陈柯罕, 张 科, 李取生,等. 四种盐生植物对 Cd Pb 复合污染提取修复效果比较研究[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(3): 458-465.
CHEN Ke-han, ZHANG Ke, LI Qu-sheng, et al. Remediation effects of four halophytes on Cd and Pb compound pollution[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(3): 458-465.

四种盐生植物对 Cd Pb 复合污染提取修复效果比较研究

陈柯罕[1], 张 科[3], 李取生[1,2*], 胡 妮[1], 徐智敏[1], 魏 佳[1]

(1.暨南大学环境学院, 广州 510632; 2.广东省环境污染控制与修复材料中心, 广州 510632; 3.中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011)

摘 要:在不同浓度的盐分和 Cd、Pb 处理下,通过砂培盆栽实验,运用富集系数、转运系数、根净吸收能力、根净转运能力、植物提取率、提取净化时间等指标,比较草木樨、盐地碱蓬、大叶补血草、野榆钱菠菜四种盐生植物对 Cd、Pb 复合污染的提取修复效果,结果发现:盐地碱蓬地上部生物量达 13.17 g·盆$^{-1}$,地上部 Cd 含量高达 97.04 mg·kg^{-1},其 Cd、Pb 吸收与转运能力均显著高于其他三种盐生植物。适当盐分胁迫促进四种盐生植物的生长,同时对 Cd 和 Pb 的吸收有促进作用。四种盐生植物对 Cd、Pb 的吸收和转运存在较大差异, 较高重金属浓度下 Pb 的吸收速率明显高于 Cd 的吸收速率。盐地碱蓬对 Cd 最大提取率为 31.80%,Cd 提取量达 938.20 μg·盆$^{-1}$,提取净化时间为 3.14 年,盐地碱蓬在盐渍化与重金属复合污染土壤修复实践中有较大应用潜力与价值。

关键词:土壤盐渍化;重金属复合污染;植物同步提取修复;盐地碱蓬
中图分类号:X53 **文献标志码**:A **文章编号**:1672-2043(2017)03-0458-08 doi:10.11654/jaes.2016-1252

Remediation effects of four halophytes on Cd and Pb compound pollution

CHEN Ke-han[1], ZHANG Ke[3], LI Qu-sheng[1,2*], HU Ni[1], XU Zhi-min[1], WEI Jia[1]

(1.School of Environment, Jinan University, Guangzhou 510632, China; 2.Guangdong Provincial Research Center of Environmental Pollution Control and Remediation Material, Guangzhou 510632, China; 3.Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China)

Abstract: Under the different concentrations of Cd, Pb and salinity levels, the sand culture pot experiment was conducted in the greenhouse. The remediation effects on Cd and Pb compound pollution were compared among four halophytes: *Melilotus suaveolens* Ledeb., *Suaeda salsa*, *Limonium gmelinii* and *Atripex aucheri* Moq. Indicators, such as enrichment coefficient, transfer coefficient, root net absorption capacity, root net translocation capacity, extraction rate, and extraction duration, were investigated. The results showed that the biomass of *Suaeda salsa* was 13.17 g·pot^{-1}, and Cd content in shoot was 97.04 mg·kg^{-1}. Cd and Pb uptake and translocation ability of *Suaeda salsa* were significantly higher than those of the other three halophytes. A certain concentration of salt could promote plant growth and absorption of Cd and Pb in four halophytes. The absorption and transport of Cd and Pb were significantly different in four halophytes. For *Suaeda salsa*, Cd extraction rate was 31.80%, Cd extraction amount was 938.20 μg·pot^{-1}, and the extraction duration was 3.14 years. *Suaeda salsa* has great potential in remediation of heavy metal contaminated saline soils.

Keywords: saline soil; heavy metals contamination; plant extract remediation; *Suaeda salsa*

收稿日期:2016-09-27
作者简介:陈柯罕(1991—),男,内蒙古呼和浩特人,硕士研究生,主要研究方向为环境修复技术与应用。E-mail:654659816@qq.com
* **通信作者**:李取生 E-mail:liqusheng@21cn.com
基金项目:国家自然科学基金项目(41673094);广东省产学研项目(2015B090903070)
Project supported: The National Natural Science Foundation of China(41673094); The Guangdong Provincial Research and Production Foundation, China (2015B090903070)

随着农业灌溉、不合理耕作、施肥等人为活动的影响，土壤盐渍化已经成为土地退化的重要因素之一。据联合国粮农组织和联合国环境规划署估计，目前全球约有 400 万 km^2 土地和 20%的农田受到土壤盐渍化影响[1-2]。由于多种原因许多盐渍化土壤同时又受到了重金属污染[3-4]，如在长期高强度施肥的作用下，设施土壤盐分和重金属逐渐累积[5]，许多沿海滩涂围垦农田土壤也存在盐分和重金属双重影响[6]。在我国的重金属污染土壤中，Cd 污染占很大比例，且多数以 Cd、Pb 复合污染存在，在盐分作用下，土壤中重金属具有更大的生物有效性，盐分提高了重金属的潜在风险[7]。因此，对重金属污染盐渍土的修复受到广泛关注。

植物修复技术以其环境友好、成本低廉等众多优点被广泛用于修复实践中[8]。然而，现已报道的 400 多种重金属超累积植物大多为甜土植物，并不适用于盐渍环境下重金属污染的修复，而关于重金属超累积的盐生植物也鲜见报道[9-10]。与甜土植物相比，盐生植物不仅具有应对渗透胁迫和营养不平衡的特有机制，一定情况下还具有应对重金属离子胁迫带来毒害作用的特性[11]。此外，适量盐分不但可以促进盐生植物的生长，还被认为是影响盐生植物吸收和转运 Cd 等重金属的重要因素，这使得挖掘盐生植物在修复重金属污染方面的潜力有了更多期待。

