

葛海香,白院生,李 民,等. 铅尾矿渗出液胁迫对香菇草生长和生理抗性的影响[J]. 江苏农业科学,2018,46(13):260–262,270.  
doi:10.15889/j.issn.1002–1302.2018.13.060

# 铅尾矿渗出液胁迫对香菇草生长和生理抗性的影响

葛海香,白院生,李 民,章清波,刘 森,韩玉林

(江西财经大学艺术学院,江西南昌 330032)

**摘要:**以香菇草为试验材料,研究不同体积分数的 Pb 尾矿渗出液对其幼苗生长和生理方面的影响。结果显示,香菇草幼苗的地上和地下部(株高和根长)与 Pb 尾矿渗出液体积分数的升高成反比,且地上部(株高)在纯 Pb 尾矿渗出液胁迫中相对对照显著降低了 33.3% ( $P < 0.05$ )。在 1/4 Pb 尾矿渗出液处理中,叶绿素 b 含量显著高于对照 ( $P < 0.05$ ),比对照增加 7.7%,而类胡萝卜素含量比对照减少了 2.1%。在不同体积分数的 Pb 尾矿渗出液胁迫下,香菇草幼苗地上部和地下部的相对电导率(1/4 Pb 处理除外)均高于对照,但均未达到显著水平。在纯 Pb 处理中,幼苗地上部分 MDA 含量较对照显著增加 57.1% ( $P < 0.05$ );在 1/2 Pb 胁迫下,幼苗地上部和地下部抗坏血酸含量最高,较对照分别增加 6.6% 和 7.5%。幼苗地上部和地下部的谷胱甘肽(GSH)含量均随 Pb 尾矿渗出液体积分数的增加而增加,在纯 Pb 胁迫下,幼苗地上部和地下部 GSH 的含量均显著高于对照 ( $P < 0.05$ ),分别比对照增加 64.9%、53.6%。说明香菇草在 Pb 胁迫下有一定的生理抗性,可用于被 Pb 污染环境的修复。

**关键词:**香菇草;Pb 尾矿渗出液;胁迫;生理抗性

**中图分类号:** X171.4    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1002–1302(2018)13–0260–03

重金属铅(Pb)污染作为常见的污染源之一,以其在环境中累积和降解方面的不可逆性,一旦污染土壤和水体,便参与食物链的富集,进而极大地危害人类健康及生命<sup>[1–2]</sup>。而植物修复技术是一项绿色修复技术,以环保、经济、生态等优点为社会所接受<sup>[3–4]</sup>,对被污染环境的修复有重要的意义。

香菇草(*Hydrocotyle vulgaris*)为多年生伞形科草本植物,多分枝,节生根且根茎发达,适应性极强,分布范围广泛,具有很高的观赏和药用等应用研究价值。本试验以液体培养法研究重金属 Pb 的尾矿渗出液对香菇草生长的影响,测定叶绿素含量、光合及非酶系统等生理指标,以期为今后进一步探讨和修复江西德兴被重金属 Pb 尾矿渗出液污染的水体环境及在 Pb 超富集植物的选择上提供理论和技术支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

供试的植物幼苗为香菇草,其来源于无重金属环境影响的江苏某苗圃基地,Pb 尾矿渗出液源自于江西省德兴市铅尾矿坝。

### 1.2 方法

**1.2.1 香菇草幼苗培育和 Pb 胁迫处理方法** 试验于 2017 年 3 月在江西财经大学原资源与环境管理学院植物生理实验室(115.81°E、28.73°N)开展。其培养方法参考 Han 等的方法<sup>[5]</sup>,选其长势良好且一致的约 5~7 cm 幼苗,以每盆栽 5 株分植于塑料花盆中(规格 20.5 cm × 15.5 cm),并在盆内套入

