

# Cu 污染土壤中溪荪和花菖蒲的生长状况及 对 Cu 的积累及转运能力

孙雨亮, 黄苏珍<sup>①</sup>, 原海燕

[江苏省·中国科学院植物研究所(南京中山植物园), 江苏 南京 210014]

**摘要:** 采用土壤栽培方法,研究了在 Cu 添加量为 0 (CK)、200、400、600、800 和 1 000  $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  的土壤中溪荪 (*Iris sanguinea* Donn ex Horn.) 和花菖蒲 (*I. ensata* Thunb. var. *hortensis* Makino et Nemoto) 叶和根的数量、长度及生物量 (干质量) 6 个生长指标的变化趋势,并对叶和根中的 Cu 含量和积累量、全株的 Cu 积累量、Cu 的富集系数及转运系数进行了比较分析。结果表明:随土壤中 Cu 添加量的提高,溪荪的根数逐渐降低且显著低于对照;而溪荪的其余 5 个生长指标和花菖蒲的 6 个生长指标均总体呈现出在 Cu 添加量较低条件下逐渐增加并显著高于对照、在 Cu 添加量较高的条件下逐渐减小且显著小于对照的变化趋势;其中在 Cu 添加量 1 000  $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  的土壤中 2 种植物的生长均受到显著抑制 ( $P < 0.05$ );而添加 400 和 600  $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  Cu 则分别对 2 种植物的生长有一定的促进作用。随土壤中 Cu 添加量的增加,溪荪和花菖蒲叶及根中的 Cu 含量均逐渐提高;溪荪对 Cu 的富集系数和转运系数以及花菖蒲对 Cu 的富集系数均显著小于对照,而花菖蒲对 Cu 的转运系数则呈现在 Cu 添加量较低条件下高于对照、Cu 添加量较高的条件下低于对照并逐渐减小的趋势;在添加了 Cu 的土壤中,溪荪叶、根和全株对 Cu 的积累量均低于花菖蒲,但均显著高于对照,且 2 种植物根的 Cu 含量及积累量均大于叶片,表明溪荪和花菖蒲均具有一定的 Cu 积累能力,且主要积累在根中,花菖蒲对 Cu 的积累能力优于溪荪。综合分析结果显示:溪荪和花菖蒲不是 Cu 超积累植物,但对 Cu 胁迫均具有一定的耐性,且花菖蒲的耐性略强于溪荪;溪荪和花菖蒲分别适宜栽植于 Cu 含量 400 和 600  $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  以下的土壤中,可用于轻度和中度 Cu 污染土壤的植物修复和环境美化。

**关键词:** 溪荪; 花菖蒲; 土壤 Cu 污染; 生长指标; Cu 积累量; 转运系数

中图分类号: Q945.78; X171.5; S564<sup>+</sup>.9 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2011)02-0049-07

**Growth status of *Iris sanguinea* and *I. ensata* var. *hortensis* in Cu polluted soil and their accumulation and translocation abilities to Cu** SUN Yu-liang, HUANG Su-zhen<sup>①</sup>, YUAN Hai-yan (Institute of Botany, Jiangsu Province and the Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210014, China), *J. Plant Resour. & Environ.* 2011, 20(2): 49-55

**Abstract:** The change trends of six growth indexes including number, length and biomass (dry weight) of leaf and root of *Iris sanguinea* Donn ex Horn. and *I. ensata* Thunb. var. *hortensis* Makino et Nemoto in soil with Cu additions of 0 (CK), 200, 400, 600, 800 and 1 000  $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  were studied by soil culture method, and Cu content and accumulation in leaf and root, Cu accumulation in whole plant, Cu enrichment and translocation coefficients of the two plants were analyzed comparatively. The results show that with rising of Cu addition in soil, root number of *I. sanguinea* decreases gradually and significantly lower than that of the control, while other five growth indexes of *I. sanguinea* and six growth indexes of *I. ensata* var. *hortensis* all generally appear the change trend of increasing gradually and significantly higher than those of the control under low Cu addition conditions, decreasing gradually and significantly lower than those of the control under high Cu addition conditions. In which, growth of the two plants in soil added with 1 000  $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  Cu is inhibited significantly ( $P < 0.05$ ), but adding 400 and 600  $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  Cu has a certain promotive effect on growth of the two plants, respectively. Cu content in leaf and root of *I.*

