

改良剂对盐化潮土饱和导水率的影响

刘璐¹, 张晴雯², 潘英华¹, 骆伟蓉¹, 杨永秦¹

(1. 鲁东大学 资源与环境工程学院, 山东 烟台 264000; 2. 中国农业科学院 农业环境与可持续发展研究所, 北京 100086)

摘要:土壤导水性是影响土壤水分入渗、淋溶等过程的重要性质,而饱和导水率是在土壤为水饱和后影响土壤渗透能力、地表径流发生程度、盐分淋洗状况的重要参数。以室内土柱试验为主要手段,以盐化潮土为研究对象,探究聚丙烯酰胺(PAM)、竹炭型土壤调理剂(BC)、菌型有机复合肥(BO)对盐化潮土饱和导水率的影响。(1)盐化潮土饱和导水率随着BC用量增加而增大,BC用量为20 g/kg时盐化潮土饱和导水率为0.041 cm/min,较CK增加32.3%;盐化潮土的饱和导水率随PAM用量的增加而减小,PAM施用量为1 g/kg土壤饱和导水率为0.0127 cm/min,较CK降低59.0%;文中选取的BO各处理对土壤饱和导水率的影响效果较小,各用量间无显著差异。(2)与CK相比,BC和BO各处理所需的渗透时间均较短,7 h的累计出流量较大;PAM各处理所需的渗透时间较长,7 h的累计出流量较小。不同改良剂对盐化潮土导水性能的作用效果不同,本研究可为改良剂的选择与用量提供数据支持。

关键词:盐化潮土; 饱和导水率; 聚丙烯酰胺; 竹炭型土壤调理剂; 菌型有机复合肥

中图分类号: S152

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2019)03-0066-06

Effects of Soil Amendments on Hydraulic Conductivity of Salinized Chao Soil

LIU Lu¹, ZHANG Qingwen², PAN Yinghua¹, LUO Weirong¹, YANG Yongqin¹

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Ludong University, Yantai, Shandong 264000, China; Institute of Agricultural Environment and Sustainable Development, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100086, China)

Abstract: Soil hydraulic conductivity is an important characteristic which affects soil water infiltration, leaching process and so on. And saturated hydraulic conductivity is the one of soil water parameters which influences soil infiltration capacity, surface runoff, salt leaching. In this paper, with the indoor soil column experiments and salinized chao soil, the effects of different soil amendments such as polyacrylamide (PAM), bamboo charcoal soil conditioner (BC) and bacterial organic compound fertilizer (BO) on soil water conductivity was investigated. The results show that: (1) the saturated hydraulic conductivity of salinized chao soil increases with the increase of BC dosage; when BC dosage is 20 g/kg, the saturated hydraulic conductivity of salinized chao soil is 0.041 cm/min, which is 32.3% higher than CK; the saturated hydraulic conductivity of soil decreases with the increase of PAM dosage; The PAM application rate is 1 g/kg, soil saturated hydraulic conductivity is 0.0127 cm/min, which is 59.0% lower than CK; the BO treatment selected in this paper is saturated with soil, the effect of water rate is small, and there is no significant difference between the amounts; (2) compared with CK, the permeation time required for each treatment of BC and BO is shorter, and the cumulative outflow at 7 hours is larger; the permeation time required for each treatment of PAM is longer, and the cumulative outflow at 7 hours is smaller. Different amendments have different effects on the water conductivity of salinized chao soil. This study can provide data support for the selection and dosage of soil modifiers.

Keywords: salinized chao soil; saturated hydraulic conductivity; polyacrylamide; bamboo charcoal organic compound fertilizer; bacteria organic compound fertilizer

收稿日期: 2018-10-19

修回日期: 2018-12-05

资助项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2015ZX07203-007); 山东省高等学校优势学科人才团队培育计划; “蓝黄两区滨海资源与环境团队”项目; 山东省自然科学基金资助项目(ZR2013DM010)

第一作者: 刘璐(1992—), 女, 山东潍坊人, 硕士研究生, 研究方向: 区域水土资源利用与调控研究。E-mail: liulu110143@163.com

通信作者: 张晴雯(1975—), 女, 宁夏中宁人, 博士, 研究员, 主要从事农业面源污染物迁移转化及调控研究。E-mail: zhangqingwen@caas.cn

