

生化黄腐酸对盐碱土水盐运移特征的影响

孙燕 王建 王全九 曲植 王春宏 张曦元  
(西安理工大学省部共建西北旱区生态水利工程国家重点实验室, 西安 710048)

**摘要:** 为改善盐碱胁迫农田土壤水盐环境、缓解西北干旱地区土地次生盐渍化,通过一维垂直入渗试验,对不同生化黄腐酸施加量(0、1、2、4、8 g/kg)条件下新疆地区中度盐碱土的水盐运移特征及入渗模型参数进行了研究。结果表明:在入渗结束后,与未施加生化黄腐酸相比,施加量为1、2、4、8 g/kg条件下的土壤累积入渗量分别增加了1.00%、4.67%、7.14%、3.44%,土壤水分入渗速率随着生化黄腐酸施加量的增加呈现先减小后增大的变化趋势,土壤剖面平均体积含水率分别增加了8.90%、17.70%、20.41%、11.67%;在0~20 cm土层,土壤平均脱盐率分别为5.29%、27.04%、42.77%、14.74%。Philip、Green-Ampt模型和代数模型均能较好地模拟不同生化黄腐酸施加量下土壤水分入渗特征,且模型参数与生化黄腐酸施加量间存在函数关系。与未施加生化黄腐酸相比,施加生化黄腐酸后土壤吸渗率 $S$ 和土壤饱和导水率 $K_s$ 均减小,且随着施加量的增加均呈现先减小后增大的变化趋势,施加量4 g/kg时 $S$ 、 $K_s$ 最小;湿润锋处吸力 $S_f$ 和综合形状系数 $\alpha$ 呈现先增大后减小的变化趋势,施加量4 g/kg时 $S_f$ 、 $\alpha$ 最大。施加生化黄腐酸能够显著影响土壤水分入渗和水盐运移特征,且施加量4 g/kg对于中度盐碱土具有较好的保水和脱盐效果。

**关键词:** 盐碱土; 生化黄腐酸; 水盐运移; 入渗模型

中图分类号: S156.4      文献标识码: A      文章编号: 1000-1298(2022)01-0302-09      OSID: 

Effect of Biochemical Fulvic Acid on Water and Salt Transport Characteristics in Saline-alkali Soil

SUN Yan   WANG Jian   WANG Quanjiu   QU Zhi   WANG Chunhong   ZHANG Xiyuan

(State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** Chemical amendment is an effective measure to improve soil water and salt environment under saline alkali stress and alleviate land secondary salinization in arid areas of Northwest China. The water and salt transport characteristics and infiltration model parameters of medium saline-alkali soil at different biochemical fulvic acid (BFA) application rates (0 g/kg, 1 g/kg, 2 g/kg, 4 g/kg and 8 g/kg) were investigated through the one-dimensional vertical infiltration test. The results showed that after the infiltration, compared with no application of BFA, the cumulative infiltration amount at the BFA application rates of 1 g/kg, 2 g/kg, 4 g/kg and 8 g/kg was increased by 1.00%, 4.67%, 7.14% and 3.44%. The soil water infiltration rate was decreased first and then increased with the increase of BFA application, respectively, the average volumetric water content of soil profile was increased by 8.90%, 17.70%, 20.41% and 11.67%, respectively. In addition, at the 0~20 cm soil layer, the average desalination rates were 5.29%, 27.04%, 42.77% and 14.74%, respectively. At the same time, the Philip model, Green-Ampt model and algebraic model could well simulate the soil water infiltration regulation at different BFA application rates, and there was a functional relationship between model parameters and BFA application rates. Compared with no application of BFA, the soil infiltration rate  $S$  and the soil saturated hydraulic conductivity  $K_s$  were decreased, and showed a trend of first decrease and then increase with the increase of the BFA application amount, and the minimum value was obtained at

收稿日期: 2021-10-16    修回日期: 2021-11-23  
**基金项目:** 国家自然科学基金重点项目(41830754)、国家自然科学基金青年科学基金项目(41907010)、国家自然科学基金面上项目(41977043)和中国博士后科学基金面上项目(2019M653708)  
**作者简介:** 孙燕(1990—),女,副教授,主要从事盐碱地改良与植物生理生态研究,E-mail: sunyan199058@126.com  
**通信作者:** 王全九(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事土壤物理与养分运移研究,E-mail: wquanjiu@163.com

application rate of 4 g/kg. The suction  $S_f$  at the wetting front and comprehensive shape factor  $\alpha$  were increased first and then decreased, and the maximum value was obtained at application rate of 4 g/kg. Therefore, the application amount of BFA significantly affected the characteristics of soil water and salt transport, and the application amount of 4 g/kg had obvious effects on water conservation and desalination of medium saline-alkali soil in Xinjiang.

**Key words:** saline-alkali soil; biochemical fulvic acid; water and salt transport; infiltration model

## 0 引言

土地盐碱化使得土壤通气性和透水性变差,延缓地表土壤温度的回升、降低土壤酶活性,对农作物生长及其产量产生一定的负面作用,威胁着农业可持续发展<sup>[1]</sup>。新疆是我国最大的盐碱土区,其盐碱化面积占全国盐碱土地总面积的1/3和新疆耕地面积的32.07%<sup>[2]</sup>。合理改善土壤盐碱化、提高盐碱化耕地的粮食生产水平对实现旱区农业可持续发展具有非常重要的现实意义<sup>[3]</sup>。目前,向土壤中添加化学改良剂(如脱硫石膏、硫酸亚铁等)是盐碱土改良常用的化学方法,主要通过改变盐碱土胶体吸附性阳离子的组成,调节土壤pH值,改善土壤结构和营养状况,进而达到改良盐碱土的目的<sup>[4]</sup>。然而添加上述化学改良剂可能会造成土壤的二次污染,如大量施用脱硫石膏会造成土壤重金属污染<sup>[5]</sup>,长期施用硫酸亚铁会造成土壤板结<sup>[6]</sup>等现象。