收稿日期: 2010-10-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(30771520); 江苏省科技计划项目(BE2008670); 南京市科技发展计划项目(201101066)

作者简介: 孙雨亮(1983—),男,满族,河南商丘人,硕士研究生,主要从事观赏植物种质资源抗性及植物修复技术方面的研究。

<sup>①</sup>通信作者 E-mail: hsz1959@163.com

*sanguinea* and *I. ensata* var. *hortensis* all increases gradually with rising of Cu addition in soil. Cu enrichment and translocation coefficients of *I. sanguinea* and Cu enrichment coefficient of *I. ensata* var. *hortensis* all are significantly lower than those of the control, while Cu translocation coefficient of *I. ensata* var. *hortensis* is higher or lower respectively than that of the control under low or high Cu addition conditions with a trend of decreasing gradually. In soil added with Cu, Cu accumulation in leaf, root and whole plant of *I. sanguinea* is lower than that of *I. ensata* var. *hortensis*, but all of them are significantly higher than that of the control, and Cu content and accumulation in root of the two plants are higher than that in leaf, showing that *I. sanguinea* and *I. ensata* var. *hortensis* both have a certain accumulation ability to Cu, and being mainly accumulating in root, Cu accumulation ability of *I. ensata* var. *hortensis* is better than that of *I. sanguinea*. The comprehensive analysis results show that *I. sanguinea* and *I. ensata* var. *hortensis* are not hyper-accumulators, but still have some resistance to Cu stress, and resistance of *I. ensata* var. *hortensis* is slightly stronger than that of *I. sanguinea*. The two plants are suitable to plant in soil with Cu content lower than 400 and 600  $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ , respectively, and they can be used to phytoremediation and environmental beautification in light and moderate Cu polluted soils.

**Key words:** *Iris sanguinea* Donn ex Horn.; *Iris ensata* Thunb. var. *hortensis* Makino et Nemoto; Cu pollution in soil; growth index; Cu accumulation; translocation coefficient

随着人类社会的发展,环境污染问题日益突出,重金属污染因具有普遍性、隐蔽性、长期性和稳定性等特点,成为最难治理的污染类型之一,其中由 Cu 污染引起的生态和环境问题也受到人们的高度重视。据统计,全球每年 Cu 平均排放量约  $3.4 \times 10^6 \text{ t}^{[1]}$ ,严重污染了农田和水体,造成巨大的经济损失。因而,寻找有效治理 Cu 污染的科学方法并将其进行切实推广应用,成为科学家目前面临的重要课题之一。

1997年,美国科学家 Chaney 等<sup>[2]</sup>首次提出了“植物修复技术”(phytoremediation),该技术以修复彻底、成本低廉以及无二次污染等优点成为一种重要且经济的绿色污染治理技术<sup>[3]</sup>,该技术实施的关键主体是超富集植物。目前,全世界已经发现重金属超积累植物 400 余种,但 Cu 富集植物仅有 24 种<sup>[4]</sup>,且普遍存在生物量较低、生长速度慢、广谱适生性不强以及难以进行机械化作业等不足之处,在实际应用中具有很大的局限性。因此,筛选出高效、实用的 Cu 污染土壤修复植物已经成为实际修复工作中迫切需要解决的问题。

鸢尾属(*Iris* L.)植物普遍具有观赏性好、适应性广、抗性强和管理粗放等特点<sup>[5-7]</sup>,其中,马蔺[*I. lactea* Pall. var. *chinensis* (Fisch.) Koidz.]和黄菖蒲(*I. pseudacorus* L.)对 Cu、Pb、Cd 及 Zn 等金属元素均具有良好的抗性和积累能力<sup>[8-9]</sup>,而同属植物溪荪(*I. sanguinea* Donn ex Horn.)和花菖蒲(*I. ensata* Thunb. var. *hortensis* Makino et Nemoto)对重金属的抗性和积累能力的研究则未见报道。

鉴于此,作者对溪荪和花菖蒲在 Cu 添加量不同

的土壤中叶和根的生长状况进行了比较,以确定这 2 种植物对 Cu 污染土壤的抗性,并对溪荪和花菖蒲对 Cu 的富集系数和转运系数进行了统计分析,以评价溪荪和花菖蒲对 Cu 污染土壤的修复潜力及效果,旨在为 Cu 污染土壤的植物修复提供一定的理论依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 材料

