

不同促生菌剂对柴达木枸杞 土壤生物学特性的影响

保善存^{1,2}, 吕亮雨^{1,2}, 龙启辰^{1,2}, 樊光辉^{2,3}

(1.青海大学农牧学院,青海 西宁 810016;2.青海大学农林科学院,青海 西宁 810016;
3.青海高原林木遗传育种实验室,青海 西宁 810016)

摘要:为探究有机肥配施促生菌剂对柴达木地区高垄栽培有机枸杞生长发育及土壤性状的影响,以诺木洪实验区枸杞‘宁杞7-8号’为试验材料,设对照(CK,施有机肥)、有机肥配施哈茨木霉菌、枯草芽孢杆菌、解淀粉芽孢杆菌和胶冻样芽孢杆菌4种不同促生菌剂,共5个处理,比较不同处理对有机枸杞生长及其栽培土壤特性的影响。结果表明:与CK相比,有机肥配施促生菌剂可不同程度提升枸杞的树高、地径、SPAD值、根系活力、净光合速率(P_n)等参数,其中枯草芽孢杆菌处理下树高、根系活力、 P_n 和单株产量较CK提升最高,增幅分别为13.4%、46.7%、37.1%和36.3%;不同菌剂处理均明显降低了土壤pH值、电导率和微生物碳氮比,胶冻样芽孢杆菌处理效果最明显,较CK分别降低9.0%、51.9%和45.3%。不同菌剂处理还可显著提升土壤有机质含量、速效养分含量、土壤酶活性、土壤微生物数量,其中枯草芽孢杆菌处理下,土壤有机质和碱解氮含量较CK分别增加26.3%和9.8%,土壤脲酶活性和微生物总数较CK分别增加35.7%和26.6%。通过对土壤生物学特性的主成分分析,综合得出有机肥配施枯草芽孢杆菌处理对柴达木有机枸杞栽培土壤的肥力水平促进效果最佳。

关键词:枸杞;微生物促生菌;根际土壤生物学特性;生长特性;柴达木

中图分类号:S567.1⁺9; S154 **文献标志码:**A

Effects of different growth-promoting microbial agents on soil biological characteristics of *Lycium barbarum* cultivated in Qaidam

BAO Shancun^{1,2}, LV Liangyu^{1,2}, LONG Qichen^{1,2}, FAN Guanghui^{2,3}

(1. College of Agriculture and Animal Husbandry, Qinghai University, Xining, Qinghai 810016, China;
2. College of Agriculture and Forestry Sciences, Qinghai University, Xining, Qinghai 810016, China;
3. Forest Genetics and Breeding Laboratory of Qinghai Plateau, Xining, Qinghai 810016, China)

Abstract: The purpose of this study was to explore the effects of organic manure combined with growth-promoting microbial inoculum on the growth and soil properties of organic *Lycium barbarum* cultivated on high ridges in Qaidam area. ‘Ningqi No.7-8’ in Nomuhong experimental area was used as the experimental material. Organic manure was added to the facility as the control (CK), and four different growth-promoting microbial agents, namely *Trichoderma harzianum*, *Bacillus subtilis*, *Bacillus amyloliquefaciens* and *Bacillus mucilaginosus*, were applied to the organic *Lycium barbarum*. The effects of different treatments on the growth and soil properties of organic *Lycium barbarum* were compared. The results indicated that, compared to the control (CK), the application of organic manure combined with growth-promoting microbial agents inordinately enhanced the tree height, ground diameter, SPAD value, root activity, and net photosynthetic rate (P_n) of *Lycium barbarum* L.. Notably, the treatment with *Bacillus subtilis* yielded the most significant improvements in plant height, root activity, P_n , and yield per plant, with increases of 13.4%, 46.7%, 37.1%, and 36.3%, respectively. Different microbial agent treatments significantly reduced

收稿日期:2023-04-01

修回日期:2023-09-04

基金项目:中央财政林草科技推广示范项目(青[2022]TG06);青海省重点研发与转化计划(2022-NK-113,2022-NK-116);青海省科技特派员专项(2023-NK-P13);青海省基础研究计划(2021-ZJ-962Q)

作者简介:保善存(1999-),女,青海西宁人,硕士研究生,研究方向为林木育种。E-mail:bshancun@163.com

通信作者:樊光辉(1972-),男,青海西宁人,副研究员,主要从事枸杞良种选育和良种繁育研究。E-mail:qhfgh@163.com

soil pH, electrical conductivity, and microbial C/N ratio. The effect was the most obvious under *Bacillus subtilis* treatment, which was 9.0%, 51.9%, and 45.3% lower than CK, respectively. Different treatments also significantly improved soil organic matter, available nutrients, soil enzyme activity and soil microbial population. Under *Bacillus subtilis* treatment, soil organic matter and alkali-hydrolysable nitrogen increased by 26.3% and 9.8% compared with CK, and soil urease activity and total microbial population increased by 35.7% and 26.6% respectively. Through the principal component analysis of soil biological characteristics, it is concluded that organic fertilizer combined with *Bacillus subtilis* treatment has the best effects on promoting the fertility level of organic *Lycium barbarum* cultivated soil in Qaidam.