潘英华(1973—), 女, 黑龙江讷河人, 博士, 教授, 主要从事区域水土资源利用与调控研究。E-mail: panxingxing@126.com

土壤导水性能是影响土壤水分入渗、淋溶等过程的重要性质,其受降雨、植被、人类活动等外在因素及土壤母质、矿物组成、质地等内在因素的影响。饱和导水率是反映饱和土壤导水性能和渗透能力的重要参数,直接影响地表径流发生程度、盐分淋洗状况。因此,对其进行人为调控,将对土壤水分入渗、径流发生、盐分淋溶等过程产生重要影响。土壤中施加改良剂可以调节土壤物理结构,进而可能影响土壤导水性能。不同的土壤改良剂,因其物质组成及作用机理不同,对土壤导水性能的作用效果差异较大。贾利梅等^[1]在田间 0—20 cm 表层土壤中施用硅藻泥和泥沙,硅藻泥处理(1.5 t/hm², 3 t/hm², 4.5 t/hm²),土壤饱和导水率分别降低 1.18%, 15.88%, 22.65%;泥沙处理(20 t/hm², 40 t/hm²)的土壤饱和导水率增加 17.94%, 60.29%,泥沙可以提高黏质盐土的饱和导水率,而硅藻泥则会降低黏质盐土的饱和导水率。杨永辉等以黄土高原土为研究对象,研究表明 PAM 用量为 54.5 mg/kg, 112.9 mg/kg, 169.4 mg/kg 时,土壤饱和导水率随 PAM 用量的增加而增大^[2]。姜井军等研究表明,在盐碱土中施加生物炭能有效降低土壤碱化度和水溶性盐总量,提高土壤的持水能力、有机碳含量及微生物活性,从而有效改良盐土^[3]。梁嘉平等通过室内一维垂直入渗试验得出,随着混合施用石膏量增加(0, 1.8%, 3.6%, 5.4%, 7.2%),土壤饱和导水率逐渐减小,且分别减小 18.42%, 36.84%, 59.21%和 75.00%^[4]。

盐碱地是各种盐土和碱土以及不同程度盐化和碱化土壤的总称^[5]。其特点是盐碱成分含量高,土壤物理性状较差,土壤微生物代谢缓慢,有机质含量少,土壤肥力低下。过多的盐分积累,一方面导致气孔导度降低,作物的光合作用减弱;另一方面迫使作物吸收过多的盐基离子,如钠离子、氯离子等,造成离子毒害,导致叶片过早脱落^[6],还会导致严重的营养元素失衡,致使作物不能正常吸收其他的营养元素^[7]。目

前我国盐化潮土总面积约 3 600 万 hm²,占全国可利用土地面积的 4.88%^[8-10]。在耕地资源约束趋紧的今天,盐碱地作为后备耕地资源,其可持续利用已受到国内外学者的高度关注。

聚丙烯酰胺(Polyacrylamide,简称 PAM)因其具有成本低、效果好、施用方便以及无毒无污染^[11]等优势而成为重要的土壤改良材料。竹炭型土壤调理剂(Bamboo charcoal organic compound fertilizer, BC)以竹炭、竹灰和酢液等为主要原料,具有丰富的孔隙结构、极高的比表面积和良好的吸附特性^[12],可有效改善土壤的持水能力。菌型有机复合肥(Bacteria organic compound fertilizer, BO)是一种生物菌剂,通过微生物的生命活动促使作物得到特定肥料效应,是常用肥料中的一种^[13]。土壤导水性能与土壤盐分的聚集与淋洗联系紧密,因而施加土壤改良剂所引起的土壤导水性能变化是亟待关注的科学问题。

因此,本文选用 PAM, BC 和 BO 为土壤改良剂,利用室内土柱试验,探究改良剂对盐化潮土导水性能的影响,以期试验结果对于正确认识改良剂对农田水盐运移过程的影响,以及在开发利用盐渍化土地资源中,合理使用土壤改良剂起到一定的指导和借鉴作用。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验土样采自山东省滨州市滨城区农田 0—30 cm 土层。土样避光条件下自然风干,去除杂质,过 2 mm 筛。利用吸管法测定土壤机械组成,土壤砂粒、粉粒、黏粒质量分数分别为 63.25%, 28.32%, 8.43%,质地为砂质黏壤土(国际制),土壤类型为盐化潮土。试验所用聚丙烯酰胺(PAM)分子量为 800 万,阴离子型;竹炭型土壤调理剂(BC)由上海时科生物科技有限公司生产;菌型有机复合肥(BO)由北京恒源嘉达科技有限公司生产。土壤及改良剂的盐分状况见表 1。

