

重金属 Zn Cu 对香根草生理生化指标的影响 及其积累特性研究

努扎艾提·艾比布^{1,2}, 刘云国¹, 宋华晓¹, 徐立¹, 陈贝贝¹

(1.湖南大学环境科学与工程学院, 湖南 长沙 410082; 2.新疆师范大学生命科学与化学学院, 新疆 乌鲁木齐 830053)

摘 要:采用水培方法,研究了不同浓度 Zn、Cu 对香根草生物量、含水量、叶绿素、MDA、可溶性蛋白质含量、根系活力以及 Zn、Cu 在香根草体内的积累和分布的影响。结果表明,低浓度的 Zn、Cu 刺激了香根草的生长,提高了香根草的生物量、含水量、叶绿素含量以及根系活力;高浓度的 Zn、Cu 使香根草生物量、含水量、叶绿素、可溶性蛋白质含量和根系活力均不同程度地下降,MDA 含量增加;香根草根系中积累的重金属含量随处理浓度的增加逐渐增加,当处理浓度为 $60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,根系干重富集的 Zn、Cu 分别达到 2 581 和 6 528 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。两种重金属在香根草植株内的分布主要以根部积累为主,地上部积累的重金属含量极少。

关键词:香根草; Zn; Cu; 生理生化指标; 重金属积累特性

中图分类号: X503.233 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2010)01-0054-06

Effects of Zn and Cu on Physiological and Biochemical Processes and Their Accumulation Characteristics of Vetiver

NUZA'AITI·Aibibu^{1,2}, LIU Yun-guo¹, SONG Hua-xiao¹, XU li¹, CHEN Bei-bei¹

(1.College of Environmental Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 2.College of Life Science and Chemistry, Xinjiang Normal University, Urumqi 830053, China)

Abstract: Vetiver was grown in hydroponic conditions to investigate the effect of Zn and Cu on growth, water content, leaf chlorophyll concentration, malondialdehyde (MDA), soluble protein, root activity and metal accumulation. Results indicated that low level of Zn and Cu could significantly increase the biomass, water content, chlorophyll content and root activity. The treatment of vetiver with high level of Zn and Cu induced decrease in biomass, water content, chlorophyll, soluble protein content, root activity along with enhanced MDA content. The heavy metal contents in roots of vetiver increased with increasing solution concentration of Zn and Cu. The roots in plants exposed to $60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Zn and Cu accumulated 2 581 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ of Zn and 6 528 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ of Cu. Plants transported only a small amount of Zn and Cu to their shoots and leaves and concentrations in these tissues were low.

Keywords: vetiver; Zn; Cu; physiological and biochemical processes; accumulation characteristics

重金属不能被生物所降解,且能通过食物链在生物体内不断富集,生态危险性高。土壤中重金属污染的危害主要表现在降低土壤肥力,降低作物产量与品质,恶化水环境等方面^[1]。因此重金属污染土壤的修复是生态环境保护所面临的重大课题。在污染区种植耐

性植物,特别是非食用性的耐性植物是较为有效的植被恢复措施。

锌(Zn)和铜(Cu)是植物生长的必要元素,在正常生长情况下,植物对 Zn 和 Cu 的吸收主要是受代谢控制的主动吸收过程。无论作为必需元素或非必需元素,Zn 和 Cu 超过某一数值时,都会对植物产生负作用,轻则使植物体内的代谢紊乱,生长发育受阻,重则导致植物死亡^[2-3]。而有些植物,体内具有某些特定的生理机制,使植物能生存于高含量的重金属中而不受损害,这种特性就是植物的耐受性^[2-4]。香根草(*V. zizanioides* Nash)是一种适应性很强的禾本科岩兰属

收稿日期:2009-05-18

基金项目:“十一·五”国家科技支撑项目(2006BAD03A1704,2006BAD-03A1706)

