

盐土改良中砂柱的作用机理研究*

张博¹ 马晨¹ 马履一¹ 贾黎明¹ 贾忠奎¹ 刘洪庆²

(1. 北京林业大学省部共建森林培育与保护教育部重点实验室, 北京 100083;

2. 天津海林园艺环保科技工程有限公司, 天津 300457)

摘要: 采用室内土柱模拟试验结合田间试验的方法对砂柱在盐土改良中的作用机理及应用效果进行了初步研究。结果表明:在土柱模拟试验中,设置砂柱的土柱3次淋水水分平均下渗速率达到0.132 mm/min,是未设置砂柱的1.73倍;含盐量由3.78%降低至0.51%,淋盐效率是未设置砂柱的1.45倍;其淋水后pH值较未设置砂柱的降低了0.12,田间试验区淋水后表现出和土柱试验相似的规律。同时,随着砂柱密度的增加,土壤脱盐率、脱盐均匀度提高,抑制pH值升高效果增加,砂柱间距0.67 m的田间试验区土壤脱盐率达到83.9%,垂直方向均匀度差值为3.9%,而未设置砂柱的脱盐率仅为53.2%,均匀度差值达到33.1%,前者pH值相对后者降低了0.59。在一定范围内,盐土含盐量、pH值及水分下渗速率显著线性相关,随着淋水速率加快,pH值升高,盐土含盐量降低。综合考虑各方面效果砂柱处理以间距0.67 m为最佳。

关键词: 滨海盐土 砂柱 含盐量 脱盐均匀度 水分下渗速率 pH值

中图分类号: S156.4⁺2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)06-0122-06

Mechanism of Sand Column in Improving Coastal Saline Soil

Zhang Bo¹ Ma Chen¹ Ma Lüyi¹ Jia Liming¹ Jia Zhongkui¹ Liu Hongqing²

(1. Key Laboratory of Silviculture and Conservation, Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2. Hailin Tianjin Horticulture Environmental Science and Technology Engineering Co., Ltd., Tianjin 300457, China)

Abstract: To explore the role of sand column in improving the saline soil, a series of experiments combining soil column simulation and field monitoring were carried out. The results indicated that the average water infiltration rate of the soil column reached to 0.132 mm/min in three washing repeats with the help of sand columns, which was 1.73 times higher than that of the soil column without sand columns. And the salinity decreased from 3.78% to 0.51% with sand columns, which was 1.45 times higher than that of the soil column without sand columns. Moreover, the former's pH value decreased by 0.12 compared with the latter's after washing. Similar results could be found in the field contrast experiments. The increase in density of the sand column could enhance the desalination rate and the evenness of salt washing, and also inhibit the growing of pH value. The desalination rate reached to 83.9% and the vertical evenness difference was 3.9% with sand columns at an interval of 0.67 m in field contrast experiments. But without sand columns, the desalinating rate was just 53.2% and the vertical evenness difference stood at 33.1%. The pH value decreased by 0.59 with the sand columns. To a certain degree, there was a correlation among the salt content, pH value and the water infiltration rate. The salinity went down with the increase of pH value and water infiltration rate. With all factors taken into consideration, the 0.67 m interval of sand column was the best.

Key words: Coastal saline soil Sand column Salt content Desalinate evenness Water infiltration rate pH value

收稿日期: 2012-11-16 修回日期: 2013-01-03

* 国家林业局林业公益性行业科研专项资助项目(201004021)和国家农业标准化示范区资助项目(SFQ7-13)

作者简介: 张博, 博士生, 主要从事滨海盐土改良及植被构建技术研究, E-mail: zbbeilin@126.com

通讯作者: 马履一, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤水分、森林培育及非粮生物质能源研究, E-mail: maluyi@bjfu.edu.cn

引言

中国海岸线全长 18 340 km, 广泛分布有各种滨海盐碱土, 总面积达 $5 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 。滨海盐碱土是在盐渍淤泥上发育或直接吹填而成, 其积盐过程先于成土过程, 具有土壤盐分大、养分含量低、地下水矿化度高、土壤盐碱化严重、地上和地下淡水资源缺乏等特点。由于受海潮和海水型地下水的双重影响, 土壤与地下水中的盐分绝大部分为与海水一致的氯化物^[1], 并且呈微碱性至碱性。土壤盐碱化已经成为发展农林业的主要限制因素, 并对人类健康和生态环境造成危害^[2]。因此, 研发滨海盐土高效改良技术对进一步提高滨海盐土利用具有重要意义。

自 20 世纪 30 年代中叶我国就有学者开展盐碱地治理研究, 50 年代末至 60 年代侧重利用水利工程措施来进行盐碱地治理, 如明沟排水、暗管排水等。水利工程措施虽然行之有效, 但其高昂的费用成为盐碱地改良实施的一大瓶颈^[3-7]。之后生物改良方法在盐碱地改良中得到广泛应用, 特别是盐生植物的种植, 其具有投资小、可持续性强等特点, 但见效慢^[8-11]。此外, 土壤盐碱改良剂等化学改良滨

