

多种盐分离子作用下苋菜对重金属的吸收累积特征

张乾坤, 刘亚男, 李取生^①, 石雷, 王立立 (暨南大学环境工程系/ 水土环境毒性污染防治与生物修复广东省高校重点实验室, 广东 广州 510632)

摘要: 模拟不同淋洗脱盐阶段滩涂土壤孔隙水中盐分和重金属含量, 通过苋菜水培试验, 研究多种盐分离子 (SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 CO_3^{2-} 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 K^+ 和 Mg^{2+} 等) 的共同作用下, 苋菜对 Zn、Cu、Ni、Cr、Pb 和 Cd 6 种重金属的吸收、累积和转运的变化。结果表明, 与对照相比, 在不同盐分离子浓度影响下, 苋菜茎叶中 Cd 的累积增幅分别为 69.2% ~ 146.2%, 而茎叶中其他重金属的含量无显著变化, 苋菜根系中 Cd、Pb、Cr、Ni 和 Cu 含量的最大增幅分别为 187.8%、197.7%、305.7%、228.1% 和 58.2%, 但根系中 Zn 含量未受到显著影响。在相对较高的盐分离子浓度 ($> 1\ 312.4\ \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 范围内, 不同盐分离子浓度处理间苋菜茎叶和根系中 6 种重金属含量差异均不显著。盐分处理显著降低了苋菜对 Pb、Cr、Ni 和 Cu 的转移系数, 但未显著影响苋菜对 Cd 和 Zn 的转移系数。

关键词: 多种盐分离子; 共同作用; 苋菜; 重金属; 吸收; 转运

中图分类号: X131 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4831(2012)01-0061-06

Absorption and Accumulation of Heavy Metals in Amaranth Under Stress of Multiple Salt Ions. ZHANG Qian-kun, LIU Ya-nan, LI Qu-sheng, SHI Lei, WANG Li-li (Department of Environmental Engineering, Jinan University/ Key Laboratory of Water/Soil Toxic Pollutants Control and Bioremediation, Department of Education of Guangdong Province, Guangzhou 510632, China)

Abstract: Reference to the salt and heavy metals content in the pore water of tidal flat soil which was in different leaching and desalinization stages, a hydroponic experiment of amaranth was carried out to investigate absorption, accumulation and transportation of six heavy metals (Zn, Cu, Ni, Cr, Pb and Cd) by the plant under the combined effect of a variety of salts (SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^- , CO_3^{2-} , Na^+ , Ca^{2+} , K^+ and Mg^{2+} , etc.). Results show that compared with what was observed in the control, under the effects of salt ions different in concentration, the content of Cd in stems and leaves of the plant increased by 69.2% - 146.2%, while the contents of other heavy metals did not change much; the content of Cd, Pb, Cr, Ni and Cu in roots of the plant increased by 187.8%, 197.7%, 305.7%, 228.1% and 58.2%, respectively, but that of Zn was not significantly affected. In the culture solution with salt ion concentration being more than $1\ 312.4\ \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, the contents of the six heavy metals in the roots and shoots did not vary much between treatments different in salt concentrations, separately. Salt treatment apparently reduced the translocation coefficients of Pb, Cr, Ni and Cu in amaranth from the roots to the shoots, but it did not affect much that of Cd and Zn.

Key words: multiple salt ions; combined effect; amaranth; heavy metal; absorption; transportation

影响植物吸收重金属的因素很多, 包括土壤溶液的 pH、阳离子交换量、氧化还原条件以及含盐量等^[1]。盐分离子可以和重金属同时存在于土壤或水中^[2], 并影响生长在土壤或水中的植物对重金属的吸收^[3-4]。不同盐分离子对植物吸收累积重金属的影响是不同的, Cl^- 、 NO_3^- 、 CO_3^{2-} 和 SO_4^{2-} 等阴离子主要通过络合作用来影响植物对重金属的吸收和转运^[5], 而 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 K^+ 和 Mg^{2+} 等阳离子主要通过与重金属竞争植物根系的吸收位点等方式来影响植物对重金属的吸收累积。国内外关于单一盐分离子影响植物吸收重金属的研究日趋增多, 如有研究认为, Cd 与 Cl^- 的络合作用可以提高苜蓿、

玉米和印度芥蓝对 Cd 的吸收^[6-8]; SO_4^{2-} 与重金属的络合作用也可以增加重金属的植物有效性^[9]; Na^+ 、 Ca^{2+} 对植物吸收重金属的影响研究也在展开^[7,10]。但是土壤溶液中盐分离子种类通常是比较复杂和多样的, 它们之间可能会发生协同或拮抗作用来影响植物对重金属的吸收。因此, 研究多种盐分离子综合作用下植物对重金属的吸收、累积和转

收稿日期: 2011-09-15

基金项目: 国家自然科学基金(40871154, U0833002); 国家科技支撑计划(2009BADB3B03)

