

DOI: 10.20103/j.stxb.202407161667

任思雨, 刘雨涵, 刘颖慧, 许茗雯. 复合微生物菌剂对退化草地植物生长和土壤质量的影响. 生态学报, 2025, 45(7): 3240-3251.

Ren S Y, Liu Y H, Liu Y H, Xu M W. Effects of microbial compound inoculants on plant growth and soil quality in degraded grasslands. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(7): 3240-3251.

复合微生物菌剂对退化草地植物生长和土壤质量的影响

任思雨, 刘雨涵, 刘颖慧*, 许茗雯

北京师范大学地理科学学部, 北京 100875

摘要: 北方农牧交错带是我国重要的生态屏障, 但由于全球变化和人类活动加剧, 该区域的草地退化现象加剧, 迫切需要绿色可持续的土壤恢复措施。微生物和有机肥在农业土壤改良中表现出积极作用。然而, 关于复合微生物菌剂在生态脆弱区退化草地恢复的应用研究较少。复合微生物菌剂因其多菌种协同作用, 能够在改良土壤结构、提升土壤肥力、促进植物生长方面发挥重要潜力, 有望成为一种低成本、高效率的草地修复策略。通过盆栽实验, 选择枯草芽孢杆菌、盐居固氮菌和层状近明球囊霉菌这三种有益微生物, 结合有机肥进行单独或组合施用, 探讨了其对退化草地土壤理化性质、微生物因子及植物生物量的影响, 并利用隶属函数结合因子分析方法计算土壤质量评分综合指标, 比较不同菌剂添加下的土壤质量改善效果。结果显示, 有机肥结合有益微生物显著提高了土壤养分有效性, 改善了土壤质量。与单独施用有机肥相比, 添加微生物菌剂显著促进了植物生长及其养分吸收, 三菌混施效果最佳。同时, 研究发现, 不同复合微生物菌剂组合间存在协同作用, 增强了微生物在土壤中的功能表现, 如提高土壤酶活性、促进土壤养分循环、增强微生物生物量等, 最终提升了植物的养分吸收和生长能力。研究为基于微生物的草地生态恢复技术提供了可行路径和理论依据, 为改善退化草地生态系统功能、维持土壤健康和保障草地可持续发展提供了科学视角和实践指导。

关键词: 退化草地; 菌剂; 土壤质量; 植物生物量; 土壤养分

Effects of microbial compound inoculants on plant growth and soil quality in degraded grasslands

REN Siyu, LIU Yuhan, LIU Yinghui*, XU Mingwen

Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract: The northern agro-pastoral zone is an important ecological barrier in China, but the degradation of grasslands in the region has intensified as a result of global changes and intensified human activities, and there is an urgent need for green and sustainable soil restoration measures. Microorganisms and organic fertilisers have shown a positive role in agricultural soil improvement. However, there are fewer studies on the application of microbial compound inoculants in the restoration of degraded grasslands in ecologically fragile areas. Microbial compound inoculants are able to play an important potential in improving soil structure, enhancing soil fertility, and promoting plant growth due to the synergistic effect of multiple strains, which is expected to be a low-cost and high-efficiency strategy for grassland restoration. In this study, three beneficial microorganisms, namely *Bacillus subtilis*, *Azotobacter salinestris*, and *Claroideoglomus lamellosum*, were selected and applied in a pot experiments, either individually or in combination with organic fertilizers, to investigate the effects on the physicochemical properties of the degraded grassland soil, microbial factors and plant biomass, and to compute the

基金项目: 国家重点研发计划 (2022YFF1302803)

收稿日期: 2024-07-16; 网络出版日期: 2025-01-02

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lyh@bnu.edu.cn

comprehensive indexes of soil quality scores by using the affiliation function in combination with the factor analysis method, to compare the soil quality improvement effects of the different microbial additives. The results showed that organic fertiliser combined with beneficial microorganisms could improve the soil quality. The results showed that the combination of organic fertiliser with beneficial microorganisms significantly increased the effectiveness of soil nutrients and improved soil quality. Compared with the application of organic fertiliser alone, the addition of microbial inoculants significantly promoted plant growth and nutrient uptake, and the best effect was achieved by the mixing of three microorganisms. At the same time, it was found that there were synergistic effects among different combinations of microbial composites, which enhanced the functional performance of microorganisms in the soil, such as increasing soil enzyme activity, promoting soil nutrient cycling, and enhancing the microbial biomass, which ultimately enhanced the nutrient uptake and growth of plants. This study provides a feasible path and theoretical basis for microbial-based grassland ecological restoration technology, and provides scientific perspectives and practical guidance for improving the function of degraded grassland ecosystems, maintaining soil health and guaranteeing the sustainable development of grasslands.

Key Words: degraded grassland; microbial inoculant; soil quality; plant biomass; soil nutrient

草地是全球重要的生物多样性库,具有粮食生产、碳储存、供水和缓解气候变化等多种生态系统服务功能^[1]。作为干旱区与非干旱区之间的过渡景观,草地是关键的自然资源,也是我国重要的生态屏障。内蒙古草原是典型的中纬度半干旱温带草原^[2],位于北方农牧交错带。北方农牧交错带作为中东部地区重要的生态安全屏障和京津冀地区重要的水源涵养带,对国家的生态安全具有重要意义^[3]。但由于该区域气候多变、土质粗疏、自然灾害频发、人类活动加剧,草地退化现象日益严重,使之成为生态脆弱带和经济贫困带^[4]。因此,迫切需要有效的草地退化防治和恢复方案。

目前,用于恢复退化草地的方法主要包括围封禁牧、季节性休牧等管理制度,草地浅耕、牧草轮播等耕种技术,以及肥水耦合、草地施肥等施肥技术^[5]。这些方法在一定程度上促进了草地恢复,但由于依赖物理、化学手段,往往伴随较高的资源投入,且可能引发二次污染。相较于这些传统方法,基于微生物的草地退化修复是一种低成本、高效率、可持续的恢复途径^[6]。一些微生物群落具有溶磷、固氮、分泌植物激素及拮抗植物病原菌等功能。利用有益功能微生物制成的微生物菌剂不仅能促进植物生长,还能改善土壤结构、提高土壤生物活性,防止土壤退化^[7]。通过这种方法促进退化草地恢复具有环保、低能耗且绿色可持续的优势^[8]。土壤微生物群落在植被恢复、土壤结构和功能的调节,尤其是养分循环中起关键作用,同时影响植物群落的动态^[9-10]。已有研究证明了丛枝菌根真菌、芽孢杆菌、固氮菌等微生物能够有效调节植物生长和土壤养分^[11-13]。然而,当前将微生物菌剂应用于退化草地土壤修复的相关研发和应用还较为有限,未来研究和推广的空间广阔。

为了更全面地评估复合微生物菌剂在草地恢复中的作用,有必要进行土壤质量评价。土壤质量是指土壤生态系统中维持生物生产、保护环境质量以及促进动植物健康的能力^[14]。土壤质量评价包括物理、化学和生物三个方面^[15]。理化指标如土壤孔隙度和渗透性、土壤有机质、养分含量和 pH 等^[16],生物指标如土壤微生物生物量、微生物多样性和酶活性等^[17],可以揭示施加生物肥料后退化土壤恢复的状况。通过评价不同类型肥料对土壤理化性质和植物生长的影响,有助于研发有效的复合微生物菌剂,并及时掌握土壤质量的变化,实现对土壤质量改良的指导。

