

促生菌剂及有机肥的添加对高寒草甸土壤酶活性的影响

张蔚¹,李海云²,姚拓^{1*},李青璞¹,彭东超¹,贺善睦¹,周泽¹,柴加丽¹

(1. 甘肃农业大学草业学院,草业生态系统教育部重点实验室,甘肃省草业工程实验室,中-美草地畜牧业可持续发展研究中心,甘肃 兰州 730070;2. 兰州大学西部生态安全省部共建协同创新中心,甘肃 兰州 730000)

摘要:【目的】探究促生菌剂及有机肥施用对高寒草甸土壤环境的影响,为促生菌剂在天然草甸中施用及高寒地区草甸生态系统的管理提供理论依据。【方法】以甘南玛曲高寒草甸为研究对象,设计随机区组研究,设置对照(CK)、促生菌剂(PG)、有机肥(OF)、促生菌剂和有机肥1:1配施(PG+OF)4个处理,通过测定土壤理化性质、微生物量碳(MBC)、微生物氮(MBN)、微生物磷(MBP)和水解酶活性(AP、 β G、CBH、 β X、NAG),研究促生菌剂及有机肥对高寒草甸土壤酶及酶化学计量比的影响。【结果】与对照(CK)相比,处理PG、OF及PG+OF的电导率显著降低,MBC、N、P含量显著升高;处理PG+OF高寒草甸土壤的MBN含量显著高于其他处理,即促生菌剂和有机肥相互作用显著提升土壤中微生物数量。与CK相比,处理PG、OF及PG+OF显著促进水解酶活性升高,MBC、MBP、MBN、EC是土壤中酶活性及酶化学计量比变化的重要驱动因子,不同处理间酶化学计量比差异显著。【结论】促生菌剂及有机肥施用显著增加土壤中微生物数量,增强土壤中微生物活性,且对缓解土壤内碳源、磷源缺失具有正向作用,配施促生菌剂和有机肥对土壤的改良效果最为显著。

关键词:促生菌剂;有机肥;土壤酶;微生物量;酶化学计量比

中图分类号:S812 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-5500(2024)01-0150-08

DOI:10.13817/j.cnki.cyycp.2024.01.017



土壤酶是一类具有催化作用的生物活性物质^[1],主要由微生物细胞代谢、植物根系分泌和动植物残体腐解产生^[2],与土壤有机质分解转化、养分循环密切相关^[3]。依据催化反应类型和功能,土壤酶可以分为氧化还原酶、水解酶、转移酶和裂合酶。其中,土壤水解酶参与碳、氮、磷循环过程,指示了土壤中生化反应过

程的方向和强度,可以作为微生物活性、微生物多样性、生态系统功能和土壤肥力的参考指标^[4]。酶化学计量比是微生物碳、氮、磷循环过程中关键酶活性的比值,常用来评价微生物生长代谢过程中土壤养分资源的需求状况和有效性^[5]。

促生菌剂能够通过溶磷、固氮、生产噬铁素、分泌植物激素、合成胞外多糖等方式促进植物吸收和利用养分^[6],同时生成抑制底物,防止或减弱病原体入侵植物^[7],与化肥、农药相比,促生菌剂生态友好,可持续、无污染。近几十年内我国促生菌领域的研究发展迅速,促生菌剂已然成为肥料的重要品类^[8],然而,对促生菌剂本身的理论依据和应用技术支撑的研究还较缺乏,促生菌剂的作用机理、复合机制、有效时间、生态影响及影响其功效的因素等仍需要深入研究^[9]。农用促生菌剂发展尚不成熟,截至2021年,正式登记商

收稿日期:2023-05-15;修回日期:2023-06-03

基金项目:中国科学院A类战略性先导科技专项子课题(XDA26020202);青藏高原退化草地恢复的主要物源制约因子及其应用技术研发(2019YFC0507703)

作者简介:张蔚(1996-),女,甘肃兰州人,硕士研究生。

E-mail:zhangweivv09@163.com

*通信作者。E-mail:yaotuo@gsau.edu.cn

品仅占全国总量的 0.08%^[10],使用量仅占化肥用量的 5%^[11],而面向天然草地的促生菌剂更是无法系统研究,因而发展前景广阔。农业部于 2015 年印发《到 2020 年化肥使用量零增长行动方案》,2016 年联合财政部印发《建立以绿色生态为导向的农业补贴制度改革方案》,提出“以绿色生态为导向”,倡导有机肥替代化肥,切实加强对生态环境的保护^[12]。玛曲作为纯牧业县,已经实现了“全域无化肥”,集中连片的牧场产生大量牛羊粪便,为有机肥产业的发展提供得天独厚的条件。基于此,本研究着重讨论促生菌、有机肥及其配合施用对高寒草甸退化草地土壤微生物量及酶活性的影响,通过分析施用处理后土壤理化性质、酶活性及其化学计量比的变化,明确促生菌剂及有机肥施用对土壤环境的影响,有助于研究草甸生态系统养分的循环和利用机制,为促生菌剂在天然草甸中施用及高寒地区草甸生态系统的管理提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 研究地自然概况