表 1 试验土壤与改良剂的盐分含量状况

试验材料	电导率/ (mS·cm ⁻¹)	pH 值	盐分离子含量/(g·kg ⁻¹)					
			HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺ , Na ⁺
盐化潮土	0.63	8.23	0.35	0.73	0.07	0.15	0.26	0.44
BC	1.63	7.52	0.28	1.54	1.38	5.18	0.82	21.04
BO	3.26	7.94	0.62	2.48	2.02	1.57	1.8	59.7
PAM	6.33	6.87	4.23	38.83	1.52	1.68	1.14	—

1.2 试验方法

土柱试验中,将 PAM 与盐化潮土按照质量比为 0.2 g/kg, 0.4 g/kg, 0.6 g/kg, 0.8 g/kg 和 1 g/kg 混合

均匀,分别记作 PAM_{0.2}, PAM_{0.4}, PAM_{0.6}, PAM_{0.8}, PAM₁;将 BC 与 BO 按照质量比 4 g/kg, 8 g/kg, 12 g/kg, 16 g/kg, 20 g/kg 混合均匀,分别记作 BC₄,

BC₈, BC₁₂, BC₁₆, BC₂₀ 以及 BO₄, BO₈, BO₁₂, BO₁₆, BO₂₀; 以不添加任何物质的盐化潮土为对照, 记作 CK。试验共设计 16 个处理, 每个处理 3 次重复。

采用定水头渗透法测定饱和导水率(图 1)。试验所用土柱高 10 cm, 由内径为 6.2 cm, 高 2 cm 的有机玻璃圆环嵌套组装而成。土柱顶部和底部各装一层石英砂, 石英砂与土样之间用滤纸隔开。风干土与改良剂混合物按 2 cm 一层装入, 控制装土容重为 1.35 g/cm³, 制成长 8 cm 的均质土柱。用马氏瓶从土柱表面供水, 接样装置固定在土柱支撑架上。接样装置主要由塑料漏斗与土柱架子组合形成, 为保证出流顺畅, 将漏斗边缘扎一小孔, 保证内外气压平衡, 不影响渗出液流动。试验装置示意图如图 1 所示。

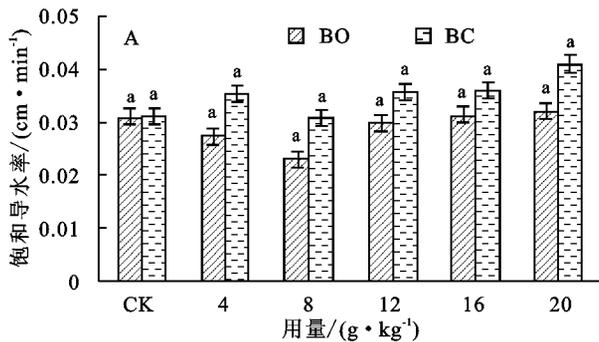
试验开始后, 用计时器计时, 记录接样漏斗中第一滴水滴下的时间和马氏瓶读数, 而后每隔 1 h, 记录马氏瓶读数, 换接样瓶并称重以记录出流流量。出流量达到稳定时停止接样, 试验结束。