Keywords: *Lycium barbarum*; microbial growth-promoting bacteria; biological characteristics of rhizosphere soil; growth characteristics; Qaidam

宁夏枸杞 (*Lycium barbarum* L.) 为多年生茄科枸杞属植物,耐逆性强,是荒漠地区防风固沙的优良树种^[1]。枸杞在我国主要分布于西北干旱地区,是高原地区特色药食两用植物资源^[2],其果实含有丰富的营养成分和药理活性成分,是我国传统的名贵中药材,具明目、防癌抗肿瘤和延缓衰老等功效^[3-4]。其中,柴达木地区枸杞种植面积约 3.24 万 hm^2 ^[5],独特的气候和环境条件使该地区成为高品质枸杞的主产区。

柴达木地区枸杞种植较为集中,连作障碍日益严重,且大量施用化肥和农药以及漫水灌溉等不合理的传统管理模式,造成土壤板结,使土壤有机质、生物活性物质及养分含量降低^[6-8],严重影响枸杞的产量品质及经济效益,阻碍了有机枸杞的种植与发展。近几年,微生物菌剂在改良土壤环境中的应用研究发展迅速,其通过有益菌自身的生理活性来修复土壤,促进植物生长,有效缓解了生态环境的破坏,防治了连作障碍,对农产品绿色安全问题的解决具有重要意义。李月梅等^[9]研究发现,柴达木盆地枸杞种植区枸杞园的土壤养分含量存在显著的空间变异性,其中老园区与新开垦的种植区土壤有机质、碱解氮和速效磷的变异系数分别为67.4%、118.4%和118.9%,此现象同样存在于新开垦的有机枸杞种植区,对有机枸杞生长发育有不利影响,而植物根际促生菌可促进作物生长,改善土壤性状及肥力。

植物根际促生菌是一类能定殖于植物根际的有益菌,其通过固氮、溶磷,并分泌酶类、激素类和抗菌类物质来促进植物根系生长发育,提升植物对水分和矿质元素的吸收和利用,增加农作物抗逆性,从而提高作物产量与品质^[10-11]。贾峥嵘等^[12]研究表明,施用促生菌剂可以显著促进甘薯生长发育,改善土壤肥力,提升土壤生物活性,土壤磷酸酶活性增幅为 32.1%,土壤放线菌及微生物量氮增幅

分别为49.0%和184.1%,土壤真菌数量和微生物量碳氮比降幅分别为32.3%和63.8%。王艳平等^[13]研究发现,生物有机肥联合微生物菌剂处理下茶-菊栽培土壤有机质、有效磷和速效钾平均含量显著提高20.1%、12.2%和33.1%,全氮和碱解氮平均含量分别提高10.1%和10.3%,土壤中细菌、真菌和放线菌的平均数量分别显著提高96.0%、40.6%、69.1%,茶-菊种植连作障碍得到改善。吕亮雨等^[14]在诺木洪地区研究表明,木霉菌微生物菌剂与有机肥配合施用,能促进枸杞生长发育,加速有机肥的分解与转化,改良土壤,提高有机枸杞产量和品质。施加促生菌剂能显著改善作物根际土壤状况,促进作物生长发育,但目前有关柴达木地区有机枸杞促生菌剂应用方面研究报道较少,因此本研究以高垄栽培有机枸杞,通过有机肥配施不同促生菌剂,探究其对有机枸杞栽培土壤的影响,筛选出有利于柴达木地区有机枸杞种植的环境友好型微生物菌剂,以期当地有机枸杞稳产高产提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试枸杞品种为2年生‘宁杞7-8号’,该品种由青海大学农林科学院选育提供,青海高原林木遗传育种实验室繁育。

供试菌剂:哈茨木霉菌 (*Trichoderma harzianum*, 有效活性菌数(以干基计) ≥ 10 亿 $\cdot \text{g}^{-1}$); 枯草芽孢杆菌 (*Bacillus subtilis*, 有效活菌数(以干基计) ≥ 1000 亿 $\cdot \text{g}^{-1}$); 解淀粉芽孢杆菌 (*Bacillus amyloliquefaciens*, 有效活菌数 ≥ 0.2 亿 $\cdot \text{g}^{-1}$); 胶冻样芽孢杆菌 (*Bacillus mucilaginosus*, 有效活菌数为 50.0 亿 $\cdot \text{mL}^{-1}$)。上述4种促生菌剂由广西微保农业技术有限公司生产。

供试肥料:供试有机肥为商品有机肥(有机质含量为45%, $\text{N} + \text{P}_2\text{O}_5 + \text{K}_2\text{O} = 5\%$),由北京嘉博文生物科技有限公司生产。

1.2 试验地点

试验于 2021—2022 年的每年 5—9 月进行, 试验区设于柴达木盆地具有代表性的重度盐碱地都兰县宗加镇田格力村高垄有机枸杞栽植地。试验地土壤为旱田内陆盐碱土, 0~0.3 m 土层土壤 pH 值为 8.7, 土壤电导率 EC (水土比 1:5) 为 $8.1 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$; 土壤有机质 $10.7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 碱解氮 $47.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效磷 $44.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效钾 $158.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.3 试验设计

试验采用单因素完全随机区组设计, 共设置 5 个处理, 各处理施加商品有机肥 $10 \text{ kg} \cdot \text{株}^{-1}$, 以不添加微生物菌剂为对照 (CK), 设哈茨木霉菌、枯草芽孢杆菌、解淀粉芽孢杆菌、胶冻样芽孢杆菌 4 种微生物菌剂处理, 每个处理 3 次重复, 一共 15 个小区, 每个小区均栽植 30 株枸杞树, 株距 1 m, 行距 3 m, 小区面积 90 m^2 。高垄横断面为腰梯形, 上边宽 0.8 m、下边宽 1.6 m、高 0.4 m, 垄间距 3 m。菌剂处理前按照使用说明用水稀释, 每株 200 ml, 施用前枸杞根部挖穴, 后将各处理菌剂灌根于根部穴中, 立即覆土, 每年 5 月和 7 月施用, 试验期内共施用 4 次; 有机肥采用沟施, 在枸杞树体两侧 (距树体 0.2~0.3 m) 开沟, 沟深 0.2~0.3 m, 沟宽 0.1~0.2 m, 沟长 0.5~0.8 m, 分成 2 等份, 分别施入两侧沟内。其他田间管理同常规管理。

