

碱蓬(*Suaeda salsa*)对胶州湾滨海湿地 重金属的富集与迁移作用*

袁华茂¹ 李学刚¹ 李 宁¹ 许思思^{1,2} 张 默^{1,2}
段丽琴^{1,2} 宋金明¹

(1. 中国科学院海洋研究所海洋生态与环境科学重点实验室 青岛 266071; 2. 中国科学院研究生院 北京 100049)

提要 通过对胶州湾东北部滨海湿地 5 个采样点生长的碱蓬中 10 种重金属 Cu、Zn、Pb、Cd、As、Cr、Co、Ni、V、Mo 的系统研究,发现碱蓬对 Cu、Zn 的吸收明显高于其它重金属,这可能与 Cu 和 Zn 是植物生长发育必需的微量元素有关,碱蓬体内 Cr、Pb、V 和 Ni 的含量也相对较高。碱蓬对 Mo 的富集效果最为显著,对 Cu、Zn、Cd 和 As 也表现出一定的富集作用,而对其它重金属的富集效果不明显。碱蓬的根、茎和叶对重金属的富集系数从大到小依次为: Cd > As > Cu > Zn > Mo > Co > Ni > V > Pb > Cr; Mo > Cd > Zn > Cu > As, Co, Ni > Pb, Cr > V; Mo > Cd > Zn > Cu > As > Ni > Co > Pb, Cr > V, 总体而言,碱蓬对 Mo 和 Zn 的迁移效率较高,大部分被迁移至地上部分,输送到茎叶的平均相对含量分别占 66.3%和 65.9%,其次是 Cu、Pb、Cd、Cr、Co 和 Ni,它们在碱蓬地上和地下部分的比例大致相当,而碱蓬对 As 和 V 的迁移效率最低,输送到茎叶的平均相对含量分别只有 33.5%和 37.2%。

关键词 重金属, 富集, 迁移, 碱蓬, 胶州湾东北部滨海湿地

中图分类号 X174

近几十年来,随着工业、城市污染的加剧和农用化学品使用的增加,导致土壤重金属污染日趋严重。重金属是一类典型的累积性污染物,可通过土壤-植物系统迁移累积,继而通过食物链进入人体,引起各种生理功能改变,导致各种急慢性疾病。

如何有效消除环境中重金属污染物已成为世界性难题。近些年来,一种成本低廉、环境友好型的植物修复技术成为各国研究的热点(王兆胡等, 2010; 孟范平等, 2009; Zhuang *et al.*, 2009; 张冬冬等, 2010)。植物修复重金属污染的机制主要是利用植物对重金属的吸收和在地上部的积累,通过收获地上部来达到减少土壤重金属含量、实现环境修复的目的,该方法具有成本低、不破坏土壤和河流生态环境、不引起二次污染等优点(付莉婷等, 2010)。

滨海湿地是重金属的重要接纳富集地之一,胶州湾东北部沿岸湿地的面积正逐年减少,其对环境中污染物的净化环境能力也在降低,并且由于胶州湾东北部海域海流为往复流,大量污染物被排入胶州湾东北部海域后,其稀释扩散速度较慢,诸多原因导致该区域环境质量日益恶化(Song, 2010)。近年来,随着湿地保护热潮的兴起,利用植物修复技术来降低滩涂重金属污染程度的研究已得到了国内外学者的普遍关注。研究发现,湿地中有些具有特异根圈效应的植物可以吸收和累积重金属,并能在植物体内发生迁移转化,从而减少滩地上的重金属污染,降低重金属对滩涂生态系统的危害。已有研究表明,潮滩盐沼植物翅碱蓬(*Suaeda heteropera*)对重金属有一定的耐受性和富集能力(朱鸣鹤等, 2005, 2006, 2010; 刘

* 国家海洋公益性项目资助, 201205008 号; 国家自然科学基金委员会创新群体项目资助, 41121064 号。袁华茂, E-mail: yuanhuamao@qdio.ac.cn

通讯作者: 宋金明, 研究员, 博士生导师, E-mail: jmsong@qdio.ac.cn

收稿日期: 2011-01-21, 收修改稿日期: 2011-06-26

晓光等, 2006), 但有关碱蓬(*Suaeda salsa*)对重金属的富集研究较少, 且只是基于实验室内的水培养实验(刘宇等, 2009), 未见其对土壤重金属的富集与迁移研究。本文选择胶州湾东北部沿岸 5 个站点所生长的碱蓬和盐渍土壤为研究对象, 探讨了重金属在碱蓬体内的累积和其迁移特征, 为滨海湿地生态环境的植物修复技术提供基础理论依据。