作者简介:努扎艾提·艾比布(1982—),硕士研究生,主要从事植物修复理论与技术研究。E-mail:nuzahat228@yahoo.com.cn

通讯作者:刘云国 E-mail:nuzahat228@yahoo.com.cn

多年生草本植物,在水土保持,对重金属和污染物的生物恢复和土壤基质的改良等方面存在巨大应用潜力和价值^[4]。杨兵等的研究已经表明香根草对于铅锌尾矿的植被重建有较大意义^[5],但有关 Zn、Cu 对香根草生理生化指标的影响及其在植物体内的运转和积累特性的研究目前却未见报到。作者以香根草为实验材料,拟进行 Zn 和 Cu 胁迫下香根草受污染毒害的生理生化指标的变化规律研究,Zn 和 Cu 在香根草体内的分布和积累情况研究,以期今后开发利用香根草修复 Zn、Cu 污染土壤修复提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 植物培养与处理

将生长 1 个月的香根草幼苗从湖南省宁乡县香根草培养基地采回,植物先用自来水再用去离子水清洗后移入 1/8 Hoaglands 营养液中,营养液 pH 值调为 6.0。适应性培养两周后,挑选生长一致的健壮植株栽入容积大约为 5 L 的塑料盆里,分别添加 Zn 和 Cu (分别以 $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 加入)持续培养 15 d,重金属处理浓度为 0、5、20、40、60 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (每个处理浓度用相应的字母 A、B、C、D 和 E 来代表),以重金属处理浓度 0 为对照。每盆 3 株,处理溶液体积为 2 L,每隔 1 d 更换 1 次溶液,观察、记录植株生长反应。处理期间保持连续通气,光照 12 h,光照强度 70 μmol 光子 $\cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,环境温度为 28 $^{\circ}\text{C}$ /26 $^{\circ}\text{C}$,湿度 65%~75%。

1.2 测定方法

含水量(WC)按照下式计算:

$$WC = \frac{FW - DW}{FW} \times 100\% [6]$$

其中 FW 为植物各部分鲜重,DW 为植物干重。

运转系数(TF)是地上部分的重金属含量和根部积累的重金属含量之比。丙二醛(MDA)含量用 TBA (硫代巴比妥酸)法测定^[7],单位 $\text{mmol} \cdot \text{g}^{-1}$;根系活力用 TTC 法测定,单位 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$;采用考马斯亮蓝试剂盒测定可溶性蛋白质含量(鲜重),单位 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$;叶绿素含量(鲜重)的测定参考文献[8],单位 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$;香根草根部和地上部分分别在 60 $^{\circ}\text{C}$ 下烘干至恒重,用 HNO_3 : HClO_4 =4:1(V:V)混合酸消解至无色透明,原子吸收分光光度计法测定重金属含量。

每个实验重复 3 次,实验结果为 3 次的平均值标准差。实验原始数据的处理和制图采用 Excel 和 Sigma plot 软件,处理组与对照之间的差异显著性检

验分析均由 SPSS11.5 统计软件完成。

2 结果

2.1 不同 Zn、Cu 水平对香根草生物量及含水量的影响

当 Zn、Cu 处理 15 d 后,和对照相比,香根草在低浓度(5 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)处理下,植株生长旺盛,根系发达,根部明显伸长,数目增多;在高浓度处理下,生长缓慢,植株矮小,根系不发达。当 Cu 处理浓度为 40、60 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 Zn 处理浓度为 60 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时出现中毒症状,主要表现为:根数目不多,根尖褐化,老叶叶尖发黄,新叶生长受抑制但仍保持绿色。

不同浓度的 Zn 和 Cu 处理后,在生物量和含水率等指标上的变化均表现出一致的规律性:植株根部和地上部、干重和含水量均在低浓度的 Zn 和 Cu (5 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)处理时略微升高,然后随着 Zn 和 Cu 浓度的增加而递减(表 1)。Zn 浓度为 5 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,香根草的生物量显著增加 ($P < 0.01$),同时生物量达到最大值 3.96 $\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$,比对照增加了 7.3%,表明低浓度的 Zn 有促进香根草生长的作用。在 Zn 处理浓度为 60 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,生物量最小($P < 0.01$),仅有对照的 40.9%。Cu 处理对香根草生物量的毒害效应比 Zn 处理更明显。虽然 5 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 Cu 处理有促进香根草生长的作用,但高浓度的 Cu 处理大幅度的减少香根草的生物量。当 Cu 处理浓度达到 60 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时香根草总生物量仅有对照的 35.2%($P < 0.01$)。实验发现,在同样浓度的情况下,Zn 处理的香根草植株比 Cu 处理的香根草植株高,根数也多一些。

