

# 电势梯度对电场条件下黏闭性土壤盐碱脱除的影响<sup>①</sup>

张子杰<sup>1,2</sup>, 贾仁浩<sup>1,2</sup>, 刘毅仁<sup>1,2</sup>, 刘建立<sup>1,3</sup>, 张佳宝<sup>1</sup>, 李晓鹏<sup>1,3\*</sup>

(1 中国科学院南京土壤研究所, 南京 211135; 2 中国科学院大学, 北京 100049; 3 中国科学院大学南京学院, 南京 211135)

**摘要:** 黏闭性盐碱土由于钠离子含量高、黏粒分散、通气透水性差, 盐碱难以脱除。在外加电场条件下, 电势梯度对土壤电渗流、酸碱变化和离子分布有明显影响。本文通过室内土柱模拟试验, 研究了电势梯度对黏闭性盐碱土水盐运移特征的影响, 探讨了不同电势梯度处理下盐碱土排水排盐动态、盐离子脱除效率、碱化特征及相关能耗表现。结果表明: 与对照不加电相比, 0.6、1.2、1.8、2.4 V/cm 电势梯度处理均可提高土柱排水脱盐效率, 且排水脱盐效率随电势梯度增大而提高。在为期 15 d 的通电过程中, 各处理排水量和脱盐量与通电时间呈正相关关系, 但增量随通电时间递减。在通电 15 d 后, 0.6、1.2、1.8、2.4 V/cm 处理土柱脱盐率分别达到了 5.98%、31.89%、37.82%、51.64%, 水溶性 Na<sup>+</sup> 含量分别降低了 6.34%、30.71%、32.07%、44.44%。此外, 土柱表层 0~5 cm 土壤 pH 降至接近中性(6.93~8.03), 且吸附性 Na<sup>+</sup> 基本脱除。综上可见, 电势梯度处理不仅能将黏闭性土壤中的盐碱加速脱除, 还能改善表层土壤的碱性。将该技术与我国盐碱地分布区丰富的风能、太阳能等绿色能源相结合, 可为盐碱地改良提供一种环保且高效的技术方案。

**关键词:** 黏闭盐碱土; 电势梯度; 土柱试验; 盐碱脱除; 碱化指标

**中图分类号:** S125; S151.9; S156.4 **文献标志码:** A

## Effects of Electric Potential Gradient on Desalination of Weakly Permeable Saline-Alkali Soil Under Electric Field Conditions

ZHANG Zijie<sup>1,2</sup>, JIA Renhao<sup>1,2</sup>, LIU Yiren<sup>1,2</sup>, LIU Jianli<sup>1,3</sup>, ZHANG Jiabao<sup>1</sup>, LI Xiaopeng<sup>1,3\*</sup>

(1 *Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, China*; 2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*; 3 *University of Chinese Academy Sciences, Nanjing, Nanjing 211135, China*)

**Abstract:** Weakly permeable saline-alkali soil is difficult to desalinate due to its high concentration of sodium ions, dispersed clay particles, and poor aeration and permeability. Under electric field conditions, the electric potential gradient has a significant impact on soil electroosmotic flow, pH change, and ion distribution. This paper investigated the effects of electric potential gradient on the water and salt transport characteristics of weakly permeable saline-alkali soil through indoor soil column simulation experiments, and studied the effects of different electric potential gradient treatments on the dynamics of water and salt discharge, desalination efficiency, alkalization characteristics, and energy consumption. The experimental results showed that compared with the condition without electricity application, the treatments of 0.6, 1.2, 1.8, and 2.4 V/cm could improve the efficiency of water and salt discharge, and the efficiency increased with the increase of the electric potential gradient. During the 15-day electrification process, the amount of water and salt discharged in each treatment group was proportional to the electrification time, but the increment decreased with the electrification time. After 15 days of electrification, the desalination rates of the soils treated with 0.6, 1.2, 1.8, and 2.4 V/cm were 5.98%, 31.89%, 37.82%, and 51.64%, respectively, and the concentrations of water-soluble Na<sup>+</sup> decreased by 6.34%, 30.71%, 32.07%, and 44.44%, respectively. In addition, pH value of the top 0–5 cm soil of the weakly permeable saline-alkali soil decreased to near neutral (6.93–8.03), and the adsorbed Na<sup>+</sup> was basically removed. Based on the above research, the electric potential gradient treatment technology could not only accelerate the removal of salt and alkali from weakly permeable saline-alkali soil but also improve the alkalinity of the topsoil. Combining

①基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD1500502)资助。

\* 通信作者(lixp@issas.ac.cn)

作者简介: 张子杰(2000—), 男, 江苏常熟人, 硕士研究生, 研究方向为电场环境下黏闭性苏打盐碱土水盐运移特征及电动力学改良技术。

E-mail: 3306500840@qq.com

this technology with the abundant green energy such as wind and solar energy in the saline-alkali soil distribution areas of China provided an environmentally friendly and efficient technical solution for the improvement of saline-alkali soil.

**Key words:** Weakly permeable saline-alkali soil; Electric potential gradient; Soil column experiment; Desalination; Alkalinization indicators

盐碱地问题是一个全球性的环境挑战,尤其是在土壤条件恶劣、农业生产受限的地区<sup>[1-4]</sup>。其中,黏闭性盐碱土的特点是土壤中可交换性钠离子含量极高<sup>[5-6]</sup>。这些钠离子与土壤黏粒表面的负电荷相互作用,导致黏粒分散<sup>[7]</sup>,进而严重破坏土壤的通气透水性。在改良黏闭性盐碱土的过程中,传统的洗盐排盐方法<sup>[8-9]</sup>常常遭遇排水不畅的问题,导致盐分难以被有效排出,使得改良工作变得困难和复杂。因此,开发新型、高效的盐碱地改良技术显得尤为迫切。