甘南草甸是我国西部重要的畜牧业基地和生态

安全屏障^[13],近年来土壤退化严重,管理和修复问题亟待解决。本研究样地位于甘肃省甘南藏族自治州玛曲县(34°05' N, 102°16' E)。该区域海拔 3 420 m,属高原大陆性气候,年均气温 1.8 °C,年均降水量 593 mm,土壤类型为高山草甸土,植被类型为川西藏东高原灌丛草甸^[14],优势种为线叶嵩草(*Kobresia capillifolia*)、禾叶嵩草(*Kobresia graminifolia*)和垂穗披碱草(*Elymus nutans*)。

1.2 供试材料及研究设计

促生菌剂来源于甘肃农业大学草业学院草地微生物多样性实验室(活菌数 $>10^9$ cfu/mL,菌种包括溶磷菌、固氮菌、生防菌等,菌剂配方正在申请专利中)。有机肥购于玛曲县圣地格桑有机肥厂(有机质 $\geq 45\%$, $N+P_2O_5+K_2O\geq 5\%$, pH 值 5.5~8.5,水分 $\leq 30\%$)。

2021 年 5 月,于玛曲县大水种畜场选取 5 块 16 m $\times$ 16 m 的样地,设置 5 组重复,在每块样地内设置 4 个 5 m $\times$ 5 m 的研究小区,各小区间有 2 m 间隔,每个小区中设置 1 个处理,4 个研究处理在小区内完全随机,各处理及肥料添加量如表 1 所示。

表 1 研究处理设计

Table 1 Experimental treatment design

处理	功能菌剂及组合	施用剂量
CK	对照(不添加菌剂和有机肥)	—
PG	促生菌剂	7.5 kg/hm ²
OF	有机肥	2 400 kg/hm ²
PG+OF	促生菌剂和有机肥 1:1 配施	菌剂 3.75 kg/hm ² +有机肥 1 200 kg/hm ²

1.3 研究方法

1.3.1 样品采集 于 2021 年 8 月进行土壤取样,在每个实验小区选取 50 cm $\times$ 50 cm 样方,挖出剖面,采集 0~20 cm 土层的土壤和 10 cm $\times$ 10 cm $\times$ 20 cm 体积的地下生物量,装入灭菌自封袋中于低温下迅速带回实验室。土壤过 1 mm 筛,分为 2 份,一份 4 °C 保存,用于微生物量和酶活的测定;另一份自然风干,用于土壤理化性质的测定。

1.3.2 土壤基本理化性质的测定 土壤含水率(SWC)、电导率(EC)、地上生物量(AGB)、地下生物量(UGB)、pH 值的测定参考《土壤农化分析》^[15]。

1.3.3 微生物量碳、氮、磷的测定 采用三氯甲烷熏蒸—浸提法测定,微生物量碳(MBC)、微生物量氮

(MBN)经 0.5 mol/L 硫酸钾(K₂SO₄)浸提,分别采用重铬酸钾硫酸外加热法和半微量凯氏定氮法进行测定;微生物量磷(MBP)经 0.5 mol/L 碳酸氢钠(NHCO₃, pH 值 8.5)浸提,采用比色法(700 nm)测定^[16]。

1.3.4 土壤水解酶活性的测定 酸性磷酸酶(AP)、 β -1,4-葡萄糖苷酶(β G)、纤维二糖水解酶(CBH)、 β -1,4-木糖苷酶(β X)和 β -1,4-N-乙酰基氨基葡萄糖苷酶(NAG)编码及底物见表 2。测定采用微孔板荧光法,方法参考 Saiya-Cork^[17]:称 2 g 鲜土于含 250 mL 醋酸缓冲液(50 mmol/L, pH 值 5.0)的三角瓶中,使用磁性搅拌器制成土壤悬浊液。每个微孔做 8 个平行,微孔板在 25 °C 黑暗条件下培养 4 h,最后加入 10 μ L 0.5

mol/L NaOH结束反应,反应结束1 min后在多功能酶标仪(SYNERGY-HTX,美国)下进行荧光测定,激发波长365 nm,测定波长450 nm。

1.3.5 数据处理 用 $\ln(\beta\text{G}+\text{CBH}+\beta\text{X}):\ln(\text{NAG})$ 、 $\ln(\beta\text{G}+\text{CBH}+\beta\text{X}):\ln(\text{AP})$ 、 $\ln(\text{NAG}):\ln(\text{AP})$ 表示土壤酶化学计量C:N、C:P、N:P。使用Excel对原始数据进行计算,SPSS25.0对计算后数据进行单因素方

差分析(One-wayANOVA),对不同添加处理土壤基本理化性质、微生物量碳、氮、磷含量、土壤水解酶活性及酶化学计量比间差异显著性进行多重比较法(LSD)检验;使用OrginPro 2021绘图;使用Canoco 5.0对土壤水解酶及酶化学计量比和土壤理化性质间相关性做冗余分析(redundancyanalysis,RDA)。本文中图表数据均显示为平均值±标准误差。