然而,生物肥料通常受到许多因素限制,植物生长与土壤养分对不同接种群体和组合的响应尚不清楚。于是本研究选择内蒙古草原的土壤进行复合微生物菌剂添加实验,并进行土壤质量评价,探索复合微生物菌剂对退化草地植物和土壤的恢复效果,了解典型农牧交错带草原退化土壤对复合菌剂添加的响应,并探讨不同复合菌剂的作用下土壤理化性质和植物与微生物特征的变化,以及有机肥与微生物之间是否存在协同作用。本研究旨在开发出更有效的提高草地生态系统功能的方法,筛选适合改良典型农牧交错带退化草地的复

合微生物菌剂,为绿色可持续肥料的研发提供思路与科学依据。

1 材料与方法

1.1 野外土壤采集

实验土壤于 2023 年 8 月采集于内蒙古自治区锡林郭勒盟多伦县的中国科学院植物研究所多伦恢复生态学试验示范研究站十三里滩基地(116°17'E,42°02'N,1324m),在样地上随机确定五个采集点,分别从各采集点收集表层土壤(0—20cm),充分混合后形成一个复合土样,土壤质地主要是砂质壤土。收集的土壤去除植物和石头等杂物后,过筛(2mm)保存,用于盆栽实验。因羊草是重要的经济作物,且为温带草原的优势物种之一,因此本研究选用羊草作为盆栽实验退化土壤修复效果的指示植物。

1.2 实验设计

实验使用了三种微生物:枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*)和盐居固氮菌(*Azotobacter salinestris*)为根际促生菌,层状近明球囊霉(*Claroideoglossum lamellosum*)为丛枝菌根真菌。这三种微生物均已被证明具有改善土壤养分的能力,例如解磷固氮、分解有机质、促进物质循环等^[18–21]。使用前通过在营养培养基(蛋白胨 10g/L,牛肉浸取物 3g/L,NaCl 5g/L)和固氮培养基(酵母提取物 0.5g/L,甘露醇 20g/L,KH₂PO₄ 0.2g/L,K₂HPO₄ 0.8g/L,MgSO₄·7H₂O 0.2g/L,CaSO₄·2H₂O 0.1g/L,FeCl₃微量,Na₂MoO₄·2H₂O 微量)中扩繁细菌菌株来制备接种物。真菌已制备为粉剂可直接溶于水施用。实验还使用了羊粪、秸秆粉、黄腐酸钾和尿素作为有机物添加,使微生物肥料含有一定的有机质成分,一方面使微生物自带养分,另一方面增加土壤有机质含量。

盆栽实验在玻璃大棚里进行,自然光照射,棚内日温在 25—37℃,夜温在 20℃左右,湿度在 22%—38%。设置 7 个微生物菌剂处理和两个对照,包括 3 种单一菌株的微生物菌剂,4 种混合菌株的微生物菌剂,以及不添加微生物菌剂的对照 CK 和仅有机肥处理的对照 O(表 1)。枯草芽孢杆菌和盐居固氮菌的浓度为 10⁸菌落数/mL,近明球囊霉菌的孢子密度为 1336 孢子数/mL。在 9 种施肥方式上设置 4 个重复,共包含 36 个盆栽。培养前,用有机肥(羊粪 150g/盆,秸秆 90g/盆)与土壤混合。黄腐酸钾腐殖酸与尿素溶于水施用,每盆播种 12 株羊草。实验采用高 16.5cm、口径 15.5cm 的塑料花盆作为栽培器皿,分别装细碎且过筛的土壤约 2kg,每盆一次性注射 30mL 菌液(不同菌剂等比例混合),并采用湿度计控制含水量在 60%—80%。

表 1 不同处理添加设计

Table 1 Experimental design with different treatments added

处理方式 Treatment methods	微生物菌剂 Microbial inoculant
对照 Control	CK 仅添加无菌水;O 仅添加有机肥
单施 Single application	B 枯草芽孢杆菌+有机肥 A 盐居固氮菌+有机肥 C 层状近明球囊霉菌+有机肥
双菌混施 Dual application	AB 枯草芽孢杆菌+盐居固氮菌+有机肥 BC 枯草芽孢杆菌+层状近明球囊霉菌+有机肥 AC 盐居固氮菌+层状近明球囊霉菌+有机肥
三菌混施 Triple application	ABC 枯草芽孢杆菌+盐居固氮菌+层状近明球囊霉菌+有机肥

1.3 土壤采样

于 2023 年 11 月接种微生物菌剂后 30d 取样,从每盆中随机采集非根际土样,均匀混合成一个样本;每个处理有 4 个重复样本。每盆使用土壤非扰动 VOC 标准采样器随机设置 5 个垂直孔,每个重复采集约 60g 土壤。一部分土壤样品保存在-20℃以测定土壤理化性质,另一部分冻干冷藏用于测定土壤胞外酶活性。

1.4 指标测定

土壤 pH 采用电位法,称取 10g 风干土壤置于 50mL 离心管中,加入 25mL 蒸馏水,充分混合后静置,使用

pH 计测定。土壤含水量(SWC)采用烘干法,称取鲜土置于 105℃烘箱中烘干至恒重,冷却到室温后称重。可溶性有机碳(DOC)、硝态氮(NO_3^- -N)和铵态氮(NH_4^+ -N)称取 10g 鲜土,用 40mL 0.05mol/L K_2SO_4 溶液浸提,振荡离心后使用滤纸过滤^[22]。收集上清液,使用总有机碳分析仪(TOC-L CPN, Shimadzu, Japan)测定 DOC,应用 AA3 型连续流动分析仪(CFA, Bran Luebbe, Germany)测定 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N。有效磷(AP)使用盐酸-硫酸浸提,恒温条件下振荡过滤并收集上清液,使用 ICP 仪测定。将地上植物剪下并在实验室 65℃的烘箱中干燥至恒重,然后称重得到植物地上生物量(AGB)。植物根系置于 0.5mm 网袋中,反复冲洗直至除去杂质,在 65℃下干燥至恒重,并称重得到植物地下生物量(BGB)^[23]。

土壤微生物生物量碳氮(MBC、MBN)采用氯仿熏蒸-浸提法,使用总有机碳分析仪(TOC-L CPN, Shimadzu, Japan)测定^[23]。参与土壤碳氮磷营养元素循环的 3 种重要的胞外水解酶活性使用 Synergy H1 多功能微孔板检测仪测定,包括 β -葡萄糖苷酶(BG)、乙酰氨基葡萄糖苷酶(NAG)、酸性磷酸酶(Acpase)。称取 1.50g 鲜土,加入 125mL 50mmol/L Tris-HCl 缓冲液(pH=8)并充分搅拌。用移液器吸取 200 μ L 上述土样悬浮液和 50 μ L 200 μ mol/L 对应酶底物加入相应的黑色 96 微孔板中,在 25℃避光培养 3h。BG 的底物为 4-甲基伞型酮- β -D-葡萄糖苷酶(4-Methylumbelliferyl β -D-glucopyranoside),NAG 的底物为 4-甲基伞型酮-N-乙酰- β -D-氨基葡萄糖苷(4-Methylumbelliferyl N-acetyl- β -D-glucosaminide),Acpase 的底物为 4-甲基伞型酮磷酸盐(4-Methylumbelliferyl phosphate)。培养结束后在酶标仪激发光谱 360nm 处比色分析^[24]。

2 统计分析

使用 SPSS 26 软件进行单因素方差分析(one-way ANOVA),检验不同复合微生物菌剂对植物、土壤理化性质和微生物因子的差异性,使用 Duncan(方差齐性)法和 Dunnett-T3(方差不齐)的事后多重比较方法进行差异显著性检验。采用 Person 相关性分析菌剂处理与植物、土壤理化和微生物各项指标间的关系。为了综合评价土壤质量,本研究利用隶属函数结合因子分析方法对土壤性质各项指标进行归一化处理,计算土壤质量评分综合指标(soil quality assessment values, SQAV),以比较不同菌剂添加下的土壤质量改善效果,SQAV 值越接近 1,土壤质量越高,土壤恢复效果越好。隶属函数公式如下^[25],其中 pH 符合抛物线形函数,其余指标符合正“S”形函数^[26]。

