

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.02.011

引用格式:熊辉,张鲜花,撒成辉,等.施肥对阿尔泰山补播天然割草地植被-土壤-微生物的影响[J].草地学报,2026,34(2):491—500

XIONG Hui, ZHANG Xian-hua, SA Cheng-hui, et al. Effects of Fertilization on Vegetation-Soil-Microorganism in Reseeding Natural Mowing Land[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(2):491—500

施肥对阿尔泰山补播天然割草地植被-土壤-微生物的影响

熊辉^{1,2}, 张鲜花^{1,2*}, 撒成辉^{1,2}, 闫佳乐^{1,2}, 张盼盼^{1,2}, 姜嘉炫^{1,2}, 薛世杰^{1,2}

(1. 新疆农业大学草业学院, 新疆乌鲁木齐 830052; 2. 新疆草地资源与生态实验室, 新疆乌鲁木齐 830052)

摘要:本试验从植被-土壤-微生物角度评价有机肥单施和有机肥混施对退化天然割草地的恢复效果,研究以阿尔泰山天然割草地为对象,采用单施有机肥(M)、混施有机肥和生物菌肥(M+NY)、混施有机肥和复合肥(M+NPK)三个施肥措施,探究草地植被-土壤-微生物对施肥的响应。结果表明:施肥显著增加了草地群落高度、生物量、土壤有机质含量、速效氮、速效磷、速效钾含量和电导率($P<0.05$),显著降低土壤pH值($P<0.05$);土壤细菌中5个门类丰富度变化差异显著($P<0.05$),土壤真菌中2个门类丰富度变化差异显著($P<0.05$);灰色系统关联度显示,复合肥+有机肥促进植被生长、改良土壤养分以及增加微生物数量效果最好,对补播天然割草地植被-土壤-微生物系统起到快速恢复作用。试验结果为有机肥单施和有机肥与其他肥料混施在补播天然割草地生产和恢复作用提供了理论依据、数据支持以及技术支撑。

关键词:有机肥;补播天然割草地;植被特征;土壤微生物

中图分类号:S812

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)02-0491-10

Effects of Fertilization on Vegetation-Soil-Microorganism in Reseeding Natural Mowing Land

XIONG Hui^{1,2}, ZHANG Xian-hua^{1,2*}, SA Cheng-hui^{1,2}, YAN Jia-le^{1,2}, ZHANG Pan-pan^{1,2},

JIANG Jia-xuan^{1,2}, XUE Shi-jie^{1,2}

(1. College of Grassland Science, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang 830052, China;

2. Xinjiang Grassland Resources and Ecology Laboratory, Urumqi, Xinjiang 830052, China)

Abstract: In this experiment, the effects of single application of organic fertilizer and mixed application of organic fertilizer on the restoration of degraded natural mowing land were evaluated from the perspective of vegetation-soil-microorganism. The natural mowing land in Altay Mountains was used as the object of study. Three fertilization measures, single application of organic fertilizer (M), mixed application of organic fertilizer and biological fertilizer (M+NY), mixed application of organic fertilizer and compound fertilizer (M+NPK), were used to explore the responses of grassland vegetation-soil-microorganism to fertilization. The results showed that fertilization significantly increased grassland community height, biomass, soil organic matter content, available nitrogen, available phosphorus, available potassium content and electrical conductivity ($P<0.05$), and significantly reduced soil pH value ($P<0.05$). There were significant differences in the richness of 5 phyla in soil bacteria ($P<0.05$), and there were significant differences in the richness of 2 phyla in soil fungi ($P<0.05$). The grey system correlation degree showed that compound fertilizer + organic fertilizer had the best effect on promoting vegetation growth, improving soil nutrients and increasing the number of microorganisms, and had a rapid recovery effect on the vegetation-soil-microbial system of reseeded natural mowing land. The results of the experiment provide

收稿日期:2025-03-24;修回日期:2025-05-07

基金项目:2024年自治区林业发展补助资金(项目编号:XJLYKJ-2024-21)资助

作者简介:熊辉(1999-),男,汉族,湖南永州人,硕士研究生,主要从事草地资源与生态研究, E-mail: 2354615724@qq.com; *通信作者
Author for correspondence, E-mail: zxh@xjau.edu.cn

theoretical basis, data support and technical support for the production and restoration of organic fertilizer single application and organic fertilizer mixed with other fertilizers in reseeding natural mowing land.

Key words: Organic fertilizer; Reseeding natural mowing land; Vegetation characteristics; Soil microorganisms

天然割草地在阿勒泰的牧区具有举足轻重的作用,它可为家畜提供冬、春季饲草,缓解冬、春、秋季草场超载过牧的压力,在防灾减灾和保障畜牧业安全方面发挥着至关重要的作用。但由于长期不合理利用及气候条件影响,草地出现严重退化。具体表现为草层高度降低,导致草地产量和牧草品质显著下降^[1],同时,优质牧草减少,劣质与有毒有害草比例增加,草地土壤肥力也发生退化。因此,提高天然割草地的生产力和土壤肥力,对促进畜牧业可持续发展及保障生态环境安全具有重要的现实意义。

草地植被群落结构稳定、生产力提高以及土壤地力提升是退化草地生态修复关注的重点,其修复措施是维持天然草地稳定性的关键技术手段。国内外学者针对退化草地修复开展了广泛研究,提出了多种措施,包括围栏封育、免耕补播、施肥等方法^[2]。近年来,关于草地与牧草施肥领域的研究及其推广实践取得了显著进展,众多报道聚焦于施肥如何影响牧草产量,这些研究主要聚焦于化学肥料种类的选择、养分比例的优化等因素,探讨其对草地生态系统结构及牧草产量的具体影响^[3-7]。然而,在实际生产过程中,采用化学肥料进行施肥不可避免地会提升成本开支,并可能引发环境污染问题,从而对草地的生态保护造成不利影响^[8-9]。

鉴于阿尔泰山天然割草地生态保护和经济价值,探索施用有机肥和有机肥与其他肥料配施对天然割草地改良以及保护阿尔泰山生态环境、实现农牧业持续健康发展具有十分重要的意义。以往研究主要关注施肥对退化草地植物多样性、土壤理化性质或土壤微生物的影响。例如,孟愉欣等^[10]探讨了氮磷施肥对退化禾草混播草地生产力和土壤理化性质的影响;郭楠等^[11]研究了单施有机肥对河北丰宁混播草地多样性和牧草营养物质含量的作用;李泽藩等^[12]则分析了单施有机肥、微生物菌剂和叶面肥对退化草地的综合效应。然而,对于天然割草地这一重要的饲草来源地现有认识多集中于其长期割草利用模式,对其维护与提升措施的关注则相对不足。尤其是有机肥与其他肥料配施是否会对天然割草地的植被群落、土壤特性及微生物区系产生显著影响,目前尚缺乏系统研究。关于有机肥及其配施措施在提升草地生产力、改良土壤肥力以及

