少,可能是造成高寒草甸植被和微生物群落组成结构及多样性与另外两种类型草地差异的原因之一。

4 结论

三江源地区高寒草甸、温性草原和高寒草原3种不同类型原生草地土壤理化性质与植被及土壤微生物群落特征差异显著,高寒草甸植被和土壤微生物多样性最高,同时具有较好的土壤养分。土壤pH、N和SOC与植被和土壤微生物群落多样性有显著相关关系,因此,在该区域的草地保护和生态修复中,通过改善土壤营养性状,能够实现土壤微生物和植被多样性的双重提升,能更好地保证草地管理效率。

参考文献 References:

- [1] Sala O E, Chapin F S, Armesto J J, *et al.* Global biodiversity scenarios for the year 2100. *Science*, 2000, 287(5459): 1770—1774.
- [2] Cardinale B J, Duffy J E, Gonzalez A, *et al.* Biodiversity loss and its impact on humanity. *Nature*, 2012, 486(7401): 59—67.
- [3] Wagg C, Bender S F, Widmer F, *et al.* Soil biodiversity and soil community composition determine ecosystem multifunctionality. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111(14): 5266—5270.
- [4] Manule D B, Maestre F T, Reich P B, *et al.* Carbon content and climate variability drive global soil bacterial diversity patterns. *Ecological Monographs*, 2016, 86(3): 373—390.
- [5] Chen X, Zhang Y P. Impacts of climate, phenology, elevation and their interactions on the net primary productivity of vegetation in Yunnan, China under global warming. *Ecological Indicators*, 2023, 154: 1—13.
- [6] Zhang X C, Jin X M. Vegetation dynamics and responses to climate change and anthropogenic activities in the Three-River Headwaters Region, China. *Ecological Indicators*, 2021, 131: 1—14.
- [7] Zhao X Q, Xu S X, Zhao L, *et al.* Innovation and practice on biodiversity conservation in Sanjiangyuan National Park. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2023, 38(12): 1833—1844.
赵新全, 徐世晓, 赵亮, 等. 三江源国家公园生物多样性保护创新及实践. *中国科学院院刊*, 2023, 38(12): 1833—1844.
- [8] Zhao X Q. The five integrative management strategies of Sanjiangyuan National Park. *Biodiversity Science*, 2021, 29(3): 301—303.
赵新全. 三江源国家公园创建“五个一”管理模式. *生物多样性*, 2021, 29(3): 301—303.
- [9] Shao Q Q, Liu S C, Ning J, *et al.* Assessment of ecological benefits of key national ecological projects in China in 2000—2019 using remote sensing. *Acta Geographica Sinica*, 2022, 77(9): 2133—2153.
邵全琴, 刘树超, 宁佳, 等. 2000—2019年中国重大生态工程生态效益遥感评估. *地理学报*, 2022, 77(9): 2133—2153.
- [10] Yang C, Wang W Y, Zhou H K, *et al.* Coupling and coordination characteristic between plant diversity and soil factors of alpine grasslands in the Three Rivers Source Region. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2022, 57(2): 125—136.
杨冲, 王文颖, 周华坤, 等. 三江源区高寒草地植物多样性与土壤因子的耦合关系. *甘肃农业大学学报*, 2022, 57(2): 125—136.
- [11] Chen X, Li Q, Chen D D, *et al.* Analysis on the difference of microbial function gene in different grasslands of Sanjiangyuan National Park. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, 29(3): 472—482.
陈昕, 李奇, 陈懂懂, 等. 三江源国家公园不同草地土壤微生物功能基因的差异性分析. *生态环境学报*, 2020, 29(3): 472—482.
- [12] Pan Y L, Tang H P, Liu D, *et al.* Geographical patterns and drivers of plant productivity and species diversity in the Qinghai—Tibet Plateau. *Plant Diversity*, 2023, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pld.2023.06.007>.