1 采样与分析

2008年8月, 于胶州湾东北部滨海湿地五个点采集土壤和碱蓬样品(图 1)。其中 T1 位于双埠入海口浅滩, 取样附近植物种类繁多, 附近有输油管道, 水面上有油污。T2 为女姑河入海口西附近浅滩, 稍偏离主河道, 潮滩有养殖虾池蟹地, 采样时为落潮时段。采样点 T2-1 位于女姑河口近水点, 采样于河道旁的斜坡上, 碱蓬根在水中, 茎叶露出水面。T3 位于白沙河入海口附近, 采样点植被完好, 碱蓬生长十分旺盛, 强烈的木质化, 株高也高于其它采样点。T4 及 T4-1 位于墨水河周边, 其附近有垃圾堆, 地面干裂, T4 位于潮滩地带, T4-1 为近水地带。T5 及 T5-1 位于上马污水处理厂外围的盐碱滩, T5 距离污水厂很近, 植物分布不规则, T5-1 位于附近盐场盐池土坝上, 碱蓬的生长繁茂, 处于地势低、盐度大区域的碱蓬尤为明显。

1.1 土壤样品的处理与分析测定

土壤样品采集后, 自然风干 3d 后, 置于 50℃烘箱中烘干至恒重, 用玛瑙研钵研磨过 120 目筛备用。

准确称取 40mg 于 Teflon 溶样罐中, 加入 0.6ml HNO_3 + 2ml HF 封盖后, 震荡样品, 静置 2h 后, 于 150 电热板上溶样 24h, 然后加入 0.5ml HClO_4 于 120 电热板上敞开蒸发至半干, 再加入 1ml HNO_3 + 1ml H_2O 密闭于 120 电热板回溶 12h, 用 ICP-MS 测定重金属 Cu、Zn、Pb、Cd、Cr、As、Co、Ni、V 和 Mo 的含量。ICP-MS 测定条件输出功率为 1300W, 射频电浆耦合器电压为 1.6V, 采样深度为 7mm, 采样锥孔与焰炬的水平距离为 0mm, 采样锥孔与焰炬的垂直距离为 0.4mm, 载气流速为 1.15L/min, 辅助气流量为 0L/min, 蠕动泵转速为 0.1r/s。

1.2 碱蓬样品的处理与分析测定

碱蓬样品采集带回实验室立即用自来水冲洗 3 遍, 蒸馏水冲洗 2 遍, 以除去茎叶部分表面黏着的泥沙, 用小毛刷小心清理根毛附近的土壤, 后用塑料剪刀将植物样品分离为根、茎、叶三部分, 分装后 40℃烘箱中烘至恒重, 以玛瑙研钵研碎, 过 120 目筛。准确称取碱蓬样品 0.1g, 用盐渍土壤同样的样品处理方式和条件测定碱蓬中 Cu、Zn、Pb、Cd、As、Cr、Co、Ni、V、Mo 的含量。

2 结果与讨论

2.1 碱蓬植物体内重金属的总量水平

胶州湾东北沿岸各站点碱蓬植物体内重金属的平均含量见图 2。由图 2 中可以看出, 碱蓬对 Cu、Zn 的吸收明显高于其它重金属, 这与 Cu 和 Zn 参与植物

体内生理活动有关。Cu 和 Zn 是植物生长发育必需的微量元素, 它们不仅是生物体内各种重要酶类的组成成分, 而且与叶绿素和生长素的合成有关。适量的 Cu 和 Zn 可以增强植物体内氧化还原酶促反应和碳氮合成代谢等, 从而提高产量, 改善品质。但如果 Cu 和 Zn 过量, 则可抑制植物生长, 降低多酚氧化酶和硝酸还原酶的活性, 对碳氮代谢也不利(韩文炎等, 1993, 1994)。过量的 Zn 会伤害植物根系, 使植物根系的生长受

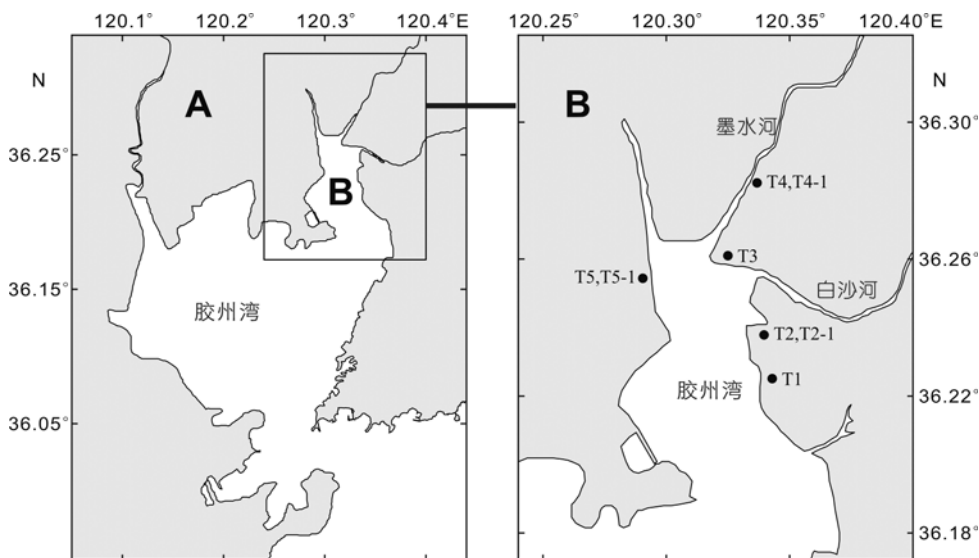


图 1 胶州湾东北部滨海湿地盐渍土壤和碱蓬样品采集站位图

Fig.1 Sampling sites of the saline soils and *S. salsa* in the northeastern coastal wetland of the Jiaozhou Bay