电动力学修复技术是一种利用土层和污染物的电动力学性质对土壤进行修复的新兴修复技术<sup>[10-11]</sup>。其通过电化学和电动力学的复合作用,完成对土壤污染物的去除。该技术的核心在于电动力运行过程<sup>[12]</sup>,即利用直流电场在电极之间产生每平方米毫安量级的电流密度,以促使土壤溶液中的离子在阳极和阴极之间发生迁移<sup>[13-14]</sup>。电动力过程主要涉及电迁移、电渗流和电泳 3 种核心机制。电迁移是指带电离子在电场的作用下,阳离子向阴极迁移,而阴离子向阳极迁移<sup>[15]</sup>;电渗流是指土壤颗粒表面的负电荷与孔隙水中的离子形成双电层,扩散双电层使得孔隙水由阳极向阴极移动<sup>[16]</sup>;电泳是指土壤中带电的胶体粒子,如细小的土壤颗粒、腐殖质和微生物细胞等,在电场作用下发生迁移<sup>[17]</sup>。Kim 等<sup>[18]</sup>探讨了电动力学修复技术在盐渍农田修复中的应用效果,其采用 1 V/cm 的恒定电压梯度对盐渍土壤进行为期 14 d 的连续处理,结果显示,该处理方式显著提升了盐渍土壤的脱

盐效率,有效增强了土壤的脱盐能力。电动力学修复过程中,除了电动力过程,电极表面还会发生水电解过程<sup>[19]</sup>。有研究表明,在电场的影响下,靠近阳极和阴极的水分子会发生电解反应,在阳极生成酸性物质,在阴极生成碱性物质,进而导致土壤 pH 的变化<sup>[20]</sup>。可见,将电动力学修复技术应用到黏闭性盐碱土的盐碱脱除上,可为盐碱土的改良提供新的可能性。

由此,本研究通过设置不同电势梯度处理,探究了电场特征对黏闭性盐碱土水盐运移特征的影响及其机制,以为黏闭性盐碱地治理提供技术支持,为实现土壤改良和提高土地利用效率开辟新的思路。

## 1 材料与方 法

### 1.1 供试土壤

供试土壤为 2023 年 10 月取自吉林省大安市碱地生态试验站内的 0~20 cm 表层土壤。通过环刀法测得容重为 1.40 g/cm<sup>3</sup>,初始体积含水率为 0.353 4 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>,初始饱和含水率为 0.393 4 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>。土壤质地采用 Mastersizer 2000 型激光粒度分析仪(英国马尔文仪器有限公司)进行测定,依据国际制土壤质地分类标准,为黏土(黏粒为 42.01%,粉粒为 33.02%,砂粒为 24.97%)。将取回的土样置于阴凉处风干,去除其中的枯枝等杂物,研磨过 2 mm 筛后备用。通过烘干法测得土壤初始含盐量为 24.06 g/kg,初始 pH 为 10.45,属于重度苏打盐碱土<sup>[21-23]</sup>。土壤的初始盐分离子组成见表 1。

表 1 土壤初始盐分离子组成(g/kg)  
Table 1 Initial composition of soil salt ions

土层(cm)	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
0~20	0.039	9.241	0.052	0.013	8.700	24.197	1.716	0.386

### 1.2 试验装置

试验所用的装置如图 1 所示。装填土柱采用厚度为 0.5 cm 的有机玻璃柱制成<sup>[24]</sup>,其内径 5 cm,高 25 cm,上端为加水口,由上向下 5 cm 为阳极钛棒( $d=1$  cm,  $L=25$  cm)、底部排水口为阴极不锈钢管( $d=0.8$  cm,  $L=3$  cm)。土柱上下部分均可拆卸,以方便通电结束后采集不同深度的土壤。在土柱出水口铺设 44 mm×5 mm 的透水石,以防止土壤堵塞,减少土壤表面张力;在

出水口安装 300 目尼龙网,以防止出水口堵塞。供水装置为马氏瓶,内径 8 cm,厚度 0.5 cm,高 30 cm,容积 1 L,为试验提供稳定的静水头<sup>[25]</sup>。试验用水为纯水,以减少水中其他离子对后期测定土壤盐离子组成的干扰。

### 1.3 试验设计

本试验使用直流稳压电源供电在土柱中施加电场,设置 5 个不同电势梯度处理,分别为 0、0.6、1.2、

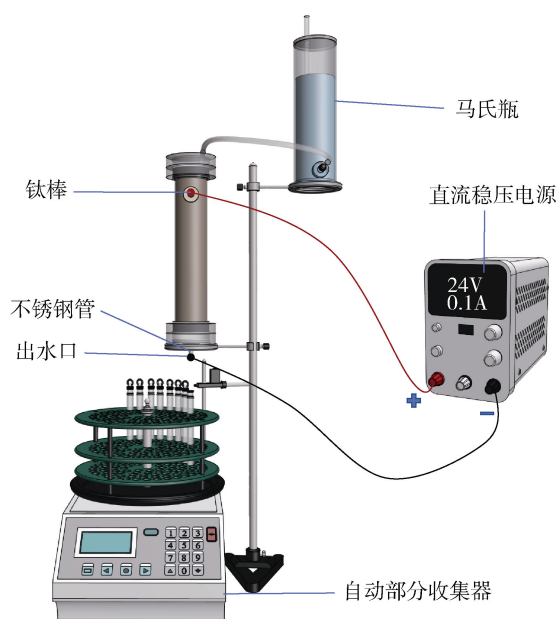


图 1 试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup

1.8、2.4 V/cm，每个处理 3 次重复。将原始土壤样品作为处理前初始状态，即基线值，记为 BL。

试验开始前，按照土壤容重 1.4 g/cm<sup>3</sup> 分层装填土柱，每 5 cm 一层，并用重物压至固定高度，每个土柱装填 20 cm 高。土柱装填好后浸没于水中，待土柱内土壤达到湿润状态取出。同时，调整马氏瓶高度，保证土柱在恒定水头 5 mm 条件下开展试验。

试验过程中，每隔 24 h 记录一次耗电量，同时通过自动部分收集器放置的试管自动收集浸出液。当土柱供电达 360 h 后停止通电，同时停止供水并去除土柱顶部积水。随后，将完成供电的土柱上下部拆开，每隔 5 cm 采集土样。土样自然风干、研磨、过 2 mm 筛后，用于测定土壤 pH、盐离子特征和碱化指标。