由表 1 可知,当 Zn 和 Cu 处理浓度较低时(5 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$),香根草含水量有所增加,从 20 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 开始随着处理浓度的增加,香根草体内的含水率逐渐下降。在处理浓度达到最高时,两种重金属处理下的香根草含

表 1 Zn、Cu 对香根草生物量以及含水量的影响

Table 1 Effects of Zn and Cu on the biomass and water content in vetiver

	处理浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	根生物量	地上生物量/g	含水率/%
对照	0	1.79±0.06	1.90±0.14	83.23±0.52
Zn	5	1.94±0.12	2.02±0.12	84.35±0.50
	20	1.36±0.12	1.44±0.26	80.11±0.35
	40	0.82±0.11	0.88±0.06	79.76±0.43
	60	0.76±0.13	0.75±0.15	67.73±0.45
Cu	5	1.86±0.55	1.98±0.12	83.99±0.23
	20	1.03±0.11	1.45±0.26	74.52±0.71
	40	0.79±0.06	0.89±0.06	67.59±1.16
	60	0.54±0.14	0.76±0.15	61.26±0.55

水量从 83.2% 分别下降到 67.73% 和 61.26%。这表明 Cu 对香根草含水量的毒害效应比 Zn 更严重。相关统计分析表明, 含水率与 Zn 和 Cu 处理浓度间达到极显著相关($R_{Zn}=-0.825$ 和 $R_{Cu}=-0.979$, $P<0.01$)。

2.2 Zn、Cu 胁迫下香根草叶片叶绿素含量的变化

叶绿素是植物进行光合作用的色素, 叶绿素含量高低在一定程度上反映了光合作用水平的高低。光合作用弱, 会导致植物鲜重降低^[9-10]。随着 Zn 处理浓度的增加, 香根草体内的叶绿素 a 和叶绿素 b 含量都是先迅速上升后逐渐下降, 下降趋势比较明显(图 1)。在 Zn 处理浓度为 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 香根草体内的叶绿素 a 和叶绿素 b 含量最高分别达到对照的 114.1% 和 108.7%, 最低分别降到对照的 88.4% 和 87.4% ($R_{Chla}=-0.826$, $R_{Chlb}=-0.629$, $P<0.05$)。由图 1 可见, 随着 Cu 处理浓度的增加, 香根草中叶绿素含量先增加后降低, 在 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cu 处理的香根草中叶绿素 a 和叶绿素 b 含量显著大于对照, 分别增加到对照的 102.9% 和 125.9%, 但在 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理时, 其叶绿素 a 和叶绿素 b 含量均有迅速下降趋势 ($R_{Chla}=-0.648$, $R_{Chlb}=-0.949$, $P<0.05$), 在 40 和 $60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理时叶绿素含量的下降趋势明显缓慢。这说明虽然 Zn 和 Cu 是植物必须

