

刘全, 伊同歆, 李秋雨, 等. 翅碱蓬对盐碱湿地重金属污染消减作用[J]. 环境化学, 2022, 41(3): 1097-1100.

LIU Quan, YI Tongxin, LI Qiuyu, et al. Abatement of heavy metal pollution in saline-alkali wetland by *Suaeda heteroptera* [J]. Environmental Chemistry, 2022, 41 (3): 1097-1100.

翅碱蓬对盐碱湿地重金属污染消减作用*

刘全^{1,2,3} 伊同歆^{1,2,3} 李秋雨^{1,2,3} 蒋培宇⁴ 赵雨朦^{1,2,3}
霍玉洁^{1,2,3} 魏海峰^{1,2,3} 何洁^{1,2,3} **

(1. 大连海洋大学海洋科技与环境学院, 大连, 116023; 2. 辽宁省自然资源厅近海生态环境与灾害防护工程技术创新中心, 大连, 116023; 3. 辽宁省近岸海洋环境科学与技术重点实验室, 大连, 116023; 4. 岛津企业管理(中国)有限公司沈阳分公司, 沈阳, 110013)

摘要 为探究翅碱蓬对盐碱湿地重金属污染的消减作用和生态修复能力, 采用现场监测与高盐水培试验相结合的方法, 测定不同浓度 Zn^{2+} 、 Cu^{2+} 和 Pb^{2+} 混合污染下, 翅碱蓬对重金属的吸收消减作用. 结果表明, 在高盐环境下, 翅碱蓬对重金属锌、铜和铅均具有消减作用, 生物富集系数 $BCF_{Sh-Zn} > BCF_{Sh-Cu} > BCF_{Sh-Pb}$. 当重金属离子浓度较高时, 翅碱蓬仍可以存活, 但吸收量较低, 影响了翅碱蓬对重金属污染的修复能力. 将研究数据与翅碱蓬种群密度相关联, 可得到区域内翅碱蓬对重金属的去除总量, 为翅碱蓬生态修复技术推广应用提供相关理论基础和技术支撑.

关键词 翅碱蓬, Zn^{2+} , Cu^{2+} , Pb^{2+} , 生态修复.

Abatement of heavy metal pollution in saline-alkali wetland by *Suaeda heteroptera*

LIU Quan^{1,2,3} YI Tongxin^{1,2,3} LI Qiuyu^{1,2,3} JIANG Peiyu⁴ ZHAO Yumeng^{1,2,3}
HUO Yujie^{1,2,3} WEI Haifeng^{1,2,3} HE Jie^{1,2,3} **

(1. Dalian Ocean University, School of Marine Science and Environment Engineering, Dalian, 116023, China; 2. Offshore Ecological Environment and Disaster Protection Engineering Technology Innovation Center, Department of Natural Resources of Liaoning Province, Dalian, 116023, China; 3. Key Laboratory of Offshore Marine Environmental Science and Technology of Liaoning Province, Dalian, 116023, China; 4. Shimazu Enterprise Management (China) Co., LTD. Shenyang Branch, Shenyang, 110013, China)

Abstract In order to explore the abatement effect and ecological restoration ability of *Suaeda heteroptera* on heavy metal pollution in salt-alkali wetland, the absorption and abatement effect of *Suaeda heteroptera* were determined under different Zn^{2+} , Cu^{2+} and Pb^{2+} concentrations, via field monitoring and high-salt hydroponic experiment. The results showed that *Suaeda heteroptera* could reduce zinc, copper and lead under high salinity environment, and the bio-enrichment coefficient was $BCF_{Sh-Zn} > BCF_{Sh-Cu} > BCF_{Sh-Pb}$. When the concentration of heavy metal ions were high, *Suaeda heteroptera* could still survive, but its absorption was low. By associating the research data with the population density of *Suaeda heteroptera*, the total amount of heavy metals removed by *Suaeda*

* 国家重点研发计划(2019YFC1407700), 辽宁省教育厅科学研究经费项目(JL202007)和大连市高层次人才创新支持计划-青年科技之星项目(2021RQ085)资助.

Supported by the Subproject of National Key R&D Program of China (2019YFC1407700), Scientific Research Project of the Educational Department of Liaoning Province (JL202007) and Dalian High-Level Talent Innovation Support Program-Youth Science and Technology Star Project (2021RQ085).

** 通信联系人 Corresponding author, Tel: +860411-84763287, E-mail: hejie@dlou.edu.cn

heteroptera in the region could be obtained, providing relevant theoretical basis and technical support for the application of *Suaeda heteroptera* ecological restoration technology.

