

黄河源区高寒草原土壤对不同PGPR菌肥的响应

钟松¹, 高俊程¹, 董世魁², 赵晓红³, 刘攀¹, 周华坤⁴, 杨冲¹,
刘艳方¹, 孙丽娇¹, 王文颖¹

1. 青海师范大学 生命科学学院, 西宁 810008
2. 北京林业大学 草业与草原学院, 北京 100083
3. 西宁市第十三中学, 西宁 810008
4. 中国科学院 西北高原生物研究所旱区恢复生态学省级重点实验室, 西宁 810008

摘要: 以黄河源区玛多县高寒草原为对象, 野外原位施加不同类型根际促生菌肥(PGPR), 研究高寒草原土壤 w (速效氮)、 w (速效磷)、 w (速效钾)对不同类型菌肥的响应, 草地土壤营养库活化技术, 并筛选适宜菌肥. 结果表明, 黄河源区高寒草原土壤表层速效养分含量均随生长季呈先上升后下降的趋势. 5种菌肥处理与无菌肥CK处理相比较, 土壤 w (铵态氮)提升12.97%~41.18%, 巨大芽孢杆菌作用最为显著(41.18%). 土壤 w (硝态氮)提升12.72%~37.88%, 胶质芽孢杆菌作用最为显著(37.88%). 土壤 w (速效磷)改变-4.48%~28.77%, 胶质芽孢杆菌(26.11%)和巨大/胶质/甲基营养型芽孢杆菌(28.77%)作用最为显著. 土壤 w (速效钾)提升2.65%~10.42%, 胶质芽孢杆菌(10.42%)作用相对显著. 对于自然环境严酷的高寒草原, 在水热条件相对较好的时间段, 土壤施加胶质芽孢杆菌菌肥可有效提升高寒草原土壤速效养分.

关键词: 土壤氮磷钾素; 根际促生菌肥; 黄河源区

中图分类号: Q89 文献标识码: A 文章编号: 0455-2059(2021)03-0294-08

DOI: 10.13885/j.issn.0455-2059.2021.03.002

The response of alpine grassland soil to different PGPR bacterial fertilizers in the source region of the Yellow River

ZHONG Song¹, GAO Jun-cheng¹, DONG Shi-kui², ZHAO Xiao-hong³, LIU Pan¹,
ZHOU Hua-kun⁴, YANG Chong¹, LIU Yan-fang¹, SUN Li-jiao¹, WANG Wen-ying¹

1. The School of Life Science, Qinghai Normal University, Xining 810008, China
2. College of Grassland Science, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China
3. The 13th Middle School of Xining City, Xining 810008, China
4. Key Laboratory of Restoration Ecology in Cold Region of Qinghai Province, Northwest Plateau Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008, China

Abstract: With the alpine grassland of Maduo County in the source region of the Yellow River as the study object, different types of rhizosphere growth-promoting bacterial fertilizers (PGPR) were applied in situ in the field to study the responses of readily available nitrogen, phosphorus and potassium amount

收稿日期: 2020-04-25 修回日期: 2020-07-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(41761107); 青海省科技厅重大专项项目(2019-SF-A12); 国家重点研发计划项目(2018YF D0800803-1); 青海省2021年度第一批中央引导地方科技发展专项资金(2021ZY002)

作者简介: 王文颖(1973-), 女, 青海湟源人, 教授, 博士, e-mail: wangwy0106@163.com, 研究方向为草地生态学, 通信联系人.

of soil in the alpine grassland to different types of bacterial fertilizers, and grassland soil nutrient pool activation technology was used to screen suitable bacterial fertilizers, are in order to provide technical support for sustainable development of grassland in the source region of the Yellow River. The results showed that the readily available nutrients in the surface layer of the alpine grassland increased first and then decreased with the growing season. A comparison of five kinds of bacterial fertilizer treatments with sterile CK treatment showed that the soil $w(\text{ammonium nitrogen})$ increased by 12.97% to 41.18%, *Bacillus megaterium* was the most significant (41.18%); $w(\text{nitrate nitrogen})$ of the soil increased from 12.72% to 37.88%, the most significant being *Bacillus mucilaginosus* (37.88%); the change of soil $w(\text{readily available phosphorus})$ was from -4.48% to 28.77%, and *B. mucilaginosus* (26.11%) and *Bacillus gigantea/gliol/methylotrophic bacteria* (28.77%) were the most significant; $w(\text{readily available potassium})$ in the soil increased by 2.65% to 10.42%, *B. mucilaginosus* (10.42%) was relatively significant. A comprehensive analysis showed that the application of *B. mucilaginosus* fertilizer to the soil might effectively improve the readily available nutrients under the relatively good hydrothermal conditions period for alpine grasslands with a harsh natural environment.

Key words: soil N, P, K; rhizosphere growth-promoting bacterial fertilizer; source area of the Yellow River

黄河源区是中华民族“母亲河”的发源地,其生态安全对整个黄河流域的可持续发展至关重要。黄河源区供水量占黄河总水量的50%左右,除了水资源供给外,黄河源区生态系统还具有气候调节、水土保持、CO₂固定、家畜生产、文化传承等重要功能,其生态环境的变化影响着整个源区以及黄河中下游地区的生态、生产与人民生活^[1]。受到环境变迁以及人类活动的长期影响,致使土壤的氮、磷、钾等速效养分下降,导致土壤退化问题日益突出,且黄河源区土地自我恢复力较差,已对当地牧民的生产生活和周边环境敲响警钟,亟待通过各种技术手段进行恢复治理^[2]。高寒草原的退化是土壤和植物的协同退化,对退化草地的治理既是植被恢复也是土壤恢复^[3]。

