

钒在枸杞幼苗中积累、转运及亚细胞分布

侯明, 胡存杰, 熊玲, 陈如

(广西矿冶与环境科学实验中心 桂林理工大学化学与生物工程学院, 广西 桂林 541004)

摘要:通过沙培实验和采用差速离心技术,研究了钒(V)在枸杞幼苗中的积累、转运和亚细胞分布特征。结果表明:V在枸杞不同器官中的含量和分配比例为根>茎>叶,随着V处理浓度的增加,枸杞幼苗根中V含量和分配比例显著增大,在V处理浓度为 $20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,根中V含量达 $19.80\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,占总量的60.1%。枸杞幼苗在V浓度为 $2, 5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,根富集系数 $\text{BCF}>1$,转运系数 $\text{TF}<1$,表明枸杞植物对V有较强的富集能力,但转运能力较低,其积累的V主要富集在枸杞植株根部,可减轻过量V对茎叶的毒害。V在枸杞叶片中的亚细胞分布规律为F1(细胞壁)>F4(可溶性组分)>F2(细胞核)>F3(线粒体和叶绿体)。V在细胞壁和可溶性组分中所占的比例分别为28.3%~52.4%和4.1%~45.2%,表明细胞壁是V在枸杞叶片细胞中的重要分布位点。随着V处理浓度的增加,V在细胞壁中的分配比例减少,而可溶性组分的分配比例相应增加,细胞核、线粒体和叶绿体的分配比例显著下降。细胞壁和细胞质可溶性组分的相互协调,对植物自身解毒重金属起着重要作用,从而增强枸杞植物对重金属V的耐性。

关键词:钒;枸杞幼苗;积累;转运;亚细胞分布

中图分类号:X503.233 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2013)08-1514-06 doi:10.11654/jaes.2013.08.004

Accumulation, Translocation and Subcellular Distribution of Vanadium in *Lycium barbarum* Seedling

HOU Ming, HU Cun-jie, XIONG Ling, CHEN Ru

(Guangxi Scientific Experiment Center of Mining, Metallurgy and Environment, College of Chemistry and Bioengineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: Accumulation, translocation and subcellular distribution of Vanadium(V) in *Lycium barbarum* seedling was investigated with sand culture by the differential centrifugation. Results showed that allocation proportions and concentrations of V in different organs of *Lycium barbarum* seedling were in sequence as follows: root>petiole>leaf. With V press level increasing, concentrations and allocation proportions of V in root increased significantly, and reached to the maximum, $19.80\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ and 60.1% respectively when V press level was $20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. The bioconcentration factor(BCF) and the translocation factor(TF) for V was more than 1 and less than 1 respectively when V press level was $2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ or $5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. It suggested that there is a strong enrichment and low translocation in *Lycium barbarum* seedling, while most V is accumulated in roots, which can reduce the toxicity of V to petioles and leaves. The subcellular distribution level of V in the leaves of *Lycium barbarum* seedling was in sequence as follows: F1 (cell wall and residue)>F4 (soluble fraction)>F2 (nucleus)>F3 (mitochondrion and chloroplasts). The allocation proportions of V in F1 and F4 were 28.3%~52.4% and 4.1%~45.2% respectively, indicating that cell wall is the main V-binding site in leaves of *Lycium barbarum* seedling. With V press level increasing, the allocation proportions of V decreased in cell wall, nucleus, mitochondrion and chloroplasts, but increased in soluble fraction, suggesting that intercoordination between cell wall and soluble fraction may benefit the tolerance of *Lycium barbarum* seedling to V.

Keywords: vanadium; *Lycium barbarum* seedling; accumulation; translocation; subcellular distribution

重金属污染已经成为全球性的环境问题^[1],研究重金属元素在植物体内的亚细胞分布特征,有助于解

释植物对重金属富集和解毒机制,因此重金属在植物中的积累和细胞分布是目前国内外研究的热点^[2-13]。已有研究表明,植物细胞壁提供了大量重金属结合位点,将重金属固定在细胞壁上,使重金属不能进入细胞质减弱其对细胞毒性^[3-4];而液泡中含有多种能与重金属结合的物质,使金属离子在细胞内区隔化^[5-6]。因此,重金属主要分布在植物细胞壁和可溶组分,如张尧、Weng 和 Marcin^[7-9]等研究黑麦草(*Lolium perenne*)

