

DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2017.07.2016111004

陈琪, 朱润良, 葛飞, 等. 两种典型粘土矿物对狐尾藻镉毒害效应的缓解作用[J]. 环境化学, 2017, 36(7): 1596-1601.

CHEN Qi, ZHU Runliang, GE Fei, et al. Alleviating effect of two clay minerals toward cadmium treated *Myriophyllum verticillatum* [J]. Environmental Chemistry, 2017, 36(7): 1596-1601.

两种典型粘土矿物对狐尾藻镉毒害效应的缓解作用*

陈 琪¹ 朱润良^{2**} 葛 飞¹ 李 峰¹ 曾 淳¹

(1. 湘潭大学环境与资源学院, 湘潭, 411105; 2. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州, 510640)

摘 要 本文以高等水生植物狐尾藻为研究对象, 人工模拟条件下, 分别比较了膨润土和海泡石对不同浓度 Cd(II) 胁迫下狐尾藻生物量、叶绿素、可溶性蛋白以及丙二醛的影响。研究结果显示, Cd(II) 对狐尾藻的光合系统、膜系统以及蛋白质等均具有明显的破坏作用; 膨润土和海泡石的加入在一定程度上能够通过吸附作用将 Cd(II) 固定, 进而有效地降低水环境中 Cd(II) 的浓度, 减轻 Cd(II) 对叶绿体结构的破坏, 降低植物的膜质过氧化反应。实验表明, Cd(II) 初始浓度在 0—30 mg·L⁻¹ 内, 海泡石对狐尾藻镉毒害的缓解作用要强于膨润土。

关键词 狐尾藻, 重金属镉, 海泡石, 膨润土, 缓解作用。

Alleviating effect of two clay minerals toward cadmium treated *Myriophyllum verticillatum*

CHEN Qi¹ ZHU Runliang^{2**} GE Fei¹ LI Feng¹ ZENG Chun¹

(1. School of Environment and Resource, Xiangtan University, Xiangtan, 411105, China;

2. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, 510640, China)

Abstract: In this work, we attempted to alleviate the toxicity of Cd(II) toward aquatic plant *Myriophyllum verticillatum* using clay minerals. In the aquatic systems containing both Cd(II) and *Myriophyllum verticillatum*, the biomass, chlorophyll, soluble protein and malondialdehyde of *Myriophyllum verticillatum* with or without the addition of bentonite and sepiolite were examined. The results showed that Cd(II) induce significant damage to the photosynthetic systems, membrane systems, and proteins of *Myriophyllum verticillatum*. On the other hand, with the addition of bentonite and sepiolite, the concentration of Cd(II) was evidently reduced through the adsorption onto the clay minerals. As a result, the damage of Cd(II) toward the chloroplast and membrane peroxidation was alleviated. Our results also showed that sepiolite was more effective than bentonite in alleviating the toxicity effect of Cd(II) toward *Myriophyllum verticillatum*.

Keywords: *Myriophyllum verticillatum*, cadmium, sepiolite, bentonite, alleviating effect.

重金属是一种常见的环境污染物, 可通过采矿冶炼和工业生产过程排放的废水、废渣等途径进入环境, 从而导致水体、土壤等环境介质受到严重的重金属离子污染^[1]。重金属离子能够从水体、土壤向植物体内迁移; 累积的重金属离子不仅危害植物本身, 而且可通过食物链进入人体, 给人类健康带来潜在

2016 年 11 月 10 日收稿 (Received: November 10, 2016).

* 国家自然科学基金 (21177104) 资助。

Supported by the National Natural Science Foundation of China (21177104).

