

DOI: 10.11931/guihaia.gxzw201703016

引文格式: 李志刚, 杨幽, 安芮辰, 等. 铬污染人工湿地薏米对铬的积累和分布 [J]. 广西植物, 2018, 38(6): 681-686
LI ZG, YANG Y, AN RC, et al. Accumulation and distribution of chromium in *Coix lacryma-jobi* in constructed wetland treated with domestic sewage [J]. *Guihaia*, 2018, 38(6): 681-686

铬污染人工湿地薏米对铬的积累和分布

李志刚, 杨幽, 安芮辰, 李琼, 李素丽*, 梁和, 李正文

(广西大学农学院, 南宁 530005)

摘要: 通过桶栽构筑微型垂直流人工湿地, 在生活污水中添加不同浓度的 Cr^{6+} (0、20、40 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 用 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 配置), 研究了在铬 (Cr) 污染条件下薏米不同器官和亚细胞水平对铬的积累及分布。结果表明: 薏米根茎叶铬含量均随铬处理浓度的提高和处理时间的延长而显著增加, 根部铬含量最高, 其次是叶片, 茎部铬含量最低。随着铬处理浓度的增加和时间的延长, 细胞壁和液泡中的铬含量大幅上升, 但细胞器中铬含量上升幅度较低, 根部细胞壁、细胞器、可溶部分及液泡铬含量均显著大于茎、叶相关细胞组分, 根、茎、叶亚细胞水平铬含量分布均依次为细胞壁>液泡>细胞器。其中, 细胞壁铬含量极显著大于液泡以及其他细胞器, 薏米根部把大部分铬隔离在细胞壁中, 从而降低了地上部分对铬的吸收, 导致地上部分干重、鲜重的受抑制程度均低于根系, 表明根部细胞壁是降低铬在薏米体内积累的重要屏障, 也是薏米在低浓度铬胁迫下能够存活的根本保证。

关键词: 铬, 薏米, 亚细胞水平, 人工湿地, 转运系数

中图分类号: Q948 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3142(2018)06-0681-06

Accumulation and distribution of chromium in *Coix lacryma-jobi* in constructed wetland treated with domestic sewage

LI Zhigang, YANG You, AN Ruichen, LI Qiong, LI Suli*, LIANG He, LI Zhengwen

(College of Agriculture, Guangxi University, Nanning 530005, China)

Abstract: Vertical flow wetland microcosms (VFWM) treated with domestic sewage were set up to study the accumulation and distribution of chromium (Cr) in organs (roots, stems and leaves) and subcellular compounds of *Coix lacryma-jobi*. 0, 20, 40 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ of $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ were added into domestic sewage, respectively. The results showed that the content of Cr in the plants was increased significantly with the prolong of Cr^{6+} stress and the increase of Cr^{6+} concentration, and the Cr content in the root was the highest, followed by leaves and stems. Cr concentrations in cell walls and vacuoles were increased significantly with Cr^{6+} exposure, but Cr content in organelles was lower than that of cell walls and vacuoles. Cr concentrations in cell walls, organelles and vacuoles of the roots were significantly higher than those of stems and leaves. The distributions of

收稿日期: 2017-09-24

基金项目: 国家自然科学基金(21167002) [Support by the National Natural Science Foundation of China(21167002)]。

作者简介: 李志刚(1969-), 男(壮族), 广西蒙山人, 博士, 教授, 主要从事植物逆境生理生态研究, (E-mail) lizhigangnn@163.com。

*通信作者: 李素丽, 博士, 副教授, 主要从事植物逆境生理生态研究, (E-mail) lisuli88@163.com

Cr concentration from the highest to the lowest were cell walls, vacuoles and cellorgans. Under Cr stress, most Cr was fixated on the cell walls of the roots, thereby limited further transportation of Cr to stems and leaves and reduced the toxicity of Cr to shoots. *C. lacryma-jobi* can absorb Cr effectively in the wastewater. Cell wall was one of the important physiological mechanisms for chromium detoxification in *C. lacryma-jobi*.