草木樨（*Melilotus suaveolens* Ledeb.）、盐地碱蓬（*Suaeda salsa*）、大叶补血草（*Limonium gmelinii*）、野榆钱菠菜（*Atripex aucheri* Moq.）是四种具有代表性的盐生植物。其中，盐地碱蓬是一种典型的盐碱地指示植物，可以耐受高盐分生长于海水中，也可以适应荒漠贫瘠土壤[12]。有研究发现，盐地碱蓬、野榆钱菠菜等几种盐生植物均具有生物量大、吸盐能力强的特点，而且对土壤中的重金属不但具有一定耐受性，还可能具有一定的富集能力[13-15]。这些特征在修复重金属污染的盐土中有重要的实际意义。

本研究采用温室砂培盆栽试验比较了四种盐生植物的生物量大小和吸收转运能力，初步探讨了几种盐生植物在盐分条件下对重金属 Cd、Pb 的提取修复能力，分析了 Cd、Pb 在四种盐生植物体内的分布、吸收和转运差异，为盐生植物作为修复材料应用于土壤修复实践中提供了科学依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

盆栽试验于 2016 年 4 月 20 日到 7 月 1 日（平均温度18.0~28.7 ℃）在广州市暨南大学环境学院玻璃温室内进行。选取草木樨、盐地碱蓬、大叶补血草、野榆钱菠菜四种盐生植物为试验材料，植物种子全部来源于中国科学院新疆生态与地理研究所。选取白色石英砂作为植物培养载体，以砂培方式进行，盆栽试验过程中所有外加处理均为生物有效态。

1.2 试验方法

供试白色石英砂用 20%盐酸浸泡 24 h，再用清水清洗数次，最后用蒸馏水冲洗，直至 pH 值接近中性为止。此后，将其置于高温高压灭菌锅中，120 ℃条件下严格灭菌 30 min，最后在实验室烘箱内 70 ℃条件下烘干至恒重。准确称量 2.5 kg 烘干后的白色石英砂于无孔塑料花盆（22 cm × 14 cm），将培育好的大叶补血草、盐地碱蓬、草木樨、野榆钱菠菜幼苗依据个体植株大小相近的原则分别移植 8 株到花盆中，并加入霍格兰营养液进行培育，营养液的加入量及之后培育期间的含水量严格控制在最大田间持水量的 70%左右，培育 60 d 后收获。

试验中的盐分与重金属以 NaCl、$Cd(NO_3)_2$ 和 $Pb(NO_3)_2$ 的形式加入，剂量如表 1 所示，各处理添加剂量参照课题组前期对广州重金属污染区域的采样调查结果。根据三种外源物的高低浓度差别，设置三因素三水平试验，每个处理下均设 3 个平行。待移栽缓苗正常后，各处理同霍格兰营养液在灌溉时一同加入花盆，培育 60 d 后对全部植株进行取样，用不锈钢小铲将整株植物连根铲起，去离子水清洗数次后沥去水分，用不锈钢剪刀将植株剪开，分别称取根部和地上部（茎叶）的鲜重，之后在 70 ℃下烘干至恒重。剪开植株的同时取 5 g 根系鲜样，用 $CaCl_2$ 溶液充分超声淋洗，以提取根细胞质外体金属。同样在 70 ℃下烘干至恒重后分别称取根部和地上部的干质量，磨碎备用。

表 1 不同处理下 NaCl、Cd、Pb 的加入剂量

Table 1 Concentrations of NaCl, Cd and Pb under different treatments

NaCl/g·kg^{-1}	处理	Cd/mg·kg^{-1}	Pb/mg·kg^{-1}
0	CK_0	0	0
2	CK_2	0	0
2	$Cd_{1.2}Pb_{80}$	1.2	80
2	$Cd_{2.4}Pb_{160}$	2.4	160
4	CK_4	0	0
4	$Cd_{1.2}Pb_{80}$	1.2	80
4	$Cd_{2.4}Pb_{160}$	2.4	160

1.3 样品测定

分别称取 0.2 g 磨碎后的植物根部和地上部干样与 10 mL 浓 HNO_3 充分混合后浸泡 24 h，用微波消解仪（CEM corporation，MARS5）消解，消解液定容至 25 mL 后经低速滤纸过滤备用。本试验采用日本岛津公司 AA-7000 原子吸收分光光度计火焰法分析测定植物根部和地上部的 Pb 含量，采用石墨炉法分析测定植物根部和地上部的 Cd 含量。采用植物标准样品（GSV-1国家标准参比物质）进行质控。

1.4 数据处理

本研究采用富集系数、转运系数、提取系数、提取净化时间等作为植物修复 Cd、Pb 污染的分析指标，采用 Microsoft Excel 2014 和 IBM SPSS statistics 19.0 进行数据处理和统计分析，采用 Origin 8 绘图。具体计算公式如下：

