

枯草芽孢杆菌对盐碱土水分运动和水稳性团聚体的影响

侯亚玲¹, 周蓓蓓¹, 王全九^{1,2}, 陈晓鹏¹, 陶汪海¹, 张继红¹

(1. 西安理工大学西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地, 西安 710048;

2. 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家实验室, 陕西 杨陵 712100)

摘要: 为探明微生物在盐碱地改良方面的应用, 通过在盐碱土中加入枯草芽孢杆菌, 研究不同浓度微咸水(0, 1, 2, 3, 4 g/L)条件下, 盐碱土中的水分运动和土壤水稳性团聚体的变化规律。结果表明: (1) 枯草芽孢杆菌可以显著减少土壤的入渗能力, 同时可减缓水分的迁移能力, 添加枯草芽孢杆菌的土壤与相对应的对照组相比, 累积入渗量和湿润锋推进距离均显著减少, 其中在微咸水浓度为 2 g/L 时, 土壤累积入渗量减少幅度最大, 为 40.97%, 其他处理减少程度依次为 3, 0, 1, 4 g/L, 湿润锋的推进距离也有类似的结果。(2) 利用 Philip 和 Kostiakov 入渗模型拟合试验数据, 发现 Philip 公式中的吸渗率 S 均小于相应对照组, Kostiakov 公式中的经验系数 K 均小于相应对照组, 而经验指数 β 均大于相应对照组。(3) 枯草芽孢杆菌可以增加土壤的保水能力, 在微咸水浓度为 2 g/L 时, 对土壤水吸力的影响较大。与对照组相比, van Genuchten 公式中土壤滞留含水率 θ_r 、饱和含水率 θ_s 及与进气值相关系数 α 均有所增大, 形状系数 n 逐渐减小。(4) 含有枯草芽孢杆菌的土壤, 在微咸水入渗后其土壤团粒结构均有较大的改善。

关键词: 枯草芽孢杆菌; γ -聚谷氨酸; 盐碱土; 土壤改良; 入渗特性; 水稳性团聚体

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)04-0105-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2017.04.018

Effects of *Bacillus Subtilis* on Water Movement and Water Stable Aggregate in Saline Alkali Soil

HOU Yaling¹, ZHOU Beibei¹, WANG Quanjiu^{1,2}, CHEN Xiaopeng¹, TAO Wanghai¹, ZHANG Jihong¹

(1. State Key Laboratory Base of Eco-hydraulic Engineering in Arid Area, Xi'an University of Technology,

Xi'an 710048; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and

Water Conservation, Chinese Academy of Science and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: In order to ascertain the impacts of microorganism (*bacillus subtilis*) on soil improvement and water movement in saline alkali soil, a laboratory 1D infiltration experiment of brackish water with different concentrations (0 g/L, 1 g/L, 2 g/L, 3 g/L and 4 g/L) was conducted. The results showed that: (1) *Bacillus subtilis* reduced the infiltration capacity of the soil significantly, and slowed down the water flow. Compared with the control, the cumulative infiltration and the final wetting front distance were significantly decreased in soil with *bacillus subtilis*. The reduction in the cumulative infiltration was up to 40.97% under the brackish water concentration of 2 g/L. The wetting front distance showed the similar results as infiltration. (2) Philip and Kostiakov infiltration model were used, and the fitting result showed that the imbibition rate S of Philip formula was less than that in the corresponding control groups. This suggested the diminished solid water absorbing ability of capillary force might be due to the viscosity property improvement made by *bacillus subtilis*. The experience coefficient K of Kostiakov formula was smaller than the control, which indicated that the initial infiltration rate of *bacillus subtilis* contained solid was lower. Nevertheless, the empirical exponential β was greater than the control, demonstrating that the containing solid capacity of *bacillus subtilis* was fading with the increasing infiltration time. (3) After the infiltration of brackish water, the soil with *bacillus subtilis* showed a better aggregate structure, which could significantly improve the ventilation

收稿日期: 2017-02-22

资助项目: 国家自然科学基金项目(51239009, 41371239); 陕西省科技支撑项目(2013KJXX-38); 陕西省自然科学基金项目(2015JQ5161); 西安理工大学特色研究计划项目(2016TS013)

第一作者: 侯亚玲(1993—), 女, 汉族, 硕士研究生, 主要从事农业水土与生态环境研究。E-mail: 2239407534@qq.com

and water holding capacity. Soil water characteristic curve showed that, with the same moisture content and concentration, the water suction of the *bacillus subtilis* containing solid was stronger than the corresponding control, with more reduced matrix potential, which indicated that *bacillus subtilis* increase the water holding capacity and inhibit the water evaporation and infiltration. Finally, the soil water characteristic curve was fitted using van Genuchten model. In this formula, the soil residual water content, saturated water content and coefficient associated with intake value increased, and shape coefficient decreased. (4) In conclusion, *bacillus subtilis* can improve the solid structure effectively and reduce solid infiltration. This study could provide a theoretical support for the microorganism application in soil improvement.