Key words: chromium, *Coix lacryma-jobi*, subcellular, constructed wetland, transfer coefficient

铬污染是世界性问题,主要为人类活动导致的。广西是有色金属之乡,矿产资源极为丰富,随着东部发达地区落后产业如电镀、印染、皮革产业的转移,加上矿产资源开发过程中对于废渣处理不科学,导致废水中铬污染事件时有发生,也导致耕作区重金属污染,通过对广西某地受污染地区粮食进行检测,发现玉米、水稻等作物中铬(Cr)含量超过国家标准(赖燕平等,2007;唐文杰等,2015;吴洋等,2015)。在环境中,铬常以三价、六价化合物形式出现,一般认为三价铬是无毒性的,而六价铬溶解度大,迁移性大,毒性很强(黄建祥等,2013),用含铬的水源灌溉是耕地铬污染的主要来源,最终导致粮食中铬的超量积累。因此,加强对铬污染水体的治理,是降低农作物重金属积累的重要途径。

利用人工湿地进行水体重金属污染治理,是当今国内外研究的热点。李志刚等(2011)的研究表明,生活污水灌溉条件下,薏米人工湿地对生活污水中的 $10\sim 20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 Cr^{6+} 具有很高的去除能力,在此浓度下薏米能够维持正常生长。布银瑶(2011)通过配制含铬胁迫的营养液对薏米影响的研究表明,营养液中 Cr^{6+} 超过 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时薏米的生长就会受到抑制,表明生活污水灌溉条件下,薏米对铬的吸收和分配与单纯营养液培养条件下可能有较大的差别。推测生活污水条件下,铬在植物体内的分布可能主要在质外体空间,而在代谢旺盛的原生质部位分布较少,从而导致对薏米的伤害较低。重金属污染条件下植物体内的积累、分配及去除,以及对植物的生长状况具有重要影响。植物对重金属的吸收积累特性也与其在亚细胞水平分布密切相关(杨素勤等,2015),细胞壁是重金属积累的一个重要位点,也是防止重金属在细胞内过量积累的重要屏障。如香蒲根的细胞壁中镉含量占细胞总镉量的50%(游少鸿等,2016)。小麦、芦苇根部大部分Pb以难溶状态存在于细胞壁,减弱了Pb

向地上部分的迁移,细胞壁的固持作用可有效减弱地上部分的毒害(杨素勤等,2015;白雪等,2014)。生活污水条件下,薏米人工湿地对生活污水中的铬有更好的净化效果,且薏米能够维持较好的生长状态(李志刚等,2010,2011),可能与铬在薏米体内的分配和积累与植株对铬的耐受性有密切关系,但对于生活污水条件下铬在植物体内组织和细胞水平积累和分配规律的相关研究较为少见,还须进一步的深入研究。本研究通过模拟垂直流人工湿地环境,研究生活污水条件下,薏米对铬的积累及分配,以及铬亚细胞分布变化情况,为人工湿地修复铬污染水体提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

参考李志刚等(2011)构建微型垂直流人工湿地系统。试验于2016年在广西大学农学院教学科研基地塑料大棚内进行。供试材料取自广西农业科学院种子资源所的野生种薏米,幼苗种在模拟垂直流人工湿地系统桶载设备中,桶高28 cm,以鹅卵石(直径3~5 cm)铺在桶底,厚度约10 cm,上部铺厚度13 cm的河沙作为基质。每桶种4~5株生长状况一致的扦插苗。供试污水来自广西大学东校园生活污水,试验过程中水质稳定。污水主要指标含量:氮为 $7.136\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,磷为 $0.98\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,钾为 $6.6\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,COD为 $120\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,pH值为6.8。污水中铬的本底水平为 $0.02\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,基质中铬本底含量为 $17.35\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

1.2 方法

薏米扦插苗长至3~4片叶时,移入人工湿地模拟系统,每桶3株,利用不含铬的生活污水进行培养,2016年4月初待长势稳定后进行不同铬浓度(0、20、40 $\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,以 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 配置)胁迫处理。采

用进水 3 d、落干 4 d 的间歇式进水方法, 每处理重复 3 次。

1.3 取样

分别于处理后第 5 周、第 14 周取样, 并把根、茎、叶分开, 用去离子水冲洗干净并吸干表面水分, 装入样品袋, 4 ℃ 下保鲜带回实验室, 一部分立即进行实验, 另一部分进行烘干处理。

1.4 测定

1.4.1 薏米不同器官(根、茎、叶)中铬含量测定 铬含量的测定参考王爱云等(2012)的方法, 称取植物干样 0.3 g 加入体积比为 4:1 的浓硝酸、浓高氯酸混合液进行消解。用 0.2% 的硝酸定容至 50 mL, 用原子吸收光谱仪(FAAS)测定各组分中 Cr 的含量。

