

腐殖酸和植物促生芽孢杆菌对黑麦草 抗逆性及砒砂岩土壤性状的影响

曾 仟¹, 徐雪婷¹, 张亚见¹, 邓 琳², 何琳燕¹

(1.农业农村部农业环境微生物重点实验室 南京农业大学 生命科学学院,
江苏 南京 210095; 2.东南大学 土木工程学院, 江苏 南京 211189)

摘 要: [目的] 探究微生物在砒砂岩土壤修复工程中的作用, 为微生物强化植物改良砒砂岩土壤的科学设想提供新思路。[方法] 以黑麦草作为供试作物, 通过室内盆栽模拟试验的方法, 研究接种植物促生芽孢杆菌 *Bacillus halotolerans* P75, 施用腐殖酸肥料以及不同的菌肥搭配对水土流失严重的砒砂岩土壤理化性质及黑麦草生长和抗逆性指标的影响。[结果] 与对照相比, *Bacillus hallotolerans* P75 发酵液与腐殖酸协同处理显著提高了黑麦草叶片中 SOD 活性(229.7%)、POD 活性(83.6%)和脯氨酸含量(119.3%), 显著增加砒砂岩土壤中多糖、有机质、速效磷和速效钾含量, 且土壤渗水率明显降低。[结论] 植物促生芽孢杆菌 *Bacillus hallotolerans* P75 发酵液与腐殖酸肥料协同作用能够显著改善砒砂岩土壤的水分、养分流失问题, 提高黑麦草的抗逆性, 强化植物对砒砂岩土壤的改良和修复。

关键词: 黑麦草; 植物促生芽孢杆菌; 腐殖酸; 砒砂岩; 土壤改良

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2021)02-0208-07

中图分类号: S156, S182

文献参数: 曾仟, 徐雪婷, 张亚见, 等. 腐殖酸和植物促生芽孢杆菌对黑麦草抗逆性及砒砂岩土壤性状的影响[J]. 水土保持通报, 2021, 41(2): 208-214. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.02.028; Zeng Qian, Xu Xueting, Zhang Yajian, et al. Effects of humic acids and plant growth-promoting *Bacillus* on stress resistance of ryegrass and characteristics of feldspathic sandstone soil [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(2): 208-214.

Effects of Humic Acids and Plant Growth-promoting *Bacillus* on Stress Resistance of Ryegrass and Characteristics of Feldspathic Sandstone Soil

Zeng Qian¹, Xu Xueting¹, Zhang Yajian¹, Deng Lin², He Linyan¹

(1.Key Laboratory of Agricultural and Environmental Microbiology, Ministry of

Agriculture and Rural Affairs, College of Life Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing,

Jiangsu 210095, China; 2.School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 211189, China)

Abstract: [Objective] The role of microorganisms in feldspathic sandstone soil remediation was explored, in order to provide new ideas for the scientific assumption of microbial enhanced plant improvement of feldspathic sandstone soil. [Methods] Ryegrass was used as the test crop, and the effects of inoculating *Bacillus hallotolerans* P75, humic acid fertilizer and different combinations of bacterial fertilizer on soil physical and chemical properties, growth and stress resistance of ryegrass were studied by pot experiments. [Results] Compared with the control, the synergistic treatment of *Bacillus hallotolerans* P75 fermentation broth and humic acid significantly increased the SOD activity (229.7%), POD activity (83.6%) and proline content (119.3%) in ryegrass leaves, significantly increased the contents of polysaccharide, organic matter, available phosphorus and available potassium and significantly reduced the soil water permeability in feldspathic sandstone soil. [Conclusion] The synergistic effect of *Bacillus hallotolerans* P75 fermentation broth and humic acid

收稿日期: 2020-11-09

修回日期: 2020-12-18

资助项目: 国家自然科学基金项目“产生物膜芽孢杆菌在蔬菜根际成膜作用与阻控蔬菜吸收铅镉的机制”(41977199); 国家重点研发计划项目“砒砂岩区生态安全保障技术”(2017YFC0504505)

第一作者: 曾仟(1996—), 女(汉族), 四川省内江市人, 硕士研究生, 研究方向为植物—微生物联合修复重金属污染土壤。E-mail: 1725307989@qq.com。

通讯作者: 何琳燕(1976—), 女(汉族), 江苏省常州市人, 博士, 教授, 主要从事边际土壤的生物修复研究。Email: helyan0794@njau.edu.cn。

fertilizer can significantly control the water and nutrient loss of feldspathic sandstone soil, improve the stress resistance of ryegrass, and strengthen the improvement and repair of feldspathic sandstone by plants.

Keywords: perennial ryegrass; plant growth-promoting bacteria; humic acid; feldspathic sandstone; soil remediation

砒砂岩是一种风化十分严重的特殊泥岩和泥砂岩,其抗侵蚀能力非常弱,无水时坚硬如石,遇水松软如泥,遇风则成砂。砒砂岩地区的水土流失极其严重,生态环境非常脆弱,且养分含量低,蓄水能力差,成岩程度低,沙粒间胶结程度差、结构强度低,极其贫瘠,多数植物在其上面都难以生存及生长,因此砒砂岩被称为“地球生态癌症”^[1]。近年来,我国以沙棘作为着手点,开发了沙棘植物“柔性坝”,有效降低了水土流失。但植物“柔性坝”只能在砒砂岩侵蚀沟的底部应用,传统人工林和草本植物的种植也很难彻底解决砒砂岩区水土流失问题^[2]。因此,砂岩地区的治理难度非常大,防止和控制水土流失的现状仍然很严峻。如何运用新的方法措施改善植物在砒砂岩上的生长情况,探究植物种植与其他方法联合治理砒砂岩区的可行方案,有效减少水土流失,仍是解决砒砂岩土壤问题的关键。