到阻碍,对地上部分也可产生褐色斑点和坏死(李文誉等, 2010)。土壤中 Cu 过多时会影响植物根系正常的代谢功能,使得植物从土壤中吸收的氮等养分显著减少,造成植物生长发育迟缓、减产等(李秀珍等, 2008)。

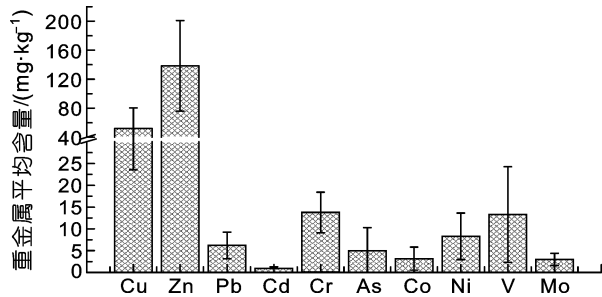


图 2 各站位碱蓬植物体内重金属的平均含量

Fig.2 The average concentrations of heavy metals in *S. salsa*

相对于 Cu 和 Zn, 碱蓬对其它重金属的吸收作用较弱(表 1), 碱蓬植物体内 Cr、Pb、V 和 Ni 的含量相对较高。重金属 Cu、Zn、Pb、Cd、Cr、As、Ni 含量分别超过 400、500、500、1.0、300、40 和 200mg/kg 的土壤属于三级土壤, 即这类土壤重金属含量已经

达到保障农林业生产和植物正常生长的土壤临界值, 超过该值将抑制植物的生长, 对植物和农林业生产产生危害(钟珍梅, 2010)。胶州湾东北部沿岸土壤的重金属 Cu、Zn、Pb、Cd、Cr、As、Ni 含量平均值分别为 122.8、321.3、18.88、0.60、149.3、8.18 和 40.40mg/kg, 均属于二级或一级土壤, 对碱蓬植物生长抑制作用有限。

通常以植物体内重金属含量(mg/kg)与土壤中重金属含量的比值(mg/kg)计算重金属富集系数。图 3 为各站碱蓬的重金属富集系数, 由图 3 中可以看出, 除 Cd 在 T5 站的富集系数最大外, 其余各站碱蓬对 Mo 的富集系数均大于 1, 富集效果最为显著, 其次是 Cu、Zn、Cd 和 As, 其富集系数在各站有的大于 1 而有的小于 1, 表现出碱蓬对这几种重金属具有一定的富集作用, 而对其它重金属的富集效果不明显, 富集系数均小于 1。

2.2 重金属在碱蓬体内不同部位中的分布

碱蓬植物体内根、茎、叶各部分重金属的分布见图 4。由图 4 中可以看出, 重金属在碱蓬根、茎和叶中含量随站位不同变化各异, Cu 在 T4-1 站位碱蓬叶中的含量明显高于根和茎, 但在 T1、T3、T4、T5 和

表 1 碱蓬和盐渍土壤中重金属含量(mg/kg)

Tab.1 Concentrations of heavy metals in the northeastern coastal wetland saline soils of the Jiaozhou Bay

重金属	存在介质	T1	T2	T2-1	T3	T4	T4-1	T5	T5-1
Cu	碱蓬	19.78	41.68	26.21	47.46	103.63	76.09	33.31	68.24
	土壤	23.32	95.60	21.38	23.00	80.21	600.63	33.26	105.10
Zn	碱蓬	119.15	114.60	73.16	125.14	270.98	153.46	81.97	168.52
	土壤	83.92	115.30	94.10	82.93	152.39	1016.15	82.93	179.45
Pb	碱蓬	6.54	3.42	1.91	11.85	6.67	6.71	4.58	8.04
	土壤	36.76	44.45	46.11	37.21	34.32	90.98	32.98	47.45
Cd	碱蓬	1.05	1.02	0.69	1.08	0.80	0.41	1.66	0.75
	土壤	0.93	0.62	0.66	0.24	0.41	1.33	0.09	0.51
Cr	碱蓬	13.37	18.19	7.53	13.57	14.22	14.78	7.41	21.00
	土壤	206.62	160.33	118.01	96.76	88.83	209.55	188.37	125.63
As	碱蓬	7.29	1.53	0.55	16.94	1.79	2.24	4.96	4.51
	土壤	7.08	8.18	11.03	6.64	6.11	9.37	6.47	10.58
Co	碱蓬	1.28	1.10	0.44	8.91	2.10	4.13	3.05	4.09
	土壤	7.65	10.51	10.98	10.72	12.67	15.19	19.07	17.35
Ni	碱蓬	2.82	5.19	1.61	14.18	8.04	9.13	8.08	17.29
	土壤	17.57	35.37	22.59	25.99	30.08	55.01	86.83	49.75
V	碱蓬	10.10	5.88	1.97	37.38	7.67	10.01	15.22	18.09
	土壤	58.29	74.65	75.46	75.16	82.28	91.88	112.21	112.76
Mo	碱蓬	3.14	2.01	1.66	6.02	3.96	2.42	1.93	2.80
	土壤	0.78	0.72	1.04	1.00	0.73	1.40	0.71	0.87

