

重金属离子胁迫对费菜生理生化指标的影响

周晓慧, 袁红艳, 吴阳清, 陆小平

(苏州大学 金螳螂建筑与城市环境学院, 江苏 苏州 215123)

摘要:以景天科植物费菜为试材,采用人工水培技术,测定了 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 和 Zn^{2+} 在费菜体内的转运和富集水平,以期为污染环境的植物修复提供理论依据。结果表明:费菜对水体中的重金属有较强的富集能力,当 Cu^{2+} 的处理浓度大于 $240 \mu\text{mol/L}$ 时,铜的富集量达到了铜超富集植物水平;同样,当 Pb^{2+} 浓度 $>960 \mu\text{mol/L}$ 时,地上部 Pb^{2+} 含量出现饱和,约为 730 mg/kg ,但地下部分 Pb^{2+} 富集量一直处于增加,达到 $9\ 600\sim 16\ 000 \text{ mg/kg}$,当 Zn^{2+} 浓度 $>1\ 500 \text{ mg/kg}$ 时,地上部分 Zn^{2+} 含量出现饱和,但地下部分 Zn^{2+} 富集量一直处于增加状态。

关键词:费菜;重金属离子;铜;铅;锌;生理响应

中图分类号:S 567.23⁺7 **文献标识码:**B **文章编号:**1001-0009(2013)21-0039-03

近年来,选用超富集植物修复重金属污染土壤成为植物修复的热点,超富集植物是植物修复的关键材料^[1]。但超富集植物通常存在植株矮小、生长缓慢、生物量低、周期长等缺点,并且,已发现的超富集植物大多仅对 1~2 种重金属的耐性和富集能力较强,用于植物修复的效率不高。因此,筛选一些生物量大、生长速度快、适于刈割,抗逆性强、地上部分有高的重金属富集量等特点的广谱性耐性植物用于植物修复具有较大的应用价值和开发潜力^[2-3]。人们在致力于寻找新的超富集植物的同时,对于具有高生物量的重金属耐(抗)性植物亦产生了浓厚的兴趣。大量研究表明,许多景天科植物对重金属有很好的耐性,其对重金属耐性能力大小成为其是否能够用于重金属污染土壤的决定因素之一^[4]。该试验的研究材料费菜是景天科多年生草本植物,具有良好的药用、食用和观赏价值。该植物具有生长旺盛、适于刈割、抗逆性强等优点^[5]。为了探讨景天科植物费菜对重金属的耐性,试验在单一重金属(Pb、Cu 或 Zn)胁迫下,对费菜的生理生化特性和吸收积累特性进行了初步研究,以期探讨费菜抗逆性及其富集重金属能力的大小,为费菜能否作为污染土壤的修复植物提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试材料为采自苏州大学金螳螂建筑与城市环境学院园艺实习基地生长良好、长势基本一致的费菜。

第一作者简介:周晓慧(1988-),女,硕士研究生,研究方向为园林植物栽培与生理。E-mail: zxsjzgc@163.com.

责任作者:陆小平(1958-),男,博士,教授,研究方向为园林植物栽培与生理。E-mail: szlpxp@yahoo.com.cn.

收稿日期:2013-06-19

1.2 试验方法

按 Hoagland^[6]法进行完全营养液水培,营养液预培养 15 d 后,用 80 、 160 、 240 、 320 、 $400 \mu\text{mol/L}$ 浓度的 Cu^{2+} ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), 240 、 480 、 960 、 $1\ 450$ 、 $1\ 630 \mu\text{mol/L}$ 浓度的 Pb^{2+} ($\text{Pb}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), 250 、 500 、 $1\ 000$ 、 $1\ 500$ 、 $2\ 000 \mu\text{mol/L}$ 浓度的 Zn^{2+} ($\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) 处理,以不做任何处理为对照,每处理 3 次重复,每重复 3 株苗,用 0.1 mol/L NaOH 或 0.1 mol/L HCl 调节营养液 pH 至 5.5 左右,每 4 d 更换 1 次营养液,生长期观察植物的长势和症状表现,处理 22 d 后测定重金属含量。

1.3 项目测定

测定方法参考 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ 湿法消化法^[7],采样后用自来水把根系反复冲洗干净后,用 20 mmol/L $\text{Na}_2\text{-EDTA}$ 交换 15 min,去除表面吸附的重金属离子,最后用去离子水冲洗干净,吸干表面水分,将根、茎叶分开,置于 105°C 下的烘箱中烘干至恒重,干燥样品粉碎后,称取 0.1 g (精确至 0.0001 g) 样品,置于消化瓶中加入 5 mL HNO_3 加盖后置通风柜中过夜,次日再加 4 mL HNO_3 和 1 mL 高氯酸(HClO_4)置于多功能消化器中消解,消解温度为 180°C ,消解时间 8 h 左右。至消化液呈清亮的无色或淡黄色,稍冷却后,用双蒸水定容至 25 mL 。重金属测定由苏州大学测试中心进行电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-AES)分析。