1.3 数据处理与分析

对于饱和土壤样品, 若以固定水头给其供水, 则当水流稳定后, 根据达西定律, 水流通量的大小与土壤饱和导水率 K 成正比。根据达西定律方程计算土壤饱和导水率, 即:

$$K_s = \frac{Q}{At} \cdot \frac{L}{\Delta H}$$

式中: K_s 为土壤饱和导水率(cm/min); Q 为出流量



(cm³); ΔH 为水头高度(cm); L 为样品长度(cm); A 为土柱横截面积(cm²); t 为时间(min)。

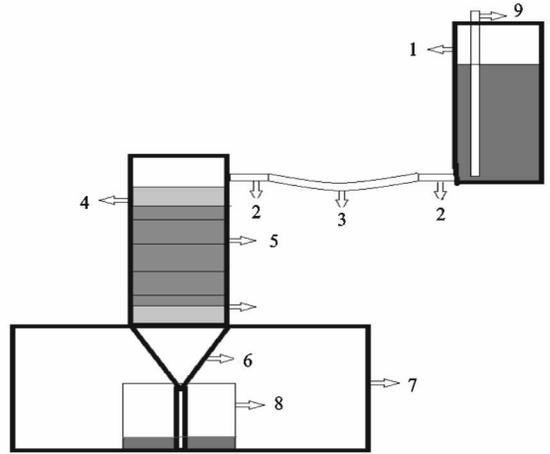


图 1 试验装置示意图

本文中的数据均采用 Excel 2013 和 SPSS 20.0 进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 改良剂对土壤饱和导水率的影响

图 2 是土表施加 PAM, BO 和 BC 情况下的土壤饱和导水率。由于 PAM 施用量无法与 BO、BC 相同, 因此, 取其任一用量(1 g/kg, PAM₁)作为处理进行比较分析, 从后续的分析结果也可以看到, PAM 其他用量处理的饱和导水率也较对照低。表 2 列出了 CK 与不同处理土壤饱和导水率的相对增加值。

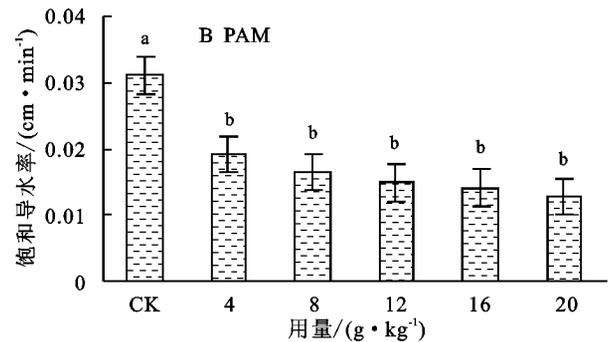


图 2 改良剂对土壤饱和导水率的影响

结合图 2 和表 2 可知, BO, BC 和 CK 的土壤饱和导水率无显著差异, 但与 PAM 处理的饱和导水率差异较显著($p < 0.05$)。PAM₁, BO₂₀, BC₂₀ 的饱和导水率分别为 0.013 cm/min, 0.029 cm/min, 0.041 cm/min, 较 CK (0.031 cm/min) 增加 -59.0%, -6.8%, 32.3%。这是由于 PAM 与土壤混合后, 经过水分长时间浸泡后膨胀, 水的黏滞性增加, 水分在土壤孔隙中流动时的摩擦力增大, 影响土壤入渗, 从而导致水分的渗流速率下降^[14]。PAM 用量越大, 这种黏滞作用越强^[15], 从而引起水分入

渗阻力增大, 降低土壤饱和导水率^[16]。韩凤朋等^[17]通过表面施撒的方式研究了 PAM 对土壤物理结构及水分分布的影响, 表层施用 PAM 超过 2 g/m² 时, 土壤体积质量开始增加, 饱和导水率降低; 杨明金等^[18]的研究表明, 磷石膏用量一定的情况, 饱和导水率随 PAM 施用量增加而减小。由图 2B 可知, PAM 各用量处理与 CK 之间存在显著差异($p < 0.05$), 但 PAM 各用量处理之间无显著差异($p > 0.05$)。施用 PAM 之后, 盐化潮土的饱和导水率与 CK 相比明显

降低,且PAM施用量越多,土壤的饱和导水率越小。由此可见,可以考虑将PAM应用于防止农田水分深层渗漏,砂质土壤水土保持等领域。

由图2A可知,BC各用量处理之间与CK的土壤饱和导水率无显著差异;由表2可知,BC各处理土壤饱和导水率的相对增加值均为正,说明BC各处理均能改善土壤导水性能,提高土壤饱和导水率。这可能是由于BC的加入使土壤具有良好的结构和渗透性能,进而对土壤导水性能提高起到一定的促进作用。王红兰等^[19]在紫色土中的研究表明,生物质炭可以增强土壤的持水能力,并使表层和亚表层土壤的饱和导水率分别平均增加45%和35%。陈心想等^[20]指出生物质炭可以吸附和保持水分,并能增强土壤水分的渗透性。因此,含有部分竹炭的BC亦能够增大土壤饱和导水率。在生产实践中,可以考虑将竹炭型土壤调理剂施用于黏粒含量高的土壤中,改善土壤的导水性能,增加水分入渗量,提高水分利用率。