海盐土的方法也有深入研究^[12-14]。

滨海盐土快速高效改良及植被构建技术是一项集改、排、防、治为一体的快速高效改良滨海盐土的新技术^[15-16], 砂柱作为这项新技术的核心部分之一, 直接决定着滨海盐土改良的速率与效果。本研究将重点分析砂柱及砂柱群密度对于滨海盐土土壤盐分含量及 pH 值变化的影响, 以期探明砂柱在滨海盐土改良中的作用机理, 为推进滨海盐土改良乃至盐碱土改良提供基础。

1 研究区概况

研究区位于天津市滨海新区大港中塘镇东河筒村, 该地区属暖温带半湿润大陆性季风气候, 冬季寒冷干燥, 夏季湿热多雨, 年平均气温 12.1℃, 年平均降水量 592.8 mm, 但降水分布不均匀, 6~8 月降水量占全年降水总量的 70% 左右^[17]。室内土柱试验取样地点和田间试验区相邻, 位于研究区内的高盐渍土区(土壤含盐量大于 0.8%), 土壤为未经扰动的以氯化物盐类为主的滨海盐土, 表层有少量的碱蓬(*Suaeda glauca*)、虎尾草(*Chloris virgata* Swartz)、柽柳(*Tamarix chinensis* Lour.) 生长。表 1 为试验区滨海盐土基本理化性状。

表 1 试验区滨海盐土基本理化性状

Tab. 1 Physical and chemical properties of tested coastal saline soil

土壤类型	含盐量 /%	pH 值	有机质 质量分数/%	容重密度 / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	颗粒组成/%			
					0.05 ~ 2 mm	0.02 ~ 0.05 mm	0.002 ~ 0.02 mm	0 ~ 0.002 mm
粉砂质壤土	1.315	8.49	0.42	1.48	27.85	10.81	60.21	1.13

2 研究方法

2.1 室内土柱试验

在研究区内的高盐渍土区分 5 层(0~20、20~40、40~60、60~80 和 80~100 cm) 取土样, 风干、过 2 mm 筛, 根据取样点田间容重分层填充试验土柱。土柱由加强型 PVC 塑料管制作(图 1), 直径 55 cm, 高 150 cm^[18-19]。设置砂柱的土柱为 S1、S2、S3, 砂柱位于土柱中央, 直径为 3~4 cm, 并以直径 0.5~1.0 mm 粗砂填灌至淋层; 淋层厚 10 cm, 以直径为 1~2 cm 石屑填充; 底部设置 20 cm × 20 cm 的盲沟, 用直径为 3 cm 左右的大砾石填充。对照土柱(CK1), 除未设置中央砂柱外, 其他处理均与图 1 所示土柱相同^[20]。

在土柱一侧距砂柱 5、10、15、20 cm 处, 及另一侧距砂柱 7.5、12.5、17.5、22.5 cm 处垂直插入德国 UMS 生产的土壤溶液取样器, 深度均为 40 cm。CK1 在土柱直径的中心点两侧按前述方法布设土壤溶液

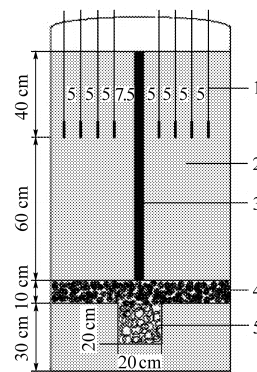


图 1 土柱示意图

Fig. 1 Diagram of soil column

1. SK20 取样器 2. 滨海盐土 3. 砂柱 4. 淋层 5. 盲沟

取样器。

试验开始时, 根据以往工程经验数据以及土柱预试验, 每个土柱每次淋水 35 L, 共计淋水 3 次(W1、W2、W3), 淋水间隔期为 4 d。淋水 2 d 后抽提土壤溶液, 利用雷磁 DDS-307 型电导率仪及 pH 计测定其含盐量和 pH 值。

2.2 田间试验

田间试验区与室内土柱土样取样地点相邻,采用完全随机区组设计 30 个规格为 2 m × 2 m 的试验小区(图 2),各试验小区进行砂柱单因素控制,不添加秸秆、有机肥等,尽量保持土壤原状性。d1、d2、d3、d4 处理分别在试验小区中央设置 1 个砂柱(砂柱间距 2 m)、4 个砂柱(砂柱间距 1 m)、9 个砂柱(砂柱间距 0.67 m)和 16 个砂柱(砂柱间距 0.5 m),砂柱间为等距设置。试验小区共进行 4 次灌水处理,每次间隔 10 d,灌水量依次为 100、100、305 和 596 L,每次浇水 3~5 d 后分别在不同处理小区内距砂柱 20 cm 处随机取样 9 个,每个取样点分 5 层进行取样(每层 20 cm),同时在一年后对不同处理小区进行取样监测。取样后风干、过 2 mm 筛,采用 5:1 水土质量比提取土壤溶液,利用雷磁 DDS-307 型电导率仪及 pH 计测定其含盐量及 pH 值,检测后取各层平均值。

