

DOI: 10.11766/trxb201910160478

王亚男, 许静, 郝利君, 刁凤伟, 张璟霞, 丁胜利, 史中奇, 贾冰冰, 郭伟. 修复剂对镉污染盐渍化土壤植物修复效率的影响[J]. 土壤学报, 2021, 58(2): 464–475.

WANG Yanan, XU Jing, HAO Lijun, DIAO Fengwei, ZHANG Jingxia, DING Shengli, SHI Zhongqi, JIA Bingbing, GUO Wei. Effects of Soil Remediation Agents on the Phytoremediation Efficiency of Cadmium-Polluted Salinized Soil [J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(2): 464–475.

## 修复剂对镉污染盐渍化土壤植物修复效率的影响\*

王亚男, 许静, 郝利君, 刁凤伟, 张璟霞, 丁胜利, 史中奇, 贾冰冰, 郭伟<sup>†</sup>

(内蒙古大学生态与环境学院, 蒙古高原生态学与资源利用教育部重点实验室, 内蒙古自治区环境污染控制与废物资源化重点实验室, 呼和浩特 010021)

**摘要:** 目前, 重金属污染盐渍化土壤已成为世界性的环境问题, 利用盐生植物进行修复具有良好的环境与经济效益, 但如何提高盐生植物修复效率的研究尚较少。采用盆栽试验方法, 通过向土壤中施加氯化钠和氯化镉溶液分别模拟无污染非盐渍化土壤(Cd0S0)、NaCl 型盐渍化土壤(Cd0S4)、重金属 Cd 污染土壤(Cd3S0)、重金属 Cd 污染 NaCl 型盐渍化土壤(Cd3S4), 研究施加乙二胺四乙酸(EDTA)和生物质炭对盐地碱蓬生长、离子平衡、Cd 和 Na<sup>+</sup>吸收的影响。结果显示, 与 Cd0S0 相比, Cd0S4 处理盐地碱蓬地上部干物质质量显著增加 115.5%~341.7%; 与 Cd0S4 相比, Cd3S4 处理盐地碱蓬地上部干物质质量显著降低 62.8%~84.4%, 生物质炭使 Cd3S0 处理盐地碱蓬总干物质质量显著增加 328.6%。与 Cd0S0 或 Cd3S0 相比, Cd0S4 和 Cd3S4 处理盐地碱蓬地上部及根部 K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>/Na<sup>+</sup>、P/Na<sup>+</sup> 显著降低; 生物质炭显著增加了 Cd3S0 处理盐地碱蓬地上部 P/Na<sup>+</sup> 和根部 K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup>、P/Na<sup>+</sup>。与 Cd0S4 相比, Cd3S4 处理盐地碱蓬地上部和根部 Na<sup>+</sup> 浓度显著增加 32.5%~94.5%, 而盐地碱蓬地上部和根部 Na<sup>+</sup> 含量显著降低 21.3%~90.9%; 与 Cd3S0 相比, Cd3S4 处理盐地碱蓬地上部 Cd 浓度和含量分别显著增加 135.8%~223.6% 和 132.4%~471.5%。施加 EDTA 和生物质炭使 Cd3S4 处理盐地碱蓬地上部 Na<sup>+</sup> 浓度显著增加 38.6%、56.0%, Na<sup>+</sup> 含量增加 199.6%、289.3%, Cd 含量显著增加 133.4%、173.4%。研究表明, 在 Cd 污染 NaCl 型盐渍化土壤中施用 EDTA 和生物质炭可促进盐地碱蓬地上部对 Cd 和 Na<sup>+</sup> 的吸收积累, 有助于提高植物修复效率, 可为重金属污染盐渍化土壤修复提供基础数据和科学依据。

**关键词:** 镉; 盐渍化土壤; 乙二胺四乙酸; 生物质炭; 盐地碱蓬

**中图分类号:** X53      **文献标志码:** A

## Effects of Soil Remediation Agents on the Phytoremediation Efficiency of Cadmium-Polluted Salinized Soil

WANG Yanan, XU Jing, HAO Lijun, DIAO Fengwei, ZHANG Jingxia, DING Shengli, SHI Zhongqi, JIA Bingbing, GUO Wei<sup>†</sup>

(Inner Mongolia Key Laboratory of Environmental Pollution Control and Waste Resource Recycle, Ministry of Education Key Laboratory of Ecology and Resource Use of the Mongolian Plateau, School of Ecology and Environment, Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China)

\* 国家自然科学基金项目(41977113, 31860170)和内蒙古自然科学基金项目(2018MS04003)资助 Support by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 41977113 and 31860170) and the Natural Science Foundation of Inner Mongolia of China (No. 2018MS04003)

<sup>†</sup> 通讯作者 Corresponding author, E-mail: ndguowei@163.com

作者简介: 王亚男(1993—), 女, 内蒙古锡林浩特人, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤污染修复。E-mail: 18804897989@163.com

收稿日期: 2019-10-16; 收到修改稿日期: 2020-02-26; 网络首发日期(www.cnki.net): 2020-04-03

**Abstract:** 【Objective】With accelerated urbanization, industrial development and excessive utilization of agricultural chemicals, the globe has witnessed soils in a number of regions or areas being salinized and polluted with heavy metals simultaneously. At present, heavy metal-polluted salinized soil has become a worldwide environmental problem. Phytoremediation of heavy metal-polluted salinized soil with halophytes demonstrates benign environmental and good economic benefits. However, little can be found in the literature about how to improve the efficiency of soil remediation with halophytes. The present research is to investigate effects of two remediation agents on remediation of heavy metal-polluted salinized soil with halophytes. 【Method】A pot experiment was carried out in greenhouse under natural light. Halophyte *Suaeda salsa* was selected as the test plant in the experiment. Four types of soils were simulated by amending the soil with sodium chloride and cadmium chloride solutions separately into 1) soil Cd0S0 (0 mg·kg<sup>-1</sup> Cd and 0 g·kg<sup>-1</sup> NaCl); 2) Soil Cd0S4 (0 mg·kg<sup>-1</sup> Cd and 4 g·kg<sup>-1</sup> NaCl); 3) Soil Cd3S0 (3 mg·kg<sup>-1</sup> Cd and 0 g·kg<sup>-1</sup> NaCl) and 4) Soil Cd3S4 (3 mg·kg<sup>-1</sup> Cd and 4 g·kg<sup>-1</sup> NaCl). The experiment was laid out in a 2×2×3-factor randomized complete block design (0 and 3 mg·kg<sup>-1</sup> Cd; 0 and 4 g·kg<sup>-1</sup> NaCl; 0 and 4 mmol·kg<sup>-1</sup> ethylene diamine tetraacetic acid (EDTA) and 15 g·kg<sup>-1</sup> biochar). The aim of the experiment was to investigate effects of EDTA and biochar on growth, ion balance, and Cd and Na<sup>+</sup> uptake and accumulation of the *Suaeda salsa* grown in cadmium-polluted sodium chloride salinized soil. 【Result】Results show that dry weight of *Suaeda salsa* shoot was 115.5%-341.7% higher in Treatment Cd0S4 than in Treatment Cd0S0, but 62.8%-84.4% lower in Treatment Cd3S4 than in Treatment Cd0S4. With application of biochar, total dry weight of the *Suaeda salsa* increased significantly by 328.6% in Treatment Cd3S0. K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>/Na<sup>+</sup> and P/Na<sup>+</sup> ratios in shoot and root of the *Suaeda salsa* decreased significantly in Treatments Cd0S4 and Cd3S4 as compared to that in Treatment Cd0S0 or Cd3S0. Application of biochar increased significantly P/Na<sup>+</sup> ratio in shoot and K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup> and P/Na<sup>+</sup> ratios in root of the *Suaeda salsa* in Treatment Cd3S0. Na<sup>+</sup> concentration in shoot and root of the *Suaeda salsa* increased significantly by 32.5%-94.5%, while Na<sup>+</sup> content in shoot and root of the *Suaeda salsa* decreased significantly by 21.3%-90.9% in Treatment Cd3S4 as compared to that in Treatment Cd0S4. Cd concentration and content in shoot of the *Suaeda salsa* increased significantly by 135.8%-223.6% and 132.4%-471.5%, respectively, in Treatment Cd3S4 compared to that in Treatment Cd3S0. Application of EDTA and biochar increased significantly Na<sup>+</sup> concentration by 38.6% and 56.0%, Na<sup>+</sup> content by 199.6% and 289.3%, and Cd content by 133.4% and 173.4% in shoot of the *Suaeda salsa* in Treatment Cd3S4, respectively. 【Conclusion】Results suggest that applications of EDTA and biochar significantly promote uptake and accumulation of Cd and Na<sup>+</sup> in shoot of the *Suaeda salsa* grown in cadmium-polluted sodium chloride salinized soil and improve efficiency of the phytoremediation of heavy metal-polluted salinized soil. All the findings in the research may provide certain basic data and a scientific basis for remediation of heavy metal-polluted salinized soil.

