

# 重金属和 pH 值对类芦种子萌发的影响

冯宏, 戴军, 李永涛, 郭彦彪

(华南农业大学 资源环境学院, 广东 广州 510642)

**摘要:** 类芦(*Neyraudia reynaudiana*)是一种具有极强耐干旱、贫瘠、高温等逆境的多年生禾草植物,是南方水蚀荒漠化地区、采矿采石厂及各类边坡植被自然恢复中的先锋植物。为探索在各类矿区及受重金属污染的地区采用类芦进行生态修复的可行性,通过室内发芽试验,对类芦种子在  $Hg^{2+}$ ,  $Cr^{6+}$ ,  $Cd^{2+}$ ,  $Pb^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$  等 6 种重金属离子胁迫及不同 pH 值条件下的萌发能力进行了研究。结果表明,类芦种子在 pH 值为 5.0~9.0 的范围内具有良好的萌发能力;6 种重金属离子随着处理浓度的升高,对类芦种子的抑制作用逐渐加强,且出现显著抑制作用的最低浓度顺序为:  $Cd^{2+} < Cu^{2+} < Hg^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$ ,  $Cr^{6+} < Pb^{2+}$ ; 6 种重金属对类芦种子活力指数出现显著影响的浓度均较显著影响发芽率、发芽势和发芽指数 3 个指标的浓度低,说明类芦幼苗生长比种子萌发对 6 种重金属更加敏感。

**关键词:** 类芦; 重金属; pH 值; 萌发

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2010)06-0096-04

中图分类号: X173, Q945.34

## Effects of Heavy Metals and pH Value on Seed Germination of Burma Reed

FENG Hong, DAI Jun, LI Yong-tao, GUO Yan-biao

(College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou, Guangdong 510642, China)

**Abstract:** Burma reed (*Neyraudia reynaudiana*) is a perennial grass which has the capacity of strong tolerance to drought, leanness, high temperature, and acid. It is a pioneer plant in natural vegetation restoration in the deserted area resulted from water erosion, mining area, stone pit, and slope. In order to explore the feasibility of ecological restoration with burma reed in various mining areas and the heavy metal contaminated area, germination ability of burma reed seed stressed by different concentrations of  $Hg^{2+}$ ,  $Cr^{6+}$ ,  $Cd^{2+}$ ,  $Pb^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$ , and  $Cu^{2+}$ , as well as different pH values was studied by lab germination test. Results showed that burma reed seed can well germinate between pH 5.0~9.0. Inhibiting effect of the heavy metals on burma reed seeds increased with increase of heavy metal concentration. The order of the heavy metals, by the lowest concentration which led to inhibition, was  $Cd^{2+} < Cu^{2+} < Hg^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$  and  $Cr^{6+} < Pb^{2+}$ . The concentrations of the heavy metals which affected obviously burma reed seed vigor were lower than the concentrations which affected obviously burma reed seed germination percentage, germination vigor, and germination index. This indicates that seedling is more sensitive to the heavy metals than germination.

**Keywords:** burma reed; heavy metal; pH value; germination

采矿活动是造成生态环境重金属污染的主要原因之一,特别是大范围的露天开采和不规范的民采,对地表造成强烈的扰动和破坏,不仅严重破坏了矿区的生态环境,而且强烈的水土流失和废水外排严重污染下游水系及农田土壤,产生一系列生态环境问题<sup>[1]</sup>,其中重金属污染最为严重<sup>[2]</sup>,恢复植被,治理水土流失是彻底解决采矿造成的生态退化与环境污染问题的必由之路<sup>[3]</sup>。类芦属多年生禾本科草种,具有很强的

抗逆境生存能力<sup>[4,5]</sup>,同时也具有较强的耐重金属能力<sup>[6,7]</sup>,是高陡边坡<sup>[8]</sup>、石质山地<sup>[9]</sup>和矿区植被绿化的首选草种<sup>[10]</sup>。研究表明,类芦不仅是矿区的先锋植物<sup>[11]</sup>,而且对 Pb 和 Zn 等重金属有一定的富集能力<sup>[12-13]</sup>,可见类芦在水土流失地区和矿区植被恢复中具有极大的应用潜力。

为了探索用类芦对各类重金属污染矿区进行生态修复的可行性,本试验通过研究类芦种子在不同

收稿日期: 2010-03-01

修回日期: 2010-05-28

资助项目: 国家自然科学基金项目(40801099; 40901129)

作者简介: 冯宏(1977—),女(汉族),河南省通许县人,硕士,讲师,主要从事土壤微生物与环境方面的研究工作。E-mail: liyhuang@scau.edu.cn.