2 层塑料袋以防止液体中 Pb 尾矿渗出液的外渗,并各加入 1/4 Hoagland Nutrition 液(HN)500 mL 进行 1 周的预培养后,再按序进行 5 组不同体积分数 Pb 尾矿渗出液的处理,依次为:HN(CK),其他的体积分数为 75% HN + 25% Pb(1/4 Pb)、50% HN + 50% Pb(1/2 Pb)、25% HN + 75% Pb(3/4 Pb)、100% Pb(Pb),每个处理 3 盆(每盆视为 1 次重复)。每周更换 1 次处理液,处理 28 d 后取样测定香菇草幼苗的生长、生理等指标。

**1.2.2 香菇草生长势和生理指标的测定方法** 将每个处理组随机选取 3 株幼苗用去离子水冲洗干净后,再用直尺法分别测量幼苗的地上部和地下部长度。在植物生理指标方面,分别取该植物 0.1 g 地上部和地下部进行测定。参照李合生的方法<sup>[6]</sup>,摘取幼苗叶片进行光合色素含量的测定;用电导仪法测定新鲜叶片(取测定光合色素含量相同部位的叶片)和根系的相对电导率;用硫代巴比妥酸法测定植物体内丙二醛(MDA)含量;在抗坏血酸(AsA)和谷胱甘肽(GSH)含量测定上分别参考 Kampfenkel 等<sup>[7]</sup>和 Ma 等<sup>[8]</sup>的方法。

### 1.3 数据统计处理

应用软件 Excel 2016 和 SPSS 20.0 进行相关试验数据的处理和分析,并采用邓肯氏(Duncan's)新复极差法对数据进行差异显著性分析。耐性指数公式参考 Han 等的公式:耐性指数 = (处理组幼苗平均根长/对照组幼苗平均根长) × 100%<sup>[9]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 Pb 尾矿渗出液单一胁迫对香菇草幼苗生长和耐性指数的影响

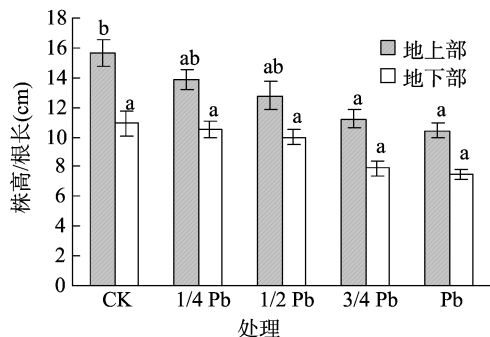
由图 1、图 2 可知,香菇草幼苗在不同体积分数的 Pb 尾矿渗出液浓度处理中,其各项生长指标较对照均有一定的降低。Pb 尾矿渗出液体积分数越大,其幼苗的地上部和地下部长度越短。地上部在纯 Pb 尾矿渗出液胁迫中,较对照显著降

收稿日期:2017–10–16

基金项目:国家自然科学基金(编号:31300436);江西财经大学国家级大学生创新训练项目(编号:201710421006)。

作者简介:葛海香(1990—),女,山西晋中人,硕士研究生,主要从事植物与园林规划设计工作。E-mail:365712833@qq.com。

通信作者:韩玉林,博士,研究员,主要从事园林植物种质资源的开发与利用、污染生态环境的植物修复。E-mail:hyll957@163.com。



图中的数据为 3 次重复的平均值; 同一指标各处理不同的小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。下同

图1 Pb 尾矿渗出液对香菇草幼苗生长指数的影响

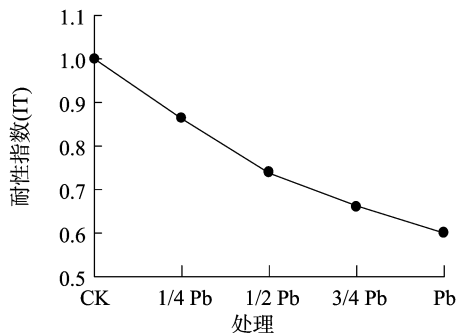


图2 Pb 尾矿渗出液对香菇草幼苗耐性指数的影响

低 33.3% ( $P < 0.05$ ), 说明 Pb 浓度增加与幼苗的耐性指数成反比。在 0 ~ 100% Pb 尾矿渗出液处理下, 其地下部分根系的耐性指数的逐渐呈降低趋势, 说明幼苗根系的各项生长指标受到明显抑制。

