

引流式双扣漏斗加速排盐并抑制返盐试验研究

校 亮^{1,2,3,4}, 徐 青⁴, 衣华鹏⁴, 董志成⁴, 熊东红^{1,2}

(1. 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室, 四川 成都 610041;
2. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041;
3. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049; 4. 鲁东大学地理与规划学院, 山东 烟台 264000)

摘 要: 为有效解决盐碱地植物根系因返盐受到胁迫以及重度退化盐碱地修复难题, 利用盐碱土地“盐随水动”典型特点, 从淋盐和抑盐角度开展盐碱化土壤的微域改良研究, 设计了可快速淋盐的引流式双扣漏斗型防盐害保水的植物栽培系统。对不同处理措施(单形漏斗试验、双扣漏斗试验、引流式双扣漏斗试验、引流式双扣漏斗加壤内隔层试验)效果进行试验研究。结果表明:(1) 采用引流式双扣漏斗加壤内隔层(处理 4)降盐效果最为显著。0~20 cm 土层处理 4 较对照土壤含盐量自 3.64% 下降至 0.66%, 降低达 5.53 倍。(2) 采用处理 4, 棉花发芽、成苗率显著提升, 发芽率由对照组 40.0% 提升至 86.0%; 成苗率较对照组 0% 提升至 82.0%。(3) 不同处理措施下土壤含盐量及棉花种子发芽、成苗率对比发现, 采用引流式双扣漏斗加壤内隔层可快速降低引流式双扣漏斗境内土壤盐分, 显著提高棉花成苗率。研究表明, 该系统可高效淋洗引流式双扣漏斗区土壤盐分, 降低区内水分蒸发, 阻隔区外水盐上行, 防止区内土壤盐化, 创造出保护根系、适宜植物生长的“小生境”。

关键词: 引流式双扣漏斗; 壤内隔层; 盐分; 发芽率; 成苗率

中图分类号: S156.4 **文献标志码:** A

Efficiency of salt drain and inhibiting soil resalinization using a couple lock funnel with streaming function

XIAO Liang^{1,2,3,4}, XU Qing⁴, YI Hua-peng⁴, DONG Zhi-cheng⁴, XIONG Dong-hong^{1,2}

(1. *Key laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Processes, Chengdu, Sichuan 610041, China*;
2. *Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, Chengdu, Sichuan 610041, China*;
3. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*;
4. *School of Geography and Planning, Lu Dong University, Yantai, Shandong 264000, China*)

Abstract: Using the principle of “salt transport along with water movement”, we designed a couple lock funnel system with streaming function to solve some problems, such as plants suffered from soil resalinization stress and restoration of strongly saline-alkaline soil. With this system, fast salt leaching, remarkably reduced evaporation, less upward movement of groundwater and salt could be functioned effectively to avoid soil salinity and create a root-protected habitat suitable for the growth of crops. The results showed that salt content at 0~20 cm layer in treatment 4 (couple lock funnel with streaming function plus interlayer in soil) was 0.66%, reduced by 5.53 times compared with 3.64% in treatment 0 (CK). We adopted cotton as the examination crop, the treatment 4 had higher germination rate and seedling rate, specifically, germination rate increased 85.6% to from 40.0% in the control, and seedling rate boosted to 82.0% from 0%. The conclusion is the couple lock funnel with streaming function plus interlayer in soil can result in fast salt leaching and markedly improve seedling rate of plant. This system can be applied in the field of landscape plant growing in the cities and restoration of saline-alkaline soil.

Keywords: couple lock funnel with streamsing function; interlayer in soil; salinity; germination rate; seedling rate

收稿日期:2016-01-22
基金项目:国家自然科学基金(50376031,41571277)
作者简介:校 亮(1991—),男,陕西渭南人,硕士研究生,主要从事土壤改良与植被恢复研究。E-mail:qinchengyongyi@126.com。
通信作者:熊东红(1974—),男,江西奉新人,研究员,博士生导师,主要从事土壤侵蚀、土壤物理、植被恢复等方面研究。E-mail:dhxiong@imde.ac.cn。

