

# 重金属污水对不同湿地植物种子萌发的影响

张桂玲

(临沂大学 生命科学学院, 山东 临沂 276000)

**摘要** 为探讨湿地植物种子在重金属污染湿地植被恢复中的应用,以17种临沂地区常见湿地植物种子为材料,研究了不同浓度重金属污水对其萌发的影响。结果表明:随着重金属污水浓度的增加,萌发率、萌发指数及活力指数,除了芦苇、芦竹、风车草、黄芩蒲、灯芯草、泽泻和石龙芮,其他均呈现先升高后降低的趋势,浓度越高受到的抑制越明显,且在T3和T4处理下均显著低于对照( $P < 0.05$ );重金属污水对活力指数的抑制作用大于对萌发率和萌发指数的抑制;17种供试湿地植物种子普遍对重金属污水有一定的耐性;通过隶属函数值聚类分析,将供试植物在种子萌发期划分为耐重金属污水较好、中等的和较差3种类型,其中黄芩蒲和黄花茵耐性较差,12种植物耐性中等,香蒲、小香蒲和芦苇耐性较好,说明这3种植物在种子萌发期对重金属污水具有较强的抗性,在利用植物种子修复重金属污染湿地中可优先作为选择的材料。

**关键词** 重金属污水;种子萌发;胁迫;湿地植物

中图分类号 Q 55; R 979.1

文章编号 1007-4333(2015)02-0167-12

文献标志码 A

## Influence of heavy metal waste water on seed germination of different wetland plants

ZHANG Gui-ling

(College of Life Science, Linyi University, Linyi 276000, China)

**Abstract** Our objective was to explore the germination of wetland plant seeds in heavy metals waste water. Seventeen species of wetland plant seeds were collected and incubated in the waste water with different heavy metal concentrations. The results showed that the germination rate, germination index and vigor index of 10 seeds increased at first and then decreased with increasing heavy metal concentrations except *Phragmites australis*, *Arundo donax*, *Cyperus alternifolius*, *Lris pseudacorus* Linn, *Juncus effuses*, *Alisma plantago-aquatica*, *Ranunculus sceleratus* L. The higher the concentration, the more obvious inhibition was observed. All the parameters in both T3 and T4 were significantly lower than those of the control ( $P > 0.05$ ). The inhibition to the vitality index was greater than the germination rate and germination index. All the seeds had certain resistance to heavy metal stress. The cluster analysis of the membership function integrated values showed that the test plants were divided into 3 categories with high, medium and low resistance to heavy metal stress during germination. Both *Lris pseudacorus* Linn and *Limnocharis flava* were lowest resistant to heavy metals. Twelve species were middle resistant. *Typha orientalis*, *Typha minima*, *Phragmites australis* were highest resistant to heavy metals, suggesting that they might be suitable to grow in the wetland contaminated with heavy metals.

**Key words** wetland plant; heavy metals waste water; germination

收稿日期: 2014-06-07

基金项目: 山东省科技发展计划项目(2009GG10007014); 临沂市社科研究项目(2014LX342); 临沂大学横向课题(HX121207)

作者简介: 张桂玲, 讲师, 主要从事植物遗传育种研究, E-mail: guilingzhang2003@126.com

随着工农业的加速发展,部分湿地重金属污染程度不容乐观<sup>[1-2]</sup>,湿地植物种子的萌发受到了重金属的影响,而采用种子繁殖、扩大湿地植物群落,是对重金属污染湿地恢复和重建绿色生态屏障最简单经济的方法之一。采用种子恢复湿地植被必须解决的难题是种子萌发。一些学者已经研究了温度<sup>[3]</sup>、埋藏<sup>[4-5]</sup>、冷湿分层处理<sup>[6]</sup>、水淹<sup>[7]</sup>、聚集效应<sup>[8]</sup>和盐碱<sup>[9-10]</sup>对湿地植物种子萌发的影响,以及泽泻种子萌发特性研究<sup>[11]</sup>,但对重金属污染湿地植物种子萌发的研究较少,并且目前还少有通过种子成功恢复湿地植被的研究,所以研究重金属污染湿地的种子萌发是开展当地被重金属污染湿地保护和恢复工作的基础。

本试验通过对重金属污水胁迫下湿地植物种子萌发的研究,有利于理解受重金属污染湿地植物消亡的原因,旨在为重金属污染湿地常用湿地植物实际修复,特别是为重金属污染的湿地植被自然恢复与重建提供理论依据,同时为植被恢复的物种选择提供一定的理论基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 种子来源

依照人工湿地植物就地取材、适宜环境气候及容易获得等原则,综合考虑植物对重金属污水净化能力和湿地景观营造能力等因素,结合大量的文献报道<sup>[12-15]</sup>,选定临沂本地 17 种湿地植物作为试验的研究对象,2012 年 9 月中旬—11 月中旬,从临沂滨河景区湿地(35°06'22"N,118°19'20"E)采集新鲜成熟的种子。每个物种的种子分别采集于 50 个以上的个体,将所选个体的种子全部采集,采集的种子在实验室阴干,精选和去杂后放入冰箱(4 °C)冷藏备用。

### 1.2 试验方法

于 2013 年 4 月初开始种子萌发试验。重金属污水配制所用重金属盐分别为硝酸镉( $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ )、重铬酸钾( $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ )、硝酸铅( $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ )、硫酸铜( $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ )、硫酸镍( $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ )及硫酸锌( $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ),重金属离子质量浓度为:镉(Cd)0.5 mg/L;铬(Cr)1.0 mg/L;铅(Pb)、铜(Cu)和镍(Ni)各 2.0 mg/L;锌(Zn)5.0 mg/L。因为根据前人<sup>[16-18]</sup>的研究,在污染较严重的城市废水及污泥中,主要重金属污染物的种类及质量浓度大致如此。依据以上浓度配比设 4 个浓度梯度和一组清洁对照(表 1)。

表 1 重金属污水处理质量浓度  
Table 1 Concentration of heavy metal

处理序号	waste water treatment					mg/L
	镉 Cd	铬 Cr	铅 Pb	铜 Cu	镍 Ni	
CK	0	0	0	0	0	0
T1	0.5	1.0	2	2	2	5
T2	2.0	4.0	8	8	8	20
T3	8.0	16.0	32	32	32	80
T4	32.0	64.0	128	128	128	320