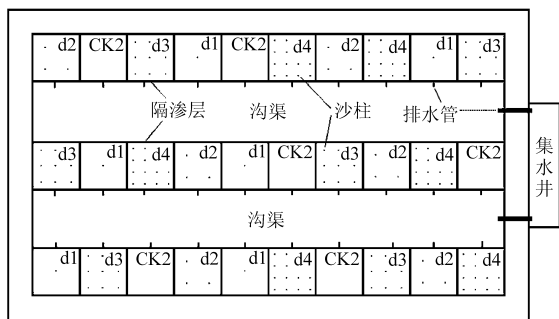


图 2 田间试验布设

Fig. 2 Layout of field experiment

采用 Excel 2007、Sigma Plot 12.0 及 Photo Shop CS5 对试验数据和图表进行分析处理。

3 结果与分析

3.1 砂柱在滨海盐土盐分淋洗过程中的作用

室内土柱在 3 次淋水之后,4 个土柱距离土柱中心不同距离处的盐分变化如图 3 所示,图中 SW1 为砂孔土柱第 1 次淋水、SW2 为砂孔土柱第 2 次淋水、SW3 为砂孔土柱第 3 次淋水、CK1W1 为对照土柱第 1 次淋水、CK1W2 为对照土柱第 2 次淋水、CK1W3 为对照土柱第 3 次淋水,下同。CK1 在第 1 次淋水之后,土柱各点平均含盐量由 3.780% 降低到 2.864%,第 2 次淋水降低到 2.215%,第 3 次淋水降低到 1.520%,含盐量减少了 59.8%。设置砂柱的土柱经过 3 次淋水后,3 个土柱各点平均含盐量在第 1 次淋水之后由 3.780% 降低到 2.359%,第 2 次淋水降低到 1.566%,第 3 次淋水降低到 0.510%,含盐量减少了 86.51%。设置砂柱的土柱盐分淋洗效果明显好于 CK1,相同淋水条件下有砂柱的土柱

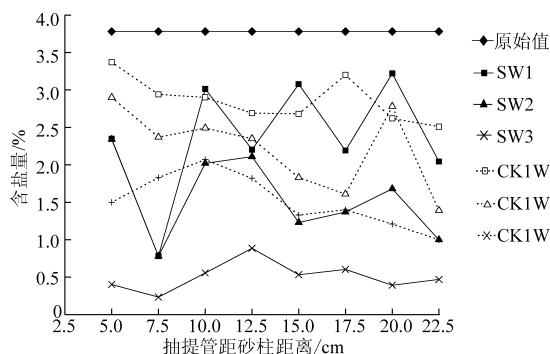


图 3 不同距离处滨海盐土盐分变化

Fig. 3 Changes of coastal saline alkali soil in different distances

盐分降低速率远大于 CK1,淋水洗盐量是 CK1 的 1.45 倍,说明设置砂柱能够有效地加快滨海盐土盐分的淋洗速率,提高盐分的淋洗效果,节约水资源。在 3 次淋水过程中,由于土壤和土柱接触不紧密而导致显著的边缘效应,4 个土柱 22.5 cm 处的土壤脱盐率均较高,对试验结果造成了一定影响。田间试验同时研究了不同砂柱密度条件下滨海盐土平均含盐量的变化(表 2)。在累计淋水 505 L 之后,CK2 土壤平均含盐量降到 0.727%,d1、d2、d3、d4 平均含盐量均降低至 0.6% 以下,分别为 0.528%、0.452%、0.350% 和 0.270%,累计淋水 1 101 L 之后,CK2 累计洗盐量为 0.758%,d1、d2、d3、d4 累计洗盐量分别是 CK2 的 1.32、1.66、1.81 和 1.79 倍,同样表明在相同淋水条件下,设置砂柱能够有效加快滨海盐土盐分的淋洗速率,提高盐分的淋洗效果,节约水资源。表 3 对不同密度砂柱盐分淋洗效果进行了多重比较及显著性分析,结果显示,d4 和 d3 差异不显著,其他均显著或极显著,表明砂柱间距介于 2~0.67 m 时,随着砂柱密度的增加相同水量淋洗盐分的效果显著增加,盐分淋洗速率显著提高,其中,结合工程成本等因素砂柱密度以 d3 为最佳,即砂柱间距为 0.67 m。CK2 由于土壤毛细管作用,水分携带盐分上升,一年后土壤平均含盐量由 0.596% 上升到 0.720%,表现出明显的返盐现象,而 d1、d2、d3、d4 由于砂柱的设置形成大孔隙有效阻断了土壤的毛细管作用,一年后土壤平均含盐量未明显上升,表明设置砂柱能够在一定程度上有效缓解土壤返盐。