## 2.2 Pb 尾矿渗出液单一胁迫对香菇草幼苗部分生理指标的影响

### 2.2.1 对光合色素含量及相对电导率的影响

由图 3 可知, 香菇草幼苗叶片中光合色素叶绿素 a (Chl a) 和叶绿素 b (Chl b) 含量随着 Pb 尾矿渗出液体积分数增加, 呈先增加后降低的趋势, 而类胡萝卜素 (Car) 含量随着 Pb 尾矿渗出液体积分数增加呈下降趋势。在 1/4 Pb 尾矿渗出液处理中, Chl b 含量显著高于对照 ( $P < 0.05$ ), 比对照增加 7.7%, 而 Car 含量比对照减少了 2.1%。在全 Pb 尾矿胁迫处理下, 植物叶片中的 Chl a、Chl b 和 Car 含量分别较对照仅下降了 1.0%、8.0% 和 6.4%。表明香菇草幼苗叶片中光合色素的合成在低浓度的 Pb 胁迫处理中具有一定的促进作用, 但随着 Pb 胁迫浓度的增加, 其对叶片中的光合色素合成产生了一定的破坏作用。由图 4 可知, 不同体积分数的 Pb 尾矿渗出液胁迫下, 香菇草幼苗地上部和地下部的相对电导率均高于对照, 但均未达到显著水平。

### 2.2.2 对丙二醛(MDA)含量的影响

在不同体积分数的 Pb 尾矿渗出液处理的基质中, 香菇草幼苗地上部和地下部 MDA 含量的变化见图 5。在不同的 Pb 尾矿渗出液体积分数的处理中, 香菇草幼苗地上部 MDA 含量呈上升趋势, 在纯 Pb 处理下与对照处理差异显著 ( $P < 0.05$ ), 较对照增加 57.1%。而地下部分的 MDA 含量呈现在低体积分数中下降、高体积分数的胁迫下上升趋势, 在纯 Pb 尾矿渗出液处理中 MDA 含量较高, 较对照增加 100%。