参照 Grime 等<sup>[19]</sup>和 Wang 等<sup>[20]</sup>的方法,在光照培养箱中进行萌发试验。将种子置于已添加 5 mL 不同浓度处理液的双层滤纸培养皿( $\Phi 9$  cm)上萌发,5 个处理,每个处理 5 次重复,每个重复 50 粒种子,对照为蒸馏水。试验模拟原生境春季气温和日照条件:白天温度( $20 \pm 1$ ) °C,光照强度 9 000 lx,12 h;夜间温度( $15 \pm 1$ ) °C,光照强度 0 lx,12 h,湿度 75%。每天加蒸馏水保持滤纸湿润,以胚根与种子等长作为萌发的标准,连续 3 d 无新萌发种子出现即视为萌发过程结束。

### 1.3 种子萌发观测指标

种子萌发测定按种子检验原理和技术<sup>[21-22]</sup>进行:

$$\text{萌发率(FG)} = \frac{\text{萌发总粒数}}{\text{试验总粒数}} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{萌发指数(GI)} = \sum (\text{Gt}/\text{Dt}) \quad (2)$$

$$\text{活力指数(VI)} = S \times \sum (\text{Gt}/\text{Dt}) \quad (3)$$

式中:Gt 为逐日萌发数,Dt 为 Gt 对应的萌发天数,S 为一定时期内幼苗生长势,以观察结束时每株苗的平均鲜重表示。萌发开始时间(Days to first germination),从播种到第一粒种子萌发所需的时间,d;达 50% 萌发率的时间,从播种到萌发 50% 所需时间,d;萌发持续时间,开始萌发到萌发结束所需时间,d。

### 1.4 数据分析方法

萌发试验数据用 5 次重复的平均值(Mean) ± 标准差(SD)表示,先对数据进行反正弦转化以克服数据的方差不齐,利用 SPSS 16.0 软件,通过 One-way ANOVA 在 95% 的置信度水平上,用 Duncan's Stest,在 0.05 水平上进行比较不同处理间的差异;采用 Excel 对数据进行隶属函数度的计算<sup>[23-24]</sup>,并计算出耐重金属隶属函数综合值,用 IBM SPSS

Statistics 19 软件对隶属函数综合值进行聚类分析,依次确定耐重金属污水的植物群落,为消除不同植物间固有的生物学和遗传性特性差异,本试验采用测定指标相对值(测定值/对照值)进行隶属函数计算和聚类分析。

隶属函数计算公式:

$$X(u) = (X - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (1)$$

$$X(u) = 1 - (X - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (2)$$

式中: $X$ 为某个植物某一指标测定值, $X_{\max}$ 为所试植物中某一指标测定值的最大值, $X_{\min}$ 为该指标中最小值,当植物的测定指标与耐重金属性负相关则用式 2)。先求出 17 种植物各个耐盐指标相对值在不同重金属污水浓度下的隶属值,然后把每一指标相对值在不同重金属污水浓度下的隶属值累加,最后再将每一植物各耐盐指标的隶属值累加得到隶属函数综合值,通过比较 17 种植物的隶属函数综合值大小,确定耐重金属污水胁迫的强弱。

## 2 结果与分析

### 2.1 重金属污水对不同湿地植物种子萌发特征的影响

种子的萌发率、萌发指数及活力指数的 3 个指标综合起来可以反映植物芽期耐盐性强弱<sup>[25]</sup>。由表 2 可知,随着重金属污水浓度升高,除了芦苇、芦竹、黄菖蒲、灯芯草、泽泻和石龙芮,其他 11 种湿地植物种子的萌发率、萌发指数和活力指数均呈现先升高后降低的趋势。

与对照相比,当重金属污水浓度为处理 T1 值时,萌发率除了芦苇和芦竹不变;黄菖蒲下降外,其他均有所升高,平均升高 4.89%,其中水葱升高显著。当处理浓度达到 T2 值时,萌发率有所升高的 14 种植物开始下降,其中黄荇、香蒲、泽泻、车前和小香蒲的萌发率仍然大于或等于对照。当浓度为处理 T4 值时,萌发率均下降显著,重金属污水对芦苇和香蒲的萌发率影响较小,只下降了 9.38% 和 12.5%,而对黄菖蒲和黄荇影响较大,萌发率分别下降了 42.86% 和 44.44%。

与对照比较,T1 处理下有 14 种植物的萌发指数升高,平均升高 4.21%,除了水苦荬、芦苇、芦竹、黄菖蒲、黄荇、灯芯草和蒲苇其他升高显著,而芦竹、黄菖蒲和灯芯草萌发指数下降;T2 处理下萌发指数除了菖蒲升高,芦苇不变外,其他 15 种植物均下降,并且芦竹、风车草、黄菖蒲、黄荇、灯芯草、泽

泻和梭鱼草下降显著;在 T4 处理浓度胁迫下,香蒲和芦苇的萌发指数下降较少,分别下降了 3.89% 和 3.96%,而石龙芮和黄菖蒲的萌发指数下降较明显,下降了 35.14% 和 36.88%。

与对照相比,T1 处理下芦苇、芦竹、黄菖蒲、泽泻和石龙芮活力指数降低其他均升高,平均升高 2.86%,其中水苦荬、水葱、风车草、菖蒲、香蒲及千屈菜和梭鱼草的活力指数升高显著。T2 处理下,除了菖蒲、香蒲、千屈菜,其他植物的活力指数均呈下降趋势,水苦荬、小香蒲和蒲苇下降不显著。T4 处理下,香蒲和芦苇的活力指数下降较少,分别下降了 8.96% 和 14.49%,而黄荇和泽泻下降明显,分别下降了 65.66% 和 66.07%。

### 2.2 重金属污水对种子萌发进程的影响

萌发进程设 3 个测量指标,萌发开始时间、达到 50% 萌发率时间和萌发持续时间,从数据可以看出,低浓度重金属污水缩短萌发进程,高浓度则延长萌发进程。CK 处理下,5 d 以内萌发的有芦苇、水葱和黄荇,香蒲、车前和小香蒲,9 d 以后萌发的有黄菖蒲、蒲苇和石龙芮。与对照比较,T1 处理下:水苦荬、水葱、风车草、菖蒲、千屈菜、蒲苇和石龙芮种子提前萌发;水苦荬、水葱、香蒲、车前、小香蒲和蒲苇达到 50% 萌发率的时间提前;水葱、芦竹、风车草、蒲苇、车前和小香蒲种子萌发持续时间缩短。随着处理浓度增加,种子萌发逐渐受到抑制,当达到 T4 浓度时,与 CK 比较萌发开始时间延后 1~6 d,其中黄菖蒲、黄荇、灯芯草和石龙芮延长 4 d 以上;达到 50% 萌发率的时间延迟 1~5 d,水葱、黄荇和灯芯草延迟 4 d 以上;萌发持续时间延长 2~6 d,水葱、芦竹、黄菖蒲、黄荇、灯芯草、梭鱼草、蒲苇和石龙芮延长了 4 d 以上。