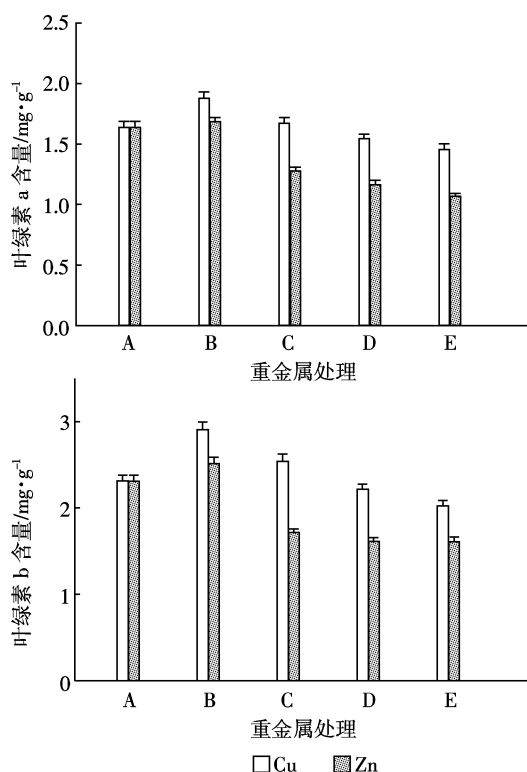


图 1 Zn、Cu 对香根草叶片叶绿素含量的影响

Figure 1 Effects of Zn and Cu content of chlorophyll in leaves of vetiver

的营养元素, 但高浓度的 Zn 和 Cu 已影响到香根草叶绿素合成。

2.3 Zn、Cu 胁迫对香根草 MDA 含量及可溶性蛋白质含量变化的影响

MDA 是膜脂过氧化的重要产物, 可与蛋白质、核酸、氨基酸等活性物质交联, 形成不溶性化合物沉积, 干扰细胞的正常生命活动^[11]。由图 2 可见, 香根草体内的 MDA 含量随 Zn 和 Cu 浓度的升高先迅速增加, 从 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 开始增加速度缓慢, 呈显著正相关, 相关系数分别为 0.936 和 0.947 ($P<0.05$)。由此可见, Zn 和 Cu 污染对香根草体内膜脂过氧化水平的影响显著。在 Zn 和 Cu 处理浓度为 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 香根草根 MDA 含量从 0 处理时的 $64.58 \text{ mmol} \cdot \text{g}^{-1}$ 迅速增加到 $79.35 \text{ mmol} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $85.69 \text{ mmol} \cdot \text{g}^{-1}$ 。在 Zn 和 Cu 处理浓度到 $60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 香根草根 MDA 含量达到最高, 分别为对照的 131.8% 和 140.7%。

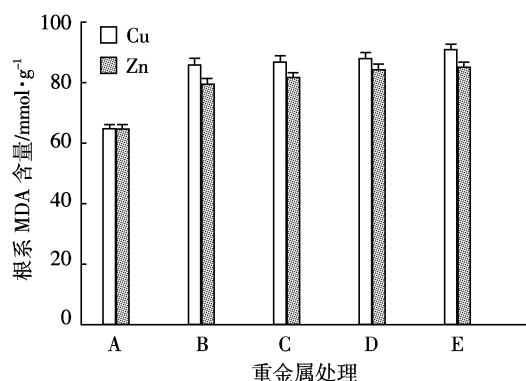


图 2 Zn、Cu 对香根草根 MDA 含量的影响

Figure 2 Effects of Zn and Cu on MDA contents in vetiver

植物体内蛋白质含量的变化是受外界胁迫时植物生长发育受到影响的直接指示。当 Zn 处理浓度为 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 与对照处理相比, 叶片中的可溶性蛋白质含量略有增加, 增加了 2.5%, 根中的可溶性蛋白质含量无明显变化。随着 Zn 处理浓度的逐渐增加, 根中的可溶性蛋白质含量逐渐下降, 叶片中的可溶性蛋白质还是逐渐上升。Zn 处理浓度 $60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 叶片中的可溶性蛋白质含量与对照相比无明显变化, 根中的可溶性蛋白质含量与对照相比下降了 9.2%, 且差异极显著 ($R=-0.705$, $P<0.01$)。不同浓度的 Cu 处理使根系可溶性蛋白质含量与对照相比显著降低, 并且总体上随着处理浓度的上升其含量迅速下降(图 3)。当 Cu 处理浓度为 $60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 根系蛋白质含量下降到最低, 降低到对照的 59.3% ($R=0.91$, $P<0.01$)。相关分

析表明,除了 Cu 处理浓度 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 与对照相比无差异外,其他处理与对照相比差异均极显著。香根草叶片中的可溶性蛋白质含量随着 Cu 处理浓度的增加呈先上升后下降的变化趋势,在 Cu 处理浓度为 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,香根草叶片中蛋白质含量达到最高,比对照提高了 2.6%。在 Cu 处理浓度为 $60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,叶片中蛋白质含量比对照降低了 7.9%,且差异极显著 ($R=-0.633, P<0.01$)。