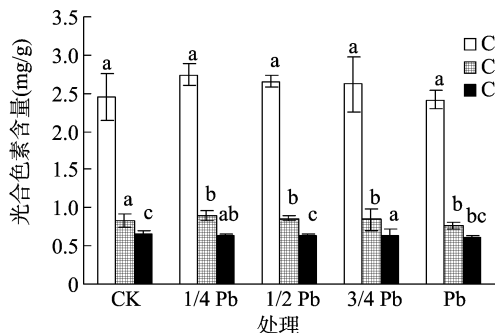


图3 Pb 尾矿渗出液胁迫对香菇草幼苗光合色素的影响

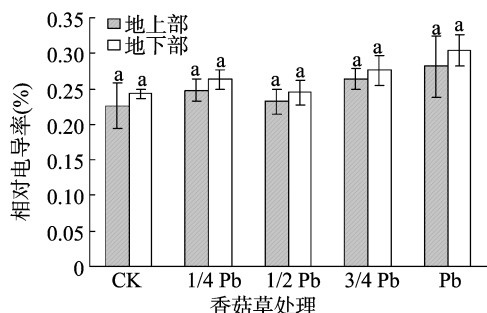


图4 Pb 尾矿渗出液胁迫对香菇草幼苗相对电导率的影响

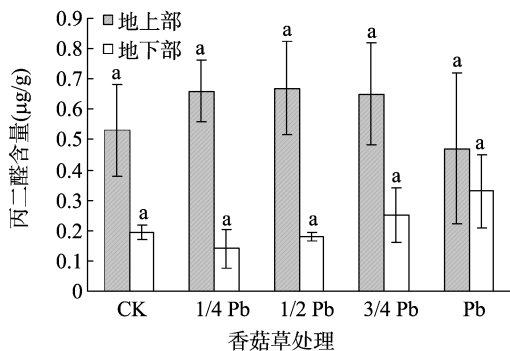


图5 Pb 尾矿渗出液胁迫对香菇草幼苗丙二醛(MDA)含量的影响

### 2.2.3 对抗坏血酸(AsA)和谷胱甘肽(GSH)含量的影响

在不同体积分数的 Pb 尾矿渗出液胁迫处理中, 香菇草幼苗地上部和地下部 AsA 和 GSH 含量的变化分别见图 6 和图 7。从图 6 可知, 不同体积分数 Pb 尾矿渗出液处理的香菇草地下部 AsA 含量与对照均无显著差异, 地上部呈先上升后下降趋势, 3/4 Pb 和 Pb 处理较对照达显著差异 ( $P < 0.05$ )。其中, 在 1/2 Pb 胁迫下, 幼苗地上部和地下部 AsA 含量最高, 较对照分别增加 6.6% 和 7.5%。而在纯 Pb 条件下, 幼苗地上部 AsA 含量明显低于对照, 降幅为 12.7%, 而地下部 AsA 含量较对照略有增加, 仅为 4.4%。结果表明, 低体积分数的 Pb 胁迫对香菇草 AsA 的合成和积累有促进作用, 而随着 Pb 液体积分数增加, 对其影响则不明显。

由图 7 可见, 香菇草随 Pb 尾矿渗出液体积分数的增加, 各部 GSH 含量变化总体呈上升趋势, 且均高于对照。在纯 Pb 胁迫下, 幼苗地上部和地下部 GSH 的含量均显著高于对照 ( $P < 0.05$ ), 分别比对照增加 64.9%、53.6%。其中, 随 Pb 液体积分数的增加, 幼苗地上部 GSH 含量比地下部含量增长趋势更为明显。说明高体积分数的 Pb 胁迫对香菇草幼苗地上部 GSH 含量积累比地下部分的 GSH 含量积累更为显著。

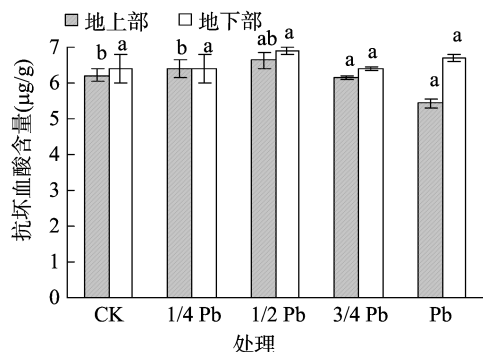


图6 Pb 尾矿渗出液胁迫对香菇草幼苗 AsA 含量的影响

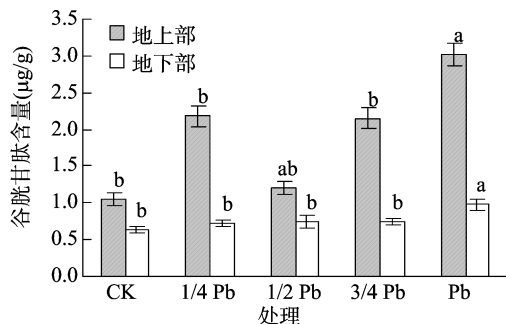


图7 Pb 尾矿渗出液胁迫对香菇草幼苗 GSH 含量的影响

### 3 讨论

Pb 含量不仅会造成环境的污染,而且还会直接影响到植物生长,甚至会导致植物死亡<sup>[10-11]</sup>。植物自身的生长状况能直接反映植物在受重金属胁迫时的耐性程度<sup>[12-13]</sup>,也是判断植物抵抗所受胁迫能力的重要依据。本试验显示,在 Pb 尾矿渗出液胁迫中,香菇草幼苗地上部和地下部生长指标均低于对照,且呈下降趋势。