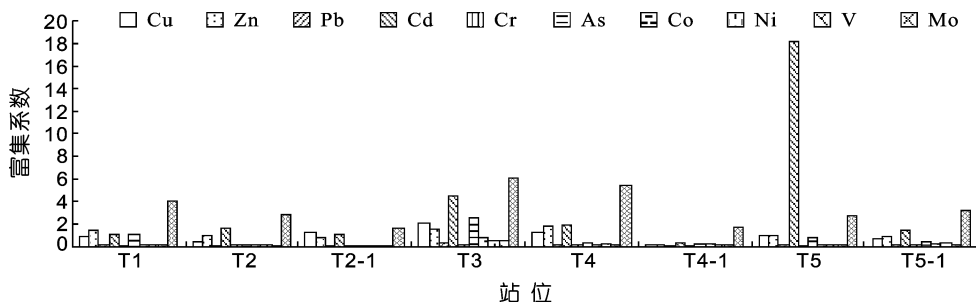


图3 各站位碱蓬植物体内重金属的富集系数

Fig.3 Enrichment factors of heavy metals in the *S. salsa*

T5-1 站其在根中的含量明显高于茎叶, 在 T2 和 T2-2 站其在根茎叶中的含量相当。Zn 在碱蓬根、茎和叶中含量随站位变化较为复杂, 在 T2-2 和 T4-1 站碱蓬叶中 Zn 的含量明显高于根和茎, 在 T3、T5 和 T5-1 站其在根中的含量明显高于茎叶, 在 T1、T2 和 T4 站其在根、茎和叶中含量相差不大。Pb、Cd、Cr、As、Co、Ni 和 V 在碱蓬根、茎和叶中含量随站位变化趋势较为一致, 在 T1、T3、T4、T5 和 T5-1 站这几种重金属在根中的含量明显高于茎和叶, 而在 T4-1 站其在叶中的含量高于在根和茎中的含量, 在 T2、T2-2 站叶中的含量或高于其在根和茎中的含量, 或在根、茎和叶中含量相差不大。Mo 在碱蓬根、茎和叶中含量变化与其它重金属不同, 在大多数站位其在叶中的含量明显高于在茎和根中的含量, 只是在 T3 和 T5 站其在根中的含量高于茎和叶。

表 2 列出了碱蓬根、茎、叶对重金属的富集系数。由表 2 中可以看出, 碱蓬的根对十种重金属的富集作用大小依次为: Cd > As > Cu > Zn > Mo > Co > Ni > V > Pb > Cr, 根对 Cd 的吸收最大, 在 T3 和 T5 站的富集系数分别为 3.51 和 16.05, 但在其它站位其富集系数均小于 1, 地域差异明显。碱蓬的茎对重金属的富集作用依次为: Mo > Cd > Zn > Cu > As, Co, Ni > Pb, Cr > V, 对 Mo 和 Cd 的吸收作用明显高于其它元素。叶对重金属的富集作用依次为: Mo > Cd > Zn > Cu > As > Ni > Co > Pb, Cr > V, 对 Mo、Cd、Cu 和 Zn 的富集作用明显。

研究表明, 植物地上部分生物富集系数越大, 越有利于植物提取修复, 因为地上部分生物量容易收获。植物地上部分生物富集系数大于 1, 意味着植物地上部分某种重金属含量大于所处土壤中该重金属

的含量, 是累积植物区别于普通植物对重金属累积的一个重要特征。作者计算了碱蓬对重金属的生物富集系数。由表 2 可以看出, 生物富集系数表现为 Mo > Cd > Zn > Cu > As > Ni > Co > Pb, Cr > V, 碱蓬地上部分对 Mo 的生物富集系数在大多数站位大于 1, 且地上部分平均是

地下部分的 7 倍, 具备了累计植物的一般特性, 但对其它重金属的生物富集系数均小于 1, 表明碱蓬对 Mo 从地下往地上迁移的能力要比其它重金属强。

2.3 重金属在碱蓬体内的迁移

碱蓬富集重金属的过程主要包括根系吸收重金属的过程和重金属在植物体内的迁移。植物根系中的重金属离子很容易与细胞壁结合, 而进入根细胞中的重金属也可以通过液泡膜上的转运蛋白进入液泡而储存在液泡中(Lasat *et al*, 1996)。重金属由根系进入植物体可以通过共质体(细胞内)或质外体(细胞外)两个途径实现(Dan, 2001)¹⁾, 但是在内皮层由于凯氏带的存在, 重金属主要通过共质体运输进入木质部, 木质部存在大量能够与金属离子结合的有机酸和氨基酸, 这种络合态是重金属离子在木质部中运输的主要形式(Vazquez *et al*, 1994), 但这至少需要三个过程: 进入根细胞, 由根细胞运输到中柱, 再装载到木质部, 最后随蒸腾流进入茎部(黄泽春, 2003²⁾; 王兆胡等, 2010)。由此可见, 重金属离子从根向茎迁移主要受两个过程制约: 一是进入根部木质部的运动; 二是通过叶部叶肉细胞随蒸腾流吸收重金属(Roberts *et al*, 1997)。