表2 测定水解酶编码及底物
Table 2 Determination of hydrolase coding and substrate

酶	缩写	EC 编码	底物
酸性磷酸酶	AP	3.1.3.2	4-甲基伞形酮磷酸酯
β -1,4-葡萄糖苷酶	βG	3.2.1.21	4-甲基伞形酮- β -D-葡萄糖苷
纤维二糖水解酶	CBH	3.2.1.91	4-甲基伞形酮- β -D-纤维二糖苷
β -1,4-木糖苷酶	βX	3.2.1.37	4-甲基伞形酮- β -D-木糖苷
β -1,4-N-乙酰基氨基葡萄糖苷酶	NAG	3.1.6.1	4-甲基伞形酮-N-乙酰基- β -D-氨基葡萄糖苷

2 结果与分析

2.1 土壤理化性质

土壤理化性质如表3所示,不同处理下0~20 cm 土壤pH、SWC、AGB、UGB均无显著差异。与对照(CK)相比、处理促生菌剂(PG)、有机肥(OF)及促生菌剂和有机肥1:1配施(PG+OF)显著降低土壤EC

值,降幅分别为12.26%、11.91%和11.09%。与CK相比,处理PG、OF和PG+OF的土壤MBC、N、P含量显著提高,MBC增幅分别为79.70%、83.12%和82.46%(图1-A),MBN增幅分别为94.10%、48.56%和129.91%(图1-B),MBP增幅分别为21.53%、26.13%和23.90%(图1-C),处理PG、OF和PG+OF间土壤MBC、MBP含量无显著差异;MBN含量有显

表3 不同处理下土壤理化性质及地上、地下生物量

Table 3 Soil physicochemical properties and aboveground and underground biomass under different treatments

处理	pH值	EC	SWC/%	地上生物量干重/ (g·m ⁻²)	地下生物量干重/ (g·cm ⁻³)
CK	7.89±0.07 ^a	228.03±3.42 ^a	32.39±2.94 ^a	264.47±60.53 ^a	0.65±0.21 ^a
PG	7.91±0.03 ^a	200.07±7.74 ^b	30.75±1.91 ^a	309.39±30.17 ^a	0.94±0.07 ^a
OF	7.99±0.05 ^a	200.87±1.55 ^b	31.51±2.76 ^a	318.11±34.6 ^a	0.96±0.06 ^a
PG+OF	7.91±0.08 ^a	202.75±0.94 ^b	27.94±0.32 ^a	214.95±66.58 ^a	0.53±0.24 ^a

注:同列数据不同字母表示处理间显著差异(P<0.05)。

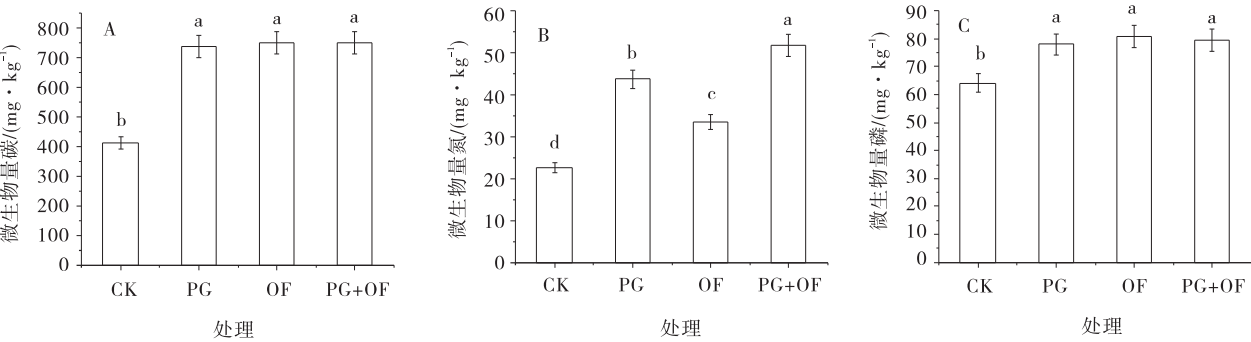


图4 不同处理下土壤微生物量碳、氮、磷含量

Fig. 4 Soil microbial biomass C,N and P contents under different treatments

注:不同小写字母表示处理间显著差异(P<0.05),下同。

著差异,与处理 PG 和 OF 相比,PG+OF 的 MBN 含量显著升高,增幅分别为 18.45% 和 54.77%;与处理 OF 相比,PG 处的 MBN 含量显著升高,增幅为 30.65%。

2.2 土壤水解酶活性及生态酶化学计量比

土壤水解酶活性如图 2 所示,与 CK 相比,处理 PG、OF 及 PG+OF 对 AP、 β G、CBH、 β X、NAG 酶活性具显著影响($P<0.05$)。与 CK 相比,PG 处理下,AP、 β G 和 CBH 酶活性分别增长了 15.56%、82.20% 和

167.60%,OF 处理下 AP 酶活性增长了 7.65%(图 2-A),处理 OF 和 PG+OF 与 CK 相比, β G 酶活性分别增长了 28.58% 和 24.91%(图 2-B)。OF 处理下,与处理 PG+OF 相比 CBH 酶活性增长了 20.11%,与处理 PG 和 PG+OF 相比 β X 酶活性分别增长了 89.34% 和 62.94%(图 2-D)。PG+OF 处理下,与处理 OF 相比 AP 酶活性增长了 50.05%,与处理 PG 和 OF 相比 NAG 酶活性分别增长了 8.52% 和 219.91%(图 2-E)。