收稿日期:2013-02-02

基金项目:国家自然科学基金项目(41161076);广西自然科学基金项目(2011GXNSFA018045);广西环境工程与保护评价重点实验室研究基金项目(桂科能 0701k013);广西矿业与环境科学实验中心项目(KH2013YB013)

作者简介:侯明(1957—),女,博士,教授,研究方向为环境分析化学。
E-mail: glhou@glut.edu.cn

和秋茄(*Kandelia obovata* Yong)幼苗中Cd、白腐菌(White-rot fungus)中Pb等金属亚细胞分布顺序为:细胞壁>可溶部分>细胞核。孙光闻、Vicenta和Feng^[10-12]等对小白菜(*Pakchoi*)中Ca和Cd、白茅[*Imperata cylindrica*(L.)Raeuschel]中Fe和凤尾蕨(*Cretan brake fern*)中As和Sb等亚细胞分布研究表明重金属浓度分布为胞液>细胞壁>细胞器。从上述研究中可看出,重金属集中分布在细胞壁和可溶组分就可能避免重金属损害植物功能性相对重要的组织如细胞器,这正是重金属植物能解毒的原因^[13]。重金属在植物亚细胞中的结合表明,重金属可以被植物吸收和累积,并能在植物体内发生迁移转化,降低其对生态系统的危害^[14]。植物细胞壁的固定和细胞液的区间隔化作用能使重金属在植物体内积累,而蛋白质和多肽等物质也能与重金属结合,也使重金属滞留植物体内^[15]。植物根部是植物积累重金属的主要器官,可限制重金属向植物的地上部转移,减少重金属对地上部的毒害^[5]。潘秀^[5]和Naza'anti Aibibu^[16]等研究表明,互花米草(*Spartina alterniflora*)和香根草(*Vetiveria zizanioides*)对Cd均具有较强的积累能力,绝大部分Cd积累在根部,转运能力较低。柳玲等^[17]研究了不同品种芹菜(*Apium graveolens* L.)对Cr的积累特性和亚细胞分布,根系Cr滞留率和富集系数较高,具有较强的富集能力。

钒(V)是动植物所必需的微量元素,又是一种可以危害整个生态系统的潜在危险化学污染物。人类活动释放到土壤中的V会对土壤酶系统产生干扰,进而影响土壤功能^[18],并导致V在植物中积累。如水稻(Rice)受到过量的V胁迫会使其富集在水稻根部^[19]。小白菜(*Brassica chinensis*)中^[20]V主要积累于植株根部,且积累量随土壤中V含量增加而增加。V不仅会在植物中积累,还可通过食物链进入人体,当人体中V的积累达到一定浓度,会损害人体健康。有研究表明^[21],胃癌、大肠癌发生与土壤中V含量有确实关系。随着V矿的开采、冶炼以及V的广泛应用,V污染已引起人们的关注^[22-23]。枸杞嫩茎叶含有丰富的营养成分,具有清肝明目、降血压、促进益生菌细胞生长等功能^[24],是华南地区人们常食用的蔬菜之一,因此保证枸杞植物的食品安全具有重要意义。本文通过自然环境下的沙培盆栽试验结合差速离心技术,研究V在枸杞幼苗各器官的积累和转运特征,分析了枸杞叶中V的亚细胞分布,探讨了枸杞植物对V的解毒和耐性机制,旨在为进一步揭示V对枸杞植物的抗性和毒

性机理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试枸杞(*Lycium barbarum*)种子为宁杞一号种,将枸杞种子洗净后晾干。盆栽试验使用河沙,经酸处理后洗至中性,风干后过0.8 mm筛,备用。配制沙培营养液的试剂和所选用的V(NH_4VO_3)均为分析纯。