Keywords *Suaeda heteroptera*, Zn, Cu, Pb, ecological restoration.

盐碱湿地常出现在陆海交汇区和内陆盐湖区,其生态功能对区域环境有重要影响.重金属经地表径流、吸收与吸附等迁移转化过程,在盐碱湿地发生沉积、释放等行为,容易造成重金属“二次污染”^[1-2].因此,河口区域重金属污染治理与修复有着十分重要的意义.

翅碱蓬(*Suaeda heteroptera*)是藜科一年生草本植物,其对盐碱和重金属污染环境具有较好的抗逆性^[3-4].翅碱蓬适应河口湿地盐渍土壤环境,是我国北方河口湿地和盐碱地的特殊优势种.朱鸣鹤等研究表明,翅碱蓬对常见重金属Cu、Zn、Pb和Cd具有累积作用,其体内重金属含量均高于滩涂背景值,其累积吸收主要取决于植物本身所特有的生理机制^[5].当前,翅碱蓬对重金属吸收研究较多,侧重毒理学方面研究,对于实际污染物消减作用方面研究较少^[6-7].特别是翅碱蓬对于不同重金属的消减能力与消减量等具体关键数据未见报道.

本文以文献调研与辽河口湿地现场监测数据为基础,利用实验室水培实验,研究翅碱蓬对重金属的吸收作用,并对翅碱蓬修复重金属污染土壤技术应用可行性进行分析,以期河口湿地重金属污染修复提供理论依据.

1 材料与方法(Materials and methods)

1.1 实验材料

仪器设备:原子吸收分光光度计(岛津 AA-6880,配 ASC-6880 自动进样器),微波消解仪(屹尧 Cash Cow 4010)

试剂与耗材:硝酸、氨水、盐酸、氢氟酸、甲基异丁酮、吡咯烷基二硫代甲酸铵、二乙氨基二硫代甲酸钠、甲基异丁酮等试剂均为优级纯.

1.2 样品采集

辽宁辽河口湿地是我国北方典型的盐碱湿地,其中国家级自然保护区“红海滩”由绵延的翅碱蓬群落组成,遍布 78 km 海岸线,宽处近 2000 m,窄处约 600 m.群落总面积近 40504 km².本课题组先后进行实地考察,并对 2020 年 11 月份成熟的翅碱蓬植株进行重点采样.由于景区保护政策,对翅碱蓬植株的采样量较少,难以做到区域内均匀采样,但以往实验表明,不同采样点位翅碱蓬体内重金属差异不大.采样后,迅速将植株带回实验室,对植物的根、茎叶分别用自来水冲洗干净后,再用去离子水冲洗,烘干待用.每个采样点采集混合沉积物样品带回室内,采样深度为 20 cm,每个样品 1 次重复.

1.3 分析检测方法

本研究使用火焰原子吸收分光光度法测定海水、土壤及植株中铅、锌、铜重金属含量.

土壤及植株处理方法:称取样品于微波消解罐中,加入氢氟酸、硝酸、盐酸,按设定程序消解.消解完成后冷却,置于电热板上赶酸至近干,1% 硝酸水溶液定容至后滤去不溶物待测.

海水处理方法:参考 GB17378.4-2004《海洋监测规范 第 4 部分:海水分析》,使用盐酸及氨水将样品条件至弱酸性(pH=4—5),溶解态的铅、锌、铜与吡咯烷基二硫代甲酸铵(APDC)及二乙氨基二硫代甲酸钠(DDTC-Na)形成螯合物,经甲基异丁酮(MIBK)萃取后待测.

1.4 试验步骤

试验用翅碱蓬种子取自盘锦红海滩,选择大小一致、饱满的翅碱蓬种子用 0.05% 高锰酸钾消毒后备用.试验用水为纯水、海水.根据实际监测数据,设置不同重金属浓度,锌分别为 100、200、400、800、1000 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,铜和铅离子浓度相同,分别为 50、100、200、400、500 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,锌:铜:铅=2:1:1,按 5 个实验组进行实验.