供试溪荪和花菖蒲的种子均为江苏省·中国科学院植物研究所鸢尾种质资源圃中无性繁殖群体自然结实的种子。供试土壤采自南京中山植物园树木园人工混交林下的表土熟化层,土壤中 Cu 含量本底值为  $22.719 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 。采用 S 形多点混合采样法<sup>[10]</sup>采集土壤,挖取深度为 0~15 cm,土壤自然风干后过 5 mm 筛,备用。

### 1.2 方法

1.2.1 供试植物播种及培育 供试种子用质量体积分数 1%  $\text{KMnO}_4$  溶液浸种消毒后,于常温下用去离子水浸种催芽,出芽后移入沙盘中,用 1/2 Hoagland 营养液培养至苗高约 10 cm;选取株高基本一致的实生苗栽植于底径 9 cm、口径 13 cm、高 11 cm 的无底孔塑料盆中,每盆种植 3 株,每盆装有 800 g 风干土壤;栽植后立即用 30 mL 去离子水浇透,置于室内阴凉通风处缓苗 2 周。

1.2.2 处理方法 共设置 5 个处理水平,土壤中 Cu 的添加量分别为 200、400、600、800 和 1 000  $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

吸取不同体积的  $15.68 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1} \text{ CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  母液,按照设置的处理水平用去离子水配成 100 mL 溶液并一次性浇灌至土壤中,对照(CK)则一次性浇灌 100 mL 去离子水。每处理 3 盆,每盆视为 1 次重复。

将幼苗置于 KRG-300-BP 型光照培养箱(上海柏欣仪器设备厂生产)中培养,光照时间  $13 \text{ h} \cdot \text{d}^{-1}$ 、温度  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ,根据幼苗生长状况进行常规水分管理,60 d 后收获;将植株洗净,根系浸于  $20 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ EDTA-Na}_2$  溶液中 30 min,洗净并吸干表面水分,将根和叶分开、备用。

**1.2.3 测定方法** 用直尺直接测量幼苗的叶长和根长,根据每一样株最长叶的长度和最长根的长度计算平均值;叶数为每一样株所有叶片数的平均值,根数则为每一样株根系基部一级分枝数的平均值;将每一样株的叶和根分别置于  $80 \text{ }^\circ\text{C}$  干燥箱中烘干至恒质量,分别称量叶和根的干质量,结果取平均值,单株干质量为每一样株叶和根干质量之和并取平均值。

采用 AAS 法<sup>[10]</sup>测定叶、根及土壤中的 Cu 含量,其中,植物样品量为 0.2 g,土壤样品量为 0.5 g。

### 1.3 数据处理

参照文献[11]的方法计算每一单株叶或根的 Cu 积累量,参照文献[12]的方法计算 Cu 的富集系数和转运系数,计算公式分别为:单株叶(根)的 Cu 积累量=单株叶(根)的 Cu 含量 $\times$ 单株叶(根)干质量;Cu 富集系数=叶中 Cu 含量/土壤中 Cu 含量;Cu 转运系

数=叶中 Cu 含量/根中 Cu 含量。

采用 Excel 2007 和 SPSS 16.0 软件对实验数据进行统计和分析,并采用邓肯氏新复极差法对数据进行差异显著性分析。

## 2 结果和分析

### 2.1 溪荪和花菖蒲的生长状况分析

**2.1.1 溪荪的生长状况分析** 在 Cu 添加量不同的土壤中溪荪幼苗的生长状况见表 1。由表 1 可知:随着土壤中 Cu 添加量的提高,溪荪的叶片数呈现出在添加量较低条件下多于对照、添加量较高的条件下与对照持平或减少的变化趋势;200 和  $400 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  Cu 处理组溪荪幼苗的叶数均显著高于对照( $P < 0.05$ ),比对照增加 3.70%,表明 200 和  $400 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  Cu 对溪荪叶数增加有促进作用;而  $1000 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  Cu 处理组的叶数显著少于对照,比对照减少 11.11%,表明在土壤中添加  $1000 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  Cu 对溪荪叶数的增加具有显著的抑制作用。由表 1 还可见:对照组溪荪幼苗的根数最多,而在 Cu 添加量为 200~ $1000 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  的土壤中,溪荪幼苗的根数均显著减少,且各处理组与对照之间以及各处理组之间均具有显著差异( $P < 0.05$ );随土壤中 Cu 添加量的增加,溪荪幼苗的根数逐渐减少,其中  $1000 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  Cu 处理组溪荪根数最少,比对照减少了 33.34%。