激活土壤微生物活性方面的具体效果与作用机制,相关报道仍然较少,亟待进一步深入探讨。

基于以上,本研究以阿尔泰山天然割草地作为研究对象,通过单独施用有机肥以及有机肥与其他肥料的组合施用,探讨有机肥与其他肥料配施对天然割草地植被-土壤-微生物的影响,旨在明确有机肥和有机肥与其他肥料配施对天然割草地的影响及作用,以期天然割草地生产力提高和地力提升提供理论支持和科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于新疆阿勒泰地区哈巴河县铁热克提乡齐巴尔希勒克村(48°26'00" N, 86°33'35" E, 海拔 1199.69 m)。该地区年均气温 6.9 °C, 年均降水量 400~500 mm, 主要集中在 7—9 月, 土壤类型为山地淋溶黑钙土。草地类型为山地草甸草地。目前由于放牧过重, 草地退化较为严重, 原生群落中的无芒雀麦(*Bromus inermis*)、鸭茅(*Dactylis glomerata*)、草地早熟禾(*Poa pratensis*)等优良牧草比例逐渐降低或消失, 优势物种已被白尖薹草(*Carex atrofusca*)、千叶蓍(*Achillea millefolium*)、水杨梅(*Geum aleppicum*)等代替, 大量巨序剪股颖(*Agrostis gigantea*)、酸模(*Rumex acetosa*)、蒲公英(*Taraxacum mongolicum*)等出现在该草地上。该草地主要利用方式为割草+放牧, 即每年 7 月 20—25 日开始打草, 之后放牧至 9 月上旬。2023 年 5 月 1 日, 根据试验区自然环境条件、原生群落植物的相容性和经济与生态价值, 选择豆科与禾本科比例为 6:4 的补播方案并进行条播。具体而言, 豆科植物中‘奇台’红豆草(*Onobrychis viciifolia* Scop.)的播种量为 60 kg·hm⁻²(占比 10%)、‘新牧 4 号’紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)的播种量为 15 kg·hm⁻²(占比 30%)、‘岷山’红三叶(*Trifolium pratense* L.)的播种量为 15 kg·hm⁻²(占比 20%); 禾本科植物中鸭茅的播种量为 22.5 kg·hm⁻²(占比 15%)、草地早熟禾的播种量为 15 kg·hm⁻²(占比 15%)、无芒雀麦的播种量为 15 kg·hm⁻²(占比 10%)。

1.2 试验设计

2024年4月,选取地势平坦且试验条件均匀一致的区域,试验设置四种处理:CK(不施肥)、NPK(单施复合肥,施用量为 $306\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,其中含氮15%、磷15%、钾15%)、M(单施有机肥/厩肥-牛粪,施用量为 $3000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,其有机质含量为 $114.9\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效氮、速效磷、速效钾含量分别为 $2.10\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, $0.02\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, $0.60\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)和NY(单施生物菌肥,施用量为 $500\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$;该生物菌肥由甘肃农业大学提供,主要成分为根瘤菌和促生菌)。每个处理3次重复,小区面积 $5\text{ m}\times 6\text{ m}$,共计12个小区。所有肥料一次性撒施于地表。

1.3 测定方法及指标

1.3.1 植被及土壤养分含量测定 植被调查和土壤取样:2024年7月27—30日,在每个 $5\text{ m}\times 6\text{ m}$ 的试验区内布设一个 $1\text{ m}\times 1\text{ m}$ 的植被调查样方,包括测定:

高度:测量样方内植物的自然生长高度。

盖度:采用针刺法测定(将 1 m^2 样方划分为100个网格点,记录每个交叉点是否有植物覆盖,根据覆盖点的比例计算盖度)。

密度:测定各物种分枝数或分蘖数。

地上生物量:采用齐地面刈割法对植株地上部分重量进行测定。

在植被调查样方内,主要测定了土壤有机质(重铬酸钾氧化-外加加热法)、pH值(pH计法)、总盐含量(EDTA-乙酸铵法)、电导率(电导率仪法)、速效氮(扩散吸收法)、速效磷(碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法)及速效钾(醋酸铵浸提-火焰光度法)含量^[13]。

1.3.2 土壤微生物测定 土壤微生物多样性和群

落组成的测定采用扩增子高通量测序技术。首先,使用土壤DNA提取试剂盒提取土壤总DNA,随后进行PCR扩增。细菌(16S)和真菌(ITS)的扩增分别采用通用引物515F-907R^[14]和ITS1F-2043R^[15]。PCR产物经纯化后,分别对16S的V3-V4区域和ITS1区域进行Miseq扩增子测序。测序数据经过拼接、质控和去接头处理后,按97%相似性对非重复序列进行OTU聚类,并去除嵌合体,最终获得OTU的代表序列和丰度表。代表序列分别通过Silva和Unite数据库进行细菌和真菌门水平的分类注释^[16]。

1.4 统计分析

采用Excel 2024对试验数据进行整理,使用SPSS 27.0对群落数量特征、土壤理化性质数据等进行差异性分析,采用One-way ANOVA和LSD检验,显著水平为 $P<0.05$;为了进行土壤微生物的Alpha多样性指数分析,采用了QIIME2软件来计算OTUs(操作分类单元)、Shannon指数、Simpson指数、Chao1指数以及系统发育多样性(Phylogenetic diversity, PD)指数。在可视化不同数据集交集情况时,选用了R语言中的UpSetR包来绘制UpSet图。为了比较不同组间微生物群落结构的相似程度,利用R语言的Vegan包执行了主成分分析(PCA),并据此绘制了相应的图表。遵循灰色系统理论,分析流程首先是进行数据标准化处理,随后计算参考量与对应样本量的绝对差值,接着依据特定公式求解各数列的关联系数,并最终通过计算各指标关联系数的算术平均值来确定灰色关联度的排序^[17]。计算公式如下:

关联系数:

$$\xi_i(k) = \frac{\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|}{|x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|}$$

$$\text{关联度: } GRG_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k)$$

式中: $\xi_i(k)$ 为灰色关联系数; GRG_i 为灰色关联度; $x_i(k)$ 表示第 k 个数据; ρ 代表可调节系数,通常取0.5。

2 结果与分析

2.1 施肥对植被群落特征的影响

如图1所示,施肥改变了草地群落高度、盖度、密度

及生物量。相比于未施肥,单施有机肥(M)、有机肥与生物菌肥(M+NY)和有机肥与复合肥(M+NPK)下的草地群落高度显著高于对照(CK)($P<0.05$)(图1a);有机肥单施及其配施处理对草地群落盖度和密度虽有提升趋势,但差异不显著(图1b,1d, $P>0.05$);在草地产量(图1c)方面,除有机肥与生物菌肥(M+NY)配施与CK无显著差异外,其他两个处理均显著高于对照(CK)($P<0.05$)。可见,施肥可以有效提高退化草地植被高度、盖度、密度及产量,且有机肥配施生物菌肥和复合肥显著促进了割草地植物的生长。