植物根际促生细菌是指自由活动于土壤中植物根内或根际的有益于植物生长,且对植物抗病虫害和增加植物生物量产量起积极促进作用的一类菌^[4]。此类菌具有固氮、解磷、解钾、分泌植物激素、解铁、产生氨基环丙烷羧酸等一种或多种功能,此外植物根际促生细菌对降低环境对植物生长的不利影响有明显效果,从而间接促进地上植物的生长^[5]。相比传统化肥,微生物菌肥具有施用便捷、成本相对低、无污染无公害、防治病虫害等优点;部分植物根际促生细菌具有解磷、解钾的作用,适合在高寒草原总养分含量高而速效养分含量低的土壤中施用,以提高土壤的速效养分,促进牧草生长。因此,本研究筛选5类根际促生菌肥(rhizosphere growth-promoting bacterial fertilizer, PGPR),野外原位在土壤中添加,监测高寒草原土壤速效磷、速效钾、氨态氮、硝态氮等指标动态

变化趋势,研究对高寒草地土壤氮素、磷素和钾元素的转化能力,从土壤养分的角度分析5种菌肥在高寒草原的适应性,筛选适合的菌肥,丰富发展高寒草地生态保护技术。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

在青海省果洛藏族自治州玛多县高寒草原开展野外试验。玛多县处于阿尼玛沁雪山以西、巴颜喀拉山北部,地理坐标介于33°50′~35°40′N, 96°50′~99°20′E,年平均气温仅为-3.8℃,平均降水量仅为321.6 mm。玛多县属于黄河源头,黄河水源地扎陵湖、鄂陵湖在其境内^[6-7]。玛多县是黄河源区的核心区域,生态环境与功能变化备受关注^[8]。本研究地点在玛多县玛查理镇,植被类型为高寒草原^[9-10],以紫花针茅(*Stipa purpurea*)为优势种,植被总盖度为30%~50%,土壤类型为高山草原土,受青藏高原发育年代短和地势高的影响,植被稀疏,土层浅薄,区内冻土分布极广^[11],供试土壤总养分理化性质见表1。

1.2 PGPR菌肥种类的筛选

依据高寒草原自然环境较为脆弱、土壤总养分含量较高而速效养分含量较低的特点,土壤养分需要转化为速效养分才能被植物吸收。本研究选择具有解磷/解钾和固氮作用的5种PGPR菌肥作为试验对象,检验它们在高寒草原土中转化氮磷钾的效果。巨大芽孢杆菌具有解磷、协同解钾及固氮功能;胶质芽孢杆菌具有解钾、协同解磷及固氮功能;巨大/胶质/甲基营养型芽孢杆菌具有解磷解钾、协同固氮功能;解磷/解钾促生复合菌

表1 高寒草原试验样地总养分理化性质
Table 1 Physicochemical properties of total nutrients in the alpine grassland

土层深度/cm	w(总碳)	w(总氮)	w(总磷)	w(总钾)
0~10	21.554	1.127	0.540	16.829
10~20	21.499	1.032	0.398	12.258

具有解磷、解钾功能; 荧光假单孢杆菌具有固氮防病功能. 其中巨大芽孢杆菌、胶质芽孢杆菌、解磷/解钾/促生复合菌及巨大/胶质/甲基营养型芽孢杆菌购于山东蔚蓝生物科技有限公司, 荧光假单孢杆菌购于常州兰陵制药有限公司. 巨大芽孢杆菌、解磷/解钾/促生复合菌及巨大/胶质/甲基营养型芽孢杆菌活菌数均为 5.0×10^{10} CFU/g, 胶质芽孢杆菌活菌数为 1.0×10^{10} CFU/g, 荧光假单孢杆菌有效成分含量为 3.0×10^{11} /g.

1.3 样地设置

在玛多县选定植物的丰富度、盖度等相对均匀, 具有代表性的高寒草原实验野外样地. 大样地采用随机区组设计, 8组处理, 每组3个重复, 共计24个小样地, 每个小样地面积 $3 \text{ m} \times 2 \text{ m}$, 为防止施加菌肥互相渗透影响, 每个小样地间隔均为 1 m . 每个小样地每间隔 50 cm 划破草皮表层, 深度为 5 cm . 根据每种菌肥施加要求, 将一定量的水中添加适量菌肥后缓缓加入划破的草皮中(表2).

表2 高寒草原试验样地处理及菌肥配施
Table 2 The experimental plot treatment and application of microbial fertilizer on alpine steppe

代码	处理	施肥量/g	配水量/L
CK	空白对照	0	0
G	划破草皮	0	0
W	划破草皮+水	0	4
BM	划破草皮+水+巨大芽孢杆菌	6	4
BMK	划破草皮+水+胶质芽孢杆菌	12	4
PF	划破草皮+水+荧光假单孢杆菌	3.32	4
P	划破草皮+水+解磷/解钾/促生复合菌	6	4
MUK	划破草皮+水+巨大/胶质/甲基营养型芽孢杆菌	6	4

根据生物菌肥使用说明以及单位含量菌数, 确定施肥量. 每个小样地单位面积有效菌数相同.

1.4 样品采集及分析

高寒草原实验样地建成后施加菌肥, 生长季取土壤样品分析土壤 $w(\text{氨态氮})$ 、 $w(\text{硝态氮})$ 、 $w(\text{速效磷})$ 、 $w(\text{速效钾})$. 玛多高寒草原植物生长季短, 仅3

个月的牧草生长期(5月底返青到8月底枯黄), 考虑到高寒气候条件对菌肥微生物的影响, 野外菌肥添加试验在水热条件较好的7月10日进行. 样地按照“S”形取样, 用土钻法分0~10、10~20 cm两层, 每个样地分别将各层土样取3钻土混匀后放入自封袋, 冰箱 $-4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 冷藏待分析, 分别在7月10日、7月16日、7月30日、8月15日和8月23日取土壤样品.