Keywords: *Bacillus subtilis*; poly- γ -glutamic acid; saline-alkali soi; soil improvement; infiltration characteristics; water stable aggregate

土壤盐碱化是一个世界性难题,全世界盐碱土面积约 10 亿 hm^2 ,且每年以 $(1.0 \sim 1.5) \times 10^6 \text{ hm}^2$ 的速度增长^[1];我国有近 1/5 耕地发生盐碱化。据最新统计,新疆是我国最大的盐土区,盐碱土面积达 1 100 万 hm^2 ,约占全国盐碱土面积的 1/3 和新疆土地面积的 6.6%^[2]。20 世纪 60 年代初,新疆地区由于不合理的灌溉,导致土壤的盐碱化现象不断加重。新疆各地相继开展了多种农业、化学以及生物方法对盐碱地进行改良。农业改良措施主要有增加土壤有机质、起槽种植、避盐栽培和种植等方法^[3],这些措施在新疆盐碱地改良中已有广泛应用,但是农业改良措施只能局部减轻土壤盐渍化程度,对于新疆大面积盐碱地的修复,仍存在困难;化学改良措施主要是在盐碱地土壤中施加石膏、磷酸、矿渣和有机无机酸等改良剂,降低土壤中的盐碱含量^[4],但施用石膏等化学改良剂增加可溶性钙(Ca^{2+}),通过离子代换作用将土壤中的钠离子(Na^+)代换出来,结合灌溉使之淋洗,达到改良盐碱土的目的,化学改良措施一般用于重度盐碱土改良^[5],化学改良措施虽然见效快,但容易引入新的离子造成二次污染,且资金投入和技术都很高,对于新疆大面积盐碱地的修复实施起来比较困难;生物改良措施主要有植树造林、种植牧草及培育和种植耐盐植物,通过种植植物不仅可以降低地下水位,抑制盐分上升,还可以调节小气候,减缓旱涝灾害^[6],但耐盐植物与作物争水争肥,极易加剧西北旱区的水资源短缺问题,且降低农户收入,亦难以推广实施。

水是维系人类生存与发展不可缺少的资源,是实现人类社会可持续发展的重要物质基础。据最新估计,我国淡水资源总量为 $2.8 \times 10^{12} \text{ km}^3$,人均水资源占有量为 2 400 m^3 ,约为世界人均的 1/4,被称为世界上最缺水的 13 个国家之一^[7]。从当前中国经济社会发展来看,水资源已经迅速接近承载力的上限,水资源短缺问题,将成为我国农业和经济社会发展的制约因素^[8]。据有关部门统计,我国地下微咸水资源约

200 亿 m^3/a ,其中可开采量为 130 亿 m^3 。从形成与分布的地理位置得知,我国微咸水主要分布于易发生干旱的华北、西北以及沿海地带^[7]。新疆是我国最大的省,位于我国西北部,微咸水资源极为丰富,因此,开发利用新疆地区微咸水资源,可以提高水资源利用率,缓解我国水资源的缺乏。

土壤微生物是土壤生命活体的主要组成部分,也是土壤生态系统的重要组份之一,它不仅可促进土壤腐殖质的形成及分解土壤有机质,还可以吸收、固定并释放土壤中养分,对植物营养状况的改善和调节有重要作用,同时也能与植物共生促进生长,如豆科植物的结瘤固氮和植物菌根的形成^[9]。使用微生物改良土壤盐碱地,不仅可以调节和改善植物的营养状况,还可以增加土壤耕作层的通透性,同时对生态环境也不会产生负面影响。

枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*)是自然界广泛存在、对人畜无毒无害、不污染环境的非致病毒,具有易培养、繁殖快、易保存、对环境适应性强等特点。它作为一类重要的生防资源,在防止植物的病害中发挥重要作用^[10-11],同时在生长代谢过程中能够产生不同的抑菌物质。枯草芽孢杆菌制剂能耐受各种恶劣的环境和抑制基质,活性稳定,已被广泛应用于较高浓度的畜牧业、养殖水体的净化中^[12],已有研究表明,枯草芽孢杆菌能产生具有良好絮凝性能的絮凝剂 γ -聚谷氨酸,能吸附和富集水体中的污染物和重金属,对水体的净化起到重要作用^[13]。在盐胁迫下,芽孢杆菌也可以促进植物对矿质营养元素的吸收,改变植物体内离子平衡,增加植物对水分的吸收和利用能力,诱导植物生理代谢发生变化与植物根际其他微生物协同作用及改善土壤团粒结构等^[14]。目前,枯草芽孢杆菌对土壤物理特性影响的研究依然不足,其影响机理仍需进一步分析,因此本文针对亟需解决的盐碱地问题,将枯草芽孢杆菌添加到盐碱土中,进一步探究枯草芽孢杆菌在微咸水入渗下对盐碱土土壤水

分运动和土壤水稳性团聚体结构的影响。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 供试土样 试验于2016年6月开始,供试土样取自新疆维吾尔自治区昌吉市农业生态试验站田间试验小区表层0—20 cm耕作层的土壤,土壤容重采用环刀法测定,为 1.43 g/cm^3 。将取回土样置于阴凉处干燥、风干,去除土样中的枯枝、残留物,过2 mm筛以留备用。土壤粒径组成采用 Mastersizer 2000 激光粒度分析仪进行测定,其黏粒所占体积分数为5.30%,粉粒为74.48%,砂粒为20.22%,得知该土壤质地为壤砂土。经测定,该地区土壤的含盐量为0.18%,pH为8,该区域土为盐碱土。微咸水取自新疆昌吉农业生态试验站地下井水,矿化度为 3.03 g/L , HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 和 K^+ 含量分别为0.318,0.701,1.140,0.596,0.075,0.65,0.361 g/L,试验中所采用的微咸水均以此为对照进行配制。

