

不同淋洗剂对滩涂围垦区土壤盐分的洗脱效果

张长波^{1,2}, 梁晶³, 廖志强¹, 马晓宇¹, 杨桂兰¹

(1.上海化工院环境工程有限公司, 上海 200062;

2.上海化工研究院有限公司, 上海 200062; 3.上海市园林科学规划研究院, 上海 200232)

摘要: [目的] 评价淋洗剂对盐渍土盐分洗脱影响, 为滩涂围垦区土壤改良提供理论指导。[方法] 以采自上海市崇明滩涂围垦区水稻田的轻度盐渍土和重度盐渍土为研究对象, 比较分析了硝酸钾、硝酸铁、硝酸钙、硝酸镁和碳酸氢铵 5 种淋洗剂浓度和淋洗次数对土壤盐分 Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , CO_3^{2-} , HCO_3^- , Cl^- 和 SO_4^{2-} 这 8 种离子的洗脱效果。[结果] 5 种淋洗剂对轻度盐渍土 Na^+ , Cl^- 的洗脱均有促进作用, 其中以硝酸钾对 Na^+ 的洗脱作用最为明显, 土壤浸出液中 Na^+ 的浓度较对照提升了 9.9%~25.9%; 碳酸氢铵更易促进土壤 Cl^- 的洗脱, 较对照提升了 9.6%~21.2%。综合考虑淋洗剂对 K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} 等土壤养分的淋出影响, 以 3.0 mmol/L 硝酸钾的处理效果更佳; 硝酸钾进行第二次淋洗时的 Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} 的浸出浓度较低, 而 HCO_3^- 和 Mg^{2+} 则相反。因淋洗剂浓度较重度盐渍土盐分离子含量低, 导致 5 种淋洗剂对重度盐渍土 Na^+ 和 Cl^- 的洗脱效果不佳, 与对照相比, 分别提升了 0.1%~1.0%, 0.01%~4.4%。[结论] 滩涂围垦土壤改良时应根据土壤盐分离子种类与含量确定淋洗剂类型、浓度及淋洗次数; 淋洗剂的施用可与灌溉措施相结合。

关键词: 盐渍土; 淋洗剂; 盐分离子; 洗脱; 滩涂围垦区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)06-0031-08

中图分类号: S275; S278

文献参数: 张长波, 梁晶, 廖志强, 等. 不同淋洗剂对滩涂围垦区土壤盐分的洗脱效果[J]. 水土保持通报, 2024, 44(6): 31-38. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.06.004; Zhang Changbo, Liang Jing, Liao Zhiqiang, et al. Effects of different washing reagents on removal of soil salt salinity for coastal reclamation zones [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(6): 31-38.

Effects of Different Washing Reagents on Removal of Soil Salt Salinity for Coastal Reclamation Zones

Zhang Changbo^{1,2}, Liang Jing³, Liao Zhiqiang¹, Ma Xiaoyu¹, Yang Guilan¹

(1. Shanghai Institute of Chemical Technology Environmental Engineering Co., Ltd,

Shanghai 200062, China; 2. Shanghai Research Institute of Chemical Industry CO., Ltd, Shanghai

200062, China; 3. Shanghai Academy of Landscape Architecture Science and Planning, Shanghai 200232, China)

Abstract: [Objective] The effectiveness of washing reagents in removing soil salinity was evaluated to provide theoretical guidance for soil amendments in coastal reclamation zones. [Methods] Slightly and heavily saline soils of paddy fields from the Chongming coastal reclamation zones in Shanghai City were selected as the research objects, and the effects of five types of washing reagent (potassium nitrate, iron nitrate, calcium nitrate, magnesium nitrate, and ammonium bicarbonate) concentrations and extraction times on soil salinity (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , CO_3^{2-} , HCO_3^- , Cl^- , and SO_4^{2-}) removal efficiency were compared and analyzed. [Results] The five washing reagents promoted the removal of Na^+ and Cl^- in the slightly saline soils, and the effect of potassium nitrate on Na^+ removal efficiency was the most obvious, because the Na^+

收稿日期: 2024-04-15

修回日期: 2024-09-09

资助项目: 上海市“科技创新行动计划”社会发展科技攻关项目“滩涂盐碱地高效改良功能材料及土壤盐分洗脱—阻控技术研究”(20dz1204803)

第一作者: 张长波(1979—), 男(汉族), 山东省聊城市人, 硕士, 正高级工程师, 主要从事污染土壤修复与障碍土壤改良技术研发和工程应用的研究。Email: cbzhang2007@163.com。

通信作者: 梁晶(1981—), 女(汉族), 山西省长治市人, 博士, 正高级工程师, 主要从事土壤质量调查评价、土壤改良修复与有机废弃物资源化利用的研究。Email: liangjing336@163.com。

concentration in the eluate was increased by 9.9%—25.9% compared with that in the control. However, Cl^- was more easily removed by ammonium bicarbonate, and the increase ratio was approximately 9.6%—21.2% compared with the control. Potassium nitrate (3.0 mmol/L) showed the best results, considering the removal of soil salt ions and the loss of soil nutrients (K^+ , Ca^{2+} , and Mg^{2+}). The Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , and Ca^{2+} concentrations in the eluate of the second washing by potassium nitrate were markedly lower than those after the first time, whereas it was not the case for HCO_3^- and Mg^{2+} . In this experiment, the five washing reagents showed negligible effects on the removal efficiency of Na^+ and Cl^- in the heavily saline soils because the applied concentration was much lower than the salt ion content in the soils, and the increase rates of the two ions were 0.10%—1.0% and 0.01%—4.40%, respectively, compared with the control. [Conclusion] The types, concentrations and times of washing reagents should be determined according to the types and contents of soil salt ions when improves soil in coastal reclamation zones. The application of washing reagents could be combined with irrigation measures.