研究表明,施用黄腐酸(Fulvic acid, FA)能够改善土壤结构、降低土壤盐分、提高土壤养分有效性、增强作物抗逆性,进而促进作物生长,是一种绿色高效的盐碱土改良措施<sup>[7-14]</sup>。目前黄腐酸的制备主要是从褐煤、风化煤等矿物源中提取<sup>[15]</sup>,提取过程中需消耗大量的酸、碱等化学物质,甚至需要高压、高温等剧烈反应条件及严格的工艺技术,生产过程中会产生大量的废水和废气,不利于农业绿色发展<sup>[16]</sup>。同时,褐煤、风化煤等均属于不可再生资源,过度开采会破坏生态环境<sup>[17]</sup>。利用微生物技术对农业废弃物进行发酵、固液分离、提取、浓缩后生产生化黄腐酸(Biochemical fulvic acid, BFA),具有使用原材料易于获取、价格低廉、制备周期短、无污染等优点,同时可以为农业废弃物再利用提供有效途径<sup>[18]</sup>。杨晓玲<sup>[19]</sup>研究表明,生化黄腐酸能够促进小麦幼苗根系生长,提高小麦幼苗叶片中的可溶性糖和可溶性蛋白含量。贾爱萍等<sup>[20]</sup>研究认为,生化黄腐酸能明显提高番茄的株高和生物量,并降低青枯病的发生率。杨宇等<sup>[21]</sup>研究发现,生化黄腐酸能够增加土壤团粒结构含量,提高小白菜干物质量。目前,生化黄腐酸相关研究主要集中在促进作物生长发育和增产等方面,而施加生化黄腐酸后的盐碱土水盐分布影响作物根系生长和分布,研究施加生

化黄腐酸后的土壤水盐运移特征以及定量分析其入渗过程能够为揭示生化黄腐酸促进作物生长机理提供理论支撑。

因此,本文将不同施加量的生化黄腐酸与盐碱土混合均匀,采用一维垂直土柱入渗试验,研究不同生化黄腐酸施加量条件下盐碱土的入渗特征及水盐分布特征,分析生化黄腐酸对土壤入渗模型参数的影响,以期改善农田水盐状况、筛选改良中度盐碱土的生化黄腐酸合理施加量提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

供试土样取自新疆维吾尔自治区库尔勒灌溉试验站0~20 cm表层土壤,将取回土样置于阴凉处风干,去除土样中的枯枝、残留物,过2 mm筛备用。土壤机械组成采用Mastersizer 2000型激光粒度分析仪(英国马尔文仪器有限公司)进行测定,土壤物理性砂粒、粉粒体积分数分别为85.37%、12.48%,依据国际制土壤质地分类标准,判定该土壤质地为壤质砂土。供试土壤初始体积含水率为0.007 8 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>,饱和体积含水率为0.375 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>,初始含盐量为9.49 g/kg,土壤pH值为9.18,属于中度盐碱土<sup>[22]</sup>。试验所用的生化黄腐酸为山东廊坊松本科技有限公司生产,棕色粉末状,BFA质量分数大于等于90%。

### 1.2 试验设计与方法

试验于2021年5月在西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室进行,采用一维垂直入渗系统开展不同生化黄腐酸施加量的入渗试验。土壤入渗试验装置由马氏瓶、试验土柱、支架等组成,其中马氏瓶高度为50 cm、内径为8 cm;试验土柱高50 cm、内径为8 cm,底部设有排水孔。生化黄腐酸施加量分别为0、1、2、4、8 g/kg(以干土质量计),每个处理设置3次重复。土柱装土高度为45 cm,以土壤容重(1.65 g/cm<sup>3</sup>)分9层(每层5 cm)装填,保证层与层之间充分接触,不出现分层。入渗开始前,向土柱顶部倒入定量的试验用水(淡水),以减小累积入渗量的初始误差。试验开始时利用秒表计时,并定时记录马氏瓶水位和土柱湿润锋深度。由于试验初期湿润锋移动较快,试验数据记录按照

先密后疏的原则。当土柱湿润锋深度达到 30 cm (入渗深度为整个土柱长度的 2/3) 时,停止供水同时用吸管吸出土柱顶部积水。质量含水率采用干燥法((105±2)℃)测定,质量含水率乘以容重得到体积含水率。将干燥后的土样进行研磨并按照 1:5 土水质量比进行浸提,将浸提液静置 8 h 后利用电导率仪(DDS-307 型)测定其电导率,通过计算转换即可得到土壤含盐量。使用恒水头饱和导水率测定仪测定土壤饱和导水率。

1.3 入渗模型

为了分析生化黄腐酸不同施加量对入渗模型相关参数的影响,分别采用 Philip 入渗模型<sup>[23]</sup>、Green-Ampt 入渗模型<sup>[24]</sup>和代数模型<sup>[25]</sup>分析添加生化黄腐酸后的土壤入渗特性。

均质土一维垂直入渗条件下,Philip 入渗模型的累积入渗量表达式为

$$I = St^{0.5} + At \tag{1}$$

在短历时情况下,式(1)可简化为

$$I = St^{0.5} \tag{2}$$

式中  $I$ ——土壤累积入渗量,cm  
 $t$ ——入渗时间,min  
 $S$ ——吸渗率,cm/min<sup>0.5</sup>  
 $A$ ——稳定入渗率,cm/min

Green-Ampt 入渗模型研究的是初始干燥的土壤在薄层积水时的入渗问题,当入渗时间较短、积水深度较小时其表达式为

$$i = K_s \frac{Z_f + S_f}{Z_f} \tag{3}$$

式中  $i$ ——土壤水分入渗速率,cm/min  
 $K_s$ ——土壤饱和导水率,cm/min  
 $S_f$ ——概化湿润锋处吸力,cm  
 $Z_f$ ——概化湿润锋深度,cm

对于短历时入渗,Philip 入渗模型中的吸渗率可以根据 Green-Ampt 入渗模型中的饱和导水率  $K_s$  和概化湿润锋处吸力  $S_f$  表示<sup>[26]</sup>,即

$$S = 2K_s S_f (\theta_s - \theta_i) \tag{4}$$

式中  $\theta_s$ ——土壤饱和含水率,cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>  
 $\theta_i$ ——土壤初始含水率,cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>

一维垂直积水入渗的代数模型可以较好地描述累积入渗量和积水入渗后不同土层深度的含水率分布,且模型中的参数容易确定,具体表达式为

$$I = Z_f (\theta_s - \theta_r) \frac{1}{1 + \alpha} \tag{5}$$

$$\theta = \left(1 - \frac{Z}{Z_f}\right)^\alpha (\theta_s - \theta_r) + \theta_r \tag{6}$$

式中  $\theta_r$ ——滞留体积含水率,cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>

$\alpha$ ——土壤水分特征曲线和非饱和导水率综合形状系数  
 $Z$ ——任意土壤深度,cm  
 $\theta$ ——土壤体积含水率,cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>

1.4 土壤水分特征曲线模型

本试验根据饱和导水率、饱和含水率、累积入渗量与时间的关系数据,通过 Hydrus-1D 软件反推出 Van Genuchten 模型中的滞留含水率  $\theta_r$  和形状系数  $n$ 。Van Genuchten 模型具体形式为

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[ \frac{1}{1 + (\alpha h)^n} \right]^{1 - \frac{1}{n}} \tag{7}$$

式中  $h$ ——土壤水吸力,cm

1.5 数据处理与统计

试验数据均取 3 次重复的平均值,采用 Office 2016 进行数据处理及制图;Origin 和 SPSS 25 进行模型参数拟合和统计分析,LSD 法进行显著性检验( $P < 0.05$ )。