1.1.2 枯草芽孢杆菌来源及其理化特性 枯草芽孢杆菌菌种(*Bacillus subtilis* subsp. *Subtilis*)来源于中国科学院微生物研究所,在安瓿中形态为白色固体;在液体培养基上其外观粗糙不透明,为污白色或微黄色,在生长时,常形成皱褶。枯草芽孢杆菌可以提高作物的抗病、抗旱、抗寒能力;增加土壤养分、改良土壤结构、提高化肥利用率;同时可以分解土壤植物的纤维和蛋白质,解磷、解氮,抑制土壤中的有害菌,防止植物病虫害、分解杂草种子,进而促进作物生长、成熟,增加产量,提高收入。

1.1.3 枯草芽孢杆菌的菌种活化 菌种活化就是将保藏状态的菌种放入适宜的培养基中培养,逐级扩大培养是为了得到纯而壮的培养物,即获得活力旺盛的、接种数量足够的培养物。菌种发酵有一般需要2~3代的复壮过程,因为保存时的条件往往和培养时的条件不相同,所以要活化,让菌种逐渐适应培养环境^[15]。菌种的恢复培养:(1)安瓿开封,用75%酒精脱脂棉对安瓿外表面进行消毒后,用火焰加热其顶端,滴少量无菌水至加热的安瓿顶端使之破裂(应避免过多水蒸汽影响菌种的复苏),用锉刀或镊子敲下已经破裂的安瓿顶端。(2)恢复培养,用无菌吸管吸取0.3~0.5 mL(建议勿超过0.5 mL)适宜的液体培养基,滴入安瓿内,轻轻振荡,使冻干菌体溶解呈悬浮状。吸取全部菌悬液,移植于培养基试管中(建议不超过2支试管)中,置于恒温培养箱培养,温度设定为 $30\text{ }^\circ\text{C}$,该培养基含蛋白胨10 g、牛肉浸提物3 g、NaCl

5 g、琼脂15 g及蒸馏水1 g。(3)菌株的活化步骤为:用接种环从试管斜面培养基上挑取少量生长的菌,在事先制好的平板上划线,划线时所划的范围尽量划满,然后将接种环灼烧,再转动一定的角度连接已划线的区域再划另一区,最后划满整个培养皿。将培养皿置于恒温培养箱中,待培养皿中长出菌落,再将其转接到斜面上,如此反复几次后便可获得活化菌株。菌株扩大培养的步骤为:用接种环挑取少量活化菌株于装有液体培养基的三角瓶中,将三角瓶置于恒温摇床中,摇床设置条件为: $30\text{ }^\circ\text{C}$,1 500 r/min。培养17 h后,观察三角瓶中的菌悬液已比较浑浊,测定其吸光度 $\text{OD}_{600}=2.50$,稀释后备用^[16]。

1.1.4 枯草芽孢杆菌与土样的混合 首先,对土样先进行灭菌处理,再称取200 g过筛后的土样倒入在桶中,随后用量筒盛10 mL活化后的菌液,使用小型喷雾将菌液喷洒在土面,之后再称取200 g土样倒入在桶中,再次使用小型喷雾将菌液喷洒在土面,重复以上过程4,5次,最后在土层表面敷一层保鲜膜,将桶置于阴暗地方,使得菌在土中快速繁殖,2天后取少许土样,分析测得每克土样中枯草芽孢杆菌含量为 $20\times 10^6\text{ cfu}$,且随着培养时间的增加,土壤中细菌含量最终将达到一个稳定值^[17],最后利用该土样进行试验。

1.2 试验方法

1.2.1 土壤入渗试验 按容重 1.43 g/cm^3 将土样分层(每层5 cm)装入土柱中,装土高度为40 cm,装土过程中,层间刮毛以保证土壤装填均匀,另设计不添加枯草芽孢杆菌的处理作为对照,每个处理2个重复。试验供水系统为马氏瓶,马氏瓶微咸水浓度分别为0,1,2,3,4 g/L,控制水头高度为1 cm左右,试验过程中记录土柱湿润锋和马氏瓶的读数,当土壤入渗速率达到稳定值时,即可停止数据记录。

1.2.2 土壤水分特征曲线试验 土壤水分特征曲线使用日本 Kokusan 公司生产的 H-1400pF 土壤水分特征曲线测量系统测定。测定步骤为:将混合后的土样,分别按容重 1.43 g/cm^3 装入离心机的配套环刀(体积为 100 cm^3 ,质量为76 g)中,称质量,记录环刀与干土总质量。在装好土的环刀下垫一张滤纸,然后分别放到浓度为0,1,2,3,4 g/L的微咸水盐溶液中,浸泡72 h使其充分饱和和后称质量,将盛有饱和土样的环刀放入样品杯,测定土样在不同转速下的含水率,设计测量系统的转速分别为100,300,500,700,1 200,1 700,2 200,3 100,4 400,5 400,6 200,6 900 r/min(转速根据土壤基质势大小换算设定),每次离