植物促生细菌是一类有益功能性细菌,可以耐受非生物胁迫、刺激根系生长、促进土壤微生物的发育和养分的有效性,改善土壤微环境,在土壤养分循环和土壤结构形成中起着关键作用,从而直接或间接地促进植物在胁迫环境下的生长^[3]。迄今为止,国内外已发现的植物促生细菌以芽孢杆菌和假单胞菌为主,其中多数芽孢杆菌能够产生植物激素,提高植物对盐碱、重金属和干旱等恶劣条件下的耐受性^[4]。嗜盐芽孢杆菌(*Bacillus halotolerans* P75)是一株植物根际促生细菌,王涛等^[5]将菌株 P75 与其他植物促生细菌混合制成复合菌剂,能够使砒砂岩土壤有机质和氮磷钾含量增加,增强土壤酶活性,促进紫花苜蓿的生长,达到改良砒砂岩的效果;同时他们还研究了将菌株 P75 与草炭、蛭石等生物基材混合制成复合固体微生物菌剂,该复合固体微生物菌剂可以明显改善砒砂岩土壤性质,促进紫花苜蓿的生长。腐殖酸是一类天然有机物质,能有效改善土壤的生物和物理化学性质,调节土壤水分、肥力。其中黄腐酸能使植物次生根数量增多,提高植物吸水能力,改善植物生长^[6],在缓解多种逆境对作物的胁迫中也具有重要作用^[7]。孙海燕等^[8]研究表明 0.6% 浓度的腐殖酸浸种 8 h 增加了低温胁迫下菜豆幼苗的抗氧化酶活性,提高了菜豆苗期耐低温胁迫能力;Rashid 等^[9]研究了腐殖酸和黄腐酸对污水灌溉镉污染土壤中小麦品种镉生物利用度的影响,结果表明,腐殖酸通过与重金属形成稳定的金属—腐殖酸配合物来降低金属的有效性。

多年生黑麦草是世界温带地区广泛种植的多年生牧草和适生牧草^[10],具有环境适应性强、易于种植、生长速度快、地上部生物量大、须根发达和抗逆性强等特点,常作为研究土壤修复的供试植物。本研究以多年生黑麦草为供试材料,通过盆栽试验研究接种 *Bacillus halotolerans* P75,施用腐殖酸肥料以及不同菌肥搭配对水土流失严重的砒砂岩土壤理化性质及黑麦草生长和抗逆性指标的影响,以期探究菌肥协同修复作用和机理,为砒砂岩区生物治理提供理论依据及技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试菌株为实验室保藏的 *Bacillus halotolerans* P75。LB 培养基:胰蛋白胨 10 g,酵母粉 5 g,NaCl 10 g,蒸馏水 1 L,pH 值为 7.0。肥料为腐殖酸肥料($\text{Ca}+\text{Mg} \geq 150 \text{ g/L}$; $\text{N}+\text{P}_2\text{O}_5+\text{K}_2\text{O} \geq 100 \text{ g/L}$;黄腐酸 $\geq 40 \text{ g/L}$;有机质 $\geq 50 \text{ g/L}$);购买自山西省恒兴科技有限公司。供试植物:多年生黑麦草(*Lolium perenne*)种子购自江苏省农科院种子站。供试土壤采自内蒙古鄂尔多斯市准格尔旗砒砂岩资源区($39^{\circ}49'9.97''\text{N}$, $111^{\circ}16'53.14''\text{E}$)道路边坡的风化砒砂岩 0—20 cm 表层土壤。自然风干后过 5 mm 标准土壤筛备用。

1.2 发酵液及腐殖酸肥料的制备

将供试菌株 *B.halotolerans* P75 单菌落活化,再按 2% 的比例接种于新鲜 LB 液体培养基中,30 ℃,160 r/min 振荡培养 16~24 h 至对数生长期后期,使菌液中细菌浓度达到 10^8 CFU/ml ,制成 P75 发酵液,对应灭菌处理则对制得的发酵液进行 121 ℃,30 min 灭菌。腐殖酸肥料按使用方法稀释至 500 倍放置备用。

1.3 盆栽试验设计

盆栽试验于 2020 年 5 月 17 日至 6 月 18 日在温室中进行。试验共设置 6 个处理,分别为:对照,加等量无菌水(T_1);P75 发酵液(T_2);腐殖酸肥料(T_3);P75 发酵液+腐殖酸肥料(1:1, T_4);P75 灭菌发酵液(T_5);P75 灭菌发酵液+腐殖酸肥料(1:1, T_6)。将风干粉碎过 2 mm 孔径筛的砒砂岩土壤装入塑料花盆内(外口径 10 cm,高 8.5 cm,底径 7 cm),每盆装土 100 g。播种前,将上述制备的发酵液及腐殖酸肥料按 10% (体积质量比)接种量将砒砂岩土壤浇灌润湿,待菌液与砒砂岩混合均匀放置 1~2 d 后再进行

种植。挑选大小基本一致且饱满的黑麦草种子用 75%乙醇表面消毒 3~5 min,再用去离子水清洗 3 次。然后均匀地撒在土壤表面,薄薄盖土后,放置于室温黑暗条件下催芽,等种子破土萌发后在室温条件下 16/8 h 光照培养,待发芽生长一周后,再用各处理液浇灌。各处理分别设置 3 个重复,共计 18 盆。整个盆栽试验过程中,每天适量浇水保持土壤持水量约 60%,并逐渐间苗,最后每盆留苗 30 株。生长 30 d 后取样。

1.4 试验指标的测定

黑麦草株高:待黑麦草生长 30 d 时,用尺子挨着地面量到苗顶最高位置,读数即为黑麦草株高。黑麦草生物量:收获植株后,用去离子水洗净沥干,将黑麦草根和茎叶两部分的新鲜样品置于 75℃烘箱烘干至恒重,称量其干重。叶片中超氧化物歧化酶(Superoxide dismutase, SOD)活性的测定采用氯化硝基四氮唑蓝法^[11]。叶片中过氧化物酶(Peroxidase, POD)活性的测定采用愈创木酚法^[12]。叶片中脯氨酸含量的测定采用磺基水杨酸法^[13]。土壤渗水率的测定:在每个盆钵下方接一个小杯,将 200 ml 水缓缓倒入上方盆钵中,24 h 后测量小杯中渗出水体的体积 V ,土壤渗水率 $=V/200\times100\%$ 。土壤多糖含量的测定采用硫酸—苯酚法^[14]。土壤 pH 值:取风干过 2 mm 筛的土壤样品 1 g,按 1:2.5(质量体积比)的比例加入去离子水,充分振荡 2 h 后离心,取上清液,pH 计测定。土壤有机质含量采用重铬酸钾氧化—稀释热法^[15]。土