1.4.2 薏米各器官铬转运系数的计算 参考周启星和宋玉芳(2004)的方法进行不同器官中铬转运系数的计算, 通过计算各器官间铬含量的比值, 得出薏米各器官铬元素的转运系数, 不同器官之间的转运系数反映铬在器官之间转移能力的强弱。“地上部/根”反映的是重金属从根系转移到地上部的能力, “茎/根”和“叶/根”分别表示重金属由根系向茎、叶转移的能力。

1.4.3 铬在薏米不同器官(根、茎、叶)亚细胞中分布 参考杨居荣等(1999), 不同细胞组分的分离采用差速离心法, 称取鲜样 6 g, 用液氮研磨成粉末状, 加入 20 mL 提取液(由 250 mmol · L⁻¹蔗糖 + 50 mmol · L Tris-HCl 缓冲液 pH = 7.5, 1.0 mmol · L⁻¹的二硫赤藓糖醇 DTE 配制而成), 4 ℃ 进行差速离心以分离细胞壁(Fb)、液泡及可溶性物质(Fy)、细胞器及细胞核(Fq)。采用王爱云等(2012)的消解法, 分别进行 HNO₃-HClO₄ 硝化处理, 用 0.2% 的硝酸定容至 50 mL, 用原子吸收光谱仪(FAAS)测定各组分中 Cr 的含量。

1.5 统计分析

数据处理采用 Excel 2016 和 SPSS 21 软件进行统计和分析。

2 结果与分析

2.1 不同铬浓度处理对下薏米根茎叶中铬含量的影响

如表 1 所示, 茎、叶、根之间铬含量均随铬处

理浓度和处理时间的延长而提高, 根中铬含量显著大于茎和叶。对照薏米根系铬含量显著大于茎叶, 茎叶之间差异不显著, 而在 20 和 40 mg · L⁻¹ 铬处理下, 不同部位铬含量均呈根 > 叶 > 茎的趋势。与对照相比, 处理 5 周时, 在 20 和 40 mg · L⁻¹ 铬处理下, 根、茎、叶铬含量分别是对照的 2.11 倍和 2.98 倍、1.31 倍和 1.64 倍、1.37 倍和 2.00 倍。而在处理 14 周时, 在 20 和 40 mg · L⁻¹ 处理条件下, 根、茎、叶铬含量分别是对照的 2.91 倍和 4.47 倍、1.61 倍和 1.90 倍、1.90 倍和 2.00 倍。总体来看, 随着胁迫时间延长, 植物根、茎、叶含铬量都随时间延长而含量增加, 40 mg · L⁻¹ 浓度下, 根系中铬积累增加量显著大于茎和叶, 茎、叶中铬含量的增加量均显著低于根系。

表 1 铬在薏米体内不同器官的积累量

Table 1 Accumulation of chromium in different organs of plant

处理时间 Treatment time (week)	铬浓度 Cr concentration (mg · L ⁻¹)	根 Root (mg · kg ⁻¹)	茎 Shoot (mg · kg ⁻¹)	叶 Leaf (mg · kg ⁻¹)
5	0	127.1±14.1a	99.8±7.9b	95.6±0.2b
	20	268.1±29.0a	131.7±10.1c	151.1±3.0b
	40	379.0±3.8a	163.6±9.0c	190.8±17.1b
14	0	141.3±12.1a	111.4±10.8b	115.6±7.5b
	20	411.9±36.1a	178.9±18.2c	219.2±14.9b
	40	632.0±64.0a	212.0±4.4b	232.3±17.7b

注: 数据为平均值±标准差, n=3; 小写字母表示同一行相比较的显著性差异(P<0.05)。下同。

Note: Data in the table represent $\bar{x} \pm s$, n=3; Different small letters in the same line indicate significant differences(P<0.05). The same below.