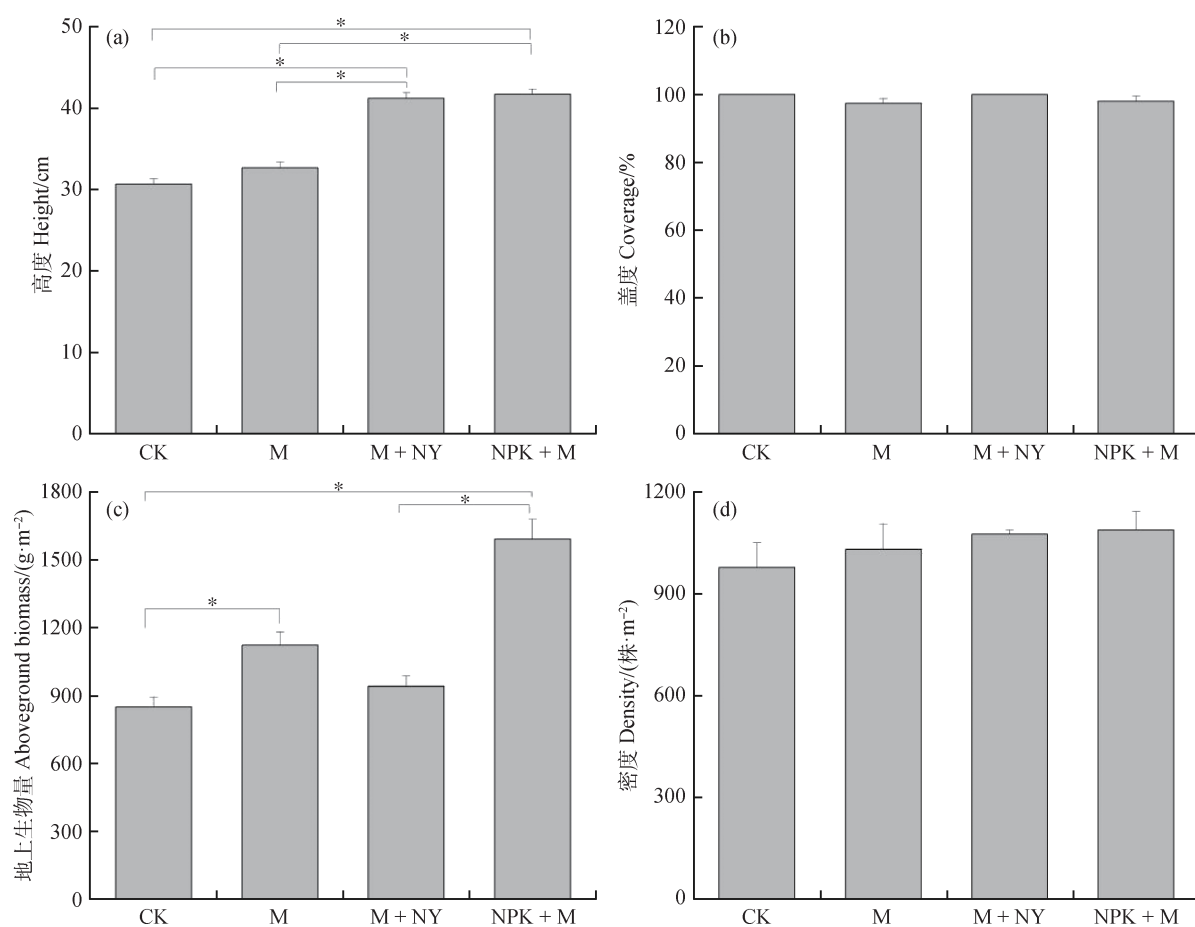


图 1 不同施肥处理下植被特征

Fig. 1 Vegetation characteristics in different restoration years after fertilization

注:CK表示对照Control;M表示有机肥;M+NY表示有机肥+生物菌肥;M+NPK表示有机肥+复合肥。***表示 $P<0.001$; **表示 $P<0.01$; *表示 $P<0.05$ 。下同

Note: CK stands for control ; M stands for organic fertilizer; M+NY stands for organic fertilizer+biological fertilizer; M+NPK stands for organic fertilizer + compound fertilizer. *** stands for $P<0.001$; ** stands for $P<0.01$; * stands for $P<0.05$. The same as below

2.2 施肥对草地土壤养分含量的影响

如表1所示,与对照相比,施肥改善了土壤养分状况,其中土壤速效钾含量和电导率有所提高,同时土壤有机质、速效氮和速效磷含量也显著增加($P<0.05$),土壤pH值显著降低($P<0.05$)。其中速效钾含量除有机肥(M)和有机肥+复合肥(M+NPK)处理显著增加外,其他处理无显著变化。所

有处理的土壤均呈酸性,施肥后pH值进一步显著降低($P<0.05$);而土壤电导率则相反,施肥后较对照显著升高($P<0.05$)。总体而言,施肥显著改变了天然割草地的土壤养分状况,尤其是有机肥与复合肥配施(M+NPK)处理,显著提升了土壤有机质、速效氮、速效磷和速效钾含量($P<0.05$),同时降低了土壤pH值并提高了电导率。

表 1 不同施肥处理下天然割草地土壤养分含量

Table 1 Physical properties of desert steppe soil in different fertilization treatments

处理 Treatment	有机质 Organic matter/ (g·kg ⁻¹)	速效氮 Available nitrogen content/(mg·kg ⁻¹)	速效磷 Available phosphorus content/(mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available potassium content/(mg·kg ⁻¹)	pH值 pH value	电导率 Electric conductivity/ (μS·cm ⁻¹)
CK	43.60±1.50 ^b	69.66±0.06 ^b	22.77±1.31 ^d	135.21±7.81 ^b	5.95±0.08 ^a	70.83±2.23 ^b
M	113.62±6.84 ^a	109.54±3.78 ^a	50.24±1.45 ^b	243.75±14.07 ^a	5.59±0.03 ^b	128.87±7.44 ^a
M+NY	106.10±3.66 ^a	106.89±3.69 ^a	32.61±1.88 ^c	171.43±9.90 ^b	5.36±0.07 ^c	122.10±7.05 ^a
NPK+M	101.86±2.03 ^a	105.79±3.65 ^a	57.96±3.35 ^a	226.31±13.07 ^a	5.37±0.04 ^c	134.27±7.75 ^a

注:表中不同小写字母表示各处理间存在显著性差异($P<0.05$),下同

Note: In the table, different lowercase letters indicate that there are significant differences between treatments ($P<0.05$), the same as below