壤速效磷含量采用 0.5 mol/L NaHCO_3 浸提—钼锑抗比色法^[16]。土壤速效钾含量采用 NH_4OAc -火焰光度法^[16]。土壤蔗糖酶活性测定采用 3,5-二硝基水杨酸比色法;脲酶活性测定采用苯酚钠比色法^[17]。

1.5 数据统计与分析

所有试验数据均采用 Excel 2016 和 GraphPad Prism 8.0.2 软件处理并制图,采用 SPSS 22.0 对数据进行单因素方差分析, $p<0.05$ 表示差异显著。

2 结果与分析

2.1 腐殖酸和植物促生芽孢杆菌对黑麦草生长的影响

图 1 和表 1 显示了腐殖酸和菌株 *B.halotolerans* P75 对黑麦草生长的影响。从图 1 可以看出,与对照 T_1 相比,所有处理均能显著提高黑麦草的株高和生长状况,处理 T_4 的促生效果最好。对照 T_1 黑麦草叶片干枯发黄,缺乏营养,施用腐殖酸肥料和接种植物促生细菌后黑麦草叶片明显变得青绿(图 1)。与对照 T_1 相比,单独接种 P75 菌液(T_2)和施用腐殖酸肥料(T_3)分别使黑麦草株高、地上部和地下部干重增加了 26.4%~42.1%,58.3%~62.8%,44.9%~49.7%;将菌株 P75 与腐殖酸肥料联合施用(T_4)则可以使黑麦草株高、地上部、地下部生物量显著增加 67.1%,127.9%,120.0%(表 1)。结果表明,*B.halotolerans* P75 和腐殖酸肥料均可以显著改善黑麦草在砒砂岩土壤中的生长状况,二者联合施用可以进一步促进黑麦草生长。

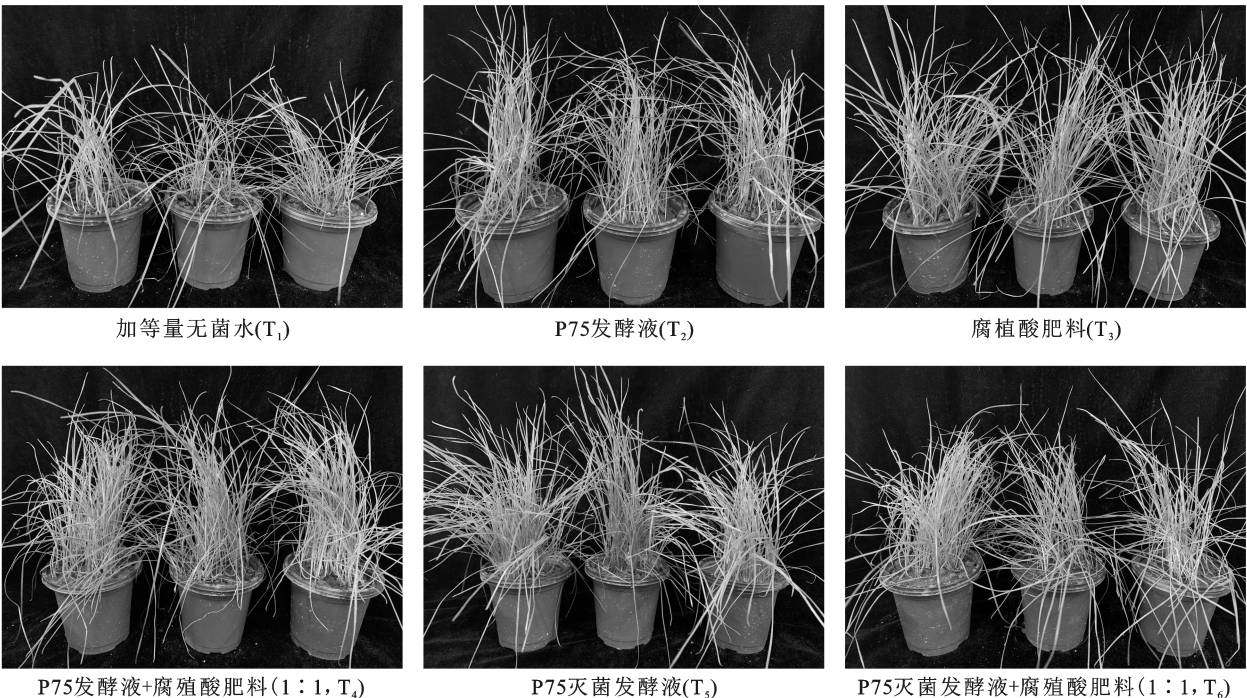


图 1 腐殖酸和菌株 P75 对黑麦草生长的影响

表 1 腐殖酸和菌株 P75 对黑麦草生长状况的影响			
处理	株高/cm	干重/g	
		地上部	地下部
T ₁	7.200±0.374 ^d	0.455±0.014 ^f	0.062±0.003 ^e
T ₂	9.100±0.374 ^c	0.720±0.025 ^d	0.089±0.004 ^c
T ₃	10.233±0.450 ^b	0.740±0.016 ^e	0.092±0.003 ^e
T ₄	12.033±0.525 ^a	1.036±0.073 ^a	0.136±0.009 ^a
T ₅	9.167±0.249 ^c	0.641±0.034 ^e	0.079±0.004 ^d
T ₆	11.933±0.340 ^a	0.967±0.016 ^b	0.127±0.002 ^b