表2 不同处理土壤饱和导水率相对增加值

处理	饱和导水率/ ($\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$)	相对 增加值/%
CK	0.0303	0.00
PAM _{0.2}	0.0192	-36.60
PAM _{0.4}	0.0165	-45.60
PAM _{0.6}	0.0149	-50.70
PAM _{0.8}	0.0141	-53.40
PAM ₁	0.0127	-58.00
BO ₄	0.0276	-9.00
BO ₈	0.0232	-23.50
BO ₁₂	0.0301	-0.70
BO ₁₆	0.0315	4.00
BO ₂₀	0.0321	6.10
BC ₄	0.0354	16.70
BC ₈	0.0307	1.30
BC ₁₂	0.0357	17.90
BC ₁₆	0.0361	19.20
BC ₂₀	0.0410	32.30

结合图2和表2可知,BO对土壤饱和导水率影响较小,各处理间无显著差异。BO₄的土壤饱和导水率为0.0276 cm/min ,较CK减小9%;BO₈的土壤饱和导水率为0.0232 cm/min ,较CK减小23.5%,推测是与BO中的钠离子有关,有研究表明,钠离子对土壤团聚体的稳定性具有不良影响,钠离子导致黏粒分散,阻塞土壤孔隙^[21]。从表1可见,BO钠离子含量高达59.7 g/kg ,钠离子对土壤颗粒的分散作用可能是导致土壤

饱和导水率降低的主要原因。BO₈处理土壤钠离子含量要比BO₄处理高,BO各处理中,BO₈土壤饱和导水率最小。钠离子对土壤黏粒溶液稳定性的影响存在一个阈值^[22],对于BO₁₂,BO₁₆,BO₂₀而言,可能是由于BO中的钠离子含量过多,分散黏粒的能力减小,因此对土壤饱和导水率影响较小。

2.2 改良剂作用下的土壤渗透时间

渗透时间(土柱底部有水渗出的时间)是可以间接衡量土壤导水性能的又一指标,表3为各改良剂及其不同用量情况下的渗透时间。与CK相比,BC和BO各处理所需的渗透时间均较短,渗透较快。通过对改良剂施用量与土壤渗透时间的相关分析,PAM各用量处理的相关系数为0.979($p < 0.05$),土壤渗透时间与PAM施用量之间显著相关,且PAM各用量处理的渗透时间均大于CK(47 min),PAM用量越多,所需的渗透时间越长,PAM₁的渗透时间为87 min。这是由于施用PAM后,PAM在水中溶解,一方面使土壤颗粒黏聚在一起,另一方面土壤水粘滞性增强,所需要的渗透时间增加。BO和BC各用量处理,改良剂施用量与土壤渗透时间之间的相关系数分别为0.652,0.703($p < 0.05$),相关性较显著。研究表明,竹炭型土壤调理剂的施用超过一定量时,造成短期内土壤结构过于疏松^[19],所需渗透时间大大缩短,BC₂₀处理渗透时间仅有31 min。随BO用量的增多,钠离子对土壤粘粒的分散作用减小,对土壤通气透水能力的影响小,渗透时间缩短,BO₂₀处理渗透时间最短,为31 min。

表3 各处理所需的渗透时间

处理 类型	渗透 时间/min	处理 类型	渗透 时间/min	处理 类型	渗透 时间/min
CK	47ab	CK	47ab	CK	47ab
PAM _{0.2}	57b	BO ₄	35a	BC ₄	37a
PAM _{0.4}	69c	BO ₈	38a	BC ₈	44a
PAM _{0.6}	75d	BO ₁₂	37a	BC ₁₂	41a
PAM _{0.8}	78e	BO ₁₆	35a	BC ₁₆	37a
PAM ₁	85f	BO ₂₀	31a	BC ₂₀	35a