1.2 试验设计和处理

试验设置为6种处理,分别加以不同量的V(以 NH_4VO_3 形式加入):0、2、5、10、15、20 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,每个处理设置6个重复,每个塑料盆装处理过的河沙5 kg。将枸杞种子播种于细沙中,用纯水浇灌,在自然环境下培育,在种子出苗并长出2片叶时,隔天浇灌1次Hoagland营养液,合理控制细沙的湿度。待枸杞幼苗长出4对叶时匀苗,每盆定株为13株,浇灌含不同浓度V的营养液进行胁迫处理,每3 d浇定量营养液,V胁迫14 d后收获植物。将植物样品分成叶片、叶柄和根系分别洗净晾干。植株根系先用自来水冲洗,再用20 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ $\text{Na}_2\text{-EDTA}$ 交换20 min,以除去根表面吸附的V,然后用去离子水洗净,滤纸吸干表面水分。植物鲜样置于-20℃冰箱供分析测定。试验所用水为超纯水。

1.3 试验方法

1.3.1 枸杞叶中亚细胞组分分离

按廖斌等^[25]方法改进:称取枸杞叶鲜样2.0 g,加入20 mL提取液[0.25 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 蔗糖+50 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ Tris-HCl缓冲液(pH 7.5)+1 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 二硫赤鲜糖醇],在冰浴中用玛瑙研钵研磨成匀浆,匀浆液在冷冻离心机中200×g下离心20 min,沉淀为细胞壁及未破碎残渣(F1);上清液在600×g下离心10 min,沉淀为细胞核(F2);上清液在10 000×g下离心30 min,沉淀为线粒体和叶绿体(F3);上清液为核蛋白和可溶性组分(F4)。全部操作在4℃下进行。

1.3.2 样品中V含量的测定

将枸杞叶、叶柄和根样分别剪碎,按样品与水的比例为1:10($\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)用玛瑙研钵磨成匀浆,用于总量测定。将总量匀浆和亚细胞组分分离物置于电热板上蒸至近干,用 $\text{H}_2\text{O}_2\text{-HNO}_3$ (1:5, V/V)消煮至澄清,水定容用石墨炉原子吸收分光光度法(GFAAS, novAA 400P, Analytik Jena AG)测定V含量。试验结果为3次重复试验的平均值。

1.3.3 数据处理

植物地上与根部重金属含量的比值称为植物的

转运系数(Translocation factor, TF),用来表示植物体对重金属从根部到地上部的有效转移程度^[26],计算公式^[27]为:TF=地上部V含量($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)/地下部V含量($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)。根系对重金属的富集系数(Bioconcentration factor, BCF)=根部V含量($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)/土壤中V含量($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)^[28]。

采用 DPS 9.50 数据处理系统和 Microsoft Excel 2003 对数据进行统计分析, Duncan 多重比较法对显著性差异($P<0.05$)进行多重比较,结果以平均值 $\pm$ 标准差(Mean $\pm$ SD)表示。

2 结果与分析

2.1 V 在枸杞叶片中亚细胞分布

不同 V 处理浓度中, V 在枸杞叶各细胞组分中的含量或分配比例为 F1>F4>F2>F3(表 1)。随着 V 处理浓度的增大, 细胞各组分 V 含量均呈增加趋势, 但其分配比例变化存在明显差异, V 在细胞壁(F1)的分配呈先上升后下降的变化趋势, 占总量的 30.1%~52.4%, 在 V 胁迫浓度为 $5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时达到最大值, 以后逐渐下降, 但始终高于对照; V 在可溶性组分(F4)的分配比例逐渐增加, 占总量的 16.2%~45.2%, 细胞核(F2)和叶绿体、线粒体(F3)中的分配比例逐渐下降, 二者占总量的 15.2%~53.7%。V 胁迫浓度为 $2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, V 主要集中在细胞核(F2), 占总量的 37.3%, 其次细胞壁(F1)为 30.1%, 叶绿体、线粒体(F3)和可溶性组分(F4)分配较少。随着 V 处理浓度的增大($\geq 5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), V 主要集中于细胞可溶性组分(F4), 其次为细胞壁(F1)。当 V 处理浓度达 $20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, F4 占总量的 45.2%, F1 占总量的 39.6%, 其他组分的分配仅为 15.2%。表明枸杞叶片中 V 主要分布到细胞壁和