正“S”形计算公式:

$$f(x) = \begin{cases} 0.1, & x \leq m_1 \\ 0.1 + 0.9 \times \frac{x - m_1}{m_2 - m_1}, & m_1 < m_2 \\ 1, & x \geq m_2 \end{cases} \quad (1)$$

抛物线形计算公式:

$$f(x) = \begin{cases} 0.1, & x \leq m_1, x \geq m_2 \\ 0.1 + 0.9 \times \frac{x - m_1}{O_1 - m_1}, & m_1 < x < O_1 \\ 1, & O_1 \leq x \leq O_2 \\ 1 - 0.9 \times \frac{x - O_2}{m_2 - O_2}, & O_2 < x < m_2 \end{cases} \quad (2)$$

式中, $f(x)$ 表示隶属度, x 为实际值, m_1 、 m_2 、 O_1 和 O_2 为划分土壤肥力的阈值转折点, m_1 和 m_2 分别表示各个土壤指标的下限值和上限值, O_1 和 O_2 则表示这些指标的临界值。基于土壤肥力特性,并结合内蒙多伦地区土壤肥力现状,转折点取值如表 2 所示。

对标准化数据进行因子分析,可以得到特征值、方差贡献值、累计贡献值和各因子得分。最后,通过公式(3)计算出退化草地在不同菌剂添加下的 SQAV 值^[27]。

$$SQAV = \sum a_i z_i \quad (3)$$

式中, SQAV 代表土壤质量评分; a_i 为第 i 个因子的方差贡献值; z_i 为第 i 个因子的得分。

表 2 隶属度函数曲线中评价指标转折点取值

Table 2 Values of evaluation index inflection points in membership function curves

转折点取值 Turning point values	酸碱度 pH	含水率 SWC	铵态氮 NH ₄ ⁺ -N	硝态氮 NO ₃ ⁻ -N	可溶性 有机碳 DOC	微生物 生物量碳 MBC	微生物 生物量氮 MBN	有效磷 AP	β-葡萄 糖苷酶 BG	乙酰氨基 葡萄糖 苷酶 NAG	酸性 磷酸酶 Acpase	植物地上 生物量 AGB	植物地下 生物量 BGB
m_1	7.86	0.17	10.27	4.17	42.53	151.54	19.72	15.11	22.87	1.45	51.49	0.07	0.20
O_1	8.09	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
O_2	8.24	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
m_2	8.54	0.29	30.93	28.27	77.01	381.28	51.56	30.63	58.97	4.65	87.21	0.35	0.76

pH: 酸碱度 Pondus hydrogenii; SWC: 土壤含水率 Soil water content; NH₄⁺-N: 铵态氮 Ammonium nitrogen; NO₃⁻-N: 硝态氮 Nitrate nitrogen; DOC: 可溶性有机碳 Dissolved organic carbon; MBC: 微生物生物量碳 Microbial biomass carbon; MBN: 微生物生物量氮 Microbial biomass nitrogen; AP: 有效磷 Available phosphorus; BG: β-葡萄糖苷酶 β-glucosidase; NAG: 乙酰氨基葡萄糖苷酶 N-acetylglucosaminidase; Acpase: 酸性磷酸酶 Acid phosphatase; AGB: 植物地上生物量 Aboveground biomass; BGB: 植物地下生物量 Belowground biomass

3 结果

3.1 施加微生物菌剂导致植物生物量变化

微生物菌剂种类对 AGB 和 BGB 均有显著影响 ($P < 0.01$)。真菌处理 (C、AC、BC、ABC) 的植株中 BGB 高于细菌处理和对照 (图 1, $P < 0.05$)。BC 处理和 ABC 处理显著增加了 AGB, 与仅有机肥对照 O 相比, 分别增加了 183.1% 和 215.6% (图 1, $P < 0.05$)。

3.2 施加微生物菌剂导致土壤理化性质变化

微生物菌剂的种类显著影响了土壤中 SWC、DOC、NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 含量 ($P < 0.01$), 较显著影响 AP 含量 ($P < 0.05$), 但对 pH 无显著影响。混合接种的复合微生物菌剂在提升土壤水分保持能力方面表现较好, 没有引起土壤 pH 的剧烈变化。大部分微生物菌剂处理显著提高了土壤 DOC 含量, 其中处理 AC 和 ABC 相比对照 O 增幅较大, 分别增加了 79.4% 和 90.6% (图 2, $P < 0.05$)。所有处理相比对照 CK 都提升了土壤的 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 含量。处理 AC 和 ABC 导致了 NH₄⁺-N 含量的最大增幅, 相较于对照 O 分别上升了 59.6% 和 36.0% (图 2, $P < 0.05$)。处理 AC、BC 和 ABC 显著增加了 NO₃⁻-N 含量, 相较于对照 O, 增幅分别为 134.3%、65.3% 和 112.2% (图 2, $P < 0.05$)。大部分处理相比 CK 均促进了 AP 含量的增加, 但相比对照 O 提升效果不显著 (图 2, $P < 0.05$)。

3.3 施加微生物菌剂导致酶活性和微生物生物量碳氮变化

整体上微生物菌剂的种类对土壤 MBC、MBN、BG 和 Acpase 含量的影响极显著 ($P < 0.01$), 对 NAG 和 MBC/MBN 影响较显著 ($P < 0.05$)。混合处理对微生物量碳氮含量的提升高于单独处理 (图 3)。在土壤胞外酶活性方面, 微生物菌剂均提高了三种水解酶活性。ABC 菌剂的 BG 和 Acpase 活性显著高于仅有机肥对照, 混合处理的 BG 和 Acpase 活性均显著高于对照 CK (图 3, $P < 0.05$)。AC、ABC 和 C 菌剂的 NAG 活性则显著高于 CK 对照 (图 3, $P < 0.05$)。

3.4 土壤质量评价因子间相互关系

相关性结果显示, 土壤质量因子间密切相关 (图 4)。NH₄⁺-N 与 SWC、DOC 和 NO₃⁻-N 呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 与 MBC、Acpase 和 AGB 呈显著正相关 ($P < 0.05$)。NO₃⁻-N 与 SWC、DOC 和 Acpase 呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 与微生物量碳氮、NAG 和 BGB 呈显著正相关 ($P < 0.05$)。AP 与微生物量碳氮和 Acpase 显著正相关。AGB 与 MBC 呈极显著正相关, BGB 与 DOC 和 Acpase 呈极显著正相关 ($P < 0.01$)。

