

陈冬霞, 刘宏伟, 梁红, 等. 几种草本植物对面源微污染重金属的净化能力[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(12):2500–2505.

CHEN Dong-xia, LIU Hong-wei, LIANG Hong, et al. Ability of herbaceous plants to remove heavy metals from non-point sources of pollution in riparian buffer zones[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(12):2500–2505.

几种草本植物对面源微污染重金属的净化能力

陈冬霞¹, 刘宏伟¹, 梁红^{1,2}, 沈海龙¹, 高大文^{1,2*}

(1.东北林业大学林学院, 哈尔滨 150040; 2.哈尔滨工业大学环境学院, 哈尔滨 150090)

摘要:为研究草本植物对城市面源污染重金属的去除能力,选择北方地区常见的3种草本植物紫花苜蓿(*Medicago sativa*)、早熟禾(*Poa pratensis*)、黑麦草(*Lolium perenne*),通过水培实验考察了3种草本植物对微污染重金属Cu、Cd、Pb的净化能力。研究结果表明,3种草本植物对微污染重金属Cu、Cd、Pb均有一定的净化效果。其中对Cu、Pb的去除率随污染物浓度的升高而升高,对Cd的去除率随Cd浓度的升高而下降。3种草本植物在不同生长期对面源微污染重金属污染物Cu、Cd、Pb的净化效果表现出不同特点:黑麦草在生长期去除率最高,分别为56.85%、63.72%、55.03%;紫花苜蓿幼苗期去除率最高,分别为41.98%、45.37%、68.41%;早熟禾生长期去除率最高,分别为51.25%、33.83%、26.55%。综合分析,3种草本植物可以作为滨岸缓冲带的备选植物。

关键词:草本植物;重金属;微污染;净化能力;滨岸缓冲带

中图分类号:X52 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2017)12-2500-06 doi:10.11654/jaes.2017-0790

Ability of herbaceous plants to remove heavy metals from non-point sources of pollution in riparian buffer zones

CHEN Dong-xia¹, LIU Hong-wei¹, LIANG Hong^{1,2}, SHEN Hai-long¹, GAO Da-wen^{1,2*}

(1.School of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China; 2.School of Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract:To study the ability of herbaceous plants to remove heavy metal micropollutants in the northeastern region of China, *Medicago sativa*, *Poa pratensis*, and *Lolium perenne* were selected. The ability of these three species to remove Cu, Cd, and Pb was studied using hydroponic experiments. The results showed that each of these three herbs displayed the ability to remove Cu, Cd and Pb. The removal rate of Cu and Pb increased with increasing exposure levels, while the removal rate of Cd decreased with increasing exposure levels for all three herbs. The removal efficiencies of Cu, Cd and Pb from synthetic rainwater were different for different stages of growth. *Lolium perenne* had a highest removal rates at the growth stage, with a removal efficiency of Cu, Cd and Pb up to 56.85%, 63.72%, and 55.03%, respectively. *Medicago sativa* had the highest removal rate at the seedling stage, with a removal efficiency of Cu, Cd and Pb up to 41.98%, 45.37%, and 68.41%, respectively. *Poa pratensis* also had the highest removal rate in the growth stage, with a removal efficiency of Cu, Cd and Pb up to 51.25%, 33.83%, and 26.55%, respectively. These results demonstrate that these three species may be used as alternative herbaceous plants for riparian buffer zones.

Keywords:herbs; heavy metals; micropollutants; purification ability; riparian buffer zone

近年来,随着我国经济飞速发展,水环境污染日益严重,尤其是城市河流普遍污染严重^[1]。面源污染涉

及范围广、控制难度大,已成为影响河流水质的主要原因^[2]。其中重金属污染具有难降解、隐蔽性强、毒性

收稿日期:2017-04-15 录用日期:2017-08-15

作者简介:陈冬霞(1992—),女,硕士研究生,从事水生态环境修复研究。E-mail:2450896930@qq.com

*通信作者:高大文 E-mail:dawengao@gmail.com

基金项目:科技部“十三五”科技支撑计划项目(2015BAD07B06)

Project supported: The Ministry of Science and Technology Support Project "13th Five-Year"(2015BAD07B06)