2.2 不同铬浓度处理对薏米各器官转运系数的影响

由表 2 可知, 各处理地上部/根的转运系数均大于 0.5。不同铬处理浓度相比较, 在处理 5 周时, 在 20 和 40 mg · L⁻¹ Cr⁶⁺ 处理下, 地上部/根转运系数均显著大于茎/根和叶/根, 但均显著低于对照, 茎/根和叶/根比之间差异不显著; 在 20 和 40 mg · L⁻¹ Cr⁶⁺ 处理之间差异不显著, 处理时间的

延长,到了处理 14 周,地上部/根、茎/根、和叶/根比均随处理浓度的提高而显著下降,40 mg · L⁻¹ Cr⁶⁺处理下地上部/根下降幅度最大,不同部位转运系数大小依次为地上部/根>叶/根>茎/根比,转移至叶片的铬相对较多。

表 2 不同浓度铬对薏米体内铬转运系数的影响

Table 2 Transfer coefficient of Cr in plants with different concentrations of Cr⁶⁺ exposure

处理时间 Treatment time (week)	铬浓度 Cr concentration (mg · L ⁻¹)	地上部/根 Shoot/ Root	茎/根 Stem/ Root	叶/根 Leaf/ Root
5	0	1.54±0.135a	0.78±0.072b	0.75±0.071b
	20	0.98±0.089a	0.49±0.045b	0.49±0.053b
	40	0.94±0.078a	0.43±0.032c	0.5±0.045b
14	0	1.61±0.132a	0.79±0.065b	0.82±0.076b
	20	0.97±0.085a	0.43±0.023c	0.53±0.047b
	40	0.7±0.067a	0.34±0.026b	0.37±0.035b

2.3 不同铬浓度胁迫下铬在薏米不同器官亚细胞水平的分布

由表 3 可知,根、茎、叶中 Fb、Fy、Fq 中的铬含量均随铬处理浓度的提高和处理时间的延长而增大。其中,Fb 中铬含量最高,Fy 次之,Fq 含量最低,同一时间段,三者之间差异极显著($P<0.05$)。

不同部位相比较,根系各细胞组分铬含量均显著大于茎、叶,Fb 铬占总量的 57%~77%,根系和叶片 Fb 铬含量所占总量的比例较高,但根和叶片 Fb 铬含量所占总量比例差异不显著;Fy 铬占总量的 12.5%~30%,低浓度处理条件下以及铬处理初期 Fy 铬含量占比较高,但随处理浓度的提高和处理时间的延长,Fy 铬含量呈下降的趋势;Fq 铬占总量的 9.9%~14.1%,根系中 Fq 铬含量显著低于茎、叶中 Fq 铬含量。

随着处理时间的延长和浓度的提高,根不同细胞器组分铬含量均呈显著提高趋势,铬处理后第 5 周,在 20 和 40 mg L⁻¹条件下,根部 Fb、Fq、Fy 铬含量分别为对照的 3.1 倍和 10 倍、2 倍和 5.2 倍、3.86 倍和 8.4 倍,随着处理时间的延长,到铬处

表 3 不同铬浓度处理下铬在薏米根茎叶的亚细胞分布
Table 3 Subcellular distribution of chromium in roots, stems and leaves with different concentrations of Cr⁶⁺ exposure

	处理时间 Treatment time (week)	铬浓度 Cr concentration (mg · L ⁻¹)	细胞壁 Fb (mg · kg ⁻¹)	细胞器 Fq (mg · kg ⁻¹)	液泡 Fy (mg · kg ⁻¹)	总量 Total (mg · kg ⁻¹)	
根 Root	5	0	10.03± 0.14a	2.50± 0.19c	3.74± 0.19b	16.26	
		20	31.12± 1.53a	5.00± 0.34c	14.44± 0.87b	50.56	
		40	100.65± 8.30	13.11± 0.94	22.89± 0.98	136.64	
	14	0	19.31± 1.38a	4.32± 0.34c	6.72± 0.10b	30.35	
		20	130.97± 10.33a	15.24± 1.28c	22.12± 1.62b	168.33	
		40	175.62± 13.50a	29.20± 1.45c	38.14± 1.64b	242.96	
	茎 Stem	5	0	3.06± 0.12a	0.79± 0.05c	1.79± 0.00b	5.65
			20	9.23± 0.43a	2.54± 0.06c	4.28± 0.25b	16.05
			40	20.12± 0.53a	5.50± 0.12c	6.01± 0.35b	31.63
14		0	9.67± 0.91a	1.62± 0.30c	4.35± 0.77b	15.64	
		20	26.10± 1.63a	6.22± 0.39c	13.95± 0.69b	46.26	
		40	53.11± 2.04a	9.68± 0.73c	19.03± 0.37b	81.82	
叶 Leaf	5	0	1.98± 0.10a	0.72± 0.07c	1.51± 0.04b	4.21	
		20	18.39± 1.46a	2.96± 0.30c	5.07± 0.38b	26.42	
		40	29.16± 1.87a	6.40± 0.27c	8.43± 0.25b	43.98	
	14	0	12.38± 0.55a	2.57± 0.06c	5.39± 0.19b	20.35	
		20	42.88± 0.22a	7.61± 0.84c	8.97± 0.21b	59.46	
		40	60.45± 3.54a	11.65± 0.76c	13.54± 0.98b	85.64	