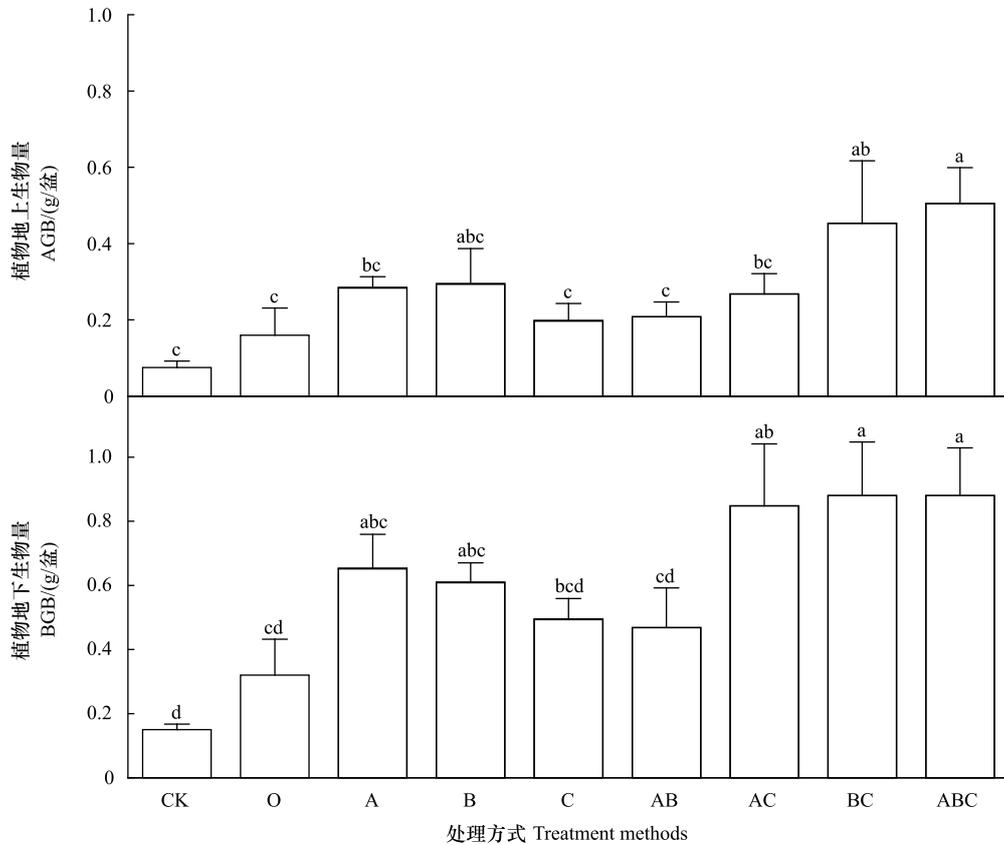


图 1 不同施肥方式对植物生物量的影响

Fig.1 Effects of different fertilization methods on plant biomass

CK:仅添加无菌水 Only sterile water; O:仅添加有机肥 Only organic fertilizer; A:盐居固氮菌 *Azotobacter salinestris*; B:枯草芽孢杆菌 *Bacillus subtilis*; C:层状近明球囊霉菌 *Claroideoglossum lamellosum*; AB:枯草芽孢杆菌+盐居固氮菌 *Bacillus subtilis*+*Azotobacter salinestris*; BC:枯草芽孢杆菌+层状近明球囊霉菌 *Bacillus subtilis* + *Claroideoglossum lamellosum*; AC:盐居固氮菌+层状近明球囊霉菌 *Azotobacter salinestris* + *Claroideoglossum lamellosum*; ABC:枯草芽孢杆菌+盐居固氮菌+层状近明球囊霉菌 *Bacillus subtilis* + *Azotobacter salinestris* + *Claroideoglossum lamellosum*; AGB:植物地上生物量 Aboveground biomass; BGB:植物地下生物量 Belowground biomass; 不同字母表示不同菌剂类型的差异显著 ($P<0.05$)

3.5 不同菌剂施加下土壤质量评价

对标准化数据进行 KMO 和 Bartlett 球形检验,结果显示适合因子分析(KMO 值为 0.762>0.6)。表 3 显示,前 5 个因子的累计贡献率达到了 75.655%,代表 13 个指标,并反映土壤各指标分量总变异的 75% 以上。采用方差最大法正交旋转载荷矩阵,使各因子更具土壤学意义。

表 3 因子特征值及方差贡献

Table 3 The eigenvalues and squared loadings of components

因子 Factor	特征值 Eigenvalue	方差贡献率/% Variance contribution rate	累计贡献率/% Cumulative contribution rate	因子 Factor	特征值 Eigenvalue	方差贡献率/% Variance contribution rate	累计贡献率/% Cumulative contribution rate
因子 1 Factor 1	2.879	22.144	22.144	因子 4 Factor 4	1.802	13.859	66.580
因子 2 Factor 2	2.161	16.625	38.769	因子 5 Factor 5	1.180	9.075	75.655
因子 3 Factor 3	1.814	13.951	52.720				

表 4 表明,因子 1 与 SWC、DOC、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 具有较大正相关性(因子载荷>0.7 或<-0.7);因子 2 与水解酶 BG、NAG 和 Acpase 正相关,表明较高的土壤酶活性有助于提高土壤质量;因子 3 与 MBN、AP 正相

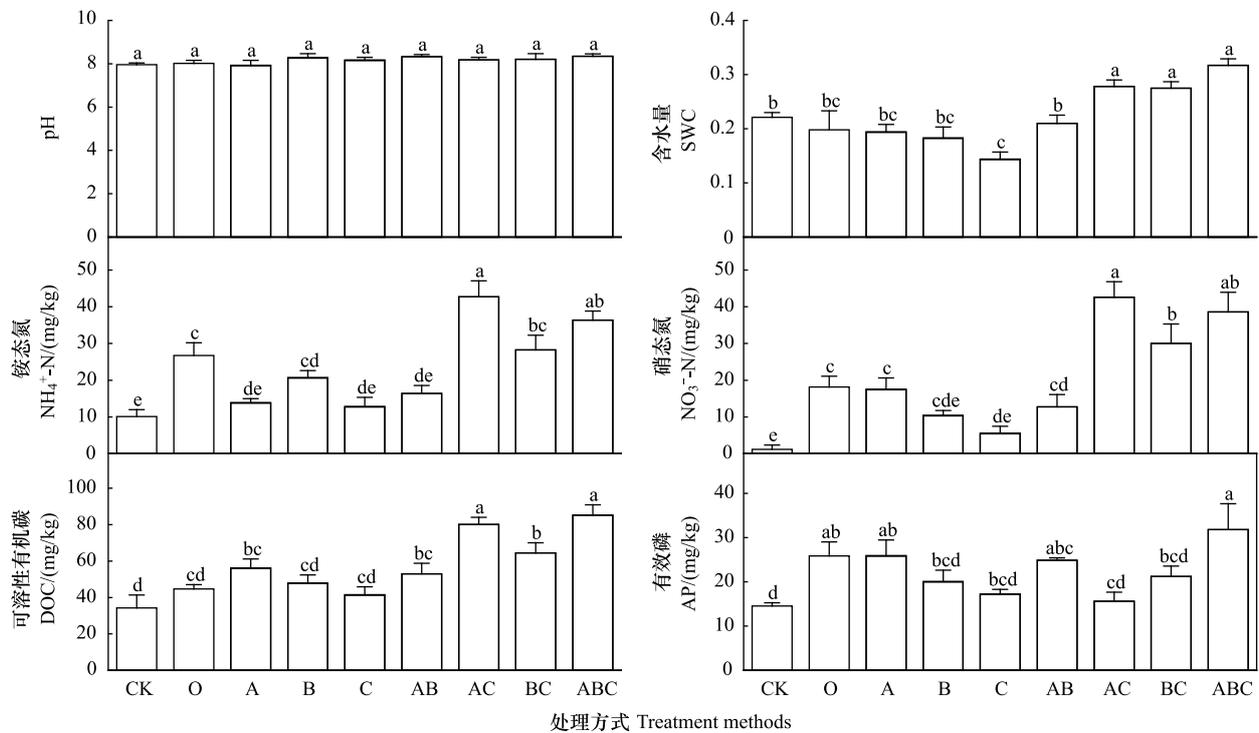


图 2 不同施肥方式对土壤性质的影响

Fig.2 Effects of different fertilization methods on soil properties

pH:酸碱度 Pondus hydrogenii;SWC:土壤含水率 Soil water content; $\text{NH}_4^+\text{-N}$:铵态氮 Ammonium nitrogen; $\text{NO}_3^-\text{-N}$:硝态氮 Nitrate nitrogen; DOC:可溶性有机碳 Dissolved organic carbon; AP:有效磷 Available phosphorus; 这些值是四次重复的平均值(\pm SE);不同字母表示不同菌剂类型的差异显著($P < 0.05$)