1.4 指标测定

1.4.1 枸杞植株生长及生理指标测定 经过为期 2 a 共 4 次促生菌剂灌根处理后, 在每年 7 月 1 日—9 月 15 日进行生长指标测定, 每个处理选 9 棵样树, 用卷尺测定树高, 用游标卡尺测定地径, 各指标测 3 次取平均值。采摘样树 3 茬果实, 晾干至恒重后称重, 并计算单株产量。每株样树随机选取 20 片功能叶片, 使用 SPAD-502 叶绿素仪 (浙江托普云农) 进行 SPAD 值测定。根系活力用 TTC 法测定; 盛果期使用 Li-COR 6400 便携式光合测定仪 (美国 LI-COR 公司) 测定净光合速率 (P_n)。

1.4.2 枸杞根际土壤样品的采集测定 试验期内每年 8 月 20 日, 采集各处理 9 棵样树两侧枸杞根际土壤, 每个处理共布 18 个样点, 抽样深度为 0~0.3 m, 采用四分法舍去多余土壤, 混匀阴干保留 1 kg 备测。土壤 pH 值、电导率、有机质、速效养分含量参照陈震等^[15]的方法测定; 土壤酶活性测定参照关松荫^[16]的方法; 土壤脲酶活性采用靛酚蓝比色法测定; 蔗糖酶活性采用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定; 磷酸酶活性采用磷酸苯二钠比色法测定; 过氧化氢酶活性采用高锰酸钾滴定法测定。土壤微生

物数量采用稀释平板计数法^[17]测定, 细菌用牛肉膏蛋白胨琼脂培养基培养; 真菌用马丁氏培养基培养; 放线菌用改良高氏 1 号培养基培养; 测定结果均以 1 g 鲜土所含微生物数量 ($\text{CFU} \cdot \text{g}^{-1}$) 表示。土壤微生物量碳 (MBC) 和土壤微生物量氮 (MBN) 均采用氯仿熏蒸-硫酸钾浸提法^[18]测定。

1.5 数据分析

试验结果以所测数据的平均值表示。数据分析使用 Microsoft Office Excel 2010 软件, 同时采用 SPSS 21.0 软件进行数据整理、分析各处理间的显著性差异 ($P < 0.05$) 并进行主成分分析。

2 结果与分析

2.1 不同促生菌剂对枸杞生长特性的影响

由表 1 可知, 2021—2022 年, 连续两年施用 4 种菌剂后枸杞的生长发育得到了明显的提高, 枸杞的树高、SPAD 值, 根系活力、 P_n 和单株产量较 CK 均有明显提高。2021 年施用胶冻样芽孢杆菌后, 枸杞的树高和 SPAD 值最大, 较 CK 分别增加 13.6% 和 40.5%。2021 年与 2022 年的根系活力、 P_n 和单株产量均是枯草芽孢杆菌处理的效果最好, 较 CK 分别增加 46.7% 和 11.2%、37.1% 和 48.0%、45.0% 和 54.9%, 其中根系活力 2021 年的增长量大于 2022 年。2022 年, 枸杞树高在施用枯草芽孢杆菌后最高 (96.5 cm), 显著高于 CK, 较 2021 年增长 15 cm, 增幅为 18.3%。2021 年, 各处理间地径差异不显著, 2022 年各处理地径显著高于 CK, 两年均为施用解淀粉芽孢杆菌后效果最好。2022 年施用哈茨木霉菌后, SPAD 值达到最高, 较 CK 增加 13.9%。2021 年, 枯草芽孢杆菌和胶冻样芽孢杆菌处理间树高、地径、SPAD 值差异均不显著; 2021 年与 2022 年, 根系活力、 P_n 、单株产量在枯草芽孢杆菌处理下的差异不显著。总体上, 4 种促生菌剂处理后枸杞的生长效果优于 CK, 由此可以看出, 高垄栽植有机枸杞在有机肥和促生菌剂配施处理下能够明显促进枸杞生长发育。

2.2 不同促生菌剂对枸杞根际土壤理化性质的影响

如表 2 所示, 不同促生菌剂处理对枸杞根际土壤理化性质的影响各不相同。与 CK 相比, 土壤 pH 值和土壤电导率有所降低, 土壤有机质和养分含量不同程度提高。解淀粉芽孢杆菌处理下, 土壤 pH 值和电导率最低, 较 CK 分别降低 16.0% 和 51.9%; 除哈茨木霉菌外, 其他促生菌剂 pH 值均与 CK 差异显著, 枯草芽孢杆菌、解淀粉芽孢杆菌和胶冻样芽

孢杆菌处理间电导率差异不显著;与 CK 相比,不同促生菌剂处理下土壤有机质、碱解氮、速效磷、速效钾养分含量分别提高 19.3%~39.2%、5.1%~19.7%、9.0%~26.2%、14.2%~25.9%。解淀粉芽孢杆菌处理土壤有机质含量最大,其他 3 种菌剂处理间差异不显著;胶冻样芽孢杆菌处理土壤碱解氮含量最大,枯草芽孢杆菌、解淀粉芽孢杆菌处理间差异不显著;土壤速效磷和速效钾含量均为胶冻样芽孢杆菌处理最大,除胶冻样芽孢杆菌处理外,其他 3 个处

理间速效磷含量差异不显著,4 种促生菌剂处理速效钾含量均与 CK 差异显著。

2.3 不同促生菌剂对枸杞根际土壤酶活性的影响

如表 3 所示,除哈茨木霉菌外,不同促生菌剂处理均能显著提升枸杞根际土壤的酶活性。脲酶和蔗糖酶活性均为枯草芽孢杆菌处理最高,胶冻样芽孢杆菌处理次之,枯草芽孢杆菌处理下,脲酶和蔗糖酶活性较 CK 分别提升 35.7% 和 44.5%;胶冻样芽孢杆菌处理下,脲酶和蔗糖酶活性较 CK 分别提升 31.5%

表 1 不同促生菌剂对枸杞生长特性的影响

Table 1 Effects of different growth-promoting microbial agents on the growth characteristics of *Lycium barbarum* L.