根系中重金属元素所占百分含量越大, 说明重金属通过植物根系吸收以后向茎叶中的迁移能力就越小。由表 3 可以看出, 碱蓬对重金属的迁移规律较为复杂, 不同站位存在明显差异。Cu 在碱蓬中由地下往地上的迁移效率较低, T3、T4、T5 和 T5-1 站主要富集在地下部分的根中, T1 站地上部分与地下部分富集效率相当, 其余各站 Cu 主要被迁移到地上部分, 大多富集在叶中。Zn 在碱蓬中的迁移效率各异,

1) Dan T V, 2001. Phytoremediation of metal contaminated soils: metal tolerance and metal accumulation in *Pelargonium* sp.. Ph.D. Thesis. The University of Guelph, Horticultural Science and Land Resource Division, 1—189

2) 黄泽春, 2003. 砷超富集植物的筛选及其富集机理研究. 北京: 中国科学院研究生院博士学位论文, 1—140

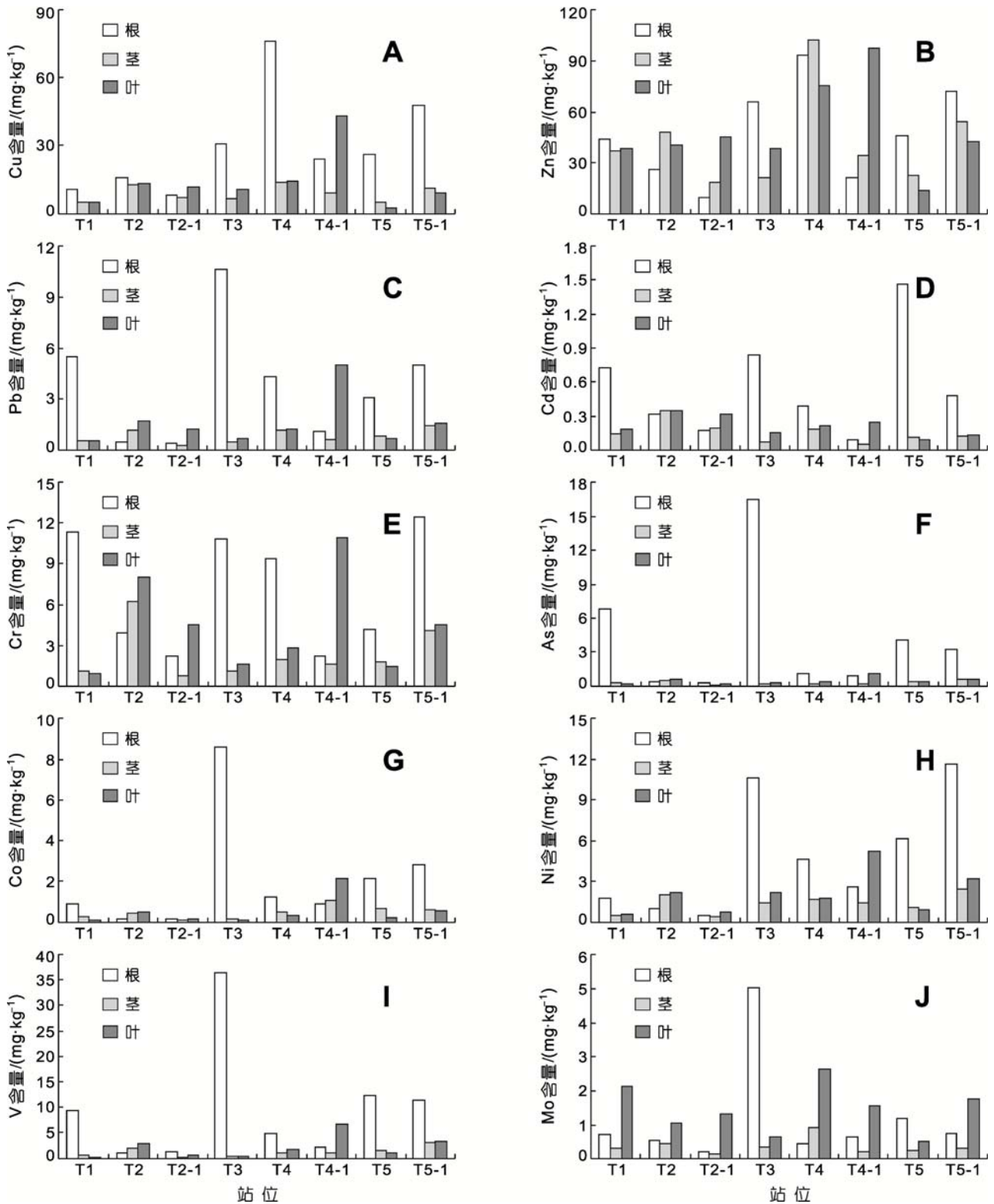


图4 碱蓬植物体内根、茎、叶中重金属的含量

Fig.4 Concentrations of heavy metals in root, stem, and leaf of *S. salsa*

在 T3 和 T5 站, Zn 在地上部分和地下部分的富集效率相当, 而其余各站主要被迁移至地上部分。Pb、Cd、Cr、As、Co、Ni 和 V 在碱蓬中的迁移规律相似, 在

T1、T3、T4、T5 和 T5-1 站这几种重金属主要被限制在根中, 而在其它站点则主要被迁移至地上部分, 除了 As 和 V 在 T2-1 站地上地下部分富集效率相当。

表 2 碱蓬根、茎、叶对重金属的富集系数(平均值)

Tab.2 Average enrichment factors of heavy metals in root, stem, and leaf of *S. salsa*

富集系数	Cu	Zn	Pb	Cd	Cr	As	Co	Ni	V	Mo
根	0.57	0.40	0.10	2.89	0.06	0.59	0.17	0.13	0.12	0.31
茎	0.17	0.32	0.02	0.41	0.02	0.04	0.04	0.04	0.01	0.44
叶	0.22	0.34	0.03	0.49	0.03	0.06	0.04	0.05	0.02	1.70
生物富集系数	0.39	0.66	0.05	0.90	0.05	0.10	0.08	0.09	0.03	2.14

表 3 碱蓬根、茎和叶中重金属的相对百分含量(%)

Tab.3 Relatively percent compositions of heavy metals in root, stem, and leaf of *S. salsa*

站位	Cu			Zn			Pb			Cd			Cr		
	根	茎	叶	根	茎	叶	根	茎	叶	根	茎	叶	根	茎	叶
T1	52.7	23.5	23.8	36.9	30.7	32.3	83.7	8.1	8.2	68.6	13.7	17.7	85.0	8.1	6.9