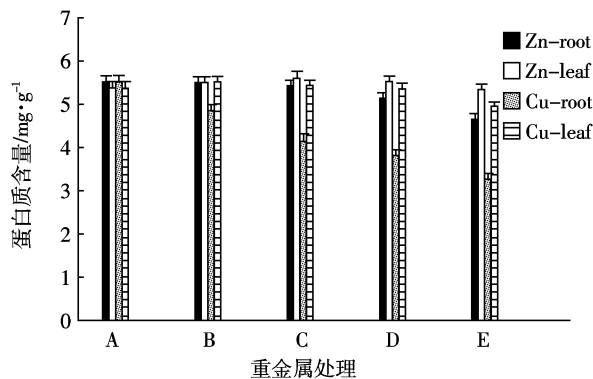


图 3 Zn、Cu 对香根草蛋白质含量的影响

Figure 3 Effects of Zn and Cu on soluble protein contents in vetiver

2.4 Zn、Cu 胁迫对香根草根系活力的影响

根系是植物生命活动中的重要器官,主要供应地上部分生长所需要的水分和矿物质,与植物的生长和产量高低有密切关系。根系活力泛指根系的吸收、合成、氧化和还原能力等,是用来衡量根系长势好坏的重要指标。根系活力大小反映了根系代谢强度的大小,活力越高,则根系组织的代谢就越旺盛,根系就健壮,这对整个植株的生长是有利的。图 4 显示,在 Zn 和 Cu 处理下,香根草根系活力均先升高后降低,呈显著负相关,相关系数分别为 -0.742 和 -0.888 。在 Zn 和 Cu 处理浓度为 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,根系 TTC 还原强度最

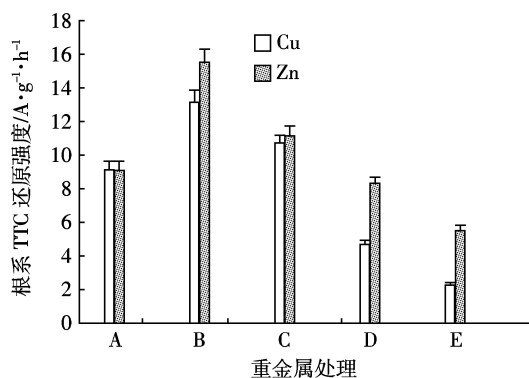


图 4 Zn、Cu 对香根草根系活力的影响

Figure 4 Effects of Zn and Cu on root activity in vetiver

高,分别比对照提高了 70.3%和 44.1%,与对照相比差异极显著 ($P<0.01$)。在 Zn 和 Cu 处理浓度为 $60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,根系 TTC 还原强度最低,分别为对照的 60.4%和 25.1%,与对照相比差异极显著 ($P<0.01$)。

2.5 不同 Zn、Cu 水平对香根草重金属含量的影响

由表 2 可见,香根草积累的重金属含量随处理浓度的增加而增加,两种重金属在香根草体内的分布主要以根部积累为主。Zn 在香根草根部位积累含量(重金属含量测定均为干重,下同)可高达 $2581 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,而地上部 Zn 含量相对较低,最高为 $1164 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。相关分析表明,根部和地上部 Zn 含量与处理液中的重金属浓度呈极显著正相关 ($R_{\text{根}}=0.997$ 和 $R_{\text{地上部}}=0.928, P<0.01$)。由转运系数值可以看出,香根草对 Zn 的富集能力较低,转运系数均小于 1,表明香根草将 Zn 向地上部的运输能力较差,主要以根部积累为主,不符合“超富集植物”的定义^[12]。Cu 胁迫下香根草的不同器官对 Cu 的吸收与积累能力具有显著差异,其中在根部的积累量明显高于地上部分,最高是地上部含量的 28.9 倍,最高达到 $6528 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,显示出植物根部对土壤中的 Cu 的吸收和积累能力。回归分析表明,香根草根部位 Cu 含量随 Cu 处理浓度的增加而显著升高,呈极显著的正相关 ($R=0.852, P<0.01$),而地上部 Cu 含量随 Cu 处理浓度增加其增长水平不明显,积累含量范围为 $29.6 \sim 228.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,但仍呈极显著相关 ($R=0.996, P<0.01$)。

香根草根系极为发达,所以吸收重金属离子能力很强,重金属在根系中的滞留量远远超过茎叶,这可能是香根草根系所吸收的重金属很少运输到地上部分的原因之一。总之,以上结果表明香根草根部位对 Zn、Cu 具有较强的吸收和积累作用,可考虑将其作为 Zn、Cu 污染土壤的植物修复物种。