注:同列数据后不同小写字母表示不同处理间有显著差异($p<0.05$)。下同。

2.2 腐殖酸和植物促生芽孢杆菌对黑麦草抗逆性的影响

由图 2 可知,与对照 T₁ 相比,各处理黑麦草叶片内的 SOD 活性均显著升高($p<0.05$)。其中,与对照相比,腐殖酸和菌株 *B.halotolerans* P75 联合施用的处理 T₄ 使黑麦草叶片 SOD 活性显著提高了 229.5%;处理 T₆ (P75 灭菌发酵液+腐殖酸肥料)的黑麦草叶片 SOD 活性显著提高了 168.1%;而单独接菌或施用腐

殖酸肥料的处理 T₂, T₃ 仅分别使黑麦草叶片中 SOD 活性增加 87.9%, 74.5%。与对照 T₁ 相比,除处理 T₅ (P75 灭菌发酵液)外,其余各处理黑麦草叶片中的 POD 活性均显著提高($p<0.05$)。其中处理 T₄ (P75 发酵液+腐殖酸肥料)可以使黑麦草叶片中 POD 活性显著提高 83.6%,而处理 T₃ (腐殖酸肥料)、T₆ (P75 灭菌发酵液+腐殖酸肥料)、T₂ (P75 发酵液)与空白对照相比分别显著提高了 58.0%, 34.4%, 16.9% (图 2)。与对照 T₁ 相比,各处理黑麦草叶片内的脯氨酸含量均显著升高($p<0.05$)。其中处理 T₄ (P75 发酵液+腐殖酸肥料)叶片脯氨酸含量显著提高了 119.3%,而处理 T₆ (P75 灭菌发酵液+腐殖酸肥料)、T₃ (腐殖酸肥料)、T₂ (P75 发酵液)叶片脯氨酸含量也分别显著提高了 110.1%, 85.1%, 42.5%。以上结果表明,菌株 *B.halotolerans* P75 和腐殖酸均使黑麦草叶片中 SOD 活性、POD 活性和脯氨酸含量显著增加,将二者复配施用则可以进一步提高黑麦草的抗逆性。

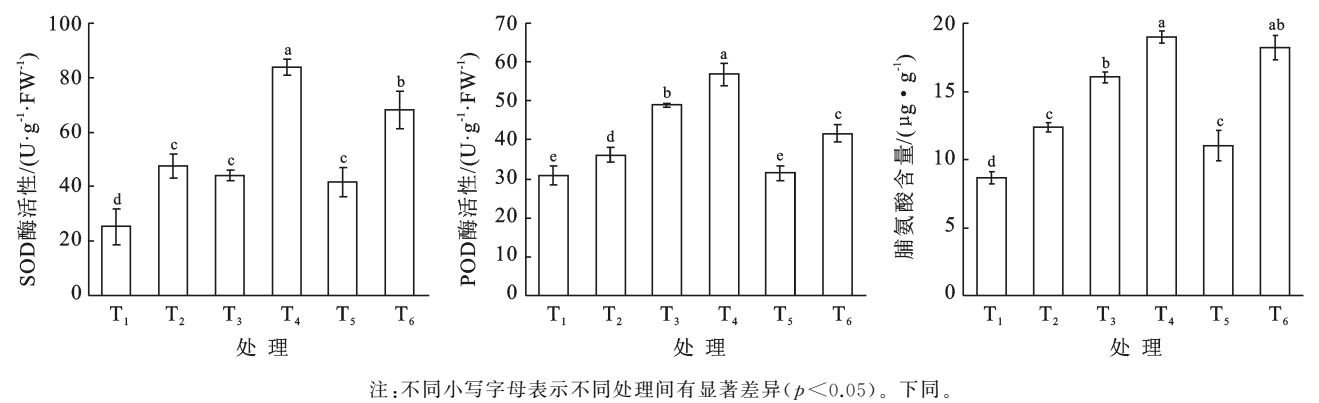


图 2 腐殖酸和菌株 P75 对黑麦草叶片 SOD 活性、POD 活性和脯氨酸含量的影响

2.3 腐殖酸和植物促生芽孢杆菌对砒砂岩土壤肥力的影响

2.3.1 不同处理对土壤 pH 值的影响 由图 3 所示,与对照相比,除处理 T₅ (P75 灭菌发酵液)以外,其余各处理均降低了砒砂岩土壤 pH 值。P75 发酵液降低砒砂岩 pH 值效果好于腐殖酸,处理 T₄ (P75 发酵液+腐殖酸肥料)可以使土壤 pH 值显著降低 0.30 个单位($p<0.05$)。

2.3.2 不同处理对根际土壤有机质含量的影响 由图 3 可知,与对照相比,单独施用腐殖酸肥料可使根际土壤有机质含量增加 10.1%,而 P75 灭菌发酵液与腐殖酸混合施用可以使根际土壤有机质含量增加 10.7%,单独施用 P75 灭菌发酵液对根际土壤有机质含量没有显著影响($p<0.05$)。当菌株 P75 与腐殖酸联合施用可以使有机质含量显著增加 19.5%,说明腐殖酸与微

生物可以短时间内增加根际土壤有机质含量。

2.3.3 不同处理对根际土壤速效磷、钾含量的影响 由图 3 可知,与对照相比,处理 T₃ (腐殖酸肥料)、T₄ (P75 发酵液+腐殖酸肥料)、T₆ (P75 灭菌发酵液+腐殖酸肥料)均可以增加砒砂岩根际土壤速效磷含量,其增加幅度为 20.7%~66.5%。除处理 T₅ (P75 灭菌发酵液)以外,其余处理均增加了根际土壤速效钾含量,增加幅度为 29.7%~48.8%。其中腐殖酸与菌株 *B.halotolerans* P75 联合施用效果最好。

2.3.4 腐殖酸和植物促生芽孢杆菌对砒砂岩土壤酶活性的影响 由图 4 可知,与对照相比,除处理 T₅ (P75 灭菌发酵液)以外,其余处理均增加了根际土壤酶活性。单独接菌和施用腐殖酸肥料分别增加了土壤蔗糖酶活性 21.9%, 12.5%,将二者复合施用的处理 T₄ (P75 发酵液+腐殖酸肥料)的效果更好,可使