理后第 14 周,根部 Fb、Fq、Fy 铬含量分别为对照的 6.7 倍和 9.1 倍、3.5 倍和 6.8 倍、3.2 倍和 5.7 倍,随着处理浓度的增加和处理时间的延长,根系不同细胞组分铬积累增加量依次为 Fb>Fy>Fq,茎、叶中不同细胞组分铬积累的变化趋势与根系相类似,但茎、叶中铬积累总量均显著低于根系。

3 讨论与结论

本研究结果表明, 随时间延长, 薏米根部铬浓度显著提高, 而茎部、叶部都对铬吸收量显著低于根系。可见, 与茎、叶相比, 根系对铬元素有更高的吸收积累能力, 是铬积累的主要部位。这与其他学者研究结果一致, 很多植物对重金属的积累大部分都集中在根部, 从而避免将过量的重金属导入脆弱性器官和敏感性细胞器中储存(董萌等, 2013)。转运系数反映环境中的重金属进入到植物体后, 由根系向地上部分(茎、叶、花、果实)转移强弱的能力(马宏瑞等, 2010)。本研究表明, 铬从根部到地上部的转运系数随处理浓度的增加而呈减小的趋势, 不会过多向地上部分转移, 可能是重金属污染环境, 植物缓解重金属毒害作用的重要机制。这与郑施雯(2009)的研究结果发现铬的超积累植物对铬的吸收过程中大部分都是在根部积累, 以避免过多毒害地上部分的结论相似。

细胞壁既是重金属进入植物细胞的第一道屏障, 又是根系吸收重金属往地上部分运输的重要门户。细胞壁的主要成分果胶质, 拥有很强的阳离子结合能力, 可以为细胞壁结合重金属离子提供足够的离子交换点, 从而避免进入到植物体内的原生质中, 以减缓植物细胞的受害程度(Baxteri et al, 2009)。在本研究中, 在不同处理时期、不同铬浓度胁迫下, 55%~70%的铬积累在在薏米细胞壁中, 其含量显著大于细胞器及可溶性部分的铬含量, 表明根系细胞壁是影响人工湿地植物薏米对铬吸收和迁移转运的重要影响因素, 也这可能是生活污水条件下低浓度铬胁迫薏米能够正常生长的重要原因之一。

随着重金属处理浓度增大和处理时间的延长, 重金属离子经细胞壁进入细胞质内, 主要是以游离态的形式存在的, 但在细胞内不能以游离态大量存在(Sarret et al, 2002), 可以与一些大分子及氨基酸结合成络合物储存在细胞器及细胞核中, 以降低植物体内自由态的重金属离子。本研究结果表明, 随着茎、叶细胞中 Cr 浓度的增加, 可溶部分(主要是液泡)的积累量会越来越多, 尤其

在茎、叶部变化最为显著, 说明液泡中可溶部分是铬积累的重要部位, 也是植物减轻铬毒害的重要机制, 这与薛永等(2014)研究的结论一致。王爱云等(2012)的研究表明, 随 Cr^{6+} 处理时间延长, 植物体内自由基积累加剧, 酶活性降低。我们的前期研究表明, 高浓度铬胁迫下, 叶片的抗氧化系统的受损加剧, 导致薏米生长受限(康亮等, 2014)。这可能与高浓度铬胁迫下, 细胞质铬含量增加, 加剧了对细胞的伤害有密切的关系, 本研究结果表明, 高浓度各胁迫下, 细胞器铬含量显著增加, 这可能是导致高浓度铬胁迫下, 薏米抗氧化系统受损加剧, 生长受限的重要原因之一。

