

# 枯草芽孢杆菌对盐碱土面蒸发及水盐分布的影响

侯亚玲<sup>1</sup>, 周蓓蓓<sup>1</sup>, 王全九<sup>1,2</sup>

(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重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** 基于室内模拟土面蒸发试验和土壤持水性能试验, 设置 5 种不同含量枯草芽孢杆菌(0, 1, 3, 5, 7 g/kg)处理, 研究不同含量枯草芽孢杆菌对盐碱土面蒸发及水盐分布的影响。结果表明: (1) 施加枯草芽孢杆菌后, 土壤累积蒸发量、蒸发速率均显著降低, 在蒸发开始后 2 天, 枯草芽孢杆菌的保水性能显现, 枯草芽孢杆菌含量为 0, 1, 3, 5, 7 g/kg 的累积蒸发量和蒸发速率均小于 0 g/kg, 在 3 g/kg 时累积蒸发量和蒸发速率最小, 蒸发后 41 天, 处理为 1, 3, 5, 7 g/kg 累积蒸发量较 0 g/kg 分别减少了 16.63%, 21.39%, 11.26%, 5.96%, 且不同处理间差异极显著 ( $P < 0.05$ )。 (2) 枯草芽孢杆菌同样影响 Black 和 Rose 蒸发模型, 对于 Black 蒸发模型, 随着枯草芽孢杆菌含量的增大, 蒸发参数  $B$  呈现先减后增的趋势, 与 0 g/kg 相比较为显著 ( $P < 0.05$ ); 对于 Rose 蒸发模型, 随着枯草芽孢杆菌含量的增大, 稳定蒸发参数  $C$  和水分扩散参数  $D$  均呈现先减少后增大的趋势, 其中在含量为 3 g/kg 时取得最小值, 并且各处理差异性较为显著。 (3) 枯草芽孢杆菌能增加土壤的保水性能, 在 6 cm 深度处, 施加量为 1, 3, 5, 7 g/kg 相比 0 g/kg 的剖面含水量分别增加了 28.24%, 37.40%, 20.00%, 6.87%。 (4) 枯草芽孢杆菌的添加使土壤的含盐量显著减少, 枯草芽孢杆菌施加量为 1, 3, 5, 7 g/kg 相比 0 g/kg 的处理分别降低了 32.26%, 46.89%, 26.34%, 14.65%。 (5) 当枯草芽孢杆菌含量为 3 g/kg 时, van Genuchten 公式中土壤的滞留含水率  $\theta_r$ 、饱和含水率  $\theta_s$  和与进气值有关的参数  $\alpha$  最大, 形状系数  $n$  最小, 且各处理差异显著。 综上, 在盐碱土中施加 3 g/kg 的枯草芽孢杆菌, 可使盐碱土壤抑盐, 提高土壤的持水性能。

**关键词:** 枯草芽孢杆菌; 盐碱土; 蒸发; 水盐分布; 水分特征曲线

中图分类号: S152.7<sup>+</sup>3; S156.4 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2018)02-0306-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.02.045

## Effects of *Bacillus subtilis* on Evaporation of Soil Surface and Water and Salt Distribution in Saline-alkali Soil

HOU Yaling<sup>1</sup>, ZHOU Beibe<sup>1</sup>, WANG Quanjiu<sup>1,2</sup>

(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 Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100)

**Abstract:** In this paper, five different contents of *Bacillus subtilis* (0, 1, 3, 5, 7 g/kg) were setted, aimed to study the effect of *B. subtilis* on evaporation of soil surface and water and salt distribution in saline-alkali soil. The results showed that: (1) With the application of *B. subtilis*, the cumulative evaporation and evaporation rate in saline-alkali soil decreased obviously, comparing to that in control soil columns, especially after the initial 2 days. The cumulative evaporation and evaporation rate of soil with different *B. subtilis* content (0, 1, 3, 5, 7 g/kg) was smaller than that without *B. subtilis* application, and reached smallest when *B. subtilis* content was 3 g/kg. In the 41st day after evaporation, the cumulative evaporation of treatments with 1, 3, 5 and 7 g/kg *B. subtilis* were decreased by 16.63%, 21.39%, 11.26% and 5.96% compared with that in 0 g/kg, and the variations between the treatments were significant ( $P < 0.05$ ). (2) Both Black and Rose model could fit soil evaporation process well with different *B. subtilis* contents. For the Black evaporation model, with the increase of *B. subtilis* contents, evaporation parameter  $B$  firstly decreased and

