

腐殖酸对滨海盐碱土水盐运移特征的影响

李晓菊¹, 单鱼洋¹, 王全九^{1,2}, 马晨光¹, 余乐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,西安 710048;

2.中科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:为了探索腐殖酸对土壤水盐运移特征及入渗参数的影响,进行了5种施量(0,1,3,5,7 g/kg)的一维垂直入渗试验。结果表明,入渗时间相同,累积入渗量和湿润锋均随腐殖酸施量的增加而减小;相同入渗深度随腐殖酸施量的增加所需的入渗时间、累积入渗量、剖面平均含水量均不断增加。入渗完成时相较于CK,施量为7 g/kg时累积入渗量、含水量分别增加8.0%,10.0%;施加腐殖酸可促进土壤剖面盐分向土壤深层运移并有效降低土壤pH,相较于CK施量为7 g/kg时0—20 cm土层平均脱盐率增加10.2%;Philip模型和代数模型能较好地描述施加腐殖酸条件下水分入渗特征。吸渗率 S 随腐殖酸施量的增加而呈线性减小,综合形状系数 α 则随着腐殖酸施量的增加而线性增加。另外,均方根误差、平均绝对误差分别为0.005~0.018,0.004~0.014 cm³/cm³,表明代数模型可以较好地描述含水量的分布。该研究结果可为应用改良剂改良滨海盐碱地的提供一定参考。

关键词:腐殖酸;滨海盐碱地;入渗特征;水盐运移;入渗模型

中图分类号:P731.12

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2020)06-0288-06

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.06.040

Effect of Humic Acid on Characteristics of Salt and Water Transport in Coastal Saline-alkali Soil

LI Xiaojun¹, SHAN Yuyang¹, WANG Quanjiu^{1,2}, MA Chenguang¹, YU Le¹

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

Xi'an, Shaanxi 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: Coastal saline-alkali land is an important land reserve resource, as well as an important way to ease the pressure on agricultural land. Soil amendments are widely used in soil improvement. Grasping its effect on water movement and salt transport is the first problem for amendment application. In order to explore the effects of humic acid on soil water movement and salt transport characteristics and infiltration parameters, one-dimensional vertical infiltration experiments were performed at five application rates (0, 1, 3, 5, 7 g/kg). The results showed that when the infiltration time was same, the cumulative infiltration amount and wetting front of each treatment decreased with the increase of humic acid application; for the same infiltration depth, the infiltration time required with the increase of humic acid application, cumulative infiltration and average water content in the profile increased significantly. Compared with CK, the cumulative infiltration and water contents increased by 8.0% and 10.0% respectively when the application rate was 7 g/kg when infiltration finished; the application of humic acid could promote the migration of salt from the soil profile to the deep soil layer and effectively reduce soil pH, compared with the CK application rate of 7 g/kg, the average desalination rate of 0—20 cm increased by 10.2%. The results showed that Philip and algebraic models could better describe the characteristics of water infiltration under the condition of humic acid application. The permeability (S) decreased with the increase of the amount of humic acid applied, and the overall shape coefficient α increased with the increase of the amount. Between the model parameters and the amount of humic acid had a follow linear relationship. In addition, the root mean square error and the average

收稿日期:2020-05-08

资助项目:黄河三角洲盐碱地水肥盐一体化综合调控机理与技术模式(U1706211)

第一作者:李晓菊(1993—),女,硕士研究生,主要从事农业水土资源与生态环境研究。E-mail:1920419227@qq.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溶质迁移研究。E-mail:wquanjiu@163.com

absolute error were 0.005~0.018, 0.004~0.014 cm³/cm³, indicating that the algebraic models could better describe the distribution of water content. The above research results provide a certain reference for the application of amendment in the improvement of coastal saline-alkali land.