心时间为 90 min,每次离心结束后用称质量法计算土壤含水率^[18];另设计不添加枯草芽孢杆菌的处理作为对照,每个处理 2 个重复。

1.2.3 土壤水稳性团聚体分析试验 土壤水稳性团聚体使用荷兰 Eijkelkamp 公司生产的 Wet Sieving Apparatus(湿筛分装置)。测定步骤为:待土壤入渗实验测量结束后,从下至上依次分为 6 层,取每层中间的土样作为土壤团聚体的分析样品。从土柱内取样放于烘箱中将其烘干,待土样烘干后,碾碎土样,称取 4 g 处理的土样,用喷雾将土样弄湿,放置在孔径为 0.25 mm 筛罐支架上,再放上已称质量的不锈钢水罐,通过筛罐支架上的加水孔向锈钢水罐中加入足够的蒸馏水以浸没土壤,再将筛罐支架固定到工作位置,即锁定在第 2 个轴孔上,接下来就可以开启马达,将时间设置在 3 min,待装置停止运行后将筛罐支架升高离开不锈钢水罐,固定在第 1 个轴孔上让水充分漏出,取出不锈钢水罐。重新放上另外一个已称质量的不锈钢水罐,并加入 2 g/L 的六偏磷酸钠溶液,重复第 1 次操作,此次设定筛分时间为 8 min。最后将不锈钢水罐放入烘箱中,充分烘干后称不锈钢水罐质量,计算出从筛网漏入不锈钢水罐中的土壤质量,将土壤总质量减去从筛网漏出的土壤质量即为粒径大于 0.25 mm 的水稳性团聚体质量,再将该质量除以土壤总质量即可得出粒径大于 0.25 mm 水稳性团聚体含量^[18]。

1.3 基本理论及指标计算

1.3.1 入渗模型 土壤入渗模型有多种,可分为理论模型与经验模型两大类。在理论模型中,Philip^[18]模型应用较为广泛,其公式形式简单,物理意义明确;在经验模型中,应用广泛的是 Kostikov 模型,该模型中的参数虽然没有确切的物理意义,但形式简单,计算方便,并且没有太多的条件要求^[19]。所以选用这两种常用模型来反映枯草芽孢杆菌在不同浓度微咸水下对土壤入渗特性的影响。

Philip 入渗公式可表示为^[18]:

$$I = St^{0.5} \quad (1)$$

式中: I 为累积入渗量(cm); S 为土壤吸渗率($\text{cm}/\text{min}^{0.5}$); t 为入渗时间(min)。

Kostikov 入渗模型,其具体形式为^[18]:

$$I = Kt^{1-\beta} \quad (2)$$

式中: K 为经验入渗系数,表示入渗开始后第一个单位时段末的累积入渗量,在数值上和第 1 个单位时段平均入渗速率相等; β 为经验指数,反映土壤的入渗速度的衰减能力。在入渗初期,参数 K 对土壤入渗

能力起主导作用,随着入渗时间的增长,参数 β 则成为影响入渗大小的主要因素^[20]。

1.3.2 土壤水分特征曲线 土壤水分特征曲线的影响因素复杂,至今尚没有从理论上建立土壤含水量和土壤基质势之间的关系,通常采用经验公式来描述。最常用的经验模型是 van Genuchten 模型,具体形式为^[18]:

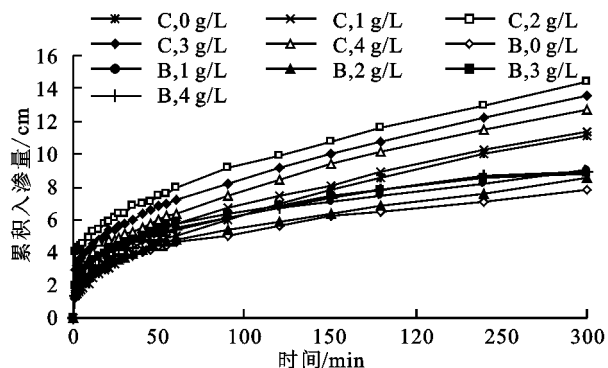
$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left(\frac{1}{1 + (\alpha h)^n} \right)^m \quad (3)$$

式中: θ 为土壤含水率(cm^3/cm^3); θ_r 为滞留土壤含水率(cm^3/cm^3); θ_s 为饱和土壤含水率(cm^3/cm^3); h 为土壤吸力(cm); α 为与进气值相关的系数; n 和 m 为形状系数,且 $m = 1 - 1/n$ 。