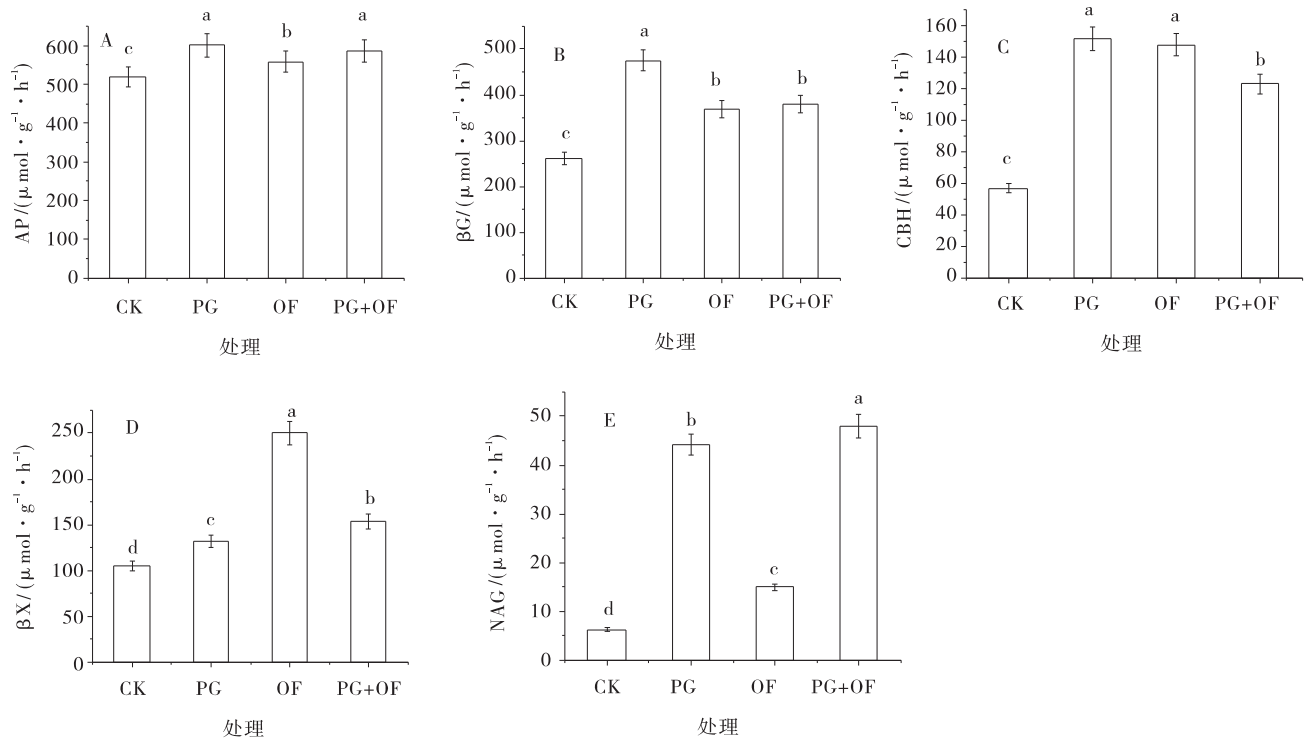


图 2 不同处理下土壤水解酶活性

Fig. 2 Soil hydrolase activity under different treatments

土壤酶化学计量比如图 3 所示,CK、PG、OF 和 PG+OF 处理下 $\ln(\beta\text{G}+\text{CBH}+\beta\text{X}):\ln(\text{NAG})$ 分别为 3.34、1.75、2.46 和 1.68(图 3-A), $\ln(\beta\text{G}+\text{CBH}+\beta\text{X}):\ln(\text{AP})$ 分别为 0.97、1.04、1.05 和 1.02(图 3-B), $\ln(\text{NAG}):\ln(\text{AP})$ 分别为 0.29、0.59、0.43 和 0.61(图 3-C)。与 CK 相比,不同处理下土壤酶化学计量 C:N、C:P 及 N:P 均有显著差异($P<0.05$)。

2.3 土壤理化性质与酶活性、酶化学计量比的相关性

由图 4 可以看出,土壤理化性质间、理化性质与土壤酶活性、酶化学计量比间、酶活性与酶化学计量比间都存在显著或极显著相关性。土壤地上生物量(AGB)与地下生物量(UGB)间呈显著正相关($P<$

0.05),相关系数为 0.98;MBC 与 MBP 间呈极显著正相关($P<0.01$),相关系数为 0.99;土壤 pH 与 β X 酶活性呈极显著正相关,相关系数为 0.99;MBC 与 CBH 酶活性呈显著正相关,相关系数为 0.98;MBN 与 NAG 酶活性呈显著正相关,相关系数为 0.96,与 $\ln(\beta\text{G}+\text{CBH}+\beta\text{X}):\ln(\text{NAG})$ 呈显著负相关,相关系数为 -0.97,与 $\ln(\text{NAG}):\ln(\text{AP})$ 呈显著正相关,相关系数为 0.98;AP 酶活性与 β G 酶活性呈显著正相关,相关系数为 0.95,与 $\ln(\beta\text{G}+\text{CBH}+\beta\text{X}):\ln(\text{NAG})$ 呈显著负相关,相关系数为 -0.98,与 $\ln(\text{NAG}):\ln(\text{AP})$ 呈显著正相关,相关系数为 0.97;CBH 酶活性与 $\ln(\beta\text{G}+\text{CBH}+\beta\text{X}):\ln(\text{AP})$ 呈显著正相关,相关系数为 0.98;NAG 酶活性与 $\ln(\beta\text{G}+\text{CBH}+\beta\text{X}):\ln(\text{NAG})$ 呈显著