3.2 砂柱对滨海盐土 pH 值变化的作用

淋水条件下伴随着含盐量变化滨海盐土 pH 值也有着规律性的变化,图 4 为不同土柱在每次淋水处理后不同距离处 pH 值的变化规律。CK1 第 1 次淋水之后,土柱各点平均 pH 值由原始值 8.23 降低至 7.88,第 2 次淋水后 pH 值降低到 7.87,第 3 次淋

水后 pH 值迅速升高至 8.34, 经过 3 次淋水 pH 值较原始值升高了 0.11; 有砂柱的 3 个土柱各点平均 pH 值在第 1 次淋水后由 8.23 降低至 7.86, 第 2 次淋水后升高到 8.06, 第 3 次淋水后升高至 8.22, 经过 3 次淋水 pH 值较原始值降低了 0.01。可见, 淋洗盐分过程土壤 pH 值呈现出先随淋水降低又逐渐升高的规律。同时, 经过 3 次淋水, CK1 的 pH 值较原始值升高了 0.11, 有砂柱土柱平均 pH 值较原始值降低了 0.01。砂柱形成的大孔隙加速了水分在土壤中的运移速度, 有效阻断了土壤毛细管作用, 使 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 等离子随水迅速排出, 从而有效抑制了盐分淋洗过程中 pH 值的升高。22.5 cm 处每次淋水处理后 pH 值均较高, 和滨海盐土盐分淋洗一样均表现出了明显的边缘效应。

表 2 不同砂柱密度土壤平均含盐量变化

Tab. 2 Average content of salt changes under different sand column densities

一次淋水量/L	d1	d2	d3	d4	CK2
原始值	1.059	1.341	1.474	1.346	1.354
100	0.875	1.087	0.951	0.748	1.176
100	0.824	0.994	0.822	0.593	1.024
305	0.528	0.452	0.350	0.270	0.727
596	0.390	0.287	0.242	0.227	0.596
一年后	0.398	0.290	0.220	0.220	0.720

表 3 不同密度砂柱淋盐效果多重比较及显著性分析

Tab. 3 Multiple comparisons and significance analysis for sand columns with different densities

对比组	均值差	显著性
(CK2, d1)	2.06	0***
(CK2, d2)	3.09	0***
(CK2, d3)	3.54	0***
(CK2, d4)	3.69	0***
(d1, d2)	1.03	0***
(d1, d3)	1.48	0***
(d1, d4)	1.63	0***
(d2, d3)	0.045	0.021**
(d2, d4)	0.60	0.003**
(d3, d4)	0.15	0.414

注: *** 表示在 0.01 水平极显著, ** 表示在 0.05 水平显著。

田间试验区不同淋水条件下滨海盐土 pH 值变化规律和土柱试验有着较为相似的规律, 同时, 不同密度的砂柱设置对滨海盐土 pH 值变化有着较为显著的影响(表 4)。CK2 土壤 pH 值伴随着淋水次数和淋水量的增加表现出先降低后升高的趋势, 在淋水 596 L 之后达到最高值 8.79, 较原始值升高 0.32; d1、d2、d3、d4 表现出和 CK2 较为一致的变化规律, 在淋水 596 L 之后 pH 值分别达到 8.59、8.39、8.27、

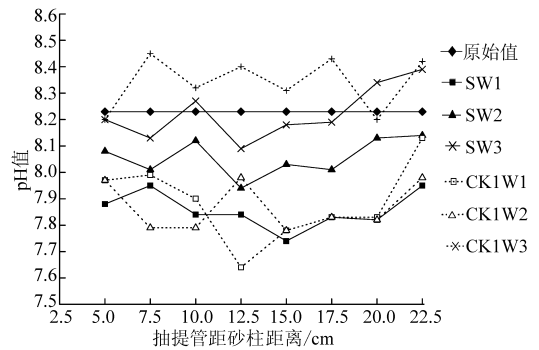


图 4 不同距离处滨海盐土 pH 值变化

Fig. 4 pH value changes in different distances of coastal saline alkali soil

8.29, d1 较原始值升高 0.04, d2、d3、d4 分别降低了 0.1、0.27、0.08, 其规律再次验证了土柱实验的结论, 同时在一定范围内随着砂柱密度的增加抑制 pH 值升高的作用更为显著, 以 d3 处理最佳。CK2 的 pH 值一年后为 8.66, d1、d2、d3、d4 分别为 8.50、8.42、8.22、8.16, 表明设置砂柱形成大孔隙能够在一定程度上抑制土壤 pH 值的升高。