1.4 数据分析

采用 Excel 2007 和 SPSS 11.5 统计软件进行数据处理及统计分析。

2 结果与分析

2.1 铜胁迫对费菜吸收和积累重金属含量的影响

由表 1 可知,费菜对铜的富集量随着重金属处理浓

度的加大而增加,当铜离子的浓度大于 $240 \mu\text{mol/L}$ 时,铜的富集量达到了土壤铜污染的超富集植物水平。经方差分析,各处理组地上部 Cu^{2+} 富集量差异极显著 ($P<0.01$)。但是铜在费菜根系的富集量远远超过其在地上部分的富集量, Cu^{2+} 为 $400 \mu\text{mol/L}$ 时的富集量显著高于其它各组的富集量。说明高浓度铜对植物根系产生了毒害,尤其是对根系细胞膜的伤害,根系对铜的主动吸收能力减弱,而铜以被动的过程进入植物体内,根系中铜含量急剧增加,向地上部分的运输量也增加。而转运系数随着重金属浓度的增加大体上呈降低的趋势, Cu^{2+} 为 $400 \mu\text{mol/L}$ 时的转运系数降低程度尤为显著,表明费菜随着铜胁迫程度的加重由根部转运到地上部分的能力逐渐减弱。

将费菜各部分铜富集量与 Cu^{2+} 浓度作回归分析,由表 2 可知,地上部分铜的富集量和 Cu^{2+} 浓度存在明显线性正相关。而根系铜的富集量和 Cu^{2+} 浓度相关性较小。

表 1 铜在费菜植物体内的分配

| 浓度 / $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ | 地上部 Cu^{2+} 富集量 / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ | 地下部 Cu^{2+} 富集量 / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ | 转运系数 |
|---|--|--|-------|
| 0(CK) | 5.9F | 30.7Bc | 0.192 |
| 80 | 34.7E | 154.1Bc | 0.225 |
| 160 | 46.0D | 317.1Bbc | 0.145 |
| 240 | 111.5C | 709.5Bbc | 0.157 |
| 320 | 139.4B | 1 048.3Bb | 0.133 |
| 400 | 308.9A | 4 274.5Aa | 0.072 |

表 2 费菜各部分铜富集量 (Y) 与 Cu^{2+} 浓度 (X) 的相关性

| 铜富集量 | 回归方程 | 相关系数 | P 值 |
|------|-----------------------|----------|---------|
| 地上部分 | $Y=6.766X-275.952$ | 0.917 * | <0.05 |
| 地下部分 | $Y=86.764X-6 462.524$ | 0.809 ** | >0.05 |

2.2 铅胁迫对费菜吸收和积累重金属含量的影响

由表 3 可以看出,根系内 Pb^{2+} 含量随着 Pb^{2+} 浓度的增加而增加,当 Pb^{2+} 浓度 $\leq 960 \mu\text{mol/L}$ 时,地上部 Pb^{2+} 含量随着 Pb^{2+} 浓度的增加而增加。当 Pb^{2+} 浓度 $> 960 \mu\text{mol/L}$ 时,地上部分 Pb^{2+} 含量出现饱和,但地下部分 Pb^{2+} 富集量达到 $9 600 \sim 16 000 \text{ mg/kg}$ 。表明 Pb^{2+} 在植物体内的运输受到了阻碍,从而使地上部分免遭伤害,一定程度上提高了植物耐性。这种机制符合 Baker 等^[8]学者认为的排斥机制,也可能是费菜具有一定抗铅能力的原因之一。另外 Pb^{2+} 的转运系数随着重金属浓度的升高先增后降, Pb^{2+} 浓度为 $480 \mu\text{mol/L}$ 达到最大值。表明 Pb^{2+} 浓度大于 $480 \mu\text{mol/L}$ 后,重金属由地下部分转运到地上部分的能力减弱。

经方差分析, Pb^{2+} 浓度 $> 960 \mu\text{mol/L}$ 时,与 Pb^{2+} 浓度 $< 960 \mu\text{mol/L}$ 的各组间差异显著。将费菜各部分铅富集量与 Pb^{2+} 浓度作回归分析,由表 4 可知,根系铅的富集量和 Pb^{2+} 浓度存在明显线性正相关。而地上部分