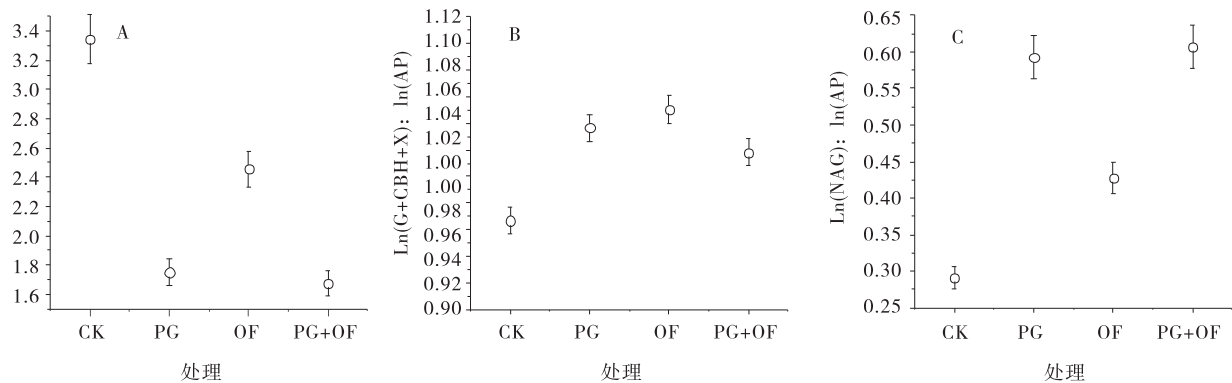


图3 不同处理下土壤酶化学计量比

Fig. 3 Stoichiometric ratio of soil enzymes under different treatments

负相关,相关系数为-0.95,与 $\ln(\text{NAG}):\ln(\text{AP})$ 呈显著正相关,相关系数为0.98; $\ln(\beta\text{G}+\text{CBH}+\beta\text{X}):\ln(\text{NAG})$ 与 $\ln(\text{NAG}):\ln(\text{AP})$ 间呈极显著负相关,相关系数为-0.99。

如图5冗余分析所示,环境因子解释了土壤酶活性及生态酶化学计量比98.24%的变化,其中,X轴解释了76.60%的变量,Y轴解释了21.64%的变量。除SWC外,环境因子与土壤酶活性均呈正相关,其中,MBC、MBP、MBN和EC分别解释了土壤酶活性的52.9%、13.6%、12.9%和10.2%,MBC作用最为明显。

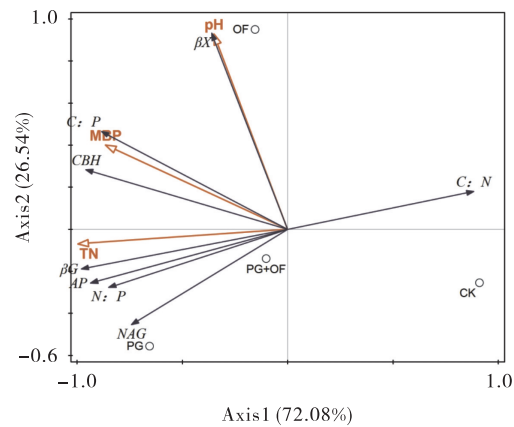


图5 土壤理化性质与酶活性及酶化学计量比的冗余分析

Fig. 5 Redundancy analysis of soil physical and chemical properties, enzyme activity and enzyme stoichiometry ratio

氮、速效磷等养分含量与微生物量碳、氮、磷间呈显著正相关^[19],添加PGPR对养分含量有促进作用^[20],进而也会影响到土壤中微生物量碳、氮、磷的含量。Schiemann等^[21]研究显示,添加的PGPR会与土壤中原有微生物形成协同关系,通过物理或生化反应相互刺激,从而提升土壤中整体微生物的活性,改变土壤中微生物群落结构和种群数量,使土壤中细菌数量增多,真菌数量减少,微生物总量升高。李传宝等^[22]、张鹏等^[23]研究显示,有机肥能够为土壤中微生物提供碳源、氮源和无机盐,促进微生物生长繁殖,增加土壤中养分含量和微生物数量。与不施肥或施用化肥相比,有机肥的添加主要增加了土壤中细菌、真菌的特征脂肪酸(不饱和脂肪酸、环状脂肪酸等)^[24]。白加林等^[25]研究显示,配施促生菌剂和有机肥能够促进土壤微生物群落组成由“真菌型”转化为“细菌型”,提高产物质量,减少植物病害率。由研究数据可以看出,添加促生菌剂、添加有机肥、配施促生菌剂和有机肥均对土壤中MBC、MBN和MBP含量升高有促进作用,这与