2 结果与分析

2.1 枯草芽孢杆菌对土壤入渗特征的影响

2.1.1 枯草芽孢杆菌对累积入渗量影响 土壤水分入渗时间与累积入渗量在一定程度上反映土壤水分入渗能力^[21]。依据实测数据,将枯草芽孢杆菌在不同浓度微咸水下的入渗结果绘于图 1。当土壤入渗时间为 300 min 时,土壤入渗速率均达到稳定值 0.03 cm/min。由图 1 可以看出,与不含枯草芽孢杆菌的对照组对比,含有枯草芽孢杆菌的土壤累积入渗量均大幅度减小,其中,在微咸水浓度为 2 g/L 时,土壤累积入渗量从 14.4 cm 减少到 8.5 cm,减少幅度最大,为 40.97%,其他处理影响大小依次为 3,0,1,4 g/L。可见枯草芽孢杆菌具有明显的减渗作用,原因可能是枯草芽孢杆菌能产生具有良好絮凝性能的絮凝剂 γ -聚谷氨酸^[13],而 γ -聚谷氨酸在吸水饱和后呈凝胶状态^[22],增加了水分的粘滞性。由于枯草芽孢杆菌有着较强的减渗能力,在一定程度上可以防止含盐量较高的地下水向地表运动,有助于防止土壤产生次生盐碱化。因此,建议在土壤中加入枯草芽孢杆菌来改善盐碱地土壤结构,增加土壤持水性,提高土壤水分利用效率,以达到节水、增产的目的。



注:C 为对照组;B 为含有枯草芽孢杆菌组。下同。

图 1 枯草芽孢杆菌对累积入渗量的影响

2.1.2 枯草芽孢杆菌对湿润锋迁移特性的影响 湿润锋是指水分下渗过程中,土壤被湿润的先头部位与干土层形成的明显交界面,是反映下渗水流的垂向运动特征之一^[23]。从图 2 可以看出,在入渗初期,同一浓度不同处理下,湿润锋推进距离相差不大,重合度较高,但在 80 min 时,同一浓度不同处理下湿润锋的推进距离逐渐拉开差距,说明枯草芽孢杆菌对湿润锋推移的影响开始得以体现。在入渗结束时,含有枯草芽孢杆菌的土壤湿润锋的推移距离与相同浓度的对照组均有大幅度减少,其中,在微咸水浓度为 2 g/L 时,土壤湿润锋的推移距离从 35.3 cm 减少到 28.4 cm,减少幅度最大,为 20%,其次为 3,0,1,4 g/L。可见枯草芽孢杆菌可以减缓对水分的推移,可能是由于枯草芽孢杆菌产生的 γ -聚谷氨酸,在吸收大量水分后,增加土壤颗粒的持水容量,使得土壤的体积变大,空隙变小,从而减缓了湿润锋的迁移速率。

2.1.3 枯草芽孢杆菌对入渗模型水分运动参数的影响 为了进一步分析和验证枯草芽孢杆菌对土壤水分运动的影响,利用 Philip 和 Kostikov 入渗模型拟合入渗数据,获取表征土壤水分入渗能力的重要参数,其中的参数大小主要取决于入渗时土壤的结构状况,结果见表 1。由拟合的决定系数可看出,拟合的效果较好。进一步分析含有枯草芽孢杆菌的土壤,Philip 公式中的吸渗率 S 均小于相同浓度对照组的吸渗率 S ,呈现负相关关系,说明毛管力对土壤中水分的吸收能力减弱,可能由于枯草芽孢杆菌产生的 γ -聚谷氨酸,在吸水饱和后呈现凝胶状态,增强了对水分的粘滞性;Kostikov 公式中的经验系数 K 也均小于相同浓度对照组的经验系数 K ,表明含有枯草芽孢杆菌的土壤在初始入渗时的速率较低,而经验指数 β 均大于相对应参照组的经验指数 β ,表明随着入渗时间的推移,含有枯草芽孢杆菌的土壤能力在减弱。

2.2 枯草芽孢杆菌对土壤水分特征曲线的影响

土壤水分特征曲线是表征土壤水吸力(基质势)与土壤含水率的关系曲线,表示土壤水的能量和数量之间的关系,是研究土壤水分的保持和运动所用到的反映土壤水分基本特征的曲线^[18]。在不同浓度微咸水作用下,含有枯草芽孢杆菌的土壤与相同浓度对照组的测定结果见图 3。在同一浓度的两种不同处理下,当含水率相同时,含有枯草芽孢杆菌土壤的水吸力大于相对应对照组的水吸力,即土壤的基质势降低,这说明枯草芽孢杆菌增加了土壤对水分的保持能力,使土壤中的水分不易因蒸发入渗等原因而流失。其中,在 2 g/L 的处理下,枯草芽孢杆菌对土壤的水

吸力影响较大,其余处理影响依次为 3,0,1,4 g/L。当土壤含水量较大时,枯草芽孢杆菌对土壤的水吸力影响较大,这可能是由于枯草芽孢杆菌产生的 γ -聚谷氨酸,在水分充足的条件下,可产生具有良好性能的水凝胶,这种水凝胶可增强土壤的水吸力。