### 2.3 萌发期耐重金属污水胁迫能力比较

通过对 17 种植物耐重金属污水指标相对值(表 3)计算出隶属函数综合值,从表 4 可以看出,隶属函数综合值可直观反映出不同供试植物种子耐重金属污水的强弱,综合值越大,耐重金属污水能力越强。研究表明,不同湿地植物种子萌发期耐重金属污水能力差异较大,香蒲和小香蒲的隶属函数综合值最大,分别为 10.17 和 9.47;黄菖蒲和黄荇的隶属函数综合值最小,分别为 1.50 和 3.14。由此可看出对重金属污水胁迫表现较好的是香蒲和芦苇,而黄菖蒲和黄荇的抗重金属污水胁迫能力较差。

表 2 17 种湿地植物的种子大小和萌发特征  
Table 2 Germination traits of 17 species wetland plant seeds

植物名称 Plant names	处理 Treatment	萌发率/% Germination	萌发指数 Germination index	活力指数 Vigor index
水苦苣 <i>Veronicaundulata</i>	CK	76±1.7 ab	8.62±0.19 ab	0.204 7±0.000 9 b
	T1	84±2.3 a	8.71±0.15 a	0.216 8±0.001 2 a
	T2	74±6.2 b	8.17±0.12 b	0.195 5±0.001 5 b
	T3	70±2.3 b	7.38±0.09 c	0.152 4±0.002 6 c
	T4	60±2.9 c	6.43±0.21 d	0.097 2±0.000 6 d
芦苇 <i>Phragmites caustralis</i>	CK	64±3.9 a	13.13±0.23 a	0.200 8±0.001 7 a
	T1	64±1.5 a	13.15±0.17 a	0.200 3±0.000 8 a
	T2	62±2.4 ab	13.13±0.12 a	0.198 3±0.001 2 b
	T3	60±2.7 ab	13.07±0.20 b	0.178 8±0.001 4 b
	T4	58±1.4 b	12.61±0.18 c	0.171 7±0.000 6 c
水葱 <i>Scirpus validus Vahl</i>	CK	80±1.3 b	12.08±0.08 b	0.559 9±0.004 b
	T1	86±2.5 a	13.21±0.11 a	0.581 1±0.029 a
	T2	76±3.1 b	11.92±0.25 b	0.536 5±0.013 c
	T3	70±1.8 c	10.75±0.14 c	0.405 6±0.033 d
	T4	56±2.7 d	8.25±0.07 d	0.328 4±0.024 e
芦竹 <i>Arundo donax</i>	CK	70±3.2 a	8.34±0.12 a	0.739 8±0.027 a
	T1	70±2.7 a	8.30±0.04 a	0.661 3±0.044 b
	T2	66±1.9 a	7.82±0.19 b	0.656 3±0.037 b
	T3	60±1.3 b	7.27±0.10 c	0.528 1±0.014 c
	T4	54±2.5 c	6.50±0.17 d	0.433 5±0.021 d
风车草 <i>Cyperus alternifolius</i>	CK	86±2.6 ab	14.37±0.27 b	0.438 8±0.028 b
	T1	90±1.7 a	15.28±0.16 a	0.462 8±0.018 a
	T2	80±2.1 bc	12.52±0.14 c	0.426 1±0.031 c
	T3	76±1.4 c	11.64±0.20 d	0.302 8±0.020 d
	T4	66±2.3 d	9.47±0.11 e	0.249 2±0.024 e
黄菖蒲 <i>Lris pseudacorus Linn</i>	CK	56±1.2 a	7.89±0.07 a	0.873 0±0.041 a
	T1	50±6.9 ab	7.84±0.14 a	0.823 7±0.039 b
	T2	48±2.2 b	7.38±0.10 b	0.630 2±0.027 c
	T3	42±5.6 c	6.26±0.11 c	0.610 3±0.038 d
	T4	32±1.3 d	4.98±0.19 d	0.495 7±0.024 e
黄花蔺 <i>Limncharis flava</i>	CK	54±2.6 a	7.84±0.12 a	0.006 1±0.000 9 a
	T1	56±5.4 a	7.92±0.07 a	0.006 3±0.000 7 a
	T2	54±1.9 a	7.12±0.31 b	0.004 5±0.000 3 b
	T3	46±2.3 b	6.21±0.17 c	0.003 5±0.000 4 c
	T4	30±1.7 c	5.32±0.13 d	0.002 1±0.000 8 d
菖蒲 <i>Acorus calamus</i>	CK	94±2.5 ab	15.64±2.14 c	0.232 0±0.015 b
	T1	96±4.7 a	16.37±3.01 a	0.243 8±0.007 a
	T2	90±3.6 b	16.24±1.59 a	0.233 1±0.011 b
	T3	80±2.1 c	15.88±2.87 b	0.182 7±0.009 c
	T4	74±2.9 c	14.14±0.97 c	0.123 3±0.017 d

表2(续)