① 通信作者 E-mail: liqusheng@21.cn.com

运具有重要意义。

在土培试验中,植物对重金属吸收的改变可能是由于盐分离子与土壤溶液中可溶态重金属的络合和竞争吸收作用所致,也可能是由于土壤颗粒对重金属的吸附解吸作用所致。为排除后者的干扰,笔者模拟不同淋洗脱盐阶段滩涂土壤孔隙水中盐分和重金属的含量^[11]进行苋菜水培试验,分析多种盐分离子(SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 K^+ 和 Mg^{2+})作用下苋菜吸收和转运重金属(Zn、Cu、Ni、Cr、Pb和Cd)的变化规律,为研究盐分作用下植物吸收和转运重金属的机制提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 水培试验

水培营养母液为改良型霍格兰营养液^[12],其中,大量元素含量($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$): $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$

945、 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 493、 KNO_3 506、 NH_4NO_3 80、 KH_2PO_4 136;微量元素含量($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$): $\text{MnSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 22.3、 H_3BO_3 6.2、 $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 8.6、 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 0.025、 CoCl_2 0.025、 $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0.25、 KI 0.83、 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 5.56、 $\text{C}_{10}\text{H}_{14}\text{N}_2\text{Na}_2\text{O}_8 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 7.46。在使用前加入 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 硝酸调节pH值为3~4。试验中盐分离子浓度梯度和重金属含量的确定参考前期模拟土柱淋洗试验^[11]。水培试验设置8个盐分离子浓度处理(T1~T8)和1个对照,每个处理设置3个重复。不同处理下霍格兰营养液中外加盐分离子含量(不包括霍格兰营养液配方离子)如表1所示。处理和对照加入相同质量浓度($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)的重金属: Cd 0.265, Cr 10.10, Pb 34.73, Cu 12.58, Zn 7.43, Ni 6.00。对应的外加重金属化合物为: $3\text{CdSO}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 、 $\text{Pb}(\text{OAc})_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 、 CuSO_4 、 $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ^[11]。

表1 营养液中外加盐分离子含量

Table 1 Contents of salt ions added into the nutrient solution

处理	$\rho/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$								
	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Cl^-	CO_3^{2-}	HCO_3^-	SO_4^{2-}	阴离子总量
对照	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T1	2 060.6	117.8	122.9	36.4	3 472.7	15.0	159.0	633.9	6 618.3
T2	1 331.8	114.7	108.6	8.7	2 825.7	22.8	179.3	249.5	4 841.1
T3	1 116.7	108.1	92.4	5.6	2 183.7	25.8	159.8	243.2	3 935.3
T4	791.9	82.8	47.0	6.9	1 449.7	21.4	156.8	110.2	2 666.7
T5	670.3	73.6	40.7	7.3	1 508.7	25.6	178.5	79.2	2 583.9
T6	622.5	63.5	32.8	6.2	1 218.6	21.0	212.9	28.4	2 205.9
T7	362.6	38.6	11.2	4.8	556.7	28.2	272.4	37.9	1 312.4
T8	244.2	27.7	7.5	9.9	345.6	14.6	155.3	32.0	836.8

供试植物为耐盐性的正泰圆叶苋菜(*Amaranthus* sp.)。水培容器为高15 cm、直径15 cm的塑料桶。在泡沫板上均匀打4个孔,挑选长势一致的幼苗,用海绵固定其根系置于泡沫板孔中,泡沫板置于容器中的营养液上。每个桶内放入1个曝气头,每日定时曝气以保证植物生长所需要的氧气。营养液每隔5 d更换1次。苋菜于6月种植,水培试验所在温室温度控制在 $(28 \pm 4)^\circ\text{C}$,温室光照充足,苋菜生长3个月后进入成熟期并开始收获,地上部与地下部分别采收、洗净,再用去离子水清洗3遍后自然晾干。称量各部分鲜质量,切碎放入控温烘箱中于 105°C 条件下杀青0.5 h,然后在 $(60 \pm 5)^\circ\text{C}$ 条件下烘干,称量干质量,研磨粉碎后过0.25 mm孔径筛,装入密封塑料袋备用。

1.2 样品处理与测定

过筛后的样品用干灰化消解法处理后滤液待测。用火焰分光光度计(岛津原子吸收分光光度计

AA-7000F)测定待测液中重金属Zn、Cu、Ni、Cr、Pb和Cd含量。为验证测定结果的准确性,在每次批量消解中插入植物标准样品。在测定供试样品之前,通过以下方法保证测试结果的准确性:(1)用标准方法多次平行测定来自中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所分析质量监控站制备的植物标准样品GBW07602(GSV-1),直到测定结果符合标准样品保证值,从而确保测试条件及结果的准确性;(2)在进行批量样品测定时,每测定10~15个样品时测定上述植物标准样品或定标所用的标准浓度液来检测仪器的稳定性和测试结果的准确性,当测定值超过相对偏差时,需用去离子水清洗仪器一段时间,再重新测定标准物质或质控样品,直到符合要求为止;(3)在测量一批样品时,随机抽取10%~20%样品进行平行测定,以确保测定仪器的稳定性。在测定苋菜中重金属含量及苋菜对重金属的转移系数时,苋菜质量以鲜质量计。