Keywords: saline soils; washing reagents; salt ions; remove; coastal reclamation zones

近年来,通过围填海形成的滩涂围垦区逐渐成为了沿海地区重要的后备土地资源,其土壤质量对沿海地区经济发展具有重要作用^[1]。然而,由于滩涂围垦区在形成过程中受到海水浸渍,致使土壤含盐量高且养分贫瘠,已成为滩涂围垦区植物生长发育的限制因素^[2-3],因而滩涂围垦区的土壤盐分消除对农业生产活动具有重大意义^[4]。

目前,基于地下咸水^[5]、黄河水^[6]等灌溉水源的洗盐、压盐措施及节水滴灌^[7-8]在盐碱地农业生产实践中被广泛采用,研究发现,灌溉时间、灌溉量、灌溉方式、灌溉水矿化度等因素对盐碱地洗盐效果具有不同的影响^[9-12]。但由于上海市崇明东滩滩涂围垦区土壤质地黏重^[13],盐分较难被水淋洗。因此,探究水淋洗盐分离子的强化方法或技术具有必要性。土壤盐分离子在土壤溶液和土壤胶体中处于动态变化,且该动态变化受溶液中离子浓度、离子组成等因素影响,通常情况下,交换能力强的离子可将交换能力弱的离子置换出来,如土壤阳离子 Ca^{2+} 交换能力大于 Na^+ ^[14],在滨海盐碱地改良时,常采用脱硫石膏 (CaSO_4) 来置换 Na^+ ,使其随降雨或灌溉被淋洗^[15];此外,可溶性土壤改良剂可与农田灌溉结合起来,避免不可溶外源添加剂加入土壤时所需的巨大工作量,成本低、简便易行^[16]。但纵观现有文献报道,无论是批次试验、室内土柱试验还是田间试验,关于强化土壤盐分洗脱作用方面的研究却鲜有报道。因此,本文

选取上海市崇明滩涂围垦区土壤为研究对象,参考土壤修复领域淋洗技术,以水溶性肥料制备淋洗剂,基于实验室的模拟实验,分析比较不同淋洗剂及其用量对土壤盐分的洗脱效果,筛选适宜的淋洗剂种类及其用量,以期对滩涂围垦区土壤盐分脱除和土壤改良提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 土壤样品采集区概况

上海崇明岛 ($121^{\circ}09'—121^{\circ}54'E, 31^{\circ}27'—31^{\circ}51'N$) 位于中国长江口,属于典型的亚热带季风气候。年平均气温 15.4°C ,年平均降雨量 $1\ 100\ \text{mm}$,年日照 $2\ 200\ \text{h}$,年平均蒸发量约 $720\ \text{mm}$,地下水位平均 $0.85\ \text{m}$,地下水矿化度平均 $2.10\ \text{g/L}$ 。

1.2 土壤样品采集

本试验分别选取上海市崇明陈家镇滩涂围垦 21 a(土样 1)和 5 a(土样 2)的水稻田(每年 6 月种植水稻,12 月收割,为单季稻)的土壤为研究对象,于 2021 年 4 月采集上述地点的土样进行室内淋洗实验。取样时,在每个地点的水稻田内以 S 形设置 10 个采样点采集表层 0—20 cm 土壤,采样点间距约 15 m,将 10 个点位的土样均匀混合,形成一个混合样品装袋运回实验室,经自然风干、除去植物根系等杂质后,磨碎过 2 mm 筛备用。2 个供试地点的土样基本性质见表 1。

表 1 供试土壤基本性质
Table 1 Basic properties of soil samples

样品类别	pH 值	EC/ ($\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$)	全盐量及各离子含量/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)								
			全盐量	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	CO_3^{2-}	HCO_3^-
轻度盐渍土(土样 1)	8.2	0.5	1.8	0.40	0.02	0.04	0.02	0.50	0.04	—	0.30
重度盐渍土(土样 2)	7.8	7.6	33.7	11.90	0.50	0.20	0.07	12.10	2.20	—	0.20

注:“—”表示未检测出。

1.3 淋洗剂选择及浓度确定

基于对土壤质量、作物等影响的考虑,本试验选取了硝酸铁、硝酸钙、硝酸镁、硝酸钾、碳酸氢铵等5种供试淋洗剂,均购自国药集团化学试剂有限公司,纯度为分析纯。

使用蒸馏水将淋洗剂配置成溶液,模拟淋洗剂加入灌溉水中的情形,研究其对土壤盐分离子洗脱的强化作用。依据表1测定的供试土壤主要以 Na^+ 和 Cl^- 为主的情况,本试验淋洗剂浓度的确定是在结合 Na^+ 和 Cl^- 物质质量基础上,将各淋洗剂阳离子、阴离子按照价态进行归一化处理,设置4个淋洗剂浓度梯度(表2),同一浓度梯度内,各处理淋洗剂的阳离子、阴离子所带电荷总数(即浓度乘以离子所带电荷数)相同。

表2 淋洗剂浓度设计

Table 2 Concentration design of different washing reagents

淋洗剂	浓度梯度/(mmol·L ⁻¹)			
	浓度1	浓度2	浓度3	浓度4
硝酸铁	1.0	5.0	10.0	15.0
硝酸钙	1.5	7.5	15.0	22.5
硝酸镁	1.5	7.5	15.0	22.5
硝酸钾	3.0	15.0	30.0	45.0
碳酸氢铵	3.0	15.0	30.0	45.0

1.4 试验设计与方法

(1) 一次淋洗。准确称取过2 mm筛风干土样50.0 g,放入干燥的500 ml锥形瓶中,加入表2中不同浓度淋洗剂溶液250 ml,加塞后振荡3 min;过滤浸出液,待过滤完全后,将浸出液充分摇匀,25℃恒温保存备用;测定滤液中 Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , CO_3^{2-} , HCO_3^- , Cl^- 和 SO_4^{2-} 的浓度。

(2) 二次淋洗。将部分处理滤纸上的土壤自然晾干收集后,称取20.0 g土样,选取土壤盐分洗脱效果较好的淋洗剂,采用同样的淋洗方法进行二次淋洗,研究淋洗次数对土壤盐分洗脱效率的影响。

(3) 试验中设置蒸馏水淋洗为对照,每个处理及对照均设置3个重复。

1.5 数据处理

采用Excel 2010进行数据处理和表格绘制;运用Origin 2021软件进行绘图;使用SPSS 21.0软件进行数据方差分析以及显著性检验($p < 0.05$)。