收稿日期: 2017-11-06

资助项目: 国家自然科学基金重点项目(51239009, 41371239); 陕西省科技支撑项目(2013KJXX-38); 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

then increased compared with the control treatment ( $P < 0.05$ ). For the Rose evaporation model, with the increase of *B. subtilis* contents, stable evaporation parameters  $C$  and moisture diffusion parameter  $D$  firstly decreased and then increased, which were obviously less than the treatment received 0 g/kg *B. subtilis* ( $P < 0.05$ ). When the *B. subtilis* was 3 g/kg, the minimum values of  $C$  and  $D$  were obtained, which further confirmed that *B. subtilis* could increase soil water holding capacity. When the *B. subtilis* content were 1, 3, 5 and 7 g/kg, the water contents were greater than that in the control. (3) At the depth of 6 cm, the water content in the treatments with *B. subtilis* of 1, 3, 5 and 7 g/kg increased by 28.24%, 37.40%, 20.00%, 6.87% respectively, compared with that in the control. (4) Soil salt contents were also significantly decreased with the application of *B. subtilis*. The salt content in the treatments with *B. subtilis* of 1, 3, 5 and 7 g/kg decreased by 32.26%, 46.89%, 26.34%, 14.65% respectively, compared to that in the control. (5) After applying *B. subtilis*, the soil residual water content  $\theta_r$ , saturated water content  $\theta_s$  and coefficient associated with intake value  $\alpha$  were all increased and shape coefficient  $n$  was decreased in van Genuchten equation. In summary, application of 3 g/kg *B. subtilis* could inhibit salt and improve soil water holding capacity in saline-alkali.

**Keywords:** *Bacillus subtilis*; saline-alkali soil; evaporation; water and salt distribution; soil water characteristic curve

土壤盐碱化是一个世界性难题,全世界盐碱土面积约 10 亿  $\text{hm}^2$ ,且每年以  $(1.0 \sim 1.5) \times 10^6 \text{ hm}^2$  的速度增长<sup>[1]</sup>;我国有近 1/5 耕地发生盐碱化,其中,原生盐化型、次生盐化型和各种盐化型分布分别占总面积的 52%, 40%和 8%<sup>[2]</sup>。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  $\text{hm}^2$ ,约占全国盐碱土面积的 1/3 和新疆土地面积的 6.6%<sup>[3]</sup>。同时,我国是一个干旱缺水严重的国家,水资源极度短缺,农业用水占总供水量的 60%以上。在新疆地区,土壤蒸发强烈,灌溉后水分难以保蓄,50%左右的农田水分通过蒸发损失<sup>[4]</sup>,这促使深层土壤水分向上运移,盐分也将随水分向表层土壤迁移,水走盐留,最终导致大量盐分聚集在表层土壤<sup>[5]</sup>,引起土壤盐渍化和地下水污染物表聚等环境问题<sup>[6]</sup>。在农业生产中,只要能增加土壤持水性,理论上就可减轻盐分表聚,降低土壤盐害<sup>[4]</sup>。因此,保持土壤水分,控制水分蒸发,是抑制盐分向土表运移和改良农田水盐障碍的重要议题。

土壤盐碱化问题在我国新疆地区尤为严重。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灌溉方法、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<sup>[7]</sup>,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<sup>[8]</sup>,但施用石膏等化学改良剂增加可溶性钙 ( $\text{Ca}^{2+}$ ),通过离子代换作用将土壤中的钠离子 ( $\text{Na}^+$ ) 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<sup>[9]</sup>,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<sup>[10]</sup>,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,降低农户收入,亦难以推广实施。目前,微生物改良盐碱地通过生物途径使植物充分适宜盐渍环境,从而提高植物在盐渍土壤上的生产力,因其绿色环保、成本低等显著优势,成为近年来国内外盐碱土改良的新方向<sup>[11]</sup>。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*) 是芽孢杆菌属的一类分布广泛的细菌,可以产生内生芽孢,具有耐热抗逆性强,对人畜无毒无害,不污染环境,环境兼容性好等优点<sup>[12]</sup>。枯草芽孢杆菌作为植物根际有益微生物,可通过分泌激素类物质、多种酶和抗菌类物质促进植物根系及植株生长,增强植物的抗病、抗干旱、抗盐碱等逆境的能力,从而改善植株生长发育<sup>[13]</sup>。于占东等<sup>[14]</sup>研究表明施生物菌剂降低大棚连作土壤全盐含量,明显改善微生物区系,减轻黄瓜枯萎病;李志洪等<sup>[15]</sup>认为施用微生物菌剂能降低石灰性土壤作物根际 pH,有效提高根际磷酸酶活性,促进土壤中难溶性磷活化,改善玉米磷素营养条件,促进玉米植株生长,增强根系对养分的吸收;尹汉文<sup>[16]</sup>报道,枯草芽孢杆菌可显著提高茄子和辣椒的耐盐性;康平<sup>[17]</sup>研究发现枯草芽孢杆菌可以产生各类有机酸和