2.3 施肥对土壤微生物群落的影响

2.3.1 对微生物群落组成的影响

施肥显著增加了天然割草地土壤微生物群落的物种多样性。施肥后,土壤细菌 OTU 总数明显增加,表现为 $CK < M + NPK < M + NY < M$ (图 2a);在门水平上,土壤细菌的物种丰富度也发生了不同程度的变化(图 3a)。基于门水平的 Kruskal-Wallis 秩和检验结果显示,共有 5 个门类在施肥处理下丰富度表现出显著差异($P < 0.05$),分别为酸杆菌门(Acidobacteriota)(22.0%~27.1%),绿弯菌门(Chloroflexi)(7.2%~13.3%),未分类(Unclassi-

fied)(5.2%~5.3%),黏球菌门(Myxococcota)(2.5%~2.8%)和拟杆菌门(Bacteroidota)(2.8%~3.1%)(图 3)。同时,施肥后,土壤真菌 OTU 总数有增加有减少,表现为 $M + NY < CK < M < M + NPK$;不同门类真菌的丰度在各处理间出现了不同程度的变化(图 3),经门水平的 Kruskal-Wallis 秩和检验后,仅子囊菌门(Ascomycota)(53.5%~68.3%)和担子菌门(Basidiomycota)(12.6%~19.7%)的丰富度有显著差异($P < 0.05$)。总体来看,不同施肥处理显著增加了土壤微生物的种类和数量,同时提升了土壤微生物的多样性。

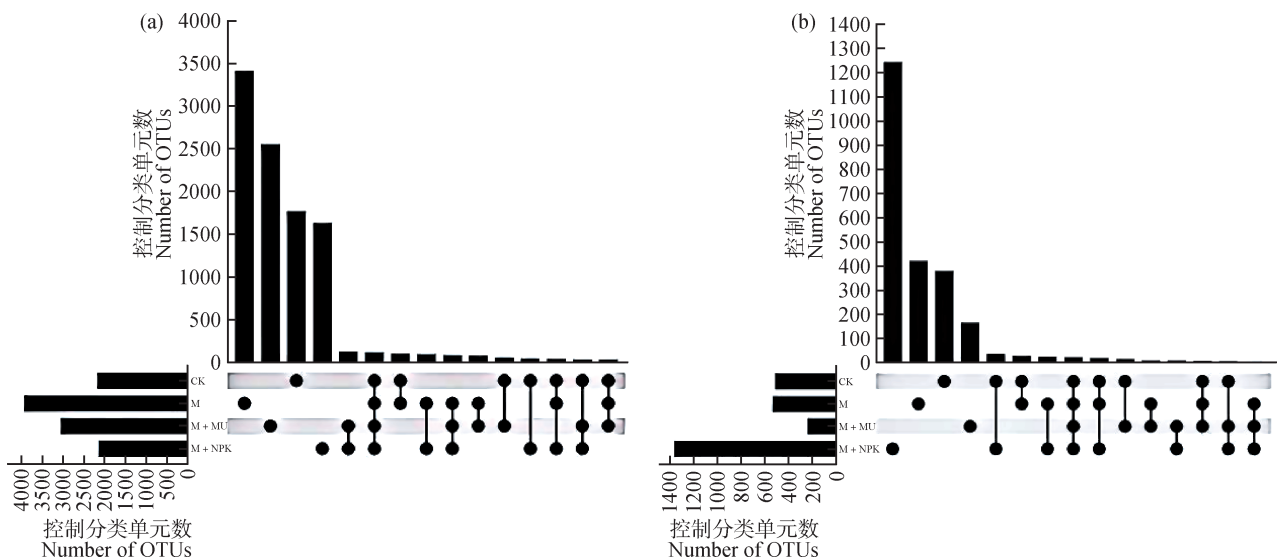


图2 不同施肥处理天然割草地土壤菌群基于 OTU 水平的 Upset 图

Fig. 2 Upset map of soil microbes in desert steppe under different fertilization treatments based on OTU level

注:图中的 a 为细菌, b 为真菌

Note: In the figure, a is bacteria and b is fungus

2.3.2 对土壤微生物群落多样性的影响 (1) α 多样性。施肥提升了天然割草地土壤微生物的 α 多样性。如图 4 所示,施肥能够促进土壤样品中微生物 OTU 数量的增长,并且对土壤细菌 ACE 指数有着明显的提升作用。与对照组(CK)相比,施用有机肥、生物菌肥(M+NY)以及有机肥和复合肥(M+NPK)均能显著提升土壤细菌的 ACE 指数($P < 0.01$)(图 4a),且有机肥、生物菌肥(M+NY)以及有机肥和复合肥(M+NPK)处理下真菌 ACE 指数也显著($P < 0.05$)高于对照(CK)($P < 0.05$)(图 4b);细菌 Shannon 指数在各处理下未呈现出显著差异(图 4c),真菌 Shannon 指数却表现出生物菌肥(M+NY)显著高于对照(CK)($P < 0.05$)(图 4d)。细菌 PD 指数(图 4e)和真菌 PD 指数(图 4f),均显示

有机肥和生物菌肥(M+NY)的显著高于对照(CK)($P < 0.05$)。以上说明施加有机肥和生物菌肥有助于增加土壤微生物 α 多样性。

(2) β 多样性。经分析发现,施肥对土壤细菌与真菌的 β 多样性产生了显著影响(图 5)。从 PCoA 结果来看,对于细菌群落,PCoA1 轴和 PCoA2 轴分别解释了总变异的 55.7% 和 18.04%;而对于真菌群落,这两个轴则分别解释了 31.93% 和 19.84% 的总变异。进一步的 ANOSIM 分析显示,不同处理下的土壤细菌和真菌 β 多样性存在显著差异($P = 0.001$)。具体而言,施肥处理后的土壤细菌和真菌群落均表现出明显的聚集性,且与对照组(CK)群落有显著分离($P < 0.05$),这表明施肥不仅改变了土壤微生物群落的组成,还影响了其结构和分布。