土壤 $w(\text{铵态氮})$ 用氯化钾浸提-水杨酸钠法测定; $w(\text{硝态氮})$ 用氯化钾浸提-硫酸肼还原法测定; $w(\text{速效磷})$ 用碳酸氢钠浸提-磷钼蓝法, 全自动间断化学分析仪测定; $w(\text{速效钾})$ 用醋酸铵浸提-火焰燃烧法, AA-6300原子吸收仪测定.

2 结果与分析

2.1 不同菌肥处理下土壤 $w(\text{铵态氮})$ 、 $w(\text{硝态氮})$ 随时间动态变化特征

高寒草原不同菌肥处理下0~10 cm土壤 $w(\text{铵态氮})$ 、 $w(\text{硝态氮})$ 动态变化特征见表3. 处理第1天, 土壤 $w(\text{铵态氮})$ BMK处理显著高于其他处理, 其他处理间差异不显著; 处理后第7天, BMK、PF处理显著高于CK处理, 其他处理间差异不显著; 处理第21天, MUK处理显著高于其他处理, BM、P、BMK处理显著高于CK处理; 处理第37天, BM、BMK、PF处理显著高于其他处理, 其他处理间差异不显著; 处理第45天, BM处理显著高于CK、W、P处理, 其他处理间差异不显著. 另外, 划破草皮或划破草皮+添加水分处理对土壤铵态氮等其他速效养分没有显著影响.

土壤 $w(\text{硝态氮})$ 处理第1天W、BMK处理显著高于其他处理, 其他处理间差异不显著; 处理第7天, BMK、G处理显著高于W、BM处理, 其他处理间差异不显著; 处理第21天, PF处理显著高于CK、G、P、BM处理, 其他处理间差异不显著; 处理第37天, BMK处理显著高于CK、G、W处理, 其他处理间差异不显著; 处理第45天, BMK处理显著高于CK、W、BM、MUK处理, 其他处理间差异不显著.

高寒草原不同菌肥处理下10~20 cm土壤 $w(\text{铵态氮})$ 、 $w(\text{硝态氮})$ 动态变化特征见表4. 处理第1天, 土壤 $w(\text{铵态氮})$ P处理显著高于BMK处理, 其他处理间差异不显著; 处理第7天, P、BM处理显著高于W处理, 其他处理间差异不显著; 处理第

表3 高寒草原不同菌肥处理下0~10 cm土壤中w(铵态氮)、w(硝态氮)随时间动态变化特征
Table 3 Change of w(soil ammonium nitrogen) and w(soil nitrate nitrogen) (0-10 cm) under the different bacterial fertilizer treatments in alpine steppe

10 ⁻⁶					
处理	w(铵态氮)				
	1 d	7 d	21 d	37 d	45 d
CK	1.323±0.084 ^{Bd}	3.662±0.347 ^{Bc}	6.912±0.120 ^{Db}	8.987±0.256 ^{Da}	5.516±1.071 ^{Cb}
G	1.147±0.081 ^{Bc}	3.944±0.553 ^{ABb}	6.513±0.138 ^{Da}	8.422±0.383 ^{Da}	6.785±0.718 ^{ABCa}
W	1.371±0.117 ^{Bd}	4.392±0.541 ^{ABc}	7.437±0.276 ^{Cab}	9.499±1.145 ^{CDa}	6.546±1.154 ^{BCb}
P	1.300±0.084 ^{Bd}	4.005±0.835 ^{ABc}	7.832±0.156 ^{BCb}	10.153±0.323 ^{BCa}	5.197±0.232 ^{Cc}
PF	1.408±0.021 ^{ABd}	4.958±0.679 ^{Ac}	7.305±0.374 ^{Cb}	11.937±0.181 ^{Aa}	7.952±0.093 ^{ABb}
BM	1.476±0.166 ^{ABd}	3.921±0.161 ^{ABc}	8.294±0.154 ^{Bb}	12.688±0.385 ^{Aa}	8.796±0.228 ^{Ab}
BMK	1.893±0.397 ^{Ad}	5.071±0.086 ^{Ac}	7.697±0.129 ^{BCb}	11.883±1.000 ^{Aa}	7.996±0.379 ^{ABb}
MUK	1.373±0.042 ^{Bd}	4.733±0.521 ^{ABc}	8.971±0.136 ^{Ab}	11.479±0.502 ^{ABa}	8.490±0.476 ^{ABb}

处理	w(硝态氮)				
	1 d	7 d	21 d	37 d	45 d
CK	2.401±0.023 ^{Cc}	4.622±0.414 ^{ABCd}	6.289±0.068 ^{CDc}	8.640±0.138 ^{CDa}	6.894±0.247 ^{Cb}
G	2.366±0.238 ^{Cc}	5.831±0.102 ^{Ab}	6.981±0.943 ^{BCab}	7.530±0.140 ^{Dab}	8.006±0.838 ^{ABCa}
W	3.161±0.332 ^{Ad}	4.556±0.417 ^{BCc}	7.361±0.539 ^{ABCb}	9.628±0.142 ^{BCDa}	6.874±0.338 ^{Cb}
P	2.714±0.191 ^{BCd}	4.277±0.393 ^{ABCc}	5.373±0.544 ^{Dc}	9.739±0.110 ^{BCa}	8.004±0.484 ^{ABCb}
PF	2.676±0.308 ^{BCd}	5.109±0.173 ^{ABc}	8.982±0.747 ^{Ab}	10.700±0.350 ^{ABa}	8.905±0.329 ^{ABb}
BM	3.120±0.340 ^{ABc}	3.329±0.856 ^{Cc}	7.384±0.482 ^{BCb}	9.796±0.865 ^{ABCa}	7.483±0.879 ^{BCb}
BMK	3.268±0.381 ^{Ad}	5.906±0.564 ^{Abc}	7.587±0.147 ^{ABCbc}	11.913±1.649 ^{Aa}	9.166±0.257 ^{Ab}
MUK	2.921±0.180 ^{Be}	5.869±0.553 ^{ABd}	8.032±0.144 ^{ABb}	10.586±0.066 ^{ABCa}	6.905±0.291 ^{Cc}

A~D表示同一时间点不同处理下土壤w(铵态氮)、w(硝态氮)差异显著($P<0.05$); a~d表示同一处理在不同时间点土壤w(铵态氮)、w(硝态氮)差异显著($P<0.05$).