细胞可溶性组分等细胞活性较弱的区域, 而具有生命活动的细胞核(F2)、线粒体和叶绿体(F3)组分中含量较少, 从而可降低 V 对枸杞幼苗叶细胞的伤害。

2.2 V 在枸杞各器官中的积累和分布

表 2 和图 1 为 V 在枸杞幼苗中的积累及分布情况。不同浓度 V 胁迫下, 枸杞幼苗不同器官中 V 含量均显著高于对照。由表 2 可见, 当 V 浓度从 $2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 增加到 $20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, V 在枸杞根中含量增加幅度远大于茎和叶, 从 $1.959\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 增加到 $19.799\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 与对照相比较存在显著差异($P<0.05$)。V 在茎和叶中的含量随着处理浓度的增加逐渐增加, 茎和叶中富集的 V 含量较少。由表 2 还可看出, 当环境中 V 浓度愈高, 枸杞根部积累的 V 就愈多。由图 1 可见, 随着 V 处理浓度的升高, V 在枸杞根中的分配显著升高, 在茎和叶中的分配比例随着 V 处理浓度的增加而下降, 表明枸杞幼苗吸收的大部分 V 积累在根部, 茎和叶富集较少, 这有利于减轻土壤 V 对幼苗特别是叶片的毒害效应。V 在枸杞不同器官中的含量和分配比例依次为根>茎>叶。

由表 2 可见, 随着 V 处理浓度增大, 根富集系数 BCF 值呈先上升后下降的趋势。当 V 浓度达 $5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 枸杞幼苗中 V 的 BCF 值最大, 为 1.32, 以后逐渐下降并趋于平稳, 在 V 浓度达 $20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, BCF 值为 0.95。可能是随着 V 浓度增大, 枸杞幼苗积累 V 的能力增强, 当枸杞幼苗吸收 V 的量接近饱和, V 从环境向枸杞根部迁移的能力减弱, 使根部吸收富集能力降低, 从而导致在高浓度 V 胁迫下枸杞幼苗的富集系数 BCF 降低。随着 V 处理浓度的增大, 转运系数 TF 值从 $2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 1.09 逐渐降低到 $20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 0.66, 表明枸杞幼苗把 V 从根部转移到茎和叶的能力逐渐

表 1 枸杞叶片各亚细胞组分中 V 含量($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 鲜重)及分配比例

Table 1 V concentration and percentages in subcellular fractions of *Lycium barbarum* leaf ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, FW)

V/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	F1		F2		F3		F4	
	$\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	%	$\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	%	$\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	%	$\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	%
0	0.101 $\pm$ 0.006d	28.3	0.168 $\pm$ 0.014c	47.3	0.072 $\pm$ 0.004c	20.3	0.015 $\pm$ 0.003e	4.1
2	0.146 $\pm$ 0.010d	30.1	0.182 $\pm$ 0.002c	37.3	0.081 $\pm$ 0.003c	16.4	0.079 $\pm$ 0.005e	16.2
5	1.060 $\pm$ 0.043c	52.4	0.282 $\pm$ 0.011b	14.0	0.213 $\pm$ 0.011b	10.5	0.466 $\pm$ 0.010d	23.1
10	1.236 $\pm$ 0.020c	49.7	0.326 $\pm$ 0.040b	13.1	0.200 $\pm$ 0.011b	8.0	0.727 $\pm$ 0.020c	29.2
15	1.482 $\pm$ 0.055b	44.7	0.392 $\pm$ 0.012b	11.8	0.232 $\pm$ 0.023b	7.0	1.210 $\pm$ 0.014b	36.5
20	2.360 $\pm$ 0.078a	39.6	0.575 $\pm$ 0.009a	9.6	0.331 $\pm$ 0.019a	5.6	2.689 $\pm$ 0.041a	45.2

注: F1-细胞壁及破碎残渣, F2-细胞核, F3-线粒体和叶绿体, F4-核蛋白和可溶性组分, 表中数据为“均值 $\pm$ 标准差”(n=3)。采用 Duncan 法检验, 同一列中不同字母代表有显著差异($P<0.05$)。下同。

Note: F1-cell wall and residue, F2-nucleus, F3-mitochondrion and chloroplasts, F4-soluble fraction. Values are means $\pm$ SD (n=3), Duncan test was used. Different letters in the same column indicate a significant difference at the 5% level.