植物的光合作用是其生长的重要物质来源,而叶绿素质量分数高低恰恰又决定植物光合作用能力的强弱<sup>[14]</sup>。有研究指出,重金属 Pb、镉(Cd)胁迫对一些植物的生理耐性有着明显的低促高抑现象<sup>[15]</sup>,这可能与植物的种类以及在发育期间重金属体积分数变化有直接的关系。另有研究表明,绿豆叶绿素含量在 Pb 处理下减少,主要原因可能是由叶绿素合成以及叶绿素酶的活性受到高浓度 Pb 破坏造成的<sup>[16]</sup>。在本试验中,不同体积分数 Pb 处理中,香菇草幼苗叶片中光合色素叶绿素 a(Chl a)和叶绿素 b(Chl b)含量随着 Pb 尾矿渗出液体积分数增加呈先增加后降低趋势,而类胡萝卜素(Car)含量随着 Pb 尾矿渗出液体积分数增加呈下降趋势。在 1/4 Pb 尾矿渗出液处理中,Chl b 含量显著高于对照( $P < 0.05$ ),比对照增加 7.7%,而 Car 含量比对照减少 2.1%。植物细胞膜外渗出液中的电导率,在一定程度上说明了植物叶片受害后的生理变化,与植物的伤害程度和抗性有密切关系<sup>[17]</sup>。植物的膜透性通过相对电导率反映出来,相对电导率越大,表明植物受到的胁迫程度越深<sup>[18]</sup>。本研究显示,不同体积分数的 Pb 尾矿渗出液胁迫下,香菇草幼苗地上部和地下部的相对电导率均高于对照,且在纯 Pb 尾矿渗出液胁迫下,分别比对照增加 24.8%、25.1%。说明香菇草体内的细胞膜系统在此过程中受到极大的伤害。这可能由于香菇草幼苗细胞膜透性受

到影响,导致其内可溶性物质外渗,从而打破了细胞间的代谢平衡引起的,同时反映香菇草具有一定的胁迫诱导抗性能力。

在本研究中,不同体积分数 Pb 处理的香菇草地上部叶片中 MDA 含量均明显高于对照,并随 Pb 液体积分数的变化,MDA 含量呈先上升后下降,这一研究结论与原海燕对 Pb 胁迫下马蔺的相关研究部分结果<sup>[19]</sup>不一致。可能由于其体内活性氧水平较高导致植物细胞受到氧化胁迫的伤害。随着时间推移,其体内所受的氧化反应慢慢趋于稳定。而本研究中地下部 MDA 含量变化也与原海燕对马蔺的研究结果<sup>[19]</sup>不一致。这可能与本研究中 Pb 处理时间过长有关。

植物体内 GSH 和 AsA 在清除活性氧以及抗氧化胁迫等方面有重要作用<sup>[8]</sup>。本试验表明,在不同体积的处理中,幼苗地上部和地下部 GSH 含量均高于对照,说明 Pb 胁迫可以促使 GSH 的合成,对其耐 Pb 性方面有一定作用。香菇草在低体积分数 Pb 尾矿处理下对其体内 AsA 含量增加有促进作用,但随 Pb 液体积分数的增加,AsA 含量逐渐下降,但与对照相比下降幅度较小,说明其具有一定的耐铅性。

### 4 结论

在不同体积分数的 Pb 尾矿渗出液的处理下,香菇草幼苗生长、光合色素均受到不同程度的抑制,体内的抗氧化系统也有一定的损伤,但通过香菇草自身调节内部的生理机制来增强对 Pb 的耐性,并以诱导植物体内光合色素、相对电导率、丙二醛含量、GSH 和 AsA 的合成与积累来体现。说明香菇草可以通过调节机体抗氧化系统来进一步缓解 Pb 对自身的毒害,保证植物自身的生长和发育,表明其在修复重金属 Pb 污染水体方面有一定的潜力。