Keywords: humic acid; coastal saline-alkali land; infiltration characteristics; water movement and salt transport; infiltration model

土地是不可再生资源。随着耕地资源短缺的日益加剧,粮食安全问题突出,因此开发并改良劣质土壤成为一种增加耕地面积的重要途径。滨海盐碱地既属于劣质土壤范畴又是重要的土地后备资源,开发改良滨海盐碱地受到了越来越多的关注。虽然传统的工程措施、化学改良措施、生物改良措施在改良盐碱地方面取得了较为理想的结果^[1-6],但由于滨海盐碱地较为特殊的自然地质条件,例如,地下水埋深较浅、地下水矿化度较高,传统的改良措施可能对滨海盐碱地的可持续利用造成不利的影响^[7-11]。有研究^[12-19]表明,腐殖酸能够有效地改善土壤结构、提高土壤有机质、降低土壤盐分、促进作物生长、提高作物产量。目前的研究大多集中在腐殖酸对土壤理化性质和作物生长方面,关于腐殖酸对水分入渗特征影响的研究相对较少,腐殖酸对土壤水盐运移的影响及如何定量分析其入渗过程仍需进一步研究分析。本文开展了滨海盐碱土混施腐殖酸入渗条件下的水盐运移及其对入渗模型参数的影响研究,明确了腐殖酸施量对滨海盐碱土入渗特征的影响,为合理选用腐殖酸施量及土壤可持续利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土样取自山东省农高区高新科技示范基地,土样采集自土壤表层 0—20 cm,通过环刀法测定土壤容重为 1.4 g/cm³。土样经过风干、去除杂质、并过 2 mm 筛后,用于后期进行含水量、土壤质地、含盐量及 pH 的测定。使用激光粒度分析仪(Mastersizer 2000)进行土壤机械组成测定,测得该土壤类型为壤砂土(国际土制壤质地分类标准),其中砂粒、粉粒、黏粒的体积分数分别为 73.93%,23.04%,3.03%。通过烘干法测得土壤初始含水量为 0.02 cm³/cm³,饱和含水量为 0.44 cm³/cm³;通过 pH 计测得土壤 pH 为 8.13;通过电导率仪(DDS—307)并计算得到土壤的初始含盐量为 4.4 g/kg,属于中度盐渍土^[20]。试验所用腐殖酸由西安田本农用化学有限责任公司生产。

1.2 试验方法

试验于 2019 年 5 月在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进行。采用一维垂直入渗系统开展不同腐殖酸施量的入渗试验,入渗试验装置主要由供水装置和入渗装置组成。其中

供水装置为内径 5 cm、高 50 cm 的马氏瓶,入渗装置为内径 5 cm、高 50 cm 的有机玻璃土柱具体见图 1。腐殖酸的 5 个施量水平分为 0 (CK),1,3,5,7 g/kg,每个施量处理重复 3 次。试验时,先按设计好的施量水平将腐殖酸与土壤均匀混合,然后以 1.4 g/cm³ 的容重将土样分层(5 cm 每层,层间刮毛保证土体连续)装入土柱,装土高度为 40 cm。此外,在土柱顶部放置滤纸,以保证试验过程中顶部供水时均匀入渗。试验时,控制马氏瓶供水水头高度为 2 cm,水分入渗开始即开始用秒表计时,按照先密后疏的原则记录湿润锋运移距离及马氏瓶水位下降高度。湿润锋运移距离至 30 cm 处即停止供水,并立即将土柱内表层水吸出。待试验结束之后,分别在土柱表面,5,10,15,20,25,30 cm 深度取样,测定土壤含水量、含盐量和 pH。每组试验设置 3 个重复。

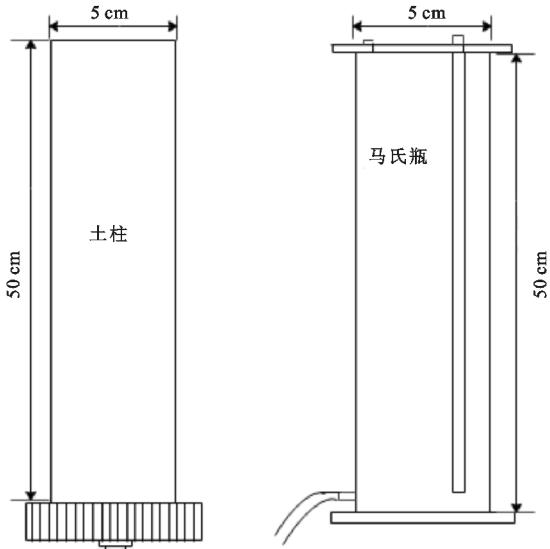


图 1 入渗试验装置

1.3 入渗模型

本研究采用广泛应用的 Philip^[21] 入渗模型及代数入渗模型^[22] 分析施加腐殖酸后的土壤入渗特性。其中,Philip 入渗模型表达式为:

$$I = st^{\frac{1}{2}} \tag{1}$$

式中: I 为累积入渗量 (cm); S 为吸渗率 (cm/min^{0.5}); t 为入渗时间 (min)。

一维垂直积水入渗的代数模型既能很好地描述累积入渗量规律变化,又能描述积水入渗后不同土层深度的含水率分布,其表达式为:

$$I = Z_f (\theta_s - \theta_r) \frac{1}{1 + \alpha} \tag{2}$$

$$\theta=(1-\frac{Z}{Z_f})^{\alpha}(\theta_s-\theta_r)+\theta_r \tag{3}$$

式中： Z_f 为湿润锋深度(cm)； θ_r 为滞留含水量(cm^3/cm^3)； α 为非饱和导水率和土壤水分特征曲线综合形状系数； θ 为土壤体积含水率(cm^3/cm^3)； Z 为任意土壤深度(cm)。

1.4 模型的评价

为了评价模型的可靠性,选择平均绝对误差MAE、均方根误差(RMSE) 2 个统计指标进行评价,具体公式为:

$$\text{MAE}=\frac{\sum_{i=1}^n|\theta_{ti}-\theta_i|}{N} \tag{4}$$

$$\text{RMSE}=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n(\theta_{ti}-\theta_i)^2}{N}} \tag{5}$$

式中： N 为实测点个数； θ_i 为含水量计算值(cm^3/cm^3)； θ_{ti} 为实测含水量(cm^3/cm^3)。

2 结果与分析

2.1 施加腐殖酸对土壤水分入渗特征的影响

累积入渗量和湿润锋是反映水分入渗特征的主要指标。图 2、图 3 分别为 5 种腐殖酸施量条件下累积入渗量、湿润锋随时间的变化过程。从图 2 可以看出,累积入渗量随时间增加而增加。入渗初期不同处理间累积入渗量的差异并不显著,而随着时间的增加而逐渐增加,这主要的原因可能是入渗初期腐殖酸的作用并未发挥,随着时间的增加,腐殖酸才发挥作用。与对照相比(240 min),腐殖酸施量为 1,3,5,7 g/kg 的累积入渗量分别低于对照 0.9%,7.0%,13.9%,29.8%,说明施加腐殖酸对土壤水分入渗有减渗的效果,且与顾文兰^[23]研究得到的腐殖酸浓度与减渗率呈正相关的结论一致。入渗深度相同时(30 cm),累积入渗量随着腐殖酸施量的增加呈增加趋势,与 CK 相比,入渗完成后,累积入渗量分别增加 1.0%,3.0%,7.0%,8.0%,说明土壤中施加腐殖酸可以有效增加土壤持水量。

从图 3 可以看出,各处理的湿润锋均随时间增加而逐渐增加,二者之间可以用幂函数关系表达。然而到达相同深度所需的入渗时间却随腐殖酸施量的增加呈现增加的趋势,再次说明腐殖酸的减渗作用。与对照相比,腐殖酸施加量为 1,3,5,7 g/kg 的入渗时间分别增加 11.6%,24.2%,39.4%,74.8%。腐殖酸减渗的机理可能是:(1)增加水的黏滞性,同时减弱毛管吸力对水的吸渗效果;(2)水凝胶间接促使土壤的大颗粒凝结导致土壤部分孔隙阻塞降低入渗速率,但却使得土壤的保水能力增加让有限的土体内储存更多的水分^[24]。