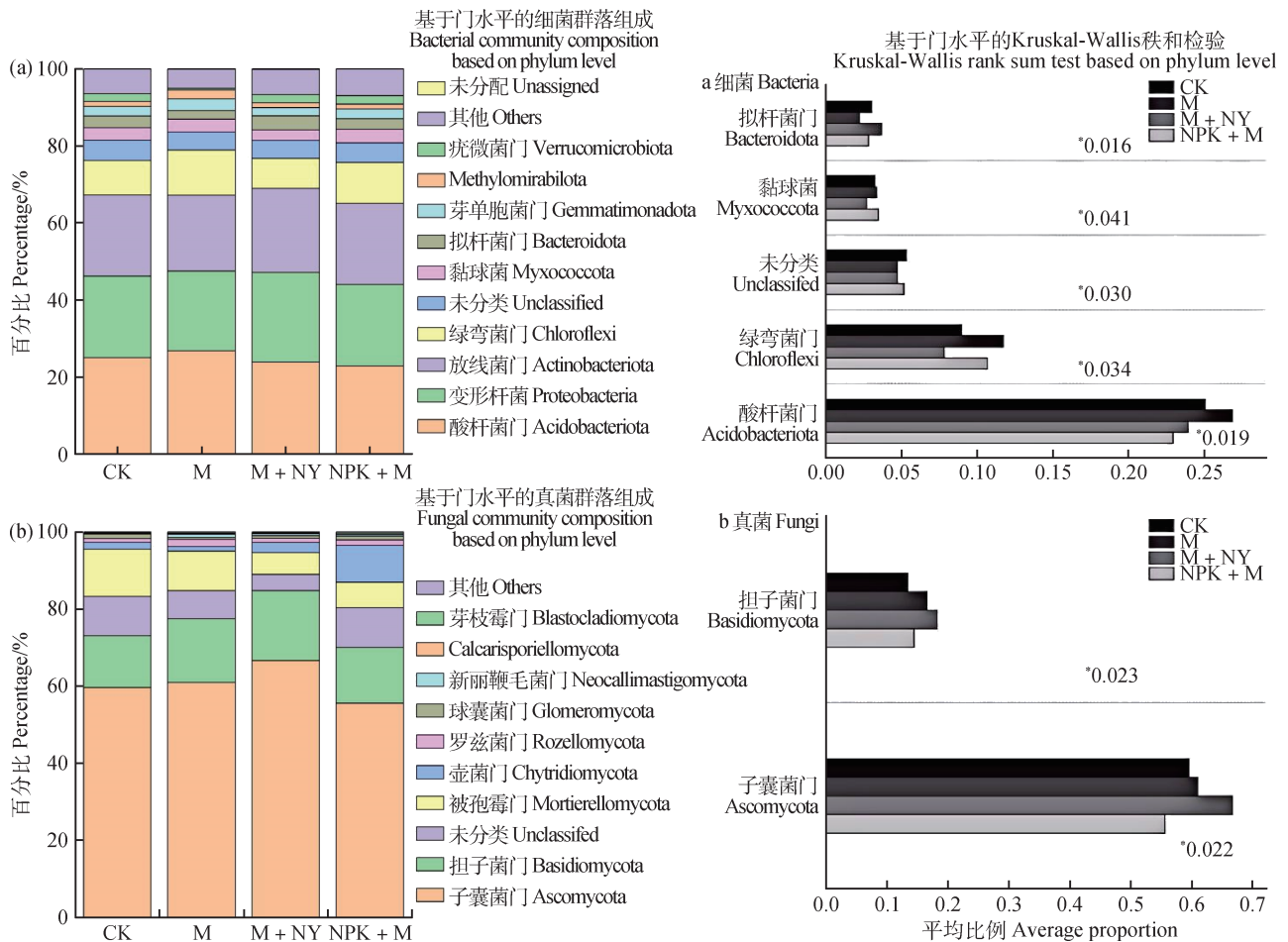


图3 不同施肥处理对天然割草地土壤微生物群落的影响(基于门水平)

Fig. 3 Effects of MOF addition on soil microbial community in desert steppe (based on phylum level)

注: 图中的a为细菌, b为真菌

Note: In the figure, a is bacteria and b is fungus

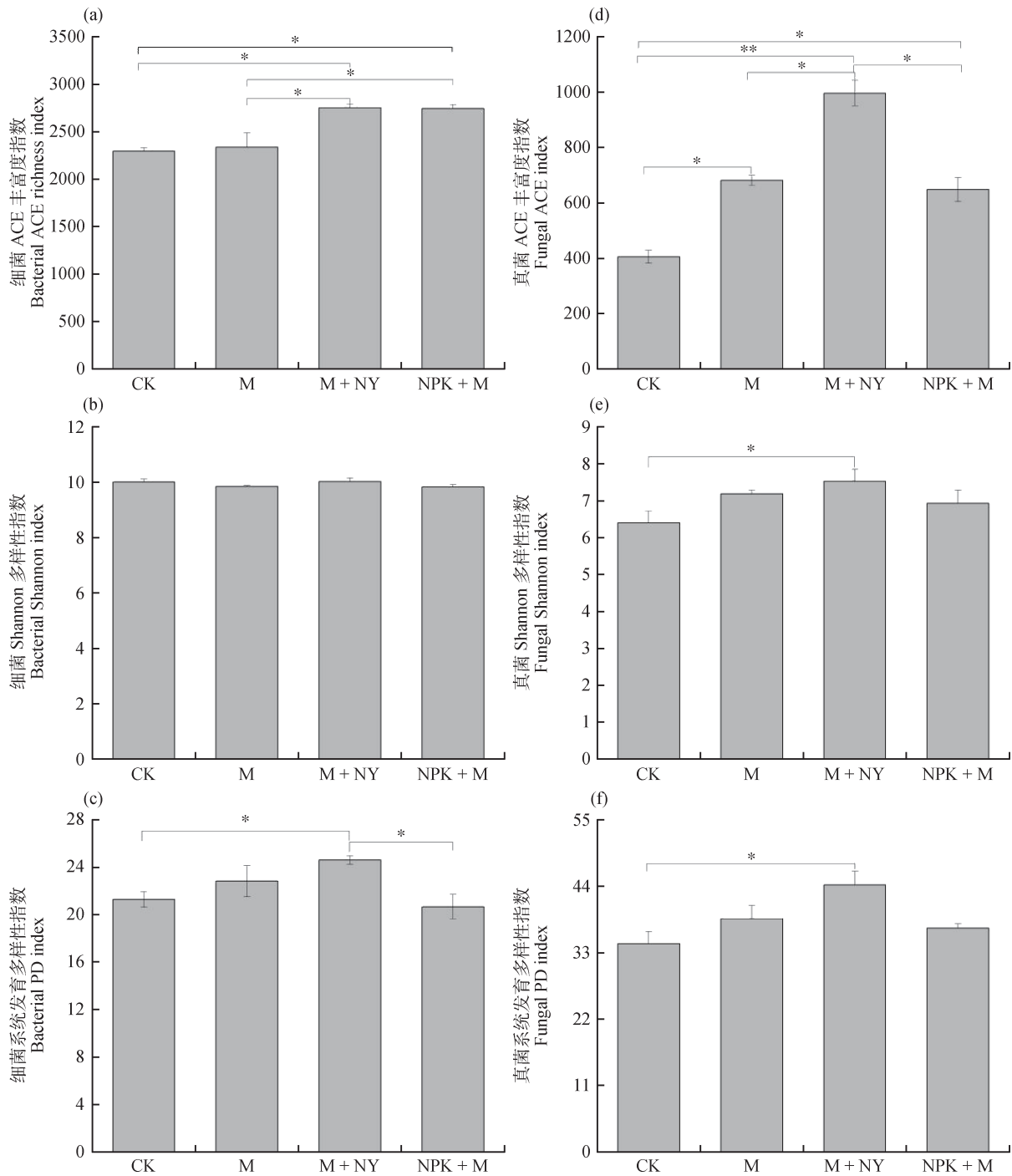
2.4 相关性分析

进行相关性分析以探究施肥处理下各指标之间的关系, 结果见表2, 表明各测定指标之间存在显著的相关性。具体而言, 草地群落高度与产量、速效氮和电导率, 产量与电导率均表现出显著的正相关($P < 0.05$)。此外, 生物量与速效磷、速效钾含量, 有机质含量与速效氮、磷、钾含量和电导率, 速效氮与速效磷、速效钾含量和电导率, 速效磷与速效钾含量和电导率, 速效钾含量与电导率均呈现出极显著的正相关($P < 0.01$)。相反, pH值与高度、有机质、速效氮含量和电导率呈极显著的负相关($P < 0.01$), 并且与速效磷含量表现出显著的负相关