表4 高寒草原不同菌肥处理下10~20 cm土壤中w(铵态氮)、w(硝态氮)随时间动态变化特征
Table 4 Change of w(soil ammonium nitrogen) and w(soil nitrate nitrogen) (10-20 cm) under the different bacterial fertilizer treatments in alpine steppe

10 ⁻⁶					
处理	w(铵态氮)				
	1 d	7 d	21 d	37 d	45 d
CK	1.089±0.101 ^{ABc}	3.190±0.122 ^{ABb}	3.809±0.092 ^{CDb}	4.932±0.574 ^{Ba}	3.293±0.145 ^{BCb}
G	1.012±0.052 ^{ABc}	3.187±0.863 ^{ABb}	3.709±0.289 ^{Db}	5.463±0.377 ^{ABa}	3.027±0.407 ^{Cb}
W	0.975±0.275 ^{ABc}	2.672±0.421 ^{ABb}	3.677±0.191 ^{Db}	5.691±0.818 ^{ABa}	3.111±0.270 ^{Cb}
P	1.114±0.060 ^{Ac}	3.350±0.536 ^{Ab}	4.173±0.111 ^{CDb}	6.891±0.559 ^{Aa}	3.693±0.414 ^{ABCb}
PF	1.054±0.110 ^{ABd}	3.275±0.496 ^{ABc}	4.163±0.282 ^{BCb}	6.973±0.323 ^{Aa}	3.591±0.345 ^{ABCbc}
BM	0.806±0.050 ^{ABd}	3.464±0.273 ^{Ac}	4.682±0.154 ^{ABb}	6.108±0.487 ^{ABa}	3.986±0.137 ^{ABc}
BMK	0.762±0.133 ^{Bd}	3.040±0.422 ^{ABc}	4.751±0.128 ^{ABb}	6.752±0.250 ^{Aa}	3.725±0.212 ^{ABCc}
MUK	1.109±0.030 ^{ABc}	3.235±0.724 ^{ABb}	5.089±0.182 ^{Aa}	6.281±0.288 ^{ABa}	4.020±0.271 ^{Ab}

处理	w(硝态氮)				
	1 d	7 d	21 d	37 d	45 d
CK	0.817±0.122 ^{BCc}	1.653±0.388 ^{Bbc}	3.506±0.421 ^{ABCa}	4.423±0.449 ^{Ba}	2.516±0.364 ^{Db}
G	1.092±0.023 ^{ABc}	1.628±0.217 ^{Bbc}	2.213±0.486 ^{Db}	3.819±0.573 ^{Ba}	3.315±0.202 ^{BCa}
W	1.108±0.284 ^{ABc}	1.347±0.363 ^{BCc}	2.472±0.275 ^{Db}	4.257±0.408 ^{Ba}	2.683±0.276 ^{Db}
P	1.143±0.050 ^{ABc}	1.868±0.507 ^{Ac}	3.643±0.388 ^{ABCb}	5.664±0.059 ^{ABa}	3.694±0.328 ^{ABb}
PF	0.717±0.134 ^{Cc}	1.934±0.301 ^{Ad}	2.985±0.092 ^{BCDc}	5.283±0.440 ^{ABa}	4.131±0.269 ^{Ab}
BM	1.082±0.086 ^{ABCc}	1.101±0.067 ^{Cc}	4.092±0.152 ^{Aab}	4.929±0.700 ^{ABa}	3.688±0.165 ^{ABb}
BMK	0.942±0.070 ^{ABCd}	1.801±0.507 ^{Ac}	3.931±0.084 ^{ABb}	5.312±0.458 ^{ABa}	2.660±0.199 ^{CDc}
MUK	1.201±0.092 ^{Ac}	1.549±0.371 ^{BCc}	2.778±0.177 ^{CDbc}	5.874±0.332 ^{Aa}	3.721±0.218 ^{ABb}

A~D表示同一时间点不同处理下土壤w(铵态氮)、w(硝态氮)差异显著($P<0.05$); a~d表示同一处理在不同时间点土壤w(铵态氮)、w(硝态氮)差异显著($P<0.05$).

21天, MUK处理显著高于CK、W、G、P处理, 其他处理间差异不显著; 处理第37天, BMK、PF处理显著高于CK处理, 其他处理间差异不显著; 处理第45天, MUK处理显著高于CK、W、G处理, 其他处理间差异不显著。

处理第1天, 土壤 w (硝态氮)MUK处理显著高于CK、PF处理, 其他处理间差异不显著; 处理第7天, P、PF、BMK处理显著高于其他处理, 其他处理间差异不显著; 处理第21天, BM处理显著高于G、W、PF、MUK处理, 其他各处理间差异不显著; 处理第37天, MUK处理显著高于CK、G、W处理, 其他各处理间差异不显著; 处理第45天, PF处理显著高于CK、G、W、BMK处理, 其他各处理间差异不显著。

2.2 不同菌肥处理下土壤 w (速效磷)、 w (速效钾)随时间动态变化特征

高寒草原不同菌肥处理下0~10 cm土壤 w (速效磷)、 w (速效钾)动态变化特征见表5。处理第1天, 土壤 w (速效磷)BM、BMK处理显著高于G、MUK处理, 其他处理间差异不显著; 处理第7天, BM、W处理显著高于CK、PF处理, 其他处理间