表 3 铅在费菜植物体内的分配

| 浓度 / $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ | 地上部 Pb^{2+} 富集量 / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ | 地下部 Pb^{2+} 富集量 / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ | 转运系数 |
|---|--|--|-------|
| 0(CK) | 1.7D | 71.6F | 0.024 |
| 240 | 378.6C | 4 125.8E | 0.092 |
| 480 | 588.5B | 5 603.6D | 0.105 |
| 960 | 758.8A | 9 634.3C | 0.079 |
| 1 450 | 714.3A | 12 555.0B | 0.057 |
| 1 630 | 731.0A | 15 933.0A a | 0.046 |

表 4 费菜各部分铅富集量 (Y) 与 Pb^{2+} 浓度 (X) 的相关性

| 铅富集量 | 回归方程 | 相关系数 | P 值 |
|------|-----------------------|----------|---------|
| 地上部分 | $Y=3.703X+2 350.741$ | 0.834 * | <0.05 |
| 地下部分 | $Y=87.039X+10 821.57$ | 0.989 ** | <0.01 |

铅富集量与 Pb^{2+} 浓度相关性不显著。在高铅处理水平 ($> 960 \mu\text{mol/L}$),地上部分铅含量并没有增加而是有所下降,这可能是一种保护机制,使其叶片免受高浓度铅胁迫。

2.3 锌胁迫对费菜吸收和积累重金属含量的影响

由表 5 可知,费菜根系对锌的富集量随着重金属处理浓度的加大而增加,而地上部分锌的富集量与 Zn^{2+} 浓度无显著相关性。 Zn^{2+} 浓度为 $1 500 \mu\text{mol/L}$ 时的地上部 Zn^{2+} 富集量显著高于其它各组,经方差分析,此处理浓度的 Zn^{2+} 地上部分富集量与其它各处理组间差异极显著 ($P<0.01$)。 Zn^{2+} 在费菜根系的富集量远远超过其在地上部分的富集量。转运系数随着重金属浓度的增加而降低,表明费菜随着胁迫程度的加重由根部转运到地上部分的能力逐渐减弱。

将费菜各部分锌富集量与 Zn^{2+} 浓度作回归分析,由表 6 可以看出,根系锌的富集量和 Zn^{2+} 浓度存在明显线性正相关;而地上部分锌富集量与 Zn^{2+} 浓度相关性极不显著。

表 5 锌在费菜植物体内的分配

| 浓度 / $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ | 地上部 Zn^{2+} 富集量 / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ | 地下部 Zn^{2+} 富集量 / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ | 转运系数 |
|---|--|--|-------|
| 0(CK) | 30.6E | 71.6F | 0.428 |
| 250 | 447.5D | 886.3E | 0.505 |
| 500 | 591.3B | 1 701.3D | 0.348 |
| 1 000 | 553.8C | 2 348.8C | 0.236 |
| 1 500 | 637.5A | 2 566.3B | 0.248 |
| 2 000 | 602.5B | 3 643.8A | 0.165 |

表 6 费菜各部分锌富集量 (Y) 与 Zn^{2+} 浓度 (X) 的相关性

| 锌富集量 | 回归方程 | 相关系数 | P 值 |
|------|-----------------------|----------|---------|
| 地上部分 | $Y=2.079X+2 952.663$ | 0.702 | >0.05 |
| 地下部分 | $Y=15.974X+4 719.712$ | 0.968 ** | <0.01 |

虽然根系中的重金属增加,而地上部分 Zn^{2+} 富集量却不随着增加,并且 Zn^{2+} 转运系数不断降低。可能是因为锌是植物生长的必需元素,主要以代谢性的主动吸收进入植物根内,需要离子载体,而离子载体是代谢产物,

在一定条件下其数量是一定的。当 Zn^{2+} 浓度增加到一定量时,离子载体饱和,因此,转运到地上部分的 Zn^{2+} 不会增加。

3 讨论

转运系数代表茎叶中重金属含量/根部重金属含量的比值。运用转运系数可评价植物对重金属由根系转运到地上部分的能力,转运系数越大说明植物从地下部分向地上部分运移重金属的能力越强。一般认为,超积累植物其转运系数都应该大于 1。但是在该试验中其转运系数都小于 1,不符合超积累植物的标准,但是铜在地上部分的富集量达到了铜超积累植物的标准 1 000 mg/kg。此外,费菜还有抗逆性强、生物量大、适于刈割等许多超富集植物不具备的优点。所以认为,费菜在铜污染的土壤中进行植物修复具有较高的应用价值。