通信作者: 郭彦彪(1973—),男(汉族),甘肃省通渭县人,硕士,讲师,主要从事水土保持与灌溉施肥方面的研究工作。E-mail: guoyanbiao@scau.edu.cn.

pH 值及不同重金属浓度条件下的萌发能力, 寻找类芦种子正常萌发的适宜条件范围, 为类芦在矿区水土保持生态修复中的应用提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

供试类芦种子于 2009 年 2 月 11 日采自华南农业大学校园。试验用重金属离子采用分析纯试剂配制, 分别为  $Hg^{2+}$  ( $HgCl_2$ ),  $Cr^{6+}$  ( $K_2Cr_2O_7$ ),  $Cd^{2+}$  ( $3CdSO_4 \cdot 8H_2O$ ),  $Pb^{2+}$  ( $Pb(NO_3)_2$ ),  $Zn^{2+}$  ( $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ ),  $Cu^{2+}$  ( $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ ); 所有处理液均用蒸馏水配制。各处理离子浓度及 pH 值见表 1。

表 1 不同处理 pH 值和重金属浓度

项目	处理编号					
	CK	A	B	C	D	E
$Hg^{2+}/(mg \cdot L^{-1})$	0	10	25	50	60	75
$Cr^{6+}/(mg \cdot L^{-1})$	0	10	25	50	75	100
$Cd^{2+}/(mg \cdot L^{-1})$	0	10	25	50	60	75
$Pb^{2+}/(mg \cdot L^{-1})$	0	50	75	100	125	150
$Zn^{2+}/(mg \cdot L^{-1})$	0	10	25	50	60	75
$Cu^{2+}/(mg \cdot L^{-1})$	0	10	20	30	40	50
pH 值	7.0	3.0	4.0	5.0	8.0	9.0

### 1.2 试验方法

挑选籽粒饱满的种子, 用 0.5% 的次氯酸钠溶液表面消毒 5 min, 依次用自来水、蒸馏水和去离子水各冲洗 3 次后, 用滤纸将水吸干。选取直径为 9 cm 的培养皿, 皿内用双层滤纸为发芽床, 每皿加入 2 ml 相应处理液, 然后均匀放入 50 粒类芦种子, 每个处理 3 次重复。试验共设置 5 个重金属处理组和 1 个 pH 处理组, 每个处理组设置 5 个浓度梯度, 所有处理均以 pH = 7 的蒸馏水处理作为对照(CK), 见表 1。处理均在全自动光照培养箱内培养, 箱中温度为  $(25 \pm 1) ^\circ C$ , 光照时间为 16 D/8 N, 相对湿度为 80% ~ 90%。试验期间每 24 h 记录 1 次, 第 10 d 统计发芽势、第 15 d 统计发芽率, 测幼苗重量并计算发芽指数和活力指数。为保证重金属的浓度, 每 3 d 补充一次溶液。

### 1.3 种子发芽指标的测定

发芽率 (%) = 15 d 内供试种子的发芽数 / 供试种子数  $\times 100\%$ ;

发芽势 (%) = 10 d 内供试种子发芽数 / 供试种子数  $\times 100\%$ ;

发芽指数 ( $I_c$ ) =  $\sum G_t / D_t$

式中:  $G_t$  —— 在  $t$  天的发芽数;  $D_t$  —— 发芽天数。

活力指数 ( $I_v$ ) =  $I_c \times S$

式中:  $I_c$  —— 发芽指数,  $S$  —— 幼苗单株平均重量(g)。

### 1.4 数据分析

在进行方差分析时, 先对数据进行方差齐性检验, 必要时, 对数据进行反正弦平方根转换, 然后进行方差分析。用 Excel 进行数据整理, 用 DPS 7.05<sup>[14]</sup> 进行齐性检验及方差分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 pH 值对类芦种子萌发的影响

在不同 pH 值条件下, 类芦种子萌发情况见表 2。从表中可以看出, pH 值在 5.0 ~ 9.0 范围内, 种子的萌发能力较强, 发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数都较高, 各处理间无明显差异, 当 pH  $\leq 4.0$  时, 种子萌发受到显著影响, 发芽率和发芽势均下降到 50% 以下, 且 pH 值越低, 种子萌发能力越弱, 各指标值显著低于 pH  $\geq 5.0$  的处理, 但是在预备试验中发现, 当 pH = 10 时类芦种子完全失去萌发能力, 由此可见, 类芦种子具有较强萌发能力的 pH 值范围较大, 在 pH 值为 5.0 ~ 9.0 的强酸性到强碱性条件下都能够保持较高的萌发能力, 过高或过低的 pH 值均不利于类芦种子的萌发。