无机酸,降低土壤环境中 pH。因此,本文采用室内模拟方法,通过测定添加不同含量枯草芽孢杆菌对土壤水分特征曲线及其水分蒸发的影响过程,研究不同含量枯草芽孢杆菌对盐碱土的持水特征和蒸发特性的影响规律,进而明确枯草芽孢杆菌对土壤水盐的运移影响,以期为微生物改良盐碱地提供理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验材料

试验于 2017 年 6 月展开,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,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。土壤容重采用环刀法测定,为 1.47 g/cm<sup>3</sup>;土壤粒径组成采用 Mastersizer 2000 激光粒度分析仪进行测定,其黏粒、粉粒、砂粒的体积分数分别为 7.13%, 60.41%, 32.46%, 依据国际制土壤质地分类标准,得知该土壤质地为粉壤土。利用 DDS-307 型电导仪器测得研究区域土壤的含盐量为 0.18%, pH 8.3, 该区域土为盐碱土。土壤初始体积含水率和土壤饱和体积含水率分别为 0.039, 0.471 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>。

试验所用的 10 亿活芽孢/克枯草芽孢杆菌可湿性粉剂由保定市科绿丰生化科技有限公司生产。

### 1.2 试验设计与方法

1.2.1 枯草芽孢杆菌对土面蒸发影响的试验设计 土壤蒸发试验装置由红外线灯、有机玻璃土柱和电子称等组成,其中,红外线灯功率为 275 W,悬挂于有机玻璃土柱上方 25 cm 处,昼夜照射,有机玻璃土柱高 12 cm,内径 10 cm,底部设有多数内径为 2 mm 的排气孔,以便土壤水气进出,装土高度为 10 cm,电子称量程 2 200 g,精度 0.01 g。将 10 亿活芽孢/克枯草芽孢杆菌可湿性粉剂与过筛后的土样混合均匀,混合比例分别为 0, 1, 3, 5, 7 g/kg,并按容重为 1.47 g/cm<sup>3</sup>将混合后的土样装入土柱试管内,每 2 cm 分层装入(共 5 层),层间刮毛,将装好的土柱悬空置于水位高度为 3 cm 的水桶中,水分借助土壤毛管力上升使土壤达到饱和状态,48 h 后取出,静止悬空使重力水行走,之后每天早上 9:00 采用称量法测定土柱蒸发质量,每个处理重复 3 次。待土壤蒸发速率稳定后,分层取样,取样深度为 0, 2, 4, 6, 8 cm,采用烘干法(105±2)℃测定质量含水率;同时将分层取得的土样阴干、研磨、过 1 mm 筛后按土水质量比 1:5 浸提,利用 DDS-307 型电导仪测定溶液的电导率,转化得到土壤含盐量<sup>[18]</sup>,每个处理重复 3 次。

1.2.2 枯草芽孢杆菌对土壤持水性影响的试验设计 采用张力计测定土壤水分特征曲线。将 10 亿活芽孢/克枯草芽孢杆菌可湿性粉剂与土样按 0, 1, 3,

5, 7 g/kg 混合均匀,分层装入高 12 cm,内径 10 cm 的有机玻璃土柱内,土柱底部设有多数内径为 2 mm 的排气孔,以便土壤水气进出,装土高度为 10 cm,在土体表面覆盖塑料保鲜膜密封,使其饱和,同时使用蒸馏水对张力计的陶土头进行充分饱和。待土壤和张力计均充分饱和后,将张力计陶土头一端插入土体 5 cm 处,打开张力计后盖,用注射器给张力计内注入无气水,使张力计杆充满水没有气泡为止,加橡皮塞拧紧。待 24 h 后张力计读数达到稳定后,进行读数与记录<sup>[19]</sup>,每个处理重复 3 次。