采用土壤 Na^+ 和 Cl^- 的去除提升率,分析不同淋洗剂对土壤 Na^+ 和 Cl^- 的洗脱效果,公式为:

$$R_{\text{Na}^+ \text{ 或 } \text{Cl}^-} = \frac{C_{\text{处理Na}^+ \text{ 或 } \text{Cl}^-} - C_{\text{对照Na}^+ \text{ 或 } \text{Cl}^-}}{C_{\text{对照Na}^+ \text{ 或 } \text{Cl}^-}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $R_{\text{Na}^+ \text{ 或 } \text{Cl}^-}$ 为土壤 Na^+ 或 Cl^- 的去除提升率; $C_{\text{处理Na}^+ \text{ 或 } \text{Cl}^-}$ 表示不同浓度淋洗剂淋洗处理后土壤浸出液中 Na^+ 或 Cl^- 的浓度; $C_{\text{对照Na}^+ \text{ 或 } \text{Cl}^-}$ 表示对照处理土壤浸出液中 Na^+ 或 Cl^- 的浓度。

2 结果与分析

2.1 不同淋洗剂对轻度盐渍土盐分洗脱效果分析

不同淋洗剂对轻度盐渍土盐分离子洗脱效果的影响见表3。由于硝酸钾、硝酸钙和硝酸镁淋洗剂会显著提升土壤浸出液中 K^+ , Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的浓度,因此,本试验不评价这些淋洗剂对相应离子的洗脱影响。

由表3可以看出,与对照相比,5种淋洗剂对土壤 Na^+ 的洗脱均有促进作用,且随各淋洗剂浓度增加,促进作用整体呈现增加趋势。其中,硝酸钾淋洗处理对土壤 Na^+ 的洗脱促进作用最大,4种浓度的土壤浸出液中 Na^+ 的浓度分别较对照提升了9.9%,18.3%,23.3%和25.9%;硝酸镁淋洗处理的洗脱促进作用最小,4种浓度的土壤浸出液中 Na^+ 的浓度分别较对照提升了6.5%,8.8%,9.9%和9.3%,与硝酸铁、硝酸钙、碳酸氢铵淋洗处理间差异不显著。

硝酸铁、硝酸钙、碳酸氢铵和硝酸镁淋洗处理对土壤 K^+ 的洗脱亦均具有促进作用,促进作用大小顺序为:硝酸钙>碳酸氢铵>硝酸铁>硝酸镁。与洗脱 Na^+ 类似,随淋洗剂浓度增加,土壤浸出液中 K^+ 浓度整体呈现增加趋势。与对照相比,4个硝酸钙浓度下土壤浸出液中 K^+ 的浓度分别是对照的24.0,33.1,38.6和41.1倍。硝酸钾、硝酸铁、碳酸氢铵和硝酸镁淋洗处理对土壤 Ca^{2+} 的洗脱亦有促进作用,其中以硝酸铁淋洗处理的促进作用最大。随着硝酸钾浓度的增加,浸出液中 Mg^{2+} 的浓度逐渐增加;但碳酸氢铵和硝酸钙2种淋洗剂对土壤 Mg^{2+} 的洗脱作用有所不同,随着碳酸氢铵和硝酸钙浓度的增加,浸出液中 Mg^{2+} 的浓度呈现先增加后降低的趋势;碳酸氢铵处理对土壤 Mg^{2+} 洗脱效果最为明显。

总体而言,5种淋洗剂均有利于土壤 Cl^- 的淋出,与对照相比,浸出液中 Cl^- 的浓度最大提升率为21.2%。其中以碳酸氢铵处理更有利于土壤 Cl^- 的洗脱,4种浓度的土壤浸出液中 Cl^- 的浓度分别较对照提升了9.6%,21.2%,18.3%和13.5%;硝酸钾次之,4种浓度的土壤浸出液中 Cl^- 的浓度分别较对照提升了13.5%,9.6%,11.5%和9.6%。由此可见,含 HCO_3^- 淋洗剂对土壤 Cl^- 的淋出量较含 NO_3^- 淋洗剂大。同时,5种淋洗剂对土壤 SO_4^{2-} 的淋洗效果不显著,但含 NO_3^- 的淋洗剂在一定程度上抑制了土壤 HCO_3^- 的淋出。

表 3 不同淋洗剂对轻度盐渍土盐分洗脱的影响

Table 3 Effect of different washing reagents on removal of salt ions for slight saline soil

处 理	浸出液盐分离子浓度/(mg·L ⁻¹)							
	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	
对 照	70.4	4.8	8.4	4.4	104.0	8.6	50.0	
硝酸钾	浓度 1	77.4 ^c	—	16.8 ^b	5.5 ^d	118.2 ^a	8.6 ^b	41.2 ^b
	浓度 2	83.3 ^b	—	18.5 ^b	20.3 ^c	114.1 ^a	8.7 ^b	40.0 ^b
	浓度 3	86.8 ^a	—	25.2 ^a	60.5 ^b	115.9 ^a	10.1 ^a	50.0 ^a
	浓度 4	88.6 ^a	—	25.2 ^a	78.1 ^a	114.1 ^a	10.0 ^a	41.2 ^b
硝酸铁	浓度 1	75.5 ^c	6.2 ^b	12.6 ^d	55.0 ^a	109.4 ^a	8.5 ^a	55.9 ^a
	浓度 2	78.4 ^b	9.0 ^a	46.3 ^c	22.0 ^b	117.0 ^a	8.3 ^a	52.9 ^a
	浓度 3	80.2 ^a	10.3 ^a	78.9 ^b	57.7 ^a	106.5 ^a	9.2 ^a	41.2 ^b
	浓度 4	80.6 ^a	11.1 ^a	135.3 ^a	17.6 ^b	111.2 ^a	9.4 ^a	40.0 ^b
硝酸钙	浓度 1	75.3 ^a	120.1 ^c	—	57.7 ^b	108.2 ^c	9.9 ^a	40.0 ^a
	浓度 2	77.6 ^a	164.3 ^b	—	77.0 ^a	122.9 ^a	9.0 ^{ab}	41.2 ^a
	浓度 3	79.3 ^a	190.0 ^a	—	66.0 ^b	114.1 ^b	9.5 ^a	32.3 ^b
	浓度 4	78.9 ^a	202.4 ^a	—	41.2 ^c	107.8 ^c	7.7 ^b	34.1 ^b
硝酸镁	浓度 1	75.0 ^a	5.8 ^b	16.4 ^c	—	105.3 ^a	9.0 ^a	29.4 ^c
	浓度 2	76.6 ^a	7.9 ^{ab}	25.2 ^b	—	108.2 ^a	9.9 ^a	47.1 ^{ab}
	浓度 3	77.4 ^a	9.1 ^a	23.1 ^b	—	110.0 ^a	9.1 ^a	50.0 ^a
	浓度 4	77.0 ^a	9.5 ^a	44.2 ^a	—	104.1 ^a	9.3 ^a	55.9 ^a
碳酸氢铵	浓度 1	75.1 ^a	7.2 ^c	4.2 ^c	38.5 ^d	114.1 ^b	8.2 ^a	—
	浓度 2	77.6 ^a	11.6 ^b	10.1 ^b	83.6 ^b	125.8 ^a	9.6 ^a	—
	浓度 3	78.6 ^a	14.4 ^a	12.6 ^b	93.5 ^a	122.9 ^a	8.6 ^a	—
	浓度 4	77.8 ^a	15.5 ^a	21.0 ^a	75.9 ^c	118.2 ^{ab}	9.9 ^a	—