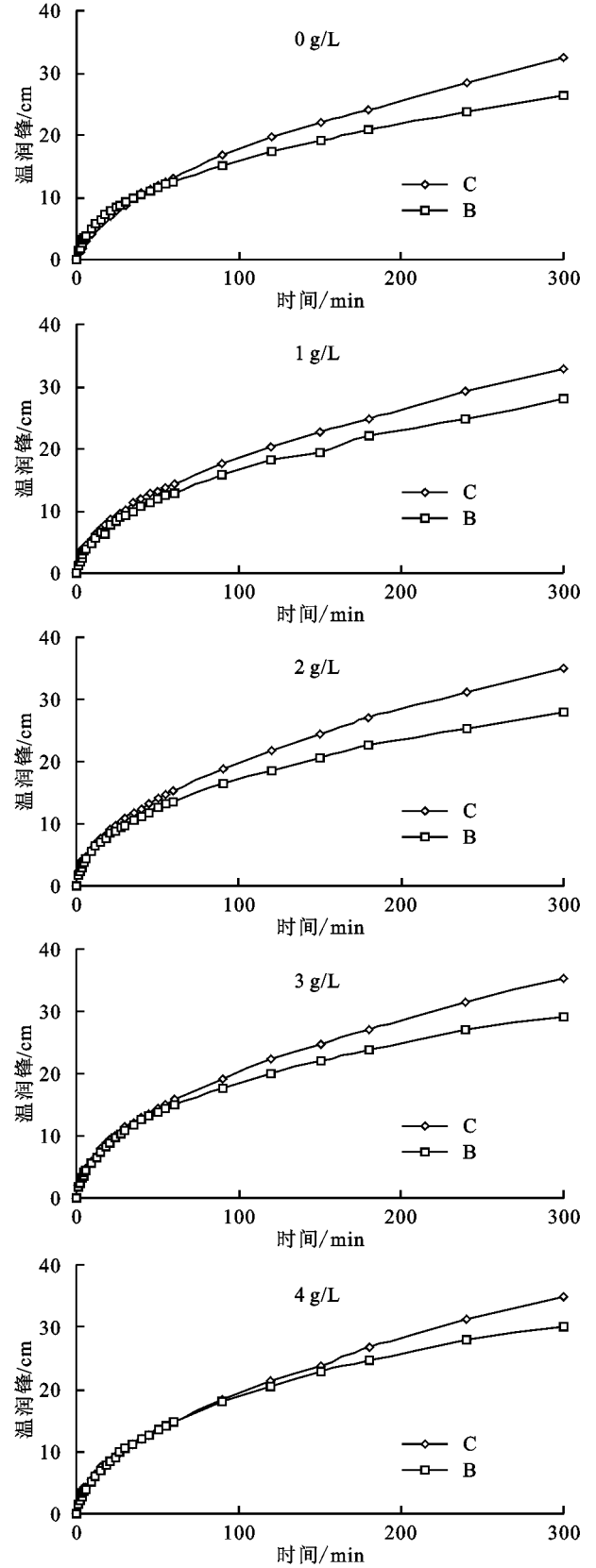


图 2 枯草芽孢杆菌对湿润锋迁移的影响

表 1 土壤水分入渗公式参数拟合

盐浓度/ (g · L ⁻¹)	Philip 公式				Kostiakov 公式					
	吸渗率 S/(cm · min ^{-0.5})		决定系数 R ²		经验系数 K		经验指数 β		决定系数 R ²	
	C	B	C	B	C	B	C	B	C	B
0	1.26	1.24	0.96	0.99	1.40	1.16	0.60	0.70	0.97	0.99
1	1.37	1.35	0.95	0.99	1.52	1.18	0.61	0.70	0.98	0.97
2	3.63	1.52	0.96	0.97	3.89	1.59	0.70	0.77	0.94	0.99
3	2.72	1.86	0.95	0.96	2.73	2.05	0.72	0.73	0.97	0.99
4	1.68	1.44	0.99	0.98	1.52	1.21	0.67	0.68	0.99	0.99