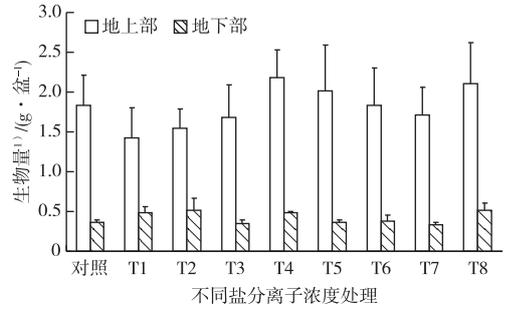
1.3 数据处理与统计分析

数据处理采用 Excel 2003 软件。采用 SPSS 16.0 软件进行单因素方差分析和多重比较, 采用 LSD 检验法进行差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 不同盐分离子浓度对苋菜生物量的影响

由图 1 可知, 随着盐分离子浓度的升高, 苋菜地上部生物量呈现先增大后降低的变化趋势, 而地下部生物量无明显变化。在低盐分离子浓度 (T4 ~ T7) 范围内, 随着盐分离子浓度的增大, 苋菜地上部生物量逐渐增大, 并在 T4 条件下达到最大; 而在高盐分离子浓度 (T1 ~ T3) 范围内, 随着盐分离子浓度的增大, 苋菜地上部生物量却逐渐降低。可见, 低盐分离子浓度促进苋菜的生长, 而高盐分离子浓度对苋菜生长具有一定抑制作用。



对照及 T1 ~ T8 处理的盐分离子浓度见表 1。1) 以干质量计。

图 1 不同盐分离子浓度对苋菜地上部与地下部生物量的影响

Fig. 1 Effects of concentrations of different salt ions on biomass of shoots and roots of amaranth

2.2 不同盐分离子浓度对苋菜吸收重金属的影响

不同盐分离子浓度对苋菜吸收 Cd 等 6 种重金属的影响见表 2。

表 2 不同盐分离子浓度对苋菜茎叶和根系中重金属含量的影响

Table 2 Effects of concentrations of different salt ions on contents of heavy metals in roots and shoots of amaranth

处理	Cd		Pb		Cr	
	茎叶	根系	茎叶	根系	茎叶	根系
对照	0.013 ± 0.007 ^c	0.041 ± 0.007 ^c	0.185 ± 0.028 ^a	0.355 ± 0.079 ^c	0.263 ± 0.055 ^a	0.297 ± 0.032 ^c
T1	0.032 ± 0.004 ^a	0.118 ± 0.024 ^a	0.172 ± 0.028 ^a	1.010 ± 0.378 ^a	0.227 ± 0.087 ^a	1.205 ± 0.236 ^a
T2	0.029 ± 0.005 ^a	0.094 ± 0.012 ^a	0.153 ± 0.023 ^a	0.942 ± 0.451 ^a	0.162 ± 0.043 ^a	0.883 ± 0.341 ^a
T3	0.031 ± 0.007 ^a	0.094 ± 0.017 ^a	0.180 ± 0.030 ^a	1.057 ± 0.238 ^a	0.212 ± 0.011 ^a	1.002 ± 0.387 ^a
T4	0.029 ± 0.005 ^a	0.087 ± 0.013 ^a	0.162 ± 0.018 ^a	0.848 ± 0.145 ^a	0.210 ± 0.047 ^a	0.907 ± 0.219 ^a
T5	0.028 ± 0.006 ^a	0.082 ± 0.021 ^a	0.198 ± 0.045 ^a	0.857 ± 0.298 ^a	0.234 ± 0.058 ^a	0.830 ± 0.231 ^a
T6	0.029 ± 0.004 ^a	0.106 ± 0.032 ^a	0.186 ± 0.043 ^a	0.792 ± 0.261 ^a	0.261 ± 0.031 ^a	0.928 ± 0.210 ^a
T7	0.023 ± 0.005 ^b	0.079 ± 0.020 ^{ab}	0.181 ± 0.029 ^a	0.597 ± 0.199 ^b	0.228 ± 0.064 ^a	0.870 ± 0.192 ^a
T8	0.022 ± 0.004 ^b	0.062 ± 0.009 ^b	0.168 ± 0.037 ^a	0.492 ± 0.083 ^b	0.218 ± 0.055 ^a	0.686 ± 0.189 ^b