年份 Year	处理 Treatment	树高 Tree height /cm	地径 Ground diameter /mm	SPAD 值 SPAD value	根系活力 Root activity /(mg·g ⁻¹ ·h ⁻¹)	P _n /(μmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	单株产量 Yield per plant /kg
2021	哈茨木霉菌 <i>Trichoderma harzianum</i>	80.7±1.9b	9.3±0.6a	45.7±4.4ab	0.114±0.100c	10.03±1.40b	0.27±0.10b
	枯草芽孢杆菌 <i>Bacillus subtilis</i>	81.6±1.6ab	9.7±0.2a	52.3±6.3a	0.135±0.001a	11.53±0.00a	0.32±0.10a
	解淀粉芽孢杆菌 <i>Bacillus amyliquefaciens</i>	75.1±0.6c	10.2±0.4a	50.0±4.9a	0.121±0.200b	10.39±0.51ab	0.26±0.01b
	胶冻样芽孢杆菌 <i>Bacillus mucilaginosus</i>	83.7±0.4a	10.1±0.8a	53.4±4.0a	0.115±0.501c	9.42±0.50bc	0.28±0.10b
	CK	73.7±1.9c	9.2±0.3a	38.0±3.8b	0.092±0.001d	8.41±0.50c	0.22±0.01b
2022	哈茨木霉菌 <i>Trichoderma harzianum</i>	87.3±0.4b	12.7±0.2b	60.7±0.5a	0.136±0.100b	12.18±1.40a	0.74±0.10b
	枯草芽孢杆菌 <i>Bacillus subtilis</i>	96.5±0.9a	13.4±0.2ab	55.7±0.4b	0.148±0.201a	13.93±1.50a	0.79±0.90a
	解淀粉芽孢杆菌 <i>Bacillus amyliquefaciens</i>	84.7±1.5c	14.6±0.6a	53.3±0.8c	0.132±0.102c	12.23±1.01a	0.61±0.10bc
	胶冻样芽孢杆菌 <i>Bacillus mucilaginosus</i>	87.9±0.9d	14.1±0.1a	56.7±1.8b	0.121±0.201d	12.57±1.70a	0.63±0.10bc
	CK	81.6±1.3d	11.8±0.3c	53.3±0.8c	0.113±0.001e	9.41±1.40b	0.51±0.10c

注:同列不同小写字母表示相同年份不同处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences between different treatments in the same year ($P<0.05$). The same below.

表 2 不同促生菌剂对枸杞根际土壤理化性质的影响

Table 2 Effects of different growth-promoting microbial agents on physical and chemical properties in rhizosphere soil of *Lycium barbarum* L.

处理 Treatment	pH	电导率 Conductivity /(mS·cm ⁻¹)	有机质 Organic matter /(g·kg ⁻¹)	碱解氮 Alkali-hydrdysable N /(mg·kg ⁻¹)	速效磷 Available P /(mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available K /(mg·kg ⁻¹)
哈茨木霉菌 <i>Trichoderma harzianum</i>	8.60±0.05a	7.60±0.60a	8.54±0.22b	53.30±0.50c	45.80±0.86bc	175.00±7.21a
枯草芽孢杆菌 <i>Bacillus subtilis</i>	8.32±0.05b	6.81±0.68ab	9.04±0.11b	55.71±0.26b	47.31±0.66b	179.73±6.74a
解淀粉芽孢杆菌 <i>Bacillus amyliquefaciens</i>	7.51±0.05d	5.22±0.38b	9.97±0.01a	56.72±1.04b	48.10±0.28b	182.72±5.42a
胶冻样芽孢杆菌 <i>Bacillus mucilaginosus</i>	8.03±0.05c	5.31±0.58b	8.72±0.58bc	60.70±0.32a	53.01±2.68a	193.01±2.04a
CK	8.71±0.01a	7.90±0.35a	7.16±0.33c	50.73±0.91d	42.02±0.65c	153.20±4.52b

和 38.1%。各促生菌剂处理磷酸酶活性表现为胶冻样芽孢杆菌>解淀粉芽孢杆菌>枯草芽孢杆菌>哈茨木霉菌处理,4 种促生菌处理磷酸酶活性较 CK 提升 5.6%~42.7%。土壤过氧化氢酶活性在解淀粉芽孢杆菌处理下最大,胶冻样芽孢杆菌、枯草芽孢杆菌和哈茨木霉菌处理相继次之,且三者之间差异不显著。

2.4 不同促生菌剂对枸杞根际土壤微生物数量的影响

如表 4 所示,与 CK 相比,枸杞根际土壤中细菌、放线菌和微生物总数量均有所增加,真菌数量有所降低。枯草芽孢杆菌处理土壤细菌数量最多,胶冻样芽孢杆菌和解淀粉芽孢杆菌处理间差异不显著,哈茨木霉菌、枯草芽孢杆菌、解淀粉芽孢杆菌和胶冻样芽孢杆菌处理下细菌数量较 CK 分别增加 8.5%、31.5%、17.7% 和 19.6%。各处理土壤真菌数量相较于 CK 均有所降低,其中哈茨木霉菌处理效

果最明显,其次为胶冻样芽孢杆菌处理,分别降低 26.7% 和 23.7%,这两个处理间差异不显著。土壤放线菌数量各处理表现为胶冻样芽孢杆菌处理最高,枯草芽孢杆菌、解淀粉芽孢杆菌和哈茨木霉菌效果依次递减,其中枯草芽孢杆菌和解淀粉芽孢杆菌处理间差异不显著,但与 CK 相比,各处理均显著增加,增幅为 17.7%~37.0%。整体来看,枸杞根际土壤中三大微生物的数量表现为细菌数量最多、放线菌次之、真菌最少,枯草芽孢杆菌处理对土壤微生物数量的影响效果最为明显。

2.5 不同促生菌剂对枸杞根际土壤微生物量碳氮的影响

如表 5 所示,不同菌剂处理有效增加了枸杞根际土壤中微生物量碳、氮含量。与 CK 相比,不同菌剂处理微生物量碳、氮含量均显著提高,枯草芽孢杆菌处理微生物量碳含量和微生物量氮含量均最高,胶冻样芽孢杆菌处理次之,其中土壤微生物量碳

表 3 不同促生菌剂对枸杞根际土壤酶活性的影响

Table 3 Effects of different growth-promoting microbial agents on enzyme activities in rhizosphere soil of *Lycium barbarum* L.