**Key words:** Cadmium; Salinized soil; EDTA; Biochar; *Suaeda salsa*

近年来,随着人类活动加剧和农用化学品的大量使用,导致包括中国在内的世界部分干旱半干旱地区土壤和沿海及河口滩涂土壤受到重金属污染和盐渍化的“双重”影响,使得重金属污染盐渍化土壤成为世界性的环境问题<sup>[1]</sup>。与重金属污染非盐渍化土壤相比,盐渍化土壤中的盐分可增加重金属的迁移性和生物有效性,从而显著改变重金属污染盐渍化土壤可导致的环境与健康风险<sup>[2]</sup>。但是,由于重金属污染盐渍化土壤的复杂性及相关修复技术缺少针对性,使得修复效果十分有限。目前,国内外学者逐渐开展了利用盐生植物修复重金属污染盐渍化土壤的研究<sup>[2]</sup>。在盐渍化土壤环境下,盐生植物

与甜土植物相比具有较高的生物量和富集盐分的能力<sup>[3]</sup>,同时也具有较强重金属耐受性或积累重金属的能力<sup>[4]</sup>。土壤盐分可影响盐生植物对重金属的吸收转运及耐受性<sup>[5]</sup>。因此,挖掘并使用盐生植物治理重金属污染盐渍化土壤,具有较好的环境效应和经济效益。

为了提高土壤的修复效率,通过外源添加土壤修复剂强化植物修复效果的研究也逐渐开展起来<sup>[6]</sup>。乙二胺四乙酸(EDTA)是一种有效的二价金属离子螯合剂,能增加土壤重金属的移动性,可显著提高重金属污染土壤的植物修复效率<sup>[7]</sup>。生物质炭是一种来源广泛的土壤改良剂,一方面在盐渍化或重金属

污染土壤环境中生物质炭可改善土壤理化性质和植物营养状况<sup>[8]</sup>,提高植物对逆境胁迫的抗性<sup>[9]</sup>,可加速土壤中盐分的浸出,对于改良盐渍化土壤具有巨大的潜力<sup>[10]</sup>;另一方面生物质炭具有巨大的比表面积,可固持和吸附土壤中的重金属并降低其有效态含量,从而减轻重金属对植物的毒害作用<sup>[11]</sup>。目前,国内外有关利用 EDTA 和生物质炭促进盐地碱蓬修复重金属污染盐渍化土壤的研究尚较少<sup>[12]</sup>,并且二者对重金属污染盐渍化土壤修复的作用机理也不尽相同,其相关研究对于强化重金属污染盐渍化土壤的植物修复效率具有重要的科学意义和应用价值。

本研究采用盆栽试验法,模拟重金属镉(Cd)污染 NaCl 型盐渍化土壤,研究施加 EDTA 和生物质炭两种修复剂对重金属污染盐渍化土壤中盐地碱蓬生长、离子平衡、盐分离子和重金属镉吸收、积累的影响,探讨修复剂的施加对盐地碱蓬修复 Cd 污染 NaCl 型盐渍化土壤的影响,旨在为重金属污染盐渍化土壤的修复提供基础数据和技术支持。

## 1 材料与方 法

### 1.1 供试材料

供试植物为盐地碱蓬(*Suaeda salsa*),种子采于内蒙古锡林郭勒盟苏尼特右旗。播种前,挑选大小均一饱满的种子,用 10% $H_2O_2$  消毒 10 min。供试修复剂 EDTA(分析纯,天津市永大化学试剂开发中心)购于鑫业鸿程试剂耗材公司;生物质炭购于江苏省溧阳市德胜活性炭厂,由水稻秸秆烧制。生物质炭的技术指标:外观为粉末状,粒度为 150~200 目,pH 为 10.57,比表面积大于 400  $m^2 \cdot g^{-1}$ ,铁盐小于 0.1%,堆积比重低于 450  $mg \cdot L^{-1}$ ,水分低于 10%,总碳 538.2  $g \cdot kg^{-1}$ ,氮 13.8  $g \cdot kg^{-1}$ ,磷 3.0  $g \cdot kg^{-1}$ ,

钾 23.4  $g \cdot kg^{-1}$ ,制作温度高于 500 $^{\circ}C$ ,烧制时间约为 4 h。供试土壤采自呼和浩特市苗圃区(40 $^{\circ}48'N$ ,111 $^{\circ}43'E$ ),采样深度为 0~20 cm,自然风干过 2 mm 土壤筛,理化性质见表 1,重金属 Cd 浓度为 0.084  $mg \cdot kg^{-1}$ ,水溶性盐含量为 0.25  $g \cdot kg^{-1}$ 。通过向采集的无污染非盐渍化土壤(Cd0S0: 0  $mg \cdot kg^{-1}Cd$ , 0  $g \cdot kg^{-1}NaCl$ )中施加氯化钠(NaCl)和氯化镉( $CdCl_2$ )溶液模拟 NaCl 型盐渍化土壤(Cd0S4: 0  $mg \cdot kg^{-1}Cd$ , 4  $g \cdot kg^{-1}NaCl$ )、重金属 Cd 污染土壤(Cd3S0: 3  $mg \cdot kg^{-1}Cd$ , 0  $g \cdot kg^{-1}NaCl$ )和重金属 Cd 污染 NaCl 型盐渍化土壤(Cd3S4: 3  $mg \cdot kg^{-1}Cd$ , 4  $g \cdot kg^{-1}NaCl$ )。将土壤混合均匀后装在圆形花盆中,在室温保持 80%田间持水量老化四周后使用。

### 1.2 试验设计

盆栽试验在内蒙古大学玻璃温室内完成。试验设置 4 种不同类型的土壤基质,分别为无污染非盐渍化土壤(Cd0S0)、NaCl 型盐渍化土壤(Cd0S4)、重金属 Cd 污染土壤(Cd3S0)和重金属 Cd 污染 NaCl 型盐渍化土壤(Cd3S4);每种土壤基质设置对照和施加两种修复剂处理,分别为不添加修复剂对照处理(CK)、添加 EDTA(4  $mmol \cdot kg^{-1}$ )、生物质炭(BC, 15  $g \cdot kg^{-1}$ )处理。每个处理设置 4 个重复,共计 48 盆,随机排列。培养容器为圆形塑料花盆(上口径 16.5 cm×下口径 10.5 cm×高度 13 cm),内衬灭菌塑料自封袋,每盆装老化四周后的土壤 2 kg,种植前将生物质炭与土壤均匀混合。每盆播种消毒后的盐地碱蓬种子 100 颗,生长 10 d 后间苗,保留 4 株长势相近的植株。在植物收获前一周以溶液的形式分 2 次添加 EDTA 至设置浓度<sup>[12]</sup>。试验期间自然采光,采用称重法浇水以维持植物生长期土壤基质含水量为田间最大持水量的 100%。出苗之日起,生长 75 d 后收获盐地碱蓬植物样品。

表 1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Physico-chemical properties of the soil

土壤类型	电导率 EC	pH	有机质	全氮	全磷	全钾	有效氮	有效磷	速效钾
Soil type	$(\mu S \cdot cm^{-1})$		Organic matter	Total N	Total P	Total K	Available N	Available P	Readily available K
			$(g \cdot kg^{-1})$	$(g \cdot kg^{-1})$	$(g \cdot kg^{-1})$	$(g \cdot kg^{-1})$	$(mg \cdot kg^{-1})$	$(mg \cdot kg^{-1})$	$(mg \cdot kg^{-1})$
栗钙土 <sup>①</sup>	88.60	7.66	13.9	0.8	0.7	18.3	40.50	3.93	76.00