差异不显著; 处理第21天, BM、BMK、MUK处理显著高于CK、G处理, 其他处理间差异不显著; 处理第37天, BMK处理显著高于CK、G、W、P处理, 其他处理间差异不显著; 处理第45天, PF、BM、BMK处理显著高于G处理, 其他处理间差异不显著。

处理第1天土壤 w (速效钾)各处理间差异不显著; 处理第7天, MUK处理显著高于其他处理, 其他处理间差异不显著; 处理第21天, P、BMK处理显著高于CK、G、W处理, 其他处理间差异不显著; 处理第37天, BMK、MUK处理显著高于G、W处理, 其他处理间差异不显著; 处理第45天, MUK处理显著高于其他处理, 其他处理间差异不显著。

高寒草原不同菌肥处理下10~20 cm土壤 w (速效磷)、 w (速效钾)动态变化特征见表6。处理第1天, 土壤 w (速效磷)CK、G处理显著高于W、P处理, 其他处理间差异不显著; 处理第7天, BMK处理显著高于CK、G、W、PF、BM处理, 其他处理间差异不显著; 处理第21天, BMK处理显著高于CK、W、MUK处理, 其他处理间差异不显著; 处理第

表5 高寒草原不同菌肥处理下0~10 cm土壤中 w (速效磷)、 w (速效钾)随时间动态变化特征
Table 5 Change of w (soil available phosphorus) and w (soil available potassium) (0~10 cm) under the different bacterial fertilizer treatments in alpine steppe

处理	w (速效磷)				
	1 d	7 d	21 d	37 d	45 d
CK	4.276±0.494 ^{ABb}	4.703±0.195 ^{Bb}	6.845±0.465 ^{Ba}	7.948±0.258 ^{BCa}	4.384±0.839 ^{ABb}
G	3.652±0.419 ^{Bb}	4.559±0.206 ^{ABb}	6.746±0.528 ^{Ba}	7.592±0.787 ^{Ca}	4.013±0.821 ^{Bb}
W	4.052±0.703 ^{ABb}	5.220±1.078 ^{Ab}	7.198±0.417 ^{ABa}	7.459±0.588 ^{BCa}	4.512±0.486 ^{ABb}
P	3.914±1.233 ^{ABb}	4.915±0.447 ^{ABb}	7.925±0.624 ^{ABa}	7.592±0.648 ^{BCa}	5.023±0.173 ^{ABb}
PF	4.265±0.790 ^{ABc}	4.186±0.579 ^{Bc}	8.045±0.448 ^{ABa}	8.451±0.162 ^{ABCa}	5.891±0.672 ^{Ab}
BM	4.781±0.689 ^{Ab}	5.817±1.356 ^{Ab}	8.014±1.053 ^{ABa}	9.102±0.408 ^{ABa}	6.234±0.469 ^{Ab}
BMK	4.803±1.086 ^{Ac}	4.943±1.594 ^{ABc}	8.174±0.581 ^{Aab}	10.023±1.884 ^{ABa}	5.984±1.483 ^{ABc}
MUK	3.409±0.304 ^{Ba}	4.753±1.527 ^{ABa}	8.339±0.570 ^{Aa}	10.235±0.965 ^{Aa}	4.862±0.411 ^{ABa}

处理	w (速效钾)				
	1 d	7 d	21 d	37 d	45 d
CK	153.65±4.65 ^{Aa}	155.55±3.95 ^{BCDa}	156.35±4.69 ^{BCa}	164.75±1.22 ^{ABCa}	139.33±3.49 ^{Cb}
G	148.82±0.92 ^{Aa}	156.66±4.26 ^{CDa}	152.31±2.54 ^{BCa}	158.80±4.42 ^{BCa}	138.28±2.16 ^{Cb}
W	151.19±1.96 ^{Aa}	153.82±4.99 ^{Db}	153.56±2.69 ^{Bc}	153.72±3.55 ^{Cd}	151.85±0.35 ^{BCc}
P	146.81±4.29 ^{Abc}	170.90±22.99 ^{ABCb}	173.10±8.95 ^{Aa}	176.40±8.73 ^{ABa}	147.93±6.74 ^{Cc}
PF	152.56±3.19 ^{Ab}	153.93±1.84 ^{Db}	133.94±4.36 ^{Cc}	169.11±3.45 ^{ABa}	161.82±2.99 ^{Ba}
BM	158.80±4.55 ^{Abc}	166.00±12.01 ^{ABabc}	169.90±6.37 ^{ABab}	172.26±1.64 ^{ABa}	155.33±3.45 ^{BCc}
BMK	156.40±3.04 ^{Ab}	164.47±2.68 ^{BCb}	175.41±7.38 ^{Aa}	181.91±6.60 ^{Aa}	151.01±2.83 ^{BCb}
MUK	151.09±2.52 ^{Ab}	171.56±7.52 ^{Aab}	169.50±14.04 ^{ABab}	178.38±19.51 ^{Aab}	179.17±16.91 ^{Aa}

A~D表示同一时间点不同处理下土壤 w (速效磷)、 w (速效钾)差异显著($P<0.05$); a~d表示同一处理在不同时间点土壤 w (速效磷)、 w (速效钾)差异显著($P<0.05$).