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^[1]。其典型特点:具有高 pH 值、低透气透水性、养分含量低、富含有害盐分等,致使大多数植物生长受到不同程度抑制,甚至死亡^[2]。我国盐碱土分布广泛^[3],总面积约 $3\,600\times 10^4\text{ hm}^2$,占全国可利用土地面积的 $4.88\%\text{[4]}$ 。依分布地区生物气候等环境因素差异分为滨海盐土与滩涂、黄淮海平原盐渍土、东北松嫩平原盐土和碱土、半漠境内陆盐土和青新极端干旱漠境盐土等^[5]。东部滨海地区土壤盐碱化主要由海水作用所致;气候干旱、蒸发强烈、地势低洼、地下水埋深浅、矿化度高、滥垦过牧等是内陆土壤盐碱化的主要成因^[6-7]。

人多地少,耕地资源紧张,加之中国正处于工业化、城市化加速发展时期,耕地占用逐年增加,使得人地矛盾日益突出。在耕地面积持续减少、建设用地日趋紧张、粮食安全威胁加剧的背景下,盐碱地已成为非常宝贵的战略资源,其高效利用对于提升我国耕地农业生产能力,增加耕地数量,保障粮食安全,坚守 1.2 亿公顷耕地红线,具有重要意义^[8]。

国内外针对盐碱地改良和修复措施涉及:水利工程、农业技术、化学改良、生物修复以及综合治理等措施^[9-11]。水利工程措施如沟渠排碱、暗管排水、改排为蓄等;原理上依据盐随水动的特点,引水排盐或循环压盐等^[12-13]。农业技术措施如地膜覆盖、根区隔盐、平整土地、增施绿肥等;以降低蒸发,阻碍返盐,改善土壤团粒结构,抑制表层土壤盐分积累,降低土壤盐分危害^[14-18]。化学改良措施即向土壤中施加诸如石膏、磷石膏、腐殖酸、醋渣等改良剂^[19];机理在于利用水溶性高分子化合物与土壤中成盐离子发生络合反应,随灌溉水排出,以达到降盐的目的^[20-21]。生物修复措施包括微生物措施和植物措施,即添加微生物或种植耐盐碱植物以降低土

壤盐、碱;通过植物吸收或中和反应达到降低盐碱的目的^[22]。综合治理措施即通过多种改良技术的有效集成,达到降低土壤盐碱的目的^[23]。

总结诸多技术措施:引水排盐、修缮土地、生化修复等是盐碱地改良的重大创新;技术集成、定向排盐、改良土壤等是盐碱地改良的研究热点和发展趋势。目前关于盐碱地改良仍存在如下问题:(1) 重度退化盐碱地修复涉足很少;(2) 植物根系因返盐受到胁迫问题尚未有效解决;(3) 受植物生态幅限制,苛刻盐碱地可生长植物种类有限;(4) 引水排盐过程中养分淋失较为严重等。为有效解决植物根系因返盐受到胁迫以及重度退化盐碱地修复难题,以淋盐、抑盐为思路,多技术集成,设计了可高效淋盐的引流式双扣漏斗型防盐害保水的植物栽培系统,系统从增加灌水淋盐、减少蒸发积盐、阻隔屏障抑盐等角度出发,创造出保护根系、适宜植物生长的“小生境”。旨在为解决植物根系因返盐受到胁迫以及修复重度退化盐碱地提供理论、技术依据和参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 土壤与试剂 试验用土于 2012 年 5 月取自黄河三角洲滨海地区($119^{\circ}9'42''\text{ E}$, $37^{\circ}45'47''\text{ N}$),该区属暖温带季风气候区,年平均气温 12.1°C ,年平均降雨量 551.6 mm ,且多集中在 7—8 月份,年平均蒸发量高达 $1\,962\text{ mm}$,干旱指数为 3.556。区内以水生和盐生植被为主,受盐碱胁迫影响,植物群落组成简单,建群种少,芦苇、柽柳、翅碱蓬分布较为广泛;土壤类型以潮土和盐土为主。供试土壤为 0~40 cm 土层,在 0~10、10~20、20~30、30~40 cm 分别采集土壤样品后分类标记。0~40 cm 混合土样的基本土壤理化性质见表 1。