#### 1.4 测试分析

取出自动 BSZ-100 自动部分收集器上的试管，将试管收集的液体烘干至恒重并称重，计算土柱排水量。在烘干后的试管中加入 10 mL 纯水并充分搅拌，通过抽滤和离心去除溶液中的土壤颗粒和胶体，然后将溶液烘干至恒重并称重，计算土柱排盐量。土壤脱盐率的计算公式如式(1)所示<sup>[26]</sup>。

$$\text{脱盐率}(\%) = \frac{S_1 - S_2}{S_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中： $S_1$  为初始土壤含盐量，g/kg； $S_2$  为处理后土壤含盐量，g/kg。

盐基离子测定：对风干后的土壤样品进行研磨，按 1 : 5 的土水质量比，称取 10 g 土壤，加入 50 mL

纯水，充分振荡、离心并过滤。土壤中可溶性  $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{K}^+$  和  $\text{Na}^+$  含量的测定依据土壤可溶性盐分析方法<sup>[27]</sup>。其中， $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  测定采用原子吸收光谱法； $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$  测定利用火焰光度计法； $\text{Cl}^-$  测定采用  $\text{AgNO}_3$  滴定法； $\text{SO}_4^{2-}$  测定采用硫酸钡比浊法； $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$  测定利用双指示剂盐酸中和滴定法。

碱化指标测定：土壤阳离子交换量(CEC)和交换性  $\text{Na}^+$  采用乙酸铵-氢氧化铵淋洗-火焰光度计法测定<sup>[28]</sup>。土壤碱化度(ESP)为交换性  $\text{Na}^+$  占阳离子交换量的百分率。土壤 pH 采用多功能测定仪 S470-K 测得<sup>[29]</sup>。

#### 1.4 数据处理与分析

利用 SPSS 26.0 处理数据。通过 Matlab R2016b 采用 plot 函数绘图，分析比较各处理土壤排水量与脱盐率。利用 Origin 2021 进行绘图，采用单因素方差分析及最小显著性差异法比较各处理土壤盐离子特征和土壤碱化指标的差异。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同电势梯度处理下黏闭性土壤排水排盐动态特征

**2.1.1 土壤排水量与浸出液盐浓度** 由图 2A 可知，不同电势梯度处理土壤排水量大小随着通电时间增加而增加，且电势梯度越大，相应的排水量越大。但各处理排水量的增量随通电时间递减。由图 2B 可知，在通电前 6 d 内，不同电势梯度处理浸出液盐浓度由高到低依次为 1.2 V/cm > 2.4 V/cm > 1.8 V/cm > 0.6 V/cm > 0 V/cm，而在通电 6 d 后，排序变为 1.2 V/cm > 1.8 V/cm > 2.4 V/cm > 0.6 V/cm > 0 V/cm。这些结果表明，电势梯度处理能够提高土壤排水效率，但在相同排水量条件下，高电势梯度处理的浸出液盐浓度反而降低。

**2.1.2 土壤含盐量与脱盐率** 由图 2C 可知，0 V/cm 电势梯度处理的土壤盐分含量未发生变化，而在 0.6、1.2、1.8、2.4 V/cm 电势梯度处理下，土壤盐分含量在通电过程中均呈现不同程度的下降，且随着通电时间的延长，土壤排盐量增加，但增量呈递减趋势。试验开始前，所有处理的土壤含盐量均为 24.06 g/kg。经过 15 d 的通电处理后，0、0.6、1.2、1.8、2.4 V/cm 处理的土壤含盐量分别为 24.06、22.62、16.39、14.96、11.64 g/kg，土壤仍属于重度盐碱土<sup>[26]</sup>，因此，要进一步降低土壤盐分含量，需要进行长期的通电排盐处理。由图 2D 可知，土壤脱盐率随着通电时间的增加