取 5 个塑料植物培养盒,向其中加入适量的土壤,洒满翅碱蓬种子进而再盖上一层土壤,浇水浸湿放在恒温培养箱中,每天浇水将翅碱蓬在土培条件下养成 6 cm 左右,改为水培.配置霍格兰氏营养液 1 L \times 5 瓶,向营养液中加入不同浓度的铜、锌和铅离子,为模拟海水再向营养液中加入海盐,使盐度调成 10‰.每 3 d 向 5 个培养盒中加入等量的重金属营养液,且每 3 d 各取 20 根翅碱蓬苗,洗净后测量其苗长及苗重,接着放入烘干箱中烘干 2 h,测量其烘干后的苗重.原子吸收分光光度法测定翅碱蓬植物吸收重金属铜、锌和铅的情况.

1.5 计算方法及数据处理

将测得的数据中按式(1)计算翅碱蓬样品的重金属含量: $\omega = \rho V / M$.式中, ω 为翅碱蓬干样中重金属的含量(质量分数); ρ 为从标准曲线上查得的重金属的浓度,单位为 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$; V 为样品制备液的体积单位为 mL; M 为样品称取量,单位为 g.本论文所有数据处理和画图均采用微软 excel 2013 软件进行.

2 结果与讨论(Results and discussion)

2.1 现场监测数据

一般地,每年 11 月份,翅碱蓬已经完全成熟,翅碱蓬植株平均高度约 45 cm(茎叶部分),每株重量约 8.5 g.由于翅碱蓬成熟植株个体较大,采用根、茎、叶部分分别测定,也能反应翅碱蓬不同部位对重金属的富集情况.由测量结果可知,3 种重金属在翅碱蓬体内均有富集,锌较多,铜和铅含量较少且二者大致相同.植株根部富集大于茎叶部位,与之前研究结果相似^[8].这与沉积物中不同重金属含量具有一致性.对数据分析可知,翅碱蓬对重金属铜、铅和锌的平

均吸收量分别为 8.01、8.67、46.30 mg·kg⁻¹。

由辽河口湿地沉积物中重金属含量监测数据可知,各站点重金属含量差异不明显,总体呈现锌含量高,是铜和铅含量的两倍左右,各站点铜和铅含量大致相等。辽河口湿地内沉积物中重金属平均含量分别为:铜 26.48 mg·kg⁻¹、铅 33.52 mg·kg⁻¹ 和锌 79.99 mg·kg⁻¹。

2.2 高盐水培试验结果

根据翅碱蓬体内铜离子变化情况可知,在低浓度下,翅碱蓬对重金属铜具有较好富集作用,最高体内含量达到 100 mg·kg⁻¹ 以上。但高浓度下,翅碱蓬对重金属铜的富集量较少,或许是因为高浓度重金属抑制了翅碱蓬的生长。随着时间延长,各浓度条件下,翅碱蓬体内重金属铜含量基本保持不变。

翅碱蓬对重金属锌具有吸收作用,且各浓度条件下吸收量均较高。低浓度范围内,翅碱蓬对重金属锌吸收量较高,随着重金属初始浓度的增加,重金属锌消减量递减。浓度在 50 μg 和 100 μg 级别时,翅碱蓬对重金属锌吸收量较多,第 3 d 吸收量达到 200 mg·kg⁻¹ 以上。当重金属浓度升高时,吸收量反而下降。除去植物生长的稀释作用,可能是由于高浓度重金属抑制了植物正常吸收、代谢等生化过程导致^[9]。随着培养时间延长,翅碱蓬体内重金属锌含量先升高后略有下降,随后基本保持不变。

翅碱蓬对铅的吸收趋势跟铜类似,但总体吸收量较低,体内最高不超过 20 mg·kg⁻¹。低浓度条件下翅碱蓬的吸收量大于高浓度,或是因为高浓度重金属抑制翅碱蓬生长导致。同一浓度条件下,翅碱蓬体内铅含量先升高后降低的趋势。除去植物生长的稀释作用,随着培养时间延长,翅碱蓬体内铅离子含量逐渐下降,推测可能是因为翅碱蓬对于铅离子具有排出机制。

2.3 翅碱蓬对重金属富集能力分析

锌和铜是翅碱蓬生长的必需元素,低浓度条件下,翅碱蓬对锌吸收量较高。在锌离子浓度 100 μg·L⁻¹ 条件下,翅碱蓬体内重金属含量约 163.8 mg·kg⁻¹。对铜离子吸收量较少,约 30.45 mg·kg⁻¹。铅对于翅碱蓬属于有毒物质,各个浓度下吸收量均较少,平均低于 10 mg·kg⁻¹。