表 1 试验区土壤基本性质
Table 1 Properties of the tested soil

指标 Parameter	可溶性盐/% Soluble salt	pH	总氮/($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) Total N	有效磷/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) Avaliale P	有效钾/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) Available K
数值 Value	1.50	8.87	0.69	4.88	302.61

试验用珍珠岩由烟台先锋保温材料股份有限公司提供,粒径约 0.1~0.3 cm,珍珠岩具有较好的通气、透水 and 持水性^[24]。试验所需棉花种子购于济南睿袁农业科技开发有限公司,巨铃王优质棉种,种子百粒重为 13.3008 g。

1.1.2 试验装置 塑料制不透水型柱状桶体,圆桶顶端开口($d=34\text{ cm}$ 、 $h=40\text{ cm}$);塑料制避光单形漏

斗($d_{\text{上}}=20\text{ cm}$ 、 $d_{\text{下}}=8\text{ cm}$ 、 $h=20\text{ cm}$),降盐口径(柱状中空壳体: $d=8\text{ cm}$ 、 $h=8\text{ cm}$),单形漏斗由下扣漏斗和降盐口径卡槽式连接而成;塑料制避光双扣漏斗($d_{\text{上}}=8\text{ cm}$ 、 $d_{\text{腰}}=20\text{ cm}$ 、 $d_{\text{下}}=8\text{ cm}$ 、 $h=40\text{ cm}$ 、 $h_{\text{上}}=20\text{ cm}$ 、 $h_{\text{下}}=20\text{ cm}$),塑料制柱状集水槽($h=5\text{ cm}$ 、 $d_{\text{上}}=15\text{ cm}$ 、 $d_{\text{下外}}=15\text{ cm}$ 、 $h_{\text{下内}}=8\text{ cm}$),双扣漏斗之上扣漏斗与下扣漏斗卡槽式连接,双扣漏斗之上扣

漏斗与集水槽卡槽式连接,双扣漏斗之下扣漏斗与降盐口径卡槽式连接,PVC 管($d = 4\text{ cm}$ 、 $l = 40\text{ cm}$),引流棒($l = 50\text{ cm}$),引流式双扣漏斗型防盐害保水的植物栽培系统如图 1 所示。此外,试验所需器材还包括喷壶、量筒、卷尺等。

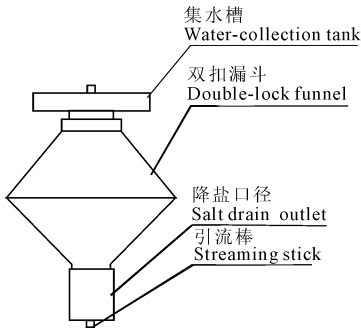


图 1 处理装置

Fig. 1 Device for experimental treatments

1.2 试验设计

将供试土壤填充至与圆桶(共 30 个)平齐。土层填充方法如下:均匀混合各土层土样后,填充 30~40 cm 土样于圆桶最底层 10 cm 厚度,随后依此以 10 cm 厚层填充 20~30、10~20、0~10 cm 土样,至土壤与圆桶平齐,自然老化一年(经多次降雨淋盐和蒸发返盐作用),备用。

试验设计五组处理:处理 0(对照处理)、处理 1(单形漏斗试验)、处理 2(双扣漏斗试验)、处理 3(引流式双扣漏斗试验)和处理 4(引流式双扣漏斗加壤内隔层试验)。其中处理 0 分入渗(引水排盐)和蒸发(水盐上行)过程,分别测定引水排盐和蒸发积盐作用后各土层土壤含盐量;入渗和蒸发过程各设 5 组平行试验(分别标记为 A、B、C、D、E, a、b、c、d、e);其余处理均设 5 组平行试验。处理 1:圆桶中部埋设单形漏斗,斗口与土面平齐(设 a_1 、 b_1 、 c_1 、 d_1 、 e_1 五组平行处理);处理 2:圆桶中部埋设双扣漏斗,斗腰与土面平齐(设 a_2 、 b_2 、 c_2 、 d_2 、 e_2 五组平行处理);处理 3:圆桶中部埋设引流式双扣漏斗,斗腰与土面平齐,引流棒顺双扣漏斗口中部垂直插入直至桶底(设 a_3 、 b_3 、 c_3 、 d_3 、 e_3 五组平行处理);处理 4:移除圆桶中 20~30 cm 土层土壤,以珍珠岩隔层替之(珍珠岩含水、盐量与移除土壤等同),20~30 cm 土层土壤含水量、含盐量如表 2 所示,珍珠岩填充层所补充盐分为分析纯 NaCl,以质量法换算补充盐分。圆桶中部埋设引流式双扣漏斗,斗腰与土面平齐,引流棒顺双扣漏斗口中部垂直插入直至桶底(设 a_4 、 b_4 、 c_4 、 d_4 、 e_4 五组平行处理)。