表 1 在 Cu 添加量不同的土壤中溪荪幼苗单株生长状况分析( $\bar{X} \pm SD$ )<sup>1)</sup>

Table 1 Analysis of growth status of individuals of *Iris sanguinea* Donn ex Horn. seedling in soil with different Cu additions ( $\bar{X} \pm SD$ )<sup>1)</sup>

Cu 添加量/ $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ Cu addition	数量 Number		长度/mm Length		干质量/g Dry weight	
	叶 Leaf	根 Root	叶 Leaf	根 Root	叶 Leaf	根 Root
	0(CK)	9.000 $\pm$ 1.000b	11.000 $\pm$ 1.000a	362.667 $\pm$ 42.501c	108.000 $\pm$ 17.059d	0.280 $\pm$ 0.059a
200	9.333 $\pm$ 0.577a	10.333 $\pm$ 1.528b	370.667 $\pm$ 57.744b	124.000 $\pm$ 5.000c	0.287 $\pm$ 0.078a	0.152 $\pm$ 0.041b
400	9.333 $\pm$ 0.577a	10.000 $\pm$ 1.000c	383.333 $\pm$ 29.569a	132.000 $\pm$ 12.124b	0.289 $\pm$ 0.057a	0.164 $\pm$ 0.043a
600	9.000 $\pm$ 1.000b	9.333 $\pm$ 0.577d	349.000 $\pm$ 5.292d	146.000 $\pm$ 8.544a	0.205 $\pm$ 0.051b	0.097 $\pm$ 0.038d
800	9.000 $\pm$ 1.000b	8.333 $\pm$ 1.528e	338.000 $\pm$ 44.306e	133.333 $\pm$ 12.662b	0.199 $\pm$ 0.107b	0.065 $\pm$ 0.065e
1000	8.000 $\pm$ 1.000c	7.333 $\pm$ 2.082f	310.667 $\pm$ 13.577f	107.667 $\pm$ 2.082d	0.108 $\pm$ 0.017c	0.045 $\pm$ 0.009f

<sup>1)</sup> 同列中不同的小写字母表示在 5% 水平上差异显著 Different small letters in the same column indicate the significant difference at 5% level.

随着土壤中 Cu 添加量的提高,溪荪幼苗的叶长呈现出在添加量较低条件下大于对照、添加量较高的条件下小于对照的变化趋势;其中  $400 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  Cu 处理组的叶片最长,较对照增加了 5.69%,且与对照差异显著( $P < 0.05$ ),表明在土壤中 Cu 的添加量低于

$400 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ ,对溪荪叶片的伸长生长有一定的促进作用;而在 Cu 添加量为 600、800 和  $1000 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  的土壤中,溪荪叶片的长度均显著小于对照( $P < 0.05$ ),且随 Cu 添加量的提高呈现不断减小的趋势,其中,  $1000 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  Cu 处理组叶片的长度较对照减小了

14.34%,说明在土壤中添加 $1\ 000\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  Cu对溪荪叶长生长有一定的抑制作用。在Cu添加量为200、400、600和 $800\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 的土壤中,溪荪幼苗的根长均显著大于对照( $P<0.05$ ),并随着土壤中Cu添加量的增加,表现出添加量较低条件下增加、添加量较高的条件下减小的趋势,其中, $600\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 处理组幼苗根的长度最长,比对照增加了35.19%;而当土壤中的Cu添加量增加至 $1\ 000\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ,溪荪幼苗的根长显著减小,但仅略低于对照,表明溪荪的根长生长对Cu胁迫有相对较高的耐性。

生物量(常用干质量表示)直接反映了植物的产出能力,是分析植物生长状况的重要参考指标之一<sup>[13]</sup>。表1结果表明:在Cu添加量不同的土壤中,溪荪幼苗叶片与根的干质量均呈现出在添加量较低条件下高于对照、添加量较高的条件下低于对照的变化趋势。在Cu添加量为200和 $400\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 的土壤中,叶干质量略高于对照但差异不显著,而根干质量则显著高于对照,其中 $400\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  Cu处理组的叶和根的干质量均最大。在Cu添加量为600、800和 $1\ 000\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 的土壤中,叶和根的干质量均显著小于对照,且随Cu添加量的提高不断降低,最低值均出现在 $1\ 000\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  Cu处理组。综合分析结果表明:在Cu添加量不同的土壤中,溪荪生物量(即叶和根的干质量)的变化趋势与叶和根的数量及长度的变化趋势相吻合。