①Chestnut Soil

### 1.3 样品制备与分析

自茎基部将盐地碱蓬地上部剪下, 用蒸馏水反复多次冲洗茎叶和根系, 70℃烘干后称重。粉碎植物样品, 称取 0.5 g 加入 5 mL 超净高纯 HNO<sub>3</sub> (BV-III) 在 120℃开放式消煮 96 h。利用电感耦合等离子体发射光谱仪 (ICP-OES, Optima 7000DV, PerkinElmer, 美国) 测定消煮液中磷 (P)、钾 (K)、钙 (Ca)、镁 (Mg) 和钠 (Na) 浓度, 电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS, DRCE, PerkinElmer, 美国) 测定消煮液中重金属 Cd 浓度。采用纳氏试剂比色法测定土壤有效氮含量, 混合溶液提取-电感耦合等离子体发射光谱法测定有效磷和速效钾含量<sup>[13]</sup>。可提取态镉的测定: 在离心管中称取 2.5 g 风干土, 加入 25 mL 乙酸铵-EDTA 萃取液 (0.5 mol·L<sup>-1</sup> CH<sub>3</sub>COONH<sub>4</sub>, 0.5 mol·L<sup>-1</sup> CH<sub>3</sub>COOH, 0.02 mol·L<sup>-1</sup> Na<sub>2</sub>EDTA, pH 4.65), 室温振荡 1 h 后离心, 上清液过 0.45 μm 滤膜, ICP-MS 测定可提取态 Cd 浓度。

### 1.4 数据分析

使用 Excel 2013 计算所有数据的平均值及标准误差, 使用 SPSS 24.0 进行数据的统计分析, 使用 Origin 2017 函数绘图软件制图。邓肯新复极差检验法 (Duncan's test) 检验各处理平均值之间的差异显著性 ( $P < 0.05$ ), 采用多因素方差分析盐分、重金属和修复剂的作用及三者交互作用对相关测定指标的影响。应用皮尔森相关分析 (Pearson correlation analysis), 研究植物地上部和根部 Cd 浓度与土壤环境因子 (土壤电导率 EC、pH、有效氮、有效磷、速效钾、可提取态 Cd 浓度) 的关系。

## 2 结果

### 2.1 修复剂对镉污染盐渍化土壤有效养分和可提取态镉浓度的影响

施加两种修复剂对镉污染盐渍化土壤有效氮、磷、钾和可提取态镉浓度的影响, 如表 2 所示。与 CK 相比, 施加生物质炭使得 Cd0S0、Cd0S4、Cd3S0 和 Cd3S4 处理土壤有效磷浓度显著增加了 67.1%~188.9%; 施加生物质炭处理时, Cd3S4 与 Cd0S0、Cd0S4、Cd3S0 处理相比显著增加了土壤有效磷浓度 ( $P < 0.05$ )。与 CK 相比, 施加生物质炭使得 Cd0S0、

Cd0S4、Cd3S0 和 Cd3S4 处理土壤速效钾浓度分别显著增加了 33.7%~98.2% ( $P < 0.05$ ); 施加生物质炭处理时, Cd3S4 与 Cd0S0、Cd0S4、Cd3S0 处理相比显著增加了土壤速效钾浓度 ( $P < 0.05$ )。与 CK 相比, 施加 EDTA 使得 Cd3S0 处理可提取态 Cd 浓度显著增加了 20.8%; 在对照 CK 组, Cd3S4 与 Cd3S0 相比, NaCl 处理使得可提取态 Cd 浓度显著增加了 41.7% ( $P < 0.05$ )。

### 2.2 修复剂对镉污染盐渍化土壤中盐地碱蓬生长的影响

施加两种修复剂对镉污染盐渍化土壤中盐地碱蓬生长的影响, 如表 3 所示。无论是否施加修复剂, Cd0S4 与 Cd0S0 相比, NaCl 处理均使得盐地碱蓬地上部干物质质量和总干物质质量分别显著增加了 115.5%~341.7% 和 66.6%~327.7% ( $P < 0.05$ ); Cd3S4 与 Cd0S4 相比, 镉胁迫均使得盐地碱蓬地上部干物质质量和总干物质质量分别显著降低了 62.8%~84.4% 和 66.6%~86.0% ( $P < 0.05$ )。与 CK 相比, 仅施加生物质炭使得 Cd3S0 处理盐地碱蓬根部干物质质量和总干物质质量分别显著增加了 1133% 和 328.6% ( $P < 0.05$ )。

### 2.3 修复剂对镉污染盐渍化土壤中盐地碱蓬离子平衡的影响

施加两种修复剂对镉污染盐渍化土壤中盐地碱蓬植株离子平衡的影响, 如表 4 所示。无论是否施加修复剂, 与 Cd0S0 或 Cd3S0 相比, Cd0S4 处理盐地碱蓬地上部 K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>/Na<sup>+</sup>、P/Na<sup>+</sup> 和根部 K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>/Na<sup>+</sup> 均显著降低 ( $P < 0.05$ ); 不施加修复剂 CK 和施加 EDTA 处理组, 与 Cd0S0 或 Cd3S0 相比, Cd3S4 处理盐地碱蓬地上部 K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>/Na<sup>+</sup>、P/Na<sup>+</sup> 和根部 K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>/Na<sup>+</sup> 均显著降低 ( $P < 0.05$ ); 施加生物质炭时, Cd3S4 与 Cd0S0 或 Cd3S0 处理相比, 盐地碱蓬地上部和根部 K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>/Na<sup>+</sup>、P/Na<sup>+</sup> 均显著降低 ( $P < 0.05$ )。与 CK 相比, 施加 EDTA 显著增加 Cd0S0 处理盐地碱蓬根部 Ca<sup>2+</sup>/Na<sup>+</sup>, 施加生物质炭显著增加 Cd0S0 处理盐地碱蓬地上部和根部 K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup>、P/Na<sup>+</sup>; 施加 EDTA 使得 Cd3S0 处理盐地碱蓬地上部 K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>/Na<sup>+</sup> 显著下降 ( $P < 0.05$ ), 施加生物质炭使得 Cd3S0 处理盐地碱蓬地上部 Ca<sup>2+</sup>/Na<sup>+</sup> 显著降低 ( $P < 0.05$ ), 地上部 P/Na<sup>+</sup> 及根部 K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup>、P/Na<sup>+</sup> 均显著增加 ( $P < 0.05$ )。

表 2 两种修复剂处理下镉污染盐渍化土壤有效氮、磷、钾和可提取态镉含量

Table 2 Effects of the two remediation agents on available N, P and K and extractable Cd in Cd-polluted salinized soil

重金属处理 Heavy metal treatment	盐处理 Salt treatment	修复剂 Remediation agents	有效氮 Available N /(g·kg <sup>-1</sup> )	有效磷 Available P /(g·kg <sup>-1</sup> )	速效钾 Readily available K /(g·kg <sup>-1</sup> )	可提取态镉 Extractable Cd /(mg·kg <sup>-1</sup> )	
Cd0	S0	CK	8.45±0.45a	4.22±0.08ef	57.23±0.49f	0.02±0.00d	
		EDTA	7.83±0.09a	4.32±0.16ef	77.73±1.65e	0.03±0.00d	
		BC	8.94±1.06a	7.05±0.52bcd	80.94±1.03cd	0.02±0.00d	
	S4	CK	8.94±0.78a	2.52±0.08f	63.66±1.34ef	0.02±0.00d	
		EDTA	10.27±0.96a	3.68±0.23ef	81.03±0.94c	0.03±0.00d	
		BC	8.78±0.38a	7.28±0.75bc	85.13±4.51c	0.02±0.00d	
	Cd3	S0	CK	8.60±0.21a	3.88±0.07ef	53.60±0.69f	2.16±0.15c
			EDTA	9.03±0.50a	4.80±0.20def	84.20±1.77c	2.61±0.02b
			BC	8.19±0.45a	8.12±0.90b	104.56±7.64b	2.39±0.18bc
S4		CK	7.94±0.35a	5.10±0.10cde	75.95±0.13cd	3.06±0.09a	
		EDTA	9.10±0.04a	4.45±0.03ef	75.40±0.45cd	2.55±0.12bc	
		BC	9.18±0.68a	12.80±1.00a	150.57±3.18a	2.35±0.10bc	
显著性 Significance							
重金属 Heavy metal (H)			NS	NS	***	***	
盐 Salt (S)			NS	NS	***	*	
修复剂 Remediation agents (R)			NS	**	***	NS	
重金属×盐 H×S			NS	NS	***	*	
重金属×修复剂 H×R			NS	NS	***	NS	
盐×修复剂 S×R			NS	NS	***	**	
重金属×盐×修复剂 H×S×R			NS	NS	***	**	