表 2 香根草体内积累的重金属含量

Table 2 Concentrations of heavy metal in vetiver

重金属	处理浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	根中重金属含量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{DW}$	地上部重金属含量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{DW}$	转运系数 (TF)
Zn	5	637.2 ± 19.6	369.4 ± 25.9	0.579
	20	1184.7 ± 16.5	672.8 ± 13.6	0.568
	40	1967.6 ± 27.9	1018.2 ± 19.1	0.518
	60	2580.5 ± 43.9	1164.2 ± 18.9	0.451
Cu	5	1582.5 ± 13.6	25.7 ± 7.6	0.016
	20	4111.3 ± 33.5	73.9 ± 8.7	0.018
	40	5737.1 ± 65.7	161.2 ± 21.3	0.028
	60	6528.9 ± 102.3	228.6 ± 24.8	0.035

3 讨论

随重金属浓度的不断增加,香根草植株生物量呈下降趋势,主要是高浓度的重金属对植株根系造成胁迫,使其幼苗根尖细胞有丝分裂数减少,分裂速度减慢,导致幼苗生长缓慢,长势不良。植物体内的叶绿素含量的高低直接影响植物正常的光合作用甚至新陈代谢,叶绿素含量的变化,既可反映植物叶片光合作用功能的强弱,也可用以表征逆境胁迫下植物组织、器官的衰老状况^[5]。过量的 Cu 引起香根草叶绿素含量下降,但是低浓度的 Cu 处理使其叶绿素含量增加,可能是因为少量 Cu 弥补了植物体内质体蓝素所需,而质体蓝素又是光合作用电子传递系统的一部分。因此,一定浓度 Cu 可使叶绿体酶活性失调,叶绿体分解加快;随着处理浓度的增加,同时局部积累 Cu 过多,与叶绿体蛋白质上的-SH 基结合或取代其中的 Fe^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Mg^{2+} ,致使叶绿体蛋白中心粒子组成发生变化而失活^[16]。

在高浓度的 Zn 胁迫下香根草体内的叶绿素含量呈下降趋势,Zn 导致香根草叶绿素含量下降的可能原因在于 Zn 被植物吸收后,细胞内的 Zn 离子作用于叶绿素生成途径的几种酶(原叶绿素酯还原酶、 δ -氨基乙酰丙酸合成酶和胆色素原脱氨酶)的肽链中富含 SH 的部分,改变了它们的正常构型,抑制了酶的活性,阻碍了叶绿素的合成^[17]。同时,MDA 水平升高。MDA 是膜脂过氧化的重要产物,其水平直接反映了细胞膜的受破坏程度。细胞内可溶性物质外渗,可能破坏细胞内酶及代谢作用原有的区域,使细胞代谢紊乱,从而出现生物量下降和叶片褪绿的情况,使植株出现受毒害症状^[10]。研究发现,Zn 通过在植物细胞内形成 AOS,直接或间接引起植物细胞组织的损伤,在植物体内 O_2^- 的不断增多可生产过氧羟自由基(OH 、 H_2O_2),其可使细胞内的脂肪酸转化成膜脂过氧化产物^[18],这可能是植物体内 MDA 含量随 Zn 处理浓度的增加迅速增加的主要原因。在不同浓度的 Cu 胁迫下,MDA 水平提高的原因可能是因 Cu 引起强烈的氧化反应而促进脂质过氧化产物的产生^[19]。

在低浓度的重金属处理下植物叶片中的可溶性蛋白质有所增加,说明香根草叶中各种代谢酶类和逆境蛋白对重金属毒害反应非常灵敏,能快速调整其活性及含量,将重金属对植株的毒害降至最低。高浓度的 Zn、Cu 处理使香根草体内的可溶性蛋白质含量不断下降,原因可能是由于其与-SH 基结合导致蛋白变

形而降解,也可能是蛋白质合成酶失活或 DNA 转录翻译途径受阻,影响了蛋白质合成^[9]。

低浓度的 Zn、Cu 均使香根草根系活力增加,表明低浓度的 Zn、Cu 对香根草根系的生长及生理活性有激活效应,可促进幼苗根系对 Zn 和 Cu 的吸收及地上部运转。但随着处理浓度的增加,根系活力逐渐下降,浓度越高,下降幅度越大。原因可能在于重金属胁迫下产生的自由基超过植物自身抗氧化系统酶的清除能力,多余的自由基会对根系代谢中的琥珀酸脱氢酶等造成伤害,从而使根系活力下降。在实验过程中发现随着 Zn、Cu 处理浓度增加侧根的生长速率变小,也与根系生物量随浓度变化趋势一致。