表 2 pH 值对类芦种子萌发的影响

处理	发芽率/%	发芽势%	发芽指数	活力指数
CK	88.7 <sup>a</sup>	81.3 <sup>a</sup>	6.650 <sup>a</sup>	0.241 <sup>a</sup>
pH = 9.0	85.3 <sup>a</sup>	79.3 <sup>a</sup>	6.022 <sup>a</sup>	0.213 <sup>ab</sup>
pH = 8.0	90.0 <sup>a</sup>	82.7 <sup>a</sup>	6.796 <sup>a</sup>	0.249 <sup>a</sup>
pH = 5.0	90.0 <sup>a</sup>	84.0 <sup>a</sup>	6.920 <sup>a</sup>	0.166 <sup>abc</sup>
pH = 4.0	40.7 <sup>b</sup>	36.7 <sup>b</sup>	3.010 <sup>b</sup>	0.034 <sup>bc</sup>
pH = 3.0	8.0 <sup>c</sup>	7.3 <sup>c</sup>	0.636 <sup>c</sup>	0.004 <sup>c</sup>

注: 数据为平均值 ( $n=3$ ); 同一列数据用采用 Duncan 新复差极法进行多重比较, 同列不同字母为 0.05 水平上差异显著。下同

### 2.2 重金属对类芦种子萌发的影响

2.2.1  $Hg^{2+}$  对类芦种子萌发的影响  $Hg^{2+}$  对大多数植物种子的萌发具有明显的抑制作用。从表 3 可以看出,  $Hg^{2+}$  对类芦种子萌发的影响表现为低浓度时对种子萌发影响不明显, 而当处理浓度达到 25 mg/L 时, 对种子萌发产生抑制作用, 发芽势、发芽指数和活力指数等指标均与 CK 和 10 mg/L 处理相比显著降低, 而发芽率在处理浓度达到 50 mg/L 时与对照和较低浓度处理达到显著差异, 种子萌发受到严重抑制, 各指标值急剧降低, 当处理浓度增加到 75 mg/L 时,  $Hg^{2+}$  的毒害作用使类芦种子完全失去萌发能力。由此可以看出,  $Hg^{2+}$  对类芦种子的影响表现为随着处理浓度的依次升高, 首先在不明显影响种子发芽率的情况下造成部分种子发芽时间的延迟, 对幼苗生长产生抑制作用, 继而影响到种子的发芽率和其它指标, 较高浓度时种子不再萌发。