注:①不同小写字母表示同一淋洗剂不同浓度间差异显著($p < 0.05$); ②硝酸钾对 K⁺ 影响,硝酸钙对 Ca²⁺ 影响,硝酸镁对 Mg²⁺ 影响,碳酸氢铵对 HCO₃⁻ 影响未列出对应浓度,用“—”表示。

综上所述,硝酸钾处理对土壤 Na⁺ 和 Cl⁻ 的洗脱促进作用最大。为此,我们进一步分析不同浓度硝酸钾溶液作用下土壤浸出液中盐分离子浓度与对照的差异(表 4)。从表 4 可以看出,硝酸钾浓度低时(浓度 1:3.0 mmol/L),浸出液 Na⁺ 比值为(109.3±3.6)%,

与其他 3 个浓度的比值呈显著差异,而后三者之间差异不显著。Cl⁻ 和 HCO₃⁻ 的 4 个浓度之间比值差异均不显著。浓度 1 和浓度 2 与浓度 3 和浓度 4 之间 Ca²⁺, SO₄²⁻ 比值差异显著。浓度 1 与其他 3 个浓度之间 Mg²⁺ 比值差异显著。

表 4 不同浓度硝酸钾处理与对照处理浸出液盐分离子浓度比值

Table 4 Ratio of typical salt ions in leachate extracted by different concentrations of KNO₃ and distilled water %

盐分离子	浓度 1	浓度 2	浓度 3	浓度 4
Na ⁺	109.3±3.6 ^b	117.7±4.3 ^a	122.6±3.1 ^a	125.1±1.2 ^a
Ca ²⁺	200.3±5.2 ^b	220.3±4.8 ^b	300.4±4.2 ^a	300.4±3.9 ^a
Mg ²⁺	123.7±2.9 ^c	457.7±6.5 ^b	1 360.8±10.5 ^a	1 756.7±12.2 ^a
Cl ⁻	114.1±1.9 ^a	110.2±1.4 ^a	1 11.9±1.3 ^a	110.2±4.2 ^a
SO ₄ ²⁻	99.4±1.6 ^b	101.1±1.1 ^b	117.6±2.3 ^a	116.8±2.9 ^a
HCO ₃ ⁻	82.3±1.3 ^a	79.9±1.0 ^a	99.9±1.0 ^a	82.3±1.7 ^a

注:小写字母表示同一盐分离子之间差异显著性($p < 0.05$)。

可见,采用同一水土比进行淋洗剂筛选时,若基于土壤 Na⁺ 的洗脱效果和淋洗剂用量的经济性,硝酸钾浓度 2(15.0 mmol/L)较好;对 Cl⁻ 而言,则有所不同,浓度 1—4 的洗脱效果差异均不显著,只需考虑淋洗剂用量的经济性,硝酸钾浓度 1(3.0 mmol/L)较好。

此外,可以发现,硝酸钾浓度 1 和浓度 2 表现出

比浓度 3,浓度 4 更佳的综合效益;硝酸钾浓度 1 和浓度 2 相比,浓度 1 时土壤 Cl⁻ 和 HCO₃⁻ 洗脱效率较高,土壤钙、镁等有益元素损失量较少,且淋洗剂用量和成本较低;浓度 2 时土壤 Na⁺ 洗脱效率是浓度 1 的 1.1 倍,但浓度 2 时淋洗剂成本是浓度 1 的 5.0 倍;综合而言,3.0 mmol/L 硝酸钾是较优的淋洗剂用量,15.0 mmol/L 硝酸钾用量次之。

2.2 硝酸钾淋洗次数对轻度盐渍土盐分洗脱的影响

利用 4 种浓度硝酸钾对轻度盐渍土进行二次淋洗(表 5),可以得知,第 2 次淋洗后浸出液中 Na^+ , Ca^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} 浓度分别为第 1 次淋洗后浸提液对应离子浓度的 12.1%~21.8%, 25.0%~37.5%, 7.9%~

15.4%, 8.4%~16.5%; 而 Mg^{2+} 和 HCO_3^- 则不同,第 2 次淋洗后浸出液中 Mg^{2+} 和 HCO_3^- 浓度分别为第 1 次淋洗的 183.6%~900.0% 和 94.1%~114.3%。可见,第 1 次淋洗对土壤 Na^+ , Ca^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} 的洗脱促进较 Mg^{2+} 和 HCO_3^- 大。

表 5 第 2 次与第 1 次硝酸钾浸出液盐分离子效果比较

Table 5 Comparison of typical salt ions in first and second leachate extracted by different concentrations of KNO_3