**2.1.2 花菖蒲的生长状况分析** 在Cu添加量不同的土壤中花菖蒲幼苗的生长状况见表2。由表2可以看出:随土壤中Cu添加量的提高,花菖蒲的叶数也呈现出在添加量较低条件下多于对照、添加量较高的条件下与对照持平或减少的变化趋势;其中, $600\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  Cu处理组的叶数最多,较对照显著增加( $P<$

$0.05$ ),增幅达21.06%;而 $1\ 000\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  Cu处理组的叶数最少,较对照显著减少( $P<0.05$ ),降幅达到10.52%。随土壤中Cu添加量的提高,花菖蒲幼苗根数的变化则呈现出在添加量较低条件下与对照持平或多于对照、添加量较高的条件下少于对照的变化趋势;其中, $400\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  Cu处理组花菖蒲幼苗的根数最多,较对照显著增加( $P<0.05$ ),增幅达18.52%;而 $1\ 000\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  Cu处理组的根数最少,较对照显著减少( $P<0.05$ ),降幅达到29.63%。

由表2还可见:在Cu添加量200、400、600和 $800\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 的土壤中,花菖蒲幼苗的叶长均显著高于对照( $P<0.05$ ),其中, $600\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  Cu处理组的叶片长度最长,较对照增加17.73%;而在Cu添加量为 $1\ 000\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 的土壤中,花菖蒲幼苗的叶长显著低于对照,比对照降低了2.12%。随土壤中Cu添加量的增加,花菖蒲幼苗根长呈现出在添加量较低条件下高于对照、添加量较高的条件下低于对照的变化趋势;其中, $400$ 和 $600\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  Cu处理组幼苗的根长显著高于对照,分别较对照增加2.98%和24.93%;而800和 $1\ 000\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  Cu处理组的根长显著低于对照,分别较对照降低了11.92%和8.67%。

在Cu添加量为200、400、600和 $800\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 的土壤中,花菖蒲叶片的干质量均显著高于对照( $P<0.05$ ),分别较对照增加了22.76%、43.90%、71.54%和27.64%;而 $1\ 000\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  Cu处理组的叶片的干质量则显著小于对照( $P<0.05$ ),较对照降低了29.27%。随土壤中Cu添加量的提高,花菖蒲根的干质量则呈现出在添加量较低(200和 $400\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  Cu)的条件下高于对照、添加量较高的条件下(600、800和 $1\ 000\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  Cu)显著低于对照的变化趋势;其中 $400\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  Cu处理组根的干质量最大,而 $1\ 000$

表2 在Cu添加量不同的土壤中花菖蒲幼苗单株生长状况分析( $\bar{X}\pm SD$ )<sup>1)</sup>

Table 2 Analysis of growth status of individuals of *Iris ensata* Thunb. var. *hortensis* Makino et Nemoto seedling in soil with different Cu additions ( $\bar{X}\pm SD$ )<sup>1)</sup>

Cu 添加量/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ Cu addition	数量 Number		长度/mm Length		干质量/g Dry weight	
	叶 Leaf	根 Root	叶 Leaf	根 Root	叶 Leaf	根 Root
0(CK)	6.333±0.577d	9.000±1.000b	299.000±41.581e	123.000±11.000c	0.123±0.087d	0.103±0.026c
200	7.000±0.000c	9.000±1.000b	327.667±53.687d	124.667±10.066c	0.151±0.119c	0.132±0.101b
400	7.333±0.577b	10.667±0.577a	347.333±23.587b	126.667±26.690b	0.177±0.058b	0.152±0.111a
600	7.667±1.528a	8.333±2.309c	352.000±9.539a	153.667±58.449a	0.211±0.088a	0.085±0.080d
800	6.333±0.577d	8.333±0.577c	338.667±7.767c	108.333±20.817e	0.157±0.022c	0.076±0.005d
1 000	5.667±0.577e	6.333±1.732d	292.667±5.508f	112.333±2.082d	0.087±0.040e	0.052±0.028e

<sup>1)</sup> 同列中不同的小写字母表示在5%水平上差异显著 Different small letters in the same column indicate the significant difference at 5% level.