关;因子 4 与 AGB、BGB 正相关;因子 5 则与 pH 相关性较大。根据隶属度与各指标权重计算出不同处理的土壤质量得分。结果显示,混施菌剂的土壤质量优于单施和仅有机肥对照,其平均得分从高到低依次为:ABC>AC>BC>AB>A>O>C>B>CK(图 5)。

表 4 土壤质量指标主成分分析

Table 4 Results of principal components analysis (PCA) of soil quality indicators

指标 Indicators	因子分析载荷矩阵 Factor analysis loadings matrix					权重系数 Weight coefficient
	因子 1	因子 2	因子 3	因子 4	因子 5	
	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4	Factor 5	
酸碱度 pH	-0.023	-0.101	0.029	-0.022	0.906	0.037
含水率 SWC	0.778	0.121	0.351	-0.088	-0.206	0.074
可溶性有机碳 DOC	0.719	0.107	0.289	0.057	-0.33	0.067
微生物生物量碳 MBC	0.436	0.168	0.601	0.139	-0.063	0.087
微生物生物量氮 MBN	0.308	-0.043	0.739	0.262	-0.249	0.070
铵态氮 $\text{NH}_4^+\text{-N}$	0.812	0.133	0.089	0.234	0.199	0.101
硝态氮 $\text{NO}_3^-\text{-N}$	0.819	0.228	0.063	0.248	0.104	0.103
有效磷 AP	0.063	0.177	0.791	-0.042	0.238	0.074
β -葡萄糖苷酶 BG	0.07	0.819	0.176	0.243	0.043	0.088
乙酰氨基葡萄糖苷酶 NAG	0.116	0.858	0.002	-0.014	-0.167	0.057
酸性磷酸酶 Acpase	0.27	0.734	0.107	0.159	-0.011	0.086
植物地上生物量 AGB	0.194	0.112	0.129	0.859	0.033	0.084
植物地下生物量 BGB	0.089	0.186	0.046	0.873	-0.066	0.072

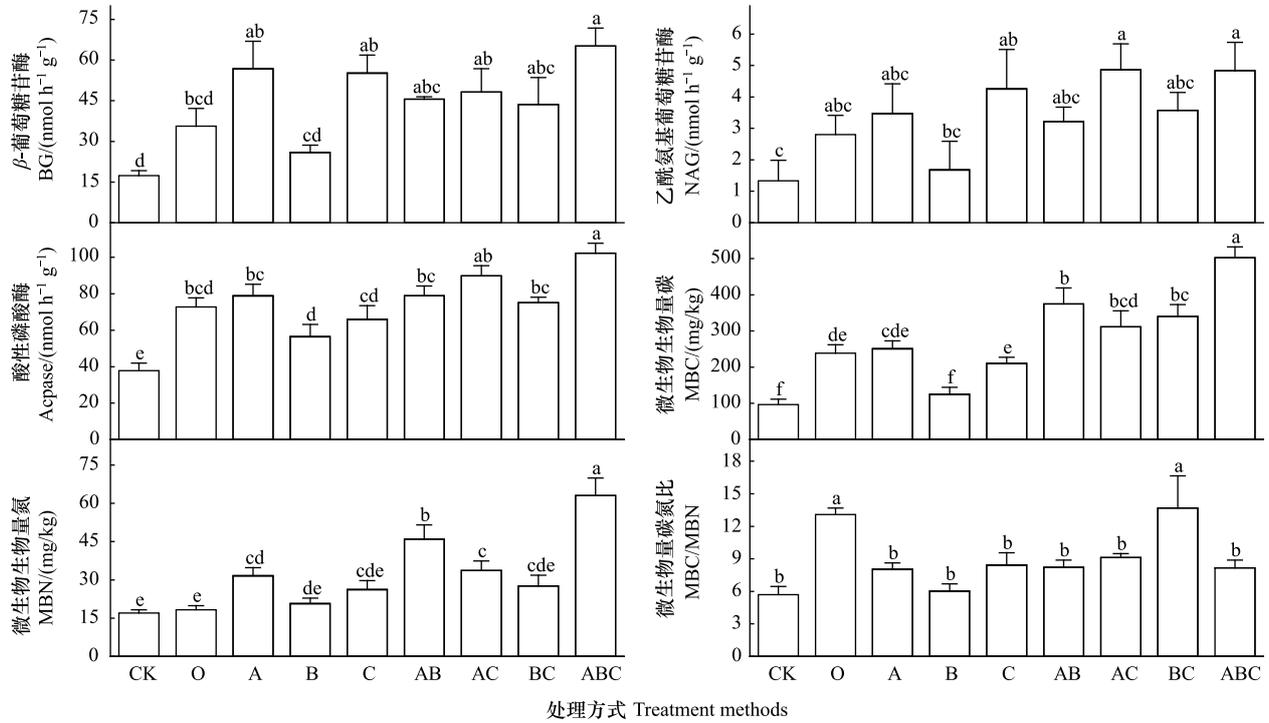


图 3 不同施肥方式对胞外酶活性和微生物生物量碳氮的影响

Fig.3 Effects of different fertilization methods on microbial factors

BG:β-葡萄糖苷酶 β-glucosidase;NAG;乙酰氨基葡萄糖苷酶 N-acetylglucosaminidase;Acpase: 酸性磷酸酶 Acid phosphatase;MBC:微生物生物量碳 Microbial biomass carbon;MBN:微生物生物量氮 Microbial biomass nitrogen;MBC/N:微生物量碳氮比 Microbial biomass carbon to nitrogen ratio;这些值是四次重复的平均值(±SE);不同字母表示不同菌剂类型的差异显著(P<0.05)