注：表中数据为 4 次重复的平均值±标准误差，同一列中不同字母表示在  $P<0.05$  显著水平差异显著。\*为  $P<0.05$ ，\*\*为  $P<0.01$ ，\*\*\*为  $P<0.001$ ，NS 表示无显著性差异。Cd0 表示土壤中添加的镉含量为  $0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，Cd3 表示土壤中添加的镉含量为  $3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ；S0 表示土壤中添加的氯化钠含量为  $0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，S4 表示土壤中添加的氯化钠含量为  $4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ；CK 表示对照组，EDTA 表示添加  $4 \text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$  乙二胺四乙酸处理，BC 表示添加  $15 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  生物质炭处理。下同。Note: The data in the table are of mean ± standard error ( $n=4$ ), and different letters in the same column mean significant difference at  $P<0.05$  level. \* stands for  $P<0.05$ , \*\* for  $P<0.01$ , and \*\*\* for  $P<0.001$ ; NS means no significant difference. Cd0 means that  $0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  cadmium was added to the soil; Cd3,  $3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  cadmium was added; S0,  $0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  sodium chloride added; S4,  $4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  sodium chloride added; and CK stands for the control group. EDTA means that  $4 \text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$  ethylene diamine tetraacetic acid was added; and BC,  $15 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  biochar added. The same below.

#### 2.4 修复剂对镉污染盐渍化土壤中盐地碱蓬吸收积累钠的影响

施加两种修复剂对镉污染盐渍化土壤中盐地碱蓬吸收积累钠的影响，如图 1 所示。无论是否施加修复剂，Cd3S0 与 Cd0S0 相比，盐地碱蓬地上部和根部  $\text{Na}^+$  浓度、含量均无显著性差异 ( $P>0.05$ )。施加 EDTA 和生物质炭时，Cd3S4 与 Cd0S4 相比，Cd 胁迫使盐地碱蓬地上部  $\text{Na}^+$  浓度分别显著增加了

32.5%和 83.3% ( $P<0.05$ )；不施加修复剂 CK 和施加生物质炭处理组，Cd3S4 与 Cd0S4 相比，Cd 胁迫使盐地碱蓬根部  $\text{Na}^+$  浓度分别显著增加了 39.6%和 94.5% ( $P<0.05$ )；无论是否施加修复剂，Cd3S4 与 Cd0S4 相比，Cd 胁迫使盐地碱蓬地上部和根部  $\text{Na}^+$  含量分别显著降低了 21.3%~83.0%和 64.6%~90.9% ( $P<0.05$ )。与 CK 相比，施加 EDTA 和生物质炭使 Cd3S4 处理盐地碱蓬地上部  $\text{Na}^+$  浓度分别显著增加

表 3 两种修复剂处理下镉污染盐渍化土壤中盐地碱蓬的生物量

Table 3 Effects of the two remediation agents on biomass of the *Suaeda salsa* grown in Cd-polluted salinized soil

重金属处理 Heavy metal treatment	盐处理 Salt treatment	修复剂 Remediation agents	干物质量 Dry biomass/ ( g·pot <sup>-1</sup> )			
			地上部 Shoot	根部 Root	总共 Total	
Cd0	S0	CK	1.03±0.14c	0.27±0.07ab	1.30±0.25cd	
		EDTA	1.23±0.16c	0.49±0.13ab	1.72±0.35cd	
		BC	1.81±0.15c	1.11±0.30a	2.93±0.24bcd	
	S4	CK	4.55±0.48a	1.11±0.06a	5.56±0.75a	
		EDTA	3.68±0.71ab	1.04±0.41a	4.72±1.44ab	
		BC	3.90±0.31a	0.98±0.16ab	4.88±0.65ab	
	Cd3	S0	CK	0.68±0.19c	0.09±0.02b	0.77±0.31d
			EDTA	1.26±0.43c	0.31±0.15ab	1.57±0.78cd
			BC	2.19±0.63bc	1.11±0.35a	3.30±1.22bc
S4		CK	0.71±0.17c	0.07±0.02b	0.78±0.19d	
		EDTA	1.37±1.08c	0.16±0.04ab	1.54±1.97cd	
		BC	1.45±0.48c	0.19±0.09ab	1.63±0.78cd	

显著性 Significance

重金属 Heavy metal ( H )

NS

\*\*

\*\*\*

盐 Salt ( S )

\*\*\*

NS

\*\*

修复剂 Remediation agents ( R )

NS

\*

NS

重金属×盐 H×S

NS

\*\*\*

\*\*\*

重金属×修复剂 H×R

NS

NS

NS

盐×修复剂 S×R

NS

\*\*

\*

重金属×盐×修复剂 H×S×R

NS

NS

NS

表 4 两种修复剂处理下镉污染盐渍化土壤中盐地碱蓬的离子平衡

Table 4 Effects of the two remediation agents on ion balance of the *Suaeda salsa* grown in Cd-polluted salinized soil

重金属处理 Heavy metal treatment	盐处理 Salt treatment	修复剂 Remediation agents	地上部 Shoot			根部 Root			
			K <sup>+</sup> /Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup> /Na <sup>+</sup>	P/Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup> /Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup> /Na <sup>+</sup>	P/Na <sup>+</sup>	
Cd0	S0	CK	0.91 ± 0.10c	1.32 ± 0.03b	0.49 ± 0.07c	4.78 ± 0.66bc	8.48 ± 1.02bc	0.34 ± 0.09c	
		EDTA	0.73 ± 0.06c	1.11 ± 0.09b	0.33 ± 0.02cd	4.52 ± 0.12bc	14.22 ± 2.68a	0.40 ± 0.04c	
		BC	1.47 ± 0.19a	1.14 ± 0.10b	1.57 ± 0.22a	9.65 ± 1.85a	10.14 ± 2.31b	1.16 ± 0.33a	
	S4	CK	0.04 ± 0.00d	0.08 ± 0.01c	0.02 ± 0.00e	1.05 ± 0.11d	1.47 ± 0.28e	0.08 ± 0.00c	
		EDTA	0.05 ± 0.00d	0.08 ± 0.00c	0.02 ± 0.00e	1.17 ± 0.18d	1.98 ± 0.68de	0.11 ± 0.03c	
		BC	0.08 ± 0.00d	0.09 ± 0.00c	0.09 ± 0.01de	1.51 ± 0.10d	1.75 ± 0.16de	0.24 ± 0.04c	
	Cd3	S0	CK	1.36 ± 0.24ab	2.16 ± 0.32a	0.59 ± 0.06c	3.56 ± 0.41c	7.31 ± 2.14bc	0.30 ± 0.09c
			EDTA	0.88 ± 0.15c	1.48 ± 0.27b	0.45 ± 0.06c	3.40 ± 0.39c	5.77 ± 1.67cd	0.30 ± 0.07c
			BC	1.07 ± 0.18bc	1.08 ± 0.14b	1.13 ± 0.14b	5.56 ± 0.41b	6.79 ± 0.51bc	0.77 ± 0.07b

续表

重金属处理	盐处理	修复剂	地上部 Shoot			根部 Root		
Heavy metal treatment	Salt treatment	Remediation agents	K <sup>+</sup> /Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup> /Na <sup>+</sup>	P/Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup> /Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup> /Na <sup>+</sup>	P/Na <sup>+</sup>
	S4	CK	0.05 ± 0.01d	0.11 ± 0.02c	0.01 ± 0.01e	0.93 ± 0.10d	1.15 ± 0.17e	0.06 ± 0.00c
		EDTA	0.13 ± 0.06d	0.31 ± 0.14c	0.06 ± 0.02e	0.75 ± 0.12d	0.86 ± 0.09e	0.06 ± 0.00c
		BC	0.24 ± 0.04d	0.51 ± 0.02c	0.15 ± 0.02de	0.82 ± 0.10d	0.63 ± 0.08e	0.06 ± 0.00c