($P < 0.05$)。

2.5 施肥对植被-土壤-微生物影响的综合分析

关联度排序是指依据不同处理条件下所得灰色关联度的大小进行排列, 以此来全面评估各种处理对草地修复效果的好坏。具体而言, 关联度越高, 意味着该处理对草地的修复效果越显著; 反之, 关联度越低, 则修复效果越不理想。表3的数据表明, 各处理下的关联度排序是 $NPK+M > M+NY > M > CK$, 说明在 $NPK+M$ 处理(复合肥+有机肥)下草地的综合修复效果最佳。

图4 不同施肥处理对土壤微生物 α 多样性的影响Fig. 4 The impact of different fertilization treatments on soil microbial α -diversity

3 讨论

本研究通过测量草地植被群落高度、盖度、密度和生物量,发现有机肥与其他两种肥料配施对天然割草地植被的生长起到促进作用。施肥能够为土壤补充养分,从而促进植被生长,这一发现不仅与以往的研究成果相符^[18-21],也与高寒草甸、荒漠草原和草甸草原的相关研究结论一致^[22-26]。单施有机肥的效

果低于配施处理,这一现象可能与肥料用量及其协同效应有关,具体机制需通过后续试验进一步验证。

在本研究中,通过测定土壤有机质含量、pH值、电导率以及速效氮、磷、钾含量等指标,发现施用有机肥、有机肥与生物菌肥以及有机肥与复合肥的组合,均能使土壤有机质含量、电导率和速效氮、磷、钾含量得到提升。这表明,单独使用有机肥或将其与生物菌肥、复合肥搭配施用,能够有效改善土壤的物

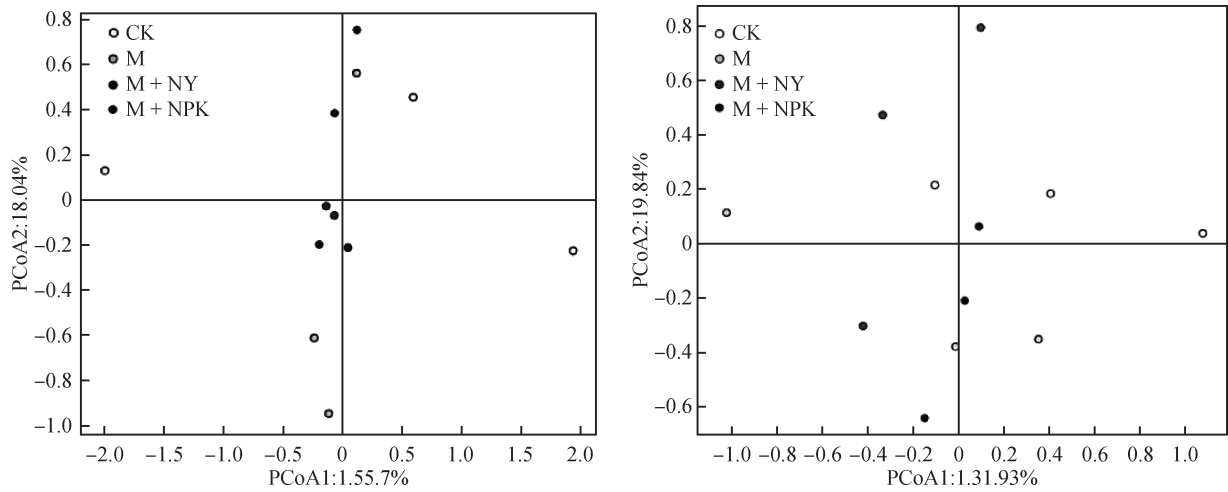


图5 不同施肥处理对土壤微生物β多样性的影响

Fig. 5 The impact of different fertilization treatments on soil microbial β-diversity

表2 施肥处理下各指标间相关性分析

Table 2 Correlation between soil chemical properties and enzyme activities

指标 Index	高度 Height	生物量 Biomass	有机质含量 Organic content	速效氮含量 Available nitrogen content	速效磷含量 Available phosphorus content	速效钾含量 Available potassium content	电导率 Electric conductivity	pH值 pH value	细菌数量 Bacteria amount	真菌数量 Fungi amount
高度 Height	1									
生物量 Biomass	0.579*	1								
有机质含量 Organic content	0.573	0.485	1							
速效氮含量 Available nitrogen content	0.629*	0.544	0.985**	1						
速效磷含量 Available phosphorus content	0.455	0.909**	0.720**	0.746**	1					
速效钾含量 Available potassium content	0.296	0.739**	0.787**	0.804**	0.932**	1				
电导率 Electric conductivity	0.674*	0.698*	0.927**	0.964**	0.844**	0.858**	1			
pH值 pH value	-0.838**	-0.526	-0.794**	-0.844**	-0.576*	-0.491	-0.834**	1		
细菌数量 Bacteria amount	0.299	-0.115	0.309	0.267	-0.006	-0.04	0.17	-0.387	1	
真菌数量 Fungi amount	0.102	-0.163	-0.199	-0.135	-0.29	-0.172	-0.11	0.227	-0.062	1

表3 施肥措施下各指标的关联度排序

Table 3 The order of correlation degree of each index under fertilization measures

处理 Treatment	关联度 Correlation degree	排名 Ranking
CK	0.5835	4
M	0.8218	3
M+NY	0.8289	2
NPK+M	0.8703	1

理和化学性质,增加土壤中的养分含量。这一结论与前人关于土壤黏粒与养分之间存在正相关关系,以及长期施用有机肥可使土壤氮含量增加的研究结果相符^[27-30]。虽然本试验对象为酸性土壤,但研究所采用的施肥处理对土壤盐碱离子调控显示出潜在作用,后续可拓展开盐碱化土壤改良验证试验。

本研究通过对土壤样品中细菌与真菌 OTU 数据进行分析,发现复合肥、有机肥和生物菌肥的施加都增加了土壤中细菌的数量,减少了真菌的数

量,其原因可能是在施肥的影响下,细菌和真菌这两大微生物类群展现出了不同的响应模式,这种差异归因于它们各自独特的生物学特性。具体来说,施肥行为促进了土壤中有有机质含量的提升,为细菌创造了一个更加优越的生长条件,进而有利于细菌的存活与繁殖;不同肥料对微生物群落多样性的影响存在差异,其中施肥通常能提升土壤细菌群落的多样性,而相应地减少土壤真菌群落的多样性,这一发现与多数既有研究结论相符^[32]。同时,施加复合肥、有机肥和生物菌肥也导致了土壤真菌与细菌群落结构的改变,这一发现与前人的研究成果相吻合。例如,薛晓敏等^[32]发现,有机肥与化肥配施可为土壤微生物提供丰富碳源,并显著影响土壤微生物群落结构,促进土壤微生物固氮,调整土壤碳氮比,进而改变土壤微生物群落组成。费裕坤等^[33]研究表明,有机肥与化肥配施能显著提高土壤养分含量,增加土壤微生物丰富度,为土壤理化性质改良