表 3 重金属对类芦种子萌发的影响

处理/ (mg·L <sup>-1</sup> )	发芽率/ %	发芽势/ %	发芽指数	活力指数	处理/ (mg·L <sup>-1</sup> )	发芽率/ %	发芽势/ %	发芽指数	活力指数		
Hg <sup>2+</sup>	CK	88.7 <sup>a</sup>	81.3 <sup>a</sup>	6.650 <sup>a</sup>	0.241 <sup>a</sup>	Pb <sup>2+</sup>	CK	88.7 <sup>a</sup>	81.3 <sup>a</sup>	6.650 <sup>a</sup>	0.241 <sup>a</sup>
	10	89.3 <sup>a</sup>	78.7 <sup>a</sup>	6.462 <sup>a</sup>	0.171 <sup>a</sup>		50	88.7 <sup>a</sup>	84.0 <sup>a</sup>	6.529 <sup>a</sup>	0.236 <sup>ab</sup>
	25	74.0 <sup>a</sup>	63.0 <sup>b</sup>	4.684 <sup>b</sup>	0.070 <sup>b</sup>		75	88.7 <sup>a</sup>	81.3 <sup>a</sup>	5.986 <sup>a</sup>	0.160 <sup>abc</sup>
	50	4.7 <sup>b</sup>	4.7 <sup>c</sup>	0.356 <sup>c</sup>	0.002 <sup>b</sup>		100	86.0 <sup>a</sup>	72.7 <sup>ab</sup>	5.625 <sup>a</sup>	0.166 <sup>abc</sup>
	60	3.3 <sup>b</sup>	2.0 <sup>c</sup>	0.237 <sup>c</sup>	0.001 <sup>b</sup>		125	79.3 <sup>ab</sup>	65.3 <sup>ab</sup>	5.243 <sup>a</sup>	0.134 <sup>bc</sup>
	75	0.0 <sup>c</sup>	0.0 <sup>c</sup>	0.000 <sup>c</sup>	0.000 <sup>b</sup>		150	70.7 <sup>b</sup>	58.0 <sup>b</sup>	4.406 <sup>a</sup>	0.095 <sup>c</sup>
Cr <sup>6+</sup>	CK	88.7 <sup>a</sup>	81.3 <sup>a</sup>	6.650 <sup>a</sup>	0.241 <sup>a</sup>	Zn <sup>2+</sup>	CK	88.7 <sup>a</sup>	81.3 <sup>a</sup>	6.650 <sup>a</sup>	0.241 <sup>a</sup>
	10	90.7 <sup>a</sup>	83.3 <sup>a</sup>	6.564 <sup>a</sup>	0.198 <sup>ab</sup>		10	84.0 <sup>ab</sup>	73.3 <sup>ab</sup>	5.532 <sup>ab</sup>	0.152 <sup>ab</sup>
	25	79.3 <sup>a</sup>	69.3 <sup>a</sup>	5.443 <sup>ab</sup>	0.113 <sup>bc</sup>		25	73.0 <sup>abc</sup>	59.3 <sup>ab</sup>	4.477 <sup>ab</sup>	0.070 <sup>b</sup>
	50	64.0 <sup>b</sup>	46.7 <sup>b</sup>	4.075 <sup>ab</sup>	0.070 <sup>c</sup>		50	72.0 <sup>bc</sup>	55.3 <sup>ab</sup>	4.330 <sup>ab</sup>	0.091 <sup>b</sup>
	75	61.3 <sup>b</sup>	46.0 <sup>b</sup>	3.788 <sup>b</sup>	0.044 <sup>c</sup>		60	70.0 <sup>bc</sup>	48.7 <sup>b</sup>	3.949 <sup>b</sup>	0.073 <sup>b</sup>
	100	46.0 <sup>c</sup>	31.3 <sup>b</sup>	2.709 <sup>b</sup>	0.025 <sup>c</sup>		75	64.7 <sup>c</sup>	42.7 <sup>b</sup>	3.559 <sup>b</sup>	0.065 <sup>b</sup>
Cd <sup>2+</sup>	CK	88.7 <sup>a</sup>	81.3 <sup>a</sup>	6.650 <sup>a</sup>	0.241 <sup>a</sup>	Cu <sup>2+</sup>	CK	88.7 <sup>a</sup>	81.3 <sup>a</sup>	6.650 <sup>a</sup>	0.241 <sup>a</sup>
	10	77.3 <sup>a</sup>	70.7 <sup>a</sup>	5.675 <sup>a</sup>	0.135 <sup>b</sup>		10	78.7 <sup>a</sup>	74.0 <sup>a</sup>	5.843 <sup>a</sup>	0.105 <sup>bc</sup>
	25	9.0 <sup>b</sup>	6.0 <sup>b</sup>	0.563 <sup>b</sup>	0.004 <sup>c</sup>		20	80.7 <sup>a</sup>	73.3 <sup>a</sup>	5.941 <sup>a</sup>	0.134 <sup>b</sup>
	50	8.7 <sup>b</sup>	7.3 <sup>b</sup>	0.681 <sup>b</sup>	0.004 <sup>c</sup>		30	23.0 <sup>b</sup>	22.0 <sup>b</sup>	1.579 <sup>b</sup>	0.012 <sup>c</sup>
	60	8.7 <sup>b</sup>	8.0 <sup>b</sup>	0.629 <sup>b</sup>	0.005 <sup>c</sup>		40	20.0 <sup>b</sup>	18.0 <sup>b</sup>	1.501 <sup>b</sup>	0.011 <sup>c</sup>
	75	4.0 <sup>b</sup>	3.3 <sup>b</sup>	0.244 <sup>b</sup>	0.001 <sup>c</sup>		50	10.0 <sup>b</sup>	8.7 <sup>b</sup>	0.683 <sup>b</sup>	0.005 <sup>c</sup>