富集系数（AF）=地上部重金属含量/土壤中相应元素含量

转运系数（TF）=地上部重金属含量/根部相应元素含量

提取系数（EC）=地上部重金属含量×地上部干质量/土壤中相应元素含量×100%

提取净化时间=培养载体中可溶态重金属含量/（地上部重金属含量×地上部干质量×年种植次数）

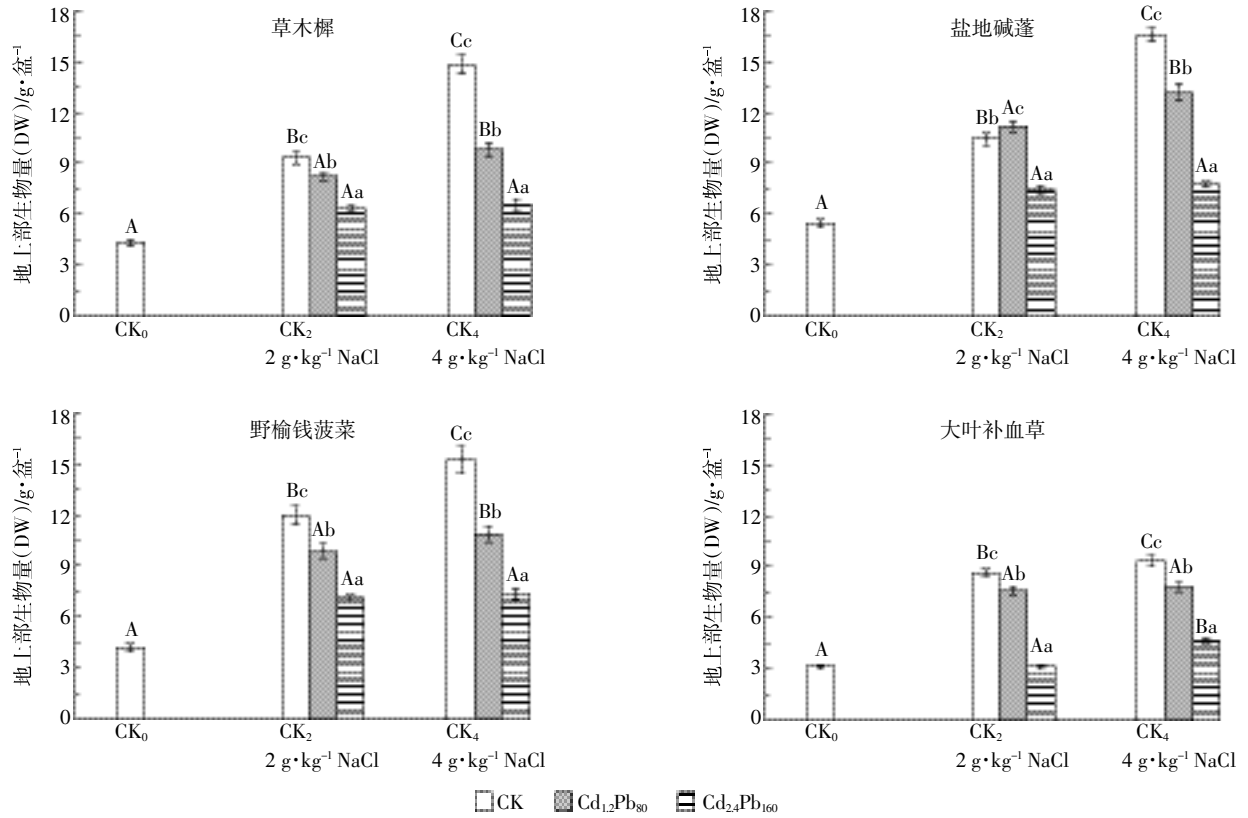
根净吸收能力=（地上部重金属含量×地上部干质量+根部重金属含量×根部干质量）/根部干质量

根净转运能力=根净吸收能力-根部重金属含量

2 结果与分析

2.1 四种盐生植物地上部生物量比较

如图 1 所示，在 2 g·kg^{-1} 和 4 g·kg^{-1} 盐分处理下，四种盐生植物生物量较 CK_0 均有显著增加，且生物量随盐分的增加而增大；在 4 g·kg^{-1} 盐分条件下，草木樨、盐地碱蓬、大叶补血草、野榆钱菠菜的生物量分别为 CK_0 的 3.4、3.0、3.9、3.6 倍。同一盐度梯度下，盐生



不同大写字母代表相同重金属处理不同盐分梯度间差异显著，不同小写字母代表相同盐分梯度下不同重金属处理间差异显著（P<0.05）

Different capital letters represent the same heavy metal treatment between different salinity gradients significant differences, different lower case letters represent the same salinity gradient between different heavy treatments was significant（P<0.05）

图 1 不同处理下几种盐生植物地上部生物量

Figure 1 Aboveground biomass of four halophytes under different treatments

植物在 $Cd_{1.2}Pb_{80}$ 和 $Cd_{2.4}Pb_{160}$ 处理下生物量较对照组均显著下降，但盐地碱蓬在 2 g·kg^{-1} 盐分处理时，$Cd_{1.2}Pb_{80}$ 处理下的生物量较 CK_2 显著增加，而 $Cd_{2.4}Pb_{160}$ 处理下生物量较 CK_2 却显著下降。

2.2 Cd、Pb 复合胁迫下四种盐生植物体内重金属分布

如表 2 所示，外源添加的 Cd、Pb 进入植株后部分被转移到地上部，大部分则滞留在根部，Cd、Pb 在草木樨、大叶补血草、野榆钱菠菜根部含量显著大于其地上部，其中大叶补血草根部 Cd 含量最大为其地上部含量的 25.84 倍，而草木樨根部 Pb 含量最大为其地上部含量的 9.10 倍。盐地碱蓬在 $Cd_{2.4}Pb_{160}$ 处理下，地上部 Cd 含量显著大于其根部含量，地上部含量最高可达 97.04 mg·kg^{-1}，非常接近 100 mg·kg^{-1} 的 Cd 超累积植物界定标准。四种盐生植物对 Pb 的地上部富集量在 204~705 mg·kg^{-1} 范围内，小于 1000 mg·kg^{-1} 的 Pb 超累积植物界定标准。

如图 2 所示，随着环境中有效态 Cd、Pb 浓度的增加，几种盐生植物地上部 Cd、Pb 含量总体呈上升趋势，但增加幅度各不相同：地上部 Cd 含量在外源添加高浓度有效态 Cd 后增幅减缓，而地上部 Pb 含量则在外源添加高浓度有效态 Pb 后增幅变大，最大增量为 108.8 mg·kg^{-1}，是较低浓度下的 1.34 倍。这说