### 1.3 蒸发和水分特征曲线模型

#### 1.3.1 蒸发模型

(1)Black 蒸发模型。Black 蒸发模型<sup>[20]</sup>广泛应用于无地下水补给时土壤累积蒸发量随时间的变化情况,其表达式为:

$$E = F + Bt_0^{\frac{1}{n}} \quad (1)$$

式中: $E$  为累积蒸发量(g); $t_0$  为蒸发历时(h); $F$ 、 $B$  为蒸发参数。

(2)Rose 蒸发模型。Rose 蒸发模型<sup>[21]</sup>形式简单,适用于蒸发下边界没有水分持续补给,其表达式为:

$$E = Ct_0 + Dt_0^{\frac{1}{n}} \quad (2)$$

式中: $C$  为稳定蒸发参数; $D$  为水分扩散参数。

1.3.2 水分特征曲线模型 为了准确表征各种土壤水分特征曲线的特征,定量地研究土壤的持水能力,在众多模拟水分特征曲线的数学模型中,其中 van Genuchten 模型因不仅能够适应多种土壤条件,而且能够获得更高层次的模拟效果而被普遍应用。具体形式为<sup>[22]</sup>:

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

式中: $\theta$  为土壤含水率(cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>); $\theta_r$  为滞留土壤含水率(cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>); $\theta_s$  为饱和土壤含水率(cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>); $h$  为土壤吸力(cm); $\alpha$  是与进气值相关的系数; $n$  和  $m$  是形状系数,且  $m = 1 - 1/n$ 。

### 1.4 数据处理与分析

文中试验数据均取 3 次重复的平均值,用 Excel 2010 进行数据处理,SPSS 19.0 进行方差分析和模型参数拟合。

## 2 结果与分析

### 2.1 枯草芽孢杆菌对土面蒸发的影响

依据实测结果,将不同含量(0, 1, 3, 5, 7 g/kg)枯草芽孢杆菌影响下,土面水分蒸发和蒸发速率随时间的变化过程绘于图 1。由图 1 可以看出,在施加枯草芽孢杆菌后,土面的蒸发量均显著减少,枯草芽孢杆菌含量为 3 g/kg 尤为显著。当蒸发开始后 2 天,不同处理的累积蒸发量呈现显著差异( $P = 0.036$ ),枯

草芽孢杆菌含量为 0 g/kg 的累积蒸发量比 3 g/kg 大 52.39%; 且随时间的推进, 不同处理之间的差异越来越显著, 在蒸发开始后 41 天, 处理 1, 3, 5, 7 g/kg 累积蒸发量较 0 g/kg 分别减少了 16.63%, 21.39%, 11.26%, 5.96%。这可能由于枯草芽孢杆菌可以在土壤中产生各类有机酸和无机酸<sup>[17]</sup>, 而这种低分子量有机酸通过羟基、羧基与土壤发生作用, 螯合作用使矿物表面的金属离子溶出, 导致矿物质形成的微孔以及矿物质与有机质之间的微孔受到破坏, 部分有机质由于失去矿物质的支撑而溶出, 导致其微孔减少, 改善土壤结构, 促进土壤形成良好的团粒结构<sup>[23]</sup>, 进而大大改善粉壤土壤的保水能力; 然而枯草芽孢杆菌

产生的低分子有机酸, 不仅通过静电作用被土壤颗粒所吸附, 还能与土壤中的铁、铅等多种金属离子形成络合物而被土壤吸附, 而这种吸附会增加可变电荷土壤表面的负电荷, 并减少表面的正电荷量<sup>[24]</sup>, 导致土壤孔隙增大, 当枯草芽孢杆菌含量大于 3 g/kg 时, 第 2 种中作用效果得以体现, 使得枯草芽孢杆菌含量为 3 g/kg 时, 土壤的累积蒸发量最小。而蒸发速率(累积蒸发量与累积蒸发时间之比)则随着时间的推移逐渐降低, 在蒸发 2 天后, 枯草芽孢杆菌含量为 3 g/kg 的蒸发速率比 0 g/kg 低 51.47%, 在蒸发 30 天后蒸发速率基本趋于稳定, 但是仍然表现为枯草芽孢杆菌含量为 0 g/kg 的蒸发速率较大。