处理	Ni		Zn		Cu	
	茎叶	根系	茎叶	根系	茎叶	根系
对照	0.398 ± 0.037 ^a	0.448 ± 0.221 ^b	14.679 ± 3.774 ^a	20.601 ± 3.219 ^a	2.692 ± 0.632 ^a	1.753 ± 0.305 ^b
T1	0.236 ± 0.054 ^a	0.993 ± 0.178 ^a	9.917 ± 1.283 ^a	17.464 ± 4.536 ^a	3.246 ± 0.903 ^a	2.773 ± 0.542 ^a
T2	0.233 ± 0.018 ^a	0.906 ± 0.214 ^a	8.610 ± 1.996 ^a	15.031 ± 4.673 ^a	2.814 ± 0.438 ^a	2.385 ± 0.632 ^a
T3	0.259 ± 0.047 ^a	1.104 ± 0.398 ^a	9.994 ± 1.874 ^a	16.959 ± 3.119 ^a	2.499 ± 0.536 ^a	2.665 ± 0.278 ^a
T4	0.244 ± 0.039 ^a	0.962 ± 0.421 ^a	8.981 ± 1.213 ^a	18.281 ± 4.287 ^a	2.445 ± 0.834 ^a	2.175 ± 0.467 ^a
T5	0.344 ± 0.027 ^a	1.008 ± 0.241 ^a	12.256 ± 2.418 ^a	17.696 ± 3.264 ^a	2.833 ± 0.539 ^a	2.177 ± 0.298 ^a
T6	0.373 ± 0.068 ^a	1.372 ± 0.378 ^a	12.637 ± 3.652 ^a	21.479 ± 4.825 ^a	2.834 ± 0.942 ^a	2.506 ± 0.503 ^a
T7	0.276 ± 0.049 ^a	1.470 ± 0.428 ^a	14.401 ± 3.985 ^a	23.721 ± 5.216 ^a	2.544 ± 0.683 ^a	2.380 ± 0.347 ^a
T8	0.465 ± 0.021 ^a	1.202 ± 0.263 ^a	12.483 ± 4.214 ^a	21.816 ± 4.529 ^a	2.524 ± 0.734 ^a	1.871 ± 0.432 ^b

对照及 T1 ~ T8 处理的盐分离子浓度见表 1。同一列英文小写字母不同表示处理间某指标在 $\alpha = 0.05$ 水平上差异显著。

2.2.1 对 Cd 的吸收

由表 2 可知, 对照苋菜茎叶中 Cd 含量为 0.013 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 而 T1 ~ T8 处理 Cd 含量比对照增加 69.2% ~ 146.2%。与对照相比, T1 ~ T8 处理显著增强苋菜茎叶对重金属 Cd 的吸收, 且呈显著正相关 ($r = 0.816, n = 9, P < 0.01$); 对照苋菜根系中 Cd 含量为 0.041 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, T1 ~ T8 处理比对照增加

51.2% ~ 187.8%。T1 ~ T8 处理显著增强苋菜根系对 Cd 的吸收, 且呈显著正相关 ($r = 0.841, n = 9, P < 0.01$)。与对照相比, 盐分离子的加入虽然显著增强苋菜茎叶和根系对 Cd 的吸收, 但 T1 ~ T6 处理间苋菜对 Cd 的吸收无显著差异。对照苋菜茎叶和根系对 Cd 的吸收总量为 0.054 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, T1 ~ T8 处理比对照增加 55.6% ~ 177.8%。盐分处理增强

了莧菜对 Cd 的吸收。由此可见,外加盐分显著影响莧菜茎叶和根系对 Cd 的吸收。

2.2.2 对 Pb 和 Cr 的吸收

由表 2 可知,所有对照与处理之间莧菜茎叶 Pb 和 Cr 含量均无显著差异。可见,盐分处理对莧菜茎叶吸收 Pb 和 Cr 的影响不大。对照莧菜根系 Pb 含量为 $0.355 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,各盐分处理比对照增加 $38.6\% \sim 197.7\%$ 。T1 ~ T8 处理显著增强莧菜根系对 Pb 的吸收,且呈显著正相关($r = 0.882, n = 9, P < 0.01$)。对照莧菜根系 Cr 含量为 $0.297 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,各盐分处理比对照增加 $131.0\% \sim 305.7\%$ 。T1 ~ T8 处理显著增强莧菜根系对 Cr 的吸收,且呈极显著正相关($r = 0.823, n = 9, P < 0.01$)。由表 2 还可知,与 Cd 类似,在相对较高盐分浓度(T1 ~ T7)条件下各盐分处理间莧菜根系 Cr 含量无显著差异,在相对较高盐分浓度(T1 ~ T6)条件下各盐分处理间莧菜根系 Pb 含量也无显著差异。对照莧菜茎叶和根系对 Pb 的吸收总量为 $0.540 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,各盐分处理比对照增加 $22.2\% \sim 129.1\%$ 。对照莧菜对 Cr 的吸收总量为 $0.560 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,各盐分处理比对照增加 $61.4\% \sim 155.7\%$ 。由此可见,随着盐分离子浓度的增加,莧菜根系对 Pb 和 Cr 的吸收均显著增强,而盐分处理对莧菜茎叶吸收 Pb 和 Cr 的影响不大。各盐分处理莧菜对 Pb 和 Cr 的吸收累积特征相似。