表 4 不同砂柱密度土壤 pH 值变化

Tab. 4 pH value changes under different sand column densities

一次淋水量/L	d1	d2	d3	d4	CK2
原始值	8.55	8.49	8.54	8.37	8.47
100	8.20	7.97	8.02	8.12	8.31
100	8.36	8.26	8.11	8.09	8.28
305	8.62	8.33	8.25	8.21	8.71
596	8.59	8.39	8.27	8.29	8.79
一年后	8.50	8.42	8.22	8.16	8.66

3.3 砂柱对滨海盐土脱盐率及脱盐均匀度的作用

图 5 和图 6 显示了滨海盐土水平、垂直方向脱盐率及脱盐均匀度的变化情况。在水平方向上, 设置砂柱的 S 土柱和 d1 各点平均脱盐率分别达到 87% 和 76%, 均显著高于 CK1 (60%) 和 CK2 (53%); 在垂直方向上, 经过 4 次淋水处理后, CK2 平均脱盐率为 53.2%, 而设置砂柱的 d1、d2、d3、d4 平均脱盐率分别达到 63%、79%、83.9%、83%, 均显著高于 CK2, 表明砂柱的设置能够有效提高滨海盐土水平和垂直方向的脱盐率, 且随着砂柱密度的增加, 滨海盐土垂直方向脱盐率进一步提高。图 5 中, 设置砂柱的 d1 脱盐率在水平方向上随着距砂柱距离的增加逐渐降低, 各点脱盐率差值为 8%, S 在 0~15 cm 范围内表现出和 d1 一致的规律(20 cm 处受土柱边缘效应影响脱盐率升高), CK1、CK2 各处脱盐率波动较大、无明显规律性, 其脱盐率差值分别达到 23%、13%, 表明设置砂柱能够有效提高滨海盐土水平方向的脱盐均匀度。图 6 中滨海盐土 0~

20、20~40、40~60、60~80和80~100 cm各层的脱盐率 d1 和 CK2 表现出了较为一致的规律,各层脱盐率波动较大,盐分随着淋洗水分的下渗呈现出向下累积的现象,在40~60 cm层达到最高值(80~100 cm层底部设置了淋层和盲沟,盐分得到有效排出),但d1各层脱盐率均显著高于CK2,d1各层差值为15.8%,远小于CK2的33.1%。随着砂柱密度的增加,d4和d3各层脱盐率均在80%以上,各层差值分别为3.9%和7.1%,d2各层脱盐率差值为10%,均显著优于CK2。表明设置砂柱能有效提高滨海盐土垂直方向的脱盐均匀度,且随着砂柱密度的增加滨海盐土脱盐均匀度提高。

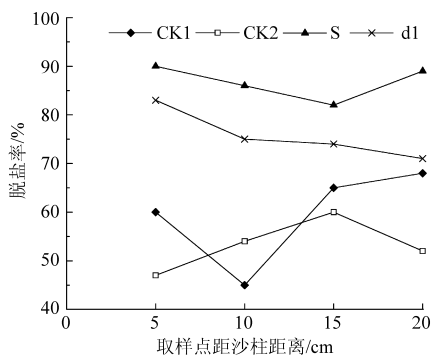


图5 不同距离处脱盐率的变化

Fig.5 Desalination rate changes in different distances

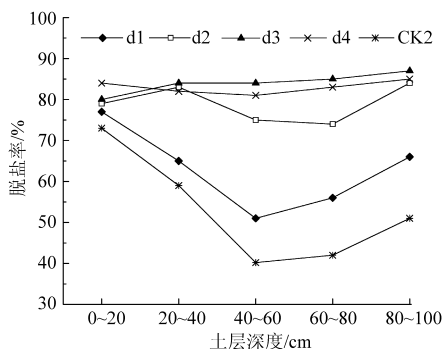


图6 4次淋水后不同深度土壤脱盐率

Fig.6 Desalination rate changes after four waterings in different depths of soil

3.4 各土柱渗水时间及水分下渗速率分析

表5可以得出3次淋水(W1、W2、W3)各土柱的渗水时间及水分下渗速率的关系:CK1水分下渗时间为32.33 h,下渗速率为0.076 mm/min,而3个有砂柱的土柱(S1、S2、S3)水分下渗的速率分别为0.112、0.136和0.148 mm/min,总平均下渗速率为0.132 mm/min,总平均下渗时间为18.77 h,其下渗速率是CK1的1.74倍,可见,淋水处理之后设置砂柱的土柱较CK1水分下渗时间短、下渗速率快。结果表明,设置砂柱能够有效提高淋洗水分的下渗速度,缩短淋水洗盐的时间。