注:C为对照组;B为含有枯草芽孢杆菌组。下同。

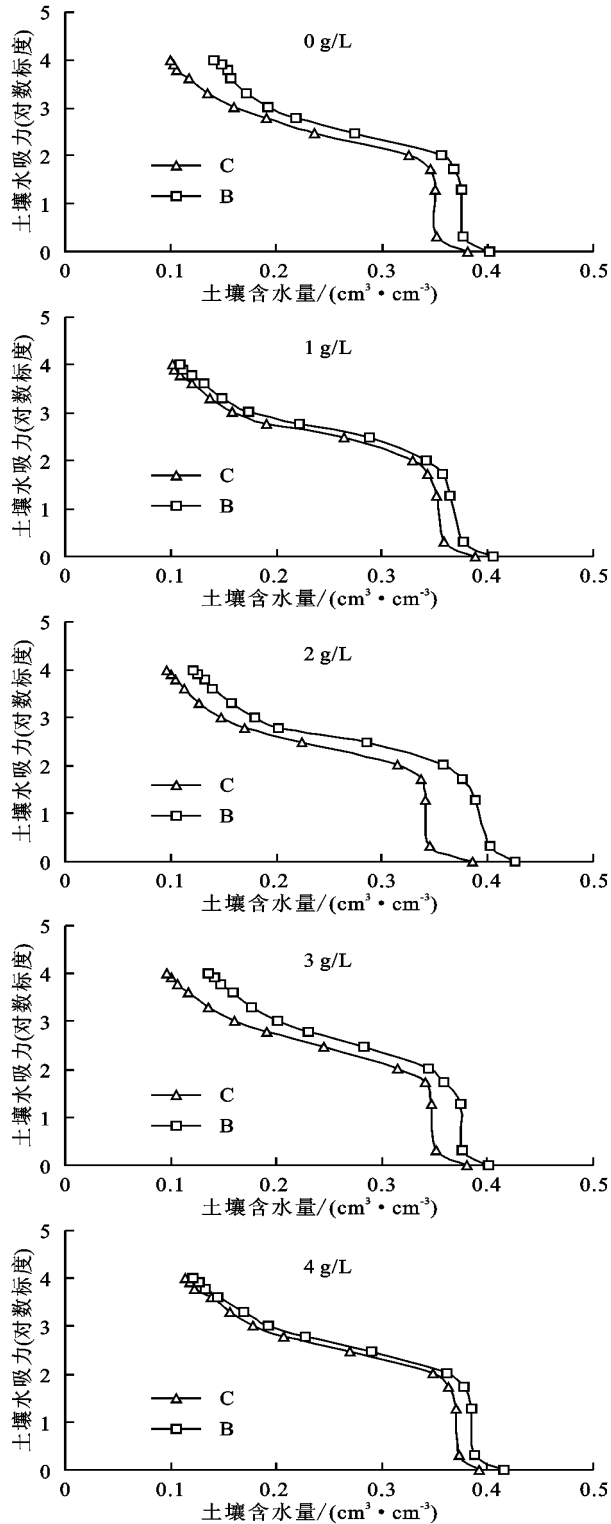


图 3 枯草芽孢杆菌对土壤水分特征曲线的影响

用 van Genuchten 模型对水分特征曲线进行拟合,得到的模型参数见表 2。从表 2 可以看出,含有枯草芽孢杆菌的土壤,在 van Genuchten 公式中的土壤滞留含水率均大于相同浓度对照组的土壤滞留含水率,表明含有枯草芽孢杆菌的土壤,在水势很低的情况下可以保持更多的水分;土壤的饱和含水率均大于相对应的对照组的土壤饱和含水率,这可能是由于枯草芽孢杆菌产生具有良好性能的絮凝剂 γ -聚谷氨酸,在吸收大量水分后,可增加土壤颗粒的持水性能,从而使得土壤的持水能力增强,进而导致土壤的饱和含水率增加;与进气值有关的参数 α 也均大于相对应的参照组,说明土壤的进气吸力减少;而形状系数 n 均小于相对应的参考组。

2.3 枯草芽孢杆菌对土壤水稳性团聚体的影响

通常认为粒径大于 0.25 mm 的团聚体具有抵抗水破坏的能力,在水中浸泡、冲洗不易崩解,并对土壤肥力具有重要影响,因此将粒径大于 0.25 mm 的团聚体称为水稳性团聚体^[24]。现对在不同浓度微咸水入渗后的土壤进行水稳性团聚体的分析见图 4。在浓度为 0 g/L 的溶液下入渗,整个土层中,含有枯草芽孢杆菌的土壤水稳性团聚体所占比例小于参考系列;在微咸水浓度为 1,2,3,4 g/L 的溶液下入渗,整个土层中,含有枯草芽孢杆菌的土壤水稳性团聚体所占比例均大于参考系列,可知,含有枯草芽孢杆菌的土壤在微咸水下入渗后,土壤的团粒结构均相对较好。具有较好团粒结构的土壤,首先可大大改善土壤的透水通气 and 保水能力,其次可协调土壤养分的消耗和积累的矛盾,同时可稳定土壤,改善土壤的温度状况,最后可改良土壤耕性,改善植物扎根的土壤条件。罗欢^[14]研究表明,枯草芽孢杆菌可改善土壤的团粒结构,这也就为枯草芽孢杆菌在土壤水稳性团聚体的现象提供了理论支持。同时,在微咸水浓度为 0,1,2,3,4 g/L 的溶液下入渗,土层深度从下至上,对照组和含有枯草芽孢杆菌土壤的水稳性团聚体所占比例均呈现先增后减的趋势,但含有枯草芽孢杆菌的土壤增长的趋势相对较快,尤其是在 2 g/L 盐溶液入渗的情况下。

表 2 van Genuchten 公式参数拟合

盐浓度/ (g · L ⁻¹)	滞留含水率 θ_r / (cm ³ · cm ⁻³)		饱和含水率 θ_s / (cm ³ · cm ⁻³)		与进气值相关的 系数 α		形状系数 n		决定系数 R^2	
	C		C		C		C		C	
	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B
0	0.099	0.119	0.382	0.402	0.0061	0.0063	1.651	1.645	0.98	0.98
1	0.101	0.108	0.388	0.401	0.0063	0.0064	1.641	1.639	0.97	0.97
2	0.107	0.125	0.386	0.406	0.0062	0.0066	1.646	1.629	0.99	0.99
3	0.106	0.120	0.381	0.404	0.0061	0.0063	1.647	1.642	0.99	0.99
4	0.113	0.116	0.393	0.402	0.0062	0.0063	1.643	1.633	0.98	0.98