2.2.3 对 Ni 的吸收

由表 2 可知,所有对照和盐分处理莧菜茎叶 Ni 含量无显著差异。各盐分处理莧菜根系 Ni 含量显著高于对照。对照莧菜根系 Ni 含量为 $0.448 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,各盐分处理比对照增加 $102.2\% \sim 228.1\%$ 。盐分处理显著增强莧菜根系对 Ni 的吸收,但 T1 ~ T8 处理间根系 Ni 含量均无显著差异。从整个植株来看,盐分处理增强了莧菜对 Ni 的吸收,增幅为 $34.6\% \sim 106.4\%$ 。与对照相比,盐分处理虽然增强了莧菜对 Ni 的吸收,但随着盐分离子浓度的升高,莧菜植株 Ni 含量反而降低,盐分离子浓度与莧菜植株 Ni 含量之间呈显著负相关($r = -0.748, n = 8, P < 0.05$)。这表明加入盐分虽然可以增强莧菜对 Ni 的吸收,但是随着外加盐分离子浓度的升高,莧菜对 Ni 的吸收表现出一定的排斥作用。

2.2.4 对 Zn 和 Cu 的吸收

由表 2 可知,外加盐分对莧菜茎叶和根系 Zn 含量未产生显著影响。所有对照与盐分处理间莧菜茎叶 Cu 含量无显著差异。对照莧菜根系 Cu 含量为 $1.753 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,各盐分处理 Cu 含量比对照增

加 $6.7\% \sim 58.2\%$ 。盐分处理显著增强了莧菜根系对 Cu 的吸收。盐分浓度与莧菜根系 Cu 含量之间呈显著正相关($r = 0.809, n = 9, P < 0.01$)。盐分离子浓度的升高促进了莧菜根系对 Cu 的吸收,但 T1 ~ T7 处理间莧菜根系对 Cu 的吸收无显著差异。

由此可见,随着盐分离子浓度的增加,虽然盐分对莧菜茎叶吸收 Cu 的影响远远小于对根系的影响,但对照和各盐分处理(T3 除外)莧菜茎叶 Cu 含量都大于根系。Cu 是该试验中唯一一种莧菜根系中含量小于茎叶中含量的重金属,表明相对于其他重金属,莧菜对 Cu 的转运能力较强。

2.3 不同盐分离子浓度对莧菜吸收转运重金属的影响

由表 3 可知,与对照相比,盐分处理显著降低莧菜对 Pb、Cr、Ni、Cu 的转移系数(茎叶重金属含量/根系重金属含量),表明盐分处理抑制 Pb、Cr、Ni 和 Cu 向莧菜茎叶的转移。各盐分处理 Pb 和 Cr 的转移系数均随盐分离子浓度的升高而降低,转移系数与盐分离子浓度之间呈显著负相关(r 分别为 -0.840 和 $-0.880, n = 8, P < 0.01$)。所有对照和盐分处理之间 Cd 和 Zn 的转移系数均无显著差异,表明盐分处理对莧菜转移 Cd 和 Zn 的能力影响不大。由表 3 还可知,各盐分处理莧菜对不同重金属的转运能力大小大体依次为 Cu、Zn、Cd、Ni、Cr 和 Pb。而对照莧菜对不同重金属的转运能力除 Cu 仍为最大以外,对其他重金属的转移能力与盐分处理相比显示出较大差异,表明在盐分影响下,莧菜对不同重金属的转运能力发生了变化。

表 3 不同盐分离子浓度处理莧菜对重金属的转移系数

Table 3 Effects of concentrations of different salt ions on translocation coefficient of heavy metals in amaranth

处理	对各重金属的转移系数					
	Cd	Pb	Cr	Zn	Ni	Cu
对照	0.325 ^a	0.521 ^c	0.885 ^c	0.713 ^a	0.888 ^b	1.536 ^b
T1	0.269 ^a	0.170 ^a	0.189 ^a	0.568 ^a	0.238 ^a	1.171 ^a
T2	0.306 ^a	0.162 ^a	0.184 ^a	0.573 ^a	0.258 ^a	1.180 ^a
T3	0.327 ^a	0.170 ^a	0.212 ^a	0.589 ^a	0.235 ^a	0.938 ^a
T4	0.337 ^a	0.191 ^a	0.231 ^a	0.491 ^a	0.253 ^a	1.124 ^a
T5	0.343 ^a	0.231 ^a	0.282 ^b	0.693 ^a	0.341 ^a	1.302 ^a
T6	0.275 ^a	0.235 ^a	0.281 ^b	0.588 ^a	0.272 ^a	1.131 ^a
T7	0.291 ^a	0.302 ^b	0.262 ^b	0.607 ^a	0.188 ^a	1.069 ^a
T8	0.359 ^a	0.342 ^b	0.318 ^b	0.572 ^a	0.387 ^a	1.349 ^a