表6 高寒草原不同菌肥处理下10~20 cm土壤中w(速效磷)、w(速效钾)随时间动态变化特征
Table 6 Change of w(soil available phosphorus) and w(soil available potassium) (10~20 cm) under the different bacterial fertilizer treatments in alpine steppe

处理	w(速效磷)				
	1 d	7 d	21 d	37 d	45 d
CK	2.258±0.223 ^{Abc}	1.593±0.085 ^{Cc}	3.256±0.352 ^{Cb}	3.562±1.094 ^{Ca}	2.107±0.361 ^{Bbc}
G	2.290±0.346 ^{Aa}	2.202±9.776 ^{BCa}	4.221±0.111 ^{ABCa}	5.752±1.068 ^{ABa}	3.052±0.588 ^{ABa}
W	1.795±0.970 ^{Ba}	2.320±0.073 ^{Bbc}	3.489±0.562 ^{BCa}	4.236±0.690 ^{BCa}	3.049±0.100 ^{ABab}
P	1.954±0.229 ^{ABb}	2.654±0.371 ^{ABb}	4.889±0.667 ^{ABa}	5.102±0.513 ^{Ba}	2.628±0.793 ^{ABb}
PF	1.775±0.323 ^{Bb}	2.272±0.114 ^{BCb}	4.123±0.536 ^{BCa}	5.116±0.416 ^{Ba}	2.852±0.488 ^{ABb}
BM	1.882±0.320 ^{ABb}	2.475±0.208 ^{Bb}	3.951±0.924 ^{BCa}	4.841±0.097 ^{Ba}	2.481±0.240 ^{ABb}
BMK	1.874±0.419 ^{ABbc}	3.079±1.012 ^{Ac}	5.061±0.213 ^{Aa}	5.124±0.654 ^{Bab}	2.556±0.503 ^{ABc}
MUK	1.924±0.130 ^{ABc}	2.601±0.128 ^{ABc}	4.862±0.110 ^{ABab}	6.269±0.620 ^{Aa}	4.566±1.787 ^{Abc}

处理	w(速效钾)				
	1 d	7 d	21 d	37 d	45 d
CK	133.74±1.88 ^{ABb}	146.05±2.24 ^{ABCa}	151.58±2.64 ^{ABa}	152.19±2.81 ^{Ba}	132.71±3.27 ^{Db}
G	128.93±1.29 ^{ABc}	139.60±1.66 ^{Cbc}	145.30±7.12 ^{ABab}	152.17±5.46 ^{Ba}	138.99±4.42 ^{BCDb}
W	134.55±4.53 ^{ABc}	140.60±9.27 ^{Cbc}	152.90±6.33 ^{ABab}	159.53±6.99 ^{ABa}	137.57±3.21 ^{CDbc}
P	133.50±4.80 ^{ABc}	151.94±7.54 ^{ABCab}	135.90±9.04 ^{Bbc}	155.64±4.54 ^{ABa}	135.57±1.61 ^{Dbc}
PF	129.65±4.90 ^{Bc}	146.30±12.50 ^{BCab}	134.40±4.42 ^{Bbc}	154.58±2.98 ^{ABa}	148.27±1.42 ^{ABa}
BM	134.20±8.75 ^{ABb}	158.83±8.82 ^{ABa}	150.00±7.20 ^{ABab}	164.70±2.44 ^{Aa}	149.87±4.97 ^{ABab}
BMK	138.61±8.87 ^{ABb}	161.91±3.28 ^{ABa}	144.40±9.42 ^{ABab}	160.92±8.72 ^{ABa}	145.23±5.49 ^{ABCab}
MUK	145.66±6.64 ^{Ab}	157.03±3.50 ^{ABa}	158.76±6.81 ^{Aa}	142.50±10.74 ^{Bab}	153.46±1.10 ^{Aab}

A~D表示同一时间点不同处理下土壤w(速效磷)、w(速效钾)差异显著($P<0.05$); a~d表示同一处理在不同时间点土壤w(速效磷)、w(速效钾)差异显著($P<0.05$).

37天, MUK处理显著高于其他处理, 其他处理间差异不显著; 处理第45天, MUK处理显著高于CK处理, 其他处理间差异不显著.

处理第1天, 土壤w(速效钾)MUK处理显著高于PF处理; 处理第7天, BMK处理显著高于G、W、PF处理, 其他处理差异不显著; 处理第21天, MUK处理显著高于P、PF处理, 其他处理间差异不显著; 处理第37天, BM处理显著高于CK、G、MUK处理, 其他处理间差异不显著; 处理第45天, MUK处理显著高于CK、G、W、P处理, 其他处理间差异不显著.

3 讨论

3.1 高寒草原土壤养分特征

土壤氮、磷、钾循环作为陆地生态系统物质循环的重要组成部分, 是陆地生态系统中物质循环和能量流动的重要方面. 氮元素作为生物生命活动必需的大量元素之一, 其储量和分配影响陆地生态系统的结构、功能及生产力水平^[12-13]. 磷是植物生长发育的必需元素, 由于土壤对磷的强烈

化学固定作用, 致使土壤磷素多以铁磷酸盐、铝磷酸盐和闭蓄态磷等难溶态存在, 土壤中磷素主要通过沉淀和溶解、吸附和解吸、矿化和固定来转化^[14]. 土壤全磷含量较高而有效磷含量不足, 是限制草业可持续发展的重要因素^[15].