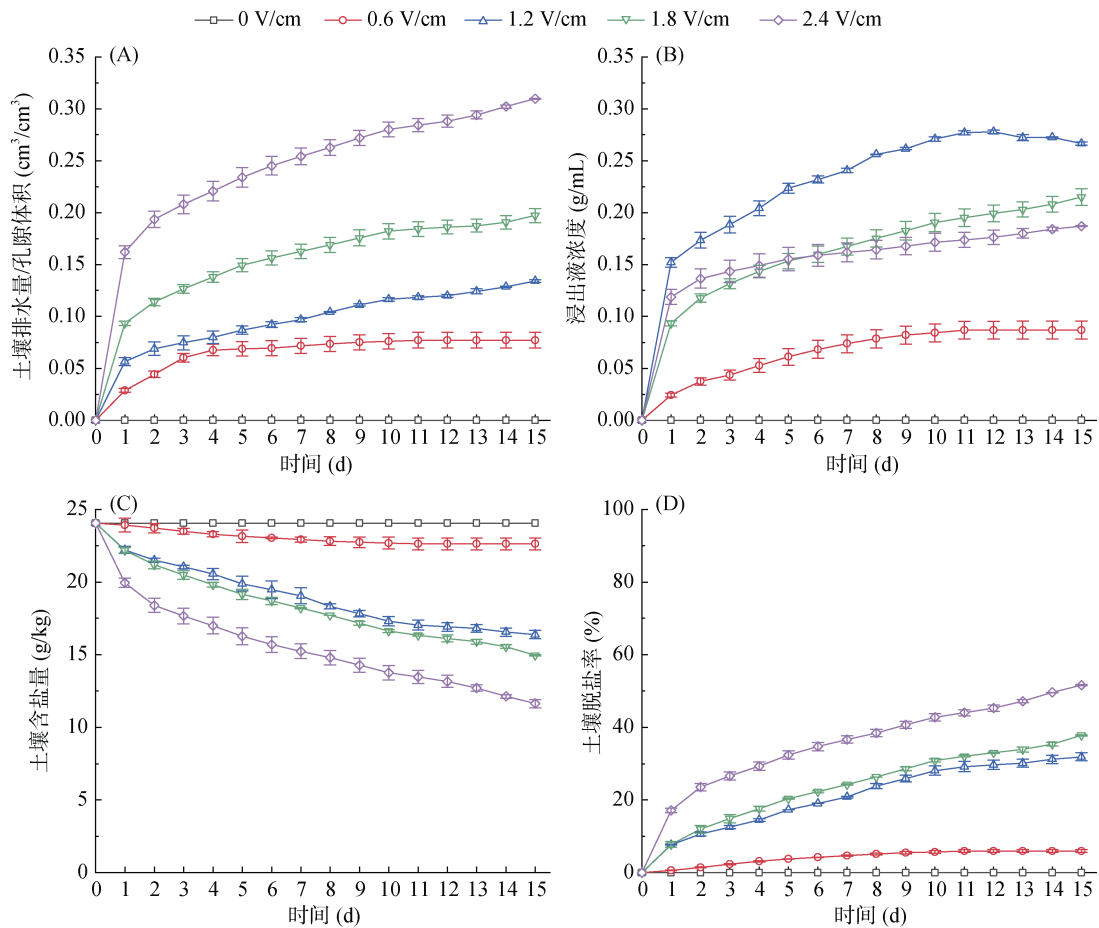


图 2 不同电势梯度处理下土壤排水排盐动态过程

Fig. 2 Dynamic processes of soil drainage and salt discharge treated with different potential gradients

而增加。在 15 d 的通电处理后, 0.6、1.2、1.8、2.4 V/cm 电势梯度处理的土柱脱盐率分别达到了 5.98%、31.89%、37.82%、51.64%。这些结果表明, 在未施加电场的情况下, 仅依靠土壤水势难以实现黏闭性土壤的脱盐; 通过外加电场, 可以显著加速盐分的排出。电势梯度的增加与土壤脱盐率的提高之间存在正相关关系, 即电势梯度越大, 土壤的脱盐率越高。

## 2.2 不同电势梯度处理下黏闭性土壤理化性质

### 2.2.1 土壤阳离子含量

利用电能驱动排水排盐对黏闭性盐碱土进行改良, 不同电势梯度处理的土壤阳离子变化明显不同, 结果如图 3 所示。土壤中 K<sup>+</sup> 含量占阳离子比例较低, 且与通电前相比, 各处理 K<sup>+</sup> 脱除效果差异不大。可溶性 Ca<sup>2+</sup> 和 Mg<sup>2+</sup> 含量在 0~5 cm 表层有所升高, 说明在通电条件下, 阳极的电解反应使 Ca<sup>2+</sup> 和 Mg<sup>2+</sup> 的溶解度增大。对于 Na<sup>+</sup>, 与 BL 相比, 各处理表层 0~5 cm 的水溶性 Na<sup>+</sup> 含量均呈现出下降的趋势, 而在底层 15~20 cm 则呈现上升的趋势, 且随着电势梯度的增大, 这一趋势更为明显。0、0.6、1.2、1.8、2.4 V/cm 电势梯度处理土柱整体 Na<sup>+</sup> 含量

与 BL 相比分别降低了 1.26%、6.34%、30.71%、32.07%、44.44%。从以上结果可知, Na<sup>+</sup> 是供试土壤含量最高的阳离子, 且 Na<sup>+</sup> 脱除量在阳离子中最高; 电势梯度的增加显著提高了 Na<sup>+</sup> 的脱除效率。

### 2.2.2 土壤阴离子含量

由图 4 可知, 各处理的 Cl<sup>-</sup> 与 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 含量占阴离子比例较低, 与 BL 相比, 不同电势梯度处理阴离子脱除效果差异较小。对于 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> 和 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 含量, 0、0.6、1.2、1.8、2.4 V/cm 电势梯度处理均有一定幅度的减少。其中, 各处理的 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 含量与 BL 相比分别下降了 6.83%、29.09%、20.78%、23.40%、36.59%, 而 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> 含量与 BL 相比分别下降了 6.61%、1.19%、11.49%、8.47%、31.03%。这些结果表明, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 是供试土壤含量最高的阴离子, CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> 含量次之, 二者含量变化趋势与土壤深度呈正相关; 外加电场依靠电势梯度处理可以更高效地推动盐基阴离子的排出, 并且电势梯度越大, 表层 0~5 cm 阴离子含量越低。