- [13] McSherry M E, Ritchie M E. Effects of grazing on grassland soil carbon: A global review. *Global Change Biology*, 2013, 19(5): 1347–1357.
- [14] Tian L, Zhang Y J, Zhu J T. Decreased surface albedo driven by denser vegetation on the Tibetan Plateau. *Environmental Research Letters*, 2014, 9(10): 11–23.
- [15] Li C X, Hendrik W, Bernhard S, *et al.* Estimating plant traits of alpine grasslands on the Qinghai–Tibetan Plateau using remote sensing. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2018, 11(7): 2263–2275.
- [16] Wang S Z, Fan J W, Li Y Z, *et al.* Effects of grazing exclusion on biomass growth and species diversity among various grassland types of the Tibetan Plateau. *Sustainability*, 2019, 11(6): 1705–1718.
- [17] Asitaiken J, Dong Y Q, Zhou S J, *et al.* Effects of enclosure on vegetation diversity and niche characteristics of different grassland types in Xinjiang. *Pratacultural Science*, 2023, 40(5): 1168–1185.
阿斯太肯·居力海提, 董乙强, 周时杰, 等. 封育对不同草地类型植物群落多样性及生态位特征的影响—以新疆不同类型草地为例. *草业科学*, 2023, 40(5): 1168–1185.
- [18] Upama K C, Samiran B, Thompson K A, *et al.* Cattle grazing management affects soil microbial diversity and community network complexity in the Northern Great Plains. *Science of the Total Environment*, 2024, 912: 169353.
- [19] Wu L W, Zhang Y, Guo X, *et al.* Reduction of microbial diversity in grassland soil is driven by long-term climate warming. *Nature Microbiology*, 2022, 7(7): 1054–1062.
- [20] Wei S, Li S W, Wang J H, *et al.* Effects of grazing on plant species and phylogenetic diversity in alpine grasslands Northern Tibet. *Ecological Engineering*, 2021, 170: 106331.
- [21] Pan J X, Peng Y F, Wang J S, *et al.* Controlling factors for soil bacterial and fungal diversity and composition vary with vegetation types in alpine grasslands. *Applied Soil Ecology*, 2023, 184: 104777.
- [22] Shen C C, Shi Y, Fan K K, *et al.* Soil pH dominates elevational diversity pattern for bacteria in high elevation alkaline soils on the Tibetan Plateau. *Microbiology Ecology*, 2019, 95(2): 3–12.
- [23] Zhou H, Zhang D G, Jiang Z H, *et al.* Changes in the soil microbial communities of alpine steppe at Qinghai–Tibetan Plateau under different degradation levels. *Science of the Total Environment*, 2019, 651(2): 2281–2291.
- [24] Hu L, Wang C T, Wang G X, *et al.* Changes in the activities of soil enzymes and microbial community structure at different degradation successional stages of alpine meadows in the headwaters region of Thee Rivers, China. *Acta Prataculturæ Sinica*, 2014, 23(3): 8–19.
胡雷, 王长庭, 王根绪, 等. 三江源区不同退化演替阶段高寒草甸土壤酶活性和微生物群落结构的变化. *草业学报*, 2014, 23(3): 8–19.
- [25] Liu P X, Wang J B, Sun X F, *et al.* Climatic suitability of vegetation growth over alpine grassland in the Three-River Headwaters. *Acta Agrestia Sinica*, 2023, 31(10): 3145–3156.
刘佩霞, 王军邦, 孙晓芳, 等. 三江源区高寒草地植被生长的气候适宜性研究. *草地学报*, 2023, 31(10): 3145–3156.
- [26] Zhang Y X, Fan J W, Cao W, *et al.* Spatial and temporal dynamics of grassland yield and its response to precipitation in the Three Headwater Region from 2006 to 2013. *Acta Prataculturæ Sinica*, 2017, 26(10): 10–19.
张雅娴, 樊江文, 曹巍, 等. 2006–2013年三江源草地产草量的时空动态变化及其对降水的响应. *草业学报*, 2017, 26(10): 10–19.
- [27] Zhou H K, Li S, Sun J, *et al.* Characteristics of plant community and soil physical and chemical properties in alpine meadow along altitude gradient in the headwaters region of Three-River on Tibetan Plateau. *Acta Agrestia Sinica*, 2023, 31(6): 1735–1743.
周华坤, 李珊, 孙建, 等. 三江源区高寒草甸植物群落与土壤理化性质沿海拔梯度的变化特征. *草地学报*, 2023, 31(6): 1735–1743.
- [28] Yang M X, Chen K Y, Li C X, *et al.* Effects of grassland degradation on soil fungal communities in alpine steppes of the Three-River Headwaters Region during different growth periods. *Pratacultural Science*, 2024, 41(1): 15–25.
杨明新, 陈科宇, 李成先, 等. 三江源区高寒草原退化对不同生长期土壤真菌群落的影响. *草业科学*, 2024, 41(1): 15–25.
- [29] Zhang Y S, Zhao X Q, Zhao S X, *et al.* Correlation between evapotranspiration and climate factors in warm steppe in source region of Yangtze, Yellow and Yalu Tsangpo Rivers. *Journal of Desert Research*, 2010, 30(2): 363–368.
张耀生, 赵新全, 赵双喜, 等. 三江源区温性草原蒸散量与主要影响因子的相关分析. *中国沙漠*, 2010, 30(2): 363–368.