土壤中蔗糖酶活性比对照显著增加 44.9%。与对照相比,处理 T₃(腐殖酸肥料)可以使土壤脲酶活性增加 21.7%,复合处理 T₄(P75 发酵液+腐殖酸肥料)

则可以使土壤脲酶活性增加 39.5%。结果表明,接菌处理以及施用腐殖酸肥料均可以使砒砂岩土壤酶活性增加,而菌肥复合施用可以进一步提高土壤酶活性。

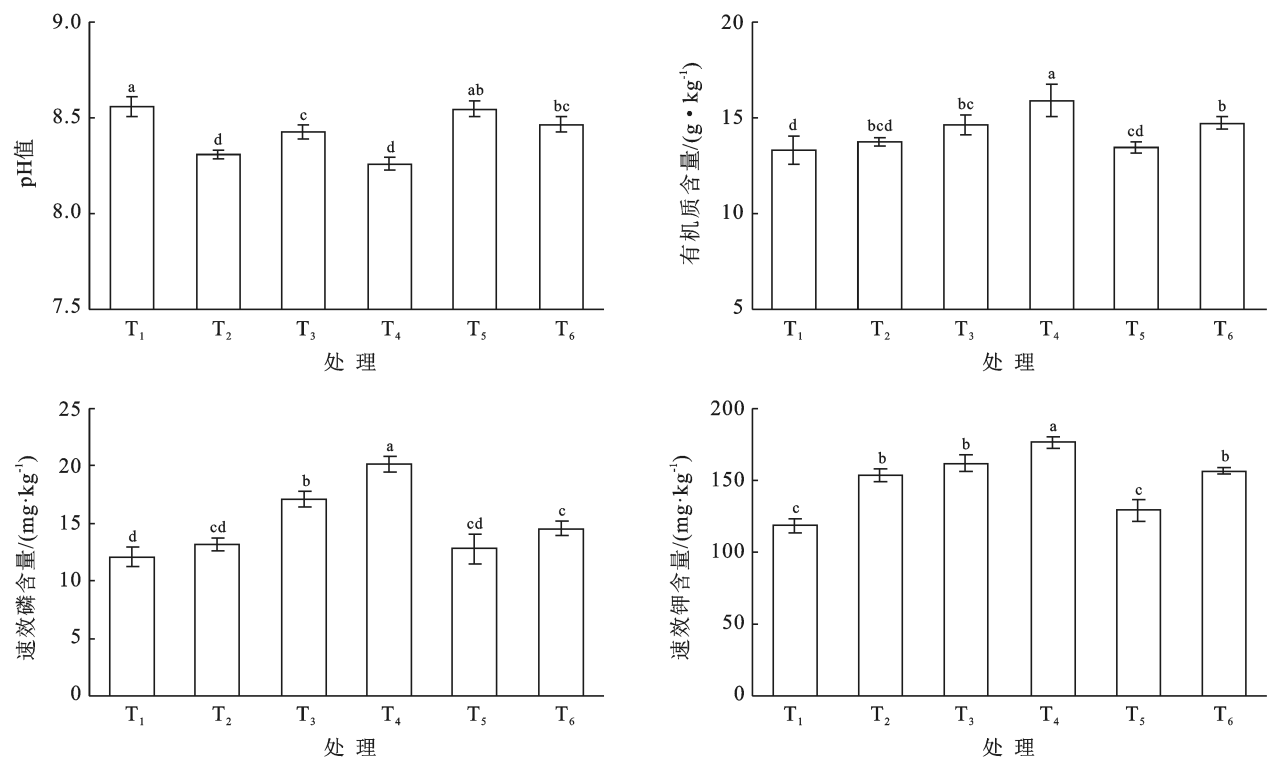


图 3 腐殖酸和菌株 P75 对砒砂岩土壤 pH 值、有机质含量、速效磷含量和速效钾含量的影响

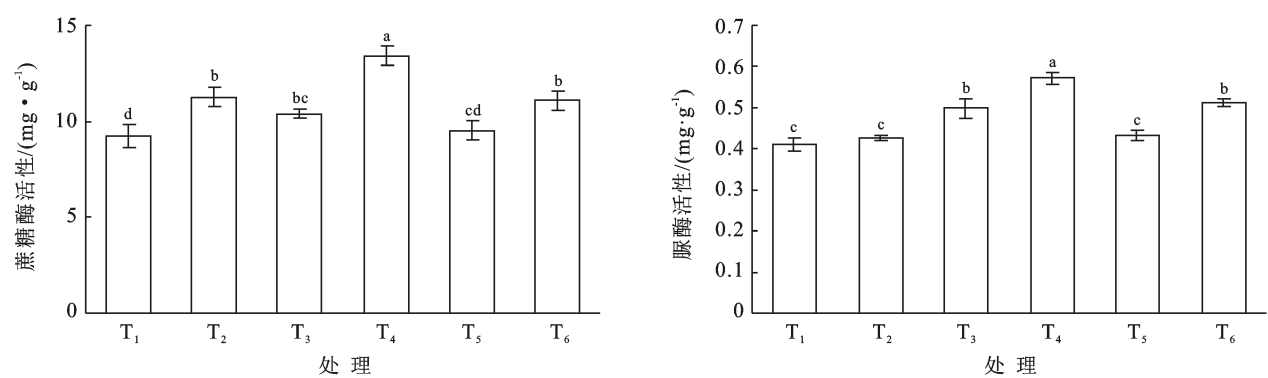


图 4 腐殖酸和菌株 P75 对砒砂岩土壤蔗糖酶活性、脲酶活性的影响

2.3.5 不同处理对根际土壤多糖含量的影响 由图 5 可知,与对照 T₁ 相比,处理 T₃(腐殖酸肥料)、T₄(P75 发酵液+腐殖酸肥料)分别使土壤多糖含量显著提高了 171.6%,266.0%($p<0.05$),处理 T₅(P75 灭菌发酵液)与对照相比无显著性差异($p<0.05$),其余处理的增加幅度为 33.9%~114.5%。结果表明,腐殖酸可以显著提高砒砂岩土壤多糖含量,而将 *B.halotolerans* P75 与腐殖酸复合施用的处理效果更好。