大等特点,对水体和土壤造成严重污染^[3]。这些重金属能够通过食物链进入生物体内,严重危害人类及其他生物的健康^[4]。因此,重金属污染成为如今亟待解决的突出环境问题。植物修复用于治理重金属污染具有很好的发展前景^[5]。植物修复技术利用植物对重金属的过滤、吸收、富集等作用实现重金属污染的修复,是一种成本低、效益高、吸附量大、操作简单、不易造成二次污染的独特的绿色修复方法^[6-7]。

滨岸缓冲带作为保护水资源的最佳管理措施之一,对防治非点源污染和防止水土流失具有重要的作用^[8-9]。近年来,国内普遍关注的是滨岸缓冲带对农业面源污染物氮、磷的去除,而对微污染重金属研究较少^[10-11]。植物具有富集和去除面源污染重金属的作用,但由于自身特性不同,各物种对重金属去除及富集能力也有差异^[12]。目前,植物修复重金属污染土壤和水生植物修复水体重金属的研究较多^[13-14],但结合滨岸缓冲带去除地表径流中溶解态重金属污染的研究较少。

本研究以黑麦草、紫花苜蓿、早熟禾 3 种草本植物为研究对象,通过水培实验的方法探究植物对模拟污水中重金属 Cu、Cd、Pb 的去除能力,筛选并探讨对重金属去除能力较佳的实验植物,为构建具有观赏性和污染治理效果的内河滨岸缓冲带提供参考。水培试验是一种快捷、有效的试验方法,虽然其与滨岸缓冲带试验存在差异,但二者的结果仍具有一致性,可有效模拟植物对重金属的去除能力^[15]。

1 材料与方法

1.1 实验材料

根据东北地区地理特征、气候条件、植物特性和滨岸缓冲带特征,通过查阅文献,选择 3 种具有截污能力、水土保持能力、景观价值的本土植物作为实验植物,分别为紫花苜蓿(*Medicago sativa*)、早熟禾(*Poa pratensis*)和黑麦草(*Lolium perenne*)。3 种植物均为典型草坪植物,须根发达,对土壤要求不严格,耐瘠薄。培养过程中,植物的生长期分为三个阶段:幼苗期(第 1 周)、生长期(第 2 周到第 6 周)、成熟期(第 7 周)。

1.2 实验用水

实验采用的人工配水,使用氯化铵(NH₄Cl)、磷酸二氢钾(KH₂PO₄)、硝酸钠(NaNO₃)、氯化镉(CdCl₂·1/2 H₂O)、硝酸铅[Pb(NO₃)₂]、硫酸铜(CuSO₄·5H₂O)(分析纯)进行配制。重金属浓度根据测定的哈尔滨市地表径流中溶解态重金属浓度确定。配水水质见表 1。

表 1 实验用水水质

污染物类型	浓度/mg·L ⁻¹
氨氮	7.02
可溶性磷酸盐	0.98
Cu	0.055±0.005
Cd	0.058±0.010
Pb	0.056±0.007

另配制重金属 Cu、Cd、Pb 低浓度(0.05 mg·L⁻¹)和高浓度(0.08 mg·L⁻¹)的培养液,考察不同浓度下植物对重金属的去除。

1.3 研究方法

本研究采用水培法。设置 4 个处理(黑麦草、紫花苜蓿、早熟禾、无植物空白),每个处理 3 次重复,各处理随机排放。将黑麦草、紫花苜蓿、早熟禾种植在用锡箔纸包好的 150 mL 三角瓶中,锥形瓶中放置 210 mL 的人工配制的污水。实验共进行 7 个周期,每隔 7 d 彻底换水,在第 1、3、5、7 周的第 5 d 取样,并在 24 h 内测定水中残留重金属浓度。另设置 0.05、0.08 mg·L⁻¹ 的重金属浓度处理,每个处理 3 次重复,培养 5 d 后取样测定残留重金属浓度。由于本实验采用的装置较小,为减少水分蒸发和植物蒸腾对浓度的影响,每天添加去离子水,保持水的体积不变。重金属去除率按公式(1)计算。