2.3 改良剂作用下的土壤出流量

通过对比BC₂₀,BO₂₀及PAM₁处理之间7 h内土壤的累计出流量,并与CK相比较,判断各处理的土壤导水性能,结果见表4。7 h之后BO₂₀,BC₂₀累计出流量为145.6 cm^3 ,172.04 cm^3 ,分别比CK(132.67 cm^3)提高了9.7%,29.7%;而PAM₁累计出流量为64.94 cm^3 ,较CK累计出流量减少51.1%。通过单因素方差分析可知,CK,BO与BC之间土壤累计出流量差异性不显著,前

4 h 内 CK 与 PAM 之间有显著的差异性 ($p < 0.05$)。BC 通过改善土壤颗粒结构,进而改善土壤导水性能,BC 主要为蜂窝状和管状孔隙结构,此结构是其吸附养分和水分的物理基础^[19];BO 富含有机质,可以改良盐化潮土的物理结构。随着入渗历时的延长,PAM 与土壤结合的更加充分,且用量越大粘结性越好,土壤有效孔隙减少,出流量总体较少。这与杨明金的试验结果一致,施用 PAM 能够减小土壤的饱和导水率,增强土壤水稳性^[12]。

图 3 是各处理 7 h 内累计出流量的变化情况。由图 3A 可知,与 CK 相比,BO₄ 和 BO₈ 两个处理累计出流量较少,这与饱和导水率的变化相一致,BO₈ 的饱和导水率最小,累计出流量最少,7 h 的累计出流量仅有 121.60 cm³。BO₁₂,BO₁₆ 以及 BO₂₀ 处理 7 h 的累计出流量分别为 141.98 cm³,143.96 cm³,145.60 cm³,相差不大,结合表 2 可知,BO 用量超过 8 g/kg 时,土壤导水性能相对稳定,变化较小。

表 4 累计出流量大小

时间/h	累计出流量/cm ³			
	BO	BC	PAM	CK
1	21.97a	21.96a	10.42b	19.32a
2	44.11a	43.19a	20.37b	38.85a
3	65.62a	64.36a	29.90b	58.02a
4	86.21a	85.10a	39.22b	76.39a
5	106.20a	122.74a	48.09b	94.84ab
6	126.19a	147.26a	56.57b	113.1ab
7	145.60a	172.04a	64.94b	132.67ab

图 3B 是 BC 各用量处理土壤累计出流量的变化,BC₈ 较 CK 土壤饱和和导水率仅增加 1.3%(表 2),BC₈ 与 CK 土壤累计出流量曲线较吻合,与饱和和导水率的变化一致。BC₄,BC₁₂ 和 BC₂₀ 3 个处理累计出流量曲线吻合度较高;4 h 之后,BC₂₀ 出流量迅速增加,推测是因为 BC 产生输水效应,累计出流量增加。

由图 3C 可知,施用 PAM 之后,单位时间内的平均出流量减小 50% 左右,其中 PAM_{0.2} 的平均出流量最小,仅有 9.5 cm³。施用少量 PAM 能够改善土壤结构,使土壤中分散的大颗粒黏结,促进土壤团聚体生成,土壤孔隙增加,降低土壤水分入渗速率,使水分入渗更均匀,较多的水分保留在土壤中,这对于促进根系吸水、改善砂土保水特性等方面具有重要意义^[23]。其余各用量 PAM_{0.4},PAM_{0.6},PAM_{0.8},PAM₁ 平均出流量分别为 10.3 cm³,10.3 cm³,10 cm³,10.1 cm³,根据 Gungor 和 Karaoglan^[24] 研究,当 PAM 施用量过大时,土壤中可交换 Na⁺ 的存在会减小 PAM 水溶液的黏滞性,从而使土壤水分的入渗速率增加。