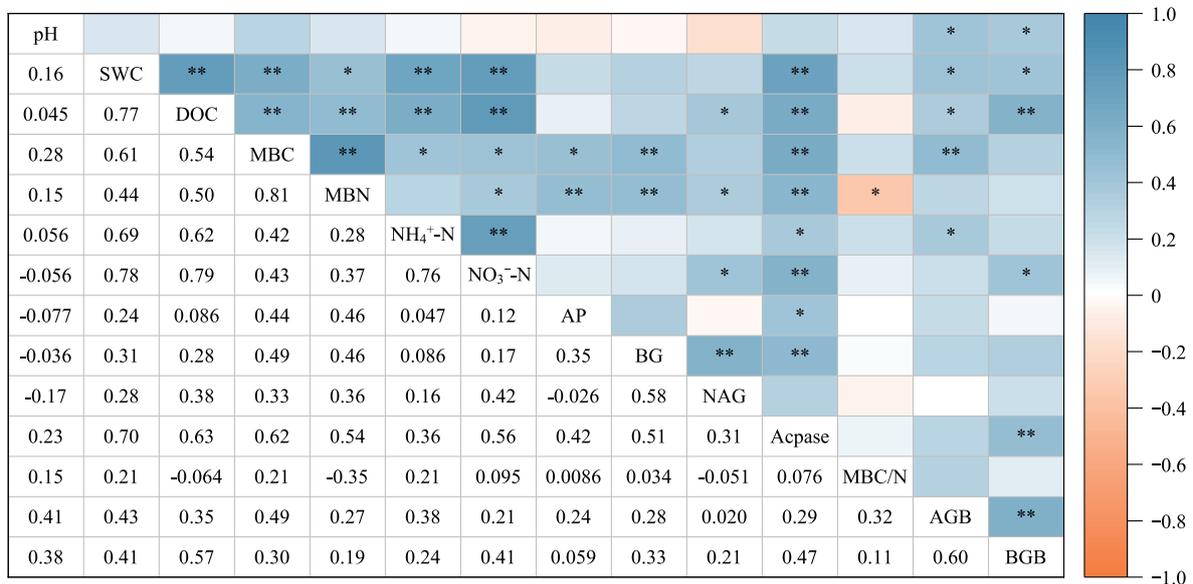


图 4 土壤质量评价因子之间的相互关系

Fig.4 Interrelationships among soil quality assessment factors

* 代表在 0.05 水平上显著相关; ** 代表在 0.01 水平上显著相关

4 讨论

4.1 复合微生物菌剂对植物生长的改善

有益微生物在低肥力土壤条件下能提高有机肥利用效率^[28–30]。与以往研究类似^[31–33],微生物和有机肥复合处理显著提升了植物生物量、土壤养分储存及酶活性(图1—图4)。微生物通过固氮、溶磷等功能改善退化土壤的养分条件,促进植物生长,解决养分匮乏问题^[34]。有机肥改善了土壤结构和养分供给,对植物生长产生积极影响^[35]。本研究发现,根际促生菌和丛枝菌根真菌与有机肥共同接种,协同提升了植物生物量(图1),与先前研究结果一致^[12,36–37]。与此同时,有机肥为微生物提供了碳源和氮源^[38],提升植物净光合速率,特别是在氮限制的天然草原土壤中^[39]。伴随有机物输入和微生物含量增加,有真菌处理的植株 BGB 显著增加,主要由于菌丝网络增加了根系的养分吸收能力^[40]。

退化土壤易导致氮、磷、钾等养分流失,不利于植物生长^[41]。微生物通过酶催化、细菌代谢等作用改变土壤理化性质。本实验中,微生物菌剂显著增加了土壤 DOC、NO₃⁻-N、NH₄⁺-N 和 AP 含量,表明其激活了土壤中微生物活性,增加无机氮吸收,同时提高有机质分解,溶解更多 DOC 为植物提供底物,加速有机质转化^[42]。微生物混合接种与有机肥配施协同提高了土壤有效养分,与之前研究结果相符^[43–45]。此外,细菌与真菌之间的协同作用增强了微生物在根部的定殖,解释了混合接种效果优于单独接种的原因^[46–47]。然而,微生物菌剂对土壤 pH 影响不显著,可能由于肥料偏碱性所致。

土壤酶在有机质分解和养分转化中起到关键作用^[48]。微生物菌剂通过影响微生物活性与数量或改变土壤养分状况,从而提高不同类型酶的活性^[49]。本研究发现,微生物菌剂显著提高了与碳、氮、磷循环相关的水解酶 BG、NAG 和 Acpase 酶活性。由于有机肥增加了可利用的碳源,微生物分泌更多的 BG 酶^[50]。土壤有机氮含量的增加使微生物菌剂促进 NAG 酶分泌用于分解底物。肥料中氮占比较大,当氮增加时,微生物分泌 Acpase 酶获取磷元素,以维持氮磷平衡^[51]。酶活性的增强改善了微生物对养分的获取,进而增加了土壤 MBC 和 MBN 含量^[52–53],最终对植物产生了正向影响。

4.2 不同复合微生物菌剂添加下土壤质量评价

土壤质量评价通常使用综合指标反映整体状况,但因研究地点、生态环境、土壤质地和评价目的差异,尚无统一的评价模式^[54–55]。本研究通过隶属函数结合因子分析,筛选出 13 项指标,评估了不同施肥方式下的土壤质量。结果表明,三种菌混合菌剂与有机肥联合处理土壤质量最好,合成菌剂处理效果优于单独接种,这也与相关研究结果类似^[56–57]。其原因可能在于多种微生物与植物具有协同作用^[58],如 PGPR 通过溶解磷酸盐促进 AMF 有效定殖^[59],AMF 则增强 PGPR 的趋化作用^[60]。细菌之间也可以产生协同作用,同时提升它们的生存能力^[61–62]。

评价结果显示,微生物与有机肥共同添加的土壤质量优于仅添加有机肥,进一步证明了微生物与有机质之间的协同效应^[63]。微生物不仅分泌多种酶分解有机物质,还促进养分矿化,使其更易被植物吸收^[64–65]。特别是细菌和真菌的组合效果优于细菌组合,AMF 与有益细菌协同作用提高了植物的养分吸收效率,作为生物肥料提供更好的营养供应^[66]。研究表明,细菌群落增加 AMF 的定植,参与 AMF 对植物生长的有益影响^[67],AMF 菌丝分泌的渗出物则促进细菌的生长和活性,为细菌提供足够的能量或作为菌丝相关微生物的底物与 AMF 互动^[68]。这表明细菌和丛枝菌根真菌混合接种与有机肥的共同使用在提升土壤质量和植物生长方面具有显著优势。本研究为农牧交错带退化草地进行不同恢复措施的土壤质量评价提供了方法和指标

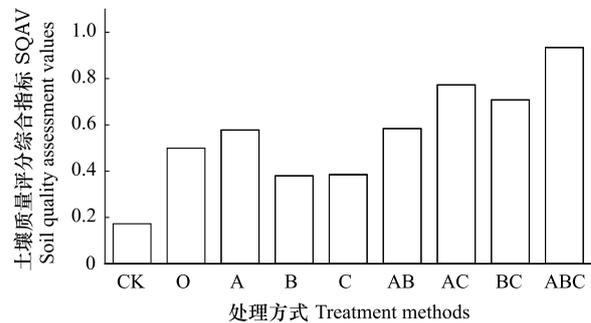


图5 不同施肥方式下土壤质量评价结果

Fig.5 Soil quality assessment results under different fertilization methods

的借鉴,评价结果对于北方农牧交错带退化草地的恢复生态建设具有重要的实践指导意义。

5 结论

接种有益菌对退化土壤恢复和植物生长有显著积极影响。枯草芽孢杆菌、盐居固氮菌和层状近明球囊霉菌混合施用对土壤质量的正向影响高于其单独施用。细菌添加提高土壤碳氮磷的可利用性;真菌增强根系的养分吸收能力。PGPR 和 AMF 联合接种可以产生协同效应。复合微生物菌剂增加土壤养分的供应、植物生物量和土壤酶活性,从而提高土壤质量。应用细菌真菌混合的复合微生物菌剂有助于实现农牧交错带退化草地恢复目标。

参考文献 (References):