植物名称 Plant names	处理 Treatment	萌发率/% Germination	萌发指数 Germination index	活力指数 Vigor index
香蒲 <i>Typha orientalis</i>	CK	80±0.8 ab	12.86±0.17 b	0.098 2±0.000 8 b
	T1	86±2.7 a	13.52±0.14 a	0.099 5±0.001 5 a
	T2	82±2.0 ab	12.77±0.13 bc	0.098 9±0.001 7 ab
	T3	78±1.7 b	12.69±0.22 cd	0.092 7±0.001 0 c
	T4	70±1.4 c	12.36±0.18 d	0.089 4±0.001 4 d
灯芯草 <i>Juncus effusus</i>	CK	80±1.8 ab	9.75±0.06 a	0.614 3±0.025 a
	T1	84±2.4 a	9.61±0.12 ab	0.614 7±0.017 a
	T2	78±1.7 b	9.42±0.16 bc	0.528 2±0.012 b
	T3	76±1.4 b	9.29±0.20 c	0.433 6±0.021 c
	T4	68±2.3 c	8.76±0.17 d	0.343 1±0.019 d
千屈菜 <i>Lythrum salicaria Linn</i>	CK	54±3.2 ab	6.23±0.18 b	0.102 4±0.000 4 b
	T1	56±3.7 a	7.15±0.10 a	0.108 6±0.001 3 a
	T2	52±1.6 b	6.18±0.06 b	0.103 0±0.001 7 b
	T3	44±1.1 c	5.64±0.09 c	0.091 3±0.001 0 c
	T4	38±1.8 d	4.58±0.11 d	0.085 7±0.001 4 d
泽泻 <i>Alisma plantago-aquatica</i>	CK	64±2.4 ab	17.29±0.16 b	0.005 6±0.000 8 a
	T1	68±1.5 a	17.72±0.23 a	0.005 0±0.000 3 ab
	T2	64±2.7 a	15.84±0.17 c	0.004 5±0.000 7 b
	T3	58±2.1 b	15.28±0.20 d	0.003 2±0.000 6 c
	T4	50±3.5 c	14.22±0.19 e	0.001 9±0.000 4 d
车前 <i>Plantago asiatica</i>	CK	90±2.0 a	39.48±3.32 b	0.093 7±0.001 8 a
	T1	94±1.4 a	40.29±2.51 a	0.094 1±0.001 1 a
	T2	90±3.4 a	37.43±1.97 b	0.093 0±0.001 4 b
	T3	82±1.7 b	34.17±2.17 c	0.081 4±0.000 9 c
	T4	68±2.1 c	30.62±1.29 d	0.072 6±0.001 3 d
梭鱼草 <i>Pontederia cordata</i>	CK	64±0.7 a	12.87±0.37 b	0.152 7±0.002 8 b
	T1	66±1.2 a	13.24±0.14 a	0.155 2±0.001 8 a
	T2	60±2.4 ab	12.73±0.29 c	0.148 3±0.019 c
	T3	54±1.3 bc	10.51±0.18 d	0.139 4±0.002 1 d
	T4	48±1.5 c	8.79±0.20 e	0.127 2±0.001 2 e
小香蒲 <i>Typha minima</i>	CK	76±0.6 ab	12.51±0.27 b	0.089 7±0.001 2 ab
	T1	80±1.7 a	12.97±0.19 a	0.090 4±0.001 1 a
	T2	76±1.1 ab	12.47±0.34 b	0.089 1±0.002 1 b
	T3	72±2.6 b	12.21±0.11 c	0.082 1±0.000 9 c
	T4	64±2.2 c	11.96±0.16 d	0.076 4±0.001 7 d
蒲葦 <i>Cortaderia selloana</i>	CK	86±1.8 ab	4.81±0.08 ab	0.075 3±0.002 6 ab
	T1	88±3.7 a	4.92±0.12 a	0.075 9±0.001 2 a
	T2	84±1.4 ab	4.76±0.06 b	0.071 2±0.000 8 b
	T3	78±2.7 b	4.20±0.11 c	0.062 8±0.001 4 c
	T4	70±1.9 c	3.49±0.05 d	0.053 3±0.001 1 d
石龙芮 <i>Ranunculus sceleratus L</i>	CK	88±2.6 a	3.50±0.07 b	0.103 1±0.001 7 a
	T1	90±1.3 a	3.61±0.10 a	0.102 9±0.000 8 a
	T2	86±2.8 a	3.49±0.09 b	0.095 7±0.001 9 b
	T3	78±3.0 b	2.86±0.04 c	0.082 3±0.001 1 c
	T4	60±1.7 c	2.27±0.08 d	0.061 8±0.001 6 d

注:同列小写字母表示  $P<0.05$  水平差异显著。

Note: Different small letters in the same column mean significant difference at 5% level at LSD test.

表3 不同湿地植物各项相对指标的差异

Table 3 Differences of the relative indicators of wetland plants

%

植物名称 Plant names	相对萌发率 Relative germination				相对萌发指数 Relative germination index				相对活力指数 Relative vigor index			
	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4
水苔菜 <i>Veronicaundulata</i>	110.53	97.37	92.11	78.95	101.04	94.78	85.61	74.59	105.90	100.39	74.45	47.48
芦苇 <i>Phragmites australis</i>	100.00	96.88	93.75	90.63	100.15	100.00	99.54	96.04	99.77	98.77	89.06	85.53
水葱 <i>Scirpus validus Vahl</i>	107.50	95.00	87.50	70.00	109.35	98.68	88.99	68.29	108.31	104.36	75.60	61.21
芦竹 <i>Arundo donax</i>	100.00	94.29	85.71	77.14	100.60	93.76	87.17	77.94	112.72	100.76	80.47	66.05
风车草 <i>Cyperus alternifolius</i>	104.65	93.02	88.37	76.74	106.33	87.13	81.00	65.90	108.61	102.97	71.06	58.48
黄萹蒲 <i>Lris pseudacorus Linn</i>	89.29	85.71	75.00	57.14	99.37	93.54	79.34	63.12	94.35	72.19	69.91	56.78
黄花草 <i>Limnocharis flava</i>	103.70	100.00	85.19	55.56	101.02	90.82	79.21	67.86	103.02	73.59	57.23	34.34
菖蒲 <i>Acorus calamus</i>	102.13	95.74	85.11	78.72	104.67	103.84	101.53	90.41	105.09	100.47	78.75	53.15
香蒲 <i>Typha orientalis</i>	107.50	102.50	97.50	87.50	105.13	99.30	98.68	96.11	101.32	100.71	91.75	86.46

表 3(续)