### 2.2.3 土壤 pH

由图 5 可知, 与 BL 相比, 0、0.6、1.2、1.8、2.4 V/cm 电势梯度处理 0~5 cm 土层土壤

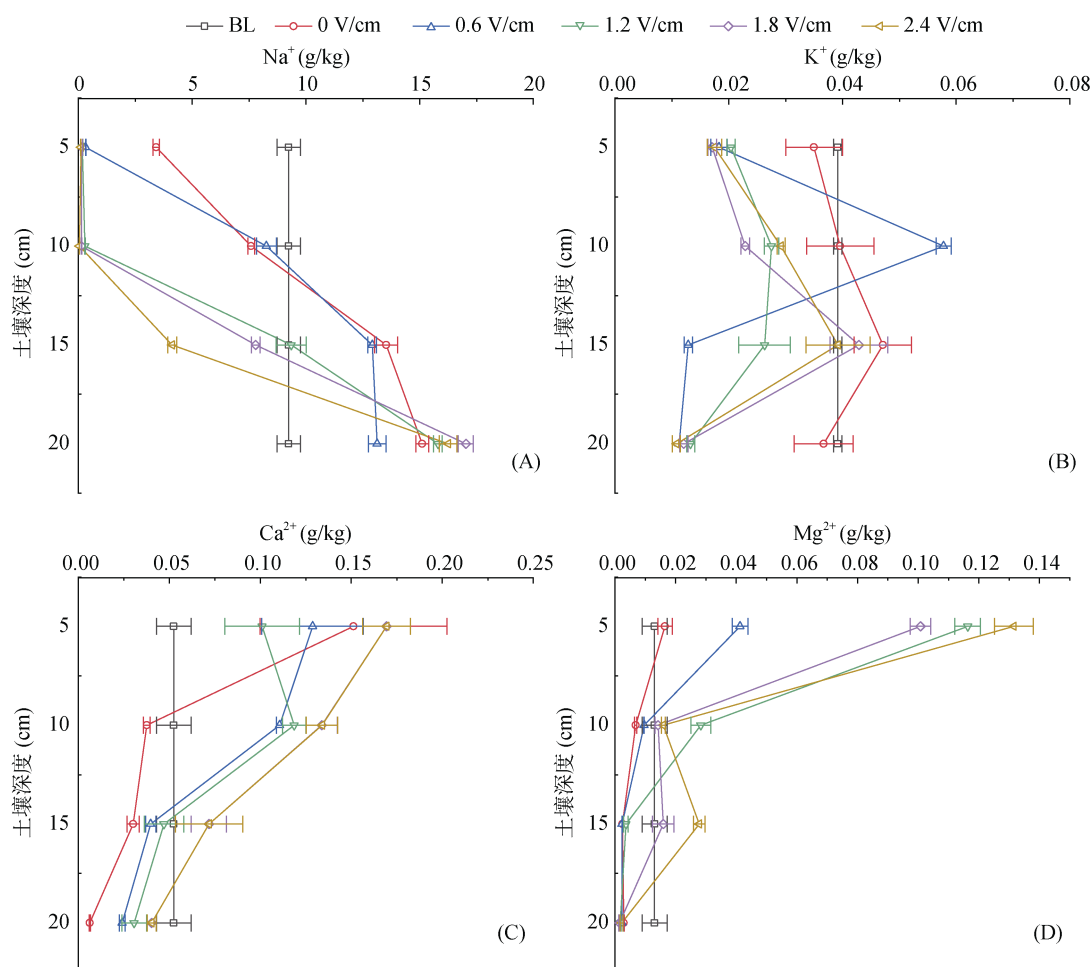


图 3 不同电势梯度处理下土壤阳离子含量

Fig. 3 Soil cation contents under different potential gradients

pH 分别降低了 0.19%、21.14%、33.70%、36.92%、33.66%，并且在 5~10 cm 土层也表现出 pH 的下降，但降幅较小。在 15~20 cm 土层，与 BL 相比，各电势梯度处理土壤 pH 有所上升，上升幅度分别为 0.19%、3.70%、5.26%、6.59%、8.06%，而在 10~15 cm 土层土壤 pH 上升幅度较小。可见，不同电势梯度处理均能促进 0~10 cm 土层盐碱土 pH 降低，且电势梯度越大，pH 降低幅度越明显，同时，10~20 cm 土层的 pH 也随电势梯度的增加而上升。这表明电势梯度处理对于表层土壤碱性的改良具有积极作用。

**2.2.4 土壤交换性 Na<sup>+</sup> 含量及碱化度** 由图 6A 可知，0、0.6、1.2、1.8、2.4 V/cm 电势梯度处理 0~5 cm 土层土壤交换性 Na<sup>+</sup> 含量分别为 3.66、0.06、0.04、0.03、0.02 g/kg，5~10 cm 土层分别为 3.56、3.23、0.31、0.09、0.04 g/kg，表明在电势梯度驱动下，表层土壤交换性 Na<sup>+</sup> 含量显著降低，且随着电势梯度的增加，降幅更为明显。但 0.6、1.2、1.8、2.4 V/cm 电势梯度处理 10~20 cm 土层土壤交换性 Na<sup>+</sup> 含量与 BL 相比

均有增加。由图 6B 可知，各电势梯度处理 0~5 cm 土层土壤碱化度分别为 97.37%、1.63%、0.75%、0.61% 和 0.58%，5~10 cm 土层分别为 95.43%、85.00%、9.04%、2.74% 和 1.21%，表明不同电势梯度处理均能促进表层土壤的改良，且电势梯度越大，改良效果越显著。这进一步证实了电势梯度处理在降低土壤中交换性 Na<sup>+</sup> 含量和碱化度方面的有效性。

### 2.3 不同电势梯度处理下黏闭性土壤耗能情况

由图 7A 可知，随着通电时间的增加，各电势梯度处理输入电量呈现出递增的趋势，且电势梯度越大，相应的能耗也越高。由图 7B 可知，整体上，各电势梯度处理单位能耗下的排盐量呈递减趋势。其中，1.2 V/cm 处理排盐量与能耗之比最大。可见，在同等耗电量下，高电势梯度处理的排盐量降低。