青藏高原不同植被类型土壤表层w(总氮)= $8.00\times 10^{-5}\sim 6.92\times 10^{-3}$, 平均为 1.61×10^{-3} , 其中高寒草甸最高. 土壤w(总磷)= $1.20\times 10^{-4}\sim 1.11\times 10^{-3}$, 平均值为 5.3×10^{-4} . 林地w(总磷)最高, 平均为 7.2×10^{-4} ^[16]. 说明高寒草原土壤微生物活性低, 土壤氮磷的矿化分解能力差, 导致植物可吸收利用的氮磷水平较低, 限制了植被的初级生产力水平. 高旭升等^[17]研究表明, 高寒草原草地土壤全磷含量较丰富, 土壤表层(0~20 cm)w(全磷)= $1.30\times 10^{-3}\sim 1.63\times 10^{-3}$, 不同退化程度间土壤w(全磷)变化不明显, 说明高寒草地退化对w(全磷)影响不显著. 高寒草原土壤w(全钾)= $2.069\times 10^{-2}\sim 2.239\times 10^{-2}$, 且高寒草原退化对土壤w(全钾)几乎没有影响. 本研究结果表明, 高寒草原土壤中w(总磷)和w(总钾)较高, 尤其是钾元素, 说明青藏高原高寒草地是富钾的地区, 施加5种PGPR菌肥对高寒草原土壤w(总

碳)、 $w(\text{总氮})$ 、 $w(\text{总磷})$ 、 $w(\text{总钾})$ 影响亦不显著。

3.2 菌肥添加对土壤速效养分的影响

解磷和解钾微生物肥料是目前应用研究较多的两种微生物肥料^[18]。土壤中难以被植物吸收状态(卵磷脂、植酸、难溶磷酸盐等)的磷占30%~50%^[19],解磷微生物由于其可以分解土壤中的难溶磷矿物,释放出其中的磷或者是分解土壤中的有机质,将有机磷变为植物可以吸收利用的无机磷,从而为作物提供有效磷素^[20]。能够使土壤中无效态磷转化为有效态磷的微生物种类很多,研究比较多的是假单胞菌和巨大芽孢杆菌^[21]。如假单胞菌MET75与土壤混合后在自然环境下作用72 h,土壤 $w(\text{有效磷})$ 由 8.420×10^{-6} 升至 1.684×10^{-5} ^[22];巨大芽孢杆菌LY02可以使黑麦草根际土壤 $w(\text{有效磷})$ 增加16.2%~26.7%^[23]。土壤中的钾主要以钾长石、云母等硅铝酸盐含钾矿物形式存在,难被植物吸收利用^[24],而解钾细菌多是硅酸盐细菌,它能分解硅酸盐类矿物并释放出钾等元素供植物利用^[25]。能够使土壤中矿物态钾转化为有效钾的细菌,目前发现的主要有扭脱芽孢杆菌、胶质芽孢杆菌^[26]。陈易等^[27]发现,与对照相比环状芽孢杆菌使土壤 $w(\text{可溶性钾})$ 增加124%,耿丽平等^[28]也得到相同的研究结果。同时菌肥也具有固氮的作用,如嗜酸性韩国假单胞可显著提高根际土壤 $w(\text{铵态氮})$ 、 $w(\text{硝态氮})$ ^[29]。

本研究结果,高寒草原生长季土壤(0~10 cm层) $w(\text{铵态氮})$ 仅为 1.32×10^{-6} ~ 8.99×10^{-6} ,土壤 $w(\text{硝态氮})$ 仅为 2.40×10^{-6} ~ 8.64×10^{-6} ,土壤 $w(\text{速效磷})$ 仅 4.28×10^{-6} ~ 7.95×10^{-6} ,但土壤 $w(\text{铵态氮})$ 、 $w(\text{硝态氮})$ 、 $w(\text{速效磷})$ 、 $w(\text{速效钾})$ 等速效养分随时间变化较为明显,呈先上升后下降的趋势,分析其原因可能是生长季内随温度升高、降水增多,土壤活性加强,植物根系分泌出较多激素分解土壤中矿化营养元素所致,与高旭升等^[17]的研究相同。同一时间梯度,5种菌肥处理下相比无菌肥处理,土壤 $w(\text{铵态氮})$ 、 $w(\text{硝态氮})$ 、 $w(\text{速效磷})$ 、 $w(\text{速效钾})$ 明显较高,其中,BM、BMK、MUK处理下土壤速效养分含量普遍升高,对土壤 $w(\text{速效磷})$ 、 $w(\text{速效钾})$ 影响尤其显著,其原因可能是由于施加菌肥为巨大芽、胶质芽、巨大/胶质/甲基营养型芽孢杆菌,其作用特点就是解磷解钾,与耿丽平等^[30]研究一致。5种菌肥处理与无菌肥CK处理相比较,土壤 $w(\text{铵}$

态氮)提升12.97%~41.18%,巨大芽孢杆菌作用最为显著(41.18%),胶质芽孢杆菌(32.22%)、荧光假单胞杆菌(32.83%)和巨大/胶质/甲基营养型芽孢杆菌(27.73%)作用次之;土壤 $w(\text{硝态氮})$ 提升12.72%~37.88%,胶质芽孢杆菌作用最为显著(37.88%),荧光假单胞杆菌(24.06%)和巨大/胶质/甲基营养型芽孢杆菌(22.52%)作用次之;土壤 $w(\text{速效磷})$ 改变-4.48%~28.77%,胶质芽孢杆菌(26.11%)和巨大/胶质/甲基营养型芽孢杆菌(28.77%)作用最为显著,巨大芽孢杆菌(14.52%)作用次之;土壤 $w(\text{速效钾})$ 提升2.65%~10.42%,胶质芽孢杆菌(10.42%)作用相对显著。

4 结论

添加微生物菌肥对增加土壤中有益微生物含量,增加土壤中速效养分含量,促进植物生长,加速植被恢复具有一定的促进作用。不同的微生物菌肥对土壤的作用效果存在一定的差异性,导致其对土壤速效养分含量的改变程度的作用有所不同。试验选取的微生物菌肥,巨大芽孢杆菌、胶质芽孢杆菌对土壤速效养分的提升具有明显的作用,如胶质芽孢杆菌使土壤 $w(\text{硝态氮})$ 提升37.88%、 $w(\text{速效磷})$ 提升26.11%、 $w(\text{速效钾})$ 提升10.42%,巨大芽孢杆菌使土壤 $w(\text{铵态氮})$ 提升41.18%。综合分析,对于低温、高紫外线的高寒草原,土壤施加胶质芽孢杆菌可普遍提高生长季高寒草原土速效养分,在黄河源区高寒草原可以推广应用。