- [30] Yang M X, Yang X C, Zhao Y, *et al.* Estimated carbon storage and influencing factors of alpine grassland in the source region of the Yellow River. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(9): 3546–3557.
杨明新, 杨秀春, 赵云, 等. 黄河源园区高寒草地碳储量估算及其影响因素. *生态学报*, 2023, 43(9): 3546–3557.
- [31] Wang Y F, Xue K, Hu R H, *et al.* Vegetation structural shift tells environmental changes on the Tibetan Plateau over 40 years. *Science Bulletin*, 2023, 68(17): 1928–1937.
- [32] Bao S D. *Soil agrochemical analysis (Third Edition)*. Beijing: China Agriculture Press, 2013: 25–114.
鲍士旦. *土壤农化分析(第3版)*. 北京: 中国农业出版社, 2013: 25–114.
- [33] Wagner M R, Lundberg D S, Devin C D, *et al.* Natural soil microbes alter flowering phenology and the intensity of selection on flowering time in a wild *Arabidopsis* relative. *Ecology Letters*, 2014, 17(6): 717–726.
- [34] Zhao S, Liu D Y, Ning L, *et al.* Bio-organic fertilizer application significantly reduces the *Fusarium oxysporum* population and alters the composition of fungi communities of watermelon *Fusarium* wilt rhizosphere soil. *Biology and Fertility of Soils*, 2014, 50(5): 765–774.
- [35] Fang J Y, Wang X P, Shen Z H, *et al.* Methods and protocols for plant community inventory. *Biodiversity Science*, 2009, 17(6): 533–548.
方精云, 王襄平, 沈泽昊, 等. 植物群落清查的主要内容、方法和技术规范. *生物多样性*, 2009, 17(6): 533–548.
- [36] Chao A. Non parametric estimation of the number of classes in a population. *Scandinavian Journal of Statistics*, 1984, 11(4): 265–270.
- [37] Tuomisto H. A consistent terminology for quantifying species diversity? Yes, it does exist. *Oecologia*, 2010, 164(4): 853–860.
- [38] Tang L, Dong S K, Liu S L, *et al.* The relationship between soil physical properties and alpine plant diversity on Qinghai Tibet Plateau. *Eurasian Journal of Soil Science*, 2015, 4(2): 88–93.
- [39] Yang X T, Fan J, Gai J M, *et al.* Soil physical and chemical properties and vegetation characteristics of different types of grassland in Qilian Mountains, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(4): 878–886.
杨学亭, 樊军, 盖佳敏, 等. 祁连山不同类型草地的土壤理化性质与植被特征. *应用生态学报*, 2022, 33(4): 878–886.
- [40] Dong S K, Tang L, Zhang X F, *et al.* Relationship between plant species diversity and functional diversity in alpine grasslands. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(5): 1472–1483.
董世魁, 汤琳, 张相锋, 等. 高寒草地植物物种多样性与功能多样性的关系. *生态学报*, 2017, 37(5): 1472–1483.
- [41] Shao J X, Liu Y H, Ma H, *et al.* Meta-analysis of physical and chemical properties of shallow soils in degraded alpine grasslands. *Acta Agrestia Sinica*, 2022, 30(6): 1370–1378.
邵建翔, 刘育红, 马辉, 等. 退化高寒草地浅层土壤理化性质 Meta 分析. *草地学报*, 2022, 30(6): 1370–1378.
- [42] Fu L J, Yan Y, Li X Q, *et al.* Rhizosphere soil microbial community and its response to different utilization patterns in the semi-arid alpine grassland of northern Tibet. *Frontiers in Microbiology*, 2022, 13: 931795.
- [43] Zhao W, Yin Y L, Li S X, *et al.* The characteristics of soil fungal community in degraded alpine meadow in the Three Rivers Source Region, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(3): 869–877.
赵文, 尹亚丽, 李世雄, 等. 三江源区退化高寒草甸土壤真菌群落特征. *应用生态学报*, 2021, 32(3): 869–877.
- [44] 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. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2020, 26(1): 1–9.
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. *应用与环境生物学报*, 2020, 26(1): 1–9.
- [45] Li H Y, Yao T, Zhang J G, *et al.* Relationship between soil bacterial community and environmental factors in the degraded alpine grassland of eastern Qilian Mountains, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(11): 3793–3801.
李海云, 姚拓, 张建贵, 等. 东祁连山退化高寒草地土壤细菌群落与土壤环境因子间的相互关系. *应用生态学报*, 2018, 29(11): 3793–3801.
- [46] Han W Y, Chen L, Su X K, *et al.* Effects of soil physico-chemical properties on plant species diversity along an elevation gradient over alpine grassland on the Qinghai–Tibetan Plateau, China. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13(4): 822268–822281.
- [47] Ahmad B I, Mudasar F, Qadir R U, *et al.* Predicting potential distribution and range dynamics of *Aquilegia fragrans* under climate change: Insights from ensemble species distribution modelling. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2023, 195(5): 623–641.