### 参考文献:

- [1] Kambhampati M S, Begonia G B, Begonia M, et al. Phytoremediation of a lead-contaminated soil using morning glory (*Ipomoea lacunosa* L.): effects of a synthetic chelate [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2003, 71 (2): 0379-0386.
- [2] 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.
- [3] 周东美, 郝秀珍, 薛艳, 等. 污染土壤的修复技术研究进展 [J]. 生态环境, 2004, 13 (2): 234-242.
- [4] 李鱼, 王晓丽, 董德明, 等. 湿地草根层土壤对铅、镉吸附与解吸的动力学研究 [J]. 湿地科学, 2004, 2 (1): 10-14.
- [5] Han Y L, Yuan H Y, Huang S Z, et al. Cadmium tolerance and accumulation by two species of *Iris* [J]. Ecotoxicology, 2007, 16 (8): 557-563.
- [6] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [7] Kampfenkel K, van Montagu M, Inzé D. Extraction and determination of ascorbate and dehydroascorbate from plant tissue [J]. Analytical Biochemistry, 1995, 225 (1): 165-167.
- [8] Ma F W, Cheng L L. The sun-exposed peel of apple fruit has higher xanthophyll cycle-dependent thermal dissipation and antioxidants of the ascorbate-glutathione pathway than the shaded peel [J]. Plant Science, 2003, 165 (4): 819-827.
- [9] Han Y L, Huang S Z, Yuan H Y, et al. Organic acids on the growth,