对照及 T1 ~ T8 处理的盐分离子浓度见表 1。同一列英文小写字母不同表示处理间某指标在 $\alpha = 0.05$ 水平上差异显著。

Cu 的平均转移系数为 1.200(0.938 ~ 1.536), 分别为 Zn 的 2 倍、Ni 的 3.5 倍、Cd 和 Cr 的 3.8 倍、

Pb 的 4.7 倍。对照苋菜的总重金属转移系数(茎叶中 6 种重金属总量/根系中 6 种重金属总量)为 0.776, T1 ~ T8 处理分别为 0.587、0.593、0.576、0.519、0.702、0.600、0.606 和 0.608, 比对照降低 9.5% ~ 33.1%, 但盐分离子浓度与苋菜总重金属转移系数之间相关不显著($P > 0.05$)。可见, 在多种盐分离子影响下, 苋菜对重金属的转运能力变弱, 盐分抑制了重金属从根系向茎叶的转运。

3 讨论

3.1 盐分离子对苋菜吸收重金属的影响机理

溶液中重金属主要以自由离子态和络合态^{[13][56][14]}形式存在。在溶液中存在配位体时重金属离子与配位体络合, 呈正价、负价或零价, 从而增强重金属的移动性^{[13][56]}。易与重金属发生络合反应的无机阴离子主要包括 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 PO_4^{3-} 、 NO_3^- 和 CO_3^{2-} ^[5]。

土壤溶液中 Cl^- 的增加可以显著增强 Cd 的植物有效利用性^[15-16]。SMOLDERS 等^[6]研究表明, Cl^- 可以提高莴苣 (*Swiss chard*) 对 Cd 的吸收, 且 Cd 与 Cl^- 形成的络合物是可以被植物吸收的。WEGGLER 等^[15]研究表明, CdCl^+ 的活性与小麦和莴苣对 Cd 的吸收之间呈显著正相关, 而幼苗中 Cd 的增加与 Cd^{2+} 含量之间无显著相关性。USMAN 等^[14]研究表明, Cl^- 显著降低土壤溶液中 Cd^{2+} 的比例, 同时显著增加 CdCl^+ 的比例, 小麦对 Cd 的吸收与 CdCl^+ 含量之间呈显著正相关, 但是与 Cd^{2+} 含量之间相关不显著。由此可见, Cl^- 与 Cd 的络合物作为植物吸收形态或 Cd 的转运介质, 在促进植物吸收 Cd 方面起着主要作用^[15]。笔者试验中水培溶液中存在大量 Cl^- , 盐分处理下苋菜对 Cd 的吸收显著增强, 且随着 Cl^- 浓度的增加, 苋菜茎叶和根部 Cd 含量呈现递增趋势, 这是由于盐分处理下大量 Cl^- 与 Cd^{2+} 形成配位体从而增强了 Cd 的植物有效性所致, 此与前人的研究结果一致。WEGGLER 等^[16]研究表明, 与对照相比, 小麦 (*Triticum aestivum*) 茎叶中只有 Cd 含量有所增高, 而其他 5 种重金属含量均无显著变化, 这是因为 Cd 与 Cl^- 形成的络合物较其他重金属络合物更加稳定, 从而使其更易于被转移到地上部。IZZO 等^[17]研究表明, 随着 NaCl 浓度的增加, 玉米根系对 Cr、Ni、Pb 和 Cu 的吸收量增大, Cr、Ni、Pb 和 Cu 含量与 NaCl 浓度之间存在很好的相关性, 而 Zn 的吸收量变化则不明显, Cl^- 与 Cr、Ni、Pb 和 Cu 具有一定的络合作用。这与笔者试验结果有一定的相似性, 即苋菜根系中 Cr、Pb 和 Cu

含量均随着 NaCl 浓度的增加而增高; 而盐分对苋菜茎叶和根系中 Zn 含量的影响都不大, 这可能是由于 Zn 是植物必需的微量营养元素所致。

盐分溶液中 SO_4^{2-} 也会影响重金属的形态, 进而影响植物对重金属的吸收。LÓPEZ-CHUKEN 等^[9]研究表明, 玉米在含 Cd 营养液培养条件下, 外加的 SO_4^{2-} 会与 Cd^{2+} 形成配位体 CdSO_4^0 , CdSO_4^0 含量升高显著增强玉米对营养液中 Cd 的吸收。笔者试验中盐分溶液含有大量 SO_4^{2-} , 随着 SO_4^{2-} 浓度的升高, 苋菜茎叶和根系 Cd 含量均增高, 表明 SO_4^{2-} 与 Cd^{2+} 的络合作用增强了苋菜对 Cd 的吸收。