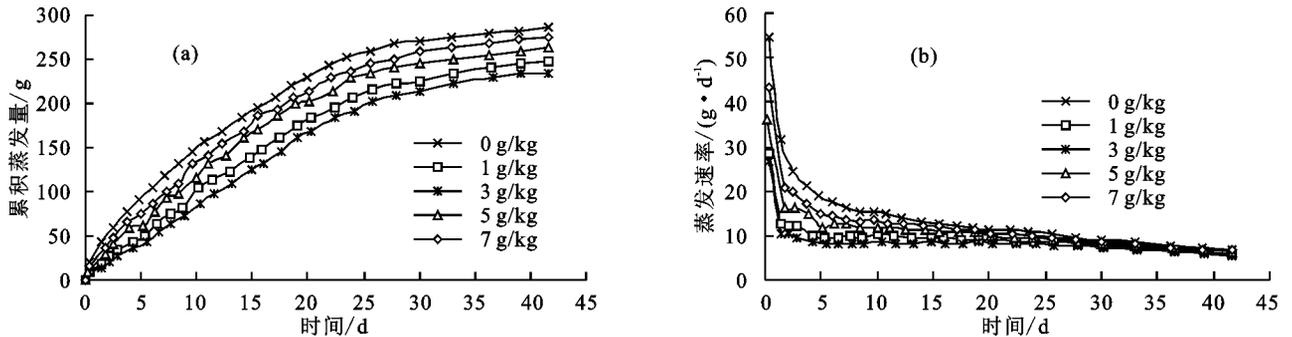


图 1 不同枯草芽孢杆菌含量对累积蒸发量及蒸发速率的影响

## 2.2 枯草芽孢杆菌对土面蒸发公式参数的影响

为进一步分析枯草芽孢杆菌对蒸发过程的影响, 利用 Black 和 Rose 蒸发模型对实测的蒸发数据进行拟合, 结果见表 1。

对于 Black 蒸发模型, 随着枯草芽孢杆菌含量的增大, 蒸发参数  $B$  呈先减后增的趋势, 土壤的均方根误差随枯草芽孢杆菌含量的增大而增大, 几何平均数

和决定系数  $R^2$  均随枯草芽孢杆菌含量的增大而减少, 说明 Black 蒸发模型的拟合效果随着枯草芽孢杆菌含量的增大精度呈明显降低的趋势; 对于 Rose 蒸发模型, 随着枯草芽孢杆菌含量的增大, 稳定蒸发参数  $C$  和水分扩散参数  $D$  均呈现先减少后增大的趋势, 其中在含量为 3 g/kg 时取得最小值, 并且各处理的差异性为极显著。

表 1 施加不同含量枯草芽孢杆菌条件下 Black 和 Rose 蒸发模型拟合效果分析

处理	Black 蒸发模型					Rose 蒸发模型				
	蒸发参数 $F$	蒸发参数 $B$	均方根误差	几何平均数	$R^2$	稳定蒸发参数 $C$	水分扩散参数 $D$	均方根误差	几何平均数	$R^2$
B0	0 <sup>a</sup>	10.252 <sup>a</sup>	0.008	0.997	0.982	0.260 <sup>a</sup>	6.369 <sup>a</sup>	0.010	0.992	0.991
B1	0 <sup>a</sup>	9.442 <sup>d</sup>	0.013	0.991	0.979	0.198 <sup>d</sup>	2.512 <sup>d</sup>	0.014	0.985	0.981
B3	0 <sup>a</sup>	9.033 <sup>e</sup>	0.019	0.989	0.974	0.173 <sup>e</sup>	2.230 <sup>e</sup>	0.021	0.963	0.957
B5	0 <sup>a</sup>	9.860 <sup>c</sup>	0.023	0.983	0.971	0.208 <sup>c</sup>	3.045 <sup>c</sup>	0.027	0.972	0.967
B7	0 <sup>a</sup>	10.133 <sup>b</sup>	0.027	0.976	0.964	0.222 <sup>b</sup>	4.688 <sup>b</sup>	0.034	0.985	0.983

注: B0、B1、B3、B5 和 B7 分别表示施加枯草芽孢杆菌含量为 0、1、3、5、7 g/kg, 同一列字母不同表示参数差异显著 ( $P < 0.05$ )。下同。

## 2.3 枯草芽孢杆菌对土壤含水率分布的影响

从图 2 可以看出, 枯草芽孢杆菌施加量为 1, 3, 5, 7 g/kg 的剖面含水量均大于 0 g/kg, 在 3 g/kg 时剖面含水量较大, 且差异极显著。在 6 cm 深度处, 施加量为 1, 3, 5, 7 g/kg 相比 0 g/kg 的剖面含水量分别增加了 28.24%, 37.40%, 20.00%, 6.87%, 这是由于枯草芽孢杆菌在土壤中产生的酸使得矿物表面的金属离子溶出, 部分有机质由于失去矿物质的支撑而溶出, 导致其微孔减少, 改善土壤结构, 增强土壤的保水性能, 然而随着施加