- [48] Zhang X Y, Feng M, Liu Q G, *et al.* Distribution patterns and driving factors of grassland plant diversity along a precipitation gradient on the Qinghai–Tibet Plateau. *Chinese Journal of Ecology*, 2024, 43(6): 1674–1680.
张小燕, 冯明, 刘倩光, 等. 青藏高原草地植物多样性沿降水梯度的分布格局及影响因素. *生态学杂志*, 2024, 43(6): 1674–1680.
- [49] Zuo X A, Sun S S, Wang S K, *et al.* Contrasting relationships between plant-soil microbial diversity are driven by geographic and experimental precipitation changes. *Science of the Total Environment*, 2023, 861: 160654.
- [50] Yang P N, Li X L, Li C Y, *et al.* Response of soil microbial diversity to long-term enclosure in degraded patches of alpine meadow in the source zone of the Yellow River. *Environmental Science*, 2023, 44(4): 2293–2303.
杨鹏年, 李希来, 李成一, 等. 黄河源区斑块化退化高寒草甸土壤微生物多样性对长期封育的响应. *环境科学*, 2023, 44(4): 2293–2303.
- [51] Shanguan Z J, Jing X, Wang H, *et al.* Plant biodiversity responds more strongly to climate warming and anthropogenic activities than microbial biodiversity in the Qinghai–Tibetan alpine grasslands. *Journal of Ecology*, 2023, 112(1): 110–125.
- [52] Laurent P, Claire C, Andreas K, *et al.* The interplay between microbial communities and soil properties. *Nature Reviews Microbiology*, 2023, 22(4): 226–239.
- [53] Lauber C L, Hamady M, Knight R, *et al.* Pyrosequencing-based assessment of soil pH as a predictor of soil bacterial community structure at the continental scale. *Applied and Environmental Microbiology*, 2009, 75(15): 5111–5120.
- [54] Xue K, Zhang B, Zhou S T, *et al.* Soil microbial communities in alpine grasslands on the Tibetan Plateau and their influencing factors. *Chinese Science Bulletin*, 2019, 64(27): 2915–2927.
薛凯, 张彪, 周姝彤, 等. 青藏高原高寒草地土壤微生物群落及影响因子. *科学通报*, 2019, 64(27): 2915–2927.
- [55] Xu H, Ding M J, Zhang H, *et al.* Interaction effects of vegetation and soil factors on microbial communities in alpine steppe under degradation. *Environmental Science*, 2024, 45(7): 4251–4265.
徐欢, 丁明军, 张华, 等. 高寒草原退化过程中植被和土壤因子对微生物群落的交互影响. *环境科学*, 2024, 45(7): 4251–4265.