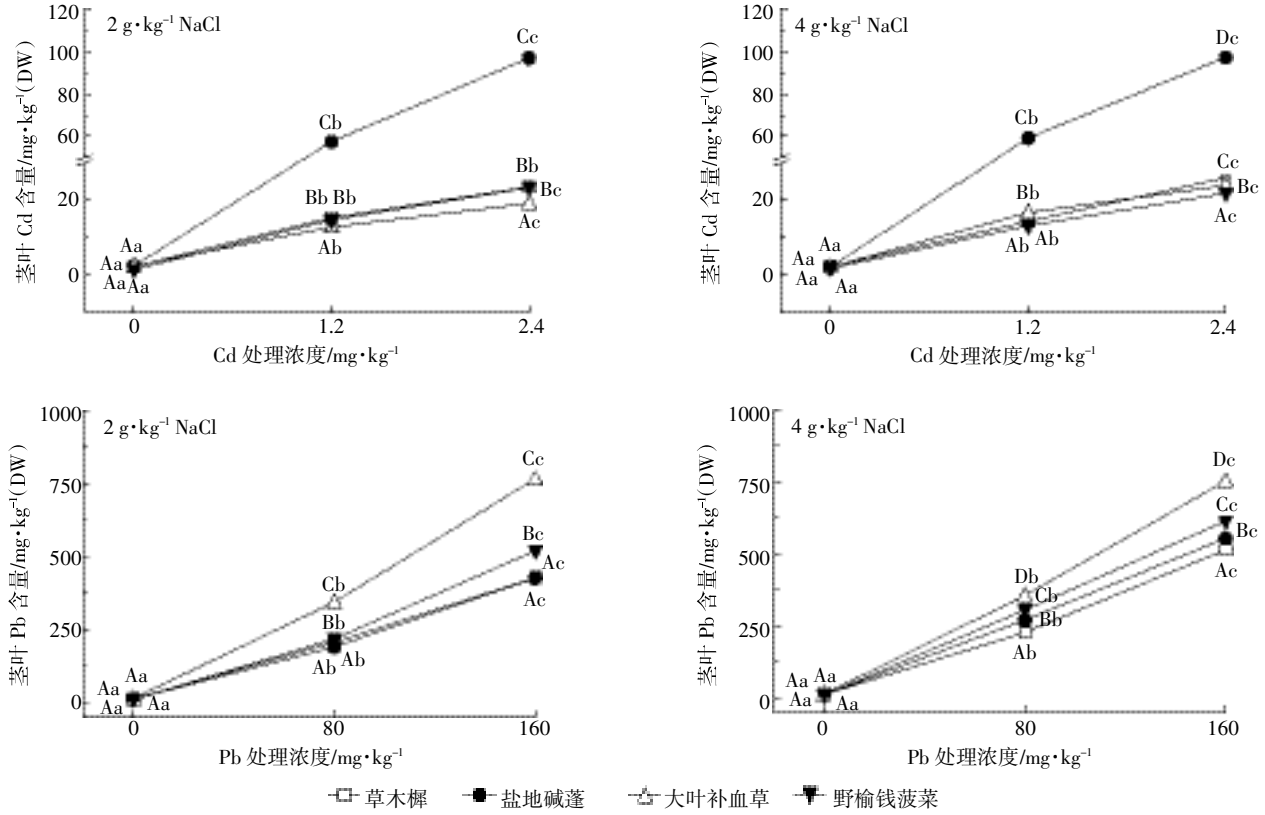
表 2 不同处理下四种植物根部和地上部的 Cd、Pb 含量

Table 2 Concentrations of Cd, Pb in shoots and roots under the different treatments