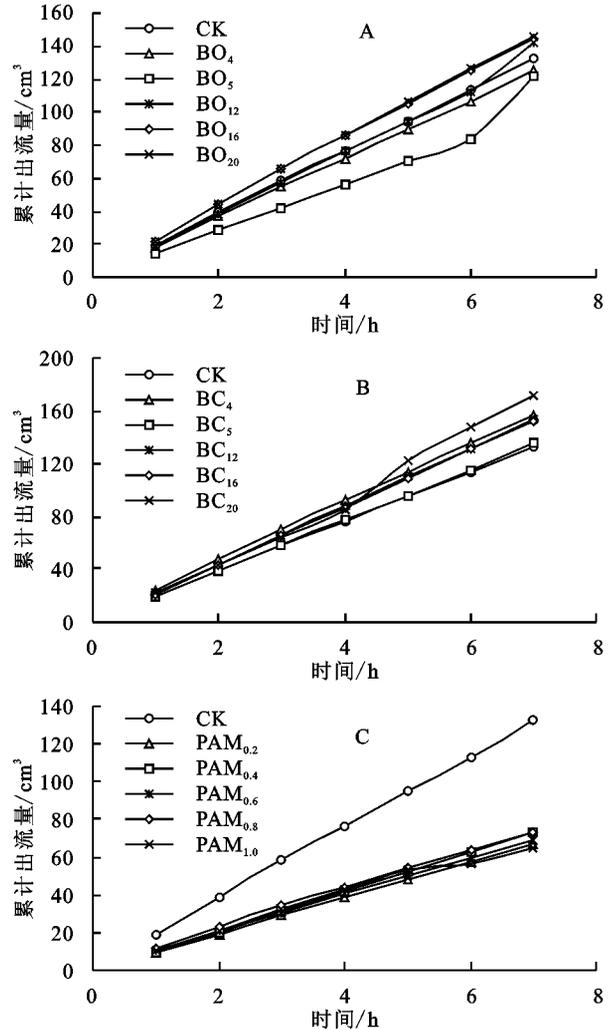


图 3 各处理累计出流量大小

3 结论

(1) 盐化潮土饱和和导水率随着 BC 用量增加而增大,BC 用量为 20 g/kg 时盐化潮土饱和和导水率为 0.041 cm/min,较 CK 增加 32.3%;盐化潮土的饱和和导水率随 PAM 用量的增加而减小,PAM 施用量为 1 g/kg 土壤饱和和导水率为 0.0127 cm/min,较 CK 降低 59.0%;本文中选取 6 个 BO 用量(0 g/kg,4 g/kg,8 g/kg,12 g/kg,16 g/kg,20 g/kg),对土壤饱和和导水率的影响效果较小,各用量之间无显著差异。

(2) 与 CK 相比,BC 和 BO 各处理渗透较快,所需的渗透时间均较短;BC₂₀ 和 BO₂₀ 的渗透时间分别为 35 min 和 31 min。PAM 各处理渗透较慢,所需的渗透时间较长,PAM₁ 的渗透时间为 87 min。

(3) 7 h 之后 BO₂₀,BC₂₀ 累计出流量分别为 145.6 cm³,172.04 cm³,均较 CK(132.67 cm³) 提高了 9.7%,29.7%;而 PAM₁ 累计出流量为 64.94 cm³,较 CK 累计出流量减少 51.1%。

(4) 本文中所用3种改良剂按一定比例混合施用情况下对盐化潮土饱和导水率的作用效果需要进一步探究。

参考文献:

- [1] 贾利梅,毛伟兵,孙玉霞,等.不同改良材料对粘质盐土物理性状和棉花产量的影响[J].中国农学通报,2017,33(13):81-87.
- [2] 杨永辉,武继承,赵世伟,等.PAM的土壤保水性能研究[J].西北农科技大学学报,2007,35(12):120-124.
- [3] 姜井军,郭瑞,陈伶俐.生物炭对酸性土和盐碱土改良效果的研究进展[J].农业开发与装备,2014(11):30-32.
- [4] 梁嘉平,史文娟,王全九.石膏对土壤水分入渗特性的影响[J].水土保持通报,2016,36(6):160-164.
- [5] 马晨,马履一,刘太祥,等.盐碱地改良利用技术研究进展[J].世界林业研究,2010,23(2):28-32.
- [6] Farooq M, Hussain M, Wakeel A, et al. Salt stress in maize: effects, resistance mechanisms, and management. A review[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2015,35(2):461-481.
- [7] Hasegawa P M, Bressan R A, Zhu J K, et al. Plant cellular and molecular response to high salinity[J]. Annual Review of Plant Physiology Plant Molecular Biology, 2000,51:463-499.
- [8] 任葳,罗廷彬,王宝军,等.新疆生物改良盐碱地效益研究[J].干旱地区农业研究,2004,22(4):211-214.
- [9] 张显双,朱大为,李秋梅,等.吉林省西部水资源短缺现状及荒漠化防治措施[J].水土保持研究,2006,13(4):98-100.
- [10] 李怀军,刘忠海,郝建成,等.德州市土壤盐渍化概况及改良利用的研究[J].山东农业科学,2008(6):70-72.
- [11] 贾玲侠,李绍才,赵秀兰,等.PAM特性参数对土壤团聚体稳定性的影响[J].东北水利水电,2006,24(4):59-62.
- [12] 王高伟,胡光洲,孔倩.竹炭性能的研究进展[J].世界竹藤通讯,2006,4(4):5-7.
- [13] 刘清玮,揣腾跃,黄曦漫.生物菌剂在药用植物栽培中的研究进展[J].吉林农业,2018(7):64-65.
- [14] 韩凤朋,郑纪勇,李占斌,等.PAM对土壤物理性状以及水分分布的影响[J].农业工程学报,2010,26(4):70-74.
- [15] 杨明金,张勃,王海军,等.聚丙烯酰胺和磷石膏对土壤导水性能的影响研究[J].土壤通报,2009,40(4):747-750.
- [16] 张振华,谢恒星,刘继龙,等.PAM对一维垂直入渗特征向量影响的试验研究[J].中国农村水利水电,2006(3):75-77.
- [17] 刘纪根,雷廷武,蔡强国.施加聚丙烯酰胺后坡长对侵蚀产沙过程的影响[J].水利学报,2004,35(1):57-61.
- [18] 刘东,任树梅,杨培岭.聚丙烯酰胺(PAM)对土壤水分蓄渗能力的影响[J].灌溉排水学报,2006,25(4):56-58.
- [19] 王红兰,唐翔宇,张维,等.施用生物炭对紫色土坡耕地耕层土壤水力学性质的影响[J].农业工程学报,2015,31(4):107-112.
- [20] 陈心想,何绪生,张雯,等.生物炭用量对模拟土柱氮素淋失和田间土壤水分参数的影响[J].干旱地区农业研究,2014,32(1):110-139.
- [21] Cass A, Sumner M E. Soil pore structural stability and irrigation water quality. I. Empirical sodium stability model. II. Sodium stability data[J]. Soil Sci. Soc. Am. J. 1982,46:503-512.
- [22] 杨娟,饶品华,何明.土壤环境中粘粒的分散-凝聚行为及其影响因素[J].上海交通大学学报:农业科学版,2006,24(5):407-413.
- [23] 王全九,张继红,谭帅.微咸水入渗下施加PAM土壤水盐运移特性研究[J].土壤学报,2016,53(4):1056-1064.
- [24] Gungor N, Karaoglan S. Interactions of polyacrylamide polymer with bentonite in aqueous systems. Materials Letters, 2001,48(3/4):168-175.

(上接第65页)

- [24] Boutton T W. $\delta^{13}\text{C}$ values of soil organic carbon and their use in documenting vegetation change in a subtropical savanna ecosystem[J]. Geoderma, 1998,82(1):5-41.
- [25] Bird M, Kracht O, Derrien D, et al. The effect of soil texture and roots on the stable carbon isotope composition of soil organic carbon[J]. Australian Journal of Soil Research, 2003,41(1):77-94.
- [26] Cambardella C A, Elliott E T. Carbon and nitrogen dynamics of soil organic matter fractions from cultivated grassland soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1994,58(1):123-130.
- [27] 杨智杰,崔纪超,谢锦升,等.中亚热带山区土地利用变化对土壤性质的影响[J].地理科学,2010,30(3):475-479.
- [28] 巩杰,陈利顶,傅伯杰,等.黄土丘陵区小流域土地利用和植被恢复对土壤质量的影响[J].应用生态学报,2004,15(12):2292-2296.
- [29] 肖焯,张于光,张小全,等.土地利用变化对土壤肥力影响研究进展[J].世界林业研究,2007,20(1):6-9.