2.3.6 不同处理对土壤持水能力的影响 试验结果

表明(图 5),处理 T₄(P75 发酵液+腐殖酸肥料)的土壤渗水率最低,且土壤渗水率 T₄(P75 发酵液+腐殖酸肥料)<T₆(P75 灭菌发酵液+腐殖酸肥料)<T₃(腐殖酸肥料),与对照相比,这 3 个处理的土壤渗水率分别显著下降了 35.3%,35.5%和 33.3%,3 个处理相互之间没有显著性差异($p<0.05$);而处理 T₅(P75 灭菌发酵液)与对照相比无显著性差异($p<0.05$)。结果表明,腐殖酸可以有效提高砒砂岩土壤的持水能力,将菌株 *B.halotolerans* P75 与腐殖酸联合施用可以进一步改善砒砂岩土壤的持水能力。

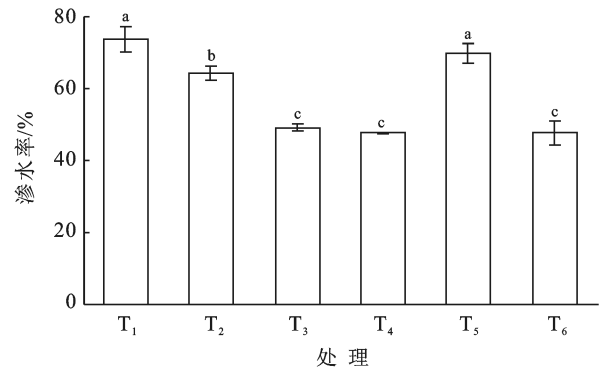
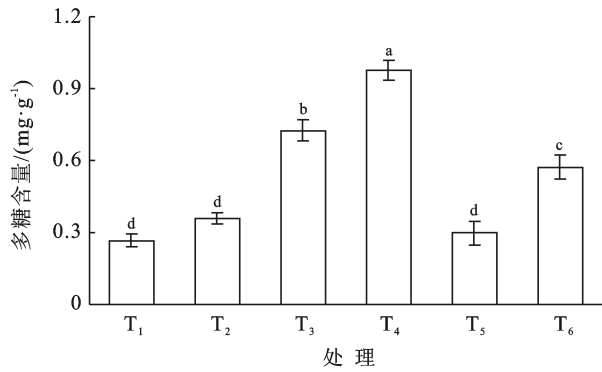


图 5 腐殖酸和菌株 P75 对砒砂岩土壤多糖含量和渗水率的影响

3 讨论

3.1 腐殖酸和植物促生芽孢杆菌联合提高黑麦草抗逆性

砒砂岩地区干旱少雨,土壤肥力低下,水土流失严重,是大多数植物生长的不良环境。通常在逆境下,植物体内产生并积累自由基和活性氧类物质,对植物细胞的结构和功能造成损伤,提高植物体内的 SOD 活性可以降低自由基和活性氧的含量,缓解自由基和活性氧带来的伤害^[18]。此外,POD 在抗逆性高的植物中活性也更高^[19]。脯氨酸是植物体内一种参与渗透调节过程的化学物质,当植物受到干旱胁迫时,植物细胞中脯氨酸会通过吸湿和保水等方面来降低细胞内水分的散失,植物会积累一定量的脯氨酸来保护细胞膜的稳定性、透性,清除植物体内的自由基,保证植物细胞的正常生理代谢活动^[20]。因此,脯氨酸是调控植物抵御外界恶劣环境的关键生理指标。相同干旱水平下同一品种植物体内脯氨酸含量高的比其相对含量低的抗旱性、旱后恢复性强^[21]。

本研究结果表明,生长于砒砂岩逆境中各处理组黑麦草叶片内 SOD 活性、POD 活性、脯氨酸含量均显著升高。本试验中接种 P75 发酵液及施用腐殖酸肥料后黑麦草叶片中各指标均高于对照,且腐殖酸和植物促生芽孢杆菌 P75 发酵液联合施用的处理组 SOD 活性显著增加,POD 活性和脯氨酸含量最高。这主要是因为腐殖酸肥料可以缩小植物气孔的开张度,降低植物的蒸腾作用,减少植物水分的消耗,从而使植物体内水势提高,增强植物的抗旱性^[22]。此外,腐殖酸肥料还能够有效增强植物体内多种酶活性,促进根系生长,提高其对水分、养分的吸收,增强植物对微量元素的吸收能力,改善植物生长状况^[23]。另外接菌处理使有益微生物定殖于植物根际周围,可以通过多种方式调节植物生长,增强植物的抗逆性,例如分泌促进植物发育的代谢物质、改善土壤结构与肥

力、提高植物根系对营养元素的吸收与利用等^[24]。本试验中单独接种 *B.halotolerans* P75 对黑麦草的抗逆性及生长情况没有腐殖酸肥料作用效果好,这可能是由于 *B.halotolerans* P75 自身的繁殖能力受到多种因素的影响,在干旱、缺乏营养的砒砂岩土壤环境条件下微生物生长受到一定程度的抑制。因此如何强化微生物在逆境环境中的生存能力仍需深入探讨。