2 结果与讨论

2.1 生化黄腐酸对土壤水分入渗特征的影响

图 1 为不同生化黄腐酸施加量(0、1、2、4、8 g/kg)下湿润锋深度随时间的变化曲线。由图 1 可知,入渗初期,各处理湿润锋深度的差异并不显著( $P > 0.05$ ),随着时间的增加生化黄腐酸逐渐发挥作用。在相同入渗时间下,湿润锋深度随着生化黄腐酸施加量的增加呈现先减小后增大的变化趋势,当施加量为 4 g/kg 时,湿润锋深度最小。在 180 min 时,施加 1、2、4、8 g/kg 生化黄腐酸后的湿润峰深度相比于不施加处理分别降低 10.01%、27.00%、33.67%、19.33%,各处理差异显著( $P < 0.05$ )。

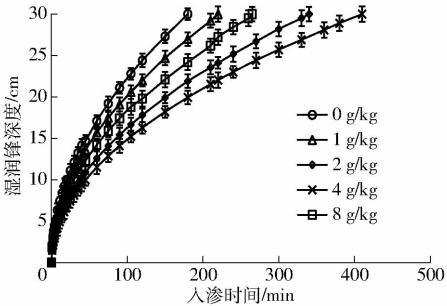


图 1 不同生化黄腐酸施加量下土壤湿润锋深度变化曲线

Fig. 1 Variation curves of soil wetting front depth under different application amounts of BFA

图 2 为各处理下土壤累积入渗量和入渗速率随时间的变化曲线。由图 2 可知,入渗结束(湿润锋深度均为 30 cm)后,土壤累积入渗量均随着生化黄腐酸施加量的增加呈现先增大后减小的变化趋势,

生化黄腐酸施加量为 1、2、4、8 g/kg 后的土壤累积入渗量与未施加相比分别增加 1.00%、4.67%、7.14%、3.44%，土壤水分入渗速率随着生化黄腐酸施加量的增加呈现先减小后增大的变化趋势，各处理差异显著 ( $P < 0.05$ )。

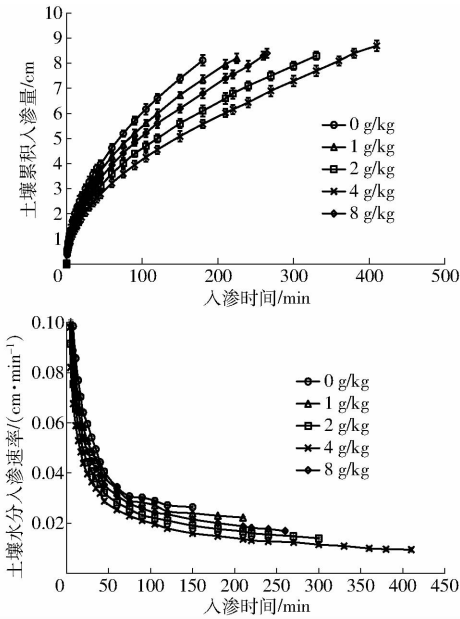


图 2 不同生化黄腐酸施加量下土壤累积入渗量和水分入渗速率变化曲线

Fig. 2 Variation curves of soil cumulative infiltration and water infiltration rate under different application amounts of BFA

通过分析土壤累积入渗量和水分入渗速率发现，生化黄腐酸施入土壤后能够有效减慢土壤水分入渗速度和提高相同湿润锋深度下的土壤累积入渗量。产生的主要原因是由于生化黄腐酸可作为腐殖质中有机胶体施入土壤中<sup>[27]</sup>，在胶结作用下使土粒、微团粒相互团聚，促进了土壤团粒结构的形成<sup>[28]</sup>，改善了土壤结构和孔隙状况，从而改良了壤质砂土保水性差的特点；同时，生化黄腐酸本身含有大量羧基和羟基，能够溶于水后与水分子通过氢键结合形成网状结构，增加水的铺展面积<sup>[29]</sup>和粘滞性<sup>[30]</sup>，降低了水分入渗速率，使更多的水分滞留在土层中，不易向下运输。杨宇等<sup>[21]</sup>研究表明，相比于未施加生化黄腐酸，施加生化黄腐酸能够显著增加土壤团粒结构含量，且施用时间越长，土壤的团粒结构含量越大。本试验结果表明，当生化黄腐酸施加量为 8 g/kg 时，入渗速率呈现增大的趋势，这可能是因为当生化黄腐酸施加量过多时自身会发生聚合吸水膨胀<sup>[31-32]</sup>，土壤孔隙增大，从而使得水分入渗速率加快。

2.2 生化黄腐酸对土壤水盐分布的影响

图 3 为入渗结束后不同生化黄腐酸施加量(0、

1、2、4、8 g/kg)下土壤含水率分布曲线。由图 3 可知，土壤含水率随着土层深度的增加而降低，而施加生化黄腐酸可以提高土壤含水率，其中施加量 4 g/kg 下效果最为明显。在土层深度 0、5、10、15、20、25、30 cm，施加量 4 g/kg 处理的土壤含水率分别高于对照 13.07%、13.01%、14.11%、17.07%、23.08%、43.09%、86.79%。入渗结束后，与未施加生化黄腐酸相比，生化黄腐酸施加量为 1、2、4、8 g/kg 下的土壤剖面平均体积含水率分别增加了 8.90%、17.70%、20.41%、11.67%。这是因为生化黄腐酸增加了土壤团粒结构含量，改善土壤结构，提高了土壤保水能力，然而当生化黄腐酸施加量过多会自身发生聚合吸水膨胀，扩大土壤孔隙，使土壤水分流失。

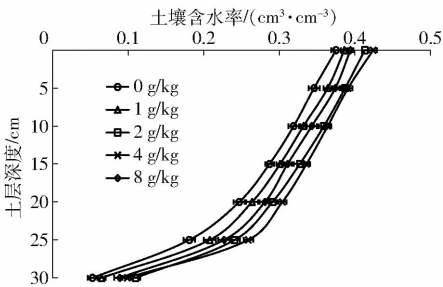


图 3 不同生化黄腐酸施加量下土壤含水率变化曲线

Fig. 3 Variation curves of soil moisture content under different application amounts of BFA