盐分离子	第 2 次浸出液浓度均值/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)				第 2 次浸出液浓度/第 1 次浸出液浓度 $\times 100\%$			
	浓度 1	浓度 2	浓度 3	浓度 4	浓度 1	浓度 2	浓度 3	浓度 4
Na^+	16.9	12.2	10.6	10.7	21.8 \pm 0.3 ^a	14.6 \pm 0.2 ^b	12.2 \pm 1.0 ^b	12.1 \pm 0.5 ^b
Ca^{2+}	6.3	6.3	6.3	6.3	37.5 \pm 0.9 ^a	34.1 \pm 1.0 ^a	25.0 \pm 1.0 ^b	25.0 \pm 0.6 ^b
Mg^{2+}	49.5	123.7	111.1	170.4	900.0 \pm 5.7 ^a	608.1 \pm 11.2 ^b	183.6 \pm 6.2 ^c	218.3 \pm 9.0 ^c
Cl^-	9.4	17.6	16.4	12.9	7.9 \pm 0.5 ^b	15.4 \pm 0.8 ^a	14.1 \pm 1.3 ^a	11.3 \pm 0.7 ^a
SO_4^{2-}	0.7	1.3	1.2	1.7	8.4 \pm 1.0 ^b	15.3 \pm 0.4 ^a	11.8 \pm 0.9 ^a	16.5 \pm 0.9 ^a
HCO_3^-	47.0	37.6	47.1	44.9	114.3 \pm 4.4 ^a	94.1 \pm 3.3 ^a	94.1 \pm 2.3 ^a	108.6 \pm 4.3 ^a

注:小写字母表示第 2 次与第 1 次浸出液同一盐分离子浓度比值之间差异显著性($p < 0.05$)。

2.3 不同淋洗剂对轻度和重度盐渍土 Na^+ 和 Cl^- 的洗脱效果比较

分析不同淋洗剂对重度盐渍土中 Na^+ 和 Cl^- 的洗脱效果,并与轻度盐渍土相关数据进行对比(图 1 和图 2)。结果发现,淋洗剂对轻度盐渍土中 Na^+ 去除提升率较大,随着淋洗剂浓度的增加,轻度盐渍土中 Na^+ 去除提升率呈显著增加趋势。从浓度 1 增至浓度 4,硝酸钾处理轻度盐渍土 Na^+ 去除提升率由

9.9% 增至 25.9%, 而碳酸氢铵处理 Na^+ 去除提升率由 6.7% 增至 11.6%, 硝酸钙、硝酸镁和硝酸铁处理则分别由 7.0% 增至 12.6%, 6.5% 增至 9.9%, 7.2% 增至 14.5%。但淋洗剂对重度盐渍土中 Na^+ 的去除效果不明显,从浓度 1 增至浓度 4,硝酸钾,硝酸铁、硝酸钙、硝酸镁和碳酸氢铵 5 种淋洗剂对重度盐渍土 Na^+ 去除提升率变化范围分别为 0.2%~0.6%, 0.1%~0.6%, 0.5%~1.0%, 0.1%~0.7% 和 0.1%~0.9%。

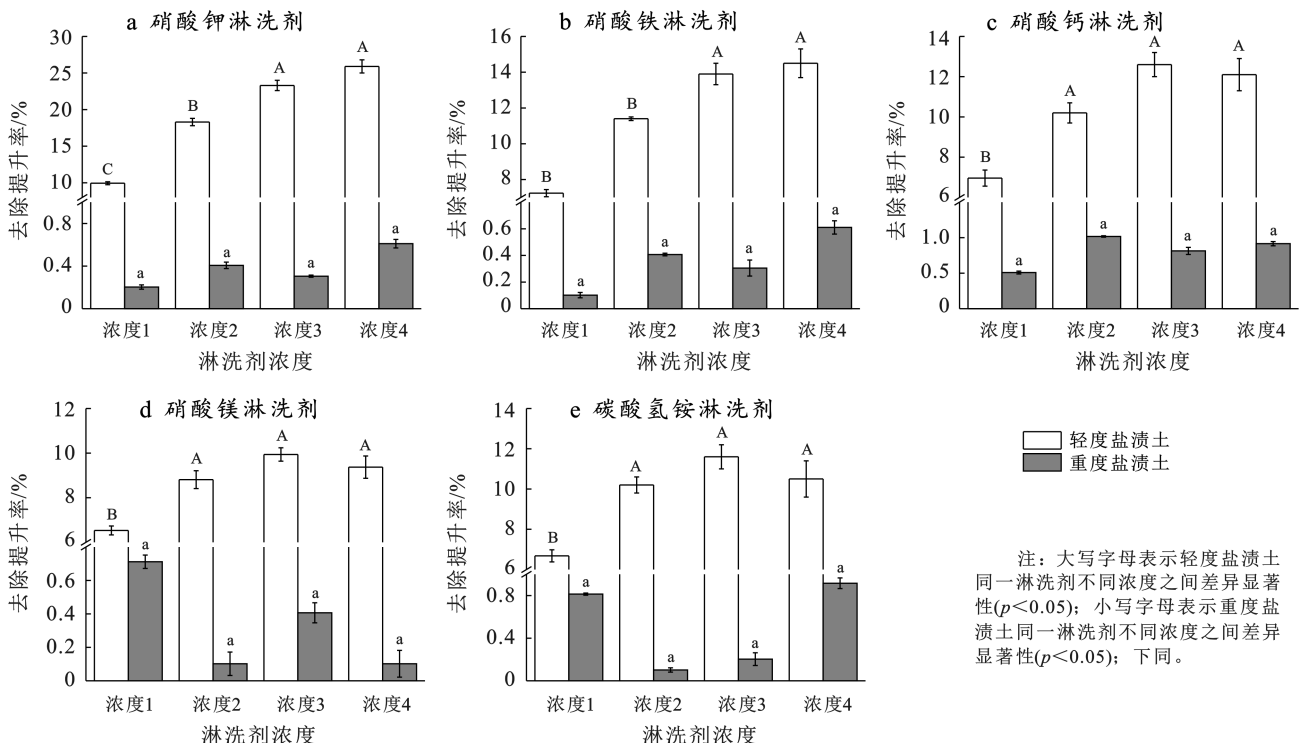


图 1 不同淋洗剂对轻度和重度盐渍土 Na^+ 去除提升率的影响

Fig.1 Effect of different washing reagents on increasing rate of Na^+ removal for slight saline soil and heavy saline soil

淋洗剂对轻度盐渍土中 Cl^- 去除提升率相对较高,对重度盐渍土 Cl^- 去除也有促进作用。与对照相比,4 个浓度硝酸钾处理轻度盐渍土时 Cl^- 去除提升率变化范围为 9.7%~13.6%,而硝酸铁、硝酸钙、碳酸氢铵和硝酸镁处理 Cl^- 去除提升率变化范围则分别为