## 3 讨论

本研究结果表明，电势梯度处理技术在提升黏闭性盐碱土的脱盐效率方面具有显著效果，并且伴随着

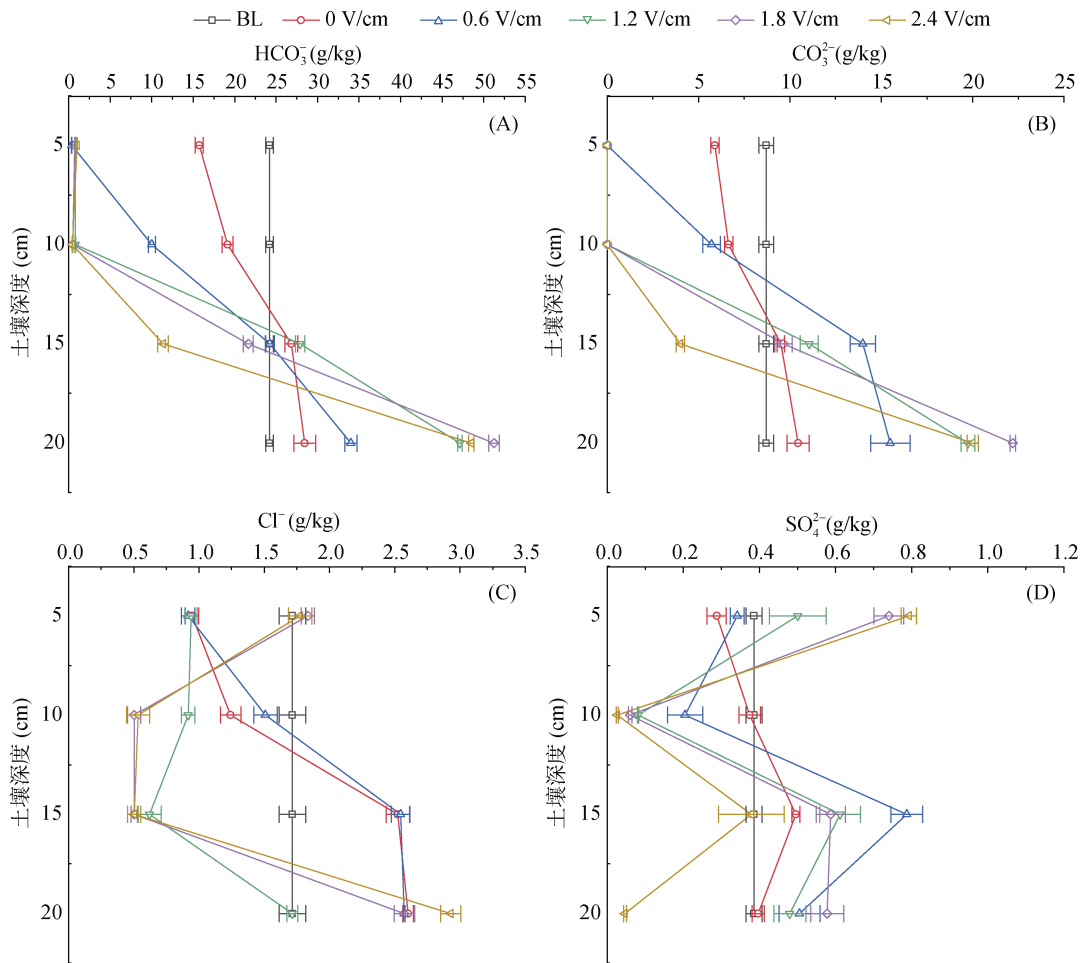


图 4 不同电势梯度处理下土壤阴离子含量  
Fig. 4 Soil anion contents under different potential gradients

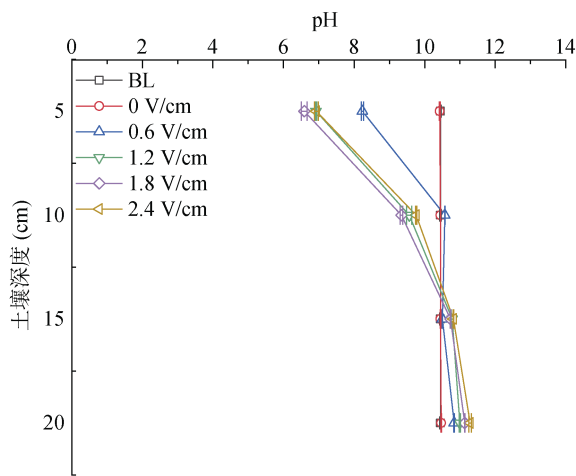


图 5 不同电势梯度处理下土壤 pH  
Fig. 5 Soil pH values under different potential gradient treatments

排水量的显著增加。这可能归因于直流电场的作用，它使得土壤颗粒表面带有的负电荷与孔隙水中的离子相互作用，形成双电层结构。这种结构促使土壤孔隙中的水分从阳极向阴极方向移动，同时促进土壤溶液中的盐基离子发生迁移，从而加速了黏闭性土壤中

盐分的脱除<sup>[17]</sup>。齐元帅等<sup>[30]</sup>关于电化学脱盐机理的相关研究中，深入探讨了离子的传输和去除特性，为电化学脱盐技术的设计和 optimization 提供了坚实的理论支持。Virkutyte 等<sup>[31]</sup>将电动土壤修复技术运用在黏土与砂质土中的研究发现，由于黏土表面存在大量的负电荷，电动力技术在黏土中排盐效果尤为显著。此外，有研究表明，电动力技术能够有效净化高盐度土壤溶液并实现脱盐。本研究中，电势梯度处理技术显著提高了黏闭性盐碱土中  $\text{Na}^+$  的去除率，并且土壤表层的  $\text{Na}^+$  含量明显降低。Abou-Shagy<sup>[32]</sup>关于电动力技术改良盐害土壤的研究表明，通电处理是去除  $\text{Na}^+$  的关键因素，且  $\text{Na}^+$  的去除率与电势梯度呈正相关关系。值得注意的是，本研究中 1.8 V/cm 和 2.4 V/cm 电势梯度处理在提高脱盐率的同时，其排水量同样增加。然而，在相同的排水量条件下，1.8 V/cm 和 2.4 V/cm 处理的浸出液盐浓度却低于 1.2 V/cm 处理。这可能是因为过高的电势梯度下，虽然排水速率得到进一步提升，但盐离子的迁移速率并未同步增加。此外，在高电势梯度条件下，电极反应速率加快，阴阳

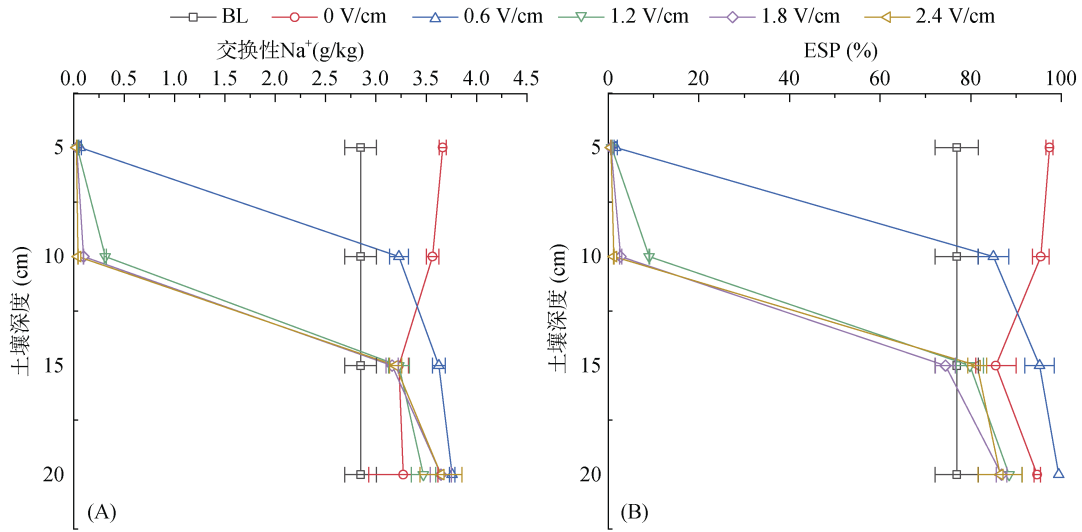


图 6 不同电势梯度处理下土壤交换性 Na<sup>+</sup>含量及碱化度

Fig. 6 Soil exchangeability Na<sup>+</sup> contents and alkalinities of soil layers treated with different electric potential gradients