3.2 腐殖酸和植物促生芽孢杆菌联合改良砒砂岩土壤肥力

砒砂岩地区水土流失严重,土壤养分低,因此改良砒砂岩土壤肥力是修复砒砂岩的重要环节之一。本试验中,与对照相比,腐殖酸和植物根际促生芽孢杆菌 *B.halotolerans* P75 单独或协同作用均可以有效提高砒砂岩土壤养分含量和肥力水平,且协同作用更好。腐殖酸肥料和植物促生芽孢杆菌联合施用的处理明显改善了砒砂岩土壤的酸碱性,提高了土壤多糖含量、有机质含量及土壤中速效钾、速效磷含量;同时,土壤酶活性也得到了显著提高;且土壤渗水率明显降低,土壤持水能力明显提高。土壤多糖是土壤中碳水化合物的主要存在方式,是土壤中一种重要的有机胶结物质,土壤多糖不仅是土壤有机质的重要组成部分,而且还可以促进土壤水稳性团聚体的形成,在土壤肥力上具有十分重要的意义^[25]。土壤中多糖含量与一些根际土壤酶、土壤微生物总数、土壤基础肥力呈正相关。本试验中接种植物促生细菌 *B.halotolerans* P75,使土壤中酶活性和速效磷、速效钾含量均明显增加,而灭菌处理组增加土壤肥力效果有限。说明活菌在土壤养分释放和循环中具有重要意义,能够在固氮、溶磷、释钾等方面发挥重要作用^[26];而且,活菌还可以在植物根系定殖,影响植物根系的生理活动,并参与土壤中营养元素的循环和矿物质的矿化过程。

腐殖酸类肥料是一种综合性非常强的环保有机

肥料,腐殖酸可以调节土壤 pH 值,提高土壤交换容量,影响土壤中土壤酶的种类和活性特征。土壤中蔗糖酶和脲酶在土壤碳氮元素循环过程中具有非常重要的作用,蔗糖酶可以将土壤中的碳水化合物分解为易溶性的营养物质,供植物和土壤微生物所吸收利用;脲酶则可以促进尿素水解生成氨,为植物生长所需氮素的主要来源^[27]。土壤中酶活性的高低也反映了土壤的肥力与土壤微生物活性^[28]。在土壤环境中,腐殖酸有着吸附黏连的作用,可以通过不同形式的作用力整合各种类型的有机—无机复合体,以维持土壤的水气肥热。同时,腐殖酸还可以有效改善土壤性能,易于稳定土壤的疏松与熟化^[29]。本研究中腐殖酸与植物促生芽孢杆菌的联合进一步强化了腐殖酸的作用,有效改善了砒砂岩土壤养分含量和肥力水平。本研究针对贫瘠的砒砂岩地区,提出微生物与腐殖酸肥料配施强化多年生黑麦草对砒砂岩土壤的改良作用,今后对菌液与腐殖酸肥料的配比和大规模应用还需作进一步探究。

4 结 论

菌株 *B.halotolerans* P75 与腐殖酸的联合施用可以使黑麦草地上部和根部生物量显著增加,显著提高了黑麦草的抗逆性,促进黑麦草在砒砂岩土壤中的生长,提高砒砂岩土壤中多糖含量和养分水平及持水能力。植物促生芽孢杆菌 *B.halotolerans* P75 与腐殖酸的协同作用可以明显改善砒砂岩土壤理化性质和肥力,强化植物生长,在砒砂岩地区进行植被修复治理具有潜力。

[参 考 文 献]

- [1] 陈科皓,韩霖昌,程杰,等.砒砂岩研究进展及利用前景[J].中国农学通报,2016,32(17):72-77.
- [2] 袁勤,崔向新,乔荣.砒砂岩区不同人工林对土壤理化性质的影响[J].北方园艺,2013(18):52-55.
- [3] Jayamohan N S, Patil S V, Kumudini B S. Seed priming with *Pseudomonas putida* isolated from rhizosphere triggers innate resistance against *Fusarium* with in tomo-to through pathogenesis-related protein activation and phenylpropanoid pathway [J]. Pedosphere, 2020, 30 (5):651-660.
- [4] Plett J M, Plett K L, Wong-Bajracharya J, et al. Mycorrhizal effector PaMiSSP10b alters polyamine biosynthesis in *Eucalyptus* root cells and promotes root colonization [J]. New Phytologist, 2020,228(2):712-727.
- [5] 王涛,邓琳,何琳燕,等.微生物菌剂对砒砂岩土壤的改良作用[J].中国环境科学,2020,40(2):764-770.
- [6] 王琦,温婧玉,赵玉杰,等.腐植酸调节砷酸盐生菜毒性作用研究[J].农业环境科学学报,2020,39(6):1196-1206.
- [7] Li Fangze, Men Shuhui, Zhang Shiwei, et al. Responses of low-quality soil microbial community structure and activities to application of a mixed material of humic acid, biochar, and super absorbent polymer [J]. Journal of Microbiology and Biotechnology, 2020,30(9):1310-1320.
- [8] 孙海燕,牡丹凤,郭伟.腐植酸浸种对低温胁迫下菜豆幼苗抗氧化系统的影响[J].植物生理学报,2020,56(11):2408-2416.
- [9] Zhang Hongyu, Xie Shuyun, Bao Zhengyu, et al. Underlying dynamics and effects of humic acid on selenium and cadmium uptake in rice seedlings [J]. Journal of Soils and Sediments, 2020,20(1):109-121.
- [10] Li Yuanyuan, Feng Gary, Tewolde Haile, et al. Soil aggregation and water holding capacity of soil amended with agro-industrial byproducts and poultry litter [J]. Journal of Soils and Sediments, 2020,21(2):1127-1135.
- [11] 张青侠,徐金光,鲍明月,等.水涝胁迫对芍药根系形态及体内多胺含量的影响[J].植物生理学报,2020,56(7):1445-1457.
- [12] 刘鑫铭,郭汝凤,刘奕,等.内生真菌侵染对化感物质胁迫下木麻黄幼苗根系活性氧代谢及保护酶系统的影响[J].植物生理学报,2020,56(9):1985-2006.
- [13] 李柯,施宠,何飞焱,等. Pb 胁迫下内生真菌侵染对德兰臭草生长及生理的影响[J].草业学报,2020,29(3):112-120.
- [14] 葛占标,殷涂童,周倩倩,等.产生物膜芽孢杆菌阻控叶菜吸收镉、铅及其修复菜地土壤的作用[J].南京农业大学学报,2020,43(1):80-88.
- [15] 郭艳.土壤有机质不同测定方法的对比[J].农业与技术,2019,39(18):25-26.
- [16] 苏伟波,杨张青,张玉民.2 种检测方法对土壤中氮、磷、钾测定结果的相关性对比研究[J].中国农学通报,2016,32(7):135-139.
- [17] 冯慧琳,徐辰生,何欢辉,等.生物炭对土壤酶活和细菌群落的影响及其作用机制[J].环境科学,2021,42(01):422-432.
- [18] 李少朋,张凯,邹书.丛枝菌根真菌对盐碱化土壤中玉米生长的影响[J].环境生态学,2019,1(8):56-59.
- [19] 周昕南,杨亮,许静,等.接种 AM 真菌对不同盐度土壤中向日葵生长的影响[J].农业资源与环境学报,2020,37(5):744-752.
- [20] Kane K H. Effects of endophyte infection on drought stress tolerance of *Lolium perenne* accessions from the Mediterranean region [J]. Environmental and Experimental Botany, 2019,71(3):337-344.