表5 各土柱渗水时间及水分下渗速率比较

Tab.5 Water infiltration time and rate of soil column experiments

土柱	渗水时间/h			3次处理水分 下渗平均时间/h	水分下渗平均速率/ mm·min ⁻¹
	W1	W2	W3		
CK1	28	33	36	32.33	0.076
S1	11	25	30	22.00	0.112
S2	14	18	22	18.00	0.136
S3	12	17	20	16.33	0.148
平均值	12.33	20	24	18.77	0.132

4 讨论

(1) 室内土柱试验设置砂柱的土柱3次淋水水分平均下渗速率为0.132 mm/min,含盐量降低86.51%,分别是未设置砂柱土柱的1.74和1.45倍,其pH值较原始值降低0.01,而未设置砂柱的土柱pH值升高了0.11,说明设置砂柱能够有效加快水分的下渗速率,加快滨海盐土盐分的淋洗速率,提高盐分淋洗效果,有效抑制滨海盐土盐分淋洗过程中pH值的升高。田间试验区淋水处理后,砂柱间距为0.67 m的田间试验区滨海盐土含盐量由1.474%降低至0.272%,洗盐量是未设置砂柱田间试验区的1.63倍,其pH值较原始值升高0.04,而未设置砂柱田间试验区pH值升高了0.32,与室内土柱试验结论一致。而且,随着砂柱密度的增加,砂柱间距为1、0.67、0.5 m田间试验区盐分淋洗效果显著优于未设置砂柱的对照,其滨海盐土累计洗盐量分别达到未设置砂柱的1.66、1.81和1.79倍,pH值分别较原始值降低了0.1、0.27、0.08,说明砂柱密度的增加能够有效加快滨海盐土盐分淋洗速率、增加洗盐量、更好地抑制pH值的升高。同时,设置砂柱能够在水平和垂直方向有效地提高滨海盐土的脱盐率和脱盐均匀度,田间试验表明随着密度的增加滨海盐土脱盐率和脱盐均匀度增加,砂柱间距为0.67 m的田间试验区土壤平均脱盐率达到83.9%,垂直方向均匀度差值为3.9%,而未设置砂柱田间试验区土壤各层平均脱盐率仅为53.2%,均匀度差值达到33.1%。另外,砂柱具有较强的持久性,能够形成大孔隙阻断土壤毛细管作用,在一定程度上有效地缓解滨海盐土返盐、抑制pH值的升高。因此在滨海盐土改良工程中设置砂柱能够取得较好的改良效果,综合考虑盐分淋洗速率、抑制pH值效果、脱盐均匀度及工程成本等因素,砂柱间距以0.67 m为最佳。

(2) 设置砂柱的土柱由于砂柱形成大孔隙,水分平均下渗速率是未设置砂柱土柱的1.72倍,表明

砂柱能够有效提高淋洗水分的下渗速度,缩短淋水洗盐的时间。对4个土柱3次淋水后的pH值、盐分含量及水分下渗速率进行回归分析表明水分下渗速率、pH值和含盐量存在显著的线性相关关系,含盐量(y)与水分下渗速率(x_1)、pH值(x_2)相关关系为: $y = -102.22x_1 + 33.22x_2 - 253.20$ 。表明一定范围内随着pH值及水分下渗速率的升高,滨海盐土含盐量降低。此外,滨海盐土盐分含量随淋水增多逐步降低,且砂柱处理在淋洗盐分过程中起到重要作用,在相同淋水量的条件下,砂柱处理可以增加

26.7%的土壤脱盐率,从而达到节水的目的。

5 结束语

土柱试验中4个土柱22.5 cm处均表现出了明显的边缘效应,对试验结果造成了一定的影响,田间试验区结论与土柱试验较为一致,且田间试验效果要优于土柱试验,说明土柱试验能够较好地指导田间工程,特别是对重盐碱农田土壤、盐碱荒地快速高效改良有着重要的指导意义。