综上所述, 薏米可以有效地吸收重金属铬, 将铬主要集中在根部, 地下部向地上部转移能力也随处理时间延长, 胁迫浓度增加而下降。根部组织细胞将大部分铬隔离在细胞壁中, 细胞壁是其体内积累铬的一个重要位点, 而体内过多的铬则分布在液泡, 从而降低铬在重要细胞器的积累, 以保护细胞免受铬的毒害。

参考文献:

- BAI X, CHEN YH, GENG K, et al, 2014. Accumulation, subcellular distribution and chemical forms of cadmium in *Viola tricolor* L. [J]. Acta Sci Circum, 34(6):1600-1605. [白雪, 陈亚慧, 耿凯, 等, 2014. 镉在三色堇中的积累及亚细胞与化学形态分布 [J]. 环境科学学报, 34(6):1600-1605.]
- BAXTER I, HOSMANI PS, RUS A, et al, 2009. Root suberin forms an extracellular barrier that affects water relations and mineral nutrition in *Arabidopsis* [J]. PLoS Gene, 5(5): e1000492.
- BU YY, 2011. The Physiological mechanism of *Coix aquatic* Roxb responding to different chromium (VI) concentration [D]. Nanning: Guangxi University. [布银瑶, 2011. 薏米不同浓度铬(VI)响应的生理机制 [D]. 南宁: 广西大学]
- DONG M, ZHAO YL, KU WZ, et al, 2013. Cadmium accumulation and subcellular distribution in different organs of *Artemisia selengensis* [J]. Bull Bot, 48(4):381-388. [董萌, 赵运林, 库文珍, 等, 2013. 萎蒿对镉的富集特征及亚细胞分布特点 [J]. 植物学报, 48(4):381-388.]
- GU CH, SHAN ZX, DING SG, 2008. Investigation for absorption of heavy-metals by plants in chromium-pollution region [J]. J SW Chin Norm Univ (Nat Sci Ed), 33(6):48-51. [古昌红, 单振秀, 丁社光, 2008. 铬污染地区植物吸附重金属的研究 [J]. 西南师范大学学报(自然科学