** 通讯联系人, Tel: (020) 85297603, E-mail: zhurl@gig.ac.cn

Corresponding author, Tel: (020) 85297603, E-mail: zhurl@gig.ac.cn

危害^[2-3].添加外源物质来固定环境介质中的重金属是缓解其对植物毒害的有效途径,其作用是通过对重金属的吸附、沉淀(共沉淀)、离子交换及络合作用等将重金属固定住^[4-5],降低其在环境中的迁移性,从而减少植物对重金属的吸收,降低在植物体内的累积量.粘土(如膨润土、海泡石)是一类储量丰富、价格低廉、环境友好的天然吸附材料,对重金属阳离子有良好的吸附性能,是一种潜在的重金属固定剂^[6].已有研究表明,粘土矿物对重金属污染土壤具有一定的改良效果,能够同时降低土壤和植物体内重金属的含量,改善植物的生长状况^[7].因此,粘土矿物在缓解重金属对植物毒害作用方面极具应用前景.但另一方面,不同粘土矿物由于对重金属离子吸附性能和机制存在较大差异,因此其缓解毒害能力也可能不同,尤其是在实际环境中多种离子共存条件下,相关研究工作目前还鲜有报道.

针对上述问题,本文选择膨润土和海泡石作为粘土矿物代表,比较在纯水和营养液两种体系中 Cd 的吸附效果,并以狐尾藻来反映水体修复情况,研究了粘土矿物对不同浓度 Cd 离子胁迫下狐尾藻生物量、叶绿素、可溶性蛋白以及丙二醛的影响,以期粘土矿物缓解水生植物的重金属毒害效应提供有用信息.

1 材料与方法 (Materials and methods)

1.1 实验材料及培养

轮叶狐尾藻于 2015 年 6 月采自湖南湘潭苗木新品种培育基地.植物采集后用自来水冲去表面杂物,然后置于无底泥水缸用自来水培养 2 个月.待其长出新根和顶枝后,截取生长一致的顶枝(约 12 cm)于改良的 Hoagland 营养液中驯化 7 d.实验所用的膨润土是来自内蒙古自治区的钙基膨润土,XRD 物相分析结果表明蒙脱石矿物含量高于 95%,阳离子交换容量为 1.08 mmol·g⁻¹.海泡石来自湖南湘潭源远海泡石新材料股份有限公司.污染物用分析纯 CdCl₂ 配制.营养液^[8](见表 1)、Cd 溶液的 pH 值均用 NaOH 和 HCl 调至 6,此 pH 值条件下,溶液中的 Cd 主要以 Cd²⁺ 的形式存在.

表 1 Hoagland 营养液
Table 1 Hoagland's nutrient solution

大量营养物质 Macronutrients	浓度 Concentration/(mmol·L ⁻¹)	微量营养物质 Micronutrients	浓度 Concentration/(μmol·L ⁻¹)
KNO ₃	4.0	H ₃ BO ₃	46.0
Ca(NO ₃) ₃ ·H ₂ O	6.0	MnSO ₄ ·H ₂ O	9.0
NH ₄ H ₂ PO ₄	1.0	ZnSO ₄ ·H ₂ O	0.76
MgSO ₄ ·7H ₂ O	2.0	CuSO ₄ ·5H ₂ O	0.32
—	—	H ₂ MoO ₄	0.11
—	—	NaFeDTPA	85.0

1.2 实验设计

实验材料做如下处理:

- (1)空白组:Hoagland 营养液.
- (2)“Cd”实验组:5、10、15、20、25、30 mg·L⁻¹ Cd 的 Hoagland 营养液.
- (3)“Cd+膨润土”实验组:5、10、15、20、25、30 mg·L⁻¹ Cd 的 Hoagland 营养液+5 g 膨润土.
- (4)“Cd+海泡石”实验组:5、10、15、20、25、30 mg·L⁻¹ Cd 的 Hoagland 营养液+5 g 海泡石.
- (5)纯水体系:5、10、15、20、25、30 mg·L⁻¹ Cd 的蒸馏水+5 g 膨润土(海泡石).
- (6)营养液体系:5、10、15、20、25、30 mg·L⁻¹ Cd 的营养液+5 g 膨润土(海泡石).

选取驯化后生长旺盛、外形相似(包括叶片的大小,植株的长度,茎的粗细等)的植株,分别移至经过上述处理的(1)—(4)号玻璃缸中,每个培养缸中放入 3 株植物作为平行样.4 周之后,选取同一位置的叶片进行相关指标的测定.

1.3 测试指标及方法

1.3.1 鲜重和株高的测定

将植株从培养液中捞出后用自来水冲去吸附在植株表面的杂质,再用蒸馏水冲洗 2—3 次.用滤纸

迅速将植物表面的水分吸干,用电子天平和直尺分别测其鲜重和株高.