量的增大, 土壤颗粒表面负电荷增大, 孔隙增大, 土壤水分便于流失。当土层深度  $> 6$  cm 时, 土壤含水率均出现降低趋势, 是因为有机玻璃土柱底部设有通气孔, 部分水分从底孔散失。因此, 在施加量为 3 g/kg 时, 土壤的持水能力较强, 可使作物根系储存较多的水分, 有利于作物根系对水分的吸收。

## 2.4 枯草芽孢杆菌对土壤含盐量分布的影响

为研究枯草芽孢杆菌对土壤含盐量的影响, 蒸发后, 不同处理相同深度处各取适量土壤测定含盐量, 结

果见图 3。由图 3 可知,土柱表层含盐量最高,且含盐量随深度增加先减少后增加,不同处理各土层盐分含量均以 4—6 cm 最低,土壤盐分随着土壤水分运移迁移,并在土壤表面和底部累积。在整个土层中,枯草芽孢杆菌施加量为 1,3,5,7 g/kg 均小于 0 g/kg 的土壤含盐量,且比 0 g/kg 的处理分别降低了 32.26%,46.89%,26.34%,14.65%,说明枯草芽孢杆菌可降低盐碱地土壤的盐分,这可能是由于枯草芽孢杆菌在土壤中分泌的有机物、死亡菌体分解产生的酸可使得矿物表面的金属离子溶出,部分有机质由于失去矿物质的支撑而溶出,使得盐碱土壤的有机成分增加,盐碱度降低。Doran 等<sup>[24]</sup>的研究结果显示, $\gamma$ -PGA 对酸、碱具有较好的缓冲能力,可有效平衡土壤的酸碱值,避免因长期使用化学肥料造成的土壤酸化和板结。

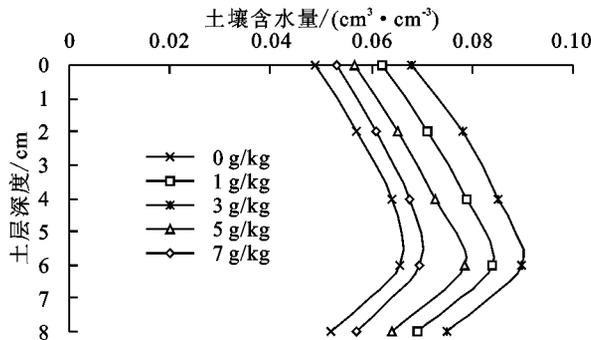


图 2 不同处理土壤含水量与深度的关系

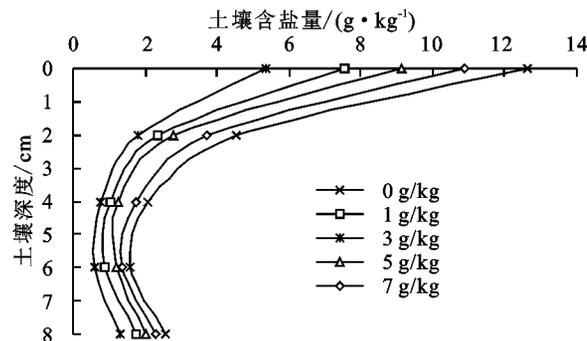


图 3 不同处理土壤含盐量与土层深度的关系

## 2.5 枯草芽孢杆菌对土壤水分特征曲线的影响

土壤水吸力和土壤含水率之间的关系曲线就是

土壤水分特征曲线,它反映了土壤水的能量和数量之间的关系,是研究土壤持水能力和水分运动的基本特性曲线<sup>[25]</sup>。对不同枯草芽孢杆菌含量处理的土壤水分特征曲线的测定结果见图 4。当土壤含水率相同时,枯草芽孢杆菌含量为 3 g/kg 的土壤水吸力值最高,其次为 1,5,7,0 g/kg,即在土壤中加入枯草芽孢杆菌后,土壤基质势降低,土壤对水分的保持能力增大,使土壤中的水分不易因蒸发入渗等原因而损失,由于枯草芽孢杆菌在土壤中产生的酸使得矿物表面的金属离子溶出,部分有机质由于失去矿物质的支撑而溶出,导致其微孔减少,改善土壤结构,增强土壤的保水性能。