用喷壶向圆桶,单形漏斗,双扣漏斗集水槽分两次、每次分三个阶段(400 ml、200 ml、100 ml,200 ml、100 ml、50 ml)均匀喷洒蒸馏水,保证水分均匀下渗。两次淋水间隔为 1 天,第一次淋水后在每个处理中种植棉花种子 50 粒。灌水淋盐结束后,任取处理 0 的 5 个圆桶,用内径 4 cm 的 PVC 管按深度 0~5、5~10、10~20、20~30、30~40 cm 取样测定入渗(引水排盐)作用下土壤盐分再分布状况。将处理 0 其余 5 个圆桶置于炎阳通风处,每隔 5 天于 19:00 灌水 100 ml,确保棉花种子发芽所需水分,1 个月后用内径 4 cm 的 PVC 管按深度 0~5、5~10、10~20、20~30、30~40 cm 取样测定蒸发(水盐上行)作用下土壤盐分再分布状况。取其余处理,置于炎阳通风处 1 个月,期间每隔 5 天 19:00 灌水 100 ml,确保棉花种子发芽所需水分,用内径 4 cm 的 PVC 管按深度 0~5、5~10、10~20 cm 取样,测定不同处理措施降盐效果。每隔 5 天同一时间统计不同措施棉花发芽和成苗状况。试验设计以 20 cm 土层为取样厚度,原因有二:其一,0~20 cm 土层对于种子发芽至成苗这一生活史关键阶段至关重要;只有幼芽成苗植物才有机会完成整个生活史;其二,试验单形漏斗系统、双扣漏斗系统容纳土层厚度为 20 cm,便于不同处理间的同层土壤盐分含量比较。

表 2 20~30 cm 土层土壤含水率和含盐量

Table 2 The contents of moisture and salinity at soil layer of 20~30 cm

组别 Group	土层厚度/cm Soil layer's thickness	质量含水率 Moisture content / %	含盐量 Salinity / %
a_4	20~30	28.64	1.274
b_4	20~30	27.32	1.029
c_4	20~30	26.53	0.983
d_4	20~30	30.05	0.752
e_4	20~30	26.96	1.128

试验采用质量法测定土壤全盐量;以胚根突破种皮并生长出第 1 片真叶视为种子发芽,以第 2 片真叶长出并成活视为成苗。其中:

发芽率(G) = (实际发芽数/供试种子数) × 100%

成苗率(E) = (实际成苗数/供试种子数) × 100%

1.3 数据处理

试验所得数据采用 Origin Pro 8 图形可视化和数据分析软件及 Excel 2003 数据统计分析软件进行数据处理与分析。

2 结果与分析

2.1 引水排盐与水盐上行土壤盐分再分布状况

由图 2 可知,引水排盐过程中,盐分溶解并随水分下渗由表土向深层土壤迁移,呈现出由表土至深层土壤盐分逐渐且明显增加的规律,0~5、5~10、10~20、20~30、30~40 cm 土层深度土壤含盐量分别为 0.46%、1.29%、2.03%、4.81%、5.27%,深层 30~40 cm 土层是表层 0~5 cm 土层土壤含盐量的

11.56 倍。蒸发返盐盐分随水分上行再次重分配,聚集表土。0~5、5~10、10~20、20~30、30~40 cm 土层深度土壤含盐量分别为 4.61%、3.63%、2.63%、1.03%、0.65%,表层 0~5 cm 土层是深层 30~40 cm 土层土壤含盐量的 7.11 倍。盐随水动是盐碱土地土壤盐分运移的显著特点,淋洗作用水分溶解并携带盐分向深层土壤迁移,于土壤剖面发生定向重分布;蒸发作用使得水盐溶液向表土迁移并发生盐分聚集,盐分再次于土壤剖面发生定向重分布。