2.4%~12.5%,3.70%~18.2%,9.7%~21.0%,0.2%~5.8%。与对照相比,硝酸钾处理重度盐渍土时 Cl^- 去除提升率变化范围为 0.01%~0.2%,而硝酸铁、硝酸钙、碳酸氢铵和硝酸镁处理的变化范围则分别为 1.9%~3.0%,0.05%~1.7%,0.2%~4.4%,0.1%~2.5%。

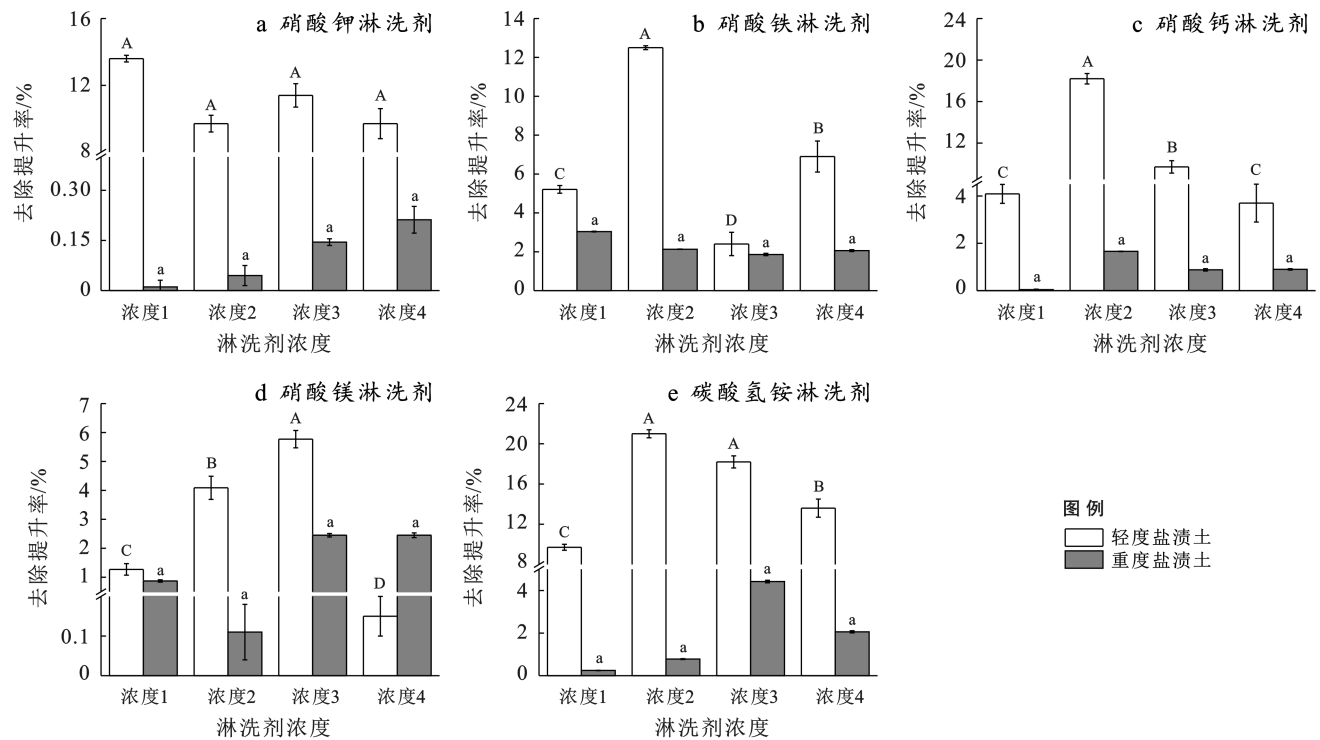


图 2 不同淋洗剂对轻度和重度盐渍土 Cl^- 去除提升率的影响

Fig.2 Effect of different washing reagents on increasing rate of Cl^- removal for slight saline soil and heavy saline soil

3 讨论

相较于传统淡水洗盐,本研究采用的硝酸钾、硝酸铁、硝酸钙、碳酸氢铵和硝酸镁 5 种淋洗剂对土壤 Na^+ 、 Cl^- 等盐离子洗脱有强化作用,以硝酸钾处理土壤 Na^+ 洗脱效果最佳。一般而言,土壤中阳离子交换能力大小顺序依次为: $\text{Fe}^{3+} > \text{Al}^{3+} > \text{H}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{NH}_4^+ > \text{Na}^+$ ^[14],但由于本试验确定淋洗剂浓度时,根据淋洗剂阳离子、阴离子的价态进行归一化处理,浓度 1 中 K^+ 的浓度分别是 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的 2 倍, Fe^{3+} 的 3 倍,且 K^+ 的水合半径较 Na^+ 小,故本试验 K^+ 对 Na^+ 的交换作用表现为最强。与对照相比,所有处理对土壤 Cl^- 的去除均有促进作用,其中碳酸氢铵对土壤 Cl^- 去除的促进作用最大,硝酸钾次之;淋洗剂中 HCO_3^- 对土壤 Cl^- 的浸提效果强于 NO_3^- ,这可能与 NO_3^- 的水合离子半径较 HCO_3^- 小所致。此外,据测定,碳酸氢铵溶液呈碱性,硝酸钾溶液近中性,而硝酸钙、硝酸镁、硝酸铁溶液偏酸性,由于滩涂围垦区土壤胶体带负电荷,碱性

溶液更利于土壤中阴离子的释放,也可能是导致这一结果的原因。

通常,淋洗剂淋洗土壤盐分的同时,也会导致 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等对植物生长有利的养分淋出土壤。本试验表明硝酸钙对土壤 K^+ 的淋洗作用最大,而硝酸铁、碳酸氢铵分别容易造成土壤 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的淋失。4 种含 NO_3^- 的淋洗剂在一定程度上抑制了土壤 HCO_3^- 的淋出,这可能是由于采用 NO_3^- 基淋洗剂时,土壤离子浓度增大,土壤中的正负电荷平衡被打破;另一方面,浸出液中 CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 的浓度可能受到土壤碳酸盐矿物的影响, HCO_3^- 可能被土壤固持。这与相关研究结果一致,如窦旭等^[17]发现,对盐渍化土壤进行淋洗时, HCO_3^- 脱盐率最小。分析其原因,是由于当土壤被淋洗时,土壤中其他离子开始减少,为使土壤中的正负电荷保持平衡,碳酸盐类矿物会产生解离,产生 CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 。樊丽琴等^[6]研究表明水淋洗虽然促进了 0—40 cm 土层 Na^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 等有害盐离子向下层运移,但 0—40 cm 土层 HCO_3^- 含量呈增加趋势,是由于水淋洗条件下土壤