图 4 为不同生化黄腐酸施加量(0、1、2、4、8 g/kg)下土壤含盐量分布曲线。由图 4 可知，由于淋洗作用，各处理的土壤含盐量会随着土层深度的增加而增加。入渗结束后，施加生化黄腐酸后的土壤含盐量和未施加生化黄腐酸后的土壤含盐量差值与未施加生化黄腐酸后的土壤含盐量相比，比值为正值时定义为相对脱盐率(%)，比值为负值时定义为相对积盐率(%)。各处理在土层 0~30 cm 范围脱盐效果和积盐效果不同，计算得出土层深度 0~30 cm 内，不同生化黄腐酸施加量下的土壤相对脱盐率和相对积盐率(表 1)。在 0~20 cm 土层，与未施加生化黄腐酸相比，施加 1、2、4、8 g/kg 生化黄腐酸后的土壤平均相对脱盐率分别为 5.29%、27.04%、42.77%、14.74%。而在 20~30 cm 土层，土壤含盐量则呈现出相反的变化趋势，说明盐分主要被淋洗到 20 cm 土层以下，施加生化黄腐酸 1、2、4、8 g/kg 后土壤平均相对积盐率分别为 -14.84%、-39.06%、-60.05%、-23.66%，这说明生化黄腐酸具有抑制盐分在土壤表层积累的作用。主要原因可能是：施加生化黄腐酸处理的土壤水分入渗速率变慢，土壤中的盐离子能更充分地溶解在水中，使随水向下运移的盐分

增加;土壤累积入渗量的增加,也使得更多的水分参与洗盐过程中,增强了压盐效果;此外,生化黄腐酸的巨大比表面积<sup>[33]</sup>能对盐分离子产生表面吸附,同时其自身含有的羟基、羧基等活性功能团能够络合<sup>[34-35]</sup>土壤溶液中的盐分离子,使土壤表层盐分离子与生化黄腐酸一同随水向下运移。郑敏娜等<sup>[36]</sup>研究表明,黄腐酸能够显著提高土壤淋洗液中  $\text{Na}^+$  含量;刘小媛等<sup>[37]</sup> 研究表明,施加黄腐酸能够显著降低 0 ~ 10 cm 土壤处电导率。

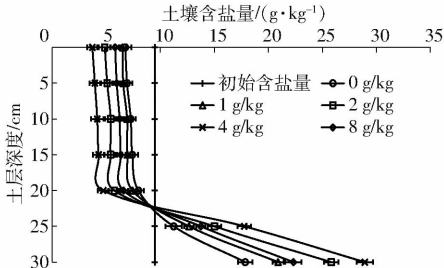


图 4 不同生化黄腐酸施加量下土壤含盐量变化曲线  
Fig. 4 Variation curves of soil salt content under different BFA application amounts

表 1 不同生化黄腐酸施加量对脱盐效果的影响

| Tab. 1    Effect of different application amounts of<br>BFA on desalination |                                |         |         |         | % |
|-----------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|---------|---------|---------|---|
| 土层深度/<br>cm                                                                 | 生化黄腐酸施加量/(g·kg <sup>-1</sup> ) |         |         |         |   |
|                                                                             | 1                              | 2       | 4       | 8       |   |
| 0                                                                           | 3. 76                          | 28. 08  | 45. 14  | 13. 92  |   |
| 5                                                                           | 5. 14                          | 26. 58  | 43. 11  | 13. 84  |   |
| 10                                                                          | 4. 61                          | 25. 50  | 42. 66  | 14. 25  |   |
| 15                                                                          | 6. 17                          | 27. 05  | 42. 10  | 14. 50  |   |
| 20                                                                          | 6. 75                          | 27. 99  | 40. 81  | 17. 21  |   |
| 25                                                                          | -12. 64                        | -33. 53 | -58. 13 | -22. 34 |   |
| 30                                                                          | -17. 04                        | -44. 60 | -61. 98 | -24. 98 |   |

2.3 生化黄腐酸对土壤水分特征曲线的影响

土壤水分特征曲线表征土壤水吸力与土壤含水

表 2 不同生化黄腐酸施加量对入渗模型参数的影响

| 入渗模型         |                                             | 生化黄腐酸施加量/(g·kg <sup>-1</sup> ) |                       |                       |                       |                       |
|--------------|---------------------------------------------|--------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 参数           |                                             | 0                              | 1                     | 2                     | 4                     | 8                     |
| Philip       | 吸渗率 $S/(\text{cm}\cdot\text{min}^{-0.5})$   | 0. 603 <sup>a</sup>            | 0. 551 <sup>b</sup>   | 0. 458 <sup>d</sup>   | 0. 422 <sup>e</sup>   | 0. 510 <sup>c</sup>   |
|              | 决定系数 $R^2$                                  | 0. 991                         | 0. 996                | 0. 986                | 0. 973                | 0. 995                |
| Green - Ampt | 饱和导水率 $K_s/(\text{cm}\cdot\text{min}^{-1})$ | 0. 020 9 <sup>a</sup>          | 0. 017 2 <sup>b</sup> | 0. 014 6 <sup>d</sup> | 0. 013 7 <sup>e</sup> | 0. 015 6 <sup>c</sup> |
|              | 概化湿润锋处吸力 $S_f/\text{cm}$                    | 70. 98 <sup>c</sup>            | 94. 76 <sup>d</sup>   | 113. 35 <sup>b</sup>  | 121. 56 <sup>a</sup>  | 108. 67 <sup>c</sup>  |
| 代数模型         | 决定系数 $R^2$                                  | 0. 975                         | 0. 981                | 0. 976                | 0. 983                | 0. 977                |
|              | 综合形状系数 $\alpha$                             | 0. 356 <sup>d</sup>            | 0. 381 <sup>c</sup>   | 0. 438 <sup>b</sup>   | 0. 465 <sup>a</sup>   | 0. 388 <sup>c</sup>   |
| 决定系数 $R^2$   |                                             | 0. 992                         | 0. 995                | 0. 996                | 0. 986                | 0. 993                |

注:同一行数字后字母不同表示参数差异显著 ( $P < 0.05$ )。

吸渗率  $S$  表示土壤依靠毛管力吸收或释放水分能力<sup>[39]</sup>,将吸渗率  $S$  与生化黄腐酸施加量进行二次项拟合,拟合结果如图 6 所示。由图 6 可知,对于

率的关系,反映了土壤水能量与数量之间的关系,是研究土壤水分保持和运动的基本特性曲线<sup>[38]</sup>。不同生化黄腐酸施加量的水分特征曲线的反推结果如图 5 所示。由图 5 可知,当土壤含水率相同时,土壤水吸力随着生化黄腐酸施加量的增加呈现先增大后减小的趋势,其中施加量为 4 g/kg 的土壤水吸力最大,即向土壤中施入生化黄腐酸后能够使土壤基质势降低,土壤对水分的保持能力增强,这是由于生化黄腐酸可作为腐殖质中可溶于水且带负电荷的有机胶体施入土壤中,在胶结作用下使土粒、微团粒相互团聚,促进了土壤团粒结构的形成,改善了土壤结构,从而增强了土壤的保水性能。