阳离子对植物吸收重金属也有一定影响。一般认为 Na^+ 对重金属离子的吸收竞争作用较弱, 但是大量 Na^+ 的存在会在一定程度上损害植物根部的代谢功能, 从而导致重金属吸收量的增加^[18]。很多研究表明, Ca^{2+} 可以通过与重金属离子竞争根系吸收位点来降低植物根系对重金属的吸收。在这种竞争吸收作用下, Ca^{2+} 可以降低玉米、黑麦草等的根系对重金属的吸收^[19-20]。然而, SEREGIN 等^[21]研究认为, 对大多数植物而言, Ca^{2+} 虽然可以降低其根系对重金属的吸收, 但是对苋菜而言, Ca^{2+} 的加入反而显著增强了其根系对 Pb 和 Ni 的吸收。苋菜的这种特性国内外尚无深入研究, 但有研究推测这可能是由于重金属通过以下 2 种途径进入植物根系质外体所致: (1) 重金属离子直接被根系细胞吸收至其自由空间, Ca^{2+} 通过与重金属离子竞争植物根系吸收位点来降低根系对重金属的吸收; (2) 重金属通过共质体进入质外体, 这个过程是依赖 Ca^{2+} 的, Ca^{2+} 的增加会增强植物对重金属的吸收^[21]。苋菜根系在 Ca^{2+} 作用下对重金属吸收的增强可能是由第 2 种途径所引起的。笔者对苋菜进行水培试验, 对照营养液中不施加 Ca^{2+} , 而盐分处理营养液中加入 Ca^{2+} , 与对照相比, 盐分处理苋菜根系重金属 (Zn 除外) 吸收量普遍显著增高, Ca^{2+} 增强了苋菜根系对重金属的吸收累积。

综上所述, 笔者试验中盐分阴离子和阳离子对促进苋菜吸收重金属起到了一定的协同作用。

3.2 盐分离子对苋菜转运重金属的影响机理

与对照相比, 盐分的加入降低了苋菜对 Pb、Cr、Ni 和 Cu 的转移系数。这可能是因为盐分离子浓度的增加对苋菜产生胁迫作用, 导致苋菜地上部的吸收抑制机制启动^[2]。同时, 由于苋菜含盐水培溶液的低水势会引起植物茎叶的水势降低, 从而导致苋菜气孔导度降低, 进而影响苋菜的蒸腾作用, 并最终抑制苋菜对重金属离子向地上部的转运^[22]。笔

者试验中盐分对 Cd 的转运系数无显著影响,这是因为盐分的加入同时促进苋菜茎叶和根系中 Cd 含量的增高,从而使 Cd 的转移系数未发生显著变化。同时,盐分对 Zn 的转移系数也无显著影响,这与 Zn 是植物必需的营养元素有关。

4 结论

(1)多种盐分离子的加入显著影响苋菜对重金属的吸收和累积。苋菜茎叶 Cd 的增幅为 69.2%~146.2%,在相对较高的盐分离子浓度($>1\ 312.4\ \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)范围内,不同盐分离子浓度处理间苋菜茎叶 Cd 的吸收量变化不大。盐分的加入未对苋菜茎叶中其他重金属的积累产生显著影响。盐分对苋菜根系 Zn 的吸收累积影响不大,而对根系 Cd、Pb、Cr、Ni 和 Cu 的累积产生显著影响。与对照相比,盐分处理下苋菜根系 Cd、Pb、Cr、Ni 和 Cu 含量的最大增幅分别为 187.8%、197.7%、305.7%、228.1% 和 58.2%,但在相对较高的盐分离子浓度($>1\ 312.4\ \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)范围内,不同盐分离子浓度处理间苋菜根系对 5 种重金属的吸收量无显著差异。

(2)与对照相比,所有盐分处理都显著降低苋菜对 Pb、Cr、Ni 和 Cu 的转移系数,但对 Cd 和 Zn 的转移系数无显著影响。盐分处理降低了苋菜的总重金属转移系数,降幅达 9.5%~33.1%。

参考文献:

[1] LI Qu-sheng, CAI Sha-sha, MO Ce-hui, *et al.* Toxic Effects of Heavy Metals and Their Accumulation in Vegetables Grown in a Saline Soil[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2010, 73 (1): 84–88.

[2] ZURAYK R A, KHOURY N F, TALHOUK S N, *et al.* Salinity-Heavy Metal Interactions in Four Salt-Tolerant Plant Species[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2001, 24(11): 1773–1786.