1.3.2 叶绿素含量的测定

参照文献[9]的方法,将丙酮、无水乙醇按 2:1 的体积比配制成浸取液.准确称取 0.1 g 叶片剪碎,置于黑暗条件下直接浸提 6 h,直至叶片完全变白.采用 72 N 型分光光度计测定波长在 645 nm 和 663 nm 处的光密度值,再用 Arnon 法公式计算叶绿素含量.

1.3.3 可溶性蛋白的测定

参照文献[10]的方法,以牛血清蛋白为标准蛋白,获得标准曲线.称取 0.1 g 叶片剪碎,加 2 mL 蒸馏水研磨,离心;取上清液加入 5 mL 考马斯亮蓝 G-250 溶液,放置 2 min 后在波长 595 nm 下测定其吸光度,并通过标准曲线获得蛋白质含量.

1.3.4 丙二醛的测定

采用硫代巴比妥酸比色法测定丙二醛^[11],称取 0.1 g 叶片剪碎,加入 1 mL10%的三氯乙酸溶液,研磨离心.取上清液加入到 2 mL 含 0.5%的硫代巴比妥酸溶液中,在 90 ℃下加热 30 min,然后迅速冷却并离心.取上清液在波长 450、532、600 nm 下测定其吸光度.

1.3.5 Cd 的测定

采用日本岛津公司 AA6300C 原子吸收分光光度计进行了 Cd 的浓度^[12],Cd 的检出限为0.001 mg·L⁻¹.

2 结果与讨论(Results and discussion)

2.1 生物量

由图 1 可知,“Cd”实验组狐尾藻的株高和鲜重均随着 Cd 浓度的升高而减少,当处理浓度达到 15 mg·L⁻¹时,植物已经开始负增长,30 mg·L⁻¹时,已经接近全部死亡.“Cd+膨润土”实验组中可以看出,狐尾藻的株高和鲜重均高于“Cd”实验组,但是相差不是很大,Cd 处理浓度为 30 mg·L⁻¹时,株高和鲜重仅增加了 16.18%和 34.76%.“Cd+海泡石”实验组中狐尾藻的株高、鲜重明显优于前两组,当 Cd 浓度为 30 mg·L⁻¹时,狐尾藻的株高、鲜重分别是“Cd”实验组的 5.4 倍和 6.07 倍;与空白组相比,株高和鲜重仅减少了 4.06%和 4.94%.

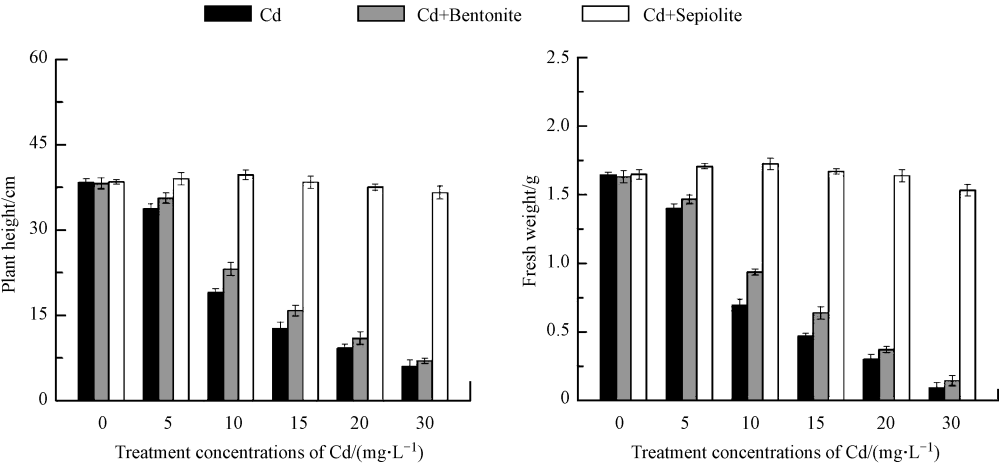


图 1 粘土矿物对 Cd²⁺胁迫下狐尾藻生物量的影响

Fig.1 Effect of clay minerals on the biomass of Myriophyllum verticillatum under Cd²⁺ stress

2.2 叶绿素含量

叶绿素的高低是植物光合作用能力强弱的直接反应.镉能够抑制植物根系对其它营养元素的吸收和运输,从而导致叶绿素的合成受阻^[13-14].镉还能进入植物细胞,直接破坏叶绿体的结构和功能,抑制植物的光合作用,使得叶绿素的含量下降^[15].