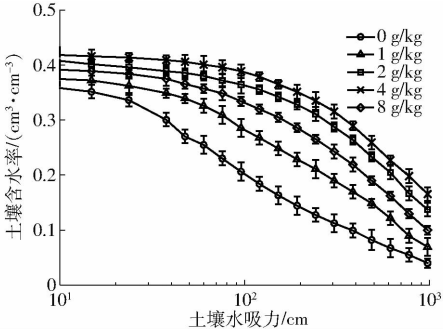


图 5 生化黄腐酸施用量对土壤水分特征曲线的影响  
Fig. 5 Effect of BFA on water characteristic curves

2.4 生化黄腐酸对入渗模型参数的影响

将不同生化黄腐酸施加量(0、1、2、4、8 g/kg)下累积入渗量与时间的关系、入渗率与概化湿润锋的关系、累积入渗量与湿润锋的关系分别采用 Philip 模型、Green - Ampt 模型和代数模型进行拟合,各参数拟合结果如表 2 所示。由表 2 可知,各处理的决定系数  $R^2$  均大于 0.97,说明 Philip 模型、Green - Ampt 模型和代数模型均能较好地模拟不同生化黄腐酸施加量下的土壤水分入渗规律。

Philip 入渗模型,吸渗率  $S$  随着生化黄腐酸施加量的增加呈现先减小后增大的变化趋势,表明土壤入渗能力随生化黄腐酸施加量的增加先减小后增大,

这与湿润锋和累积入渗量变化规律一致。当生化黄腐酸施加量为 4 g/kg 时,吸渗率  $S$  最小,低于对照组 30.02%。

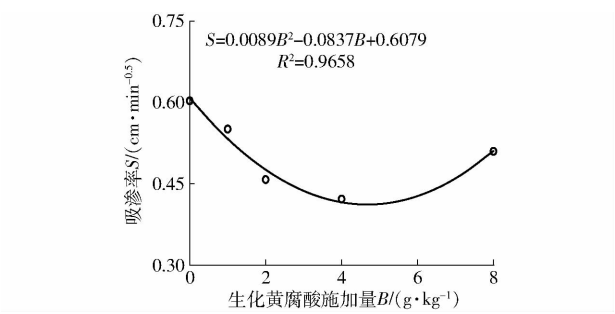


图 6 生化黄腐酸施加量与吸渗率的关系曲线  
Fig.6 Relationship between application amount of BFA and sorptivity

对于 Green - Ampt 模型,饱和导水率  $K_s$ 随着生化黄腐酸施加量的增加呈现先减小后增大的变化趋势,在施加量为 4 g/kg 时,饱和导水率  $K_s$ 最小,低于对照组 58.79%。而概化湿润锋处吸力  $S_f$ 则随着生化黄腐酸施加量的增加呈现先增大后减小的变化趋势,在施加量为 4 g/kg 时,概化湿润锋处吸力最大,高于对照组 71.26%。将饱和导水率  $K_s$ 和概化湿润锋处吸力  $S_f$ 与生化黄腐酸施加量的关系进行拟合,拟合结果如图 7 所示。由图 7 可知,拟合  $R^2$ 均大于 0.96,说明饱和导水率  $K_s$ 和湿润锋处吸力  $S_f$ 均与生化黄腐酸施加量之间呈较好的二次多项式关系。

将土壤饱和导水率的实测值与拟合值进行拟合,结果如图 8 所示。由图 8 可知,实测值与拟合值存在较好的线性关系,决定系数  $R^2$ 为 0.997,但实测值与拟合值之间仍存在一定的误差。诸多因素均可引起实测值和拟合值的误差,例如软件反推土壤模型参数时存在参数的置信度问题;测定土壤饱和导水率和水分入渗时的水温差异也会对测量值的准确度产生影响。

利用式(4)对比分析施加生化黄腐酸入渗条件下 Philip 入渗模型和 Green - Ampt 入渗模型参数之间的相互转换关系,结果如表 3 所示。由表 3 可知,两个人渗模型参数中  $S$  和  $K_s S_f$  的拟合值随着生化

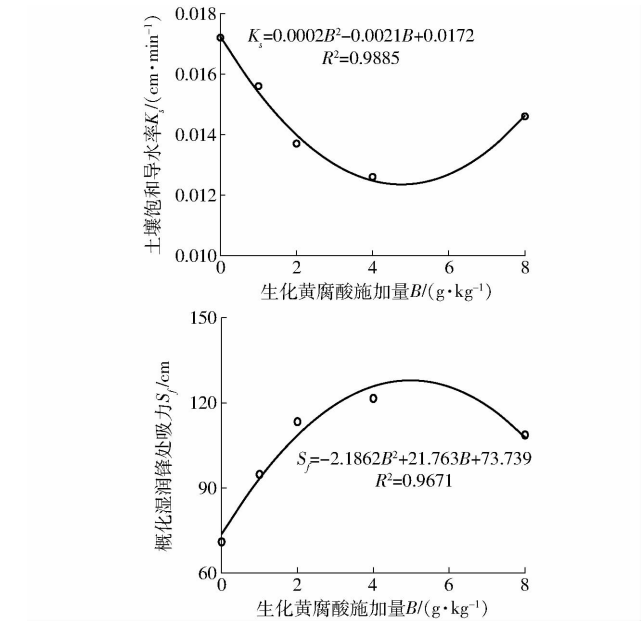


图 7 生化黄腐酸施加量与饱和导水率和概化湿润锋处吸力的关系曲线

Fig.7 Relationship between application amount of BFA and saturated hydraulic conductivity and suction at generalized wetting front

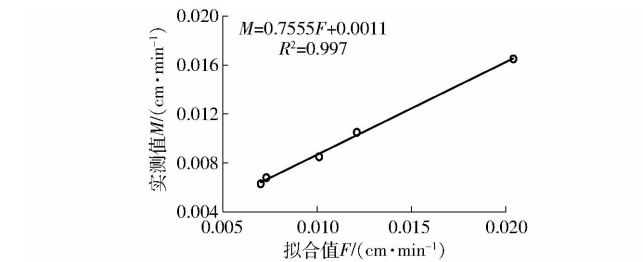


图 8 各处理下土壤饱和导水率实测值与拟合值关系曲线  
Fig.8 Relationship between measured and fitted value of soil saturated hydraulic conductivity under each treatment

黄腐酸施加量的增加呈现先减小后增大的变化趋势,且在施加量为 4 g/kg 时达到最小值,这与两个人入渗模型参数的拟合值变化规律一致。然而拟合值和计算值存在相对误差,这是因为生化黄腐酸改善了土壤团粒结构,从而使得入渗公式参数发生变化,最终影响了 Philip 模型和 Green - Ampt 模型参数互相转换的精度。