生物富集系数 (BCF) 是评价植物富集能力的重要指标之一,其数值越大,说明植物对该重金属的富集能力越强^[10]。因此,翅碱蓬对重金属富集能力可用相应的生物富集系数来表示:BCF=植物体内重金属含量/根际土壤重金属含量。根据现场监测数据,翅碱蓬对重金属富集系数分别为翅碱蓬-锌 (BCF_{Sh-Zn}=0.58)>翅碱蓬-铜 (BCF_{Sh-Cu}=0.30)>翅碱蓬-铅 (BCF_{Sh-Pb}=0.26)。由于翅碱蓬对 3 种重金属的生物富集系数均小于 1,证明翅碱蓬对三类重金属富集能力较低,属于非超级累植物。但是,由于翅碱蓬对高盐环境的特殊适应性,其在高盐环境中对重金属污染仍具有一定的消减能力,适用于盐碱湿地生态修复。

以辽河口湿地为例,翅碱蓬对重金属锌吸收量为 46.30 mg·kg⁻¹,翅碱蓬平均株重约为 8.5 g,种群密度为 100—200 株·m⁻²,则区域内翅碱蓬对重金属锌吸收总量=翅碱蓬对锌的吸收量×平均株重×种群密度×总面积。同样的,在高盐水培实验条件下,富集系数计算过程也可参照上述计算方法。将营养液中的重金属浓度作为环境值,进而计算富集系数。本次实验时长 15 d,重金属在翅碱蓬体内含量逐步稳定。因此,选择第 15 d 取样数据以计算高盐水培条件下翅碱蓬对重金属的富集能力:BCF_{水培}=植物体内重金属含量/营养液中重金属含量。

计算结果如表 1 所示,翅碱蓬对低浓度下的重金属污染富集系数较高,对锌的富集系数明显高于铜和铅。水培条件下富集系数与现场实际环境中的数值相差较大。分析原因主要有三个方面:(1)现场环境重金属活性离子态占比较低,影响翅碱蓬的吸收;(2)水培条件下,重金属离子自身扩散作用对翅碱蓬吸收重金属有促进作用;(3)水培条件设置重金属的浓度相对较高,有利于翅碱蓬对重金属的充分富集。

表 1 高盐水培条件下翅碱蓬对不同重金属生物富集系数

Table 1 Bio-enrichment coefficient of different heavy metals in *Suaeda heteroptera* under high salinity hydroponics

	生物富集系数				
	Cu : Pb : Zn 50 : 50 : 100	Cu : Pb : Zn 100 : 100 : 200	Cu : Pb : Zn 200 : 200 : 400	Cu : Pb : Zn 400 : 400 : 800	Cu : Pb : Zn 500 : 500 : 1000
Cu	2121	444	116.52	63.97	31.26
Pb	115.36	68.45	6.81	9.59	2.74
Zn	2862	1238	563.7	292.06	160.9

从富集系数可以明显看到,在低浓度范围里,翅碱蓬对 3 种重金属吸收富集作用均好于高浓度实验组。各实验组内翅碱蓬对锌和铜的富集能力均大于铅。因此,翅碱蓬对重金属铅的消减能力相对较弱,不适用于铅污染严重区域生态修复。可从两方面入手提高翅碱蓬对重金属污染盐碱湿地的修复能力:(1)翅碱蓬针对锌污染去除能力较强,锌污染严重的区域可优先使用翅碱蓬进行修复,其他种类重金属污染区域可配合其他植物共同修复;(2)通过添加重金属活化物质或微生物等手段,增加沉积物中重金属活化离子所占的比例,进而提高翅碱蓬的富集效率^[11-12]。

3 结论 (Conclusion)

翅碱蓬作为耐盐优势植物,其对于重金属污染不敏感,可用于盐碱地和河口湿地重金属污染消减及生态修复。翅

碱蓬对重金属的消减能力与重金属种类、混合污染物等环境因子有关。翅碱蓬对于不同重金属存在不同的吸收机制,在铜、锌和铅混合污染条件下,其对于锌有良好的消减效果;对铜和铅的消减作用较小但二者差别不大。实际生产应用过程中,翅碱蓬可与微生物法或化学法配合,促进重金属活化,提高翅碱蓬对重金属的富集能力,但相关机制和技术参数有待进一步探索。

参考文献 (References)