$$\text{去除率} = (C_0 - C_i) \div C_0 \times 100\% \quad (1)$$

式中: C_0 为初始质量浓度; C_i 为第 i d 的质量浓度。

1.4 分析方法

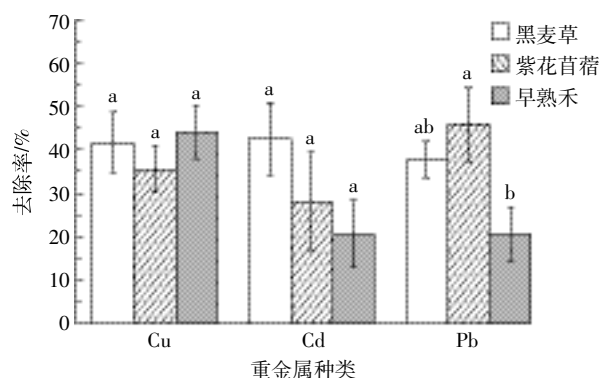
水样中 Cu、Pb、Cd 采用电感耦合等离子体发射光谱(ICP-MS)法测定。在 $\alpha=0.05$ 水平下,应用 SPSS 软件通过方差分析对数据进行显著性检验, $P<0.05$ 时差异显著。

2 结果与讨论

2.1 不同植物对重金属的去除效果

不同植物对 3 种重金属均有不同的净化效果,整个实验过程的平均去除率如图 1 所示。通过单因素方差分析,不同草本植物对重金属 Cu、Cd 的去除率无显著差异,对 Pb 的去除率显著差异。

由图 1 可知,在 Cu 平均浓度为 0.055 mg·L⁻¹ 条件下,早熟禾净化效果最好,平均去除率为 44.03%。而黑麦草和紫花苜蓿对 Cu 的去除率略低于早熟禾,分别为 41.72%、35.55%。但对 Cd 的去除率差别较大。Cd 平均浓度为 0.058 mg·L⁻¹ 时,去除率最高为黑麦草



不同小写字母表示不同植物对同一种重金属的去除率差异显著 ($P < 0.05$)

图1 不同植物对 Cu、Cd、Pb 污染的去

Figure 1 Removal of Cu, Cd and Pb pollution by different plants

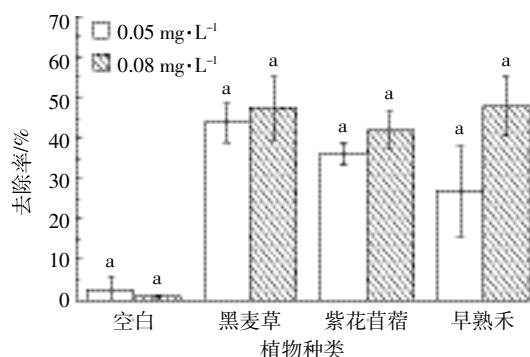
42.41%, 紫花苜蓿和早熟禾分别为 28.14%、20.63%。Pb 平均浓度为 $0.056 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 3 种草本植物对 Pb 的去除率由高到低分别为紫花苜蓿 (45.77%) > 黑麦草 (37.72%) > 早熟禾 (20.52%)。植物作为滨岸缓冲带的重要组成部分, 在处理面源污染重金属的过程中具有非常重要的作用。一方面, 植物可以直接吸收和积累离子态的重金属, 另一方面, 可以通过植物吸附作用和根际分泌物来去除面源污染中的重金属^[16-17]。

2.2 不同浓度下植物对重金属的去除效果

2.2.1 对 Cu 的去除效果

随着 Cu 浓度的变化, 3 种草本植物对 Cu 的去除率也有变化。图 2 为不同浓度下, 3 种草本植物对重金属 Cu 污染的去除率, 不同 Cu 浓度下植物对重金属 Cu 去除率无显著差异 ($P > 0.05$)。

由图 2 可知, 3 种草本植物对 Cu 有较好的净化效果, 且随着 Cu 浓度的增加, 去除率逐渐增加, 且去除率明显比空白高。当 Cu 污染浓度为 $0.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$



不同小写字母表示同种植物不同浓度对重金属的去除率差异显著 ($P < 0.05$)。下同

图2 不同浓度下植物对 Cu 去除率

Figure 2 Removal rate of Cu from plants under different concentrations

时, 黑麦草的去除率最高为 43.75%, 紫花苜蓿和早熟禾分别为 36.25%、26.91%。当 Cu 浓度为 $0.08 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 3 种草本植物去除率差别不大, 早熟禾的最高, 为 48.02%。