表 3 不同生化黄腐酸施加量对入渗模型拟合结果的影响

| Tab.3 Effect of different application amounts of BFA on fitting results of infiltration model |                                       |                                       |                                       |                                       |                                       |                                       |                                       |                                       |                                       |                                       |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| 参数                                                                                            | 0 g/kg                                |                                       | 1 g/kg                                |                                       | 2 g/kg                                |                                       | 4 g/kg                                |                                       | 8 g/kg                                |                                       |
|                                                                                               | $S/$                                  | $K_s S_f/$                            | $S/$                                  | $K_s S_f/$                            | $S/$                                  | $K_s S_f/$                            | $S/$                                  | $K_s S_f/$                            | $S/$                                  | $K_s S_f/$                            |
|                                                                                               | ( $\text{cm}\cdot\text{min}^{-0.5}$ ) | ( $\text{cm}^2\cdot\text{min}^{-1}$ ) | ( $\text{cm}\cdot\text{min}^{-0.5}$ ) | ( $\text{cm}^2\cdot\text{min}^{-1}$ ) | ( $\text{cm}\cdot\text{min}^{-0.5}$ ) | ( $\text{cm}^2\cdot\text{min}^{-1}$ ) | ( $\text{cm}\cdot\text{min}^{-0.5}$ ) | ( $\text{cm}^2\cdot\text{min}^{-1}$ ) | ( $\text{cm}\cdot\text{min}^{-0.5}$ ) | ( $\text{cm}^2\cdot\text{min}^{-1}$ ) |
| 拟合值                                                                                           | 0.603                                 | 1.483                                 | 0.551                                 | 1.458                                 | 0.458                                 | 1.655                                 | 0.422                                 | 1.665                                 | 0.51                                  | 1.695                                 |
| 计算值                                                                                           | 0.723                                 | 1.231                                 | 0.638                                 | 1.257                                 | 0.526                                 | 1.442                                 | 0.536                                 | 1.312                                 | 0.607                                 | 1.425                                 |
| 相对误差/%                                                                                        | 17.01                                 | -20.49                                | 13.67                                 | -15.83                                | 12.89                                 | -14.80                                | 21.24                                 | -26.98                                | 15.95                                 | -18.98                                |

2.5 代数模型描述土壤施加生化黄腐酸入渗后土壤含水率准确性分析

将拟合得到的综合形状系数  $\alpha$  利用式(6) 计算土壤含水率,图9 为土壤含水率计算值和实测值之间的关系。由图9 可以看出,土壤含水率计算值与实测值之间吻合程度较好。为了更好地说明代数模

型的计算效果,对土壤含水率计算值和实测值之间进行误差分析。结果表明,随着生化黄腐酸施加量的增加,各处理的平均绝对误差分别为 1.36%、1.19%、3.15%、3.52%、2.04%。由此可见,代数模型能够较好地模拟计算施加生化黄腐酸后一维垂直入渗条件下的土壤含水率。

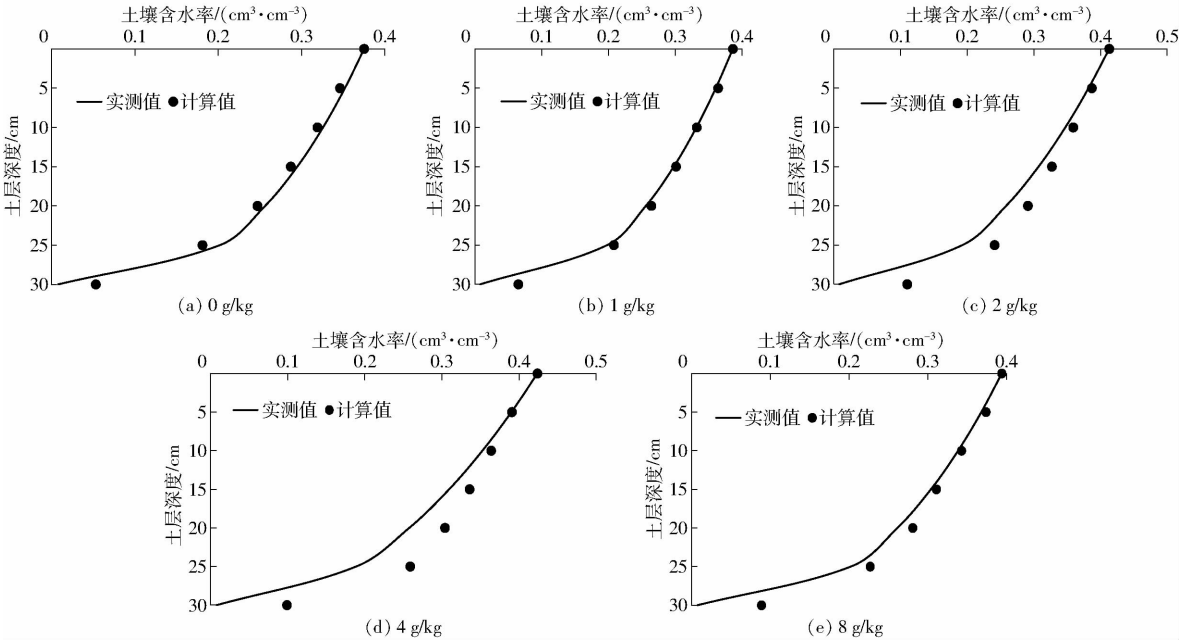


图9 土壤含水率计算值与实测值  
Fig.9 Theoretical and measured values of soil moisture content

3 结论

(1)生化黄腐酸具有减缓水分入渗速率的作用。施加生化黄腐酸后,相同时间内能够降低湿润锋运移速率;而当湿润锋深度相等时,生化黄腐酸能够增大累积入渗量。相同时间内,湿润锋深度随着生化黄腐酸施加量的增加呈现先减小后增大的变化趋势,在施加量为 4 g/kg 时湿润锋深度最小。入渗至相同湿润锋时,土壤累积入渗量随着施加量的增加呈现先增大后减小的变化趋势,在施加量为 4 g/kg 时土壤累积入渗量最大。

(2)生化黄腐酸具有保水脱盐的作用。入渗结束后,与未施用相比,施加生化黄腐酸能够提高土壤含水率,且土壤含水率随着施加量的增加呈现先增大后减小的变化趋势,施加量为 4 g/kg 时土壤含水

率最大。同时在土层 0 ~ 20 cm,施加生化黄腐酸能够提高土壤脱盐率,与未施加相比,施加生化黄腐酸 1、2、4、8 g/kg 后的土壤平均脱盐率分别为 5.29%、27.04%、42.77%、14.74%,其中施加量为 4 g/kg 时土壤脱盐效果最好。