- [J]. 自然资源学报, 2019, 34(7): 1429-1439.
- [11] Yang Liu, Xu Youpeng, Han Longfei, et al. River networks system changes and its impact on storage and flood control capacity under rapid urbanization [J]. *Hydrological Processes*, 2016, 30(13): 2401-2412.
- [12] 韩龙飞, 许有鹏, 雷超桂, 等. 长江三角洲水系退化研究 (英文)[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2016, 26(6): 694-706.
- [13] 张振龙. 新疆城镇化与水资源耦合协调发展研究[D]. 新疆 乌鲁木齐: 新疆大学, 2018.
- [14] 王玮, 唐德善, 金新, 等. 基于系统动态耦合模型的河湖水系连通与城市化系统协调度分析[J]. *水电能源科学*, 2015, 33(7): 20-24.
- [15] 徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究[J]. *遥感学报*, 2005, 33(5): 589-595.
- [16] 陈希孺. 变点统计分析简介[J]. *数理统计与管理*, 1991, 10(1): 55-58.
- [17] 吴雷, 许有鹏, 徐羽, 等. 平原水网地区快速城市化对河流水系的影响[J]. *地理学报*, 2018, 73(1): 104-114.
- [18] 王启名, 杨昆, 许泉立, 等. 滇池流域土地利用格局变化的地形梯度效应[J]. *水土保持通报*, 2017, 37(4): 106-113, 118.
- [19] 刘永婷. 城市发展对嘉兴市水系连通影响及其与水资源耦合关系研究[D]. 安徽 芜湖: 安徽师范大学, 2018.
- [20] 陈东景, 徐中民. 西北内陆河流域生态安全评价研究: 以黑河流域中游张掖地区为例[J]. *干旱区地理*, 2002, 25(3): 219-224.
- [21] 李晨昱. 西安城市水系演变与城市发展的关系研究[D]. 陕西 西安: 西安理工大学, 2017.
- [22] 崔子豪. 西安市城市化过程与用水耦合关系研究[D]. 陕西 西安: 西安理工大学, 2017.
- [23] 廖重斌. 环境与经济协调发展的定量评判及其分类体系: 以珠江三角洲城市群为例[J]. *热带地理*, 1999, 19(2): 3-5.
- [24] 王洋, 王少剑, 秦静. 中国城市土地城市化水平与进程的空间评价[J]. *地理研究*, 2014, 33(12): 2228-2238.
- [25] 白天. 漯河城市地表景观对雨洪资源时空分配的影响[D]. 河南 郑州: 河南农业大学, 2019.
- [26] 王恒伟, 严金明, 陈萌. 快速城市化地区土地资源承载力空间分异研究: 以广东东莞市为例[J]. *西南大学学报 (自然科学版)*, 2016, 38(11): 141-148.
- [27] 胡艳芳, 田国行. 郑州市水系整治的生态学途径探讨[J]. *西南林业大学学报*, 2011, 31(5): 67-71.
- [28] 乔标, 方创琳. 城市化与生态环境协调发展的动态耦合模型及其在干旱区的应用[J]. *生态学报*, 2005, 25(11): 211-217.

(上接第 214 页)

- [21] 陈腊, 米国华, 李可可, 等. 多功能植物根际促生菌对东北黑土区玉米的促生效果[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(8): 2759-2766.
- [22] 谷端银, 王秀峰, 魏珉, 等. 腐植酸类物质与植物抗逆性研究进展[J]. *山东农业大学学报 (自然科学版)*, 2016, 47(3): 321-326.
- [23] 王相平, 杨劲松, 张胜江, 等. 改良剂施用对干旱盐碱区棉花生长及土壤性质的影响[J]. *生态环境学报*, 2020, 29(4): 757-762.
- [24] 庞志强, 余迪求. 干旱胁迫下的植物根系—微生物互作体系及其应用[J]. *植物生理学报*, 2020, 56(2): 109-126.
- [25] 杨坤, 于季红. 土壤多糖的研究进展[J]. *中国农学通报*, 2014, 30(36): 222-225.
- [26] Khoshru Bahman, Mitra Debasis, Khoshmanzar Elah-heh, et al. Current scenario and future prospects of plant growth-promoting rhizobacteria: An economic valuable resource for the agriculture revival under stressful conditions [J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2020, 43(20): 3062-3092.
- [27] 李婧男, 孙向阳, 李素艳. 有机无机改良剂对滨海盐渍化土壤酶活性和土壤微生物量的影响[J]. *水土保持通报*, 2019, 39(5): 160-165.
- [28] Luan Haoan, Gao Wei, Tang Jiwei, et al. Aggregate-associated changes in nutrient properties, microbial community and functions in a greenhouse vegetable field based on an eight-year fertilization experiment of Chian [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2020, 19(10): 2530-2548.
- [29] 纪磊, 岳鑫, 陈磊, 等. 生物质炭和秸秆对土壤团聚体腐殖物质组成的影响[J]. *山东农业科学*, 2019, 51(1): 91-97.