Cu 是植物生长发育所必需的微量营养元素, 它是多酚氧化酶、细胞色素氧化酶及抗坏血酸氧化酶等多种酶类的组成成分之一, 因此低浓度的 Cu 对植物生长是有益的^[18]。在本实验浓度范围内, Cu 的浓度越高, 3 种草本植物对 Cu 的去除率越高^[19]。

2.2.2 对 Cd 的去除效果

不同浓度下 3 种草本植物对 Cd 的去除率变化如图 3 所示, 不同 Cd 浓度下植物对 Cd 去除率有显著差异 ($P < 0.05$)。由图 3 可知, 3 种草本植物对 Cd 的去除率明显比空白高, 且随着 Cd 浓度的增加, 去除率降低。当 Cd 浓度为 $0.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 3 种草本植物对 Cd 的去除率表现出一定的差异性, 黑麦草对 Cd 的净化效果最好, 去除率为 47.01%。当 Cd 浓度为 $0.08 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 黑麦草、紫花苜蓿、早熟禾对 Cd 的去除率分别为 35.00%、23.71%、25.35%, 黑麦草去除率最高。

Cd 的浓度越高时, 3 种草本植物对 Cd 污染物的去除率就越低, Cd 的浓度低时, 去除率相对较高。植物对 Cd 存在一个耐受范围, 在该范围内, 植物对 Cd 的去除率随 Cd 浓度的升高而升高, 而超过了耐受范围时, 去除率随 Cd 浓度的升高而降低^[20]。本研究结果可能就是由于 Cd 浓度超过了 3 种草本植物的耐受范围所导致的。在低浓度的 Cd 溶液中, 草本植物可以正常生长并富集 Cd, 但是当 Cd 浓度超过草本植物的耐受范围时, 植物各种功能器官会受到胁迫, 从而导致去除率下降。

2.2.3 对 Pb 的去除效果

植物对重金属 Pb 污染也有一定的去除效果, 且

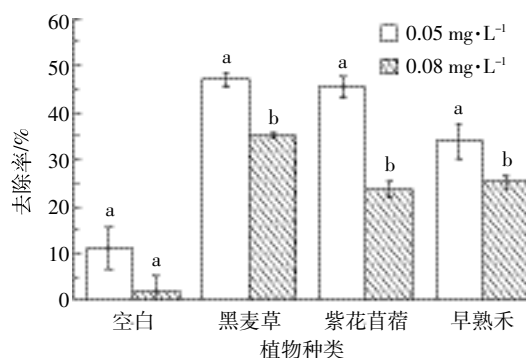


图3 不同浓度下植物对 Cd 的去除率

Figure 3 Removal rate of Cd from plants under different concentrations

Pb 污染浓度不同,去除效果也不同。不同浓度下植物对 Pb 的去除结果如图 4 所示,不同 Pb 浓度下植物对重金属 Pb 去除率无显著差异($P>0.05$)。

由图 4 可知,随着 Pb 浓度增加,3 种草本植物对 Pb 的去除率也增加,且明显比空白高。当 Pb 污染浓度为 $0.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,3 种草本植物对 Pb 的去除率相差不大,由高到低分别为黑麦草(38.98%)>紫花苜蓿(32.45%)>早熟禾(26.68%)。当 Pb 污染浓度为 $0.08 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,紫花苜蓿去除效果最好,去除率为 65.03%。

林芳芳等^[21]研究发现 Pb 培养液浓度越大,植物体富集的 Pb 量越大,本研究结果与其观点一致,Pb 的浓度高时,3 种草本植物对 Pb 污染物的去除率就高,Pb 浓度低时,去除率相对也低。