由图 2 可知,“Cd”实验组中叶绿素含量随着 Cd 浓度的升高而降低.当 Cd 浓度为 $30\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,叶绿素含量为 $0.93\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,与空白组时相比减少了 60.04%.“Cd+膨润土”实验组中狐尾藻的叶绿素略高出“Cd”实验组,当 Cd 浓度为 $30\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,叶绿素含量提高了 10.80%.说明膨润土的加入,在一定程度上减轻了 Cd 对绿体结构的破坏,但效果不是很显著,Cd 浓度为 $5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时植物叶绿素的合成仍然还是受到了严重的影响.

“Cd+海泡石”实验组中狐尾藻的叶绿素含量明显高于前两组.当 Cd 浓度在 $0\text{—}15\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,狐尾藻叶绿素的含量无明显变化,这说明海泡石的加入,使得狐尾藻叶绿素的合成不受低浓度 Cd 胁迫的影响;当 Cd 浓度大于 $15\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,虽然叶绿素的含量随着 Cd 浓度的升高而降低,但 Cd 浓度 $30\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,仍然要高于“Cd”实验组 $5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时的叶绿素含量,是“Cd”实验组相同处理浓度下的 2.04 倍,与空白组相比,仅减少了 17.76%.这说明在高浓度 Cd 的胁迫下,海泡石仍能很大程度上减小 Cd 对植物叶绿素合成的影响.

2.3 可溶性蛋白含量

可溶性蛋白质的含量是衡量植物是否发生重金属胁迫的重要指标^[16].低浓度的 Cd 能诱导植物细胞产生一些与抗性有关的蛋白质及保护酶,以减轻对植物的伤害^[17].但随着 Cd 浓度的升高,会使相关合成蛋白质的细胞受到损伤,从而抑制新蛋白质的合成.

由图 3 中,“Cd”实验组可知,低浓度的 Cd 能够使可溶性蛋白的含量增加;但当 Cd 浓度高于 $5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,可溶性蛋白的含量急剧下降;到 $30\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,其含量仅为空白组的 28.64%.“Cd+膨润土”实验组可溶性蛋白含量的变化规律与“Cd”组一致,都呈现先增大后变小的规律,但可溶性蛋白含量相比于“Cd”实验组均有所增加.说明膨润土的加入能促进蛋白质的合成(减弱 Cd 对蛋白质合成的抑制作用),但 Cd 浓度较高时,蛋白质的合成还是受到明显的抑制.

在“Cd+海泡石”实验组中,低浓度时可溶性蛋白的含量与空白组无显著差异,蛋白质的合成并没有受到 Cd 的影响;但 Cd 处理浓度高于 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,含量均明显高于空白对照组, $30\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd 处理下,蛋白质的含量是空白组的 1.37 倍,是“Cd”实验组相同处理浓度下的 4.79 倍.说明海泡石的加入,使得蛋白质的合成在高浓度的 Cd 胁迫下不但没有受到抑制,反而能刺激产生更多的蛋白质及保护酶,来减轻 Cd 对植物的伤害.

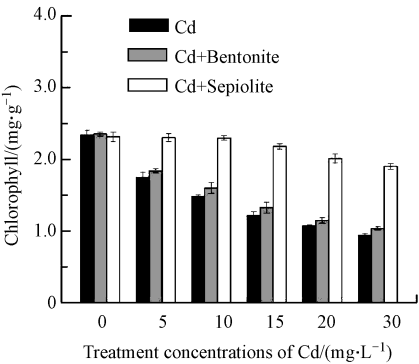


图 2 粘土矿物对 Cd²⁺胁迫下狐尾藻叶绿素含量的影响

Fig.2 Effect of clay minerals on the chlorophyll content of *Myriophyllum verticillatum* under Cd²⁺ stress