提供条件,提高退化土壤微生物活性。不同肥料施用会改变土壤细菌和真菌群落结构,表明草地土壤环境在施用不同肥料后会发生相应变化^[34]。

灰色关联度分析法是一种综合多指标评价手段,它克服了单一指标评价的局限性,能够对处理效应进行全面而深入的评估^[35]。在本研究中,我们基于灰色系统关联度理论,精心挑选了12项关键指标进行综合考量。分析结果显示,NPK+M处理(复合肥结合有机肥)在关联度排名第一,这有力地证明了其卓越的综合修复效能。值得注意的是,灰色关联度分析所得结论与单一指标评估结果高度一致,这不仅彰显了该评价方法的稳健性和可靠性,也进一步验证了NPK+M处理在综合修复方面的显著优势。

4 结论

本研究证实有机肥配施复合肥(NPK+M)可协同促进退化草地多系统恢复:显著提升植物盖度与生物量($P < 0.05$);同步改良土壤养分结构并优化微生物群落多样性。基于灰色关联度模型构建12指标综合评价体系,揭示NPK+M处理关联度排名为第一,其通过“植被-土壤-微生物”协同增效机制,在补播天然割草地中展现最优生态修复效能,为退化天然割草地生态系统的快速修复提供了创新的策略和实践方法。

参考文献

- [1] 童永尚,张春平,俞畅,等. 环青海湖地区多年生禾草的混播效应[J]. 草地学报,2023,31(7):2203-2209
TONG Y S, ZHANG C P, YU Y, et al. Mixed sowing effects of perennial grasses in the Qinghai Lake region[J]. Acta Agrestia Sinica, 2023, 31(7): 2203-2209
- [2] 张英俊,周冀琼,杨高文,等. 退化草原植被免耕补播修复理论与实践[J]. 科学通报,2020,65(16):1546-1555
ZHANG Y J, ZHOU J Q, YANG G W, et al. Theory and application of no-tillage reseeding in degraded grasslands[J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(16): 1546-1555
- [3] 德科加. 青藏高原高寒草甸草地NPK施肥组合研究[J]. 草原与草坪,2010,30(4):22-25
DE K J. Study on NPK fertilizer application in alpine meadow on Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Grassland and Turf, 2010, 30(4): 22-25
- [4] 马青山. 施肥对高寒草甸草地群落及产量的影响[J]. 草原与草坪,2011,31(3):94-96
MA Q S. Impact of Fertilization on vegetation structure and yield of alpine meadow[J]. Grassland and Turf, 2011, 31(3): 94-96
- [5] 陈亚明,李自珍,杜国祯. 施肥对高寒草甸植物多样性和经济类群的影响[J]. 西北植物学报,2004,24(3):424-429
CHEN Y M, LI Z Z, DU G Z. Effects of fertilization on plant diversity and economic herbage groups in alpine meadow[J]. Acta Botanica Boreali-occidentalia Sinica, 2004, 24(3): 424-429
- [6] 德科加,周青平,徐成体,等. 施肥对青海省山地草原类草地上生物量的影响[J]. 中国土壤与肥料,2010(3):38-40
DE K J, ZHOU Q P, XU C T, et al. Effect of fertilization on above-ground biomass of mountain meadow in Qinghai Province[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2010(3): 38-40
- [7] 李小坤,鲁剑巍,陈防. 牧草施肥研究进展[J]. 草业学报,2008,17(2):136-142
LI X K, LU J W, CHEN F. Primary study on fertilizer application of forage[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2008, 17(2): 136-142
- [8] 德科加,张德罡,芦光新,等. 牦牛粪便对高寒草甸群落多样性及生产力的影响[J]. 草原与草坪,2013,33(6):9-13
DE K J, ZHANG D G, LU G X, et al. Effect of yak dung on plant diversity and productivity of alpine meadow[J]. Grassland and Turf, 2013, 33(6): 9-13
- [9] 赵娜,贾力,刘洪来,等. 氮肥的环境风险及管理研究进展[J]. 草原与草坪,2011,31(1):89-93,96
ZHAO N, JIA L, LIU H L, et al. Environmental risk and management of nitrogen fertilizer[J]. Grassland and Turf, 2011, 31(1): 89-93, 96
- [10] 孟愉欣,刘婉婷,王正文,等. 氮磷施肥对退化禾草混播草地生产力和土壤理化性质的影响[J]. 生态学报,2025,45(7):3204-3217
MENG Y X, LIU W T, WANG Z W, et al. Effects of nitrogen and phosphorus fertilization on productivity and soil physicochemical properties of degraded grass mixed-sowing grassland[J]. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(7): 3204-3217
- [11] 郭楠,姜峡,李佳嵘,等. 施肥对河北丰宁混播草地多样性和牧草营养物质含量的影响[J]. 饲料研究,2024,47(21):115-119
GUO N, JIANG S, LI J R, et al. Effects of fertilization on diversity and nutrient content of forage in mixed sowing grassland in Fengning, Hebei Province[J]. Feed Research, 2024, 47(21): 115-119
- [12] 李泽藩,张振豪,董书明,等. 施肥对退化草地植被生产力和群落结构特征的影响[J]. 草地学报,2024,23(9):2973-2981
LI Z F, ZHANG Z H, DONG S M, et al. Effects of fertilization on vegetation productivity and community structure characteristics of degraded grassland[J]. Acta Agrestia Sinica, 2024, 23(9): 2973-2981
- [13] 宋永林,姚造华,袁锋明. 不同肥料配施对土壤主要养分含量及作物氮、磷、钾表观利用率的影响[J]. 土壤肥料,2002(3):23-25
SONG Y L, YAO Z H, YUAN F M. Effects of different fertilizer combinations on main nutrient contents in soil and apparent utilization rate of nitrogen, phosphorus and potassium in crops[J]. Soils and Fertilizers, 2002(3): 23-25
- [14] MOHD YUSOFF M Z, HU A Y, FENG C J, et al. Influence of pretreated activated sludge for electricity generation in microbial fuel cell application[J]. Bioresource Technology, 2013, 145: 90-96
- [15] ADAMS R I, MILETTO M, TAYLOR J W, et al. Dispersal in microbes: fungi in indoor air are dominated by outdoor air and show dispersal limitation at short distances[J]. The ISME Journal, 2013, 7(7): 1262-1273
- [16] 蒋星驰,李俊瑶,陈峰,等. 阴山北麓荒漠区6种植物群落的土壤细菌特征[J]. 干旱区研究,2022,39(4):1122-1132
JIANG X C, LI J Y, CHEN F, et al. Soil bacterial characteristics of six plant communities in the desert areas to the North of