表 2 枸杞幼苗不同部位中 V 含量($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 鲜重)Table 2 V concentrations in different parts of *Lycium barbarum* seedlings($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,FW)

V/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	V 含量 V content/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ FW			富集系数(BCF)	迁移系数(TF)
	根 Root	茎 Petiole	叶片 Leaf		
0	0.454 $\pm$ 0.020f	0.391 $\pm$ 0.032f	0.173 $\pm$ 0.012e		1.24
2	1.959 $\pm$ 0.032e	1.458 $\pm$ 0.089e	0.677 $\pm$ 0.029e	0.98	1.09
5	6.592 $\pm$ 0.113d	3.863 $\pm$ 0.109d	1.766 $\pm$ 0.046d	1.32	0.85
10	10.282 $\pm$ 0.392c	5.967 $\pm$ 0.253c	2.487 $\pm$ 0.109c	1.03	0.82
15	14.933 $\pm$ 0.301b	7.001 $\pm$ 0.312b	3.356 $\pm$ 0.153b	0.99	0.69
20	19.799 $\pm$ 0.376a	8.894 $\pm$ 0.374a	4.267 $\pm$ 0.210a	0.95	0.66

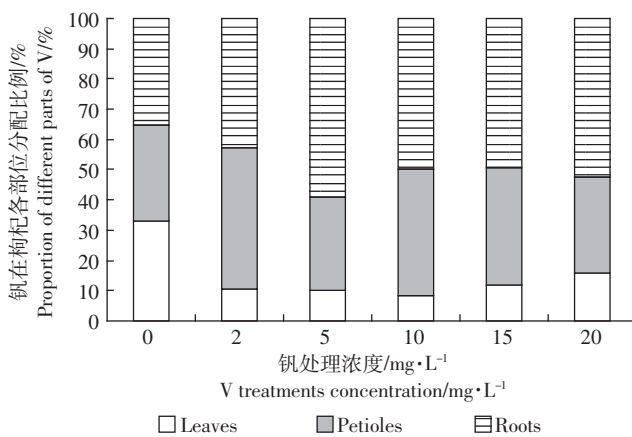


图 1 枸杞幼苗根、茎和叶中 V 含量的比率

Figure 1 V percentages in roots, petioles and leaves of *Lycium barbarum* seedlings

降低。

3 讨论

研究表明,在低浓度 V 处理下,V 主要分布在枸杞叶的细胞核(F2)和细胞壁(F1),当 V 处理浓度 $\geq 5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,V 主要分布在细胞壁(F1)和可溶性组分(F4)中。可见,随着 V 处理浓度的增加,细胞壁和细胞质是 V 在枸杞叶细胞内的主要分布位点,对于细胞最重要的光合作用和呼吸作用场所——含叶绿体、线粒体的细胞器中则相对很少,这一结果与已有研究结果相似^[7,25,29]。本实验结果表明,在 V 胁迫下,枸杞幼苗中的 V 主要结合在细胞壁。可能由于细胞壁中含有可以螯合 V 的物质,这些物质将 V 固定在细胞壁,减少了 V 的跨膜运输,降低了植物原生质中 V 的毒性^[30]。细胞壁结合重金属有助于加强植物对重金属的抗性和耐性,同时降低重金属对植物的毒害作用。当细胞壁上结合的 V 达到饱和时,进入细胞内的大部分 V 被转移到液泡中,使植物体内过量 V 离子与代谢反应中心隔离,同时,V 还可能在液泡中结合成毒性较

小的螯合物,以减轻对植物的毒害^[31-33]。这说明液泡对重金属在植物中的区间隔化起着重要作用,植物除细胞壁外,可溶性组分也是防止重金属损害植物细胞器的重要组分,有助于增强植物对重金属的抗性。因此,随着 V 胁迫浓度的增大,V 在枸杞叶细胞壁中的分配比例先上升后下降,在可溶性组分中的分配比例则明显上升。研究还发现,提高 V 胁迫浓度总体上会减弱细胞壁对 V 的固定作用,还可降低 V 在细胞核和叶绿体、线粒体中的分配比例,使得细胞质的区隔化作用增强。这既有利于满足枸杞植物体细胞对必需元素 V 的需求,又减轻了过量 V 对其的损害,从而保证维持植物细胞的正常生理代谢功能。所以,V 在枸杞叶中的亚细胞分布规律体现了枸杞幼苗对 V 的耐受性反应。