盐生植物	处理		Cd 含量/mg·kg^{-1} (DW)		Pb 含量/mg·kg^{-1} (DW)	
	NaCl/g·kg^{-1}	Cd、Pb/mg·kg^{-1}	地上部	根部	地上部	根部
草木樨	0	CK_0	2.14±0.08Aa	32.15±1.32Ba	15.16±0.12Ba	86.27±3.21Da
	2	CK_2	3.12±0.12Cc	36.58±1.20Bb	14.86±0.11Ba	79.42±4.58Da
	2	$Cd_{1.2}Pb_{80}$	8.35±0.21Ad	55.57±2.17Bc	204.5±11.6Bc	1859± 121.6Ce
	2	$Cd_{2.4}Pb_{160}$	23.58±1.54Bf	151.18±9.17Cd	426.8±17.3Be	1485 ±106.4Bd
	4	CK_4	2.61±0.06Bb	31.97±1.65Ba	17.21±0.14Bb	102.3±9.27Ba
	4	$Cd_{1.2}Pb_{80}$	9.30±0.32Ae	37.58±2.89Bb	226.6±14.5Ad	1192 ±109.2Bc
	4	$Cd_{2.4}Pb_{160}$	26.03±1.29Cg	194.16±6.25Ce	513.1±14.5Af	894.6 ±75.6Ab
盐地碱蓬	0	CK_0	10.08±0.65Cb	51.96±2.13Ca	11.58±0.01Ab	70.96±5.21Ca
	2	CK_2	2.32±0.13Aa	51.29±3.15Da	10.52±0.56Aa	42.13±3.14Aa
	2	$Cd_{1.2}Pb_{80}$	57.52±2.17Dc	99.54±4.18Ce	190.2±11.2Ad	964.3 ±80.54Ac
	2	$Cd_{2.4}Pb_{160}$	96.80±2.12Cd	63.74±3.18Bc	425.6±27.1Af	1182± 95.6Ad
	4	CK_4	2.04±0.16Aa	53.76±4.21Cb	16.28±1.20Ac	62.14±4.32Aa
	4	$Cd_{1.2}Pb_{80}$	59.27±2.89Dc	103.7±8.23Cf	269.1±19.1Be	427.1 ±29.47Ab
	4	$Cd_{2.4}Pb_{160}$	97.04±3.09Dd	65.09±2.46Bd	552.8±31.4Bg	1105± 82.64Bd
大叶补血草	0	CK_0	3.42±0.21Bab	52.13±3.28Cb	16.38±1.32Ca	42.51±3.21Aa
	2	CK_2	2.79±0.15Ba	42.95±3.69Ca	21.46±1.21Cc	63.21±4.81Ba
	2	$Cd_{1.2}Pb_{80}$	12.81±1.01Bc	302.9±15.81Dd	342.4±21.9Dd	2445±125.6 Db
	2	$Cd_{2.4}Pb_{160}$	19.16±0.46Ae	495.2±21.18Df	765.4±41.2Dg	3827±241.6Dd
	4	CK_4	4.65±0.32Db	61.28±4.62Dc	18.21±1.32Cb	68.45±5.12Aa
	4	$Cd_{1.2}Pb_{80}$	16.72±0.98Cd	402.1±17.45De	354.3±17.5De	2952± 218.9Dc
	4	$Cd_{2.4}Pb_{160}$	23.99±1.76Bf	512.1±12.95Dg	750.9±52.1Df	4068 ±314.5Ce
野榆钱菠菜	0	CK_0	3.42±0.13Ba	12.54±1.21Ab	21.85±1.52Db	63.21±4.21Ba
	2	CK_2	5.32±0.21Dc	11.09±1.05Aa	25.42±1.84Dc	70.19±3.58Ca
	2	$Cd_{1.2}Pb_{80}$	14.76±0.38Ce	15.81±1.92Ac	216.3±16.7Cd	1802± 102.8Bb
	2	$Cd_{2.4}Pb_{160}$	23.38±1.37Bg	30.09±2.44Ae	519.5±28.4Cf	3463 ±187.6Cd
	4	CK_4	4.17±0.32Cb	18.37±1.52Ad	19.62±1.62Da	62.84±5.12Aa
	4	$Cd_{1.2}Pb_{80}$	13.15±1.09Bd	16.61±2.30Ac	303.8±21.6Ce	2531 ±195.6Cc
	4	$Cd_{2.4}Pb_{160}$	21.86±0.64Af	34.78±2.82Af	612.4±17.4Cg	4707±321.8De

注：表中不同大写字母代表相同处理不同品种间差异显著，不同小写字母代表相同品种不同处理间差异显著（P<0.05）。下同。

Note: Different uppercase letters indicate significant difference (P<0.05) among different cultivars, different lowercase letters indicate significant difference (P<0.05) among different treatments. The same below.



图中不同大写字母代表相同处理不同品种间差异显著,不同小写字母代表相同品种不同处理间差异显著(P<0.05)

Different uppercase letters indicate significant difference(P<0.05) among different cultivars, different lowercase letters indicate significant difference(P<0.05) among different treatments

图 2 2 g·kg⁻¹ 和 4 g·kg⁻¹ 盐度下地上部 Cd、Pb 含量与 Cd、Pb 处理浓度的关系

Figure 2 The relation between shoot content of Cd, Pb and added content of Cd, Pb under 2 g·kg⁻¹ and 4 g·kg⁻¹ salinity

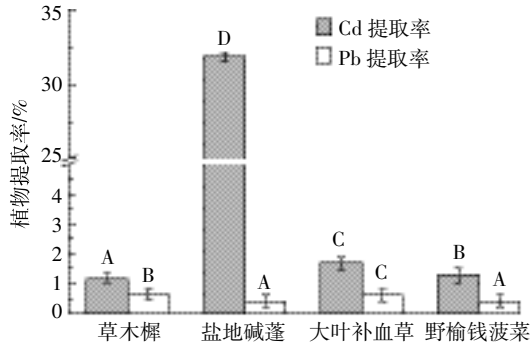
明地上部Cd、Pb 含量表现出相反的变化规律。

2.3 四种盐生植物 Cd、Pb 吸收和转运能力比较

经计算,四种盐生植物对 Cd 的富集系数均大于 1,其中盐地碱蓬最大富集系数可达 49.39,表现出很强的 Cd 富集能力;Pb 平均富集系数仅为 Cd 富集系数的 12%;外源添加 $Cd_{1.2}Pb_{80}$ 处理后,植物的富集系数小于较高浓度下的植物富集系数。盐地碱蓬最大转运系数可达 1.52, 而其他三种盐生植物 Cd、Pb 转运系数均小于 1。如表 3 所示,盐地碱蓬对 Cd、Pb 的根净吸收能力和根净转运能力也显著高于其他三种盐生植物。盐地碱蓬、大叶补血草、野榆钱菠菜在 4 g·kg⁻¹ 盐分条件下 Cd、Pb 根净吸收能力显著高于 2 g·kg⁻¹ 盐分条件。

2.4 四种盐生植物 Cd、Pb 提取能力比较

由图 3 可知,同一盐分条件下,四种盐生植物对于 Pb 的提取率显著低于 Cd,不同盐分条件下四种植物 Pb 的提取率全部低于 1%。2 g·kg⁻¹ 盐分条件下盐地碱蓬 Cd 最大提取率为 31.80%, 提取 Cd 量可达到 938.20 μg·盆⁻¹; 草木樨平均提取 Cd 量为 46.42 μg·盆⁻¹, 大叶补血草平均提取 Cd 量为57.81 μg·盆⁻¹,野



不同大写字母代表不同品种间差异显著(P<0.05)

Different capital letters represent significant differences among different species(P<0.05)

图 3 四种盐生植物对 Cd、Pb 的提取率比较

Figure 3 The extraction rate of four halophytes

表 3 不同浓度处理下四种盐生植物 Cd、Pb 吸收转运能力比较

Table 3 Accumulation and transportation of four halophytes under the different treatments