pH	pH
EC	-0.22 EC
AGB	0.55-0.90 AGB
UGB	0.62-0.800.98 UGB
SWC	0.076-0.910.67 0.51 SWC
MBC	0.60 0.27 0.16 0.36-0.61 MBC
MBN	0.0420.67-0.37-0.17-0.920.80 MBN
MBP	0.69 0.26 0.18 0.37-0.570.99 0.75 MBP
AP	0.13 0.290.0270.22-0.670.85 0.90 0.78 AP
βG	0.24-0.0140.33 0.50-0.410.82 0.73 0.75 0.95 βG
CBH	0.65-0.0310.44 0.62-0.360.95 0.64 0.94 0.82 0.89 CBH
NAG	-0.160.57-0.33-0.15-0.840.69 0.96 0.61 0.93 0.78 0.58 NAG
βX	0.99-0.100.43 0.51-0.0080.600.0790.69 0.11 0.18 0.61-0.14 βX
C:N	-0.16-0.470.13-0.0740.80-0.88-0.97-0.82-0.98-0.87-0.79-0.95-0.16 C:N
C:P	0.79-0.0750.50 0.66-0.280.93 0.54 0.94 0.70 0.78 0.98 0.43 0.75-0.69 C:P
N:P	0.0530.50-0.19.00870.820.83 0.98 0.76 0.97 0.86 0.73 0.980.060-0.990.61 N:P

图4 研究测定指标间相关性分析

Fig. 4 Correlation analysis between test indexes

3 讨论

3.1 不同处理对土壤理化性质的影响

本研究所用微生态反应促生菌剂的菌种来源于高寒植物根际,具有溶磷、固氮、分泌植物激素、生防等功能。植物根际活跃,敏感复杂,土壤中元素的积累与微生物品种和数量密切相关^[18],全碳、全氮、碱解

前人研究结果相一致^[26]。

潘昭隆等^[27]研究显示,土壤EC值反映土壤中盐离子含量,与土壤孔隙度、土壤粘粒含量密切相关,随肥料施用量增多而增大,EC值过高会对植物生长产生抑制作用。本研究中各处理下土壤电导率(EC)相较于CK显著降低,这与李晗灏^[28]研究结果相一致,说明促生菌剂和有机肥的施用对改良土壤结构、改善土壤盐渍化促进作用显著。

3.2 不同处理对酶活性及酶化学计量比的影响

土壤酶能够有效反映土壤肥力,对土壤中环境的变化反馈敏感,其活性大小反映土壤中各生化反应的强弱^[29],在土壤生物活动中发挥重要调节功效。解媛媛等^[30]研究发现,微生物菌剂施加进土壤后会加速土壤中有有机物的分解,为酶促反应提供底物,进而促进微生物生长代谢更加活跃,产生更多水解酶,因而施加微生物菌剂能够显著增强土壤水解酶的活性。因为酶在进行酶促反应时具有专性,故而不同微生物菌剂施用对不同酶的影响也不同^[31]。徐忠山等^[32]研究发现,相比于对照,施用有机肥显著增加了土壤中水解酶活性,这是由于有机肥中含有大量植物残体和微生物,施用到土壤中会提升土壤微生物总量及其代谢活动需要的底物数量,从而加速微生物的反应速度和反应数量,进而促进微生物产生更多土壤水解酶。杨博雯^[33]研究表明,配施微生物菌剂和有机肥显著增加土壤有机质,降低土壤EC值,有机肥对土壤中溶磷微生物生长、繁殖、土壤中难溶性磷分解具促进作用。本研究中,处理PG、OF、PG+OF的土壤酶活性均显著高于CK($P<0.05$);处理PG+OF的AP酶活性显著高于OF($P<0.05$), β X酶活性显著高于PG和PG+OF($P<0.05$),NAG酶活性显著高于PG($P<0.05$),这与前人的研究结果相一致。处理PG的 β G酶活性显著高于OF和PG+OF($P<0.05$),CBH酶活性显著高于PG+OF($P<0.05$),AP、 β X酶活性显著高于OF($P<0.05$);处理OF的CBH酶活性显著高于PG+OF($P<0.05$), β X酶活性显著高于OF和PG+OF($P<0.05$),这可能是由于促生菌剂中菌种对土壤中微生物的专性影响以及菌剂与有机肥的相互作用。

由RDA分析,MBC、MBP、MBN、EC是土壤中土壤酶活性及酶化学计量比变化的重要驱动因子,相关性分析表明,MBC与CBH的酶活性呈显著正相关,

MBN与NAG酶的活性呈显著正相关,MBC与MBP间呈极显著正相关,相关研究显示^[34],PG或OF的施用能够显著提升土壤中MBC、MBN和MBP含量,故PG或OF可能是通过调节MBC、MBN、MBP含量进而调节土壤中酶活性,并控制土壤中酶化学计量比,从而稳定土壤微环境平衡。