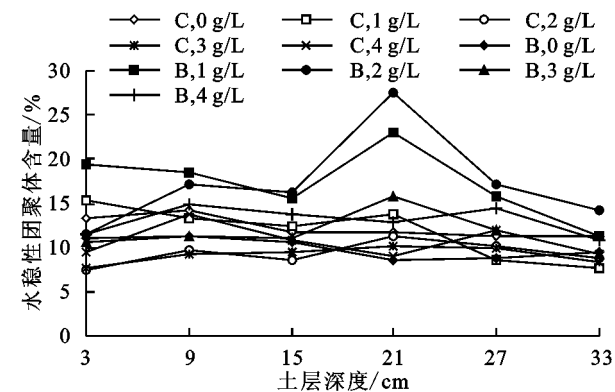


图 4 枯草芽孢杆菌对土壤水稳性团聚体的影响

3 结论

(1) 枯草芽孢杆菌可以显著减少盐碱地土壤的入渗能力,同时可减缓对水分的推移能力。含有枯草芽孢杆菌的土壤与相对对照组相比,累积入渗量和湿润锋的最终迁移距离均显著减少,其中在微咸水浓度为 2 g/L 时,土壤累积入渗量从 14.4 cm 减少到 8.5 cm,减少幅度最大,为 40.97%;分别用 Philip 公式、Kostiakov 公式拟合试验数据,含有枯草芽孢杆菌的土壤,Philip 公式中的吸渗率 S 均小于相对对照组的吸渗率 S ;Kostiakov 公式中的经验系数 K 也均小于相对对照组的经验系数 K ,而经验指数 β 均大于相对对照组的经验指数 β 。

(2) 枯草芽孢杆菌可以增加盐碱地土壤的保水能力。使用 van Genuchten 公式拟合土壤水分特征曲线,得出含有枯草芽孢杆菌的土壤,其滞留含水率 θ_r 、饱和含水率 θ_s 、与进气值相关的系数 α 均大于相对应的参照组,而形状系数 n 均小于相对应的参考组。

(3) 含有枯草芽孢杆菌的土壤在微咸水入渗后,盐碱地土壤的团粒结构有较大的改善。土层深度从下至上,对照组和含有枯草芽孢杆菌土壤的水稳性团聚体所占比例均呈现先增后减的趋势,但含有枯草芽孢杆菌的土壤增长的趋势相对较快,尤其是在 2 g/L 盐溶液入渗的情况下。

从以上的研究结果可以看出,枯草芽孢杆菌对盐碱地土壤的入渗特性和保水性能影响较大,具有明显的减少土壤水分入渗和增强土壤保水能力的效果,同时还可改善盐碱地土壤的团粒结构。因此可以将枯

草芽孢杆菌应用于盐碱地土壤改良方面。本次试验仅考虑了枯草芽孢杆菌对盐碱地土壤水分运动及土壤团粒结构的影响,没有对土壤养分迁移作出相应的研究,后续的研究工作可从这方面展开;另外,可根据枯草芽孢杆菌对土壤的团粒结构的改善,进一步研究微生物在土壤抗侵蚀方面的影响。

参考文献:

[1] 范富,张庆国,侯迷红,等. 玉米秸秆隔离层对西辽河流域盐碱土碱化特征及养分状况的影响[J]. 水土保持学报,2013,27(3):131-137.

[2] 伍黎芝,底艳. 干旱区盐碱化土地整理工程实证研究:以陕西省蒲城县卤泊滩土地整理项目为例[J]. 农业工程学报,2005,31(增刊 1):179-182.

[3] 毛国新,刘继兵. 农十师土壤次生盐渍化成因及改良措施[J]. 新疆农垦科技,1999(2):37-38.

[4] 王睿彤,陆兆华,孙景宽,等. 土壤改良剂对黄河三角洲滨海盐碱土的改良效应[J]. 水土保持学报,2012,26(4):239-244.

[5] 王利民,陈金林,梁珍海,等. 盐碱土改良利用技术研究进展[J]. 浙江林学院学报,2010,27(1):143-148.

[6] 张建锋,张旭东,周金星,等. 世界盐碱地资源及其改良利用的基本措施[J]. 水土保持研究,2005,12(6):28-30.

[7] 徐秉信,李如意,武东波,等. 微咸水的利用现状和研究进展[J]. 安徽农业科学,2013(36):13914-13916.

[8] 黄修桥,高峰,王宪杰. 节水灌溉与 21 世纪水资源的持续利用[J]. 灌溉排水学报,2001,20(3):1-5.

[9] 崔海军. 咪唑烟酸用于毛竹林清除杂草的环境效应评价[D]. 北京:中国林业科学研究院,2012.

[10] Ongena M, Jacques P. Bacillus lipopeptides: Versatile weapons for plant disease biocontrol[J]. Trends in Microbiology,2008,16(3):115-125.

[11] 陈华,郑之明,余增亮. 枯草芽孢杆菌 JA 脂肽类及挥发性物质抑菌效应的研究[J]. 微生物学通报,2008,35(1):1-4.

[12] 陈尚智,胡勇有. 枯草芽孢杆菌对微污染水体的净化作用[J]. 环境科学学报,2011,31(8):1594-1601.

[13] 王晓阁. 枯草芽孢杆菌研究进展与展望[J]. 中山大学研究生学刊(自然科学与医学版),2012(3):14-23.