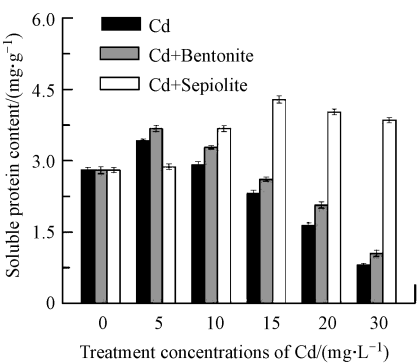


图 3 粘土矿物对 Cd²⁺胁迫下狐尾藻可溶性蛋白含量的影响

Fig.3 Effect of clay minerals on the soluble protein content of *Myriophyllum verticillatum* under Cd²⁺ stress

2.4 丙二醛含量

丙二醛是植物细胞膜中多不饱和脂肪酸的分解产物,是植物细胞膜质过氧化程度的体现^[18].丙二醛的含量越高,说明植物细胞膜质过氧化程度越高,细胞膜受到的伤害越重^[19].

由图 4 中,“Cd”和“Cd+膨润土”实验组可知,随着 Cd 的处理浓度增加,丙二醛的含量升高,植物的膜质过氧化反应增强.当 Cd 浓度为 $30\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,丙二醛含量分别是 $28.45\text{ nmol}\cdot\text{g}^{-1}$ 、 $26.96\text{ nmol}\cdot\text{g}^{-1}$,与空白组相比增加了 54.53%、46.49%.说明膨润土的加入在一定程度上降低了丙二醛的含量,减轻了 Cd 对植物细胞膜的伤害,但效果并不是很显著,与空白组相比植物的过氧化反应依然很强.而海泡石的加

入明显减弱了 Cd 对植物细胞膜的伤害.当浓度低于 20 mg·L⁻¹时,丙二醛的含量接近空白组,说明在这个浓度之下,植物的细胞膜并未受到明显的伤害;当 Cd 浓度为 30 mg·L⁻¹时,与空白组相比丙二醛的含量仅增加了 2.97%,这说明在高 Cd 浓度下,海泡石仍能将 Cd 对植物细胞膜的伤害降到很低.

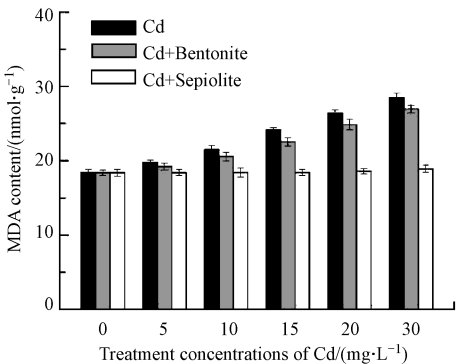


图 4 粘土矿物对 Cd²⁺胁迫下狐尾藻丙二醛含量的影响
Fig.4 Effect of clay minerals on the malondialdehyde content of *Myriophyllum verticillatum* under Cd²⁺ stress

2.5 溶液中 Cd 的浓度

在纯水体系(图 5a)中,膨润土和海泡石对 Cd 均能起到很好的去除效果,当 Cd 初始浓度为 30 mg·L⁻¹,平衡时溶液中 Cd 的浓度分别为 1.8 mg·L⁻¹、2.1 mg·L⁻¹,对应的去除率为 95.0%和 90.0%;在 hoagland 营养液体系(图 5b)中,膨润土对 Cd 的吸附受到了严重的影响,平衡时溶液中 Cd 的浓度为 23.8 mg·L⁻¹,去除率仅为 20.67%,而海泡石对 Cd 的吸附效果并没有太大影响,去除率仍能达到 80.0%.这主要是因为两者的吸附机理不同,膨润土对重金属的吸附主要是离子交换作用^[20],hoagland 营养液中共存离子竞争能力较强,影响了 Cd 在膨润土上的吸附,使得 Cd 以离子的形式继续存在于溶液中.而海泡石对重金属的吸附除了离子交换作用^[21],还有大量 Si—O—Si 键断裂形成的特殊吸附位点 Si—OH 能与重金属发生络合作用^[22],共存离子竞争作用较弱.因此,海泡石对 Cd 的吸附受其它离子的干扰要小于膨润土,大部分的 Cd 都能被吸附在海泡石上.