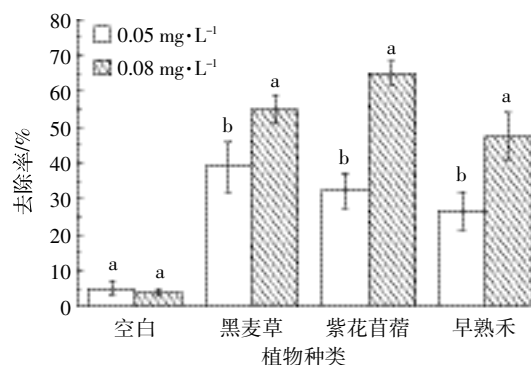


图 4 不同浓度下植物对 Pb 的去除率

Figure 4 Removal rate of Pb from plants under different concentrations

2.3 不同植物生长期对重金属的去除效果

2.3.1 黑麦草不同生长期对重金属的去除效果

植物在不同的生长期,由于植物植株大小、根系等情况不同,对重金属污染的去除结果也不同^[22-23]。

黑麦草在各生长期对重金属 Cu、Cd、Pb 均有一定的去除效果,且随着培养时间延长,黑麦草对 3 种重金属的去除率呈先上升后下降趋势(图 5)。黑麦草在生长期第 5 周时对 Cu 的去除效果最好,去除率为 56.85%,生长期第 3 周时对 Cd、Pb 的去除率最高,分别为 63.72%、55.03%。在实验的前几周,黑麦草对重金属的去除率呈上升趋势,这是由于水培黑麦草幼苗期根系迅速增长,为重金属提供了足够的吸附位点。进入生长期植物生长迅速,生物量增大,能够有效吸收富集水体中的重金属。但随着黑麦草培养时间增加,黑麦草对重金属去除率降低,由于吸附位点有限,植物根系的吸附趋于饱和,此时,黑麦草对水中重金属的去除以吸收为主,且去除率降低^[24]。

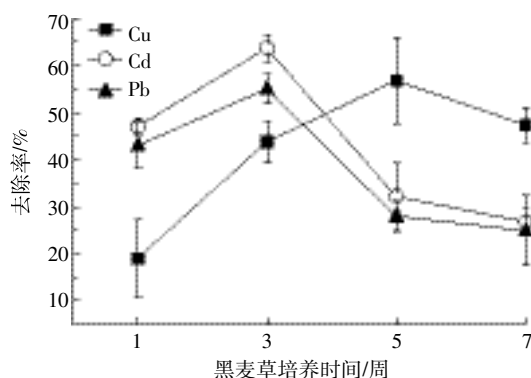


图 5 黑麦草不同生长期对重金属 Cu、Cd、Pb 的去除率

Figure 5 Removal rate of heavy metals Cu, Cd and Pb at different growth stages of *Lolium perenne*

2.3.2 紫花苜蓿不同生长期对重金属的去除效果

紫花苜蓿在各生长期对 3 种重金属均有一定的去除效果,且随着培养时间增加,去除率呈下降趋势(图 6)。紫花苜蓿生长期第 5 周时对 Cu 的去除率最高,为 41.98%,幼苗期第 1 周期时紫花苜蓿对 Cd 和 Pb 的去除效果比其他生长期的效果好,去除率分别为 45.37%、68.41%。整个试验阶段,紫花苜蓿对重金属去除率总体呈下降趋势。一方面由于紫花苜蓿对环境的要求高,水培条件下生长较弱,另一方面是由于重金属对紫花苜蓿的生理代谢有一定的伤害^[25]。

2.3.3 早熟禾不同生长期对重金属的去除效果

早熟禾在各生长期对 3 种重金属均有一定的去除效果,且去除率随时间的增加呈先上升后下降趋势(图 7)。早熟禾在生长期第 3 周时对 Cu、Cd、Pb 的去除效果最好,去除率分别为 51.25%、33.83%、26.55%。

整个试验阶段,早熟禾对重金属 Cu、Cd、Pb 的去除率呈先上升后下降趋势。这一现象可能与植物的生

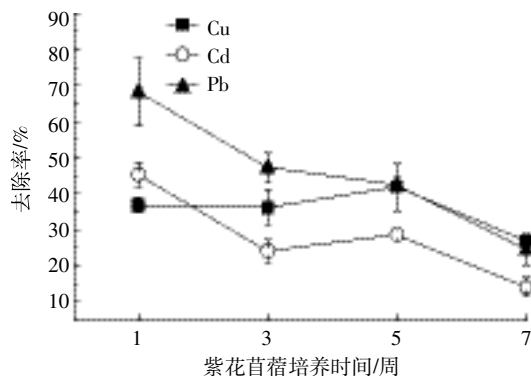


图 6 紫花苜蓿不同生长期对 Cu、Cd、Pb 的去除率

Figure 6 Removal rate of Cu, Cd and Pb at different growth stages of *Medicago sativa*