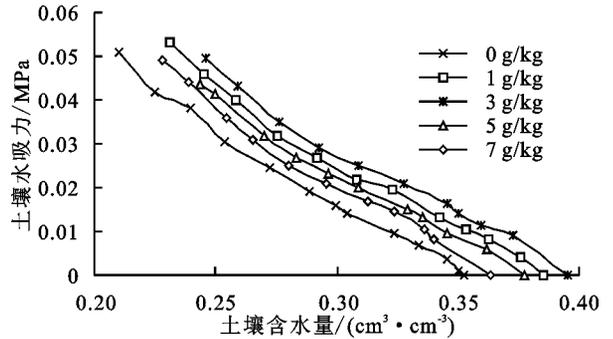


图 4 不同处理对土壤水分特征曲线的影响

为定量研究枯草芽孢杆菌对土壤水分特征曲线的影响,需要进一步用 van Genuchten 模型对土壤水分特征曲线进行拟合,得到模型参数与枯草芽孢杆菌含量的关系见表 2。由表 2 可以看出,用 van Genuchten 模型拟合试验结果取得了较好的效果。当枯草芽孢杆菌含量为 3 g/kg 时,土壤的滞留含水率  $\theta_r$  最大,其依次为 1,5,7,0 g/kg,表明将枯草芽孢杆菌添加到土壤后,土壤在水势很低情况下可以保持有更多的水分;在 3 g/kg 时,土壤的饱和含水率  $\theta_s$  最大,土壤颗粒的持水性能增加;与进气值有关的参数  $\alpha$  在含量为 3 g/kg 时最大,0 g/kg 最小,说明添加菌后土壤的进气吸力减小,且各处理差异显著;形状系数  $n$  在含量为 3 g/kg 时最小,0 g/kg 最大。

表 2 施加不同含量枯草芽孢杆菌条件下 van Genuchten 公式参数拟合

处理	滞留含水率 $\theta_r$ / ( $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ )	饱和含水率 $\theta_s$ / ( $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ )	与进气值 相关的系数 $\alpha$	形状 系数 $n$	均方根误差 RMSE	几何 平均数	$R^2$
B0	0.1189 <sup>d</sup>	0.3519 <sup>e</sup>	0.0032 <sup>d</sup>	1.6901 <sup>a</sup>	0.007	0.992	0.981
B1	0.1212 <sup>b</sup>	0.3843 <sup>b</sup>	0.0043 <sup>a</sup>	1.5127 <sup>d</sup>	0.012	0.991	0.982
B3	0.1236 <sup>a</sup>	0.3989 <sup>a</sup>	0.0044 <sup>a</sup>	1.4218 <sup>e</sup>	0.021	0.987	0.985
B5	0.1195 <sup>c</sup>	0.3775 <sup>c</sup>	0.0040 <sup>b</sup>	1.5936 <sup>c</sup>	0.032	0.985	0.990
B7	0.1190 <sup>d</sup>	0.3617 <sup>d</sup>	0.0037 <sup>c</sup>	1.6538 <sup>b</sup>	0.041	0.979	0.987

## 3 结论

本文基于室内模拟蒸发试验和土壤持水性试验,

测定分析不同含量枯草芽孢杆菌对土壤累积蒸发量、蒸发速率、蒸发参数、剖面含水量、剖面含盐量和水分特征曲线的影响。主要结论为:

(1) 枯草芽孢杆菌的添加使土壤水分累积蒸发量减少。在蒸发开始后2天, 枯草芽孢杆菌的保水性能显现, 枯草芽孢杆菌含量为1, 3, 5, 7 g/kg的累积蒸发量和蒸发速率均小于0 g/kg, 在3 g/kg时累积蒸发量和蒸发速率最小, 蒸发后41天, 处理为1, 3, 5, 7 g/kg累积蒸发量较0 g/kg分别减少了16.63%, 21.39%, 11.26%, 5.96%, 且不同处理差异极显著( $P < 0.05$ )。

(2) Black和Rose蒸发模型均能较好的模拟不同枯草芽孢杆菌含量条件下土壤蒸发规律。对于Black蒸发模型, 随着枯草芽孢杆菌含量的增大, 蒸发参数 $B$ 呈现先减少后增大的趋势, 与0 g/kg相比较为显著( $P < 0.05$ ); 对于Rose蒸发模型, 随着枯草芽孢杆菌含量的增大, 稳定蒸发参数 $C$ 和水分扩散参数 $D$ 均呈现先减少后增大的趋势, 其中在含量为3 g/kg时取得最小值, 并且各处理差异性极为显著。