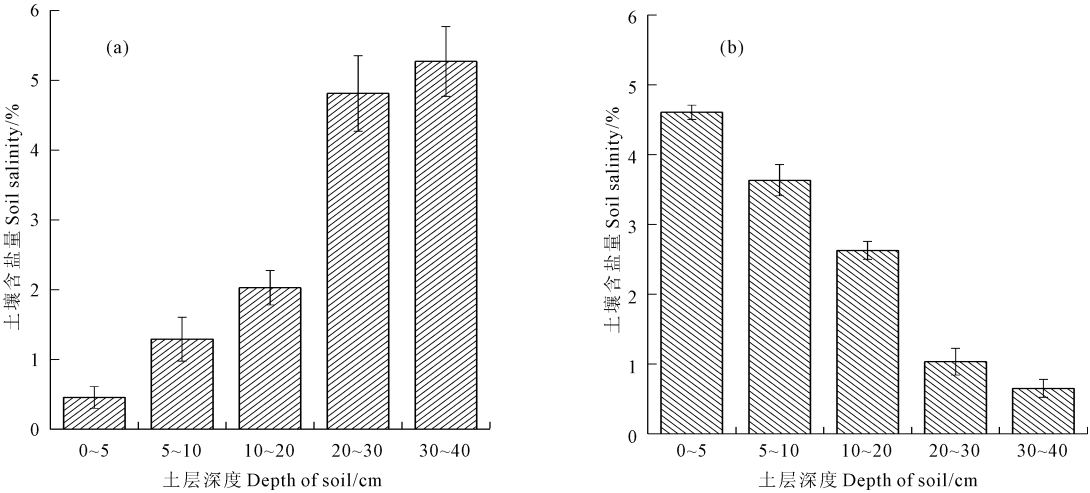


图 2 入渗(a)与蒸发(b)作用土壤盐分再分布状况

Fig.2 Re-distribution of soil salt content resulting from infiltration(a) and evaporation(b)

2.2 不同处理措施下土壤的降盐效果

不同处理措施显著影响水分入渗能力、蒸发强度和运移方式。盐随水动,土层剖面土壤含盐量也随之发生显著变化。如图 3 所示,土层剖面土壤含盐量随处理方式的不断优化呈现出递减规律,采用处理 4 土层剖面降盐效果尤为明显。处理 1、处理 2、处理 3、处理 4 较处理 0,在 0~5 cm 土层土壤含盐量降低了 1.51%、2.05%、3.62%、4.05%;在 5~10 cm 土层土壤含盐量降低了 0.90%、1.31%、2.51%、3.12%,在 10~20 cm 土层土壤含盐量降低了 1.35%、1.14%、1.13%、1.90%;在 0~20 cm 土层土壤含盐量降低了 1.61%、1.65%、2.43%、2.98%。处理 4 降盐效果最佳。

处理 1 采用单形漏斗,漏斗底口可显著缩减境外蒸发面积。引水排盐过程中,盐分溶解随水分下渗从底口排出并分散分布;但由于底径形成的蒸发回升面较小,从而有效阻隔了区外水盐蒸发回升,使得蒸发作用不易携带盐分通过降盐口径回升至单形漏斗境内,以达到降盐目的。处理 2 采用双扣漏斗,在处理 1 的基础上增设上扣漏斗,可缩小境内蒸发面,消减蒸发作用,有效防止双扣漏斗土壤盐分随蒸

发作用发生盐分表聚。与地膜覆盖不同,上扣漏斗是通过缩小蒸发面以减小蒸发作用阻碍水盐上升,地膜覆盖则是通过循环压盐作用控制水盐运移。处理 3 在处理 2 的基础上增设引流棒,采用引流棒:一方面引流棒与周围土壤形成入渗差异界面,使得系统内水分入渗能力增强,淋盐效率增加;另一方面引流棒可使系统内盐分发生定向重分布,加速盐分在水流和自身浓度梯度的作用下运移,以引流棒为中心,形成周围脱盐区,棒底积盐区,进一步提升了降盐效率。处理 4 在处理 3 的基础上增设壤内珍珠岩隔层,珍珠岩具有很强的吸水和持水性,隔层的存在一方面改变了水分入渗特征,增加了水分入渗量,又进一步提升了降盐效果,另一方面隔层可破坏土壤剖面毛管的连续性,利用毛管屏障减少蒸发积盐。