T2	38.1	30.2	31.7	22.5	42.1	35.4	14.6	34.8	50.6	31.4	34.4	34.2	21.6	34.0	44.3
T2-1	29.8	25.6	44.6	13.2	25.5	61.4	21.3	13.5	65.3	26.0	27.6	46.4	30.0	10.6	59.4
T3	64.0	14.0	22.0	52.6	16.8	30.6	90.0	4.0	6.0	78.0	7.1	14.9	79.9	7.9	12.2
T4	73.4	13.1	13.5	34.4	37.8	27.9	64.4	17.4	18.1	48.6	23.8	27.7	66.2	13.8	20.0
T4-1	31.7	11.8	56.4	13.9	22.5	63.5	15.9	9.4	74.7	24.2	13.8	62.0	15.1	10.7	74.2
T5	78.7	14.7	6.5	56.3	27.2	16.4	66.8	17.7	15.5	88.1	6.6	5.3	55.8	24.2	20.0
T5-1	69.9	16.7	13.4	42.6	32.0	25.4	62.4	17.8	19.8	65.1	16.2	18.7	59.1	19.4	21.6
平均	54.8	18.7	26.5	34.1	29.3	36.6	52.4	15.3	32.3	53.7	17.9	28.4	51.6	16.1	32.3

站位	As			Co			Ni			V			Mo		
	根	茎	叶	根	茎	叶	根	茎	叶	根	茎	叶	根	茎	叶
T1	93.2	3.7	3.1	68.5	20.8	10.6	62.9	17.0	20.1	92.1	4.9	3.0	22.6	9.3	68.0
T2	27.3	30.7	42.1	17.1	38.4	44.6	19.4	38.2	42.4	18.4	34.0	47.6	26.5	21.9	51.6
T2-1	54.8	12.7	32.5	43.7	22.0	34.3	29.3	22.2	48.4	62.4	12.5	25.1	12.2	8.4	79.4
T3	97.1	1.2	1.7	96.3	2.0	1.6	74.7	10.2	15.1	97.7	1.0	1.3	83.5	5.9	10.5
T4	62.8	13.2	24.0	60.6	23.2	16.2	57.4	21.0	21.6	64.4	13.8	21.8	10.8	22.8	66.4
T4-1	40.6	10.0	49.4	22.6	26.0	51.4	28.1	15.0	56.9	22.4	10.9	66.6	26.7	8.7	64.6
T5	82.9	8.9	8.2	69.9	22.3	7.8	76.1	12.8	11.1	81.7	10.5	7.8	60.8	11.9	27.3
T5-1	73.1	12.7	14.2	69.9	15.7	14.4	67.5	14.2	18.3	63.6	17.5	19.0	26.5	11.0	62.5
平均	66.5	11.6	21.9	56.1	21.3	22.6	51.9	18.8	29.2	62.8	13.1	24.0	33.7	12.5	53.8