有碱化趋势所致。5种淋洗剂对土壤 SO_4^{2-} 的淋洗效果不显著,与对照相比,浓度3,浓度4硝酸钾处理土壤 SO_4^{2-} 浸提的提升率分别为17.2%和16.0%,而浓度1,浓度2硝酸钾处理土壤 SO_4^{2-} 浸提的提升率则更低。这可能是由于本试验采用的淋洗剂含有 NO_3^- , HCO_3^- , 这2种离子持有电荷数均小于 SO_4^{2-} , SO_4^{2-} 可能被多种土壤成分所固持,而通常情况下硫酸盐溶解度较低。

由于盐分离子溶解度较高,第1次淋洗即可将轻度盐渍土大部分盐分离子淋出土壤,故第2次浸提的浸出液中 Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} 浓度分别为第1次的12.1%~21.8%,7.9%~15.4%,8.4%~16.5%,而 Ca^{2+} 为25.0%~37.5%。因此,随着淋洗次数的增加,土壤 Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} 浸出浓度呈现逐渐降低的趋势。而第2次淋洗时浸出液中 HCO_3^- 浓度为第1次的94.1%~114.3%,这也再次说明 HCO_3^- 脱盐率小,可能与土壤碳酸盐类矿物的重新释放有关^[17];同样的,可能受含镁矿物释放的影响,导致第2次淋洗时 Mg^{2+} 为第1次的183.6%~900.0%。

土壤盐分含量和淋洗剂溶液浓度是影响洗脱效果的决定性因素。本试验中的重度盐渍土含盐量是轻度盐渍土的18.4倍, Na^+ , Cl^- 物质的量分别是轻度盐渍土的34.0倍,23.2倍。故同一浓度淋洗剂淋洗重度盐渍土时,由于淋洗剂中阴阳离子不足,从而对 Na^+ 的浸提效果与对照无明显差异。 Cl^- 与 Na^+ 有所不同, Cl^- 较为活跃且带有负电荷,与同样带有负电荷的土壤电荷性质相同,二者之间的排斥力导致 Cl^- 较 Na^+ 更容易被洗脱^[18],与对照相比,硝酸铁、硝酸钙、碳酸氢铵和硝酸镁处理重度盐渍土时 Cl^- 去除提升率变化范围分别为1.9%~3.0%,0.05%~1.7%,0.2%~4.4%,0.1%~2.5%。

此外,淋洗水土比(简称“淋洗比”)对土壤盐分洗脱也有较重要的影响。通常,灌溉用水量多参考淋洗比进行计算,但由于土壤性质、植物耐盐性、滴管方式、气候条件等因素不同,淋洗比也会存在差异^[19]。Prichard T.L.等^[20]采用漫灌方式进行盐分淋洗,当灌水量深度与土层深度相同时,可使土壤盐分降低70%;郭美美等^[16]研究表明,采用滴管方式进行0—55 cm土柱盐分淋洗,当灌水量深度达到24 cm时,土柱盐分可由32 mS/cm降低至5 mS/cm,脱盐率约85%。灌溉水用量实验将进一步结合土柱实验或大田模拟实验开展研究。

4 结论

(1) 5种淋洗剂对轻度盐渍土 Na^+ 和 Cl^- 的洗脱

均有促进作用,以硝酸钾对 Na^+ 洗脱促进作用大,4种硝酸钾浓度对 Na^+ 的洗脱作用分别较对照提升了9.9%,18.3%,23.3%和25.9%;碳酸氢铵对 Cl^- 的洗脱作用大,4种碳酸氢铵浓度对 Cl^- 的洗脱作用分别较对照提升了9.6%,21.2%,18.3%和13.5%。基于 Na^+ 和 Cl^- 的洗脱效果、较小养分离子损失和淋洗剂用量的经济性,硝酸钾浓度1(3.0 mmol/L)是最佳选择。

(2) 同一硝酸钾溶液浓度淋洗轻度盐渍土时,第2次淋洗对土壤 Na^+ , Ca^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} 去除影响较小,对 Mg^{2+} 和 HCO_3^- 去除影响较大,第2次淋洗后浸出液中 Na^+ , Ca^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , Mg^{2+} 和 HCO_3^- 浓度分别为第1次淋洗的12.1%~21.8%,25.0%~37.5%,7.9%~15.4%,8.4%~16.5%,183.6%~900.0%和94.1%~114.3%。

(3) 相较轻度盐渍土,淋洗剂对重度盐渍土中 Na^+ 的去除效果不佳,硝酸钾、硝酸铁、硝酸钙、硝酸镁和碳酸氢铵5种淋洗剂对重度盐渍土 Na^+ 去除提升率变化范围分别为0.2%~0.6%,0.1%~0.6%,0.5%~1.0%,0.1%~0.7%和0.1%~0.9%;但除硝酸钾外,其他淋洗剂对重度盐渍土 Cl^- 的去除具有一定的作用,硝酸铁、硝酸钙、硝酸镁和碳酸氢铵对重度盐渍土 Cl^- 去除提升率变化范围则分别为1.9%~3.0%,0.05%~1.7%,0.1%~2.5%和0.2%~4.4%,硝酸钾对重度盐渍土 Cl^- 去除提升率变化范围则为0.01%~0.2%。

参考文献 (References)

- [1] 张继宁,周胜,孙会峰,等.中国滨海滩涂土壤现状及基于生物炭的改良潜力分析[J].浙江农业科学,2020,61(9):1707-1711.
Zhang Jining, Zhou Sheng, Sun Huifeng, et al. Current situation of coastal mudflat soil and potential analysis on its improvement with biochar in China [J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2020,61(9):1707-1711.
- [2] 朱伟,杨劲松,姚荣江,等.黄河三角洲中重度盐渍土棉田水盐运移规律研究[J].土壤,2021,53(4):817-825.
Zhu Wei, Yang Jinsong, Yao Rongjiang, et al. Soil water and salt transport in medium and heavy saline soils of Yellow River delta [J]. Soils, 2021,53(4):817-825.
- [3] 任玉蓉,王钰祺,廖安邦,等.江苏滨海滩涂湿地盐沼植被动态及机制[J].生态学杂志,2023,42(10):2327-2335.
Ren Yurong, Wang Yuqi, Liao Anbang, et al. Salt marsh vegetation dynamics and its mechanism in coastal wetlands in Jiangsu Province [J]. Chinese Journal of Ecology, 2023,42(10):2327-2335.
- [4] 王世平,陈月,潘大伟,等.盐碱地治理研究综述:现状、问题与对策[J].化工矿物与加工,2023,52(11):59-68.