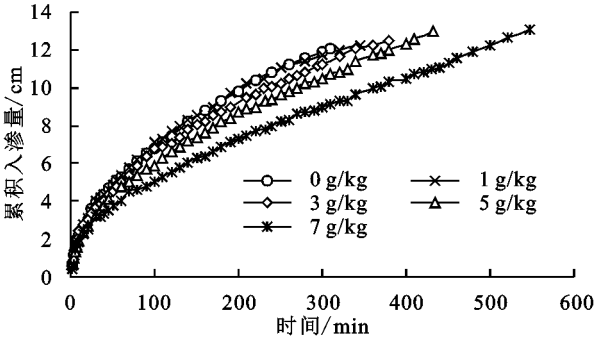


图 2 5 种腐殖酸施量累积入渗量随时间变化

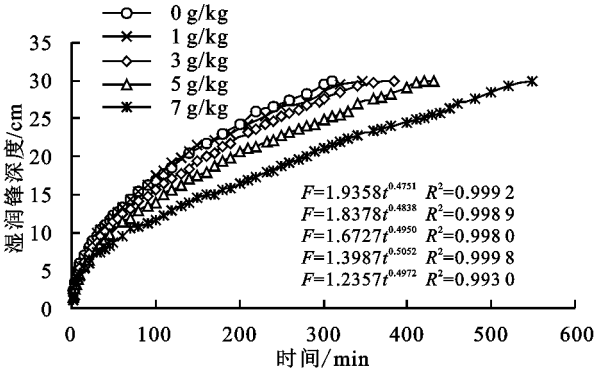


图 3 5 种腐殖酸施量湿润锋深度随时间变化

2.2 施加腐殖酸对土壤水盐分布的影响

水盐分布也是评价改良剂效果的重要指标。图 4、图 5 分别为 5 种腐殖酸施量条件下,入渗结束剖面水盐分布规律。从图 4 可以看出,土壤含水量随土层深度的增加而降低。相同深度,各处理含水量均高于对照且增加幅度随着施量的增加而增加(以 25 cm 为例,与 CK 对比发现,施量为 1,3,5,7 g/kg 处理的土壤含水量分别增加 1.3%,5.3%,10.5%,13.2%)。与对照相比,施量为 1,3,5,7 g/kg 处理平均含水量分别提高 0.9%,3.4%,7.5%,10.0%,说明腐殖酸能够有效提高土壤剖面平均含水量,且随着腐殖酸施量的增加呈现增加的规律。增加的原因可能为:(1)由于腐殖酸本身特有的“海绵体”结构,吸水膨胀致土壤孔隙度变大^[25-26];(2)入渗过程中腐殖酸充分发挥了胶体性能,使松散颗粒形成稳定的团聚体,增加有效的储水空间^[27];(3)腐殖酸官能团与水分子通过氢键结合形成的网状结构使得水分更加稳定。

在 5 种腐殖酸施量入渗条件下,不同土层深度土壤含盐量的变化见图 5。由图 5 可知,土壤含盐量随着土层深度的增加呈逐渐增加趋势,说明盐分随着水分向土壤深层运移,并在土壤深层累积。通过分析发现,各处理在 0—20 cm 土层均表现为脱盐,处理 0,1,3,5,7 g/kg 在 0—20 cm 土层平均脱盐率分别为 62.3%,63.8%,64.6%,68.6%,68.7%,相较于 CK,处理 1,3,5,7 g/kg 脱盐率分别增加 2.4%,3.7%,10.0%,10.2%;各处理在 20—30 cm 土层均表现为积盐效果,处理 0,1,3,5,7 g/kg 在 20—30 cm 土层平均积盐率

分别为 174.9%,189.4%,196.9%,211.0%,213.1%,相较于 CK,处理 1,3,5,7 g/kg 平均积盐率分别增加 8.3%,12.6%,20.6%,21.8%。说明脱盐效果随着施量的增加而增加,主要原因为:(1)腐殖酸在 pH 5~9 条件下表面带有负电^[28],混入土壤后可增加阳离子吸附量;(2)腐殖酸中羧基等官能团可以与金属离子形成络合物^[29],通过改善土壤胶体团粒结构^[15]进而形成允许吸附离子胶体运动的通道;(3)含水量的增加也使得土壤溶液中离子溶度下降有利于吸附离子胶体水分向下运动。说明施加腐殖酸可以增强土壤盐分淋洗,从而使根区土壤盐分降低,缓解盐分胁迫对作物的危害,为植物生长创造有利的环境。