(3)Philip 模型、Green - Ampt 模型和代数模型均能较好地模拟不同生化黄腐酸施加量下土壤水分入渗规律。吸渗率  $S$  和饱和导水率  $K_s$  随着生化黄腐酸施加量的增加呈现先减小后增大的变化趋势,施加量 4 g/kg 时  $S$ 、 $K_s$  最小。概化湿润锋处吸力  $S_f$  和综合形状系数  $\alpha$  随着生化黄腐酸施加量的增加呈现先增大后减小的变化趋势,施加量 4 g/kg 时  $S_f$ 、 $\alpha$  最大,且代数模型能够较为准确地拟合施加生化黄腐酸一维垂直入渗条件下的土壤含水率。

参 考 文 献

[1] 周慧,史海滨,徐昭,等. 有机无机肥配施对盐渍土供氮特性与作物水氮利用的影响[J]. 农业机械学报, 2020, 51(4): 299 - 307.  
ZHOU Hui, SHI Haibin, XU Zhao, et al. Effects of combined application of organic and inorganic fertilizers on nitrogen supply and crop water and nitrogen utilization in salinized soils[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(4): 299 - 307. (in Chinese)

[2] 王著峰,王玉刚,陈园园,等. 施加脱硫石膏对盐碱土固碳的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(2): 353 - 360.  
WANG Zhufeng, WANG Yugang, CHEN Yuanyuan, et al. Effect of applying flue gas desulfurization gypsum on carbon

- sequestration in saline-alkali soils[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(2): 353–360. (in Chinese)
- [3] 屈忠义, 孙慧慧, 杨博, 等. 不同改良剂对盐碱地土壤微生物与加工番茄产量的影响[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(4): 311–318.
- QU Zhongyi, SUN Huihui, YANG Bo, et al. Effects of different amendments on soil microorganisms and processing tomato yield in saline alkali soil[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(4): 311–318. (in Chinese)
- [4] 王旭, 孙兆军, 韩磊, 等. 砾石暗沟提高脱硫石膏改良龟裂碱土效果及油葵产量[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(22): 143–151.
- WANG Xu, SUN Zhaojun, HAN Lei, et al. Subsurface gravel blind ditch increasing improved effects of takyr solonetz by desulfurized gypsum and yield of oil sunflower[J]. *Transactions of the CSAE*, 2017, 33(22): 143–151. (in Chinese)
- [5] 王静, 许兴, 肖国举, 等. 脱硫石膏改良宁夏典型龟裂碱土效果及其安全性评价[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(2): 141–147.
- WANG Jing, XU Xing, XIAO Guojun, et al. Effect of typical takyr solonetz reclamation with flue gas desulfurization gypsum and its security assessments[J]. *Transactions of the CSAE*, 2016, 32(2): 141–147. (in Chinese)
- [6] 李晓晴, 周蓓蓓, 杨扬, 等. 有机酸改良剂对盐碱土水盐运移的影响[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(1): 307–313.
- LI Xiaoping, ZHOU Beibei, YANG Yang, et al. Effect of organic acid modifier on water and salt transport in saline-alkali soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(1): 307–313. (in Chinese)
- [7] 孙运朋, 杨劲松, 姚荣江, 等. 生物炭和黄腐酸对滨海滩涂盐碱地土壤性质的提升[J]. *中国农业科技导报*, 2019, 21(8): 115–121.
- SUN Yunpeng, YANG Jinsong, YAO Rongjiang, et al. Effects of biochar and fulvic acid application on soil properties in tidal flat reclamation region[J]. *China Agricultural Science and Technology Guide*, 2019, 21(8): 115–121. (in Chinese)
- [8] 高惠敏, 王相平, 屈忠义, 等. 不同改良剂对河套灌区土壤盐碱指标及作物产量的影响研究[J]. *土壤通报*, 2020, 51(5): 1172–1179.
- GAO Huimin, WANG Xiangping, QU Zhongyi, et al. Effects of different amendments on soil salinity and crop yield in Hetao Irrigation Area[J]. *Soil Bulletin*, 2020, 51(5): 1172–1179. (in Chinese)
- [9] LIU X Y, YANG J S, TAO J Y, et al. Elucidating the effect and interaction mechanism of fulvic acid and nitrogen fertilizer application on phosphorus availability in a salt-affected soil[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2021, 21(10): 2525–2539.
- [10] YONG S L, RICHMOND J B. Stimulation of plant growth by humic substances[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1976, 40(6): 876–879.
- [11] LI Z L, LIU Z G, ZHANG M, et al. The combined application of controlled-release urea and fulvic acid improved the soil nutrient supply and maize yield[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2021, 67(5): 633–646.
- [12] 李志鹏, 刘浩, 于晓娜, 等. 黄腐酸对植烟土壤改良及烟叶品质的影响研究[J]. *土壤通报*, 2016, 47(4): 914–920.
- LI Zhipeng, LIU Hao, YU Xiaona, et al. Effect of fulvic acid on improvement of tobacco-planted soil and quality of flue-cured tobacco leaves[J]. *Soil Bulletin*, 2016, 47(4): 914–920. (in Chinese)
- [13] 庞晓燕. 营养液中添加不同剂量黄腐酸对基质栽培黄瓜生长、品质及产量的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2017.
- PANG Xiaoyan. Effects of different doses of fulvic acid in nutrient solution on growth, quality and yield of cucumber cultivated in organic substrate[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [14] QIU C, SUN J H, SHEN J Z, et al. Fulvic acid enhances drought resistance in tea plants by regulating the starch and sucrose metabolism and certain secondary metabolism[J]. *Journal of Proteomics*, 2021, 247(10): 1–9.
- [15] 袁红莉, 陈文新, 木村真人. 褐煤风化过程中化学特性的变化[J]. *环境化学*, 1997, 16(4): 311–315.
- YUAN Hongli, CHEN Wenxin, KIMURA M. Changes of chemical properties of lignite during weathering[J]. *Environmental Chemistry*, 1997, 16(4): 311–315. (in Chinese)
- [16] 李亚军, 巩冠群, 石侃, 等. 黄腐酸提取及其分子结构的研究[J]. *应用化工*, 2016, 45(5): 940–943.
- LI Yajun, GONG Guanqun, SHI Kan, et al. Research on extraction and molecular structure of fulvic acid[J]. *Applied Chemical Engineering*, 2016, 45(5): 940–943. (in Chinese)
- [17] CANELLAS L P, OLIVARES F L, AGUIAR N O, et al. Humic and fulvic acids as biostimulants in horticulture[J]. *Scientia Horticulture*, 2015, 196: 15–27.
- [18] 杨晓玲, 朱京涛, 张健文. 生化黄腐酸的提取及其理化性质的研究[J]. *吉林农业大学学报*, 2003, 25(1): 18–20.
- YANG Xiaoling, ZHU Jingtao, ZHANG Jianwen. Study on extraction of BcFA and its physical and chemical characters[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2003, 25(1): 18–20. (in Chinese)
- [19] 杨晓玲. 生化黄腐酸(BcFA)浸种对小麦幼苗生长及干旱时的生理影响[J]. *河北农业技术师范学院学报*, 1996, 10(2): 67–69.
- YANG Xiaoling. The effect of biochemical fulvic acid (BcFA) on the growth of wheat seeding and some physiological changes in drought condition[J]. *Journal of Hebei Normal University of Agricultural Technology*, 1996, 10(2): 67–69. (in Chinese)
- [20] 贾爱萍, 赵冰, 廖宗文. 生化腐植酸的肥效及作用机理研究[J]. *腐植酸*, 2005(2): 15–19.
- JIA Aiping, ZHAO Bing, LIAO Zongwen. Study on fertilizer effect and mechanism of biochemical humic acid[J]. *Humic Acid*, 2005(2): 15–19. (in Chinese)
- [21] 杨宇, 金强, 卢国政, 等. 生化黄腐酸土壤改良剂对菜田盐碱土壤理化性质的影响[J]. *北方园艺*, 2010(5): 45–46.
- YANG Yu, JIN Qiang, LU Guozheng, et al. Effect of the soil modifier of biochemical fulvic acid on saline land[J]. *Northern Horticulture*, 2010(5): 45–46. (in Chinese)