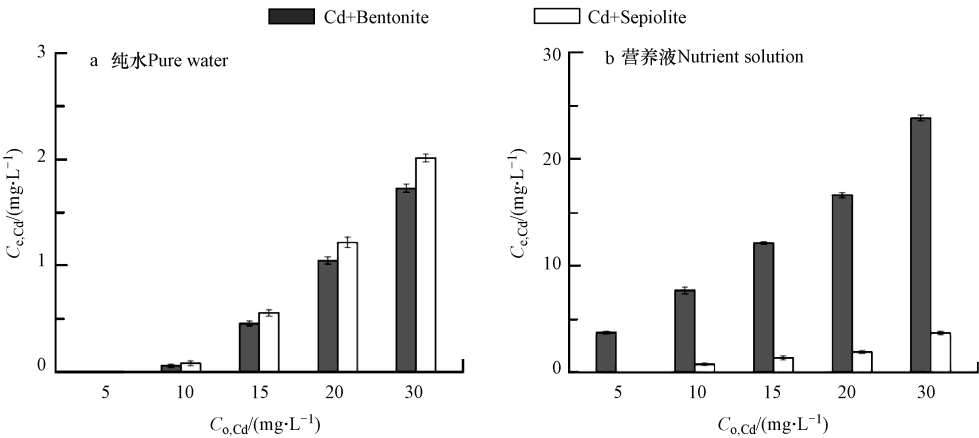


图 5 粘土矿物对溶液中 Cd²⁺ 含量的影响
Fig.5 Effect of clay mineral on content of Cd²⁺ in solution

3 结论 (Conclusion)

海泡石对 Cd 的吸附受共存离子的影响比膨润土小,Cd 浓度为 30 mg·L⁻¹的纯水体系中,膨润土和海泡石对 Cd 的去除率均能达到 90.0%.在营养液体系中,膨润土对 Cd 的吸附受到严重的抑制,去除率仅为 20.67%,而海泡石对 Cd 的去除率仍能达到 80.0%.膨润土和海泡石缓解 Cd 对狐尾藻毒害的能力不同,当 Cd 处理浓度小于 15 mg·L⁻¹时,膨润土只能在一定程度上减轻 Cd 对狐尾藻的毒害,而海泡石的

加入则能让植物正常生长;当 Cd 处理浓度为 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,“海泡石+Cd”实验组中狐尾藻的生长情况也比 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时“膨润土+Cd”实验组的要好.因此,海泡石对于修复实际的重金属水污染具有较好的应用前景.

参考文献 (References)