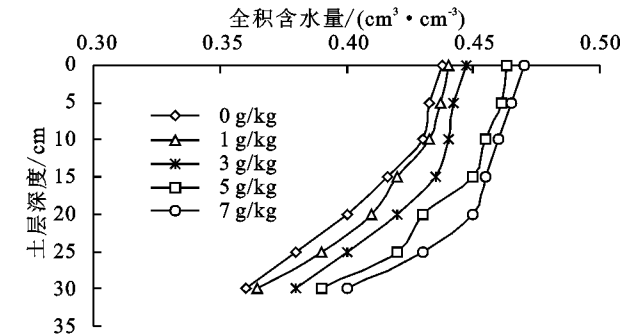


图 4 5 种腐殖酸施量下土壤含水量剖面变化

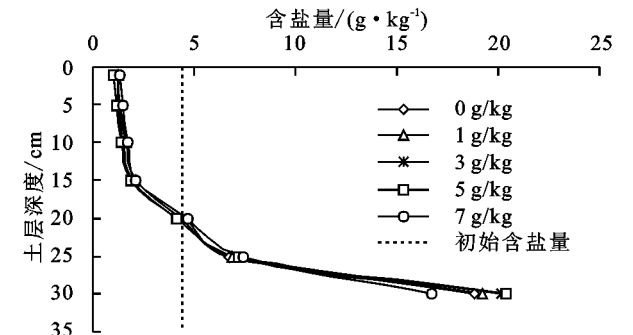


图 5 5 种腐殖酸施量对土壤剖面含盐量分布的影响

2.3 施加腐殖酸对土壤 pH 的影响

土壤 pH 是土壤酸碱度的强度指标,是土壤的基本性质和肥力的重要影响因素之一,也是盐碱土改良效果的重要参考指标。由图 6 可知,与对照相比,腐殖酸能够明显的降低土壤 pH,但处理 1,3,5,7 g/kg 之间差异并不显著。降低的原因在于:(1)腐殖酸主要由胡敏酸和富里酸组成属于酸性有机物,能够降低土壤 pH;(2)腐殖酸中的有机质在水中溶解产生碳酸使得 pH 向中性移动。同时还发现,施加腐殖酸后各处理随着施量的增加 pH 呈增加的趋势,但增加并不显著。这与 Shaaban 等^[14]的研究结果一致。增加的原因可能是由于游离阳离子减少使得 CaCO₃ 部分溶解,导致弱碱性的 HCO₃⁻ 增加使 pH 增高。

2.4 施加腐殖酸对入渗模型参数的影响

水力参数是反映水分入渗的重要指标。为了评价腐殖酸对入渗特征的影响,选用 Philip 模型中的吸渗率

S 和代数模型中综合形状系数 α 进行研究。将累积入渗量和湿润锋深度的实测数据拟合,得到累积入渗量与湿润锋的关系见表 1。令 $A=\frac{(\theta_s-\theta_r)}{(1+\alpha)}$,将 A 值带入计算得到综合性状系数 α ;将累积入渗量和入渗时间实测值带入到 Philip 入渗模型中,得到吸渗率 S。

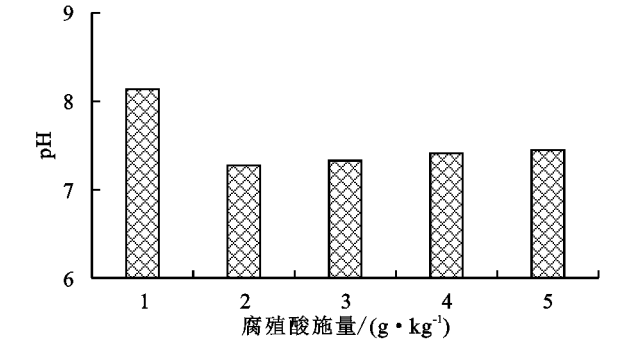


图 6 5 种腐殖酸施量下土壤 pH 变化

表 1 累积入渗量与湿润锋关系及 R^2						
公式		腐殖酸施量/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)				
		0	1	3	5	7
$I=AZ_fA$	决定	0.4028	0.4089	0.4109	0.4238	0.4313
	系数 R^2	0.9989	0.9986	0.9996	0.9998	0.9988