显著性 Significance	重金属 Heavy metal (H)	盐 Salt (S)	修复剂 Remediation agents (R)	重金属×盐 H×S	重金属×修复剂 H×R	盐×修复剂 S×R	重金属×盐×修复剂 H×S×R
	NS	NS	*	NS	*	*	NS
	*	*	*	*	NS	NS	NS
	NS	*	NS	NS	*	NS	NS
	NS	*	NS	NS	NS	NS	NS
	*	**	NS	NS	NS	NS	NS
	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS

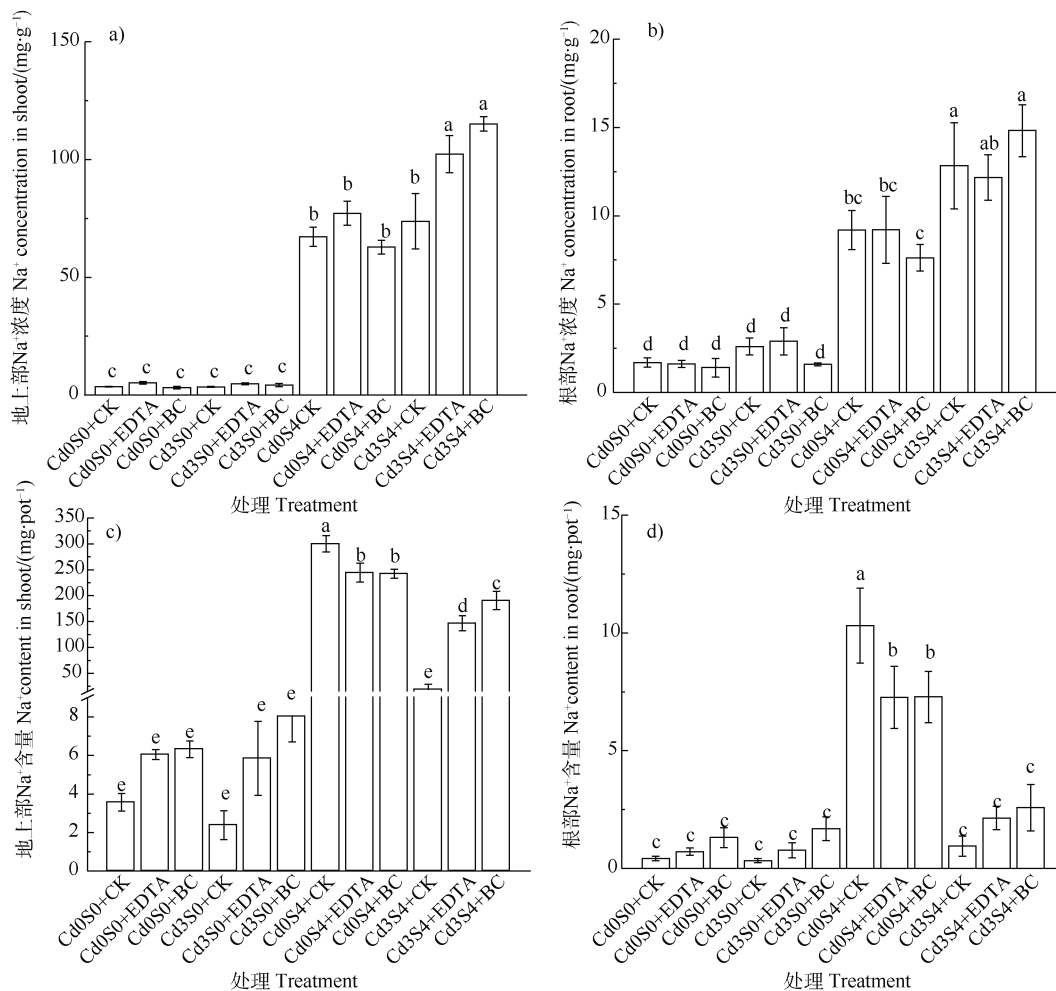


图 1 两种修复剂处理下镉污染盐渍化土壤中盐地碱蓬的钠离子浓度 (a)、b)) 和含量 (c)、d))

Fig. 1 Effects of the two remediation agents on concentration (a), b)) and content (c), d)) of sodium ions of the *Suaeda salsa* grown in Cd-polluted salinized soil

了 38.6%和 56.0%，地上部  $\text{Na}^+$  含量分别显著增加了 199.6%和 289.3% ( $P < 0.05$ )；施加 EDTA 和生物质炭使得 Cd0S4 处理盐地碱蓬根部  $\text{Na}^+$  含量分别显著降低了 29.6%和 29.4% ( $P < 0.05$ )。

## 2.5 修复剂对镉污染盐渍化土壤中盐地碱蓬吸收积累镉的影响

施加两种修复剂对镉污染盐渍化土壤中盐地碱蓬吸收积累重金属镉的影响，如图 2 所示。无论是否施加修复剂，Cd0S4 与 Cd0S0 相比，NaCl 处理对盐地碱蓬地上部和根部 Cd 浓度和含量均无显著影响 ( $P > 0.05$ )；Cd3S4 与 Cd3S0 相比，NaCl 处理使盐地碱蓬地上部 Cd 浓度和含量分别显著增加了 135.8%~223.6%和 132.4%~471.5% ( $P < 0.05$ )。施

加生物质炭时，Cd3S4 与 Cd3S0 相比，NaCl 处理使盐地碱蓬根部 Cd 浓度显著增加了 282.2% ( $P < 0.05$ )，而根部 Cd 含量显著降低了 56.8% ( $P < 0.05$ )。与 CK 相比，施加生物质炭使 Cd3S0 处理盐地碱蓬根部 Cd 浓度显著降低了 54.2% ( $P < 0.05$ )，根部 Cd 含量显著增加了 2100% ( $P < 0.05$ )；与 CK 相比，施加生物质炭使 Cd3S4 处理盐地碱蓬根部 Cd 浓度显著增加了 31.1% ( $P < 0.05$ )，EDTA 和生物质炭使 Cd3S4 处理盐地碱蓬地上部 Cd 含量分别显著增加了 133.4%和 173.4% ( $P < 0.05$ )。皮尔森相关分析表明，盐地碱蓬地上部 Cd 浓度与土壤电导率 EC、速效钾和可提取态 Cd 浓度呈显著正相关；盐地碱蓬根部 Cd 浓度与速效钾和可提取态 Cd 浓度呈显著正相关 (表 5,  $P < 0.05$ )。