处理 Treatment	脲酶 Urease/(mg·g ⁻¹)	蔗糖酶 Sucrase/(mg·g ⁻¹)	磷酸酶 Phosphatase/(mg·g ⁻¹)	过氧化氢酶 Catalase/(mL·g ⁻¹)
哈茨木霉菌 <i>Trichoderma harzianum</i>	1.93±0.44bc	4.03±0.15cd	0.94±0.07cd	4.55±0.35b
枯草芽孢杆菌 <i>Bacillus subtilis</i>	2.28±0.27a	5.65±0.45a	0.98±0.06c	4.92±0.13b
解淀粉芽孢杆菌 <i>Bacillus amyliquefaciens</i>	2.15±0.38ab	4.73±0.38bc	1.19±0.09b	6.49±0.06a
胶冻样芽孢杆菌 <i>Bacillus mucilaginosus</i>	2.21±0.21b	5.40±0.26b	1.27±0.05a	5.08±0.26b
CK	1.68±0.06c	3.91±0.19d	0.89±0.06d	3.33±0.24c

表 4 不同促生菌剂对枸杞根际土壤微生物数量的影响/(10⁵CFU·g⁻¹)

Table 4 Effects of different growth-promoting microbial agents on the number of microorganisms in rhizosphere soil of *Lycium barbarum* L.

处理 Treatment	细菌 Bacterium	真菌 Fungus	放线菌 Actinomycetes	总数 Total
哈茨木霉菌 <i>Trichoderma harzianum</i>	5.86±0.24c	5.76±0.31d	6.90±0.46b	6.83±0.75bc
枯草芽孢杆菌 <i>Bacillus subtilis</i>	7.10±0.25a	6.80±0.43bc	7.73±0.21ab	8.56±0.51a
解淀粉芽孢杆菌 <i>Bacillus amyliquefaciens</i>	6.36±0.26b	6.10±0.36cd	7.23±0.20ab	7.76±0.08ab
胶冻样芽孢杆菌 <i>Bacillus mucilaginosus</i>	6.46±0.57b	5.90±0.25d	8.03±0.14a	8.08±0.26ab
CK	5.40±0.25c	7.30±0.15a	5.86±0.14c	6.76±0.46c

表 5 不同促生菌剂对枸杞根际土壤微生物量碳氮的影响

Table 5 Effects of different growth-promoting microbial agents on microbial biomass carbon and nitrogen in rhizosphere soil of *Lycium barbarum* L.

处理 Treatment	微生物量碳 MBC /(mg·kg ⁻¹)	微生物量氮 MBN /(mg·kg ⁻¹)	微生物量 碳氮比 Microbial biomass C/N
哈茨木霉菌 <i>Trichoderma harzianum</i>	74.49±2.44b	29.60±1.36b	6.51±0.04b
枯草芽孢杆菌 <i>Bacillus subtilis</i>	86.20±3.68a	37.21±2.46a	7.31±0.20bc
解淀粉芽孢杆菌 <i>Bacillus amyliquefaciens</i>	74.88±2.92ab	32.08±1.49ab	6.33±0.09bc
胶冻样芽孢杆菌 <i>Bacillus mucilaginosus</i>	81.26±2.39b	36.74±2.06a	5.21±0.76c
CK	68.93±1.67c	26.74±1.04c	9.57±0.46a

增幅为 7.7%~25.0%,土壤微生物量氮增幅为 10.7%~39.1%;相比 CK,各菌剂处理微生物量碳氮比呈下降趋势,其中以胶冻样芽孢杆菌处理降幅最大(14.0%)。

2.6 不同促生菌剂对枸杞根际土壤生物学特性影响的综合评价

以脲酶活性(X_1)、蔗糖酶活性(X_2)、磷酸酶活性(X_3)、过氧化氢酶活性(X_4)、土壤细菌数量(X_5)、真菌数量(X_6)、放线菌数量(X_7)、土壤微生物量碳 MBC(X_8)、微生物量氮 MBN(X_9)作为分析变量,综合评价不同菌剂对有机枸杞栽培土壤生物学特性的影响。利用 SPSS 数据分析软件进行主成分分析,得出相关矩阵的特征值及特征向量累积贡献率,如表 6 所示,前两个主成分的累积贡献率达到 86.633%,满足大于 80% 的条件,说明前两个主成分可以解释土壤生物学特性的主要信息。

为进一步确定主成分与土壤生物学特性因子之间的关系,计算得出各处理的主成分得分和综合得分。分析主成分载荷矩阵,可得 2 个主成分的表达式,第 1 主成分: $F_1 = 0.3507X_1 + 0.3576X_2 + 0.2616X_3 + 0.3158X_4 + 0.3748X_5 - 0.3667X_6 + 0.3860X_7 + 0.2539X_8 + 0.3047X_9$;第 2 主成分: $F_2 = 0.3786X_1 + 0.1773X_2 - 0.6075X_3 - 0.0682X_4 + 0.2147X_5 + 0.2738X_6 - 0.2047X_7 + 0.5135X_8 - 0.1556X_9$;综合评价得分计算公式为: $F = (\lambda_1 F_1 + \lambda_2 F_2) / (\lambda_1 + \lambda_2)$,式中, λ_1 和 λ_2 分别是前两个主成分的特征值。

根据前两个主成分的特征值和特征向量计算出各处理在前两个主成分的得分,以每个主成分特征值所占比例为权重,计算出各处理的综合评价得分。如表 7 所示,不同处理对有机枸杞栽培土壤生物学特性的综合评价排序表现为枯草芽孢杆菌 > 解淀粉芽孢杆菌 > 胶冻样芽孢杆菌 > 哈茨木霉菌 > CK,表明不同促生菌剂均有助于改良有机枸杞栽培土壤的微生物学特性,且以枯草芽孢杆菌处理的改良效果最佳。