- [1] NAZAR R, IQBAL N, MASOOD A. Cadmium toxicity in plants and role of mineral nutrients in its alleviation[J]. 2012, 3(10): 1476-1489.
- [2] 张兴梅, 杨清伟, 李扬. 土壤镉污染现状及修复研究进展[J]. 河北农业科学, 2010, 14(3): 79-81.
ZHANG X M, YANG Q W, LI Y. Progress of status and remediation of soil cadmium pollution[J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2010, 14(3): 79-81 (in Chinese).
- [3] 王丽, 陈凡, 马千里, 等. 东江淡水河流域地表水和沉积物重金属污染特征及风险评价[J]. 环境化学, 2015, 34(9): 1671-1684.
WANG L, CHEN F, MA Q L, et al. Pollution characteristics and risk assessment of heavy metals in surface water and sediment in Danshui River of Dongjiang[J]. Environmental Chemistry, 2015, 34(9): 1671-1684 (in Chinese).
- [4] MANNING B A, SABINE G. Adsorption and stability of arsenic (Ⅲ) at the clay mineral-water interface[J]. Environmental Science & Technology, 1997, 31(7): 2005-2011.
- [5] 余铁萍, 戴友芝, 王未平, 等. 磁性海泡石吸附水中重金属离子的特性及机理[J]. 环境化学, 2013, 32(8): 1691-1696.
YU T P, DAI Y Z, WANG W P, et al. Adsorption characteristic and mechanism of heavy metals onto magnetically modified sepiolite[J]. Environmental Chemistry, 2013, 32(8): 1691-1696 (in Chinese).
- [6] PROST R, YARON B. Use of modified clays for controlling soil environmental quality[J]. Soil Science, 2001, 166(12): 880-895.
- [7] 陶雪, 杨琥, 季荣, 等. 固定剂及其在重金属污染土壤修复中的应用[J]. 土壤, 2016, 48(1): 1-11.
TAO X, YANG H, JI R, et al. Stabilizers and their applications in remediation of heavy metal-contaminated soil[J]. Soils, 2016, 48(1): 1-11 (in Chinese).
- [8] DRESLER S, MAKSYMIEC W. Capillary zone electrophoresis for determination of reduced and oxidized ascorbate and glutathione in roots and leaf segments of Zea mays plants exposed to Cd and Cu[J]. Acta Sci Pol Hortorum Cultus, 2013, 12(6): 143-155.
- [9] 杨振德. 分光光度法测定叶绿素含量的探讨[J]. 广西农业大学学报, 1996, 15(2): 145-150.
YANG D Z. Studies on the determination of chlorophyll content by spectrophotometric method[J]. Journal of Guangzhou Agricultural University, 1996, 15(2): 145-150 (in Chinese).
- [10] BRADFORD M M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding[J]. Analytical biochemistry, 1976, 72(1-2): 248-254.
- [11] LIU Y, WANG X, ZENG G, et al. Cadmium-induced oxidative stress and response of the ascorbate-glutathione cycle in *Beckermia nivea* (L.) Gaud [J]. Chemosphere, 2007, 69(1): 99-107.
- [12] ZHU R H, CHEN Q, ZHU R L, et al. Sequestration of heavy metal cations on montmorillonite by thermal treatment[J]. Applied Clay Science, 2015, 107: 90-97.
- [13] DAS P, SAMANTARAY S, Rout G R. Studies on cadmium toxicity in plants: A review[J]. Environmental Pollution, 1997, 98(1): 29-36.
- [14] GARDEA-TORRESDEY J L, PERALTA-VIDEA JR, MONTES M, et al. Bioaccumulation of cadmium, chromium and copper by *Convolvulus arvensis* L.: impact on plant growth and uptake of nutritional elements[J]. Bioresource Technology, 2004, 92(3): 229-235.
- [15] SANDALIO LM, DALURZO HC, GOMEZ M, et al. Cadmium-induced changes in the growth and oxidative metabolism of pea plants[J]. Journal of Experimental Botany, 2001, 52(364): 2115-2126.
- [16] ALDOOBIE N F, BELTAGI M S. Physiological, biochemical and molecular responses of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) plants to heavy metals stress[J]. African Journal of Biotechnology, 2013, 12(29): 4614-4622.
- [17] FIGUEIREDO-PEREIRA M E, YAKUSHIN S, COHEN G. Disruption of the intracellular sulfhydryl homeostasis by cadmium-induced oxidative stress leads to protein thiolation and ubiquitination in neuronal cells[J]. Journal of Biological Chemistry, 1998, 273(21): 12703-12709.
- [18] HOU W, CHEN X, SONG G, et al. Effects of copper and cadmium on heavy metal polluted waterbody restoration by duckweed (*Lemna minor*) [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2007, 45(1): 62-69.
- [19] DEVI SR, PRASAD MNV. Copper toxicity in *Ceratophyllum demersum* L. (Coontail), a free floating macrophyte: Response of antioxidant enzymes and antioxidants[J]. Plant Science, 1998, 138(2): 157-165.
- [20] TAHIR SS, RAUF N. Removal of a cationic dye from aqueous solutions by adsorption onto bentonite clay[J]. Chemosphere, 2006, 63(11): 1842-1848.
- [21] KOCAOBA S. Adsorption of Cd (Ⅱ), Cr (Ⅲ) and Mn (Ⅱ) on natural sepiolite[J]. Desalination, 2009, 244(1): 24-30.
- [22] EREN E, CUBUK O, CIFTCI H, et al. Adsorption of basic dye from aqueous solutions by modified sepiolite: Equilibrium, kinetics and thermodynamics study[J]. Desalination, 2010, 252(1): 88-96.