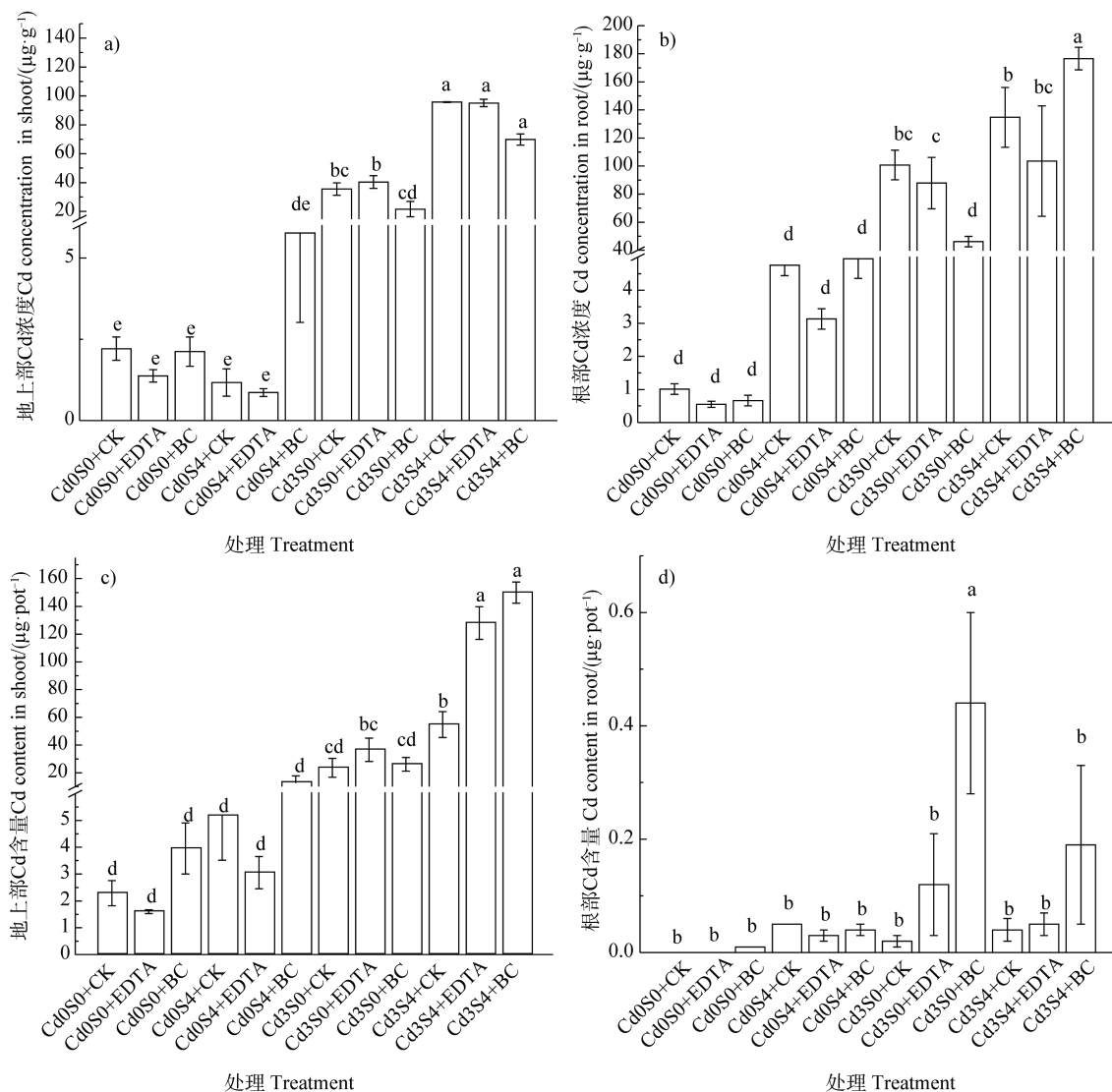


图 2 两种修复剂处理下镉污染盐渍化土壤中盐地碱蓬的镉浓度 (a、b) 和含量 (c、d)

Fig. 2 Effects of the two remediation agents on cadmium concentration (a, b) and content (c, d) in the *Suaeda salsa* grown in Cd-polluted salinized soil



表 5 盐地碱蓬地上部和根部镉浓度与土壤环境因子的相关性

Table 5 Pearson correlation coefficient between Cd concentrations in shoot and root of the *Suaeda salsa* and soil environmental factors

	可提取态镉 Extractable Cd	土壤电导率 Soil EC	pH	有效氮 Available N	有效磷 Available P	速效钾 Readily available K
地上部镉浓度 <sup>①</sup>	0.824***	0.487**	0.048	-0.043	0.283	0.330*
根部镉浓度 <sup>②</sup>	0.692***	0.177	-0.063	0.150	0.262	0.417*

① Cd concentration in shoot; ② Cd concentration in root.

### 3 讨论

#### 3.1 修复剂对镉污染盐渍化土壤中盐生植物生长的影响及原因

生物量是植物生长最直观的生理指标,通常作为植物对逆境胁迫反应的重要参数<sup>[14]</sup>。本研究显示,在无 Cd 胁迫时 NaCl 处理显著促进了盐地碱蓬的生长,而在 Cd 胁迫下 NaCl 处理对盐地碱蓬的生长无显著影响(表 3),表明土壤中一定量的盐分有益于盐生植物的生长,而 Cd 胁迫抑制了盐分对于盐生植物生长的有益作用。研究显示,盐地碱蓬可在 NaCl 浓度为 10~400 mmol·L<sup>-1</sup> 的环境下生长,且在 200 mmol·L<sup>-1</sup> 时生长最佳<sup>[15]</sup>。在对照和 1.0 mg·kg<sup>-1</sup> Cd 处理下,5 g·kg<sup>-1</sup> NaCl 处理的碱蓬生物量显著高于 1 g·kg<sup>-1</sup> NaCl 处理;而在 2.5 mg·kg<sup>-1</sup> 和 5.0 mg·kg<sup>-1</sup> Cd 处理下,随着土壤中盐分的增加(1 g·kg<sup>-1</sup>~10 g·kg<sup>-1</sup>),碱蓬生长均受到显著抑制<sup>[16]</sup>。此外,无 NaCl 处理时 Cd 胁迫未显著影响盐地碱蓬的生长,而 NaCl 处理时 Cd 胁迫却显著抑制了盐地碱蓬的生长,表明盐渍化土壤环境增加了重金属 Cd 对盐地碱蓬生长的毒害作用,可能原因是 NaCl 活化了土壤中的 Cd,使有效态 Cd 浓度增加,促进了盐地碱蓬对 Cd 的吸收;这与本研究中施加 NaCl 显著增加了 Cd 处理土壤中可提取态 Cd 浓度和盐地碱蓬地上部 Cd 浓度的研究结果(表 2,图 2)相一致。已有研究表明,NaCl 能显著促进 Cd 从土壤中解吸活化,从而使盐碱化土壤中 Cd 对于植物的毒害作用增强<sup>[17]</sup>。陈雷<sup>[16]</sup>的研究发现,在 5 g·kg<sup>-1</sup> 和 10 g·kg<sup>-1</sup> NaCl 处理下,Cd 浓度的增加(0~5 mg·kg<sup>-1</sup>)抑制了碱蓬的生长;而在 1 g·kg<sup>-1</sup> NaCl 处理时,Cd 浓度的增加却显著促进了碱蓬的生长。上述研究结果表明,盐分和重金属复合胁迫对盐生植物生长的影响与土壤环境中盐

分和重金属浓度直接相关。研究发现,在重金属 Cd 污染土壤中施加 1 g·kg<sup>-1</sup> 菌渣生物质炭可提高小白菜的产量,可能的机理是生物质炭可提供植物生长的营养元素,并将 Cd 吸附固定在土壤中<sup>[18]</sup>。本研究显示,在 Cd3S0 处理时施加生物质炭显著促进了盐地碱蓬的生长(表 3),表明在单 Cd 胁迫下生物质炭有助于促进盐生植物的生长,缓解重金属对于盐生植物的毒害作用,可能与生物质炭显著改善了盐地碱蓬磷营养状况,显著增加地上部、根部 P/Na<sup>+</sup> 和根部 K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup>,显著降低根部 Cd 浓度等作用相关;而在 Cd 污染盐渍化土壤中,生物质炭处理未显示出对盐地碱蓬生长的有益作用。

植物离子平衡被破坏是植物受到外界胁迫时生长受到抑制的主要原因之一。本研究显示,无论有无 Cd 胁迫,NaCl 处理均使盐地碱蓬地上部和根部 K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>/Na<sup>+</sup>、P/Na<sup>+</sup> 显著降低(表 4),表明盐分是影响植株体内离子平衡的关键因素,这也与已有的研究结果相一致<sup>[19]</sup>。其主要原因可能是随着土壤中盐浓度的增加,植物对于 Na<sup>+</sup> 的吸收显著增加,从而使植株 K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>/Na<sup>+</sup>、P/Na<sup>+</sup> 显著降低。施加生物质炭显著增加了 Cd0S0 处理盐地碱蓬地上部及根部 K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup> 和 P/Na<sup>+</sup>,显著增加了 Cd3S0 处理盐地碱蓬地上部 P/Na<sup>+</sup> 及根部 K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup> 和 P/Na<sup>+</sup>(表 4),主要可能是因为生物质炭本身含有丰富的 P、K 元素<sup>[20]</sup>,从而促进了盐地碱蓬对 P 和 K 的吸收,本研究结果也显示生物质炭显著增加了土壤中有效磷和速效钾浓度(表 2)。

#### 3.2 修复剂对镉污染盐渍化土壤植物修复效率的影响及原因

在重金属污染盐渍化土壤中,重金属与盐分离子之间存在着复杂的交互作用<sup>[5]</sup>。盐渍土中所含有的盐分离子非常复杂,其中 NaCl 被认为是盐渍土中最为主要的一种盐<sup>[21]</sup>。Na<sup>+</sup> 既是盐渍土中最主要的