生态酶化学计量比主要反映微生物对土壤中碳、氮、磷的相对需求^[5]。本研究中各处理下 $\ln(\beta G+CBH+\beta X):\ln(NAG)$ 均高于全球平均值(1.4), $\ln(\beta G+CBH+\beta X):\ln(AP)$ 均高于全球平均值(0.62),处理CK与OF的 $\ln(NAG):\ln(AP)$ 低于全球平均值(0.44),处理PG和PG+OF的 $\ln(NAG):\ln(AP)$ 高于全球平均值(0.44),这反映出试验地区碳循环相关酶活性较高,氮和磷循环酶活性相对较低。基于“最佳分配”的生态经济学原则,微生物会趋向于生产更缺乏的资源^[35],故而反映出试验区内碳元素缺乏。与CK相比,处理PG、OF、PG+OF的C:N、N:P值更趋近于1,说明施用促生菌剂、有机肥或配施促生菌剂和有机肥均对缓解土壤内碳源、磷源缺失具有正向作用,其中,配施促生菌剂和有机肥作用最为显著。

4 结论

与CK相比,处理PG、OF及PG+OF的EC值显著降低,土壤中MBC、N、P含量显著升高。与PG和OF相比,处理PG+OF的MBN含量显著升高。

与CK相比,处理PG、OF及PG+OF的AP、 β G、CBH、 β X、NAG酶活性显著升高,MBC、MBP、MBN、EC是土壤中酶活性及酶化学计量比变化的重要驱动因子,不同处理对土壤酶活性影响不同。处理PG+OF的C:N、C:P、N:P最接近全球平均值。处理PG+OF效果最优。

参考文献:

- [1] 周礼恺. 土壤酶学[M]. 北京:科学出版社,1987.
- [2] Ndour Ndèye Yacine Badiane, Chotte J L, Pate E, *et al.* Use of soil enzyme activities to monitor soil quality in natural and improved fallows in semi-arid tropical regions[J]. *Applied Soil Ecology*, 2001;18(3):229—238.
- [3] Deforest J L. The influence of time, storage temperature, and substrate age on potential soil enzyme activity in acidic forest soil using MUB-linked substrates and l-DOPA [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009: 41 (6): 469—481.

- [4] 王理德,王方琳,郭春秀,等. 土壤酶学研究进展[J]. 土壤,2016,48(1):12—21.
- [5] Sinsabaugh R L, Lauber C L, Weintraub M N, *et al.* Stoichiometry of soil enzyme activity at global scale[J]. *Ecology letters*,2008;11(11):1180—1186.
- [6] Kumar A. Phosphate solubilizing bacteria in agriculture biotechnology: diversity, mechanism and their role in plant growth and crop yield [J]. *International Journal of Advanced Research in Biological Sciences*, 2016: 4 (5) : 116—124.
- [7] Naveed M B H, Zahir Z A. Drought stress amelioration in wheat through inoculation with Burkholderia phytofirmans strain PsJN [J]. *Plant Growth Regulation*, 2014: 73 (2) : 121—131.
- [8] Wang M Y, Li W, Du B, *et al.* Effect of biochar applied with plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) on soil microbial community composition and nitrogen utilization in tomato[J]. *Pedosphere*,2021,31(6): 872—881.
- [9] 郑茗月,李海梅,赵金山,等. 微生物肥料的研究现状及发展趋势[J]. 江西农业学报,2018,30(11): 52—56.
- [10] 邹锦丰. 微生物肥料研究进展及发展前景[J]. 现代农业科技,2021(22): 142—144.
- [11] 李涛,张朝辉,郭雅雯,等. 国内外微生物肥料研究进展及展望[J]. 江苏农业科学,2019,47(10): 37—41.
- [12] 张梦玲,陈昭玖,翁贞林,等. 农业社会化服务对化肥减量施用的影响研究——基于要素配置的调节效应分析[J]. 农业技术经济,2023(3):1—21.
- [13] 武月月,文军,王作亮,等. 黄河源高寒草原下垫面土壤冻融过程中陆—气间的水热交换特征分析[J]. 高原气象,2022,41(1):132—142.
- [14] 卢鑫,张丽静,王瑞,等. 玛曲高寒沙化草地3种灌木根际土壤磷素含量特征[J]. 草业科学,2012,29(2): 167—173.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社,2000.
- [16] 吴金水. 土壤微生物生物量测定方法及其应用[M]. 北京:气象出版社,2006.
- [17] Saiya—CorkRLS K R, Zak D R. The effects of long term nitrogen deposition on extracellular enzyme activity in an *Acer saccharum* forest soil[J]. *Soil Biology & Biochemistry*,2002;34:1309—1315.
- [18] Provorov N A. The contributions of plant and bacteria genotypes in the growth and nitrogen accumulation of inoculated alfalfa[J]. *Plant and Soil*,1994;35:213—219.
- [19] Zhou J B, Li S X, J C Z. Soil Microbial Biomass Nitrogen and Its Relationship to Uptake of Nitrogen by Plants[J]. *Pedosphere*,2002(3):251—256.
- [20] 高雁,张永强,张志东,等. 功能性微生物菌剂对小麦生长和根际土壤生态的影响[J]. 新疆农业科学,2021,58(1): 115—124.
- [21] Buddrus—Schiemann K S M, Schreiner K. Root colonization by *Pseudomonas* sp. DSMZ 13134 and impact on the indigenous rhizosphere bacterial community of barley[J]. *Microbial Ecology*,2010;60(2):381—393.
- [22] 李传宝,王宏燕,赵伟,等. 秸秆还田配施微生物菌剂与有机肥施用对黑土微生物量碳的影响[J]. 江苏农业科学,2017,45(5):265—268.
- [23] 张鹏,路文涛,张晓芳,等. 不同有机肥施用量对宁南旱区土壤养分、酶活性及作物生产力的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2011,17(5):1122—1130.
- [24] 张奇春,王雪芹,时亚南,等. 不同施肥处理对长期不施肥区稻田土壤微生物生态特性的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2010,16(1):118—123.
- [25] 白加林,张映杰,张荣辉,等. 促生菌剂与不同有机肥复配对植烟土壤交换性钙镁的影响[J]. 农学学报,2019,9(2):38—42.
- [26] 苟小梅,张瑞平,张宇羽,等. 苗床添加微生物肥料对植烟根际土壤微生物量碳氮的影响[J]. 四川农业大学学报,2019,37(3): 338—342+351.
- [27] 潘昭隆,刘会芳,赵帅翔,等. 氮肥投入对不同土壤类型电导率变化的影响[J]. 福建农林大学学报(自然科学版),2021,50(4):533—537.
- [28] 李晗灏. 促生菌配合化学改良剂对盐渍土改良的效果及对玉米生长的影响[D]. 泰安:山东农业大学,2019.
- [29] Maxm C W J S C. Amicroplate fluorimetric assay for the study of enzyme diversity in soil[J]. *Soil Biol Bio chem*, 2001,33:1633—1640.
- [30] 解媛媛,谷洁,高华,等. 微生物菌剂酶制剂化肥不同配比对秸秆还田后土壤酶活性的影响[J]. 水土保持研究,2010,17(2):233—238.
- [31] 张美存,程田,多立安,等. 微生物菌剂对草坪植物高羊茅生长与土壤酶活性的影响[J]. 生态学报,2017,37(14):4763—4769.
- [32] 徐忠山,刘景辉,逯晓萍,等. 施用有机肥提高黑土土壤酶活性、增加细菌数量及种类多样性[J]. 中国土壤与肥料,2020(4):50—55.
- [33] 杨博雯. 施用有机物料及菌剂(G1)对番茄生长及土壤养分的影响[D]. 太谷:山西农业大学,2017.
- [34] 刘彦伶,李渝,张艳,等. 长期施用磷肥和有机肥黄壤微生物量磷特征[J]. 中国农业科学,2021,54(6): 1188—