$\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  Cu 处理组的最小。综合分析结果显示:在 Cu 添加量不同的土壤中,花菖蒲的生物量(即叶和根干质量)的变化趋势与其叶和根的数量及长度的变化趋势相吻合。

## 2.2 溪荪和花菖蒲对 Cu 的积累及转运能力分析

### 2.2.1 溪荪对土壤 Cu 的积累及转运能力分析

在 Cu 添加量不同的土壤中溪荪幼苗叶片和根对 Cu 的积累量、富集系数和转运系数见表 3。由表 3 可见:溪荪叶和根中的 Cu 含量均随土壤中 Cu 添加量的提高呈不断增加的趋势,各处理组叶和根中的 Cu 含量均显著高于对照,且各处理组间也差异显著( $P < 0.05$ );另外,不论是对照组还是各处理组,溪荪根中的 Cu 含量均显著高于叶片。

富集系数能够反映植物从土壤环境中吸收和积累重金属的能力<sup>[14]</sup>。在 Cu 添加量不同的土壤中,溪荪对 Cu 的富集系数均显著低于对照,且各处理组间均有显著差异( $P < 0.05$ );其中,200  $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  Cu 处理组的富集系数最高,800 和 1 000  $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  Cu 处理组的富集系数较小,而 400 和 600  $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  Cu 处理组的富集系数最小。导致这一现象的原因是:土壤中相对较低的 Cu 含量对溪荪生长有一定的促进作用,使其自身的耐 Cu 能力增强;但若土壤中 Cu 含量超过了溪荪的耐受程度,可使其耐 Cu 机制逐渐失效,植株体内 Cu 大量积累,从而对植株产生毒害作用。这与溪荪大部分生长指标的变化趋势相吻合,也是在 Cu 含量较高的土壤中溪荪生长受到显著抑制的原因之一。

转运系数反映了植物不同部位间重金属的转移能力<sup>[14]</sup>。从表 3 可见:各处理组溪荪幼苗对 Cu 的转运系数均显著小于对照,且各处理组间也有显著差异( $P < 0.05$ )。其中,在 Cu 添加量为 200、400 和 600  $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  的土壤中,溪荪的转运系数逐渐降低;而在 Cu 添加量为 800  $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  的土壤中转运系数略有提高,但 1 000  $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  Cu 处理组的转运系数最低。这一现象与植物对 Cu 胁迫的应激反应有关。

评价植物对污染环境的实际修复效果,最终要以该植物从污染环境中吸收并转移的目标污染物的量为准,因此,Cu 积累量是衡量植物对 Cu 污染环境实际修复能力的相对理想的指标<sup>[15]</sup>。在 Cu 添加量不同的土壤中,溪荪叶、根和全株中的 Cu 积累量均高于对照且差异显著( $P < 0.05$ )。其中,叶中的 Cu 积累量以 800  $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  Cu 处理组最高,其次为 1 000  $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  Cu 处理组;根中 Cu 的积累量以 1 000  $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  Cu 处理组最高,其次为 400 和 600  $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  Cu 处理组;全株的 Cu 积累量也以 1 000  $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  Cu 处理组最高,其次为 400 和 800  $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  Cu 处理组。1 000  $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  Cu 处理组溪荪叶、根和全株 Cu 积累量较高可能与植株体内 Cu 含量的显著增加有关,也与土壤 Cu 添加量的提高有关。在土壤 Cu 添加量为 1 000  $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  的条件下,溪荪的生长受到显著抑制,因此尽管溪荪植株体内的 Cu 积累量较高,但在 Cu 添加量 1 000  $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  以上的土壤中并不适宜种植溪荪以达到修复 Cu 污染土壤的目的。

表 3 在 Cu 添加量不同的土壤中溪荪对 Cu 的积累量、富集系数和转运系数( $\bar{X} \pm SD$ )<sup>1)</sup>

Table 3 Cu accumulation, enrichment coefficient and translocation coefficient of *Iris sanguinea* Donn ex Horn. seedling in soil with different Cu additions ( $\bar{X} \pm SD$ )<sup>1)</sup>