[22] 李会志. 基于 RS/GIS 的开都河流域下游绿洲土壤盐碱化动态变化研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆师范大学, 2010.  
LI Huizhi. Study on dynamic changes of the oasis soil salinization in the lower reaches of Kaidu River basin, Xinjiang based on RS and GIS[D]. Urumqi: Xinjiang Normal University, 2010. (in Chinese)

[23] PHILIP J R. The theory of infiltration: 1. The infiltration equation and its solution[J]. Soil Science, 1957, 83(5): 345–358.

[24] SHAO Y H, MARKUS H. Incorporation of dynamic capillary pressure into the Green–Ampt model for infiltration[J]. Vadose Zone Journal, 2011, 10(2): 642–653.

[25] WANG Q J, ROBERT H, SHAO Ming'an. Algebraic model for one-dimensional infiltration and soil water distribution[J]. Soil Science, 2003, 168(10): 671–676.

[26] 王全九, 许紫月, 单鱼洋, 等. 磁化微咸水矿化度对土壤水盐运移的影响[J]. 农业机械学报, 2017, 48(7): 198–206.  
WANG Quanjiu, XU Ziyue, SHAN Yuyang, et al. Effect of salinity of magnetized brackish water on salt and water movement [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7): 198–206. (in Chinese)

[27] 吕贻忠, 李保国. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2006.

[28] 刘侠. 黄腐酸对黑垆土结构及小白菜生长特性的影响研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2020.  
LIU Xia. The effects of fulvic acid on the structure of black loessial soil and growth characteristics of pakchoi[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020. (in Chinese)

[29] 田一良, 刘艳升, 张海兵. 盐碱地改良与腐植酸应用技术探讨[J]. 腐植酸, 2018(3): 42–46.  
TIAN Yiliang, LIU Yansheng, ZHANG Haibing. Discussion on saline alkali land improvement and humic acid application technology[J]. Humic Acid, 2018(3): 42–46. (in Chinese)

[30] 李晓菊, 单鱼洋, 王全九, 等. 腐殖酸对滨海盐碱土水盐运移特征的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(6): 288–293.  
LI Xiaojie, SHAN Yuyang, WANG Quanjiu, et al. Effect of humic acid on characteristics of salt and water transport in coastal saline-alkali soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(6): 288–293. (in Chinese)

[31] 杜作勇, 庾先国, 王彦惠, 等. 腐殖酸对 U(VI) 的吸附机理研究[J]. 环境化学, 2019, 38(8): 1768–1774.  
DU Zuoyong, TUO Xianguo, WANG Yanhui, et al. Adsorption mechanism of humic acid on U(VI)[J]. Environmental Chemistry, 2019, 38(8): 1768–1774. (in Chinese)

[32] 张春练, 娄奥林, 曾令强, 等. 矿源黄腐酸和生化黄腐酸异同以及作用机理浅析[J]. 安徽化工, 2021, 47(5): 55–57.  
ZHANG Chunlian, LOU Aolin, ZENG Lingqiang, et al. Research on extraction of flavonoids from sourellaria barbata[J]. Anhui Chemical Industry, 2021, 47(5): 55–57. (in Chinese)

[33] 周花香. 普洱茶茶褐素与褐煤黄腐酸对金属离子络合作用的对比研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2012.  
ZHOU Huaxiang. Comparative study on the complexation of eabrownin of Pu-erh tea and lignite fulvic acid of lignite with metal ions[D]. Kunming: Kunming University of Science Technology, 2012. (in Chinese)

[34] 马栗炎, 姚荣江, 杨劲松. 氮肥及黄腐酸对盐碱土有机碳和团聚体特征的调控作用[J]. 土壤, 2020, 52(1): 33–39.  
MA Liyan, YAO Rongjiang, YANG Jinsong. Regulation of nitrogen and fulvic acid on soil organic carbon and aggregates in saline soil[J]. Soil, 2020, 52(1): 33–39. (in Chinese)

[35] 田丹碧, 田定一. 黄腐酸的萃取和性质研究[J]. 资源开发与市场, 2007(10): 872–873.  
TIAN Danbi, TIAN Dingyi. Study on extraction and properties of yellow humic acid[J]. Resource Development and Market, 2007(10): 872–873. (in Chinese)

[36] 郑敏娜, 梁秀芝, 韩志顺, 等. 不同措施对苏打型盐碱土土壤盐分淋洗特征的影响[J]. 山西农业科学, 2021, 49(3): 318–323.  
ZHENG Minna, LIANG Xiuzhi, HAN Zhishun, et al. Effects of different measures on soil salinity leaching characteristics in saline-alkali soil[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2021, 49(3): 318–323. (in Chinese)

[37] 刘小媛, 杨劲松, 姚荣江. 化肥减量施肥黄腐酸降低盐渍农田 NaCl 含量提高氮磷养分有效性的协同效应[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(8): 1339–1350.  
LIU Xiaoyuan, YANG Jinsong, YAO Rongjiang. Synergistic effects of fertilizer reduction and fulvic acid application on decreasing NaCl content and N, P availability of salinized soil[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2021, 27(8): 1339–1350. (in Chinese)

[38] 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.  
GAO Huiyi, GUO Shengli, LIU Wenzhao, et al. Spatial variability of soil water retention curve under fertilization practices in arid-highland of the Loess Plateau [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(6): 161–165. (in Chinese)

[39] 付秋萍, 王全九, 樊军. 盘式吸渗仪吸渗率计算方法比较[J]. 农业机械学报, 2009, 40(9): 56–62.  
FU Qiuping, WANG Quanjiu, FAN Jun. Comparison among permeability methods of disc infiltrometer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(9): 56–62. (in Chinese)