Mo 在碱蓬中的迁移效率较高, 除在 T3、T5 站富集于根中外, 其余各站均迁移至地上并主要富集于碱蓬的叶中。

总体而言, 碱蓬对 Mo 和 Zn 的迁移效率较高, 大部分被迁移至地上部分, 输送到茎、叶的平均相对含量分别占 66.3% 和 65.9%, 其次是 Cu、Pb、Cd、Cr、Co 和 Ni, 它们在碱蓬地上和地下部分的比例大致相当, 而碱蓬对 As 和 V 的迁移效率最低, 输送到茎叶的平均相对含量分别只有 33.5% 和 37.2%。

除 Mo 和 Zn 外, 其余重金属被根际吸收后 50% 以上被限制在根中而未输送到茎、叶中, 说明碱蓬对重金属的吸收输送效率不高, 这一结果与朱鸣鹤等 (2005, 2006) 对翅碱蓬的研究结果相一致。朱鸣鹤等

(2005, 2006) 认为, 吸收效率不高的原因可能是植物对非必要元素的抗性反应有关, 翅碱蓬对元素的吸收受沉积物理化性质、复合污染和根际环境分泌物等因素共同作用。在 Cu、Pb 和 Cd 等重金属的胁迫作用下, 植物可能通过改变 pH 和根系分泌物组分增加其对 Cu、Pb 和 Cd 等重金属的强化学结合态, 减少其植物受毒害程度, 从而提高其对上述几种重金属的耐性; 另外, 根际分泌物中的低分子量有机酸在沉积物重金属离子的溶性和有效性方面也起到重要的作用, 根际游离金属离子可以和分泌到根际的螯合剂形成稳定的金属螯合物复合体, 从而使重金属离子的活度降低, 使其有限制地对重元素由地下部分往地上部分迁移转化。这种适应性机制可能与植物在长

期的进化过程中相应地产生了多种抵制重金属毒害的防御机制有关。而 Zn 由地下往地上迁移的效率总体较高,这是翅碱蓬本身特有生理特性(根际分泌物等)、沉积物理化性质改变、微生物等影响因素共同作用的结果,其中根际分泌物主要通过影响并调节根际的 pH 改变重金属的活性态。由此看出碱蓬与翅碱蓬对重金属的迁移存在相似特征。

3 结论

本文首次研究报道了采自胶州湾东北部滨海湿地 5 个采样站点生长的碱蓬对重金属的富集和迁移特征,获得了如下主要结论:

(1) 碱蓬对 Cu、Zn 的吸收明显高于其它重金属,这与 Cu 和 Zn 是植物生长发育必需的微量元素有关。对于其它重金属,碱蓬植物体内 Cr、Pb、V 和 Ni 的含量相对较高。所有站位碱蓬对 Mo 的富集系数均大于 1,对 Mo 的富集效果最为显著,其次是 Cu、Zn、Cd 和 As,表现出有一定的富集作用,而对其它重金属的富集效果不明显,富集系数均小于 1。

(2) 碱蓬的根对十种重金属的富集作用大小依次为: Cd > As > Cu > Zn > Mo > Co > Ni > V > Pb > Cr,茎对重金属的富集作用依次为: Mo > Cd > Zn > Cu > As, Co, Ni > Pb, Cr > V,其中对 Mo 和 Cd 的吸收作用明显高于其它元素。叶对重金属的富集作用依次为: Mo > Cd > Zn > Cu > As > Ni > Co > Pb, Cr > V,其中对 Mo、Cd、Cu 和 Zn 的富集作用明显。

(3) 总体而言,碱蓬对 Mo 和 Zn 的迁移效率较高,大部分被迁移至地上部分,输送到茎叶的平均相对含量分别占 66.3%和 65.9%,其次是 Cu、Pb、Cd、Cr、Co 和 Ni,它们在碱蓬地上和地下部分的比例大致相当,而碱蓬对 As 和 V 的迁移效率最低,输送到茎叶的平均相对含量分别只有 33.5%和 37.2%。

致谢 邢军武高级工程师在样品采集、处理及分析中给予大力帮助,谨致谢忱。

参 考 文 献

王兆胡,王鸣刚,骆焕涛,2010. 植物修复技术在重金属污染土壤治理中的应用. 甘肃科技, 26(5): 73—76
付莉婷,王 森,2010. 重金属污染的生物修复研究进展. 贵