在不同浓度 V 胁迫下,枸杞幼苗体内积累的 V 主要分布在根部,其次为茎部,而枸杞叶中积累的 V 含量极少,V 在植株各部位含量为根>茎>叶,说明 V 在枸杞植株中是被动吸收运输。这种现象可能是 V 在植物体中浓度差的驱动,且植物根部对重金属具有较强的富集力,可以降低 V 在土壤中的生物有效性,减轻过量 V 对茎叶器官的毒害作用。利用转运系数(TF)^[34]和根富集系数(BCF)^[30]可以考察植物对重金属的富集程度,评价植物对于生态修复的潜力。枸杞幼苗对 V 的吸收富集能力和转运能力与 V 处理浓度关系密切。本实验显示,对照组转运系数 TF 值较大(1.24),说明枸杞幼苗在不受 V 胁迫时转运能力较强;随着 V 处理浓度的增加,V 在枸杞幼苗中吸收总量升高,但 V 的转运系数 TF 值降低,说明在 V 胁迫下,枸杞植株将 V 从根部转运到地上部的能力下降,枸杞幼苗根系固持 V 的能力较强,减少了 V 向地上部分运输,从而缓解重金属对植物生命活动的影响。在低浓度 V($\leq 5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)胁迫时,枸杞叶片呈翠绿色,生长情况良好,根富集系数(BCF)增大;高浓度 V($\geq$

10 mg·L⁻¹胁迫时,枸杞叶片有发黄和脱落现象,BCF值和TF值均降低。这一方面可能是枸杞幼苗根系细胞壁和液泡对V的吸收和固定能力增强,其转运能力降低^[35],另一方面在高浓度V胁迫下根部的V与细胞壁和液泡的结合量达到饱和,多量的V进入植物细胞器,导致枸杞幼苗受到毒害,富集能力下降。植株中V的BCF值和TF值均小于1,说明枸杞植株对V具有一定的富集能力,属于V的耐性植物。

4 结论

(1)不同浓度V处理下,V在枸杞幼苗各部位含量或分配比例为根>茎>叶。随着V处理浓度的增大,根富集系数先升高后缓慢下降,转运系数逐渐降低,表明枸杞幼苗对V具有良好的富集作用,但将V运输到地上部的能力减小。富集的V主要累积在根部,可减轻过量V对枸杞茎叶的毒害作用,所以,枸杞是V的耐性植物。

(2)在V胁迫下,枸杞叶细胞中V主要分布在细胞壁,其次是可溶性组分,V在细胞核和叶绿体、线粒体部分的分布较少,表明枸杞植株将大部分的V贮存于细胞活性较弱的非生理活动区,大大降低了V对枸杞幼苗的毒害。

(3)V在细胞壁的积累、V向液泡的转移和V的细胞质区隔化可能是枸杞植物对V的主要耐性机理之一。

参考文献:

- [1] Xu Qin-song, Min Hai-li, Cai San-juan, et al. Subcellular distribution and toxicity of cadmium in *Potamogeton crispus* L. [J]. *Chemosphere*, 2012, 89: 114-120.
- [2] 于方明, 汤叶涛, 周小勇, 等. 镉对圆锥南芥锌的吸收、亚细胞分布和化学形态影响[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2010, 49(4): 120-124.
YU Fang-ming, TANG Ye-tao, ZHOU Xiao-yong, et al. Effects of cadmium on uptake, subcellular distribution and chemical form of zinc in *Arabispiculata* Franch [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2010, 49(4): 120-124.
- [3] Li Tingqiang, Yang Xiao E, Yang Jinyan, et al. Zn accumulation and subcellular distribution in the Zn hyperaccumulator *sedum alfredii* Hance [J]. *Pedosphere*, 2006, 16(5): 616-623.
- [4] Nalimova A A, Popova V V, Tsoglin L N, et al. The effects of copper and zinc on *Spirulina platensis* growth and heavy metal accumulation in its cells [J]. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2005, 52(2): 229-234.
- [5] 潘秀, 刘福春, 柴民伟, 等. 镉在互花米草中积累、转运及亚细胞的分布[J]. 生态学杂志, 2012, 31(3): 526-531.
PAN Xiu, LIU Fu-chun, CHAI Min-wei, et al. Accumulation, translocation, and subcellular distribution of cadmium in *Spartina alterniflora* [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(3): 526-531.
- [6] Nishizono H, Ichikawa H, Suzuki S, et al. The role of the root cell wall in the heavy metal tolerance of *Athyrium yokoscense* [J]. *Plant and Soil*, 1987, 101(1): 15-20.
- [7] 张尧, 田正贵, 曹翠玲, 等. 黑麦草幼苗对镉耐性能力及吸收积累和细胞分布特点研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(11): 2080-2086.
ZHANG Yao, TIAN Zheng-gui, CAO Cui-ling, et al. Characteristics of cadmium tolerance, accumulation and cellular distribution in *Lolium perenne* seedlings [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(11): 2080-2086.
- [8] Weng Bosen, Xie Xiangyu, Weiss Dominik J, et al. *Kandelia obovata* (S., L.) yong tolerance mechanisms to cadmium; Subcellular distribution, chemical forms and thiol pools [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2012, 64(11): 2453-2460.
- [9] Marcin Graz, Bozena Pawlikowska-Pawlega, Anna Jarosz-Wilkolazka. Growth inhibition and intracellular distribution of Pb ions by the white-rot fungus *Abortiporus biennis* [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2011, 65: 124-129.
- [10] 孙光闻, 朱祝军, 方学智. 小白菜镉和钙的亚细胞分布及钙、镉互作的研究[J]. 华北农学报, 2010, 25(6): 229-232.
SUN Guang-wen, ZHU Zhu-jun, FANG Xue-zhi. Cadmium uptake and subcellular distribution in shoots of pakchoi and Cd-Ca interaction [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2010, 25(6): 229-232.
- [11] Vicenta de la Fuente, Nuria Rodríguez, Ricardo Amils. Immunocytochemical analysis of the subcellular distribution of ferritin in *Imperata cylindrica* (L.) Raeuschel, an iron hyperaccumulator plant [J]. *Acta Histochemica*, 2012, 114: 232-236.
- [12] Feng Ren-wei, Wei Chao-yang, Tu Shu-xin. Simultaneous hyperaccumulation of arsenic and antimony in Cretan brake fern; Evidence of plant uptake and subcellular distributions [J]. *Microchemical Journal*, 2011, 97: 38-43.
- [13] Hans J W, Hans J J. Subcellular distribution and chemical form of cadmium in bean plant [J]. *Plant Physiology*, 1980, 65(3): 480-482.
- [14] Duarte B, Caetano M, Almeida P R. Accumulation and biological cycling of heavy metal in four salt marsh species, from *Tagus estuary* (Portugal) [J]. *Environmental Pollution*, 2010, 158: 1661-1668.
- [15] 薛艳, 沈振国, 周东美. 蔬菜对土壤重金属吸收的差异与机理[J]. 土壤, 2005, 37(1): 32-36.
XUE Yan, SHEN Zhen-guo, ZHOU Dong-mei. Difference in heavy metal uptake between various vegetables and its mechanism [J]. *Soils*, 2005, 37(1): 32-36.
- [16] Naza'anti Aibibu, Liu Yun-guo, Zeng Guang-ming, et al. Cadmium accumulation in vetiveria zizanioides and its effects on growth, physiological and biochemical characters [J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101: 6297-6303.
- [17] 柳玲, 吕金印, 张微. 铬在芹菜中的累积、亚细胞分布及化学形态分析[J]. 核农学报, 2010, 24(5): 1093-1098.
LIU Ling, LÜ Jin-yin, ZHANG Wei. Accumulation, subcellular distribution and chemical form of chromium in celery (*Apium graveolens* L.)