2.3 不同处理措施下棉花种子发芽与成苗状况

图 4 为不同处理措施下棉花种子发芽与成苗率。由图可知,棉花种子发芽与成苗率随处理方式的不断优化而增加,比较不同处理措施,棉花种子发芽率较对照组分别提升了 2.0%、4.0%、22.0%、46.0%,发芽率随处理方式的优化稳步上升,处理 4 棉花种子发芽率最高,达 86.0%;成苗率较对照组

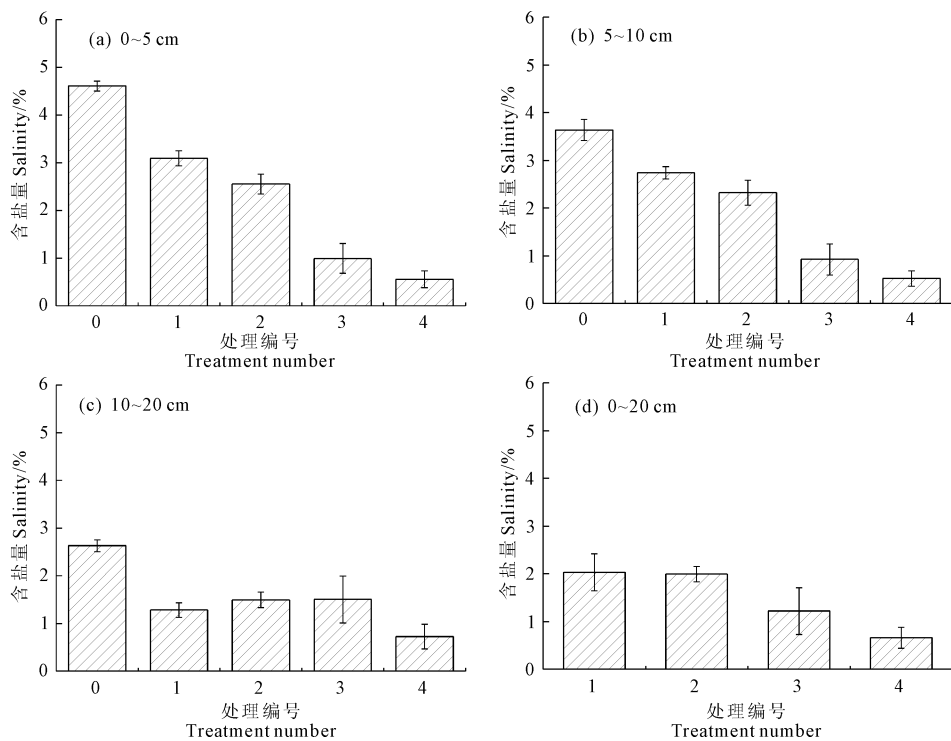


图 3 不同处理方式下各土层土壤平均含盐量

Fig.3 The average soil salt content at various layer in different treatments

0 提升了 1.0%、2.0%、42.0%、82.0%，棉花种子成苗率实现零突破并显著增加，采用处理 4 棉花种子成苗率最高，达 82.0%。

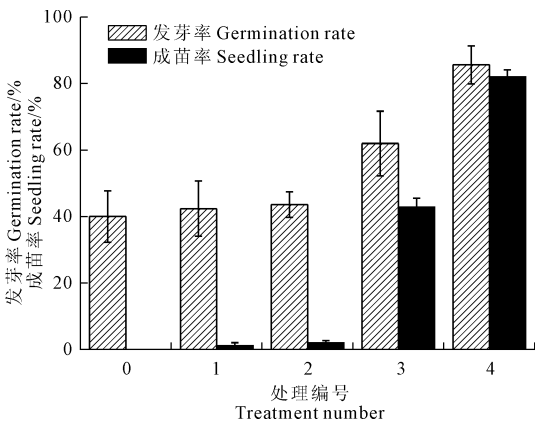


图 4 不同处理方式下棉花种子发芽与成苗率

Fig.4 Germination rate and seedling rate of cotton in different treatments

受植物生理生态幅限制，每种植物完成其正常生活史对于某一环境要素都有其特定的耐受范围。盐分是制约盐碱土地发展的关键因素，以试验植物棉花为例，其对于盐分的耐受上限为 1.50%，超过此限，棉花生长受到抑制，逐渐死亡。处理措施的不