离子, 同时也是使盐地碱蓬肉质化的因素<sup>[22]</sup>。本研究显示, Cd3S4 与 Cd0S4 相比, Cd 处理显著增加盐地碱蓬地上部和根部 Na<sup>+</sup>浓度 (图 1)。谭灵杰<sup>[14]</sup>的研究发现, 在盐和镉复合胁迫下 (5 mg·kg<sup>-1</sup>Cd+2 g·kg<sup>-1</sup>NaCl), 镉使得美洲黑杨雄株叶片 Na<sup>+</sup>浓度显著增加, 其认为 Na<sup>+</sup>与 Cd 之间存在协同吸收效应。此外, 在 Cd3S4 处理时施加 EDTA 和生物质炭使得盐地碱蓬地上部 Na<sup>+</sup>浓度和含量均显著增加 (图 1), 表明两种修复剂均可增加盐地碱蓬对盐分的吸收积累, 从而促进重金属污染盐渍化土壤的植物修复。可能是因为 EDTA 可以活化土壤中的金属阳离子, 而生物质炭能促进植物的生长, 从而促进了盐地碱蓬对 Na<sup>+</sup>的吸收积累。目前, 关于重金属或修复剂对盐生植物吸收积累盐分离子影响的研究尚不多, 其相关作用机理尚需进一步研究。

镉是植物生长的非必需元素, 具有极高的生物毒性, 可破坏叶绿体膜的完整性, 减少营养元素的吸收, 增加细胞膜的透性, 影响植物呼吸作用、光合作用和碳氮代谢等生理生化反应, 从而抑制植物的生长<sup>[23]</sup>。本研究显示, Cd3S4 与 Cd3S0 相比, 盐地碱蓬地上部 Cd 浓度和含量均显著增加 (图 2), 表明 NaCl 促进了盐地碱蓬对 Cd 的吸收和积累, 与盐地碱蓬地上部 Cd 浓度和土壤电导率 EC 呈显著正相关的结果 (表 5) 相符合。相关研究认为不同的阳离子 (Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>) 均可使土壤中重金属 Cd 有效态浓度增加<sup>[24]</sup>, 可能解释了其原因。Gabrijel 等<sup>[25]</sup>的研究发现, NaCl 可促进重金属 Cd 在甜瓜叶片中的积累, 并且在种植甜瓜 25 d 后, 随着盐浓度的增加叶片中 Cd 浓度显著增加。但也有研究显示, 氯化钠降低了盐生植物海滨锦葵对于重金属 Cd 的吸收<sup>[26]</sup>; 含硫酸钠和碳酸钠的土壤抑制了油菜对于 Cd 的吸收, 而低浓度氯化钠促进其对 Cd 的吸收, 高浓度氯化钠无显著影响<sup>[27]</sup>。导致研究结果不同的原因可能是盐分对植物吸收积累重金属元素的影响与盐种类和浓度相关, 且植物种类和生长情况对重金属的吸收积累也有一定的影响。此外, 施加 EDTA 和生物质炭显著增加了 Cd3S4 处理盐地碱蓬地上部 Cd 含量 (图 2), 表明两种修复剂均可显著增加盐地碱蓬对 Cd 的积累, 从而促进重金属污染盐渍化土壤的植物修复。相关研究显示, 施加 EDTA 可显著增加水稻体内 (茎部、叶片以及籽粒)

Cd 含量<sup>[28]</sup>, 使旱生盐土植物猪毛菜幼苗中重金属 Cd 浓度升高为对照的两倍<sup>[29]</sup>。研究已证明 EDTA 可显著的活化土壤中的重金属离子, 使其在土壤中的移动性增加, 有助于被植物所吸收<sup>[30]</sup>。然而, 本研究结果显示在盐渍化土壤环境下, 施用 EDTA 显著降低了重金属污染盐渍化土壤中可提取态 Cd 浓度 (表 2), EDTA 可能是通过促进盐地碱蓬的生长而增加对 Cd 的积累。此外, 盘丽珍等<sup>[31]</sup>的研究发现, 施加生物质炭后空心菜地上部 Cd 含量显著增加; 而 Houben 等<sup>[32]</sup>的研究显示, 生物质炭可使油菜体内 Pb、Cd 和 Zn 的含量显著降低, 是重金属污染土壤修复良好的钝化剂; 生物质炭也可显著降低青菜体内重金属 Zn、Cd、Pb、Cu 的含量<sup>[33]</sup>。研究结果存在差异的可能原因为, 首先生物质炭用量不同会造成对重金属吸附效果的差异, 其次因为生物质炭具有增肥和改善土壤结构的作用, 可促进植物的生长, 导致植物对重金属积累量的增加<sup>[34]</sup>。而本结果显示, 在重金属污染盐渍化土壤环境下, 施加生物质炭显著降低了土壤中可提取态 Cd 浓度 (表 2), 却改善了盐地碱蓬的生长 (表 3)。

## 4 结论

Cd 胁迫显著抑制了土壤盐分对于盐地碱蓬生长的有益作用, 盐渍化土壤环境显著增加了重金属 Cd 对盐地碱蓬生长的毒害作用。Cd 胁迫可显著增加盐渍化土壤中盐地碱蓬地上部和根部 Na<sup>+</sup>浓度, 显著降低盐地碱蓬地上部和根部 Na<sup>+</sup>含量。土壤盐分可显著增加 Cd 胁迫下盐地碱蓬地上部 Cd 浓度和含量; 盐地碱蓬地上部和根部 Cd 浓度与土壤速效钾和可提取态 Cd 浓度呈显著正相关。在 Cd 污染 NaCl 型盐渍化土壤中施加 EDTA 和生物质炭显著增加了盐地碱蓬地上部 Na<sup>+</sup>和 Cd 含量, 提高了重金属污染盐渍化土壤的植物修复效率。

## 参考文献 (References)

- [1] Bartkowiak A, Lemanowicz J, Hulisz P. Ecological risk assessment of heavy metals in salt-affected soils in the Natura 2000 area (Ciechocinek, north-central Poland) [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, 24 (35): 27175—27187.
- [2] Lutts S, Lefèvre I. How can we take advantage of halophyte properties to cope with heavy metal toxicity in