- Wang Shiping, Chen Yue, Pan Dawei, et al. Review on salt marshes management: Status, problems and countermeasures [J]. *Industrial Minerals & Processing*, 2023, 52(11):59-68.
- [5] 李争争, 屈忠义, 杨威, 等. 不同矿化度咸水结冰灌溉对重度盐碱地土壤水分入渗和盐分运移的影响[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(3):304-311.
- Li Zhengzheng, Qu Zhongyi, Yang Wei, et al. Effects of freezing irrigation with different saline water on soil water infiltration and salt transport in severely saline-alkali soil [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(3):304-311.
- [6] 樊丽琴, 王旭, 李磊, 等. 不同淋洗水—改良材料对银北灌区碱化盐土盐分离子的影响[J]. *土壤通报*, 2023, 54(6):1439-1446.
- Fan Liqin, Wang Xu, Li Lei, et al. Effects of combined addition of different leaching water and soil amendments on salt ions distribution of alkalized solonchak in Yinbei irrigation district [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2023, 54(6):1439-1446.
- [7] 姚荣江, 李红强, 杨劲松, 等. 滴灌下生物质改良材料对盐渍土水盐氮运移的调控效应[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(11):282-291.
- Yao Rongjiang, Li Hongqiang, Yang Jinsong, et al. Regulation effect of biomass improved materials on migration of soil water, salt and nitrogen in salt-affected soil under drip irrigation [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(11):282-291.
- [8] 王航, 周青云, 张宝忠, 等. 不同滴灌方式对滨海盐碱地土壤剖面盐分变化的影响[J]. *节水灌溉*, 2021(11):35-40.
- Wang Hang, Zhou Qingyun, Zhang Baozhong, et al. Effects of different drip irrigation methods on salinity change of soil profile in coastal saline-alkali land [J]. *Water Saving Irrigation*, 2021(11):35-40.
- [9] 徐鑫, 张金珠, 李宝珠, 等. 不同盐度土壤水盐时空分布特征及对棉花出苗的影响[J]. *石河子大学学报(自然科学版)*, 2022, 40(2):204-212.
- Xu Xin, Zhang Jinzhu, Li Baozhu, et al. Response characteristics and numerical simulation of soil water and salt dynamics in different salinized cotton seedling stage to submembrane drip irrigation [J]. *Journal of Shihezi University (Natural Science)*, 2022, 40(2):204-212.
- [10] 孙珍珍, 岳春芳. 非生育期春灌灌水量对土壤盐分变化的影响[J]. *水资源与水工程学报*, 2015, 26(3):237-240.
- Sun Zhenzhen, Yue Chunfang. Effect of spring irrigation in non growth period on variation of soil salinity [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2015, 26(3):237-240.
- [11] 宋仁友, 吕廷波, 刘一凡, 等. 春灌定额对不同盐碱度农田水盐分布影响研究[J]. *节水灌溉*, 2024(4):19-26.
- Song Renyou, Lv Tingbo, Liu Yifan, et al. Study on the influence of spring irrigation quota on the water and salt distribution in different salinization farmlands [J]. *Water Saving Irrigation*, 2024(4):19-26.
- [12] 郑彦, 杨树青, 张晶, 等. 暗管排水对河套灌区下游盐碱地脱盐效果的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2022(4):106-112.
- Zheng Yan, Yang Shuqing, Zhang Jing, et al. Influence of subsurface drainage on desalting effect of saline-alkali land in Hetao irrigated area [J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2022(4):106-112.
- [13] 王清, 吕作俊, 姚萌, 等. 崇明东滩吹填区黏性土层抗剪强度随时间变化特征及机理[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2023, 53(4):1163-1174.
- Wang Qing, Lü Zuojun, Yao Meng, et al. Characteristics and mechanism of shear strength variation with time of cohesive soil layers in Chongming Dongtan reclamation area [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2023, 53(4):1163-1174.
- [14] 魏文杰, 程知言, 胡建, 等. 滨海盐碱地形成及离子附着形态综述[J]. *土壤通报*, 2017, 48(4):1003-1007.
- Wei Wenjie, Cheng Zhiyan, Hu Jian, et al. A review on formation and ion attached form of coastal saline-alkali soil [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2017, 48(4):1003-1007.
- [15] 曲长凤, 杨劲松, 姚荣江, 等. 不同改良剂对苏北滩涂盐碱土壤改良效果研究[J]. *灌溉排水学报*, 2012, 31(3):21-25.
- Qu Changfeng, Yang Jinsong, Yao Rongjiang, et al. Effects of different soil amendments on coastal saline-alkali soil in North Jiangsu [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2012, 31(3):21-25.
- [16] 郭美美, 李晓彬, 万书勤, 等. 滨海重度盐渍土加酸滴灌对脱盐过程中土壤 pH 值的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2021, 40(6):72-79.
- Guo Meimei, Li Xiaobin, Wan Shuqin, et al. The efficacy of acidified drip irrigation for reducing soil pH in remediating heavy saline coastal soils [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2021, 40(6):72-79.
- [17] 窦旭, 史海滨, 李瑞平, 等. 暗管排水控盐对盐渍化灌区土壤盐分淋洗有效性评价[J]. *灌溉排水学报*, 2020, 39(8):102-110.
- Dou Xu, Shi Haibin, Li Ruiping, et al. Assessing the efficiency of subsurface drain in controlling soil salinization in Hetao irrigation district [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2020, 39(8):102-110.