断优化使得引流式双扣漏斗区内盐分显著下降至棉花耐受范围是其得以成苗的基本保证。

3 结论与讨论

引流式双扣漏斗加壤内隔层可有效降低系统内部土壤盐分。经引水排盐后，系统内盐分剧降，自 3.64% 下降至 0.66%，降低达 5.53 倍，盐分淋洗后，试验植物棉花成苗率高达 82.0%。

盐分随水分的淋洗与蒸发，在土壤剖面上下运移^[16]。试验从增加灌水淋盐和减少蒸发积盐的目标出发，设计提出了双扣漏斗，减少蒸发面(上扣漏斗)，减少蒸发过程中毛管水上升面，达到抑制蒸发积盐的效果。

水分通过土壤表面垂直或水平进入土壤发生入渗，土壤入渗过程主要受供水强度和入渗能力的影响，且入渗能力随入渗过程逐渐降低^[25]。增设引流棒增加了土壤的透水性，增强了系统内水分入渗能力，淋盐效率增加；同时使得系统内盐分发生定向重分布，使得盐分在水流和自身浓度梯度的作用下运移，进一步提升了降盐效率。

土壤质地和结构对土壤水分入渗和蒸发能力有显著的影响^[26-27]。在土壤剖面埋置珍珠岩隔层，

一方面珍珠岩强吸水和持水性改变了水分入渗特征,增加了水分入渗量,又进一步提升了降盐效果,另一方面隔层可破坏土壤剖面毛管的连续性,利用毛管屏障减少蒸发积盐。

存储在珍珠岩隔层中的水盐溶液,受蒸发、结晶、溶解等多重作用驱动,一部分随蒸发聚集表土,形成白色盐斑;另一部分以结晶析出的方式富集在系统外壁;还有一部分以水盐溶液的形式继续存储在珍珠岩隔层中。

研究可为盐碱地区城市、道路绿化带苗木栽培及盐化土壤植树造林提供理论依据和技术指导。

参 考 文 献:

[1] 陈影影,符跃鑫,张振克,等.中国滨海盐碱土治理相关专利技术评述[J].中国农学通报,2014,30(11):279-285.

[2] 刘春阳,何文寿,何进智,等.盐碱地改良利用研究进展[J].农业科学研究,2007,28(2):68-71.

[3] 王遵亲.中国盐渍土[M].北京:科学出版社,1993:400-515.

[4] 杨劲松.中国盐渍土研究的发展历程与展望[J].土壤学报,2008,45(5):837-845.

[5] 李彬,王志春,孙志高,等.中国盐碱地资源与可持续利用研究[J].干旱地区农业研究,2005,23(2):154-158.

[6] 杨建国,樊丽琴,许兴,等.盐碱地改良技术集成示范区水土环境变化研究初报[J].中国农学通报,2011,27(1):279-285.

[7] 杨思存,车宗贤,王成宝,等.甘肃沿黄灌区土壤盐渍化特征及其成因[J].干旱区研究,2014,31(1):57-64.

[8] 王佳丽,黄贤金,钟太洋,等.盐碱地可持续利用研究综述[J].地理学报,2011,66(5):673-684.

[9] 冯琛,解建仓,孙博,等.蓄水条件下水体-土壤循环压盐机理试验研究[J].水土保持学报,2011,25(1):184-187.

[10] 刘云,孙书洪.不同改良方法对滨海盐碱地修复效果的影响[J].灌溉排水学报,2014,33(4/5):248-250.

[11] 李金彪,陈金林,刘广明.滨海盐碱地绿化理论技术研究进展[J].土壤通报,2014,45(1):246-250.