植物名称 Plant names	相对萌发率 Relative germination				相对萌发指数 Relative germination index				相对活力指数 Relative vigor index			
	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4
灯芯草 <i>Juncus effusus</i>	105.00	97.50	95.00	85.00	98.56	96.62	95.28	89.85	100.07	85.98	70.58	55.85
千屈菜 <i>Lythrum salicaria Linn</i>	103.70	96.30	81.48	70.37	114.77	99.20	90.53	73.52	106.05	100.59	89.20	83.68
泽泻 <i>Alisma plantago-aquatica</i>	106.25	96.88	90.63	78.13	102.49	91.61	88.37	82.24	89.29	80.36	57.14	33.93
车前 <i>Plantago asiatica</i>	104.44	100.00	91.11	75.56	102.05	94.81	86.55	77.56	100.43	99.25	86.87	77.48
梭鱼草 <i>Pontederia cordata</i>	103.13	93.75	84.38	75.00	102.87	98.91	81.66	68.30	101.64	97.12	91.29	83.30
小香蒲 <i>Typha minima</i>	105.26	100.00	94.74	84.21	103.68	99.68	97.60	95.60	100.77	99.32	91.52	85.16
蒲苇 <i>Acorus calamus</i>	102.33	97.67	90.70	81.40	102.29	98.96	87.32	72.56	100.80	94.56	83.40	70.78
石龙芮 <i>Ranunculus sceleratus L</i>	102.27	97.73	88.64	68.18	103.14	99.71	81.71	64.86	99.81	92.82	79.83	59.94
变幅	89.29~	85.71~	75.00~	55.56~	98.56~	87.13~	79.21~	63.12~	89.29~	72.19~	57.14~	33.93~
平均值	110.53	102.50	97.50	90.63	114.77	103.84	101.53	96.11	112.72	104.36	91.75	86.46
标准差	103.39	96.49	88.64	75.90	103.38	96.55	88.83	77.93	102.23	94.37	78.71	64.68
	4.53	3.72	5.58	9.52	3.96	4.22	7.34	11.64	5.47	10.11	11.07	17.23

表4 不同浓度重金属污水胁迫下17种湿地植物各项指标的隶属函数值U(X)  
 Table 4 Membership function values of each index of emerged plants under the stress of the different heavy metal concentration U(X)

植物名称 Plant names	相对萌发率 Relative germination				相对萌发指数 Relative germination index				相对活力指数 Relative vigor index				综合值 Total value
	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4	
水苦苣 <i>Veronica undulata</i>	1.00	0.69	0.76	0.67	0.15	0.46	0.29	0.35	0.71	0.88	0.50	0.26	6.71
芦葍 <i>Phragmites australis</i>	0.50	0.66	0.83	1.00	0.10	0.77	0.91	1.00	0.45	0.83	0.92	0.26	8.96
水葱 <i>Scirpus validus Vahl</i>	0.86	0.55	0.56	0.41	0.67	0.69	0.44	0.16	0.81	1.00	0.53	0.98	7.19
芦竹 <i>Arundo donax</i>	0.50	0.51	0.48	0.62	0.13	0.40	0.36	0.45	1.00	0.89	0.67	0.52	6.61
风车草 <i>Cyperus alternifolius</i>	0.72	0.44	0.59	0.60	0.48	0.00	0.08	0.08	0.82	0.96	0.40	0.61	5.65
黄菖蒲 <i>Lris pseudacorus Linn</i>	0.00	0.00	0.00	0.05	0.05	0.38	0.01	0.00	0.22	0.00	0.37	0.47	1.50
黄花草 <i>Limncharis flava</i>	0.68	0.85	0.45	0.00	0.15	0.22	0.00	0.14	0.59	0.04	0.00	0.44	3.14
菖蒲 <i>Acorus calamus</i>	0.60	0.60	0.45	0.66	0.38	1.00	1.00	0.83	0.67	0.88	0.62	0.01	8.06
香蒲 <i>Typha orientalis</i>	0.86	1.00	1.00	0.91	0.41	0.73	0.87	1.00	0.51	0.89	1.00	0.37	10.17
灯芯草 <i>Juncus effusus</i>	0.74	0.70	0.89	0.84	0.00	0.57	0.72	0.81	0.46	0.43	0.39	1.00	6.96
千屈菜 <i>Lythrum salicaria Linn</i>	0.68	0.63	0.29	0.42	1.00	0.72	0.51	0.32	0.72	0.88	0.93	0.42	8.04
泽泻 <i>Alisma plantago-aquatica</i>	0.80	0.66	0.69	0.64	0.24	0.27	0.41	0.58	0.00	0.25	0.00	0.95	4.56
车前 <i>Plantago asiatica</i>	0.71	0.85	0.72	0.57	0.22	0.46	0.33	0.44	0.48	0.84	0.86	0.00	7.30
梭鱼草 <i>Pontederia cordata</i>	0.65	0.48	0.42	0.55	0.27	0.71	0.11	0.16	0.53	0.77	0.99	0.83	6.57
小香蒲 <i>Typha minima</i>	0.75	0.85	0.88	0.82	0.32	0.75	0.82	0.98	0.49	0.84	0.99	0.94	9.47
蒲葍 <i>Acorus calamus</i>	0.61	0.71	0.70	0.74	0.23	0.71	0.36	0.29	0.49	0.70	0.76	0.98	6.99
石龙芮 <i>Ranunculus sceleratus L</i>	0.61	0.72	0.61	0.36	0.28	0.75	0.11	0.05	0.45	0.64	0.66	0.70	5.73