参考文献

- [1] 吴渊. 黄河源区草原生态保护补助奖励政策实施效果评价[D]. 兰州: 兰州大学, 2019.
- [2] 林丽, 曹广民, 李以康, 等. 人类活动对青藏高原高寒矮嵩草甸碳过程的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(15): 4012-4018.
- [3] 杨青, 何贵永, 孙浩智, 等. 青藏高原高寒草甸土壤理化性质及微生物量对放牧强度的响应[J]. 甘肃农业大学学报, 2013, 48(4): 76-81.
- [4] 康贻军, 程洁, 梅丽娟, 等. 植物根际促生菌作用机制研究进展[J]. 应用生态学报, 2010, 21(1): 232-238.
- [5] KAMILOVA F, VALIDOV S, AZAROVA T, et al. Enrichment for enhanced competitive plant root tip colonizers selects for a new class of biocontrol bacteria [J]. Environmental Microbiology, 2010, 7(11): 1809-1817.

- [6] 曹文炳, 万力, 曾亦键, 等. 气候变暖对黄河源区生态环境的影响[J]. 地学前缘, 2006, 13(1): 40-47.
- [7] 程捷, 田明中, 张绪教, 等. 黄河源区的自然资源状况与经济可持续发展: 以玛多县为例[J]. 国土与自然资源研究, 2001(4): 1-4.
- [8] 牛天林, 刘雪华, 李周园, 等. 1990-2009年间黄河源区玛多县草地格局时空变化[J]. 环境科学与技术, 2013, 36(增刊2): 438-442.
- [9] 玛多县地方志编纂委员会. 玛多县志1996-2010[M]. 西宁: 青海民族出版社, 2011: 47-49, 475-481.
- [10] 李红琴, 乔小龙, 张懿铨, 等. 封育对黄河源头玛多高寒草原水源涵养的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(1): 195-200.
- [11] 潘竞虎, 刘菊玲. 黄河源区土地利用与景观格局变化[J]. 水土保持通报, 2005, 25(1): 29-32.
- [12] VITOUSEK P M, HATTENSCHWILER S, OLANDER L, et al. Nitrogen and nature[J]. *Ambio*, 2002, 31(2): 97-101.
- [13] PAOLO N, PAUL E. The chemical and functional characterization of soil N and its biotic components[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(12): 2357-2369.
- [14] 倪杰强. 不同生物碳对滴灌棉田土壤磷素及磷肥利用率影响[D]. 石河子: 石河子大学, 2015.
- [15] 于姣姐, 殷丹阳, 李莹, 等. 生物炭对土壤磷素循环影响机制研究进展[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(18): 17-21.
- [16] 张亚亚. 青藏高原植物土壤碳氮磷化学计量特征及其对环境因子的响应[D]. 天津: 天津师范大学, 2017.
- [17] 高旭升, 田种存, 郝学宁, 等. 三江源区高寒草原草地不同退化程度土壤养分变化[J]. 青海大学学报(自然科学版), 2006, 24(5): 37-40.
- [18] 马海林, 杜秉海, 邢尚军, 等. 解磷、解钾根际促生菌的筛选与鉴定[J]. 山东林业科技, 2013, 43(6): 1-4.
- [19] SOSIĆI L, BARRETEAU H, SIMČIĆ M, et al. Second-generation sulfonamide inhibitors of D-glutamic acid-adding enzyme: activity optimisation with conformationally rigid analogues of D-glutamic acid[J]. *European Journal of Medicinal Chemistry*, 2011, 46(7): 2880-2894.
- [20] 冯瑞章, 姚拓, 周万海, 等. 溶磷菌和固氮菌溶解磷矿粉时的互作效应[J]. 生态学报, 2006, 26(8): 2764-2769.
- [21] 吴海燕, 金荣德, 范作伟, 等. 解磷巨大芽孢杆菌(*Bacillus megaterium*)的溶磷机理探讨[J]. 吉林农业大学学报, 2014, 36(2): 171-175.
- [22] 刘诚, 张钰, 余梦林, 等. 多功能菌株假单胞菌的溶磷和解磷效果及其应用[J]. 湖北大学学报(自然科学版), 2018, 40(5): 457-461, 469.
- [23] 赵树民, 李晓东, 虞方伯, 等. 巨大芽孢杆菌LY02对黑麦草修复重金属污染土壤的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(5): 340-344.
- [24] 赵晨曦, 刘前刚, 张志元. 磷钾细菌解磷解钾能力的研究[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2004, 30(6): 519-521.
- [25] 蒋宝贵, 赵斌. 解磷解钾自生固氮菌的分离筛选及鉴定[J]. 华中农业大学学报, 2005, 24(1): 43-48.
- [26] 饶正华, 林启美. 解钾菌与解磷菌及固氮菌的相互作用[J]. 生态学杂志, 2002, 21(2): 71-73.
- [27] 陈易, 程永毅, 郭涛, 等. 一株具紫色土亲和性解钾菌的筛选及促生效应[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2016, 38(5): 58-65.
- [28] 耿丽平, 李小磊, 赵全利, 等. 添加微生物菌剂对小麦产量及土壤生物学性状的影响[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(5): 50-54.
- [29] 赵倩, 任广伟, 王杰, 等. 施用韩国假单胞菌(*Pseudomonas koreensis*)CLP-7对连作烟田土壤质量及微生物群落功能多样性的影响[J]. 生态学报, 2020, 40(15): 5357-5366.
- [30] 耿丽平, 范俊, 王婧瑶, 等. 解磷、钾功能性微生物耐盐效应研究[J]. 水土保持学报, 2020, 34(4): 370-375.

(责任编辑: 蔡红霞)