Cu 添加量/ $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ Cu addition	Cu 含量/ $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ Cu content		富集系数 Enrichment coefficient	转运系数 Translocation coefficient	Cu 积累量/ $\mu\text{g}$ Cu accumulation		
	叶 Leaf	根 Root			叶 Leaf	根 Root	全株 Whole plant
0 (CK)	7.467±0.052f	14.767±0.266f	0.276±0.002a	0.506±0.067a	2.088±0.014f	2.062±0.153f	4.151±0.089f
200	8.200±0.110e	24.033±0.160e	0.083±0.013b	0.341±0.036b	2.353±0.157e	3.653±0.171e	6.006±0.275e
400	8.700±0.121d	28.733±0.142d	0.049±0.006f	0.303±0.004c	2.517±0.032c	4.702±0.226b	7.220±0.130b
600	11.833±0.214c	44.567±0.741c	0.053±0.021e	0.266±0.015e	2.423±0.008d	4.323±0.008c	6.745±0.016d
800	17.133±0.131b	57.167±0.519b	0.071±0.026d	0.300±0.019d	3.415±0.187a	3.716±0.031d	7.131±0.083c
1 000	25.167±0.044a	112.100±0.656a	0.077±0.014c	0.225±0.012f	2.710±0.279b	5.007±0.142a	7.717±0.142a

<sup>1)</sup> 土壤 Cu 本底值为 22.719  $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  Background value of Cu in soil is 22.719  $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ ; 同列中不同的小写字母表示在 5% 水平上差异显著 Different small letters in the same column indicate the significant difference at 5% level.

### 2.2.2 花菖蒲对土壤 Cu 的积累及转运能力分析

在 Cu 添加量不同的土壤中花菖蒲幼苗叶片和根对 Cu 的积累量、富集系数和转运系数见表 4。由表 4 可

见:花菖蒲叶和根中的 Cu 含量均随土壤 Cu 添加量的提高呈不断增加的趋势,各处理组叶和根中的 Cu 含量均显著高于对照,且各处理组间也有显著差异( $P <$

0.05);另外,不论是对照组还是处理组,花菖蒲根中的Cu含量均显著高于叶片。

在Cu添加量不同的土壤中,花菖蒲幼苗对Cu的富集系数均显著小于对照,且各处理组间也有显著差异( $P<0.05$ );随土壤中Cu添加量的提高,花菖蒲幼苗对Cu的富集系数逐渐减小,以1 000  $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  Cu处理组的富集系数最小。这可能是因为花菖蒲对Cu胁迫产生的应激反应,即花菖蒲通过调节体内的防御机制降低对Cu的相对吸收量和积累量,从而减少由于

Cu积累过多而产生的毒害作用。

各处理组花菖蒲幼苗对Cu的转运系数均与对照有显著差异,且各处理组间也有显著差异( $P<0.05$ )。其中,在Cu添加量为200、400和600  $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 的土壤中,转运系数均显著大于对照,且以200  $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 处理组最大;而在Cu添加量为800和1 000  $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 的条件下转运系数显著小于对照,且以1 000  $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  Cu处理组最小。这一现象也与植物对Cu胁迫的应激反应有关。

表4 在Cu添加量不同的土壤中花菖蒲对Cu的积累量、富集系数和转运系数( $\bar{X}\pm\text{SD}$ )<sup>1)</sup>

Table 4 Cu accumulation, enrichment coefficient and translocation coefficient of *Iris ensata* Thunb. var. *hortensis* Makino et Nemoto seedling in soil with different Cu additions ( $\bar{X}\pm\text{SD}$ )<sup>1)</sup>

Cu 添加量/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ Cu addition	Cu 含量/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ Cu content		富集系数 Enrichment coefficient	转运系数 Translocation coefficient	Cu 积累量/ $\mu\text{g}$ Cu accumulation		
	叶 Leaf	根 Root			叶 Leaf	根 Root	全株 Whole plant
0(CK)	9.467±0.013f	25.200±0.051f	0.515±0.012a	0.376±0.032d	1.164±0.067f	2.587±0.138f	3.752±0.165f
200	27.367±0.012e	61.733±0.241e	0.283±0.026b	0.443±0.065a	4.141±0.125d	8.169±0.091b	12.311±0.231c
400	28.933±0.018d	75.300±0.085d	0.163±0.005c	0.384±0.003c	5.131±0.286b	11.421±0.368a	16.551±0.337a
600	31.333±0.024c	78.567±0.381c	0.153±0.003d	0.399±0.034b	6.611±0.133a	6.678±0.255c	13.290±0.294b
800	31.967±0.079b	86.067±0.216b	0.108±0.018e	0.371±0.033e	5.008±0.297c	6.541±0.043d	11.549±0.133d
1 000	38.733±0.064a	109.863±0.577a	0.099±0.004f	0.353±0.013f	3.370±0.085e	5.713±0.282e	9.083±0.152e