参 考 文 献

- 1 毛建华,沈伟然.天津滨海新区土壤盐碱与污染状况及土地利用的思考[J].天津农业科学,2005,11(4):15~17.
Mao Jianhua, Shen Weiran. Reflection of soil salination pollution research and land use of Binhai area in Tianjin[J]. Tianjin Agricultural Sciences, 2005, 11(4): 15~17. (in Chinese)
- 2 支欢欢,杨敏生,董宇,等.天津滨海地区盐碱土季节动态变化[J].土壤学报,2010,47(1):187~191.
Zhi Huanhuan, Yang Minsheng, Dong Yu, et al. Seasonal variation of salt-affected soil in coastal region of Tianjin[J]. Acta Pedologica Sinica, 2010, 47(1): 187~191. (in Chinese)
- 3 Sembiring H, Raun W R, Johnson G V, et al. Effect of wheat straw inversion on soil water conservation[J]. Soil Science, 1995, 159(2): 81~89.
- 4 周明耀,陈朝如,毛春生,等.滨海盐土地区稻田暗管排水效果试验研究[J].农业工程学报,2000,16(2):54~57.
Zhou Mingyao, Chen Chaoru, Mao Chunsheng, et al. Experiment and research on seepage effect by underground pipe drainage system of paddy field in saline soil coastland[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2000, 16(2): 54~57. (in Chinese)
- 5 程寻.天津滨海盐碱地绿化管理研究[D].天津:天津大学,2008.
Cheng Xun. Study on the management of the Tianjin Binhai saline-alkali afforestation[D]. Tianjin: Tianjin University, 2008. (in Chinese)
- 6 谭丹,谭芳.明沟排水条件下盐碱地改良优化配水模式[J].灌溉排水学报,2008,28(1):97~100.
Tan Dan, Tan Fang. Optimization model of water supply for saline land improvement under ditch drainage[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2008, 28(1): 97~100. (in Chinese)
- 7 景峰.滨海泥质盐碱地盐土造林技术研究[D].北京:北京林业大学,2011.
Jing Feng. Research of saline soil afforestation technique in coastal argillaceous saline-alkali land[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2011. (in Chinese)
- 8 David E Busch, Stanley D Smith. Effects of fire on water and salinity relations of riparian woody taxa[J]. Oecologia, 1993, 94(2): 186~194.
- 9 Dedova E H B. Method for cultivation of underground water: RU 2253221[P]. 2005-06-10.
- 10 宋玉民,张建锋,邢尚军,等.黄河三角洲重盐碱地植被特征与植被恢复技术[J].东北林业大学学报,2003,31(6):87~89.
Song Yumin, Zhang Jianfeng, Xing Shangjun, et al. Features of plant community and its restoration techniques in Yellow River Delta Region[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2003, 31(6): 87~89. (in Chinese)
- 11 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.
Ma Chen, Ma Lüyi, Liu Taixiang, et al. Research progress on saline land improvement technology[J]. World Forestry Research, 2010, 23(2): 28~32. (in Chinese)
- 12 Al-Karaki Ghazi N, Al-Omouh M. Wheat response to phosphogypsum and mycorrhizal fungi in alkaline soil[J]. Journal of Plant Nutrition, 2002, 25(4): 873~883.
- 13 张凌云,赵庚星,徐嗣英,等.滨海盐渍土适宜土壤盐碱改良剂的筛选研究[J].水土保持学报,2005,19(3):21~23.
Zhang Lingyun, Zhao Gengxing, Xu Siying, et al. Filtration of suitable saline-alkali soil amendments on coastal saline soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19(3): 21~23. (in Chinese)
- 14 Tejada M, Garcia C, Hernandez M T. Use of organic amendment as a strategy for saline soil remediation influence on the physical, chemical and biological properties of soil[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2006, 38(6): 1413~1421.
- 15 毛建华,刘太祥,马履一,等.中新天津生态城资源节约、环境友好的改土绿化技术[J].天津农业科学,2008,14(4):1~3.
Mao Jianhua, Liu Taixiang, Ma Lüyi, et al. Technology of resource saving and environment-friendly for soil provement virescence in sino-singapore Tianjin eco-city[J]. Tianjin Agricultural Sciences, 2008, 14(4): 1~3. (in Chinese)