3 讨论

柴达木地区气候与土壤类型特殊,且种植作物单一,连作、大量施用化肥等问题凸出,导致种植地土壤结构稳定性遭到破坏,有机质及其活性组分含量降低,在此严苛的环境条件下,有机肥分解转化困难、利用率低,土壤中多数有益菌不能快速繁殖建群。本研究发现,施用促生菌剂可以明显加速有机肥分解速度,改善枸杞根际土壤环境,促进枸杞的生长发育,提高有机枸杞产量。

表 6 枸杞根际土壤生物学特性的主成分分析

Table 6 Principal component analysis of microbial agents biological characteristics in rhizosphere soil of *Lycium barbarum* L.

主成分 Principal component	特征值 Eigenvalue	贡献率 Contribution rate/%	累积贡献率 Cumulative contribution rate/%
1	5.400	76.042	76.042
2	1.444	16.046	86.533
3	0.088	0.978	99.841
4	0.014	0.159	100.000

表 7 不同促生菌剂对枸杞根际土壤生物学特性影响的综合评价

Table 7 Comprehensive evaluation of effects of different growth-promoting microbial agents on biological characteristics in rhizosphere soil of *Lycium barbarum* L.

处理 Treatment	F_1	F_2	F	排序 Sort
哈茨木霉菌 <i>Trichoderma harzianum</i>	-1.270	0.057	-0.753	4
枯草芽孢杆菌 <i>Bacillus subtilis</i>	2.266	1.506	1.597	1
解淀粉芽孢杆菌 <i>Bacillus amyloliquefaciens</i>	1.257	0.120	0.773	2
胶冻样芽孢杆菌 <i>Bacillus mucilaginosus</i>	1.527	-1.867	0.613	3
CK	-3.773	0.183	-2.233	5

微生物菌剂中有效菌可以分泌植物激素,同时分解、释放多种微量元素,有效调节作物吸收利用方式,提高作物体内蛋白质、氨基酸、糖分等含量的积累,促进植物生长发育。本研究中,有机肥配施微生物菌剂能促进枸杞的生长发育,以枯草芽孢杆菌效果最为明显。可能是枯草芽孢杆菌具有固氮能力,对作物生长发育有促进作用,不仅能够促进作物株高的增长,还能明显提升根系活力、净光合速率及单株产量^[19],且生物有机肥能改善土壤理化性质,平衡土壤微环境,进而促进作物生长发育。侯婷婷等^[20]研究发现,接种枯草芽孢杆菌、解淀粉芽孢杆菌和胶冻样芽孢杆菌均能促进大豆根系结瘤,提高大豆农艺性状与生长发育,且复合微生物菌剂效果明显优于单一菌剂。朱丽等^[21]研究表明,促生菌剂处理后的草莓植株叶片数、株高、花序数和花梗长等生长指标明显高于 CK 处理,表明施加促生菌剂可促进草莓生长发育。张雪娇等^[22]研究表明,微生物菌剂与有机肥混施能够加速有机肥分解,促使土壤有机质、腐殖质含量增加,有利于增强根系活力,促进冬小麦吸收土壤中营养物质,进而提升叶片的 SPAD 值、光合速率,增加有机物的积累量。Miljakovic 等^[23]认为,芽孢杆菌属通过固氮、磷酸盐溶解和产生植物激素等方式促进植物生长,被确定为潜在的生物防治剂和植物生长促进剂。Bhusal 等^[24]研究表明,施加 3 种芽孢杆菌菌剂可以

通过增加辣椒株高、地上部质量、根长、根质量和叶绿素含量来促进植物生长,也可降低在温室环境中疫霉侵扰土壤中生长植物的辣椒假单胞菌病的严重程度。本研究结果与前人研究一致,即应用芽孢杆菌属菌剂可加速有机肥分解,增加有机质的含量,加快有机质分解转化,增加耕作层土壤活性物质,促进枸杞根系的营养吸收,促进根系活力,进而显著提升枸杞的株高、冠幅、SPAD 值、 P_n 、 WUE 等参数^[25],但不同菌剂改良效果不同,可能原因是不同的有益菌的生态位不同。

微生物菌剂含有多种有益菌,能在土壤中快速繁殖建群,改善土壤微生态,且微生物代谢过程中分泌的有机酸性物质,可以调节植物根际酸碱度,改善土壤结构,使团粒结构容易形成,进而增加有机质,生成的腐殖酸可与土壤中的氮形成腐殖酸铵,减少氮肥流失^[26]。酶活性、微生物种群结构和微生物生物量碳氮等作为土壤生物学特性的主要参数,能有效反映土壤生产能力和土壤生态环境质量^[27]。本研究发现,施用促生菌剂可以提高有机枸杞种植地土壤的自我调节能力,增加土壤微生物数量,改善土壤的微环境,降低土地盐碱度,使土壤理化性质得到改善。闫锋等^[28]研究发现,施入微生物菌剂后,土壤脲酶、蔗糖酶、磷酸酶活性显著增强,且复合微生物菌剂和光合细菌处理对土壤酶活性提高效果最好。Deng 等^[29]研究表明,微生物菌剂具有解磷、解钾的作用,可以将土壤中磷、钾元素从无效态转化为有效态,使植物容易吸收利用,从而提高土壤有机质、碱解氮、速效磷、速效钾含量。不同植物施用生物菌剂对土壤性质和细菌组成的影响不同,植株的生长也表现出差异,说明土壤中微生物与不同植物的交互作用不同,因此本研究还可以基于枸杞不同品种间施用促生菌剂展开进一步研究。Duan 等^[30]研究与本研究结果一致,即施用不同促生菌剂后,细菌数量放线菌数量增加,真菌数量减少,该研究还发现,解淀粉芽孢杆菌 QSB-6 可以降低致枸杞根腐病的镰刀属真菌数量,有效缓解柴达木地区大面积流行的镰刀菌 (*Fusarium*) 造成的枸杞根腐病。孙运杰等^[31]研究发现,施加有机肥能显著提高土壤酶活性,土壤细菌和微生物总量显著降低,真菌数量显著提高。本研究发现,施用有机肥和促生菌剂后细菌放线菌数量有所增加,真菌数量却有所减少,这可能因为不同类型土壤受气候、环境条件、菌剂类型及作物品种等多方面的影响。