2.2.2 Cr<sup>6+</sup> 对类芦种子萌发的影响 Cr<sup>6+</sup> 对植物具有较高的毒害作用,从表 3 可以看出,随着 Cr<sup>6+</sup> 浓度的增加,Cr<sup>6+</sup> 对类芦种子萌发的抑制作用越来越严重,与对照处理相比,当 Cr<sup>6+</sup> 浓度达到 25 mg/L 时,种子活力指数明显降低,当 Cr<sup>6+</sup> 浓度达到 50 mg/L 时,种子发芽率、发芽势和发芽指数与对照相比显著降低,当浓度 Cr<sup>6+</sup> 达到 100 mg/L 时,发芽率和发芽势降低到 50% 以下,种子萌发能力受到严重抑制,这说明较低浓度的 Cr<sup>6+</sup> 对类芦种子萌发的影响作用要比对种子活力的影响小。

2.2.3 Cd<sup>2+</sup> 对类芦种子萌发的影响 金属 Cd 无毒性,但 Cd 的化合物毒性极大,从表 3 中可以看出,在本试验重金属离子中,Cd<sup>2+</sup> 对类芦种子萌发的抑制作用最大,当 Cd<sup>2+</sup> 浓度超过 10 mg/L 时,就会对类芦种子的萌发产生抑制,当 Cd<sup>2+</sup> 浓度达到 25 mg/L 时,种子萌发各指标与对照和 10 mg/L 处理相比显著降低,且发芽率和发芽势均低于 10%,表现出严重的抑制作用,当处理浓度更高时,虽在 25~75 mg/L 这 4 个处理之间各指标差异不显著,但其抑制作用仍有所加强。

2.2.4 Pb<sup>2+</sup> 对类芦种子萌发的影响 在本试验条件下,Pb<sup>2+</sup> 在 6 种重金属中产生明显抑制作用的浓度最高,从表 3 中可以看出,当 Pb<sup>2+</sup> 浓度达到 150 mg/L 时,发芽率和发芽势与较低浓度处理相比有明显降低,发芽指数在整个试验浓度处理中均没有显著差

异,而活力指数在 125 mg/L 浓度处理时就与对照浓度处理达到显著差异,这说明当 Pb<sup>2+</sup> 浓度在 150 mg/L 以下时,Pb<sup>2+</sup> 对类芦种子的发芽率影响不大,但 Pb<sup>2+</sup> 浓度达到 125 mg/L 时就对幼苗的生长产生一定的抑制作用。

2.2.5 Zn<sup>2+</sup> 对类芦种子萌发的影响 Zn 是植物生长所必需的微量元素之一,但是高浓度的 Zn<sup>2+</sup> 对种子发芽则会产生影响。从表 3 所示试验结果来看,随着 Zn<sup>2+</sup> 浓度的逐渐增大,类芦种子各萌发指标依次降低,说明 Zn<sup>2+</sup> 对种子萌发的抑制作用逐渐加强,经方差分析,发现当处理浓度达到 50 mg/L 时,发芽率与对照之间存在显著差异,而发芽势与发芽指数在处理浓度达到 60 mg/L 时,才与对照之间存在显著差异,种子活力则在 Zn<sup>2+</sup> 浓度为 25 mg/L 时就与对照之间存在显著差异,这说明 Zn<sup>2+</sup> 在种子萌发时延缓了部分种子的发芽时间,且对其幼芽和幼根具有较强的毒害作用。

2.2.6 Cu<sup>2+</sup> 对类芦种子萌发的影响 Cu 也是植物生长所必需的微量元素之一,但从表 3 结果看,Cu<sup>2+</sup> 对类芦种子萌发的抑制作用要比相同浓度的 Zn<sup>2+</sup> 强一些,当 Cu<sup>2+</sup> 浓度达到 30 mg/L 时,种子萌发能力显著降低,发芽率、发芽势和发芽指数均与对照和较低浓度处理有显著差异,且发芽率和发芽势均低于 50%,而活力指数在 Cu<sup>2+</sup> 浓度为 10 mg/L 时就与对照之间存在显著差异。可见,高浓度 Cu<sup>2+</sup> 处理对类

芦种子萌发能力具有显著抑制作用, 低浓度处理抑制作用则不显著, 在处理浓度逐渐增大时, 对类芦种子萌发生产生明显抑制作用的浓度在 20~ 30 mg/L 之间,  $\text{Cu}^{2+}$  对类芦种子幼芽和幼根具有比  $\text{Zn}^{2+}$  更强的毒害作用。