表 2 为腐殖酸施量对应的 S、 α 值及决定系数 R²。由表 2 可知,吸渗率 S 与腐殖酸施量呈负相关关系,综合形状系数 α 则随着腐殖酸施量的增加而增加;吸渗率的降低再次证明腐殖酸的减渗作用,综合形状系数 α 的增加说明土壤结构的变化。分析发现,2 个参数与腐殖酸施加量均存在线性函数关系(图 7),其决定系数 R² 均大于 0.9。水力参数吸渗率 S 减少和 α 增加充分说明腐殖酸对土壤入渗的减渗作用及土壤结构改善作用。

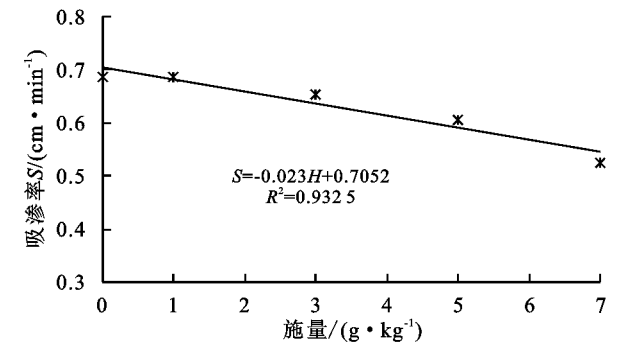
表 2 入渗模型拟合参数及 R²

入渗模型	参数	腐殖酸施量/(g·kg ⁻¹)				
		0	1	3	5	7
Philip 模型	吸渗率 S/(cm·min ⁻¹)	0.6871	0.6867	0.6532	0.6060	0.5253
	决定系数 R ²	0.9860	0.9970	0.9890	0.9930	0.9700
	综合形状系数 α	0.0427	0.0440	0.0475	0.0505	0.0531
代数模型	决定系数 R ²	0.9880	0.9740	0.9900	0.9930	0.9890

2.5 代数模型描述含水量分布的准确性分析

为了评价代数模型对剖面水分分布描述的准确性,将拟合得到的综合形状系数 α 代入式(3),得到土壤含水量剖面分布的理论值。水分运动十分复杂,目前数学模型被广泛地用于描述水分运动和分布,为了更好地评价模型模拟的准确性,采用 RMSE、MAE 指标进行评价(表 3)。从表 3 可以看出,均方根误差、平均绝对误差分别为 0.005~0.018,0.004~0.014 cm³/cm³,这说明模型模拟的准确性。由此可以看出,含水量剖面计算值与实测值比较吻合。综上所述