州化工, 35(1): 35—37
朱鸣鹤,丁永生,郑道昌等,2005. 潮滩植物翅碱蓬对 Cu、Zn、Pb 和 Cd 累积及其重金属耐性. 海洋环境科学, 24: 13—16
朱鸣鹤,丁永生,丁德文,2006. 翅碱蓬体内重金属在不同生长期的分布与迁移. 中国环境科学, 26(Suppl.): 110—113
朱鸣鹤,方颀雄,丁永生等,2010. 常见重金属在翅碱蓬 (*Suaeda heteroptera*) 根际沉积物系统季节迁移变化. 海洋与湖沼, 41(5): 784—790
刘 宇,孟范平,姚瑞华,2009. 碱蓬幼苗对 Pb、Cd、Cu、Zn 耐受性及富集能力. 环境科学与技术, 32(12D): 55—59
刘晓光,缪锦来,李光友,2006. 天津市清静黄河口河岸翅碱蓬的重金属富集特性. 应用与环境生物学报, 12(1): 25—29
李文誉,李德明,2010. 盐碱及重金属对植物生长发育的影响. 牧草与饲料, 4(1): 7—11
李秀珍,李 彬,2008. 重金属对植物生长发育及其品质的影响. 四川林业科技, 29(4): 59—65
张冬冬,肖长来,梁秀娟,2010. 植物修复技术在水环境污染控制中的应用. 水资源保护, 26(1): 63—65
孟范平,刘 宇,王震宇,2009. 海水污染植物修复的研究与应用. 海洋环境科学, 28(5): 588—593
钟珍梅,王义祥,杨冬雪等,2010. 4种植物对铅、镉和砷污染土壤的修复作用研究. 农业环境科学学报, 29: 123—126
韩文炎,许允文,伍炳华,1993. 铜与锌对茶树生育特性及生理代谢的影响 I. 铜对茶树的生长和生理效应. 茶叶科学, 13(2): 101—108
韩文炎,许允文,伍炳华,1994. 铜与锌对茶树生育特性及生理代谢的影响 II. 锌对茶树的生长和生理效应. 茶叶科学, 14(1): 23—29
Lasat M M, Baker A J M, Kochian V, 1996. Physiological characterization of root Zn²⁺ absorption, translocation to shoots in Zn hyperaccumulator, non-accumulator species of *Thlaspi*. *Plant Physiology*, 112: 1715—1722
Roberts S K, Tester M, 1997. Permeation of Ca²⁺, monovalent cations through an outwardly rectifying channel in maize root stelar cells. *Journal of Experimental Botany*, 48: 839—846
Song J M, 2010. Biogeochemical Processes of Biogenic Elements in China Marginal Seas. Springer-Verlag GmbH & Zhejiang University Press, 1—662
Vazquez M D, Poschenrieder C, Barcelo J, 1994. Compartment of zinc in roots, leaves of the zinc hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* J & C Presl. *Biochimica et Biophysica Acta*, 107: 243—250
Zhuang P, Shu W S, Li Z A, 2009. Removal of metals by sorghum plants from contaminated land. *Journal of Environmental Sciences*, 21(10): 1432—1437

ACCUMULATION AND TRANSPORTATION OF HEAVY METALS BY *SUAEDA SALSA* IN THE NORTHEASTERN COASTAL WETLAND OF THE JIAOZHOU BAY

YUAN Hua-Mao¹, LI Xue-Gang¹, LI Ning¹, XU Si-Si^{1,2}, ZHANG Mo^{1,2},
DUAN Li-Qin^{1,2}, SONG Jin-Ming¹

(1. Key Laboratory of Marine Ecology and Environmental Sciences, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao, 266071; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049)

Abstract Accumulation and transportation of heavy metals by *Suaeda salsa* were studied in the northeastern coastal wetland of the Jiaozhou Bay. The uptake of Cu and Zn in *S. salsa* was much higher than other metals due to their essential roles in plant growth and development. For other metals, the concentrations of Cr, Pb, V, and Ni in *S. salsa* were relatively higher than Cd, As, Mo, and Co. However, accumulation of Mo by *Suaeda salsa* was the most obvious relative to its content in the soil, and the enrichment factors was higher than 1 in all sampling stations. The orders of enrichment factor of the heavy metals in root, stem and leaf were Cd > As > Cu > Zn > Mo > Co > Ni > V > Pb > Cr, Mo > Cd > Zn > Cu > As, Co, Ni > Pb, Cr > V and Mo > Cd > Zn > Cu > As > Ni > Co > Pb, Cr > V, respectively. Overall, Mo and Zn were transported from underground to aboveground tissues and their concentrations in stem and leaf were 66.3% and 65.9% higher than in the root, respectively. The concentrations of Cu, Pb, Cd, Cr, Co, and Ni in underground and aboveground tissues were similar, while the transportation efficiencies of As and V were lower. Their concentrations in stem and leaf were only 33.5 and 37.2%, respectively.

Key words Heavy metals, Accumulation, Transportation, *Suaeda salsa*, The northeastern coastal wetland of the Jiaozhou Bay

2011 年度《海洋与湖沼》动态

(1) 《海洋与湖沼》2011 年最新公布的总被引频次在海洋科学期刊中名列第一; 影响因子为 1.404, 学科影响指标和综合评价总分均列海洋科学期刊首位; 综合评价总分在全国期刊中排第 18 位。

(2) 获得 2011 年度百种中国杰出期刊奖。

(3) 荣获 2011 年度中国精品期刊奖。