### 3 结论

(1) 类芦种子在 pH 值为 5.0~ 9.0 的范围内具有良好的萌发能力。

(2) 6 种重金属离子随着浓度的升高, 对类芦种子的抑制作用逐渐加强, 但是不同重金属对类芦种子出现明显抑制作用的浓度却不相同, 从本试验结果来看, 对类芦种子产生显著抑制作用的最低浓度顺序为:  $\text{Cd}^{2+} < \text{Cu}^{2+} < \text{Hg}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Cr}^{6+} < \text{Pb}^{2+}$ ; 说明不同重金属离子对类芦种子的毒性不相同, 其中  $\text{Pb}^{2+}$  产生抑制作用的浓度最高, 可能与类芦植物对铅具有一定富集能力和较强的抗性有关<sup>[6-7]</sup>。

(3) 6 种重金属离子显著影响类芦种子活力指数的浓度均较显著影响发芽率、发芽势和发芽指数 3 个指标的浓度低, 说明类芦幼苗生长比种子萌发对 6 种重金属离子更加敏感, 这与前人在其它植物上的研究结果较为一致<sup>[15-16]</sup>。

致谢: 本试验得到梁成慧和许建托同学的帮助, 在此深表谢意。

#### [ 参 考 文 献 ]

[ 1 ] 林初夏, 龙新宪, 童晓立, 等. 广东大宝山矿区生态退化现状及治理途径探讨[ J ]. 生态科学, 2003, 22( 3 ): 205-208.

[ 2 ] 房辉, 曹敏. 云南会泽废弃铅锌矿重金属污染评价[ J ]. 生态学杂志, 2009, 28( 7 ): 1277-1283.

[ 3 ] 林初夏, 黄少伟, 童晓立, 等. 大宝山矿水外排的环境影响综合治理对策[ J ]. 生态环境, 2005, 14( 2 ): 173-177.

[ 4 ] 郑本暖, 叶功富, 卢昌义. 干旱胁迫对 4 种植物蒸腾特性的影响[ J ]. 亚热带植物科学, 2007, 36( 1 ): 36-38.

[ 5 ] 潘伟彬, 邓恢. 4 种草本水土保持植物的耐旱生理特性[ J ]. 华侨大学学报: 自然科学版, 2009, 30( 3 ): 305-308.

[ 6 ] 王海娟, 宁平, 曾向东, 等. 类芦在土壤铅污染修复中的应用前景探讨[ J ]. 昆明理工大学学报: 理工版, 2008, 33( 1 ): 75-78.

[ 7 ] 戴文娇, 宁平, 刘晓海, 等. 类芦对铅的耐性及富集能力探讨[ J ]. 环境工程学报, 2008, 2( 7 ): 1004-1008.

[ 8 ] 王炜, 孙发政, 刘荣堂. 类芦对重建边坡防护植被的贡献[ J ]. 草原与草坪, 2006( 4 ): 49-51.

[ 9 ] 袁剑刚, 周先叶, 陈彦, 等. 采石场悬崖生态系统自然演替初期土壤和植被特征[ J ]. 生态学报, 2005, 25( 6 ): 1517-1522.

[ 10 ] 林武星, 陈东华, 倪志荣, 等. 闽南沿海石矿区植物配置模式对水土保持的影响[ J ]. 防护林科技, 2006( 4 ): 1-3.

[ 11 ] 秦建桥, 夏北成, 胡萌, 等. 广东大宝山矿区尾矿库植被演替分析[ J ]. 农业环境科学学报, 2009, 28( 10 ): 2085-2091.

[ 12 ] Deng H, Ye Z H, Wong M H. Accumulation of lead, zinc, copper and cadmium by 12 wetland plant species thriving in metal-contaminated sites in China[ J ]. Environmental Pollution, 2004, 132: 29-40.

[ 13 ] 祝鹏飞, 宁平, 曾向东, 等. 矿区土壤 Pb 的分布特征及植物修复应用性研究[ J ]. 工业安全与环保, 2006, 32( 5 ): 4-6.

[ 14 ] 唐启义, 冯明光. DPS 数据处理系统: 试验设计、统计分析 & 数据挖掘[ M ]. 北京: 科学出版社, 2007.

[ 15 ] Li W Q, Mohammad A K, Yamaguchi S J, et al. Effects of heavy metals on seed germination and early seedling growth of *Arabidopsis thaliana* [ J ]. Plant Growth Regulation, 2005, 46: 45-50.

[ 16 ] Munzuroglu O, Geckil H. Effects of metals on seed germination, root elongation, and coleoptile and hypocotyls growth in *Triticum aestivum* and *Cucumis* [ J ]. Arch. Environ. Cont. Tox., 2002, 43: 203-213.