土壤微生物量碳、氮能影响有机质中腐殖质的

转化速度,是土壤养分转化和循环的重要参数,能有效反映土壤微生物和土壤肥力状况。本研究与由晓璇等^[32]研究结果一致,促生菌剂配施有机肥能使土壤微生物量碳、氮显著提高,土壤微生物量碳氮比有所降低,说明施加微生物菌剂可提高土壤肥力,增强土壤氮素利用率。基于主成分分析对土壤 pH 值、有机质等 6 个指标进行综合评价并排序,得到对有机枸杞根际土壤改良效果最好的处理为枯草芽孢杆菌处理。

4 结 论

有机肥配施不同促生菌剂,可以不同程度地提高枸杞的株高、冠幅、SPAD 值、 P_n 等参数,促进枸杞幼苗生物量积累,也能够有效增加有机枸杞园土壤有机质、碱解氮、速效磷和速效钾含量,调节土壤 pH 值和电导率,脱盐配肥、增温保墒。同时不同促生菌剂可提升土壤脲酶、蔗糖酶、磷酸酶、过氧化氢酶活性,增加土壤细菌、放线菌、微生物总数量及土壤微生物量碳、氮含量,降低土壤真菌数量及土壤微生物量碳氮比,从而改善土壤微环境,增强种植地土壤的自我调节能力。通过土壤生物学特性的主成分分析,得出枯草芽孢杆菌处理下枸杞栽培土壤的根际环境最佳,具有一定的开发利用潜力,可作为枸杞生产生物肥料的优良菌株资源。

参 考 文 献:

- [1] 刘法营,柴达木:风沙渐行渐远[N]. 青海日报, 2021-09-27(8).
LIU F Y. Qaidamu: wind and sand gradually drift away[J]. Qinghai Daily, 2021-09-27(8).
- [2] 何嘉,马婷慧,白小军,等. 不同微生物菌剂对枸杞生长发育及产量品质的影响[J]. 西南农业学报, 2021, 34(6): 1296-1301.
HE J, MA T H, BAI X J, et al. Effects of different microbial agents on growth, yield and quality of *Lycium barbarum* L[J]. Southwest China journal of agricultural sciences, 2021, 34(6): 1296-1301.
- [3] KAN X H, YAN Y M, YAN L W, et al. Evaluation of bioaccessibility of zeaxanthin dipalmitate from the fruits of *Lycium barbarum* in oil-in-water emulsions[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 15: 105781.
- [4] GUI H, FAN L C, WANG D H, et al. Organic management practices shape the structure and associations of soil bacterial communities in tea plantations[J]. Applied Soil Ecology, 2021, 163: 103975.
- [5] 辛亚军. 有机肥与氮肥配施对枸杞产量和品质的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2022.
XIN Y J. Effects of combined application of organic fertilizer and nitrogen fertilizer on yield and quality of *Lycium barbarum* L. [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2022.
- [6] AMAGASE H, FARNSWORTH N R. A review of botanical characteristics, phytochemistry, clinical relevance in efficacy and safety of *Lycium barbarum* fruit (Goji)[J]. Food Research International, 2011, 44(7): 1702-1717.
- [7] DUMONT D, DANIELATO G, CHASTELLIER A, et al. Multi-targeted metabolic profiling of carotenoids, phenolic compounds and primary metabolites in Goji (*Lycium* spp.) berry and tomato (*Solanum lycopersicum*) reveals inter and intra genus biomarkers ([J]. Metabolites, 2020, 10