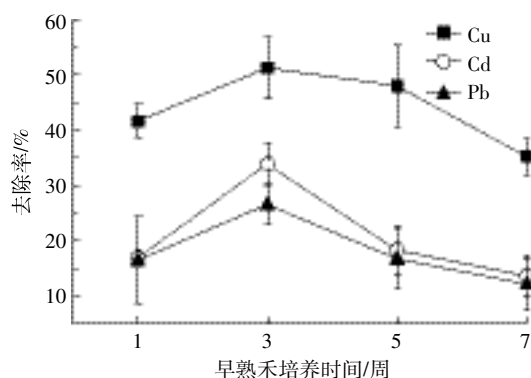


图7 早熟禾不同生长期对 Cu、Cd、Pb 的去除率

Figure 7 Removal rate of heavy metals Cu, Cd and Pb at different growth stages of *Poa pratensis*

长习性和生物量有关,在实验前几周早熟禾的生物量随时间的增加而不断增长。但早熟禾不耐水湿,后期生长状况不良,导致去除率下降。

2.3.4 植物不同生长期对重金属的去除

水培条件下植物对重金属的去除主要通过植物吸收、植物富集、植物吸附及根系微生物活动^[26]。植物与重金属作用时,植物根系首先接触重金属,并对重金属进行吸收,根细胞中存在大量的交换位点,能对重金属进行吸收和固定,另一方面,直接影响根际酸化、沉淀、螯合作用及氧化还原反应,进而影响重金属离子的溶解度和生物可利用性^[27-28];牛之欣等^[29]研究发现生物量大的植物对重金属污染有更好的修复作用。

植物的生长过程中,伴随着一系列的生理生态过程,包括植株高度、根系增长、根际活动增强、生物量积累等。黑麦草和早熟禾在幼苗期时,根系迅速扩展,表面积增大,提供了充足的吸附位点,有助于植物对重金属的吸收;生长期时,植物保持在旺盛生长状态,生物量增大,植物根系扩张;植物成熟期时,生物量以及根系趋于稳定,且由于在水中培养时间较长,根部出现腐烂现象,植物生长状况不佳,从而导致去除率下降。紫花苜蓿对重金属的去除呈下降趋势,是由于紫花苜蓿在水培条件下生长不好,随着水培时间的增加,植物出现根系腐烂、叶片枯黄现象。

3 结论

(1)不同草本植物对3种重金属的去除效果不同。水培条件下,3种草本植物黑麦草、紫花苜蓿、早熟禾对重金属 Cu、Cd、Pb 均有较好的去除效果,可以作为滨岸缓冲带的备选植物。

(2)重金属浓度不同时,3种草本植物对重金属

的去除率也不同。因此,在实际构建缓冲带时可根据不同地区的污染物种类及浓度选择最适植物。

(3)3种草本植物在不同生长期由于植物根系、生物量等不同,对重金属 Cu、Cd、Pb 污染的去除效果不同。

参考文献:

- [1] 程 鹏,李叙勇,苏静君.我国河流水质目标管理技术的关键问题探讨[J].环境科学与技术,2016,39(6):195-205.
CHENG Peng, LI Xu-yong, SU Jing-jun. Study on the key issues of river water quality target management technique in China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 39(6):195-205.
- [2] 崔 键,马友华,赵艳萍,等.农业面源污染的特性及防治对策[J].中国农学通报,2006,22(1):335-340.
CUI Jian, MA You-hua, ZHAO Yan-ping, et al. Characteristic and countermeasures for control and prevention of multiple area-pollution in agriculture[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2006, 22(1):335-340.
- [3] 王宏镔,束文圣,蓝崇钰.重金属污染生态学研究现状与展望[J].生态学报,2005,25(3):596-605.
WANG Hong-bin, SHU Wen-sheng, LAN Chong-yu. Ecology for heavy metal pollution: Recent advances and future prospects[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(3):596-605.
- [4] 黄益宗,郝晓伟,雷 鸣,等.重金属污染土壤修复技术及其修复实践[J].农业环境科学学报,2013,32(3):409-417.
HUANG Yi-zong, HAO Xiao-wei, LEI Ming, et al. The remediation technology and remediation practice of heavy metals-contaminated soil [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(3):409-417.
- [5] Wieshammer G, Unterbrunner R, García T B, et al. Phytoextraction of Cd and Zn from agricultural soils by *Salix* ssp. and intercropping of *Salix caprea* and *Arabidopsis halleri*[J]. *Plant and Soil*, 2007, 298(1/2):255-264.
- [6] 申 华,黄鹤忠,张 皓,等.3种观赏水草对水体镉污染修复效果的比较研究[J].水生生态学杂志,2008,29(5):52-55.
SHEN Hua, HUANG He-zhong, ZHANG Hao, et al. Compare analysis for phytoremediation of Cd²⁺ contaminated water by three ornamental aquatic plants[J]. *Journal of Hydroecology*, 2008, 29(5):52-55.
- [7] 林 海,陈 思,董颖博,等.黑藻、狐尾藻对重金属铅、镉、铬、钒污染水体的修复[J].中国有色金属学报,2017,27(1):178-186.
LIN Hai, CHEN Si, DONG Ying-bo, et al. Phyto-remediation on heavy metal-polluted water of Pb, Cd, Cr and V by *Hydrilla verticillata* and *Myriophyllum verticillatum*[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2017, 27(1):178-186.
- [8] 郭二辉,孙然好,陈利顶.河岸植被缓冲带主要生态服务功能研究的现状与展望[J].生态学报,2011,30(8):1830-1837.
GUO Er-hui, SUN Ran-hao, CHEN Li-ding. Main ecological service functions in riparian vegetation buffer zone: Research progress and prospects[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(8):1830-1837.
- [9] Lowrance R, Altier L S, Williams R G. The riparian ecosystem management model[J]. *Journal of Soil & Water Conservation*, 2000, 55(1):27-