盐生植物	处理		根净吸收能力/g·kg^{-1}		根净转运能力/g·kg^{-1}	
	NaCl/g·kg^{-1}	Cd、Pb/mg·kg^{-1}	Cd	Pb	Cd	Pb
草木樨	2	$Cd_{12}Pb_{80}$	0.12±0.01Aa	1.85±0.23Bc	0.07±0.01Aa	1.63±0.21Bc
	2	$Cd_{24}Pb_{160}$	0.14±0.01Ab	2.85±0.25Bd	0.10±0.01Ab	2.59±0.25Bd
	4	$Cd_{12}Pb_{80}$	0.24±0.02Ac	1.56±0.15Bb	0.09±0.01Ab	1.11±0.12Bb
	4	$Cd_{24}Pb_{160}$	0.27±0.02Ad	1.48±0.11Ba	0.08±0.01Aa	1.00±0.25Ba
盐地碱蓬	2	$Cd_{12}Pb_{80}$	0.62±0.04Ca	3.20±0.42Ca	0.53±0.06Da	2.45±0.12Ca
	2	$Cd_{24}Pb_{160}$	1.12±0.15Db	5.05±0.56Db	1.02±0.12Bc	4.61±0.62Db
	4	$Cd_{12}Pb_{80}$	1.48±0.12Dd	7.71±0.74Dd	1.41±0.16Dd	6.22±0.65Dd
	4	$Cd_{24}Pb_{160}$	1.17±0.13Dc	6.42±0.82Dc	0.86±0.08Cb	4.91±0.52Dc
大叶补血草	2	$Cd_{12}Pb_{80}$	0.12±0.02Aa	3.49±0.42Da	0.11±0.02Bb	2.92±0.24Dc
	2	$Cd_{24}Pb_{160}$	0.53±0.04Cb	3.57±0.21Cb	0.13±0.02Ab	2.77±0.26Cb
	4	$Cd_{12}Pb_{80}$	0.57±0.06Cc	6.34±0.56Cd	0.07±0.01Aa	5.54±0.62Cd
	4	$Cd_{24}Pb_{160}$	0.66±0.06Cd	3.68±0.23Cc	0.09±0.01Aa	2.42±0.31Ca
野榆钱菠菜	2	$Cd_{12}Pb_{80}$	0.20±0.01Bb	0.47±0.06Ab	0.19±0.02Ca	0.09±0.01Aa
	2	$Cd_{24}Pb_{160}$	0.16±0.05Ba	0.27±0.02Aa	0.16±0.02Aa	0.06±0.01Aa
	4	$Cd_{12}Pb_{80}$	0.50±0.01Bc	0.70±0.08Ad	0.47±0.04Ba	0.31±0.03Ac
	4	$Cd_{24}Pb_{160}$	0.40±0.03Bc	0.61±0.04Ac	0.39±0.04Bb	0.21±0.05Ab

榆钱菠菜平均提取 Cd 量为 32.47 μg·盆$^{-1}$。经计算四种植物 Cd、Pb 提取净化时间有很大差别，Pb 提取净化时间较长；不同盐分条件下 Cd 提取净化时间最短的为盐地碱蓬 3.14 年，其他分别为草木樨 85.30 年，大叶补血草 59.21 年，野榆钱菠菜 77.84 年。

3 讨论

一定浓度的盐分处理可促进盐生植物的生长[16-17]。本研究中，在 2 g·kg^{-1} 盐度处理下四种盐生植物生物量较对照组（CK_0）均显著增加，平均增加 1.5 倍，4 g·kg^{-1} 盐度处理下生物量平均增加 2.5 倍。盐度的升高促进了盐生植物的生长，很可能因为 Na 是盐生植物的必需元素[18]，也可能由于盐生植物本身应对盐分胁迫具有一种自适应能力，可通过快速生长来增加个体重量，从而降低盐分在植物体内的浓度[19-20]。四种盐生植物中盐地碱蓬的生物量最大，其干质量可达 13.17 g·盆$^{-1}$，在野外高盐度培育条件下地上生物量干质量可达 18 978 kg·hm^{-2}[21]。这一生物量是重金属 Cd 超累积植物龙葵[22]的 1.8 倍，是宝山堇菜[23]的 6.3 倍，较大的生物量在植物修复重金属污染土壤实践中极具潜力。以Cd 为主的重金属会通过抑制植物的光合作用和蒸腾作用来减缓植物的生长，也会干扰植物营养物质的正常吸收和体内再分配，从而降低植物的生物量。本研究中，在 $Cd_{24}Pb_{160}$ 处理下，四种盐生植物的生长均受到不同程度的抑制，但培育过程中未观察到植物衰败或枯萎等严重中毒现象，表明四种盐生植物对重金属 Cd、Pb 有一定耐性。4 g·kg^{-1} NaCl 处理下四种盐生植物根部 Cd、Pb 含量显著高于 2 g·kg^{-1} 处理下的含量，Cd、Pb 的根净吸收能力也表现出相同规律。这表明适当盐分胁迫不但促进盐生植物的生长，也促进其根部对重金属的吸收。在 $Cd_{12}Pb_{80}$ 处理下，盐地碱蓬生物量较空白上升 7.8%，表明低浓度的 Cd、Pb 可能会促进其根部对营养物质的吸收，也可能刺激茎叶部有机酸的生成，从而促进生长[24]。重金属胁迫下盐地碱蓬较大的生物量表明其有较强的 Cd、Pb 耐性，植物对重金属的耐性强弱可作为植物能否被用于修复遭受重金属污染土壤的基本依据[25-26]，特别是重度污染的土壤。本研究结果说明盐地碱蓬对于重金属污染土壤的修复具有较强的应用潜力和价值。