(3) 枯草芽孢杆菌能增加土壤的保水性能。在6 cm深度处, 施加量为1, 3, 5, 7 g/kg相比0 g/kg的剖面含水量分别增加了28.24%, 37.40%, 20.00%, 6.87%, 在3 g/kg时剖面含水量较大, 且差异极为显著。

(4) 枯草芽孢杆菌的添加使土壤的含盐量显著减少。枯草芽孢杆菌施加量为1, 3, 5, 7 g/kg相比0 g/kg的处理分别降低了32.26%, 46.89%, 26.34%, 14.65%。

(5) 枯草芽孢杆菌可增加土壤的保水能力。使用van Genuchten模型拟合土壤水分特征曲线, 当枯草芽孢杆菌含量为3 g/kg时, 土壤的滞留含水率 $\theta_r$ 、饱和含水率 $\theta_s$ 和与进气值有关的参数 $\alpha$ 最大, 形状系数 $n$ 最小, 且各处理差异显著。

#### 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] 周和平, 张立新, 禹锋, 等. 我国盐碱地改良技术综述及展望[J]. 现代农业科技, 2007(11): 159-161.
- [3] 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, 21(13): 179-182.
- [4] 周凌云, 周刘宗. 农田秸秆覆盖节水效应研究[J]. 中国生态农业学报, 1996, 7(3): 49-52.
- [5] 赵永敢, 王婧, 李玉义, 等. 秸秆隔层与地覆膜盖有效抑制潜水蒸发和土壤返盐[J]. 农业工程学报, 2013, 29(23): 109-117.
- [6] 牛文全, 邹小阳, 刘晶晶, 等. 残膜对土壤水分入渗和蒸发的影响及不确定性分析[J]. 农业工程学报, 2016, 32(14): 110-119.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 贺学礼, 赵丽莉, 李英鹏. NaCl胁迫下AM真菌对棉花生长和叶片保护酶系统的影响[J]. 生态学报, 2005, 25(1): 188-193.
- [12] 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.
- [13] 牛舒琪, 何傲蕾, 丁新宇, 等. 枯草芽孢杆菌GB03与保水剂互作对小花碱茅生长和耐盐性的影响[J]. 植物生理学报, 2016, 52(3): 285-292.
- [14] 于占东, 宋述尧. 稻草配施生物菌剂对大棚连作土壤的改良作用[J]. 农业工程学报, 2003, 19(1): 177-179.
- [15] 李志洪, 李翠兰, 王淑华, 等. 有机、无机复合肥及调节剂对玉米根系生长和根际效应的影响[J]. 吉林农业大学学报, 2004, 26(2): 165-169.
- [16] 尹汉文. 枯草芽孢杆菌提高黄瓜耐盐性的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2006.
- [17] 康平. 芽孢杆菌在微生物肥料中的研究与应用进展[J]. 山东林业科技, 2014(3): 129-132.
- [18] 王水献, 董新光, 吴彬, 等. 干旱盐渍土区土壤水盐运动数值模拟及调控模式[J]. 农业工程学报, 2012, 28(13): 142-148.
- [19] 邓宏凯, 周林康, 晋华. 5种砂土水分特征曲线的测试分析[J]. 节水灌溉, 2017(5): 16-19.
- [20] 刘旭. 科尔沁沙地坨甸相间地区土壤蒸发的野外试验与动态模拟[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2010.
- [21] Rose E J. Agricultural Physics[M]. Oxford: Pergamon, 1996.
- [22] 高会议, 郭胜利, 刘文兆, 等. 不同施肥土壤水分特征曲线空间变异[J]. 农业机械学报, 2014, 45(6): 161-165.
- [23] 宋秀丽. 低分子量有机酸对土壤微孔的作用机理[D]. 山东青岛: 中国海洋大学, 2011.
- [24] Doran J W, Zeiss M R. Soil health and sustainability: Managing the biotic component of soil quality[J]. Applied Soil Ecology, 2000, 15(1): 3-11.
- [25] 吴军虎, 陶汪海, 王海洋, 等. 羧甲基纤维素钠对土壤团粒结构及水分运动特性的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(2): 117-123.