- (10): 422.
- [8] LUO Y M, LIU Y, GUO H, et al. Evaluation of the bioaccessibility of carotenoid esters from *Lycium barbarum* L. in nano-emulsions: a kinetic approach[J]. Food Research International, 2020, 136: 109611.
- [9] 李月梅, 杨文辉, 高玉亭, 等. 柴达木盆地枸杞种植园土壤养分状况评价[J]. 广东农业科学, 2013, 40(24): 51-54, 58.
- LI Y M, YANG W H, GAO Y T, et al. Evaluation of soil nutrients status of *Lycium barbarum* orchard in Qaidam basin[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2013, 40(24): 51-54, 58.
- [10] KUMAR R, DEKA B C, KUMAR M, et al. Productivity, quality and soil health as influenced by organic, inorganic and biofertilizer on field pea in eastern Himalaya[J]. Journal of Plant Nutrition, 2015, 38(13): 2006-2027.
- [11] NKEBIWE P M, WEINMANN M, MÜLLER T. Improving fertilizer-depot exploitation and maize growth by inoculation with plant growth-promoting bacteria; from Lab to field[J]. Chemical and Biological Technologies in Agriculture, 2016, 3(1): 15.
- [12] 贾峥嵘, 郝佳丽, 郝艳芳, 等. 4 种促生菌剂对甘薯生长及土壤肥力的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(9): 166-172.
- JIA Z R, HAO J L, HAO Y F, et al. Effects of four growth-promoting bacteria on the growth of sweet potato and soil fertility[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2022, 36(9): 166-172.
- [13] 王艳平, 李萍, 吴文强, 等. 生物有机肥和微生物菌剂对北京山区连作茶菊生长及土壤肥力的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2023(12): 107-113.
- WANG Y P, LI P, WU W Q, et al. Effects of bio-organic fertilizer and microbial agent on the growth of tea chrysanthemum and soil fertility under continuous cropping cultivation system in the mountainous area of Beijing[J]. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2023(12): 107-113.
- [14] 吕亮雨, 段国珍, 苏彩凤, 等. 木霉菌微生物菌剂对枸杞生长及土壤性状的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2022, 53(4): 476-482.
- LV L Y, DUAN G Z, SU C F, et al. Effects of microbial agents on growth and soil properties of *Lycium barbarum* L.[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2022, 53(4): 476-482.
- [15] 陈震, 吴俊兰. 土壤肥料理化性质简易测定法[M]. 北京: 农业出版社, 1980: 12-35.
- CHEN Z, WU J L. A simple method for determining the physico-chemical properties of soil fertilizers [M]. Beijing: Agricultural Publishing House, 1980: 12-35.
- [16] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986: 309-313.
- GUAN S Y. Soil enzymes and their research methods [M]. Beijing: Agricultural Publishing House, 1986: 309-313.
- [17] 许光辉, 郑洪元. 土壤微生物分析方法手册[M]. 北京: 农业出版社, 1986: 255-257.
- XU G H, ZHENG H Y. Handbook of soil microbial analysis methods [M]. Beijing: Agricultural Publishing House, 1986: 255-257.
- [18] 李凤霞, 王长军, 肖国举, 等. 生物有机肥对宁夏盐碱地土壤理化性质及微生物的影响[J]. 宁夏农林科技, 2021, 62(7): 18-22.
- LI F X, WANG C J, XIAO G J, et al. Effects of bio organic fertilizer on soil physical and chemical properties and microorganism in saline alkali soil of Ningxia[J]. Journal of Ningxia Agriculture and Forestry Science and Technology, 2021, 62(7): 18-22.
- [19] BAEZ-ROGELIO A, MORALES-GARCÍA YE, QUINTERO-HERNÁNDEZ V, et al. Next generation of microbial inoculants for agriculture and bioremediation[J]. Microbial Biotechnology, 2016, 10(1): 19-21.
- [20] 候婷婷, 于德水, 何鑫, 等. 复合微生物菌剂对大豆生长发育、结瘤和产量的影响[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(10): 65-72.
- HOU T T, YU D S, HE X, et al. Effects of compound microorganisms on growth, nodulation and yield of soybean [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2023, 51(10): 65-72.
- [21] 朱丽, 殷敏, 任荣荣, 等. 3 种微生物菌剂对基质栽培草莓生长发育、果实产量品质和病害的影响[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(1): 155-160.
- ZHU L, YIN M, REN R R, et al. Impacts of three microbial inoculants on growth, yield, quality and disease of strawberry cultivated in substrates[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2023, 51(1): 155-160.
- [22] 张雪娇, 石晶晶, 常娜, 等. 多功能土壤微生物菌剂在冬小麦上的应用效果[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(14): 46-49.
- ZHANG X J, SHI J J, CHANG N, et al. Application effect of multi-functional soil microbial agents on winter wheat[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2017, 45(14): 46-49.
- [23] MILJAKOVIC D, MARINKOVIC J, BALEŠEVIC-TUBIC S. The significance of *Bacillus* spp. in disease suppression and growth promotion of field and vegetable crops[J]. Microorganisms, 2020, 8(7): 1037.
- [24] BHUSAL B, MMBAGA M T. Biological control of *Phytophthora* blight and growth promotion in sweet pepper by *Bacillus* species[J]. Biological Control, 2020, 150: 104373.
- [25] 逢焕成, 李玉义, 严慧峻, 等. 微生物菌剂对盐碱土壤化和生物性状影响的研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(5): 951-955.
- PANG H C, LI Y Y, YAN H J, et al. Effects of inoculating different microorganism agents on the improvement of salinized soil[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, 28(5): 951-955.
- [26] 李银科, 刘虎俊, 李菁菁, 等. 施用不同有机肥对种植甜高粱土壤生物学特性的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2021, 35(9): 171-176.
- LI Y K, LIU H J, LI J J, et al. Effects of different organic fertilizers on the biological characteristics of sweet sorghum-planted soil [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2021, 35(9): 171-176.
- [27] CONG P F, OUYANG Z, HOU R X, et al. Effects of application of microbial fertilizer on aggregation and aggregate-associated carbon in saline soils[J]. Soil and Tillage Research, 2017, 168: 33-41.
- [28] 闫锋, 董扬, 赵富阳, 等. 不同微生物菌剂对糜子生长及土壤酶活性的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2023(5): 35-38, 51.
- YAN F, DONG Y, ZHAO F Y, et al. Effects of different microbial agents on growth of broomcorn millet and enzyme activities of soil[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2023(5): 35-38, 51.
- [29] DENG L, WANG T, LUO W, et al. Effects of a compound microbial agent and plants on soil properties, enzyme activities, and bacterial composition of Pisha sandstone[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2021, 28(38): 53353-53364.
- [30] DUAN Y, ZHOU Y, LI Z, et al. Effects of *Bacillus amyloliquefaciens* QSB-6 on the growth of replanted apple trees and the soil microbial environment[J]. Horticulturae, 2022, 8(1): 83.
- [31] 孙运杰, 马海林, 刘方春, 等. 生物肥对蓝莓根际土壤微生物学特性及土壤肥力的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(3): 167-171, 177.
- SUN Y J, MA H L, LIU F C, et al. Effects of bio-fertilizer on microbial properties and soil fertility in blueberry rhizosphere soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(3): 167-171, 177.
- [32] 由晓璇, 许桂玲, 冯跃华, 等. 减氮配施有机肥对喀斯特地区稻田土壤微生物量和酶活性及杂交水稻产量的影响[J]. 作物研究, 2023, 37(2): 116-123, 134.
- YOU X X, XU G L, FENG Y H, et al. Effects of nitrogen reduction combined with organic fertilizer on soil microbial biomass and enzyme activities and yield of indica hybrid rice in karst area[J]. Crop Research, 2023, 37(2): 116-123, 134.