### 2.4 对 17 种湿地植物耐重金属污水胁迫的聚类分析

对 17 种湿地植物种子的相对耐重金属污水胁迫能力隶属函数综合值进行聚类分析(图 1),将在不同重金属污水胁迫下耐受能力相近的品种聚在一

起,结果表明,在欧氏距离平方值大约为 5 时,可将 17 种湿地植物划分为三大类,香蒲、小香蒲和芦苇耐性较好,黄花蔺和黄菖蒲耐性较差,其他的耐性中等。

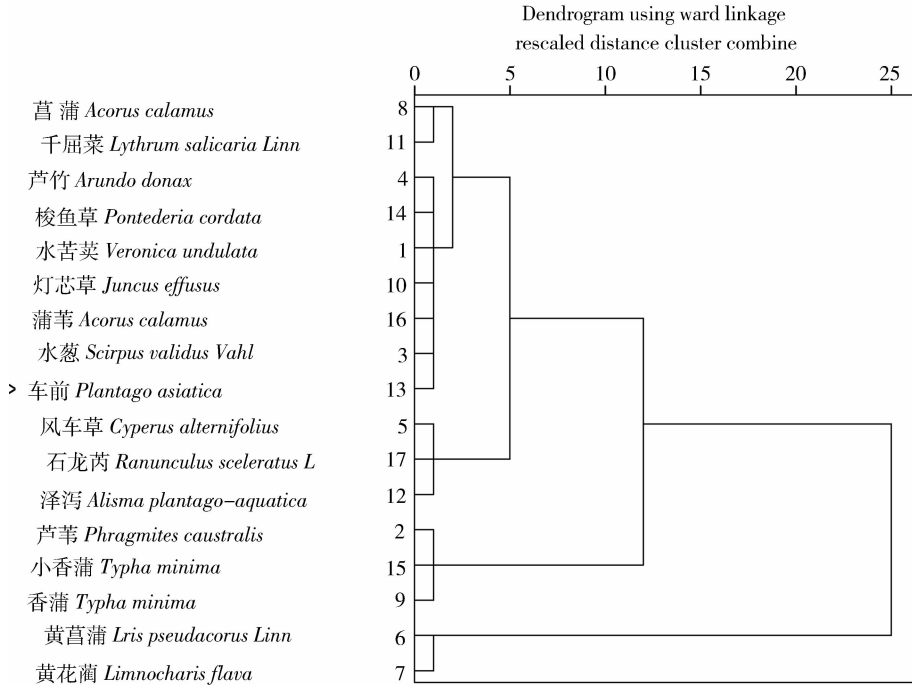


图 1 17 种湿地植物种子萌发期耐重金属污水的聚类分析

Fig. 1 Map of cluster analysis of heavy metal resistance about 17 emergent aquatic plant during germination

## 3 讨论

### 3.1 重金属污水对湿地植物种子萌发的影响

种子萌发是植物对外界有所反应的开始,其生长状况直接影响植物的生长和生物产量<sup>[26]</sup>,评价种子萌发常用的指标为萌发率、萌发指数及活力指数,相应地反映种子萌发整齐度、萌发速度、幼苗健壮程度的潜势<sup>[27]</sup>。种子的萌发特性不仅与植物本身的生物学特性有关外,还与外界的各种环境因子密切相关,其中重金属胁迫是影响种子萌发的环境因子之一,在不同浓度重金属胁迫下,种子萌发一般经历 3 个过程,即低浓度一般对种子萌发有促进作用<sup>[28-32]</sup>;随着重金属浓度升高,引起种子萌发能力降低;重金属浓度过高会抑制种子萌发。对于低浓度重金属胁迫对种子萌发有促进作用的原因,有关研究认为,种子在萌发过程中低浓度的重金属离子与种子萌发所必需的酶反应或特异性结合,可提高胚

的生理活性<sup>[33]</sup>,能短时间提高种子萌发初期的淀粉酶、蛋白酶和脂肪酶等酶活性,有利于胚乳中营养物质的降解,增强种子的呼吸速率,促进萌发代谢;另外重金属对植物种子萌发的影响与种间差异以及种子的自身结构有很大的关系,特别是种皮结构<sup>[36]</sup>,种皮是阻止重金属侵入抑制胚萌发的主要壁垒<sup>[34-35]</sup>;还有研究认为,试验选用的  $Pb(NO_3)_2$  含有  $NO_3^-$  有一定的营养作用,并且超过了低浓度  $Pb^{2+}$  带来的负面影响,所以低浓度  $Pb^{2+}$  总体表现促进了种子的萌发<sup>[32]</sup>。

本研究结果表明,在对照处理下,千屈菜、黄花蔺和黄菖蒲的萌发率低于 60%,这可能与种子本身存在休眠有关。在 T1 处理下,萌发率除了芦苇和芦竹不变,黄菖蒲下降外,其他均有所升高;萌发指数除了芦竹、黄菖蒲和灯芯草下降,其他均有所升高;活力指数除了芦苇、芦竹、黄菖蒲、泽泻和石龙芮下降,其他均升高,随着处理浓度的升高,当处理浓

度达到 T3 以上时,萌发率、萌发指数、活力指数都出现逐渐下降趋势。以上可以看出 17 种湿地植物的萌发特征指数多数也出现了出现了低浓度促进,高浓度抑制作用。国内外对重金属污水对湿地植物种子萌发的影响少有报道,吕笃康等<sup>[37]</sup>研究发现,当  $\text{Cr}^{6+}$  浓度为 5 mg/L 时,对小香蒲种子萌发率略微有促进作用,而浓度为 10、50 和 100 mg/L 依次递增时, $\text{Cr}^{6+}$  不利于小香蒲种子的萌发和生长,抑制作用逐渐增大,试验结果与本试验相同。低浓度对萌发指数有促进作用可能是种子受到重金属胁迫,湿地植物种子启动逆境萌发的应激机制,使种子快速萌发来抵御重金属对其伤害,同时由于湿地植物种子比一般陆地植物种子较耐水淹、深埋等逆境<sup>[4,38]</sup>,可能是由于湿地植物种子具有为适应特殊的生存环境而进化的特有的生理结构决定的。

随着重金属浓度的升高,胁迫程度加剧,植物体会产生过量的对细胞膜结构和功能起破坏作用的活性氧自由基。这些过剩的活性氧使细胞膜结构过氧化作用加强,内源抗氧化能力减弱,膜通透性增大<sup>[39-40]</sup>,细胞内的离子和有机物大量外渗,外界有毒物质进入细胞,结果导致植物体内一系列生理生化过程失调;同时重金属可能抑制乙醇脱氢酶、淀粉酶、蛋白酶、酸性磷酸酯酶等酶活性;从而抑制种子内储藏淀粉和蛋白质等营养成分分解,进而减少种子萌发所需的物质和能量<sup>[41]</sup>,萌发率、萌发指数和活力指各项指标均呈下降趋势,种子萌发进程受到严重抑制<sup>[29]</sup>。本研究发现,随着重金属浓度增加,达到 T2 处理浓度时,种子的萌发特征指数萌发率、萌发指数、活力指数,除了香蒲和泽泻外其他植物开始呈下降趋势,说明受到重金属不同程度的抑制作用,继续增加到处理 T4 时,种子萌发受到显著抑制,其萌发率下降了 9.38%~44.44%;萌发指数下降了 3.89%~36.88%;活力指数下降了 8.96%~66.07%,萌发开始时间推迟了 14.29%~75.00%,达到 50%萌发率时间延后 11.11%~62.50%,萌发持续时间延长了 11.11%~125.00%,可见,特定浓度下各湿地植物种子的抑制率分布范围较广,说明不同湿地植物种子对重金属的耐性存在很大的差异,但仍平均有 56.82%的种子萌发,说明这 17 种供试湿地植物种子普遍对重金属污水有一定的耐性;同时还发现,重金属污水影响 17 种湿地植物种子活力指数的浓度均较影响萌发率和萌发指数 2 个指标的浓度低,说明幼苗生长比种子萌发对重金属