富集量、富集系数一般用来表征土壤或其他培养体系与植物体之间元素迁移的难易程度，富集量、富集系数越大说明元素越容易通过植物根部迁移到植物体内。转运系数大于 1 意味着植物地上部重金属的含量大于根部的含量，表明植物体对这种元素有很好的转运能力。这是重金属高累积植物区别于普通植物的重要特征。本研究中，四种盐生植物对 Cd 富集能力显著大于 Pb。这是因为复合污染下，Cd 具有的较强毒性，很大程度上抑制了植物根部对Pb 的吸收[27]，

当 Cd、Pb 复合污染条件下,Cd 更易与盐生植物生长环境中的 Cl^- 发生络合反应,更易移动从而增加 Cd 的生物有效性,增加其进入植物体的可能性,而 Pb 则更易与环境中 CO_3^{2-}、PO_4^{3-}、SO_4^{2-} 形成不易溶解的物质[28],从而降低其移动性,不易被富集进入植物体内。

本研究中,草木樨、大叶补血草和野榆钱菠菜的 Cd、Pb 转运系数均小于 1,说明 Cd、Pb 进入植物根部后,难以被转移到地上部。原因是 Cd、Pb 为植物的非必需元素,植物体内没有专门负责其迁移的转运蛋白和相应通道,植物对 Cd、Pb 的吸收多为被动吸收,故大部分 Cd、Pb 离子滞留在植物根部。低浓度 Cd、Pb 处理下,四种盐生植物的 Cd、Pb 富集系数高于高浓度处理,且地上部 Cd、Pb 含量均随处理浓度的增大而增加,但高浓度处理使得植物对 Cd 吸收速率下降,同时 Pb 表现出与 Cd 富集转运相反的规律。这表明盐生植物根部对 Cd、Pb 的累积能力有限,在正常的富集能力范围内富集系数随 Cd、Pb 处理浓度的增加而降低,低浓度处理时富集系数更高,高浓度处理时富集系数较低。盐地碱蓬 Cd 富集系数达 49.40,地上部 Cd 富集量达 97.04 $mg\cdot kg^{-1}$,转运系数达 1.52,根净吸收与根净转运能力显著大于其他盐生植物。主要原因是其根部有较强的吸收与转运能力,应用于土壤修复实践时可直接通过收割植物的地上部后焚烧处理,一方面可提高经济效益,另一方面便于集中处理含大量 Cd 的灰渣。

植物提取率与提取净化时间指标在修复重金属污染土壤实践工作中更具实际意义。植物提取率可表征某种植物对污染土壤的净化效率,提取净化时间则表征有效态 Cd、Pb 被植物完全吸收净化所需时间。由于 Pb 进入植物体后大多沉淀富集在植物根部的细胞壁和液泡中,难以迁移到地上部分,而 Cd 的移动性远大于 Pb 的移动性,故几种植物对于 Cd 的提取率明显高于对 Pb 的提取率,Cd 提取净化时间也显著少于提取净化 Pb 所需的时间。本研究中,几种盐生植物依据上述评价指标综合看来,盐地碱蓬具有根部吸收转运 Cd 能力强、提取效率高、提取净化时间短的优势,且有较强吸盐能力,表现出对重金属和盐分均有较好的去除效果,故在重金属 Cd 污染的盐土修复实践中具有很大的潜力和应用价值。

4 结论

(1)经过对比四种盐生植物对重金属的提取修复能力,发现盐地碱蓬地上部生物量为 13.17 $g\cdot 盆^{-1}$,地上部 Cd 含量可达 97.04 $mg\cdot kg^{-1}$,Cd 最大提取率为 31.80%;提取 Cd 量可达 938.20 $\mu g\cdot 盆^{-1}$,提取净化时间仅为 3.14 年;又因其有很强的吸盐能力,故盐地碱蓬在受重金属 Cd 污染的盐土修复实践中有较大潜力与价值。

(2)4 $g\cdot kg^{-1}$ NaCl 处理下四种盐生植物的地上部生物量及根部 Cd、Pb 含量显著高于 2 $g\cdot kg^{-1}$ 处理,表明适当浓度盐分不但促进盐生植物的生长,也促进了盐生植物根部对土壤中重金属的吸收。

(3)盐地碱蓬对 Cd、Pb 的根吸收能力与根转运能力显著高于其他三种盐生植物,表明盐地碱蓬地上部高富集重金属是由其根部较强的吸收能力和较强的转运能力共同决定的。

(4)四种盐生植物对 Cd、Pb 吸收和转运存在较大差异,较高重金属浓度下 Pb 的吸收速率明显高于 Cd。

参考文献:

[1] Rozema J, Flowers T. Crops for a salinized world[J]. *Science*, 2008, 322(5907):1478-1480.

[2] Ravindran K, Venkatesan K, Balakrishnan V, et al. Restoration of saline land by halophytes for Indian soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39(10):2661-2664.

[3] 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.

[4] Duarte B, Caetano M, Almeida P R, et al. Accumulation and biological cycling of heavy metal in four salt marsh species, from Tagus estuary (Portugal)[J]. *Environmental Pollution*, 2010, 158(5):1661-1668.

[5] 余海英, 李廷轩, 周健民. 典型设施栽培土壤盐分变化规律及潜在的环境效应研究[J]. 土壤学报,2006, 43(4):571-576.
YU Hai-ying, LI Ting-xuan, ZHOU Jian-min. Salt in typical greenhouse soil profiles and its potential environment effect[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(4):571-576.

[6] Li Q S, Chen Y, Fu H, et al. Health risk of heavy metals in food crops grown on reclaimed tidal flat soil in the Pearl River Estuary, China[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, 227:148-154.

[7] Du Laing G, Rinklebe J, Vandecasteele B, et al. Trace metal behaviour in estuarine and riverine floodplain soils and sediments: A review[J]. *Science of the Total Environment*, 2009, 407(13):3972-3985.