- Yinshan Mountains [J]. *Arid Zone Research*, 2022, 39 (4): 1122-1132
- [17] 孙彦旭,周自翔,米朝娟,等. 基于土地利用覆被变化(LUCC)的人类活动与流域生物多样性灰色关联分析[J]. *干旱区研究*, 2021, 38(6):1782-1792
- SUN Y X., ZHOU Z X., MI C J., et al. Grey correlation analysis between human activities and watershed biodiversity based on land use/cover change (LUCC) [J]. *Arid Zone Research*, 2021, 38(6):1782-1792
- [18] 周国英,陈桂琛,赵以莲,等. 施肥和围栏封育对青海湖地区高寒草原影响的比较研究 II 地上生物量季节动态[J]. *草业科学*, 2005, 22(1):59-63
- ZHOU G Y., CHEN G C., ZHAO Y L., et al. Comparative studies on the influence of chemical fertilizer application and enclosure on alpine steppes in Qinghai Lake area II Seasonal and Annual Biomass Dynamics [J]. *Pratacultural Science*, 2005, 22(1):59-63
- [19] 程积民,贾恒义,彭祥林,等. 施肥草地植被群落结构和演替的研究[J]. *水土保持研究*, 1996, 3(4):124-128
- CHENG J M., JIA H Y., PENG X L. Study on community structure and succession of vegetation in fertilized grassland [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 1996, 3(4):124-128
- [20] 孙斌. 三种改良措施对高寒退化草地植被的影响[J]. *甘肃农业大学学报*, 2005, 40(6):797-801
- SUN B. Three grassland improvement measures on alpine degraded grassland vegetation [J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2005, 40(6):797-801
- [21] 邱波,罗燕江. 不同施肥梯度对甘南退化高寒草甸生产力和物种多样性的影响[J]. *兰州大学学报*, 2004, 40(3):56-59
- QIU B., LUO Y J. Effects of fertilizer gradients on productivity and species diversity in a degraded alpine meadow [J]. *Journal of Lanzhou University*, 2004, 40(3):56-59
- [22] 张楚,王森,张宇,等. 切根与施有机肥对羊草草甸草原打草场地上生物量与土壤养分的影响[J]. *草地学报*, 2022, 30 (1): 220-228
- ZHANG C., WANG M., ZHANG Y., et al. Effects of root cutting and organic fertilizer application on aboveground biomass and soil nutrients in *Leymus chinensis* meadow steppe hayfield [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2022, 30(1), 220-228
- [23] 王长庭,王根绪,刘伟,等. 施肥梯度对高寒草甸群落结构、功能和土壤质量的影响[J]. *生态学报*, 2013, 33(10):3103-3113
- WANG C T., WANG G X., LIU W., et al. Effects of fertilization gradients on plant community structure and soil characteristics in alpine meadow [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33 (10): 3103-3113
- [24] 赵甜. 不同措施及处理后年限对锡林郭勒退化草甸草原群落特征和土壤理化性质的影响[D]. 呼和浩特:内蒙古大学, 2022:11-16
- ZHAO T. Effects of different measures and years after treatment on grassland community characteristics and soil physical and chemical properties of degraded meadow in Xilinguole [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2022:11-16
- [25] 李俊瑶,蒋星驰,胡晋瑜,等. 生物有机肥施加对荒漠草原植被-土壤-微生物的影响[J]. *草业学报*, 2024, 33(3): 34-45
- LI J Y., JIANG X C., HU J Y., et al. Effects of bio-organic fertilizer application on vegetation-soil-microorganisms in desert steppe [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2024, 33(3), 34-45
- [26] 马祥,贾志锋,张永超,等. 生物有机肥对青海高寒牧区燕麦产量和土壤肥力的影响[J]. *草地学报*, 2019, 27(6):1759-1765
- MA X., JIA Z F., ZHANG Y C., et al. Effects of bio-organic fertilizers on oat production and soil fertility in alpine region of Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2019, 27 (6): 1759-1765
- [27] LIU S B., WANG J Y., PU S Y., et al. Impact of manure on soil biochemical properties: A global synthesis [J]. *Science of The Total Environment*, 2020, 745:141003
- [28] 再吐尼古丽·库尔班,吐尔逊·吐尔洪,山其米克,等. 施肥对不同生育期甜高粱土壤养分含量的影响[J]. *草地学报*, 2021, 29(1):103-113
- KUERBAN Z., TUERHONG T., SHANQIMIKE, et al. Study on the change of soil nutrient content in the growth period of sweet sorghum under different fertilization [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(1):103-113
- [29] 刘杏兰,高宗,刘存寿,等. 有机-无机肥配施的增产效应及对土壤肥力影响的定位研究[J]. *土壤学报*, 1996, 33(2):138-142, 142, 144-147
- LIU X L., GAO Z., LIU C S., et al. Study on the effect of combined application of organic and inorganic fertilizers on yield increase and its influence on soil fertility [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1996, 33(2):138-142, 142, 144-147
- [30] 马钊,郑桂亮,何峰,等. 施用有机无机复混肥对盐碱地紫花苜蓿生产性能、营养品质和土壤养分含量的影响[J]. *草地学报*, 2019, 27(2):466-472
- MA Z., ZHENG G L., HE F., et al. Effects of applying organic-inorganic compound fertilizer on production performance, nutritional quality and soil nutrient content of alfalfa in saline-alkali soil [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2019, 27(2):466-472
- [31] CHEN D M., YUAN L., LIU Y R., et al. Long-term application of manures plus chemical fertilizers sustained high rice yield and improved soil chemical and bacterial properties [J]. *European Journal of Agronomy*, 2017, 90:34-42
- [32] 薛晓敏,韩雪平,陈汝,等. 生物有机肥对红富士树体生长及土壤微生物群落结构的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2020(6):163-173
- XUE X M., HAN X P., CHEN R., et al. Effects of biological organic fertilizer on growth and soil microbial community structure of red Fuji tree [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2020(6):163-173
- [33] 费裕彬,黄樱,张筱,等. 不同有机肥处理对紫色土油茶林土壤微生物群落结构的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2020, 26(4):919-927
- FEI Y C., HUANG Y., ZHANG X., et al. Effects of different organic fertilizer treatments on the soil microbial community structure of a *Camellia oleifera* plantation in a purple soil area [J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2020, 26 (4):919-927
- [34] HE Y., LU L., PENG C., et al. High-yield grass *Pennisetum sinense* Roxb plantation and organic manure alter bacterial and fungal communities structure in an ecological agriculture farm [J]. *AMB Express*, 2020, 10(1):86
- [35] 刘国富,孙雪,肖知新,等. 补播和施肥对退化草甸土壤化学性质及酶活性的影响[J]. *中国草地学报*, 2022, 44(11):66-75
- LIU G F., SUN X., XIAO Z X., et al. Effects of reseeding and fertilizing on the chemical properties and enzyme activities of degraded meadow soils [J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2022, 44(11):66-75