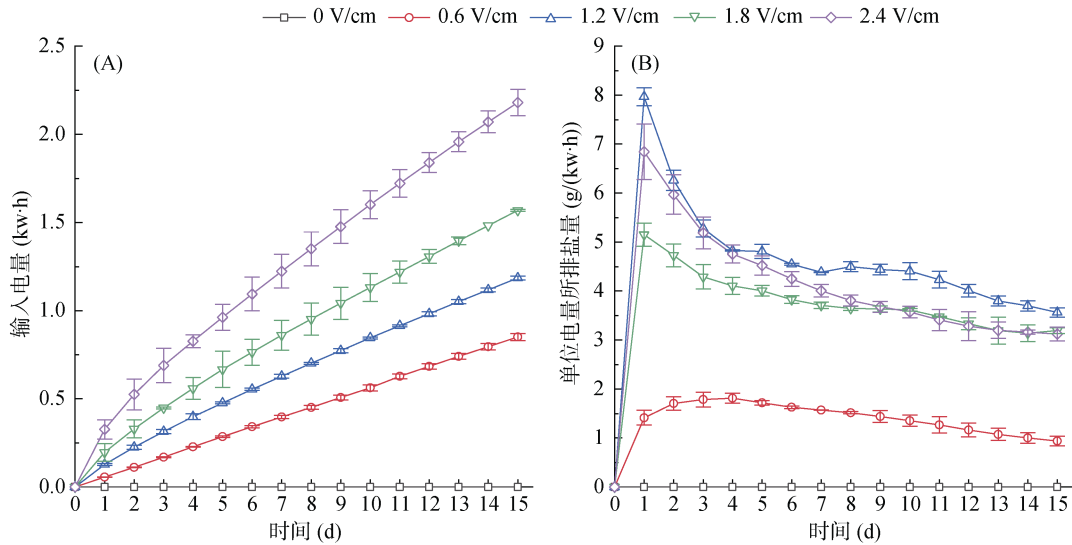


图 7 不同电势梯度处理耗能情况

Fig. 7 Energy consumptions under different electric potential gradients

极上的氧化还原反应可能导致部分盐离子被氧化, 形成更难迁移的形态。因此, 选择适当的电势梯度对于促进排盐和减少耗水量具有重要意义。

电势梯度处理技术在提高脱盐排水效率的同时, 对土壤表层 pH 的调节亦展现出积极作用。本研究中, 为期 15 d 的电势梯度处理显著改善了黏闭性盐碱土的理化性质。具体而言, 土壤表层 0~5 cm 的 pH 降低至接近中性水平, 同时, 土壤中吸附性 Na<sup>+</sup> 基本去除。这一结果可能归因于电极表面发生的水解反应, 该反应生成了 H<sup>+</sup> 和 OH<sup>-</sup>。在电解过程中, 阳极附近的 OH<sup>-</sup> 被大量消耗<sup>[33]</sup>, 而 H<sup>+</sup> 则与土壤溶液中的 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 反应, 生成水和 CO<sub>2</sub>, 进而导致阳极附近的 pH 降低。Klouche 等<sup>[34]</sup>关于电动技术处理修复盐碱

地的研究表明, 在土壤中插入电极并施加连续的 10 V 电压, 其处理后的土壤 pH 在阳极区域呈酸性, 在阴极则表现为碱性。本研究中, 靠近黏闭性盐碱土阳极的土壤 pH 与电势梯度呈负相关关系, 靠近阴极的土壤 pH 与电势梯度呈正相关关系。

本研究中, 电势梯度处理所耗电量与通电时间呈正相关关系, 但增量呈下降趋势。此外, 土壤排盐量与单位能耗之比整体上呈递减趋势。这可能归因于随着脱盐过程的进行, 土壤中的盐基离子含量逐渐减少, 土壤的电阻率逐渐增大, 导致电流减小。此外, 电极表面的极化现象也会导致电流减小。张锡辉等<sup>[17]</sup>在关于电动力学技术在土壤修复中的研究进展中认为, 在电动力学修复过程中, 电极上水的电解反应会

产生氢气和氧气(气泡), 这些气泡会覆盖在电极表面, 形成绝缘层, 导致电极的导电性下降, 从而使电流降低。

综上所述, 本研究深入探讨了电势梯度处理技术在改良黏闭性盐碱土中的应用效果, 揭示了其在提高土壤排水脱盐效率、调节土壤 pH 以及优化土壤理化性质方面的优势, 但目前仍存在着不足。未来的研究可进一步探讨电势梯度处理在不同土壤类型和环境条件下的应用效果, 以及如何结合其他土壤改良技术, 以实现更高效、更环保的土壤改良目标。

## 4 结论

电势梯度处理技术在加速黏闭性盐碱土的盐分脱除方面是可行的。该技术在提高黏闭性盐碱土脱盐效率的同时, 伴随着排水量的增加。具体而言, 黏闭性土壤排水脱盐效率与电势梯度呈正相关关系, 并且土壤排水量与脱盐率均随通电时间的增加而增加。电势梯度处理显著提高了土壤中  $\text{Na}^+$  和  $\text{HCO}_3^-$  的去除率, 并有效降低了土壤表层 0~5 cm 的  $\text{Na}^+$  和  $\text{HCO}_3^-$  含量。此外, 该技术对土壤表层 pH 的调节表现出积极作用, 使得土壤表层 0~5 cm 的 pH 降低至接近中性水平, 同时土壤碱化度降至 2% 以下。综合来看, 电势梯度处理技术不仅能够有效去除土壤中的盐分, 还能改善土壤的碱性, 这对于提升土壤健康和农业生产条件具有重要的意义。