- [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2010, 24(5): 1093–1098.
- [18] 王凯荣, Selim H M, 朱端卫. 钒和磷在土壤中的竞争吸附与迁移特性研究[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(5): 536–540.
- WANG Kai-rong, Selim H M, ZHU Duan-wei. Competitive adsorption and transportation of vanadium and phosphorous in soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003, 22(5): 536–540.
- [19] 胡莹, 朱永官, 黄益宗, 等. 钒镉复合污染对水稻吸收积累镉、钒和磷的影响[J]. 环境科学学报, 2005, 25(2): 198–202.
- HU Ying, ZHU Yong-guan, HUANG Yi-zong, et al. Effects of combined contamination of vanadium and cadmium on cadmium, vanadium and phosphorus uptake by rice in solution culture[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 25(2): 198–202.
- [20] 侯明, 黄以峰, 何剑亮, 等. 蔬菜根际环境钒的形态变化及植物有效性[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(1): 1353–1357.
- HOU Ming, HUANG Yi-feng, HE Jian-liang, et al. Speciation and phyto-availability of vanadium in vegetable rhizosphere[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(1): 1353–1357.
- [21] 曾昭华, 廖苏平, 曾雪萍. 中国癌症与土壤环境中钒元素的关系[J]. 吉林地质, 2002, 21(3): 93–98.
- ZENG Zhao-hua, LIAO Su-ping, ZENG Xue-ping. The relation between the cancer in China and V element in the soil environment[J]. *Jilin Geology*, 2002, 21(3): 93–98.
- [22] Weg W. Salinity dependence of vanadium toxicity against the Brackish water hydroid[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2001, 48(1): 18–26.
- [23] Chen Zuliang, Gary Owens. Trends in speciation analysis of vanadium in environmental samples and biological fluids; A review[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2008, 607: 1–14.
- [24] 张华峰, 杨晓华. 枸杞叶的生物活性成分及其在食品工业中的应用[J]. 食品工业科技, 2010, 31(2): 369–373.
- ZHANG Hua-feng, YANG Xiao-hua. Bioactive substances in *Lycium* leaves and their application in food industry[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2010, 31(2): 369–373.
- [25] 廖斌, 邓冬梅, 杨兵, 等. 铜在鸭跖草细胞内的分布和化学形态研究[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2004, 43(2): 72–75, 80.
- LIAO Bin, DENG Dong-mei, YANG Bing, et al. Subcellular distribution and chemical forms of Cu in *Commelina communis*[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2004, 43(2): 72–75, 80.
- [26] Windham L, Weis J S, Weis P. Lead uptake, distribution, and effects in two dominant salt marsh macrophytes, *Spartina alterniflora* (cordgrass) and *Phragmites australis* (common reed)[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2001, 42: 811–816.
- [27] Tanhan P, Kruatrachue M, Pokethitiyook P, et al. Uptake and accumulation of cadmium, lead and zinc by Siam weed[J]. *Chemosphere*, 2007, 68(2): 323–329.
- [28] Tiwari K K, Singh N K, Patel M P, et al. Metal contamination of soil and translocation in vegetables growing under industrial wastewater irrigated agricultural field of Vadodara, Gujarat, India[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2011, 74: 1670–1677.
- [29] Pilar Zornoza, Saúl Vázquez, Saúl Vázquez. Cadmium stress in nodulated white lupin; Strategies to avoid toxicity[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2002, 40: 1003–1009.
- [30] Wojcik M, Vangronsveld J D, Haen J, et al. Cadmium tolerance in *Thlaspi caerulescens* II: Localization of cadmium in *Thlaspi caerulescens*[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2005, 53: 163–171.
- [31] 张玉秀, 柴团耀, Gerard Burkard. 植物耐重金属机理研究进展[J]. 植物学报, 1999, 41(5): 453–457.
- ZHANG Yu-xiu, CAI Tuan-yao, Gerard Burkard. Mechanisms of plant tolerance to heavy metals[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 1999, 41(5): 453–457.
- [32] Kramer U, Cotte-Howells J D, Charnock J M, et al. Free histidine as a metal chelator in plants that accumulate nickel[J]. *Nature*, 1996, 379(15): 635–638.
- [33] Sangner S, Kneer R, Wanner G, et al. Hyperaccumulation, complexation and distribution of nickel in *Sebertia acuminata*[J]. *Phytochemistry*, 1998, 47: 339–347.
- [34] Hayens R J. Ion exchange properties of roots and ionic interactions within the root POPLsm: Their role in ion accumulation by plants[J]. *The Botanical Review*, 1980, 46: 75–99.
- [35] Chardonnens A N, Bookum W M, Kuijper L D J, et al. Distribution of cadmium in leaves of cadmium tolerant and sensitive ecotypes of *Silene vulgaris*[J]. *Plant Physiology*, 1999, 104(1): 75–80.