[3] FRITIOFF A, KAUTSKY L, GREGER M. Influence of Temperature and Salinity on Heavy Metal Uptake by Submersed Plants[J]. *Environmental Pollution*, 2005, 133(2): 265–274.

[4] SAYYAD G, AFYUNI M, MOUSAVI S F, *et al.* Transport of Cd, Cu, Pb and Zn in a Calcareous Soil Under Wheat and Safflower Cultivation: A Column Study[J]. *Geoderma*, 2010, 154(3): 311–320.

[5] SCHEFFER F, SCHACHTSCHABEL P. *Lehrbuch der Bodenkunde* [J]. *Anzeiger für Schädlingkunde*, 2002, 44(3): 46.

[6] SMOLDERS E, MCLAUGHLIN M J. Chloride Increases Cadmium Uptake in Swiss Chard in a Resin-Buffered Nutrient Solution[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1996, 60 (20): 1443–1447.

[7] GHALLAB A, USMAN A R A. Effect of Sodium Chloride-Induced Salinity on Phyto-Availability and Speciation of Cd in Soil Solution [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2007, 185(4): 43–51.

[8] LOPEZ-CHUKEN U J, YOUNG S D, SANCHEZ-GONZALEZ M N. The Use of Chloro-Complexation to Enhance Cadmium Uptake by *Zea mays* and *Brassica juncea*: Testing a “Free Ion Activity Model” and Implications for Phytoremediation[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2010, 12(7): 680–696.

[9] LÓPEZ-CHUKEN U J, YOUNG S D. Modelling Sulphate-Enhanced Cadmium Uptake by *Zea mays* From Nutrient Solution Under Conditions of Constant Free Cd^{2+} Ion Activity[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2010, 22(7): 1080–1085.

[10] TAN Wan-neng, LI Zhi-an, QIU Jing, *et al.* Lime and Phosphate Could Reduce Cadmium Uptake by Five Vegetables Commonly Grown in South China[J]. *Pedosphere*, 2011, 21(2): 223–229.

[11] 刘亚男, 李取生, 杜焯峰, 等. 滩涂土壤淋洗过程中盐分变化及其对重金属的影响[J]. *环境科学*, 2011, 32(7): 231–235.

[12] HOAGLAND D R, ARNON D I. *The Water-Culture Method for Growing Plants Without Soil* [M]. Berkeley, USA: University of California, 1938: 1–39.

[13] MCLEAN J E, BLEDSOE B E. *Behavior of Metals in Soils* [M]. Washington DC, USA: Environmental Protection Agency, 1992: 56.

[14] USMAN A R A, KUZUYAKOV Y, STAHR K. Effect of Immobilizing Substances and Salinity on Heavy Metals Availability to Wheat Grown on Sewage Sludge-Contaminated Soil[J]. *Soil and Sediment Contamination*, 2005, 14(4): 329–344.

[15] WEGGLER K, MCLAUGHLIN M J, GRAHAM R D. Salinity Increases Cadmium Uptake by Wheat and Swiss Chard From Soil Amended With Biosolids [J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2000, 38(1): 37–45.

[16] WEGGLER K, MCLAUGHLIN M J, GRAHAM R D. Effect of Chloride in Soil Solution on the Plant Availability of Biosolid-Borne Cadmium [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2004, 33(2): 496–504.

[17] IZZO R, NAVARI I F, QUARTACCI M F. Growth and Mineral Absorption in Maize Seedlings as Affected by Increasing NaCl Concentrations [J]. *Journal of Plant Nutrition*, 1991, 14(2): 687–699.

[18] HELAL H M, HAQUE S A, RAMADAN A B, *et al.* Salinity-Heavy Metal Interactions as Evaluated by Soil Extraction and Plant Analysis[J]. *Soil Science and Plant Analysis*, 1996, 27(6): 1355–1361.

[19] 周卫, 汪洪, 林葆. 镉胁迫下钙对镉在玉米细胞中分布及对叶绿体结构与酶活性的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 1999, 5(4): 335–340.

[20] JARVIS S C, JONES H P, HOPPER M J. Cadmium Uptake Form Solution by Plants and Its Transport From Roots to Shoots [J]. *Plant and Soil*, 1976, 44(1): 179–191.

[21] SEREGIN I V, KOZHEVNIKOVA A D. Enhancement of Nickel and Lead Accumulation and Their Toxic Growth-Inhibitory Effects on Amaranth Seedlings in the Presence of Calcium [J]. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2009, 5(1): 92–96.

[22] 李彦, 张英鹏, 孙明, 等. 盐分胁迫对植物的影响及植物耐盐机理研究进展[J]. *中国农学通报*, 2008, 24(1): 258–265.

作者简介: 张乾坤(1985—), 男, 山西运城人, 硕士生, 主要研究方向为环境生态与土壤环境。E-mail: zqk0824@163.com