- salt-affected areas?[J]. *Annals of Botany*, 2015, 115(3): 509—528.
- [ 3 ] Kadukova J, Manousaki E, Kalogerakis N. Pb and Cd accumulation and phyto-excretion by salt cedar (*Tamarix Smyrnensis* Bunge) [J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2008, 10(1): 31—46.
- [ 4 ] Feng J X, Lin Y Y, Yang Y, et al. Tolerance and bioaccumulation of Cd and Cu in *Sesuvium portulacastrum*[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, 147: 306—312.
- [ 5 ] Mariem W, Kilani B R, Benet G, et al. How does NaCl improve tolerance to cadmium in the halophyte *Sesuvium portulacastrum* ?[J]. *Chemosphere*, 2014, 117: 243—250.
- [ 6 ] Yuan J W, Chen J, Chen F, et al. The augmentation strategies and mechanisms in the phytoremediation of heavy metal-contaminated soil[J]. *Biotechnology Bulletin*, 2019, 35(1): 120—130. [袁金玮, 陈笈, 陈芳, 等. 强化植物修复重金属污染土壤的策略及其机制[J]. *生物技术通报*, 2019, 35(1): 120—130.]
- [ 7 ] Li X B, Dong H H, Ren L X, et al. Effects of chelating agent combination technologies on soil contaminated by heavy metals[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, 32(12): 1993—2000. [李晓宝, 董焕焕, 任丽霞, 等. 螯合剂修复重金属污染土壤联合技术研究进展[J]. *环境科学研究*, 2019, 32(12): 1993—2000.]
- [ 8 ] Wang Z, Li Y K, Xu Z G, et al. Research progresses in effects of biochar on soil physiochemical properties and nitrogen transformation[J]. *Soils*, 2019, 51(5): 835—842. [王湛, 李银坤, 徐志刚, 等. 生物质炭对土壤理化性状及氮素转化影响的研究进展[J]. *土壤*, 2019, 51(5): 835—842.]
- [ 9 ] Abbas T, Rizwan M, Ali S, et al. Effect of biochar on cadmium bioavailability and uptake in wheat (*Triticum aestivum* L.) grown in a soil with aged contamination[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2017, 140: 37—47.
- [ 10 ] Yue Y, Guo W N, Lin Q M, et al. Salt leaching in the saline soil relative to rate of biochar applied[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(4): 914—919. [岳燕, 郭维娜, 林启美, 等. 加入不同量生物质炭盐渍化土壤盐分淋洗的差异与特征[J]. *土壤学报*, 2014, 51(4): 914—919.]
- [ 11 ] Paz-Ferreiro J, Lu H, Fu S, et al. Use of phytoremediation and biochar to remediate heavy metal polluted soils: A review[J]. *Solid Earth Discussions*, 2013, 5(2): 2155—2179.
- [ 12 ] Anning A K, Akoto R. Assisted phytoremediation of heavy metal contaminated soil from a mined site with *Typha latifolia* and *Chrysopogon zizanioides*[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, 148: 97—104.
- [ 13 ] Mei L P. Extraction of analytes with a composite solution-simultaneous ICP-AES determination of quick-acting K and effective P, Fe, Mn, Cu, Zn in alkaline soil[J]. *Physical Testing and Chemical Analysis: Part B: Chemical Analysis*, 2019, 55(9): 1112—1116. [梅连平. 混合溶液提取-电感耦合等离子体原子发射光谱法同时测定碱性土壤中速效钾和有效磷、铁、锰、铜、锌的含量[J]. *理化检验: 化学分册*, 2019, 55(9): 1112—1116.]
- [ 14 ] Tan L J. Effect of cadmium pollution and salinization on the growth and physiology of male and female *Populus deltoides*[D]. Yaan, Sichuan: Sichuan Agricultural University, 2017. [谭灵杰. 镉污染和盐渍化对美洲黑杨雌雄植株生长和生理的影响[D]. 四川雅安: 四川农业大学, 2017.]
- [ 15 ] Song J, Chen M, Feng G, et al. Effect of salinity on growth, ion accumulation and the roles of ions in osmotic adjustment of two populations of *Suaeda salsa*[J]. *Plant and Soil*, 2009, 314(1/2): 133—141.
- [ 16 ] Chen L. Physiological response of the halophyte *Suaeda salsa* to cadmium stress and its application in the remediation of cadmium contaminated soils[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2014. [陈雷. 盐生植物碱蓬对镉胁迫的生理响应及其在镉污染土壤修复中的应用[D]. 南京: 南京农业大学, 2014.]
- [ 17 ] Chai M W, Shi F C, Li R L, et al. Effect of NaCl on growth and Cd accumulation of halophyte *Spartina alterniflora* under CdCl<sub>2</sub> stress[J]. *South African Journal of Botany*, 2013, 85: 63—69.
- [ 18 ] He Z L, Xian Y, Meng X X, et al. Effects of mushroom residues biochar on properties of cadmium-contaminated soil and Cd uptake by Chinese cabbage[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(1): 340—344, 352. [何梓林, 鲜杨, 孟晓霞, 等. 菌渣生物炭对镉污染土壤性质及小白菜吸收镉的影响[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(1): 340—344, 352.]
- [ 19 ] Liu Z X, Wei Q, Zhang H X. Effects of salt stress on mineral element contents in different parts of *Elaeagnus angustifolia* seedlings[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, 36(12): 3501—3509. [刘正祥, 魏琦, 张华新. 盐胁迫对沙枣幼苗不同部位矿质元素含量的影响[J]. *生态学杂志*, 2017, 36(12): 3501—3509.]
- [ 20 ] Zhang M, Wei Q Q, Xiao H J, et al. Biological effects of biochar on nitrogen fertilizer reduction and nitrogen fertilizer utilization efficiency of pod pepper in yellow soil of Guizhou[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(5): 1201—1209. [张萌, 魏全全, 肖厚军, 等. 生物质炭对贵州黄壤朝天椒减氮的生物效应及氮肥利用率的影响[J]. *土壤学报*, 2019, 56(5): 1201—1209.]
- [ 21 ] Yadav S, Irfan M, Ahmad A, et al. Causes of salinity and plant manifestations to salt stress: A review[J]. *Journal of Environmental Biology*, 2011, 32(5): 667—685.
- [ 22 ] Li Y D, Guo J R, Wang B S. Effects of sodium salt and

- chloride on vegetative growth of euhalophyte *Suaeda salsa*[J]. *Plant Physiology Journal*, 2018, 54 ( 3 ): 421—428. [李艳迪, 郭建荣, 王宝山. 钠盐和氯化物对真盐生植物盐地碱蓬营养生长的影响[J]. *植物生理学报*, 2018, 54 ( 3 ): 421—428.]
- [ 23 ] Wang Z X, Chen H P, Li M, et al. Toxicity thresholds of cadmium to barley and perennial ryegrass as determined by root-elongation and growth tests in soils[J]. *Soils*, 2019, 51 ( 6 ): 1151—1159. [王子莹, 陈宏坪, 李明, 等. 不同土壤中镉对大麦和多年生黑麦草毒性阈值的研究[J]. *土壤*, 2019, 51 ( 6 ): 1151—1159.]
- [ 24 ] Acosta J A, Jansen B, Kalbitz K, et al. Salinity increases mobility of heavy metals in soils[J]. *Chemosphere*, 2011, 85 ( 8 ): 1318—1324.
- [ 25 ] Gabrijel O, Davor R, Zed R, et al. Cadmium accumulation by muskmelon under salt stress in contaminated organic soil[J]. *Science of the Total Environment*, 2009, 407 ( 7 ): 2175—2182.
- [ 26 ] Zhai Y X. The effects of endophytic fungi *Trichoderma asperellum* cadmium accumulation of maize seedlings[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2018. [翟亚欣. 海滨锦葵内生真菌棘孢木霉对玉米幼苗的促镉富集效应[D]. 郑州: 郑州大学, 2018.]
- [ 27 ] Yi L P, Wang Z W. Effects of three salts to oilseed rape ( *Brassica napus* ) accumulating cadmium in Cd-contaminated soil[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19 ( 4 ): 798—802. [弋良朋, 王祖伟. 土壤中三种盐对油菜富集镉的影响[J]. *生态环境学报*, 2010, 19 ( 4 ): 798—802.]
- [ 28 ] Zhang P B, Zhao D D, Liu Y Q, et al. Cadmium phytoextraction from contaminated paddy soil as influenced by EDTA and Si fertilizer[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26 ( 23 ): 23638—23644.
- [ 29 ] Ben Rejeb K, Ghnaya T, Zaier H N, et al. Evaluation of the Cd<sup>2+</sup> phytoextraction potential in the xerohalophyte *Salsola kali* L. and the impact of EDTA on this process[J]. *Ecological Engineering*, 2013, 60: 309—315.
- [ 30 ] Guo D, Ali A, Ren C Y, et al. EDTA and organic acids assisted phytoextraction of Cd and Zn from a smelter contaminated soil by potherb mustard ( *Brassica juncea*, *Coss* ) and evaluation of its bioindicators[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 167: 396—403.
- [ 31 ] Pan L Z, Xu Z J, Wu Z G, et al. Remediation of soil polluted by lead-zinc tailings using soybean straw biochar[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32 ( 5 ): 325—329, 334. [盘丽珍, 许中坚, 伍泽广, 等. 大豆秸秆生物炭对铅锌尾矿污染土壤的修复作用[J]. *水土保持学报*, 2018, 32 ( 5 ): 325—329, 334.]
- [ 32 ] Houben D, Evrard L, Sonnet P. Beneficial effects of biochar application to contaminated soils on the bioavailability of Cd, Pb and Zn and the biomass production of rapeseed ( *Brassica napus* L. ) [J]. *Biomass and Bioenergy*, 2013, 57: 196—204.
- [ 33 ] Wang L L. The remediation of heavy metal contaminated soil around a Pb/Zn mine by different biochars derived from rice straw and pig manure[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015. [王丽丽. 不同生物炭对铅锌矿尾矿重金属污染土壤修复效果的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.]
- [ 34 ] Chan K Y, van Zwieten L, Meszaros I, et al. Agronomic values of greenwaste biochar as a soil amendment[J]. *Australia Journal of Soil Research*, 2007, 45( 8 ): 629—634.

( 责任编辑: 陈荣府 )