- and Mapping, 2008, 33(Supp.): 57~59. (in Chinese)
- 9 郑玉凤, 李海涛, 顾海燕. 基于环境卫星 CCD 影像的薄云去除研究[J]. 遥感信息, 2011(3): 77~81.
Zheng Yufeng, Li Haitao, Gu Haiyan. Research on haze removal from HJ satellite CCD images[J]. Remote Sensing Information, 2011(3): 77~81. (in Chinese)
- 10 郑文武, 邓运员. 基于 LSMA 的 TM 影像云和阴影的检测与去除方法[J]. 测绘科学, 2010, 25(3): 62~65.
Zheng Wenwu, Deng Yunyuan. Detecting and removing cloud and shade on TM imagery based on LSMA [J]. Science of Surveying and Mapping, 2010, 25(3): 62~65. (in Chinese)
- 11 李微, 方圣辉, 佃袁勇, 等. 基于光谱分析的 MODIS 云检测算法研究[J]. 武汉大学学报:信息科学版, 2005, 30(5): 435~438, 443.
Li Wei, Fang Shenghui, Dian Yuanyong, et al. Cloud detection in MODIS data based on spectrum analysis[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2005, 30(5): 435~438, 443. (in Chinese)
- 12 田养军, 薛春纪. 遥感影像云团和云影检测与去除[J]. 地球科学与环境学报, 2007, 29(3): 300~303.
Tian Yangjun, Xue Chunji. Detection and removal of clouds and their shadows from remote sensing images[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2007, 29(3): 300~303. (in Chinese)
- 13 余坤勇, 许章华, 刘健, 等. “基于片层一面向类”的竹林信息提取算法与应用分析[J]. 中山大学学报:自然科学版, 2012, 51(1): 89~95.
Yu Kunyong, Xu Zhanghua, Liu Jian, et al. Algorithm and application analysis of film-based & class-oriented for bamboo forest information extraction[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2012, 51(1): 89~95. (in Chinese)
- 14 高海燕, 吴波. 结合像元形状特征分割的高分辨率影像面向对象分类[J]. 遥感信息, 2010(6): 67~72.
Gao Haiyan, Wu Bo. Object-oriented classification of high spatial resolution remote sensing imagery based on image segmentation with pixel shape feature[J]. Remote Sensing Information, 2010(6): 67~72. (in Chinese)
- 15 余坤勇, 刘健, 许章华, 等. 南方地区竹资源专题信息提取研究[J]. 遥感技术与应用, 2009, 24(4): 449~455.
Yu Kunyong, Liu Jian, Xu Zhanghua, et al. Study on bamboo resources thematic information extraction in the south of China[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2009, 24(4): 449~455. (in Chinese)
- 16 沈文水, 周新志. 一种基于 ENVI 二次开发的遥感薄云去除方法的改进[J]. 计算机与数学工程, 2009, 37(5): 127~129.
Shen Wenshui, Zhou Xinshi. An improved approach to remove cloud in RS image based on the second exploitation of ENVI[J]. Computer & Digital Engineering, 2009, 37(5): 127~129. (in Chinese)
- 17 董保根, 秦志远, 杨安红. 基于多时相遥感影像去除朵云及阴影的改进方法[J]. 测绘通报, 2010(12): 13~16, 57.
Dong Baogeng, Qin Zhiyuan, Yang Anhong. The improved method of cirrus and shadows removal based on multi-temporal remote sensing images[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2010(12): 13~16, 57. (in Chinese)
- 18 武坚, 江洪, 张峡辉, 等. 图像替换去云的接缝消除研究[J]. 测绘科学与工程, 2010, 30(2): 24~27.
Wu Jian, Jiang Hong, Zhang Xiahui, et al. Image exchange seam smoothing in cloud removal[J]. Geomatic Science and Engineering, 2010, 30(2): 24~27. (in Chinese)

(上接第 127 页)

- 16 毛建华, 王正祥, 刘太祥, 等. 资源节约环境友好的滨海盐土改良与绿化创新技术[J]. 中国农学通报, 2009, 25(11): 169~172.
Mao Jianhua, Wang Zhengxiang, Liu Taixiang, et al. A resource-saving and environment-friendly innovative technology for modifying saline soil and greening in the coastal region[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2009, 25(11): 169~172. (in Chinese)
- 17 张天. 天津滨海盐渍土区水盐监测及盐土改良工程模拟实验分析[D]. 北京: 中国农业大学, 2010.
Zhang Tian. Monitoring of water and salt movement in Tianjin coastal saline soil area and investigating of the simulated saline soil reclamation projects[D]. Beijing: China Agricultural University, 2010. (in Chinese)
- 18 冯永军, 陈为峰, 张蕾娜, 等. 滨海盐渍土水盐运动室内实验研究及治理对策[J]. 农业工程学报, 2000, 16(3): 38~42.
Feng Yongjun, Chen Weifeng, Zhang Leina, et al. Experimental study on salt and water movement of seashore saline soil in laboratory and harnessing measures [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2000, 16(3): 38~42. (in Chinese)
- 19 李法虎. 土壤物理化学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- 20 刘太祥, 马履一. 节水型盐碱滩地物理-化学-生态综合改良及植被构建方法: 中国, ZL 2004 1 0072547.9[P]. 2006-05-03.
Liu Taixiang, Ma Lüyi. A water-saving technology to improve saline alkali marshes and build vegetation by integrating physical-chemical-ecological methods; China, ZL 2004 1 0072547.9[P]. 2006-05-03. (in Chinese)
- 21 Ahmad Niaz, Awan Usman Khalid, Saeed Amir. Effect of controlled drainage on wheat water use efficiency and soil salinity—a lysimeter study[J]. International Agricultural Engineering Journal, 2005, 14(4): 215~224.
- 22 Johannes Hendrikus Barnard, Leon Daniel van Rensburg, Alan Thomas Peter Bennie. Leaching irrigated saline sandy to sandy loam apedal soils with water of a constant salinity[J]. Irrigation Science, 2010, 28(2): 191~201.
- 23 刘虎, 魏占民, 黄明勇, 等. 稳定流条件下曹妃甸地区吹填土脱盐过程[J]. 农业工程学报, 2009, 25(9): 62~68.
Liu Hu, Wei Zhanmin, Huang Mingyong, et al. Desalination process by dredger fill under steady flow in Caofeidian area[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(9): 62~68. (in Chinese)