述,代数模型可以较为准确计算施加腐殖酸的滨海盐碱土一维垂直入渗土壤含水量剖面分布规律。产生



误差的主要原因:(1)假设土柱中土壤均质,实际难免不均匀;(2)取样过程中的误差。

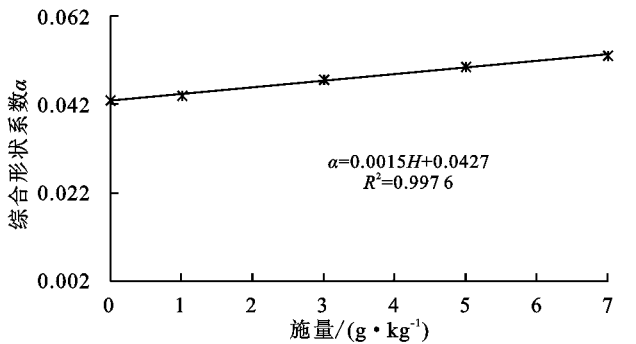


图 7 腐殖酸施量对模型参数的影响

表 3 误差分析					
处理/ (g·kg ⁻¹)	深度/ cm	实测值/ (cm ³ ·cm ⁻³)	计算值/ (cm ³ ·cm ⁻³)	RMSE/ (cm ³ ·cm ⁻³)	MAE/ (cm ³ ·cm ⁻³)
0	0	0.438	0.439	0.018	0.014
	5	0.433	0.437		
	10	0.430	0.433		
	15	0.416	0.428		
	20	0.400	0.422		
	25	0.380	0.412		
	30	0.360	0.383		
	0	0.440	0.441		
	5	0.437	0.439		
	10	0.433	0.435		
1	15	0.420	0.430	0.013	0.010
	20	0.410	0.423		
	25	0.390	0.413		
	30	0.365	0.383		
	0	0.447	0.449		
	5	0.442	0.446		
	10	0.440	0.442		
	15	0.435	0.437		
	20	0.420	0.429		
	25	0.400	0.418		
3	30	0.380	0.385	0.008	0.006
	0	0.463	0.464		
	5	0.461	0.461		
	10	0.455	0.456		
	15	0.450	0.450		
	20	0.430	0.442		
	25	0.420	0.430		
	30	0.390	0.394		
	0	0.464	0.470		
	5	0.461	0.465		
5	10	0.456	0.460	0.006	0.004
	15	0.450	0.455		
	20	0.430	0.450		
	25	0.430	0.430		
	30	0.394	0.400		
7	0	0.442	0.450	0.005	0.005
	5	0.430	0.430		
	10	0.430	0.430		
	15	0.450	0.455		
	20	0.442	0.450		
	25	0.430	0.430		
	30	0.394	0.400		
	0	0.442	0.450		
	5	0.430	0.430		
	10	0.430	0.430		

3 结 论

(1)入渗相同时间,各种腐殖酸施量处理累积入渗量和湿润锋均随腐殖酸施量的增加而减小;入渗相同深度,所需的时间随腐殖酸施量的增加而增加;累积入渗量也呈现增加的趋势。

(2)相同土层深度,土壤含水量随腐殖酸施量的增加而增加,剖面平均含水量也遵循相同的规律;土壤盐分随深度的增加为增加趋势,脱盐率与施量呈正比例关系。

(3)施加腐殖酸可以有效降低土壤 pH,然而随着施量的增加各处理间差异并不显著。

(4)Philip 模型和代数模型均能较好描述施腐殖酸条件下的水分入渗过程。吸渗率 S 随腐殖酸施量的增加而减少,综合形状系数 α 随腐殖酸施量的增加而增加。代数模型能够描述该入渗条件下土壤含水量剖面分布。

腐殖酸处理有利于改善盐碱地土壤的理化性质,并促进盐分的淋洗,希望该结果对腐殖酸在滨海盐碱地的应用有一定的参考作用。

参考文献:

[1] 张梦璇,董智,李红丽,等.不同白榆品系对滨海盐碱地的改良效果及盐分离子的分布与吸收[J].水土保持学报,2018,32(6):340-345.

[2] 张乐,徐平平,李素艳,等.有机—无机复合改良剂对滨海盐碱地的改良效应研究[J].中国水土保持科学,2017,15(2):92-99.

[3] 张宁.滨海盐碱地起垄种植和地力提升技术相结合对土壤生态系统的影响研究[D].济南:齐鲁工业大学,2016.

[4] Xiao A, Ouyang Y, Li W C. et al. Effect of organic manure on Cd and As accumulation in brown rice and grain yield in Cd-As-contaminated paddy fields[J]. Environmental Science of Pollution Research, 2017, 24 (10): 9111-9121.

[5] 褚琳琳,康跃虎,陈秀龙,等.喷灌强度对滨海盐碱地土壤水盐运移特征的影响[J].农业工程学报,2013,29(7):76-82.

[6] 孙兆军,赵秀海,王静,等.脱硫石膏改良龟裂碱土对枸杞根际土壤理化性质及根系生长的影响[J].林业科学研究,2012,25(1):107-110.

[7] 陈小兵,杨劲松,杨朝晖,等.渭干河灌区灌排管理与水盐平衡研究[J].农业工程学报,2008,12(4):59-65.

[8] 路晓筠,项卫东,郑光耀,等.盐碱地改良措施研究进展[J].江苏农业科学,2015,43(12):5-8.

[9] 李颖,陶军,钞锦龙,等.滨海盐碱地“台田—浅池”改良措施的研究进展[J].干旱地区农业研究,2014,32(5):154-160,167.

[10] 刘小京.环渤海缺水盐碱地改良利用技术研究[J].中国生态农业学报,2018,26(10):1521-1527.

[11] 王帅,王楠,张溪,等.改良方式对盐碱地稻田总有机碳及腐殖质组成的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2017,45(11):43-50.