环境中的重金属铅进入植物的过程,主要是非代谢性的被动吸收入植物根内。根细胞内的重金属铅大部分滞留在根内,这是因为细胞壁是重金属进入细胞内的第一道屏障,当重金属由植物根系进入时,由于细胞壁上存在重金属的结合位点,所以它们在细胞壁上沉积下来,减少了进入细胞内的重金属,降低了重金属对细胞内部结构的伤害^[9]。铅在根系主要以磷酸铅和碳酸铅等沉淀形式存在,铅经过在植物根细胞内沉积,减少了向地上部分的运输,减轻重金属对地上部分的毒害^[10]。试验中发现,容器底附着的黏滑状褐色沉淀。当 Pb^{2+} 浓度越高,容器底附着的黏滑状褐色沉淀越多。这可能是植物在对重金属 Pb^{2+} 胁迫下的一种自我保护机

制,通过根系分泌物螯合、吸附以及包裹 Pb^{2+} ,使其在根外沉淀下来,有效地降低了 Pb^{2+} 对植物的毒害作用。另外,经不同浓度铅离子处理后,费菜的地下部分富集量是地上部分的 10~20 倍,即铅进入植物体内后绝大部分累积在根部,其原因是铅在根系主要以磷酸铅和碳酸铅等沉淀形式存在,在植物汁液中也有离子态和络合态铅,由于吸持、钝化或沉淀作用,植物根系所吸收的铅向地上部运输较困难。

参考文献

- [1] 彭红云,杨肖娥. 香薷植物修复铜污染土壤的研究进展[J]. 水土保持学报,2005,19(5):195-199.
- [2] 龙新宪,倪吾钟,杨肖娥. 超积累生态型东南景天吸收锌的特性[J]. 生态学报,2006,26(2):334-340.
- [3] Yang X E, Long X X, Ni W Z, et al. Zinc tolerance and hyperaccumulation in a new ecotype of *Sedum alfredii* Hance[J]. Acta Phytocologica Sinica, 2001, 25: 665-672.
- [4] Long X X, Yang X E, Ye Z Q, et al. Study of the differences of uptake and accumulation of zinc in four species of *Sedum* Linn[J]. Acta Bot Sin, 2002, 44: 152-157.
- [5] 袁红艳,刘嘉琦,陆小平. 铅胁迫对费菜叶绿素含量及抗氧化酶活性的影响[J]. 安徽农业科学,2010,38(23):12445-12447.
- [6] 盖博格 O L, 韦特 L R. 植物组织培养方法[M]. 北京:科学出版社,1980:129.
- [7] 王小平,高伟健,项苏留. 植物样品消解后残留颗粒物元素组成研究[J]. 光谱学与光谱分析,2006,26(2):348-352.
- [8] Baker A J M. Accumulators and excluders strategies in the response of plants to heavy metals[J]. Journal of Plant Nutrition, 1981(8): 643-645.
- [9] 唐东民,伍钧,唐勇,等. 重金属胁迫对植物的毒害及其抗性机理研究进展[J]. 四川环境,2008,27(5):79-82.
- [10] 刘俊祥,孙振元,韩蕾,等. 草坪草对重金属胁迫响应的研究现状[J]. 中国农学通报,2009,25(13):142-145.

Effects of Heavy Metals Stress on Physiological Responses of *Sedum aizoon* L.

ZHOU Xiao-hui, YUAN Hong-yan, WU Yang-qing, LU Xiao-ping

(Gold Mantis School of Architecture and Urban Environment, Soochow University, Soochow, Jiangsu 215123)

Abstract: Taking *Sedum aizoon* of Crassulaceae cultured by artificial hydroponic technology as materials, the level of Cu^{2+} , Pb^{2+} and Zn^{2+} transportation and accumulation in aizoon were determined, in order to provide new plant material for repairing polluted environment. The results showed that aizoon had a stronger ability of accumulating heavy metals in polluted waters. When Cu^{2+} concentration was more than 240 $\mu\text{mol/L}$, the enrichment ability of copper had reached to the level of hyper accumulation-plant did. Similarly, when Pb^{2+} concentration was more than 960 $\mu\text{mol/L}$, the aboveground part saturated, and the concentration was about 730 mg/kg. However, the Pb^{2+} concentration of underground part was increasing on the way, and the concentration was 9 600~16 000 mg/kg. When Zn^{2+} was more than 1 500 mg/kg, the aboveground part saturated, but underground part was in a state of increasing.

Key words: *Sedum aizoon* L.; heavy metal ions; Cu^{2+} ; Pb^{2+} ; Zn^{2+} ; physiological response