- 环境工程学报,2013,7(8):2968–2972.
- [11] 钱程,桂明生,刘兴勇. 改性小麦秸秆的制备及其对水中亚甲基蓝的吸附性能[J]. 环境工程,2014(12):42–47.
- [12] 黄界颖,胡宏祥,伍震威,等. 水稻、油菜秸秆对水中镉的吸附特性[J]. 安全与环境学报,2015,15(4):244–249.
- [13] Wu Y H, Fan Y, Zhang M, et al. Functionalized agricultural biomass as a low-cost adsorbent; utilization of rice straw incorporated with amine groups for the adsorption of Cr(Ⅵ) and Ni(Ⅱ) from single and binary systems[J]. Biochemical Engineering Journal, 2016(105):27–35.
- [14] Farooq U, Kozinski J A, Khan M A, et al. Biosorption of heavy metal ions using wheat based biosorbents – a review of the recent literature[J]. Bioresource Technology, 2010,101(14):5043–5053.
- [15] Liu D G, Zhu Y, Li Z H, et al. Chitin nanofibrils for rapid and efficient removal of metal ions from water system[J]. Carbohydrate Polymers, 2013,98(1):483–489.
- [16] Gao H, Liu Y G, Zeng G M, et al. Characterization of Cr(Ⅵ) removal from aqueous solutions by a surplus agricultural waste – Rice straw[J]. Journal of Hazardous Materials, 2008,150(2):446–452.
- [17] Dang V B, Doan H D, Dang – Vu T, et al. Equilibrium and kinetics of biosorption of cadmium(Ⅱ) and copper(Ⅱ) ions by wheat straw[J]. Bioresource Technology, 2009,100(1):211–219.
- [18] Zhang R D, Zhang J H, Zhang X N, et al. Adsorption of Congo red from aqueous solutions using cationic surfactant modified wheat straw in batch mode; kinetic and equilibrium study[J]. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2014,45(5):2578–2583.
- [19] Georgieva V G, Tavlieva M P, Genieva S D, et al. Adsorption kinetics of Cr(Ⅵ) ions from aqueous solutions onto black rice husk ash[J]. Journal of Molecular Liquids, 2015(208):219–226.
- [20] Wang J, Wei J, Li J. Rice straw modified by click reaction for selective extraction of noble metal ions[J]. Bioresource Technology, 2015(177):182–187.
- [21] Feng Y, Dionysiou D D, Wu Y, et al. Adsorption of dyestuff from aqueous solutions through oxalic acid – modified swede rape straw: adsorption process and disposal methodology of depleted bioadsorbents[J]. Bioresource Technology, 2013,138(2):191–197.
- [22] You H, Chen J C, Yang C, et al. Selective removal of cationic dye from aqueous solution by low-cost adsorbent using phytic acid modified wheat straw[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2016(509):91–98.
- [23] Cao W, Dang Z, Zhou X Q, et al. Removal of sulphate from aqueous solution using modified rice straw: preparation, characterization and adsorption performance[J]. Carbohydrate Polymers, 2011,85(3):571–577.
- [24] Mashhadi S, Sohrabi R, Javadian H, et al. Rapid removal of Hg(Ⅱ) from aqueous solution by rice straw activated carbon prepared by microwave-assisted H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> activation; kinetic, isotherm and thermodynamic studies[J]. Journal of Molecular Liquids, 2016(215):144–153.
- [25] 黄色燕,刘云凤,曹威,等. 改性稻草对 Cr(Ⅵ) 的吸附动力学[J]. 环境化学, 2013(2):240–248.
- [26] Rocha C G, Zaia D A, Alfaya R V, et al. Use of rice straw as biosorbent for removal of Cu(Ⅱ), Zn(Ⅱ), Cd(Ⅱ) and Hg(Ⅱ) ions in industrial effluents[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009,166(1):383–388.
- [27] Qin L J, Qiu J H, Liu M Z, et al. Mechanical and thermal properties of poly(lactic acid) composites with rice straw fiber modified by poly(butyl acrylate)[J]. Chemical Engineering Journal, 2011,166(2):772–778.
- [28] 谭光群,袁红雁,刘勇,等. 麦秸秆对水中 Pb<sup>2+</sup> 和 Cd<sup>2+</sup> 的吸附特性[J]. 环境科学, 2011,32(8):2298–2304.
- [29] Hsu T C, Guo G L, Chen W H, et al. Effect of dilute acid pretreatment of rice straw on structural properties and enzymatic hydrolysis[J]. Bioresource Technology, 2010,101(13):4907–4913.
- [30] Han R P, Zhang L J, Chen S, et al. Characterization of modified wheat straw, kinetic and equilibrium study about copper ion and methylene blue adsorption in batch mode[J]. Carbohydrate Polymers, 2010,79(4):1140–149.
- [31] Guo H, Zhang S, Kou Z, et al. Removal of cadmium(Ⅱ) from aqueous solutions by chemically modified maize straw[J]. Carbohydrate Polymers, 2015(115):177–185.
- 受性[J]. 生态学报, 2015,35(8):2536–2544.
- [14] 张杰,周守标,黄永杰,等. 能源植物获对铜胁迫的耐性和积累特性[J]. 水土保持学报, 2013,27(2):168–172,188.
- [15] 李香君,董然,才燕,等. 玫瑰对铅胁迫的生理响应及积累特性研究[J]. 吉林林业科技, 2017,46(2):25–28,48.
- [16] Prasad D K, Prasad A K. Effect of Lead and mercury oil chlorophyll synthesis in mung bean seedlings[J]. Phytochemistry, 1987,26(4):881–883.
- [17] Pang S Q. Plant adversity physiology foundation[M]. Haerbin: Northeast Forestry University Press, 1990:103.
- [18] 孙延东,原海燕,黄苏珍. Cd – Cu 复合胁迫对黄菖蒲叶片及根系中 Cd 和 Cu 的积累及其迁移率的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2009,18(1):22–27.
- [19] 原海燕. 马蔺 Pb 耐性机理及其对 Pb 污染土壤根际微环境的影响研究[D]. 南京:南京农业大学, 2013:36.
- (上接第 262 页)
- anatomical structure, biochemical parameters and heavy metal accumulation of *Iris lactea* var. *chinensis* seedling growing in Pb mine tailings[J]. Ecotoxicology, 2013,22(6):1033–1042.
- [10] 李影,刘鹏. Cd 胁迫对 3 种蕨类植物生理代谢及镉累积特性的影响[J]. 水土保持学报, 2016,30(3):128–133.
- [11] Osma E, Elveren M, Karakoyun G. Heavy metal accumulation affects growth of scots pine by causing oxidative damage[J]. Air Quality, Atmosphere & Health, 2017,10(1):85–92.
- [12] Han Y L, Huang S Z, Yuan H Y, et al. Effect of Pb and Zn combined stress on the growth and elements accumulation of two different ecotype species of *Iris* L. in artificial contaminated soils[J]. Fresenius Environmental Bulletin, 2013,22(5):1548–1555.
- [13] 顾翠花,王懿祥,白尚斌,等. 四种园林植物对土壤镉污染的耐