- 34.
- [10] 杨帆, 高大文, 高辉. 草本缓冲带优化配置对氮磷的去除效果[J]. 东北林业大学学报, 2011, 39(2): 57-59, 78.
YANG Fan, GAO Da-wen, GAO hui. Effects of nitrogen and phosphorus removal by optimizing the configuration of herbaceous buffer strips[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2011, 39(2): 57-59, 78.
- [11] 杨帆, 高大文, 高辉. 高效吸收氮、磷的滨岸缓冲带植物筛选[J]. 东北林业大学学报, 2010, 38(9): 62-63, 112.
YANG Fan, GAO Da-wen, GAO hui. Screening of plants with efficient absorption of nitrogen and phosphorus for riparian buffer zones[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2010, 38(9): 62-63, 112.
- [12] 吴健, 王敏, 吴建强, 等. 滨岸缓冲带植物群落优化配置试验研究[J]. 生态与农村环境学报, 2008, 24(4): 42-45, 52.
WU Jian, WANG Min, WU Jian-qiang, et al. Optimization of plants community of riparian buffer zones[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2008, 24(4): 42-45, 52.
- [13] 鲍桐, 廉梅花, 孙丽娜, 等. 重金属污染土壤植物修复研究进展[J]. 生态环境学报, 2008, 17(2): 858-865.
BAO Tong, LIAN Mei-hua, SUN Li-na, et al. Research progress on the phytoremediation of soils contaminated by heavy metals[J]. *Ecology and Environment*, 2008, 17(2): 858-865.
- [14] 王谦, 成水平. 大型水生植物修复重金属污染水体研究进展[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(5): 96-102.
WANG Qian, CHENG Shui-ping. Review on phytoremediation of heavy metal polluted water by macrophytes[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 33(5): 96-102.
- [15] 孙晓灿, 魏虹, 谢小红, 等. 水培条件下秋华柳对重金属 Cd 的富集特性及光合响应[J]. 环境科学研究, 2012, 25(2): 220-225.
SUN Xiao-can, WEI Hong, XIE Xiao-hong, et al. Bioaccumulation and photosynthesis response of *Salix variegata* to cadmium under hydroponic culture[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2012, 25(2): 220-225.
- [16] 崔丽华. 植物过滤缓冲带减少径流泥沙及养分输移效果[J]. 水土保持应用技术, 2010(6): 5-7.
CUI Li-hua. Plant filter buffer strips reduce runoff, sediment and nutrient transport effects[J]. *Technology of Soil and Water Conservation*, 2010(6): 5-7.
- [17] 诸葛亦斯, 刘德富, 黄钰铃. 生态河流缓冲带构建技术初探[J]. 水资源与水工程学报, 2006, 17(2): 63-67.
ZHUGE Yi-si, LIU De-fu, HUANG Yu-ling. Primarily discussion on structuring technology of buffer zone in eco-stream[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2006, 17(2): 63-67.
- [18] Clijsters H, Assche F V. Inhibition of photosynthesis by heavy metals[J]. *Photosynthesis Research*, 1985, 7(1): 31-40.
- [19] Sun X L, Davis A P. Heavy metal fates in laboratory bioretention systems[J]. *Chemosphere*, 2007, 66(9): 1601.
- [20] 张饮江, 易冕, 王聪, 等. 3 种沉水植物对水体重金属镉去除效果的实验研究[J]. 上海海洋大学学报, 2012, 21(5): 784-793.
ZHANG Yin-jiang, YI Mian, WANG Cong, et al. Reaserch on phytoremediation of cadmium contaminated water by three submerged macrophytes[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2012, 21(5): 784-793.
- [21] 林芳芳, 丛鑫, 黄锦楼, 等. 人工湿地植物对重金属铅的抗性[J]. 环境工程学报, 2014, 8(6): 2329-2334.
LIN Fang-fang, CONG Xin, HUANG Jin-lou, et al. Resistance of artificial wetland plants to lead[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2014, 8(6): 2329-2334.
- [22] 李龙山, 倪细炉, 李志刚, 等. 5 种湿地植物生理生长特性变化及其对污水净化效果的研究[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(8): 1625-1632.
LI Long-shan, NI Xi-lu, LI Zhi-gang, et al. Growth characteristics and sewage cleaning effect of five wetland plants[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(8): 1625-1632.
- [23] 张春燕, 王瑞刚, 范稚莲, 等. 杨树和柳树富集 Cd、Zn、Pb 的品种差异性[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(3): 530-538.
ZHANG Chun-yan, WANG Rui-gang, FAN Zhi-lian, et al. Difference in cadmium, zinc and lead accumulation of poplar and willow species[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(3): 530-538.
- [24] Khan M S, Zaidi A, Wani P A, et al. Role of plant growth promoting rhizobacteria in the remediation of metal contaminated soils[J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2009, 7(1): 1-19.
- [25] 唐永金, 罗学刚, 曾峰, 等. 不同植物对高浓度 Sr、Cs 胁迫的响应与修复植物筛选[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(5): 960-965.
TANG Yong-jin, LUO Xue-gang, ZENG Feng, et al. The responses of plants to high concentrations of strontium, cesium stress and the screening of remediation plants[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(5): 960-965.
- [26] 乔旭, 王沛芳, 郑莎莎, 等. 水生植物去除重金属机制及生理响应研究综述[J]. 长江科学院院报, 2015, 32(5): 15-20.
QIAO Xu, WANG Pei-fang, ZHENG Sha-sha, et al. Review of studies on the mechanism of removing heavy metals by aquatic plants and the physiological response of plants[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2015, 32(5): 15-20.
- [27] 谢辉, 谢光炎, 杜青平, 等. 湿地植物对矿山废水重金属去除的影响[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(增刊 2): 476-480.
XIE Hui, XIE Guang-yan, DU Qing-ping, et al. Impact of wetland on removal of heavy metal in mine wastewater [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 33(Suppl2): 476-480.
- [28] Jones D L, Darrah P R, Kochian L V. Critical evaluation of organic acid mediated iron dissolution in the rhizosphere and its potential role in root iron uptake[J]. *Plant & Soil*, 1996, 180(1): 57-66.
- [29] 牛之欣, 孙丽娜, 孙铁珩. 水培条件下四种植物对 Cd、Pb 富集特征[J]. 生态学杂志, 2010, 29(2): 261-268.
NIU Zhi-xin, SUN Li-na, SUN Tie-heng. Enrichment characteristics of Cd and Pb by four kinds of plant under hydroponic culture[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(2): 261-268.