- [1] O'Mara F P. The role of grasslands in food security and climate change. *Annals of Botany*,2012,110(6): 1263-1270.
- [2] 胡玉琼,王跃思,纪宝明,王明星,杜睿. 内蒙古草原温室气体排放日变化规律研究. *南京气象学院学报*,2003,26(1): 29-37.
- [3] Huang D, Wang K, Wu W L. Problems and strategies for sustainable development of farming and animal husbandry in the Agro-Pastoral Transition Zone in Northern China (APTZNC). *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*,2007,14(4): 391-399.
- [4] 李旭亮,杨礼箫,田伟,胥学峰,贺缠生. 中国北方农牧交错带土地利用/覆盖变化研究综述. *应用生态学报*,2018,29(10): 3487-3495.
- [5] 潘庆民,孙佳美,杨元合,刘伟,李昂,彭云峰,薛建国,夏昊,黄建辉. 我国草原恢复与保护的问题与对策. *中国科学院院刊*,2021,36(6): 666-674.
- [6] 古琛,贾志清,杜波波,何凌仙子,李清雪. 中国退化草地生态修复措施综述与展望. *生态环境学报*,2022,31(7): 1465-1475.
- [7] 李雪萍,李建宏,李敏权. 天然草地退化综合修复技术规程. *甘肃农业科技*,2020,51(11): 88-91.
- [8] 朱晓琳. 浅析微生物制剂对农业土壤改良的作用. *农村实用技术*,2020(2): 81.
- [9] Wubs E R, Van der Putten W H, Bosch M, Bezemer T M. Soil inoculation steers restoration of terrestrial ecosystems. *Nature Plants*,2016,2: 16107.
- [10] Kardol P, Wardle D A. How understanding aboveground-belowground linkages can assist restoration ecology. *Trends in Ecology & Evolution*,2010,25(11): 670-679.
- [11] Matos P S, da Silva C F, Damian J M, Cerri C E P, Pereira M G, Zonta E. Beneficial services of Glomalin and Arbuscular Mycorrhizal fungi in degraded soils in Brazil. *Scientia Agricola*,2022,79(5): e20210064.
- [12] Wang Z K, Xu Z H, Chen Z Y, Kowalchuk G A, Fu X X, Kuramae E E. Microbial inoculants modulate growth traits, nutrients acquisition and bioactive compounds accumulation of *Cyclocarya paliurus* (Batal.) Iljinskaja under degraded field condition. *Forest Ecology and Management*,2021,482: 118897.
- [13] Li Y, He M, Du Y Z, Wang X P, Zhang H, Dai Z C, Wan J S, Sun J Q, Wang C Y, Du D L. Indigenous PGPB inoculant from Qinghai-Tibetan Plateau soil confer drought-stress tolerance to local grass *Poa annua*. *International Journal of Environmental Research*,2022,16(5): 1-11.
- [14] Doran J W, Parkin T B. Defining and assessing soil quality. *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*,1994,35: 1-21.
- [15] 张汪寿,李晓秀,黄文江,李建辉,任万平,高中灵. 不同土地利用条件下土壤质量综合评价方法. *农业工程学报*,2010,26(12): 311-318.
- [16] 胡伟,刘文辉,刘凯强,吴雨涵. 基于最小数据集土壤质量评价及生物指标的确立. *草地学报*,2024,(4): 1-14.
- [17] 黄佳惠,张瑶,肖凯,李斌,蒋文君,吴龙英,陈稷,孔凡磊,赵珂,黄进. 中国农田土壤质量评价指标及其发展趋势. *资源环境与工程*,2024,38(1): 26-33.
- [18] Liao X F, Chen J Z, Guan R T, Liu J M, Sun Q W. Two arbuscular mycorrhizal fungi alleviates drought stress and improves plant growth in *Cinnamomum migao* seedlings. *Mycobiology*,2021,49(4): 396-405.
- [19] Morris E K, Morris D J P, Vogt S, Gleber S C, Bigalke M, Wilcke W, Rillig M C. Visualizing the dynamics of soil aggregation as affected by arbuscular mycorrhizal fungi. *The ISME Journal*,2019,13(7): 1639-1646.
- [20] Chennappa G, Sreenivasa M Y, Nagaraja H. *Azotobacter salinestris*: a novel pesticide-degrading and prominent biocontrol PGPR bacteria// *Microorganisms for Sustainability*. Singapore: Springer Singapore,2018: 23-43.
- [21] Singh S, Tripathi A, Chanotiya C S, Barnawal D, Singh P, Patel V K, Vajpayee P, Kalra A. Cold stress alleviation using individual and combined inoculation of ACC deaminase producing microbes in *Ocimum sanctum*. *Environmental Sustainability*,2020,3(3): 289-301.
- [22] Li H Y, Zhang J Q, Tian D S, Liu Y H, Dong J Y. Nitrogen significantly affected N cycling functional gene abundances compared with phosphorus and drought in an alpine meadow. *Agronomy*,2023,13(4): 1041.
- [23] Dong Q, Liu Y H, He P, Du W. Belowground biomass changed the regulatory factors of soil N₂O funder N and water additions in a temperate steppe of Inner Mongolia. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*,2024,24(1): 606-617.

- [24] Liu Y H, Zhang J Q, Li Y, He P, Dong J Y. Do long-term N additions affect the soil organic carbon pool in temperate grasslands? *Science of the Total Environment*, 2022, 810: 152227.
- [25] 王翔宇, 张学霞, 胡韵哲, 穆微, 方华军. 基于地理探测器的耕地土壤肥力及影响因子. *环境科学*, 2024: 1-16.
- [26] 张文学, 王少先, 刘增兵, 唐先干, 熊丽, 夏文建, 王萍, 袁福生, 孙刚, 李祖章, 刘光荣. 基于土壤肥力质量综合指数评价化肥与有机肥配施对红壤稻田肥力的提升作用. *植物营养与肥料学报*, 2021, 27(5): 777-790.
- [27] 贡璐, 张雪妮, 吕光辉, 韩丽. 塔里木河上游典型绿洲不同土地利用方式下土壤质量评价. *资源科学*, 2012, 34(1): 120-127.
- [28] Wei X P, Xie B K, Wan C, Song R F, Zhong W R, Xin S Q, Song K. Enhancing soil health and plant growth through microbial fertilizers: mechanisms, benefits, and sustainable agricultural practices. *Agronomy*, 2024, 14(3): 609.
- [29] Bargaz A, Lyamlouli K, Chtouki M, Zeroual Y, Dhiba D. Soil microbial resources for improving fertilizers efficiency in an integrated plant nutrient management system. *Frontiers in Microbiology*, 2018, 9: 1606.
- [30] Muhammad H, Fahad S, Saud S, Hassan S, Nasim W, Ali B, Hammad H M, Bakhat H F, Mubeen M, Khan A Z, Liu K, Harrison M T, AbdElgawad H, Abdel-Maksoud M A. A paradigm shift towards beneficial microbes enhancing the efficiency of organic and inorganic nitrogen sources for a sustainable environment. *Land*, 2023, 12(3): 680.
- [31] Wang Z K, Chen Z Y, Fu X X. Integrated effects of co-inoculation with phosphate-solubilizing bacteria and N₂-fixing bacteria on microbial population and soil amendment under C deficiency. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16(13): 2442.
- [32] Ali A M, Awad M Y M, Hegab S A, El Gawad A M A, Eissa M A. Effect of potassium solubilizing bacteria (*Bacillus cereus*) on growth and yield of potato. *Journal of Plant Nutrition*, 2021, 44(3): 411-420.
- [33] Glick B R. Plant growth-promoting bacteria: mechanisms and applications. *Scientifica*, 2012, 2012: 963401.
- [34] Timofeeva A M, Galyamova M R, Sedykh S E. Plant growth-promoting soil bacteria: nitrogen fixation, phosphate solubilization, siderophore production, and other biological activities. *Plants: Basel, Switzerland*, 2023, 12(24): 4074.
- [35] Zhang Y P, Yan J, Rong X M, Han Y L, Yang Z Y, Hou K, Zhao H, Hu W. Responses of maize yield, nitrogen and phosphorus runoff losses and soil properties to biochar and organic fertilizer application in a light-loamy fluvo-aquic soil. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2021, 314: 107433.
- [36] Fasusi O A, Babalola O O, Adejumo T O. Harnessing of plant growth-promoting rhizobacteria and arbuscular mycorrhizal fungi in agroecosystem sustainability. *CABI Agriculture and Bioscience*, 2023, 4(1): 26.
- [37] Dutta S C, Neog B. Inoculation of arbuscular mycorrhizal fungi and plant growth promoting rhizobacteria in modulating phosphorus dynamics in turmeric rhizosphere. *National Academy Science Letters*, 2017, 40(6): 445-449.
- [38] Liu X L, Yang W P, Li W G, Ali A, Chen J, Sun M, Gao Z Q, Yang Z P. Moderate organic fertilizer substitution for partial chemical fertilizer improved soil microbial carbon source utilization and bacterial community composition in rain-fed wheat fields: current year. *Frontiers in Microbiology*, 2023, 14: 1190052.
- [39] Harpole W S, Ngai J T, Cleland E E, Seabloom E W, Borer E T, Bracken M E S, Elser J J, Gruner D S, Hillebrand H, Shurin J B, Smith J E. Nutrient co-limitation of primary producer communities. *Ecology Letters*, 2011, 14(9): 852-862.
- [40] Wang F, Zhang L, Zhou J C, Rengel Z, George T S, Feng G. Exploring the secrets of hyphosphere of arbuscular mycorrhizal fungi: processes and ecological functions. *Plant and Soil*, 2022, 481(1): 1-22.
- [41] Ayub M A, Usman M, Faiz T, Umair M, ul Haq M A, Rizwan M, Ali S, Zia ur Rehman M. Restoration of degraded soil for sustainable agriculture// *Soil Health Restoration and Management*. Singapore: Springer Singapore, 2019: 31-81.
- [42] Li Y, Wei J L, Ma L, Wu X B, Zheng F L, Cui R Z, Tan D S. Enhancing wheat yield through microbial organic fertilizer substitution for partial chemical fertilization: regulation of nitrogen conversion and utilization. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2024, 24(1): 935-943.
- [43] Wang X L, Chi Y K, Song S Z. Important soil microbiota's effects on plants and soils: a comprehensive 30-year systematic literature review. *Frontiers in Microbiology*, 2024, 15: None.
- [44] Wang Y, Li Q X, Li C Y. Organic fertilizer has a greater effect on soil microbial community structure and carbon and nitrogen mineralization than planting pattern in rainfed farmland of the Loess Plateau. *Frontiers in Environmental Science*, 2023, 11: 1232527.
- [45] Lori M, Symnaczik S, Mäder P, De Deyn G, Gattinger A. Organic farming enhances soil microbial abundance and activity-a meta-analysis and meta-regression. *PLoS One*, 2017, 12(7): e0180442.
- [46] Sun K, Jiang H J, Pan Y T, Lu F, Zhu Q, Ma C Y, Zhang A Y, Zhou J Y, Zhang W, Dai C C. Hyphosphere microorganisms facilitate hyphal spreading and root colonization of plant symbiotic fungus in ammonium-enriched soil. *The ISME Journal*, 2023, 17(10): 1626-1638.
- [47] Pliogo C, Kamilova F, Lugtenberg B. Plant growth-promoting bacteria: fundamentals and exploitation// *Bacteria in Agrobiology: Crop Ecosystems*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011: 295-343.
- [48] Dotaniya M L, Aparna K, Dotaniya C K, Singh M, Regar K L. Role of soil enzymes in sustainable crop production// *Enzymes in Food Biotechnology*. Amsterdam: Elsevier, 2019: 569-589.