污水更加敏感,这与前人在其他植物上的研究结果<sup>[42-44]</sup>较为一致。

### 3.2 重金属污水对隶属函数值的影响

隶属函数法在植物盐胁迫、重金属胁迫研究中较为常用<sup>[45-46]</sup>,本研究通过隶属函数法计算出 17 种供试植物的相对指标的综合值,然后对其进行系统聚类分析,将萌发期耐重金属性强弱划分为三大类,香蒲、小香蒲和芦苇种子萌发耐重金属性较强,在供试重金属浓度范围内,三者种子的相对萌发率、相对萌发指数、相对活力指数明显比其他植物要高,尤其是在重金属污水污染浓度为:镉(Cd)32 mg/L;铬(Cr)64 mg/L;铅(Pb)、铜(Cu)、镍(Ni)各 128 mg/L;锌(Zn)320 mg/L 时种子仍具有较强的萌发能力,T4 处理与对照比较,3 个萌发特征指数萌发率、萌发指数和活力指数,香蒲分别下降了 12.50%、3.89% 和 8.96%,小香蒲分别下降了 15.79%、4.40% 和 14.84%,芦苇分别下降了 9.38%、3.96% 和 14.49%,这 3 种植物种子萌发持续时间仅需 9~12 d。在重金属污染的湿地上进行植物修复,理想的湿地挺水植物种子应在污染胁迫下仍具有较强的生命力,因此,本试验筛选出的香蒲、小香蒲和芦苇可能具有进行植物种子修复重金属污染湿地的潜力。较多研究发现这 3 种湿地植物对重金属净化效果显著<sup>[47-51]</sup>,但种子萌发期耐重金属胁迫的强弱并不代表生长期耐性的强弱,本研究结果仅能说明参试品种萌发期耐重金属污水胁迫的差异,而品种真正耐性的差异还必须在实践中检验。

本研究仅对 17 种湿地植物种子在重金属污水胁迫下的萌发特征进行了初步探讨,但随着重金属污染研究的不断深入,以及毒物联合作用的毒性、拮抗作用、加和作用等概念的提出,有必要从生理角度深入研究湿地植物幼苗对重金属的耐抗机理以及重金属污染区正常生长植物的形态指标和抗逆特征,进一步掌握重金属污染区湿地植物的解毒机制等。

## 4 结 论

1) 17 种湿地植物的萌发率、萌发指数和活力指数受到重金属污水胁迫时,除了黄菖蒲、芦苇、芦竹、水苦菜、黄花蔺和蒲苇,其他均出现低浓度促进,高浓度抑制的现象。

2) 低浓度处理(T1)促使水苦菜、水葱、风车草、菖蒲、千屈菜、蒲苇和石龙芮种子提前萌发;使水苦菜、水葱、香蒲、车前、小香蒲和蒲苇的达到 50% 萌

发率的时间提前;同时缩短了水葱、芦竹、风车草、蒲苇、车前和小香蒲种子萌发持续时间。

3) 重金属污水影响 17 种湿地植物种子活力指数的浓度均较影响萌发率和萌发指数的浓度低,说明幼苗生长比种子萌发对重金属污水更加敏感。

4) 利用相对指标的隶属函数综合值进行聚类分析,结果表明,在欧氏距离平方值大约为 5 时,根据种子萌发期耐重金属污水能力强弱,可将 17 种湿地植物划分为三大类,香蒲、小香蒲和芦苇耐性较好,黄花蔺和黄菖蒲耐性较差,其他的耐性中等。