[12] 南江宽,陈效民,王晓洋,等.不同改良剂对滨海盐渍土盐碱指标及作物产量的影响研究[J].土壤,2013,45(6):1108-1112.

[13] 王倩姿,王玉,孙志梅,等.腐植酸类物质的施用对盐碱地的改良效果[J].应用生态学报,2019,30(4):1227-1234.

[14] Shaaban M, Abid M, Abou-Shanab R A I. Amelioration of salt affected soils in rice paddy system by application of organic and inorganic amendments[J]. Plant, Soil and Environment, 2013, 59(5): 227-233.

[15] 孙在金,黄占斌,陆兆华.不同环境材料对黄河三角洲滨海盐碱化土壤的改良效应[J].水土保持学报,2013,27(4):186-190.

[16] 庄振东,李絮花.腐植酸氮肥对玉米产量、氮肥利用及氮肥损失的影响[J].植物营养与肥料学报,2016,22(5):1232-1239.

[17] García A C, Berbara R L L, Farias L P, et al. Humic acids of vermicompost as an ecological pathway to increase resistance of rice seedlings to water stress[J]. African Journal of Biotechnology, 2012, 11(13): 3125-3134.

[18] Damin G E, Micle, Valer, et al. Mobilization of Cu and Pb from multi-metal contaminated soils by dissolved humic substances extracted from leonardite and factors affecting the process[J]. Journal of Soils and Sediments, 2019, 19(7): 2869-2881.

[19] Ondrasek G, Romic D, Rengel Z, et al. Interactions of humates and chlorides with cadmium drive soil cadmium chemistry and uptake by radish cultivars[J]. Science of The Total Environment, 2020, 702: 134887.

[20] 孙在金.脱硫石膏与腐植酸改良滨海盐碱土的效应及机理研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2013.

[21] Philip J R. The theory of infiltration: 1. The infiltration equation and its solution[J]. Soil Science, 1957, 83(5): 345-357.

[22] Wang Q, Horton R, Shao M. Algebraic model for one-dimensional infiltration and soil water distribution[J]. Soil Science, 2003, 168(10): 671-676.

[23] 顾文兰.施用腐殖酸对土壤—维入渗和蒸发的影响试验研究[D].西安:西安理工大学,2017.

[24] 章智明,黄占斌,单瑞娟.腐植酸对土壤改良作用探讨[J].环境与可持续发展,2013,38(3):109-111.

[25] 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.

[26] Du J, Jing C, Duanc J, et al. Removal of arsenate with hydrous ferric oxide coprecipitation: Effect of humic acid[J]. Journal of Environmental Sciences, 2014, 26(2): 240-247.

[27] 单瑞娟,黄占斌,柯超,等.腐植酸对土壤重金属镉的淋溶效果及吸附解吸机制研究[J].腐植酸,2015(1):12-17.

[28] 刘志雄,张佳丽,洪许言,等.CuO/腐植酸复合材料的制备及其吸附性能[J].化工进展,2018,37(10):4060-4067.

[29] 李艳红,庄锐,张政,等.褐煤腐植酸的结构、组成及性质的研究进展[J].化工进展,2015,34(8):3147-3157.

(上接第 287 页)

[31] 崔曾杰,耿艳秋,范丽丽,等.生物菌肥对盐碱地水稻生长发育及产量的影响[J].吉林农业科学,2013,38(5):32-35.

[32] 梁运江,许广波,郑哲,等.生物菌肥对水稻营养特性及增产效果的初步研究[J].土壤通报,2001,32(2):88-89.

[33] 刘雅文,马资厚,潘复燕,等.不同土壤添加剂对太湖流域水稻产量及氮磷养分利用的影响[J].农业环境科学学报,2017,36(7):1395-1405.

[34] Fettweis U M W, Schimansky C, Fuhr F. Lysimeter experiments on the translocation of the carbon-14-labelled nitrification inhibitor 3, 4-dimethylpyrazole phosphate(DMPP) in a gleyic cambisol[J]. Biology and Fertility of Soils, 2001, 34: 126-130.

[35] 朱丽霞,章家恩,刘文高.根系分泌物与根际微生物相互作用研究综述[J].生态环境,2003,12(1):102-105.