## 参考文献:

- [1] 谭利伟, 李旭锐, 武耘, 等. 新阶段盐碱地综合改造利用研究[J]. 农业工程技术, 2023, 43(22): 53–54.
- [2] 姚东恒, 廖宇波, 孔祥斌, 等. 基于“三层”融合的松嫩平原盐碱地资源特征[J]. 农业工程学报, 2022, 38(23): 247–257.
- [3] 王世睿, 黄迎新. 松嫩平原盐碱地改良治理研究进展[J]. 土壤与作物, 2023, 12(2): 206–217.
- [4] 姜万, 张壹, 杨伟丹, 等. 盐碱地改良及盐碱地农业的研究现状与发展趋势——基于 CiteSpace 可视化分析[J]. 现代园艺, 2024, 47(12): 32–35, 38.
- [5] Luo X J, Zhang X, Zhang L, et al. Characteristics of clay dispersion and its influencing factors in saline-sodic soils of Songnen Plain, China[J]. Agricultural Water Management, 2024, 303(C): 109033.
- [6] Shen J J, Wang Q, Chen Y T, et al. Experimental investigation into the salinity effect on the physicommechanical properties of carbonate saline soil[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2024, 16(5): 1883–1895.
- [7] 罗雪娇, 王志春, 杨帆. 苏打盐碱土壤黏粒分散特征研究进展[J]. 土壤, 2024, 56(2): 255–263.
- [8] 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.
- [9] 周利颖, 李瑞平, 苗庆丰, 等. 排盐暗管间距对河套灌区重度盐碱土盐碱特征与肥力的影响[J]. 土壤, 2021, 53(3): 602–609.
- [10] 刘芳, 付融冰, 徐珍. 土壤电动修复的电极空间构型优化研究[J]. 环境科学, 2015, 36(2): 678–685.
- [11] 杨珍珍, 耿兵, 田云龙, 等. 土壤有机污染物电化学修复技术研究进展[J]. 土壤学报, 2021, 58(5): 1110–1122.
- [12] 章梅, 王彦君, 周来, 等. 电解液强化电力修复铅镉污染土壤研究[J]. 能源环境保护, 2022, 36(5): 53–59.
- [13] Han D, Wu X Y, Li R, et al. Critical review of electro-kinetic remediation of contaminated soils and sediments: Mechanisms, performances and technologies[J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2021, 232(8): 335.
- [14] Pandey B K, Shukla C, Sillanpää M, et al. A systematic review on application of electrokinetics in stabilization and remediation of problematic soils[J]. Innovative Infrastructure Solutions, 2023, 8(9): 226.
- [15] 谢帆, 樊丽, 逯秋源, 等. 电动及其联用技术在污染场地修复中的应用研究进展[J]. 四川环境, 2022, 41(2): 281–288.
- [16] 齐培杉, 朱蓬生, 谢天尧. 基于非接触电导检测和在线富集技术快速灵敏检测土壤中速效磷[J]. 分析测试学报, 2022, 41(5): 787–791.
- [17] 张锡辉, 王慧, 罗启仕. 电动力学技术在受污染地下水和土壤修复中新进展[J]. 水科学进展, 2001, 12(2): 249–255.
- [18] Kim D H, Jo S U, Choi J H, et al. Hexagonal two dimensional electrokinetic systems for restoration of saline agricultural lands: A pilot study[J]. Chemical Engineering Journal, 2012, 198/199: 110–121.
- [19] Yeung A T, Gu Y Y. A review on techniques to enhance electrochemical remediation of contaminated soils[J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 195: 11–29.
- [20] Zhang P, Zou D, Dong C H, et al. Mechanism investigation of arsenic remediation in contaminated soil by Fe anode using the electrochemical method[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2024, 12(4): 113183.
- [21] 孙广友, 王海霞. 松嫩平原盐碱地大规模开发的前期研究、灌区格局与风险控制[J]. 资源科学, 2016, 38(3): 407–413.
- [22] 王露露, 王天亮, 高斌, 等. 松嫩平原土地盐碱化时空动态变化及影响因素分析[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(4): 108–115.
- [23] Wang L, Seki K, Miyazaki T, et al. The causes of soil alkalization in the Songnen Plain of Northeast China[J]. Paddy and Water Environment, 2009, 7(3): 259–270.
- [24] 孙燕, 吴建鑫, 曲植, 等. 生化黄腐酸对不同质地苏打盐碱土水盐运移特征的影响[J]. 农业工程学报, 2023, 39(22): 74–84.
- [25] 肖娟, 雷廷武, 李光永. 水质及流量对盐碱土滴灌湿润锋运移影响的室内试验研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(2): 88–91.

- [26] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [27] 中国土壤学会农业化学专业委员会. 土壤农业化学常规分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 1983.
- [28] 李彬, 王志春, 迟春明. 吉林省大安市苏打盐碱土碱化参数与特征分析[J]. 生态与农村环境学报, 2006, 22(1): 20–23, 28.
- [29] 侯迷红, 范富, 张庆国, 等. 西辽河盐碱地不同植被类型土壤碱化特征差异分析[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2022, 34(5): 39–46.
- [30] 齐元帅, 彭文朝, 李阳, 等. 电化学脱盐机理及相关研究进展[J]. 化工学报, 2024, 75(1): 171–189.
- [31] Virkutyte J, Sillanpää M, Latostenmaa P. Electrokinetic soil remediation—Critical overview[J]. Science of the Total Environment, 2002, 289(1/2/3): 97–121.
- [32] Abou-Shady A. Reclaiming salt-affected soils using electro-remediation technology: PCPSS evaluation[J]. Electrochimica Acta, 2016, 190: 511–520.
- [33] 王森, 邓蓉蓉, 张启波. 电解水阳极析氧替代反应及高效催化剂研究进展[J]. 工程科学学报, 2024, 46(4): 744–764.
- [34] Klouche F, Bendani K, Benamar A, et al. Electrokinetic restoration of local saline soil[J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 22: 64–68.

(责任编辑: 于 飞)