- 版), 33(6): 48-51.]
- HUANG JX, LI SL, LI ZY, et al, 2013. Effects of Cr⁶⁺ on microorganism population in *Coix aquatica* constructed wetlands [J]. *Guihaia*, 33(2): 253-257. [黄建祥, 李素丽, 吕钊彦, 等, 2013. 六价铬对薏米人工湿地微生物群落数量的影响 [J]. *广西植物*, 33(2): 253-257.]
- KANG L, LI SL, LI Q, et al, 2014. Purification effect of *Coix aquatica* Roxb on sanitary sewage with chromium [J]. *J Southern Agric*, 45(1): 63-66 [康亮, 李素丽, 李琼, 等, 2014. 薏米对含铬污水的净化作用 [J]. *南方农业学报*, 45(1): 63-66.]
- LAI YP, LI MS, YANG SX, et al, 2007. Heavy metal concentrations and pollution assessment of edible crops grown on restored manganese mine lands in Guangxi, South China [J]. *Chin J Appl Ecol*, 18(8): 1801-1806. [赖燕平, 李明顺, 杨胜香, 等, 2007. 广西锰矿恢复区食用农作物重金属污染评价 [J]. *应用生态学报*, (8): 1801-1806.]
- LI ZG, HUANG HL, LI SL, et al, 2010. Effects of chromium on purification of domestic wastewater and its accumulation in constructed wetlands [J]. *J Agro-Environ Sci*, 29(7): 1362-1368. [李志刚, 黄海莲, 李素丽, 等, 2010. 铬对人工湿地净化生活污水的影响及铬积累规律 [J]. *农业环境科学学报*, 29(7): 1362-1368.]
- LI ZG, LI SL, MEI LM, et al, 2011. Chromium purification effects on domestic wastewater and physiological changes of *Canna indica* linn. and *Phragmites australis* L. in constructed wetlands [J]. *J Agro-Environ Sci*, 30(2): 358-365. [李志刚, 李素丽, 梅利民, 等, 2011. 美人蕉 (*Canna indica* Linn.) 和芦苇 (*Phragmites australis* L.) 人工湿地对含铬生活污水的净化效果及植物的生理生态变化 [J]. *农业环境科学学报*, 30(2): 358-365.]
- MA HR, REN JH, JI JF, et al, 2010. Distribution and enrichment of heavy metal in sediments and soils in nanjing section of the yangtze river [J]. *Admin Techniq Environ Mon*, 22(2): 32-36. [马宏瑞, 任静华, 季俊峰, 等, 2010. 长江南京段近岸沉积物和土壤中重金属分布特征分析 [J]. *环境监测管理与技术*, 22(2): 32-36.]
- SARRET G, SAUMITOU LP, BERT V, et al, 2002. Forms of zinc accumulated in the hyperaccumulator *Arabidopsis halleri* [J]. *Plant Physiol*, 130(4): 1815-1826.
- TANG WJ, HUANG JB, YU Q, et al, 2015. Analysis on the content of heavy metal in the food crops and assessment on human health risk of manganese mine [J]. *Environ Sci & Technol*, S1: 464-468. [唐文杰, 黄江波, 余谦, 等, 2015. 锰矿区农作物重金属含量及健康风险评估 [J]. *环境科学与技术*, S1: 464-468.]
- VAZQUEZ MD, BARCELO J, POSCHENRIEDER C, et al, 1992. Localization of zinc and cadmium in *Thlaspi caerulescens* (Brassicaceae), a metallophyte that can hyperaccumulate both metals [J]. *J Plant Physiol*, 140(3): 350-355.
- WANG AY, HUANG SS, ZHONG GF, et al, 2012. Effect of Cr(VI) stress on growth of three herbaceous plants and their Cr uptake [J]. *Environ Sci*, 33(6): 2028-2037. [王爱云, 黄姗姗, 钟国峰, 等, 2012. 铬胁迫对3种草本植物生长及铬积累的影响 [J]. *环境科学*, 33(6): 2028-2037.]
- WU Y, YANG J, ZHOU X, et al, 2015. Risk assessment of heavy metal contamination in farmland soil in Du'an autonomous county of Guangxi Zhuang Autonomous Region, China [J]. *Environ Sci*, 36(8): 2964-2971. [吴洋, 杨军, 周小勇, 等, 2015. 广西都安县耕地土壤重金属污染风险评估 [J]. *环境科学*, 36(8): 2964-2971.]
- XUE Y, WANG YY, YAO QH, et al, 2014. Research progress of plants resistance to heavy metal Cd in soil [J]. *Environ Sci*, 23(3): 528-534. [薛永, 王苑嫫, 姚泉洪, 等, 2014. 植物对土壤重金属镉抗性的研究进展 [J]. *生态环境学报*, 23(3): 528-534]
- YANG JR, ZHA Y, LIU H, et al, 1999. The distribution and chemical forms of Cd, Cu and Pb in polluted seeds [J]. *Chin J Environ Sci*, 13(4): 263-268. [杨居荣, 查燕, 刘虹, 等, 1999. 污染稻、麦籽实中Cd、Cu、Pb的分布及其存在形态初探 [J]. *中国环境科学*, 13(4): 263-268.]
- YANG SQ, CHENG HK, JING XX, et al, 2015. Subcellular distribution and chemical-extraction of lead in wheat with different characteristics of lead absorption [J]. *Sci Agric Sin*, 48(14): 2848-2856. [杨素勤, 程海宽, 景鑫鑫, 等, 2015. 不同铅吸收特性小麦Pb的亚细胞分布和化学提取态 [J]. *中国农业科学*, 48(14): 2848-2856.]
- YOU SH, TENG Y, MA LL, et al, 2016. Characteristics of Cd uptake and chemical forms in *Typha angustifolia* [J]. *Environ Eng*, 34(8): 58-61. [游少鸿, 腾云, 马丽丽, 等, 2016. 香蒲吸收镉的途径及体内镉化学形态研究 [J]. *环境工程*, 34(8): 58-61.]
- ZHENG SW, 2009. Screening research on Cr hyperaccumulators [D]. Changsha: Hunan University. [郑施雯, 2009. 耐土壤铬污染植物种质筛选研究 [D]. 长沙: 湖南大学.]
- ZHOU QX, SONG YF, 2004. Principles and methods of remediation of contaminated soil [M]. Beijing: Science Press: 177-179. [周启星, 宋玉芳, 2004. 污染土壤修复原理与方法 [M]. 北京: 科学出版社: 177-179.]