重金属在植物体内的分布有两种情况,一种是大部分积累在根部,另一种是把根系吸收的重金属大部分运输到地上部;重金属在植株体内的运输影响着植物对重金属的吸收与耐性,以及重金属在植物体内的分布和金属离子与植物体内物质的结合形态等^[20]。本实验表明,香根草对 Zn、Cu 均具有较强的积累能力,其中根系滞留是香根草积累重金属的主要方式,而地上部重金属积累量均较低。植物根系对重金属的滞留效应,可能是植物的一种自我保护措施,以避免过量的重金属进入茎和叶,降低重金属的毒害作用^[21]。香根草根系积累 Zn、Cu 的特性说明香根草可能通过降低重金属向地上部位的迁移能力,以减轻过量的重金属对其他器官的毒害作用,从而提高植物的耐重金属能力。另外,香根草对 Zn、Cu 的滞留能力不相同,Zn、Cu 在香根草根系中的滞留能力为 $\text{Cu} > \text{Zn}$ 。香根草积累的重金属主要分布在根部,这样污染土壤中的重金属通过植被向生态系统迁移的风险相对较低。同时,香根草还具有生物量大,叶粗、茎硬,茎叶可用来编织工艺品的特点,可以比较好地防止二次污染,副产品也可以得到充分利用^[22]。虽然不是定义上的超富集植物,但植物根系对土壤重金属具有较强的吸收和积累能力。这些表明香根草在植物修复方面的应用潜力不容忽视。

4 结论

(1)低浓度的($5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)Zn、Cu 胁迫使香根草幼苗叶绿素含量、可溶性蛋白质含量、根系活力、含水量和生物量增加,植株生长旺盛,根系发达,根系明显伸张;在高浓度处理下,香根草生长缓慢,植株矮小,根系不发达,植株体内叶绿素含量、可溶性蛋白质含量、根系活力、含水量和生物量下降,同时 MDA 含量增加。

(2)Zn和Cu在香根草体内积累特征以根部积累为主,将重金属运输到地上部的能力较差。香根草对Zn、Cu的滞留能力也不相同,Zn、Cu在香根草根系中的滞留情况为Cu>Zn。

参考文献:

- [1] 陈怀满,陈能场,陈英旭.土壤-植物系统中的重金属污染[M].北京:科技出版社,1996.
CHEN Huai-man, CHEN Neng-chang, CHEN Ying-xu, et al. Heavy metal pollution of soil-plant system[M]. Beijing: Science Press, 1996.
- [2] 杨居荣,等.植物对重金属的耐性机理[J].生态学杂志,1994,13(6):20-26.
YANG Ju-rong, et al. The mechanisms of heavy metal tolerance in plants[J]. *Journal of Ecology*, 1994, 13(6):20-26.
- [3] 王庆仁,等.植物修复-重金属污染土壤整治有效途径[J].生态学报,2001,21(2):326-331.
WANG Qing-ren, et al. Phytoremediation-an effective approach of heavy metal cleanup from contaminated soil[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(2):326-331.
- [4] Chen Y H, Shen Z G, Li X D. The use of vetiver grass in the phytoremediation of soils contaminated with heavy metals[J]. *Applied Geochemistry*, 2004, 19:1553-1565.
- [5] 杨兵,蓝崇钰,束文圣.香根草在铅锌尾矿上生长及其对重金属的吸收[J].生态学报,2005,25(1):45-50.
YANG Bing, LAN Chong-yu, SHU Wen-sheng. Growth and heavy metal accumulation of *Vetiveria zizanioides* grown on lead/zinc mine tailings[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(1):45-50.
- [6] Kim D W, Rakwal R, Agrawal G K, et al. A hydroponic rice seedling culture model system for investigating proteome of salt stress in rice leaf[J]. *Electrophoresis*, 2005, 26:4521-4539.
- [7] Tijen D, Ismail T. Comparative lipid peroxidation, antioxidant defense systems and proline content in roots of two rice cultivars differing in salt tolerance[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2005, 53:247-257.
- [8] 邹琦.植物生理学实验指导[M].北京:中国农业出版社,2000:72-75.
ZOU Qi. The guidance of plant physiology experiments[M]. Beijing: Chinese Agronomy Press, 2000:72-75.
- [9] Mathys W. Vergleichende untersuehungen der zinkaufnahme von die sisten-ten und sensitive population von agrostis tenuis sibth[J]. *Flora*, 1973(162):492-499.
- [10] 储玲,刘登义,王友保,等.铜污染对三叶草幼苗生长及活性氧代谢影响的研究[J].应用生态学报,2004,1(15):119-122.
CHU Ling, LIU Deng-yi, WANG You-bao, et al. Effect of copper pollution on seedling growth and active oxygen metabolism of *Trifolium pretense*[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 1(15):119-122.
- [11] 胡正义,沈宏,曾志洪. Cu 污染土壤-水稻系统中 Cu 的分布特征[J].环境科学,2004,21(2):62-65.
HU Zheng-yi, SHEN Hong, ZENG Zhi-hong. Distribution of Cu in soil-crop system polluted by Cu [J]. *Environmental Science*, 2004, 21(2):62-65.
- [12] Tan g S R, Wilke B M, Huang C Y. The uptake of copper by plants dominantly growing on copper mining spoils along the Yangtze River, the People s Republic of China[J]. *Plant and Soil*, 1999, 209:225-232.
- [13] 王焕校.污染生态学[M].第2版.北京:高等教育出版社,2002:59-79.
WANG Huan-xiao. Pollution Ecology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2002:59-79.
- [14] Gadallah M A A. Effects of indole-3-acetic acid and zinc on the growth, osmotic potential and soluble carbon and nitrogen components of soybean plants growing under water deficit[J]. *Arid Environ*, 2000, 44:451-467.
- [15] Jennifer Cutraro, Nora Goldstein. Cleaning up contaminants with plants[J]. *Biocycle*, 2005, 46(S):30-32.
- [16] 郑春荣,陈怀满.土壤水稻系统中重金属的迁移及其对土壤的影响[J].环境科学学报,1990,10(2):145-152.
ZHENG Chun-rong, CHEN Huai-man. Transfer of heavy metals through soil-plant system and its influence on the growth of rice[J]. *Acta Scientiae Circumstantia*, 1990, 10(2):145-152.
- [17] Somaehekaraiah B V, Padmaja K, Prasad R K. Phytotoxicity of cadmium ions on germination seedling of mung bean (*Phaseolus vulgarize*): Involvement of lipid peroxides in chlorophyll degradation[J]. *Physiol Plant*, 1992, 85:85-89.
- [18] Lin C C, Kao C H. Effect of NaCl stress on H₂O₂ metabolism in rice leaves[J]. *Plant Growth Regulat*, 2000, 30:151-155.
- [19] Pinto E, Sigaud-Kutner T C S, Leitao M A S, et al. Heavy metal-induced oxidative stress in algae[J]. *Phycol*, 2003, 39:1008-1018.
- [20] 杨居荣,鲍子平,张素芹.镉、铅在植物细胞内的分布及其可溶性结合形态[J].中国环境科学,1993,13(4):263-268.
YANG Ju-rong, BAO Zi-ping, ZHANG Su-qin. The distribution and binding of Cd and Pb in plant cell[J]. *China Environmental Science*, 1993, 13(4):263-268.
- [21] 夏汉平,束文圣.香根草和百喜草对铅锌尾矿重金属的抗性与吸收差异研究[J].生态学报,2001,21(7):1121-1129.
XIA Hang-ping, SHU Wen-sheng. Resistance to and uptake of heavy metals by *Vetiveria zizanioides* and *Paspalum notatum* from lead/zinc mine tailings[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(7):1121-1129.
- [22] 龙健,黄昌勇,滕应,等.天台铅锌矿区香根草(*Vetiveria zizanioides*)等几种草本植物的重金属耐性[J].应用与环境生物学报,2003,9(3):226-229.
LONG Jian, HUANG Chang-yong, TENG Ying, et al. Tolerance to heavy metals of *Vetiveria zizanioides* and some herbages in Tiantai lead-zinc mine[J]. *China J Apple Environ Biol*, 2003, 9(3):226-229.