- [49] Liu S J, Xia X, Chen G m, Mao D, Che S g, Li Y X. Study progress on functions and affecting factors of soil enzymes. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(21): 1-7.
- [50] Dominchin M F, Verdenelli R A, Berger M G, Aoki A, Meriles J M. Impact of N-fertilization and peanut shell biochar on soil microbial community structure and enzyme activities in a Typic Haplustoll under different management practices. European Journal of Soil Biology, 2021, 104: 103298.
- [51] 朱莹, 李焕茹, 庾强, 陈晓冬, 魏镔, 雒文涛, 陈振华, 陈利军. 呼伦贝尔草原土壤养分及生物学特性对氮沉降的响应. 应用生态学报, 2018, 29(10): 3221-3228.
- [52] Liao H J, Sheng M H, Liu J, Ai X Y, Li C N, Ai S H, Ai Y W. Soil N availability drives the shifts of enzyme activity and microbial phosphorus limitation in the artificial soil on cut slope in southWestern China. Environmental Science and Pollution Research International, 2021, 28(25): 33307-33319.
- [53] Akter S, Kamruzzaman M, Sarder M P, Amin M S, Joardar J C, Islam M S, Nasrin S, Islam M U, Islam F, Rabbi S, Halder M. Mycorrhizal fungi increase plant nutrient uptake, aggregate stability and microbial biomass in the clay soil. Symbiosis, 2024, 93(2): 163-176.
- [54] Mukherjee A, Lal R. Comparison of soil quality index using three methods. PLoS One, 2014, 9(8): e105981.
- [55] Guo M X. Soil health assessment and management: recent development in science and practices. Soil Systems, 2021, 5(4): 61.
- [56] 侯晓萌, 孔涛, 霍宏亮, 狄军贞, 冯奥哲, 程昊天, 黄丽华. 微生物菌剂对小叶杨复垦区土壤理化性质和酶活性的影响. 林业科学研究, 2022, 35(3): 55-62.
- [57] Bharti N, Barnawal D, Wasnik K, Tewari S K, Kalra A. Co-inoculation of *Dietzia natronolimnaea* and *Glomus intraradices* with vermicompost positively influences *Ocimum basilicum* growth and resident microbial community structure in salt affected low fertility soils. Applied Soil Ecology, 2016, 100: 211-225.
- [58] Hryniewicz K, Szymańska S, Piernik A, Thiem D. Ectomycorrhizal community structure of *Salix* and *Betula* spp. at a saline site in central Poland in relation to the seasons and soil parameters. Water, Air, and Soil Pollution, 2015, 226(4): 99.
- [59] Nanjundappa A, Bagyaraj D J, Saxena A K, Kumar M, Chakdar H. Interaction between arbuscular mycorrhizal fungi and *Bacillus* spp. in soil enhancing growth of crop plants. Fungal Biology and Biotechnology, 2019, 6: 23.
- [60] Cameron D D, Neal A L, van Wees S C M, Ton J. Mycorrhiza-induced resistance: more than the sum of its parts? Trends in Plant Science, 2013, 18(10): 539-545.
- [61] Shanmugam S R, Chaganti S R, Lalman J A, Heath D D. Effect of inhibitors on hydrogen consumption and microbial population dynamics in mixed anaerobic cultures. International Journal of Hydrogen Energy, 2014, 39(1): 249-257.
- [62] Yu X, Liu X, Zhu T H, Liu G H, Mao C. Co-inoculation with phosphate-solubilizing and nitrogen-fixing bacteria on solubilization of rock phosphate and their effect on growth promotion and nutrient uptake by walnut. European Journal of Soil Biology, 2012, 50: 112-117.
- [63] Song X C, Liu M Q, Wu D, Griffiths B S, Jiao J G, Li H X, Hu F. Interaction matters: Synergy between vermicompost and PGPR agents improves soil quality, crop quality and crop yield in the field. Applied Soil Ecology, 2015, 89: 25-34.
- [64] Daunoras J, Kačergius A, Gudiukaitė R. Role of soil microbiota enzymes in soil health and activity changes depending on climate change and the type of soil ecosystem. Biology, 2024, 13(2): 85.
- [65] Prasad S, Malav L C, Choudhary J, Kannojiya S, Kundu M, Kumar S, Yadav A N. Soil microbiomes for healthy nutrient recycling//Yadav A N, Singh J, Singh C, Yadav N, eds. Environmental and Microbial Biotechnology. Singapore: Springer Singapore, 2020: 1-21.
- [66] Azcón-Aguilar C, Barea J M. Nutrient cycling in the mycorrhizosphere. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2015.
- [67] Miransari M. Interactions between arbuscular mycorrhizal fungi and soil bacteria. Applied Microbiology and Biotechnology, 2011, 89(4): 917-930.
- [68] Wang F, Feng G. Arbuscular mycorrhizal fungi interactions in the rhizosphere//Gupta V V S R, Sharma A K, eds. Rhizosphere Biology. Singapore: Springer Singapore, 2020: 217-235.