### 参 考 文 献

- [1] 李吉锋,叶玉超. 国内湿地重金属污染及植物修复技术研究进展[J]. 广东农业科学, 2013(7):164-166
- [2] 简敏菲,徐鹏飞,熊建秋,等. 乐安河-鄱阳湖段湿地表土重金属污染风险及水生植物群落多样性评价[J]. 生态与农村环境学报, 2013, 29(4):415-42
- [3] Andersen R N. Germination and establishment of weeds for experimental purposes[M]. Weed Science Society of America, Urbana, IL, 1968, 230-236
- [4] 孟焕,王雪宏,佟守正,等. 湿地土壤埋深对芦苇、香蒲种子萌发的影响[J]. 生态学杂志, 2013, 32(9):2320-2325
- [5] Schfiütz W. Primary dormancy and annual dormancy cycle in seeds of six temperate wetland sedges[J]. Aquat Bot, 1997, 59: 75-85
- [6] Schutz W, Rave G. The effect of cold stratification and light on the seed germination of temperate sedges (*Carex*) from various habitats and implications for regenerative strategies[J]. Plant Ecol, 1999, 144:215-230
- [7] 曹昀,王国祥,刘玉. 淹水对曹蒲萌发及幼苗生长的影响[J]. 湖泊科学, 2007, 19(5):577-584
- [8] 李洁琳,尹黎燕,陈媛媛,等. 几种水生植物种子萌发的聚集效应研究[J]. 武汉植物学研究, 2010, 28(3):330-335
- [9] 裴定宇,陆兆华,苗颖,等. 黄河三角洲不同程度盐碱化土壤对芦苇种子发芽的影响[J]. 滨州学院学报, 2009, 25(3):23-26
- [10] 袁龙义,江林枝. 不同盐度对苦草、刺苦草和水车前种子萌发的影响研究[J]. 安徽农学通报, 2008, 14(17):77-19
- [11] 陈菁瑛,刘波,郑伟文,等. 泽泻种子发芽特性研究[J]. 现代中药研究与实践, 2005, 19(5):17-19
- [12] 刘霄,唐婷芳子,黄岁禄,等. 4 种湿地植物的生长特性和污水净化效果研究[J]. 云南农业大学学报, 2013, 28(3):392-399
- [13] 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
- [14] 王婷,耿绍波,常高峰. 人工湿地植物对生活污水净化作用的研究进展[J]. 环境科学与技术, 2013, 36(6L):210-212
- [15] 陈永华,吴晓英,蒋丽鹏,等. 处理生活污水湿地植物的筛选与净化潜力评价[J]. 环境科学学报, 2008, 28(8):1549-1554
- [16] DEMIREZEN D, AKSOY A. Accumulation of heavy metals in *Typha angustifolia* (L) and *Potamogeton pectinatus* (L) living in Sultan Marsh (Kayseri, Turkey) [J]. Chemosphere, 2004, 56(7):685-696
- [17] 卢吉文,陈萍丽,赵秀兰. 传统活性污泥法处理城市污水过程中重金属的变化研究[J]. 环境污染与防治, 2008, 30(5):29-32
- [18] 刘荣博,张建刚. 三宝屯污水处理厂各工艺段重金属含量的测定[J]. 山东化工, 2014, 43:81-82
- [19] Grime J P, Mason G, Curtis A V, et al. A comparative study of germination characteristics in a local flora[J]. The Journal of Ecology, 1981, 69(3):1017-1059
- [20] Wang Z L, Wang G, Liu X M. Germination strategy of the temperate sandy desert annual chenopod *Agriophyllum squarrosum*[J]. Journal of Arid Environments, 1998, 40(1): 69-76
- [21] 颜启传. 种子检验原理和技术[M]. 杭州:浙江大学出版社, 2001:2, 66, 102
- [22] 张春庆,王建华. 种子检验学[M]. 北京:高等教育出版社, 2006:134-157
- [23] 刘华,王峰,李娜,等. 隶属函数法对 12 个树种抗旱性的综合评价[J]. 中国农村小康科技, 2010(10):39-41
- [24] 赵一鹤,李建宾,杨时宇,等. 干旱胁迫下 3 个甜角品种幼苗的生理生化响应及抗旱性评价[J]. 林业科学研究, 2012, 25(5): 569-575
- [25] 沈禹颖,王镇民,陈亚明. 盐胁迫对牧草种子萌发及其恢复的影响[J]. 草业学报, 1999, 8(3):54-60
- [26] 廖钢,张志飞,王俊丽,等. 镉胁迫对野老鹳草和长刺酸模种子萌发的影响[J]. 草原与草坪, 2011, 31(1):47-49
- [27] 何欢乐,蔡涓,潘俊松,等. 盐胁迫对黄瓜种子萌发特性的影响[J]. 上海交通大学学报:农业科学版, 2005, 23(2):148-152
- [28] 高雪峰,敖恩宝力格. 重金属 Pb、Hg 污染对 3 种小麦种子的萌发及抗氧化活性的影响[J]. 种子, 2012, 31(2):17-20
- [29] 张大鹏,蔡春菊,范少辉,等. 重金属 Pb<sup>2+</sup> 和 Cd<sup>2+</sup> 对毛竹种子萌发及幼苗早期生长的影响[J]. 林业科学研究, 2012, 25(4): 500-504
- [30] 吴恒梅,纪艳,姜成,等. 重金属镉对丝瓜种子萌发及根系活力的影响[J]. 北方园艺, 2012(11):38-40
- [31] 马敏,龚惠红,邓泓. 重金属对 8 种园林植物种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 中国农学通报, 2012, 28(22):206-211
- [32] 马沙,高熹,陈春梅,等. 重金属铅锌镉对紫茎泽兰种子萌发及幼苗更长的影响[J]. 杂草科学, 2012, 30(4):16-20
- [33] 葛成军,陈秋波,俞花美,等. Cd 胁迫对 2 种热带牧草种子发芽与根伸长的抑制效应[J]. 热带作物学报, 2008, 29(5):567-571
- [34] Wierzbicka M, Obidzinska J. The effect of lead on seed imbibition and germination in different plant species[J]. Plan Sci, 1998, 137:155-171
- [35] 王瀚,何九军,杨小录. 重金属铅 Pb<sup>2+</sup> (II) 胁迫对萝卜种子萌发及幼苗叶绿素合成影响的研究[J]. 种子, 2012, 31(1):42-44
- [36] Bonifacio R S, Montano M N E. Inhibitory effects of mercury and cadmium on seed germination of *Enhalus acoroides* (Lf) Royle[J]. Bull Environ Contam Toxicol, 1998, 60:45-51

- [37] 吕笃康,李海冰,巴音山,等. 重金属铬及盐胁迫对小香蒲种子萌发的影响[J]. 种子, 2013, 27(2): 72-75
- [38] 刘贵华,袁龙义,苏睿丽,等. 储藏条件和时间对六种多年生湿地植物种子萌发的影响[J]. 生态学报, 2005, 25(2): 371-374
- [39] Maria D B, Ewa S P, Zbigniew K. Copper-induced oxidative stress and antioxidant deference in *bidopsis thaliana* [J]. *BioMetals*, 2004, 17: 379-387
- [40] Nentoa D A, Prisco J T, Fiiho J E. Effect of salt stress on ahtioxidative enzymes and lipid peroxidation in leaves and roots of salt tolerant and salt sensitive maize genotypes [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2006, 56(1): 87-94
- [41] 张义贤. 汞、镉、铅胁迫对油菜的毒害效应[J]. 山西大学学报: 自然科学版, 2004, 27(4): 410-413
- [42] 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
- [43] 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
- [44] 冯宏,戴军,李永涛,等. 重金属和 pH 值对类芦种子萌发的影响[J]. 水土保持通报, 2010, 30(6): 96-99
- [45] 李士磊,霍鹏,李卫华,等. 新疆春小麦品种苗期耐盐性分析[J]. 新疆农业科学, 2012, 49(1): 9-15
- [46] 余玮,揭雨成,邢虎成,等. 苕麻耐镉品种差异及其筛选指标分析[J]. 作物学报, 2011, 37(2): 348-354
- [47] 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(12): 476-480
- [48] 任珺,付朝文,陶玲,等. 芦苇、菖蒲和水葱对水体中  $Zn^{2+}$  的富集效应研究[J]. 湿地科学, 2011, 9(4): 322-327
- [49] 张秀娟,孙润生,吴楚,等. Hg、Cd 复合污染对千屈菜生理生化指标的影响[J]. 北方园艺, 2013(18): 74-77
- [50] 周海兰. 人工湿地在重金属废水处理中的应用[J]. 环境科学与管理, 2007, 32(9): 89-91
- [51] Janjit I, Su W Y, Jae S R. Nutrient removals by 21 aquatic plants for vertical free surface-flow (VFS) constructed wetland [J]. *Ecol Eng*, 2007, 29(3): 287-293

责任编辑: 王燕华