- [1] 刘倡君, 罗专溪, 闫钰, 等. 九龙江口红树林湿地表层沉积物中微塑料赋存特征与重金属的关系 [J]. 环境科学, 2022, 43(1): 239-246.
LIU C J, LUO Z X, YAN Y, et al. Occurrence characteristics of microplastics in mangrove sediments in the Jiulong River Estuary and the association with heavy metals [J]. Environmental Science, 2022, 43(1): 239-246 (in Chinese).
- [2] 李琦, 赵琬婧, 王瑜, 等. 三江平原沼泽湿地典型湿地植物对重金属的富集效应 [J]. 湿地科学与管理, 2021, 17(2): 9-13.
LI Q, ZHAO W J, WANG Y, et al. Enrichment effect of typical wetland plants on heavy metals in marshes of Sanjiang plain [J]. Wetland Science & Management, 2021, 17(2): 9-13 (in Chinese).
- [3] HE J, FAN X R, LIU H, et al. The study on *Suaeda heteroptera* Kitag, *Nereis Succinea* and bacteria's joint bioremediation of oil-contaminated soil [J]. Microchemical Journal, 2019, 147: 872-878.
- [4] ZHANG X W, ZHANG L Z, ZHANG L H, et al. Comparison of rhizosphere bacterial communities of reed and *Suaeda* in Shuangtaizi River Estuary, Northeast China [J]. Marine Pollution Bulletin, 2019, 140: 171-178.
- [5] 朱鸣鹤, 丁永生, 丁德文. 翅碱蓬体内重金属在不同生长期的分布与迁移 [J]. 中国环境科学, 2006, 26(S1): 110-113.
ZHU M H, DING Y S, DING D W. Seasonal variation about accumulation distribution and transference of heavy metals in *Suaeda heteroptera* [J]. China Environmental Science, 2006, 26(Sup 1): 110-113 (in Chinese).
- [6] 赵雨朦, 魏海峰, 李悦, 等. Zn^{2+} 、 Cu^{2+} 对翅碱蓬生长的影响研究 [J]. 中国野生植物资源, 2020, 39(10): 7-13.
ZHAO Y M, WEI H F, LI Y, et al. Effects of Zn^{2+} and Cu^{2+} on the growth of *Suaeda heteroptera* [J]. Chinese Wild Plant Resources, 2020, 39(10): 7-13 (in Chinese).
- [7] 何洁, 高钰婷, 贺鑫, 等. 重金属Zn和Cd对翅碱蓬生长及抗氧化酶系统的影响 [J]. 环境科学学报, 2013, 33(1): 312-320.
HE J, GAO Y T, HE X, et al. The effect of Zn and Cd on growth and antioxidant enzymes activity of *Suaeda heteroptera* Kitagawa [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, 33(1): 312-320 (in Chinese).
- [8] HE J, JI Z X, WANG Q Z, et al. Effect of Cu and Pb pollution on the growth and antionxidant enzyme activity of *Suaeda heteroptera* [J]. Ecological Engineering, 2016, 87: 102-109.
- [9] 朱鸣鹤, 丁永生, 郑道昌, 等. 潮滩植物翅碱蓬对Cu、Zn、Pb和Cd累积及其重金属耐性 [J]. 海洋环境科学, 2005, 24(2): 13-16.
ZHU M H, DING Y S, ZHENG D C, et al. Accumulation and tolerance of Cu, Zn, Pb and Cd in plant *Suaeda heteroptera* Kitag in tideland [J]. Marine Environmental Science, 2005, 24(2): 13-16 (in Chinese).
- [10] 田山川, 魏海峰, 刘长发, 等. Cu、Cd、Pb在翅碱蓬体内富集动力学研究 [J]. 中国野生植物资源, 2021, 40(2): 36-41.
TIAN S C, WEI H F, LIU C F, et al. Kinetics of enrichment of several heavy metals in *Suaeda heteroptera* [J]. Chinese Wild Plant Resources, 2021, 40(2): 36-41 (in Chinese).
- [11] 黄欣, 何洁, 赵肖依, 等. 翅碱蓬对镉的耐性及吸收特性的研究 [J]. 生态科学, 2021, 40(1): 37-42.
HUANG X, HE J, ZHAO X Y, et al. Study on the absorption and tolerance of Cd to *Suaeda salsa* [J]. Ecological Science, 2021, 40(1): 37-42 (in Chinese).
- [12] 王雨涵, 陈冬月, 江志勇, 等. EDTA强化盐生植物修复Pb、Cd和盐渍化复合污染土壤 [J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(9): 1866-1874.
WANG Y H, CHEN D Y, JIANG Z Y, et al. Phytoremediation of the soil contaminated by Pb, Cd and secondary salinization with the enhancement of EDTA [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, 37(9): 1866-1874 (in Chinese).