[12] 潘延鑫,罗纨,贾忠华.排水沟蓄水条件下农田与排水沟水盐监测[J].生态学报,2014,34(3):597-604.

[13] 于淑会,刘金铜,李志祥,等.暗管排水排盐改良盐碱地机理与农田生态系统响应研究进展[J].中国生态农业学报,2012,20(12):1664-1672.

[14] 丁秋生.清、洪水灌溉条件下土壤中盐分运移规律的试验研究[J].灌溉排水学报,2006,25(4):71-73.

[15] 赵永敢,王婧,李义玉,等.秸秆隔层与地膜覆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.

[16] 杨鹏年,董新光,刘磊,等.干旱区大田膜下滴灌土壤盐分运移与调控[J].农业工程学报,2011,27(12):90-95.

[17] 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):28-31.

[18] 管博,于君宝,陆兆华,等.黄河三角洲重度退化滨海湿地盐地碱蓬的生态修复效果[J].生态学报,2011,31(17):4835-4840.

[19] 周和平,徐小波,王少丽,等.盐碱地改良技术综述与一种新的研究模式展望[J].中国科学基金,2011,(3):157-162.

[20] 王文杰,贺海升,祖元刚,等.施加改良剂对重度盐碱地盐碱动态及杨树生长的影响[J].生态学报,2009,29(5):2272-2278.

[21] 张建锋,乔勇进,焦明,等.盐碱地改良利用研究进展[J].山东林业科技,1997,(3):5-8.

[22] 宋玉珍,安志刚,张玉红,等.活性微生物菌肥在大庆苏打盐碱地造林中的应用[J].东北林业大学学报,2008,36(7):17-19.

[23] 王海江,石建初,张花玲.不同改良措施下新疆重度盐渍土土壤盐分变化与脱盐效果[J].农业工程学报,2014,30(22):102-111.

[24] 吉玉玲.珍珠岩引发对茄子种子发芽率的影响[J].山东农业科学,2008,(4):13-16.

[25] 邵明安,王全九,黄明斌.土壤物理学[M].北京:高等教育出版社,2006:126-129.

[26] Franzluebbers A J. Water infiltration and soil structure related to organic matter and its stratification with depth[J]. Soil Tillage and Research, 2002,66(2):197-205.

[27] Zhang G S, Chang K Y, Oates A, et al. Relationship between soil structure and runoff/soil loss after 24 years of conservation tillage[J]. Soil Tillage and Research, 2006,92(1):122-128.

(上接第 282 页)

[27] 曾全超,董扬红,李鑫,等.基于 Le Bissonnais 法对黄土高原森林植被带土壤团聚体及土壤可蚀性特征研究[J].中国生态农业学报,2014,22(9):1093-1101.

[28] 董莉丽.不同土地利用类型下土壤水稳性团聚体的特征[J].林业科学,2011,47(4):95-100.

[29] 魏小波,何文清,黎晓峰,等.农田土壤有机碳固定机制及其影响因子研究进展[J].中国农业气象,2010,31(4):487-494.

[30] 张四海,曹志平,张国,等.保护性耕作对农田土壤有机碳库的影响[J].生态环境报,2012,21(2):199-205.

[31] 王静娅,张凤华.干旱区典型盐生植物群落土壤团聚体组成及有机碳分布[J].生态学报,2016,36(3):600-607.

[32] 刘晓利,何园球,李成亮,等.不同土地利用方式旱地红壤水稳性团聚体及其碳、氮、磷分布特征[J].土壤学报,2009,46(2):252-262.

[33] 侯晓静,杨劲松,王相平,等.不同施肥方式下滩涂围垦农田土壤有机碳及团聚体有机碳的分布[J].土壤学报,2015,52(4):118-127.

[34] 李鑫,马瑞萍,安韶山,等.黄土高原不同植被带土壤团聚体有机碳和酶活性的粒径分布特征[J].应用生态学报,2015,26(8):2282-2290.

[35] 宋春,韩晓增,王凤菊,等.长期不同施肥条件下黑土水稳性团聚体中磷的分布及其有效性[J].中国生态农业学报,2010,18(2):272-276.