1198.

[35] 王冰冰,曲来叶,马克明,等. 岷江上游干旱河谷优势灌

丛群落土壤生态酶化学计量特征[J]. 生态学报, 2015, 35(18): 6078—6088.

Effects of adding a growth-promoting agent and organic fertilizer to alpine meadow on soil enzyme activities

ZHANG Wei¹, LI Hai-yun², YAO Tuo^{1*}, LI Qing-pu¹, PENG Dong-chao¹,
HE Shan-mu¹, ZHOU Ze¹, CHAI Jia-li¹

(1. College of Pratacultural Science, Gansu Agricultural University, Key Laboratory of Pratacultural Ecosystem, Ministry of Education, Lanzhou 730070, China; 2. Collaborative Innovation Center for Ecological Security in Western China, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: 【Objective】 To investigate the effects of biotrophic fungicides and organic fertilizers on the soil environment of alpine meadows, and to provide theoretical basis for the application of biotrophic fungicides in natural meadows and the management of meadow ecosystems in alpine areas. 【Method】 The alpine meadow in Maqu, Gannan served as the research object in a randomized block group study with four treatments: control (CK), biotrophic fungicide (PG), organic fertilizer (OF), and biotrophic fungicide and organic fertilizer with 1:1 dosage (PG + OF). Four treatments were established to examine the effects of biotrophic agents and organic fertilizers on soil physico-chemical properties, microbial carbon, nitrogen, and phosphorus (MBC, N, and P), as well as hydrolytic enzyme activities (AP, β G, CBH, and β X, NAG), and to explore the impacts on enzymes and enzyme stoichiometric ratios in alpine meadows. 【Result】 Compared with the control (CK), treatment with PG, OF and PG+OF significantly reduced conductivity, while increasing the content of MBC, N and P. The MBN content in the PG+OF treatment was significantly higher than in other treatments, indicating a significant interaction between biotrophic fungicides and organic fertilizers that enhanced the soil microbial population. Additionally, compared with the control (CK), treatments PG, OF and PG+OF significantly increased the activity of hydrolases, along with higher levels of MBC, N, and P. Furthermore, compared with CK, treatments PG, OF and PG+OF significantly promoted the hydrolytic enzyme activity, where MBC, MBP, MBN and EC emerged as important driving factors for changes in enzyme activity and enzyme stoichiometry ratio in soil. The enzyme stoichiometry ratio displayed significant variations among different treatments. 【Conclusion】 The application of biotrophic fungicides and organic fertilizers substantially increased the microorganism count, enhanced microbial activity and positively influenced the alleviation of carbon and phosphorus sources deficiencies in the soil. The combined application of biotrophic fungicides and organic fertilizers demonstrated the most significant impact on soil improvement.

Key words: inoculant of plant growth-promoting rhizosphere microorganism; organic fertilizers; soil enzymes; microbial load; enzyme stoichiometric ratios

(责任编辑 靳奇峰)