[8] Mahar A, Wang P, Ali A, et al. Challenges and opportunities in the phytoremediation of heavy metals contaminated soils: A review, China[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2016, 126:111-121.

[9] Manousaki E, Kalogerakis N. Phytoextraction of Pb and Cd by the mediterranean saltbush(*Atriplex halimus* L.): Metal uptake in relation to salinity[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2009, 16(7):844-854.

[10] Wang H L, Tian C Y, Jiang L, et al. Remediation of heavy metals con-

taminated saline soils:A halophyte choice?[J]. *Environmental Science and Technology*, 2013, 48(1):21-22.

[11] 卞阿娜, 林 鸣, 王文卿, 等. 根系盐胁迫对盐生植物和甜土植物的幼苗生长及矿质元素分布的影响[J]. 热带亚热带植物学报, 2015, 23(4):405-412.
BIAN A-na, LIN Ming, WANG Wen-qing, et al. Effects of root salt stress on growth and allocation of mineral elements in halophyte and glycophyte seedlings[J]. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2015, 23(4):405-412.

[12] 赵可夫, 李法曾, 樊守金, 等. 中国的盐生植物[J]. 植物学通报. 1999, 16(3):201-207.
ZHAO Ke-fu, LI Fa-zeng, FAN Shou-jin, et al. Halophytes in China [J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 1999,16(3):201-207.

[13] Han R M, Lefèvre I, Ruan C J, et al. Effects of salinity on the response of the wetland halophyte *Kosteletzkya virginica*(L.) presl:To copper toxicity[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2012, 223(3):1137-1150.

[14] Bankaji I, Sleimi N, López-Climent M, et al. Effects of combined abiotic stresses on growth, trace element accumulation, and phytohormone regulation in two halophytic species[J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2014, 33(3):632-643.

[15] Chai M W, Shi F C, Li R L, et al. Effect of NaCl on growth and Cd accumulation of halophyte spartina alterniflora under $CdCl_2$ stress [J]. *South African Journal of Botany*, 2013, 85(2):63-69.

[16] Clough B F. Growth and salt balance of the mangroves *Avicennia marina*(Forsk.) Vierh. and *Rhizophora stylosa* Griff. in relation to salinity [J]. *Plant Physiology*, 1984, 11(5):419-430.

[17] Khan M A, Ungar I A, Showalter A M. The effect of salinity on the growth, water status, and ion content of a leaf succulent perennial halophyte, *Suaeda fruticosa*(L.) Forssk.[J]. *Journal of Arid Environments*, 2000, 45(1):73-84.

[18] Brownell P. E. Sodium as an essential micronutrient for a higher plant (*Atriplex vesicaria*)[J]. *Plant Physiology*, 1965, 40(3):460-468.

[19] Brownell P E, Crossland C J. The requirement for sodium as a micronutrient by species having C4 dicarboxylic photosynthetic pathway [J]. *Plant Physiology*, 1972, 49(5):794-797.

[20] Mandak B, Pysek P. Effects of plant density and nutrient levels on fruit polymorphism in *Artiplex sagittata*[J]. *Oecologia*, 1999, 119(1):63-72.

[21] 郭 洋, 陈波浪, 盛建东, 等. 几种一年生盐生植物的吸盐能力[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(1):269-276.
GUO Yang, CHEN Bo-lang, SHENG Jian-dong, et al. Salt absorption capacities of several annul halophytes[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(1):269-276.

[22] 魏树和, 周启星, 王 新. 超积累植物龙葵及其对镉的富集特征[J]. 环境科学, 2005, 26(3):167-171.
WEI Shu-he, ZHOU Qi-Xing, WANG-Xin. Cadmium-hyperaccumulator *Solanum nigrum* L. and its accumulating characteristics[J]. *Environmental Science*, 2005, 26(3):167-171.

[23] 刘 威, 束文圣, 蓝崇钰. 宝山堇菜 (*Viola baoshanensis*): 一种新的 Cd 超富集植物[J]. 科学通报, 2003, 48(19):2046-2049.
LIU Wei, SHU Wen-sheng, LAN Chong-yu. A new cadmium-hyperaccumulate plant:*Viola baoshanensis*[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(19):2046-2049.

[24] 郭 平, 刘 畅, 张海博, 等. 向日葵幼苗对 Pb、Cu 富集能力与耐受性研究[J]. 水土保持学报, 2007, 21(6):92-95.
GUO Ping, LIU Chang, ZHANG Hai-bo, et al. Studies on enrichment and tolerance ability to Pb, Cu of sunflower seedlings[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(6):92-95.

[25] McGrath S P, Shen Z G, Zhao F J. Heavy metal uptake and chemical changes in the rhizosphere of *Thlaspi caerulescens* and *Thlaspi ochroleucum* grown in contaminated soils[J]. *Plant and Soil*, 1997, 188:153-159.

[26] Lefevre I, Correal E, Lutts S. Cadmium tolerance and accumulation in the noxious weed *Zygophyllum fabago*[J]. *Canadian Journal of Botany*, 2005, 83(12):1655-1662.

[27] 牛之欣, 孙丽娜, 孙铁珩. 水培条件下四种植物对 Cd、Pb 富集特征[J]. 生态学杂志, 2010, 29(2):261-268.
NIU Zhi-xin, SUN Li-na, SUN Tie-heng. Enrichment characteristics of Cd and Pb by four kinds of plant under hydroponic culture[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(2):261-268.

[28] 王 新, 梁仁禄, 周启星. Cd-Pb 复合污染在土壤-水稻系统中生态效应的研究[J]. 农村生态环境, 2001,17(2):41-44.
WANG Xin, LIANG Ren-lu, ZHOU Qi-xing. Ecological effect of Cd-Pb combined pollution on soil-rice system[J]. *Rural Eco-Environment*, 2001, 17(2):41-44.