<sup>1)</sup>土壤Cu本底值为22.719  $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  Background value of Cu in soil is 22.719  $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ; 同列中不同的小写字母表示在5%水平上差异显著 Different small letters in the same column indicate the significant difference at 5% level.

由表4还可见:各处理组花菖蒲根、叶及全株Cu积累量均显著大于对照( $P<0.05$ ),且均随土壤中Cu添加量的提高呈现在添加量较低条件下增加、添加量较高的条件下降低的变化趋势。其中,叶中的Cu积累量以600  $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  Cu处理组最高,其次为400和800  $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  Cu处理组;根中Cu的积累量以400  $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  Cu处理组最高,其次为200  $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  Cu处理组;全株的Cu积累量也以400  $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  Cu处理组最高,其次为600  $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  Cu处理组。根和全株Cu积累量的最高值均出现在400  $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  Cu处理组,而叶中Cu积累量的最高值出现在600  $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  Cu处理组,且在Cu添加量低于600  $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 的条件下花菖蒲的生长状况良好,因此,可将花菖蒲种植在土壤Cu添加量400~600  $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 的土壤中以达到修复Cu污染土壤的目的。

### 3 讨 论

Cu是植物生长发育过程中必需的微量元素之一,作为多种酶的组分参与植物体内很多的生理代谢

过程,对植物的发育、品质、产量等有重要影响;适量添加外源Cu能促进植物生长,但过量的Cu又会导致植物体内的Cu累积和毒害,阻碍其生长<sup>[16]</sup>。

在叶的数量、长度和干质量及根的数量、长度和干质量6个生长指标中,溪荪幼苗大部分指标的最高值出现在400  $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  Cu处理组,只有根的数量和长度的最高值分别出现在200和600  $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  Cu处理组;而花菖蒲的叶长、根长、叶数、叶干质量的最高值出现在600  $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  Cu处理组,根的数量和干质量的最高值出现在400  $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  Cu处理组。总体上看,2种植物在轻度和中度(400~600  $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ) Cu污染土壤中生长均相对良好,且花菖蒲对土壤Cu污染的耐性略强于溪荪;土壤中较低含量的Cu对溪荪和花菖蒲的生长有一定的促进作用,而Cu含量较高的土壤则对二者的生长有抑制作用,这也是Cu对植物生长影响的普遍模式。

在Cu添加量分别为200、400、600、800和1 000  $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 的土壤中,溪荪和花菖蒲的根干质量均显著低于叶干质量,但根对Cu的积累量却显著高于叶片对Cu的积累量,说明这2种植物的地下部分具有一

定的 Cu 积累能力,因此,在实际修复应用中,也可考虑采取全株挖取收获的方法以提高修复效果。另外,在 Cu 添加量不同的土壤中溪荪和花菖蒲对 Cu 的转运系数均较低,表明这 2 种植物的耐 Cu 机制主要是将 Cu 吸收和积累在地下部分,减少 Cu 向地上部分的运输,从而减轻 Cu 对地上部分的毒害,这与许多耐 Cu 植物的耐性机制相似<sup>[17]</sup>。

评价植物对 Cu 污染土壤的实际修复能力主要采用 Cu 积累量来衡量<sup>[17]</sup>。在 Cu 添加量分别为 400 和 600  $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  的土壤中溪荪和花菖蒲全株均具有一定的 Cu 积累能力,且花菖蒲对 Cu 的积累能力略高于溪荪。植物在污染环境能够正常(或基本正常)生长是其作为污染修复植物的首要条件。虽然在 Cu 添加量为 1 000  $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  的土壤中溪荪对 Cu 的积累量最高,但溪荪的生长受到显著抑制,植株出现叶片发黄、弯曲、细弱等现象;而在 Cu 添加量为 400  $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  的土壤中溪荪的生长相对较好,且叶、根及全株的 Cu 积累量也较高,因此,溪荪适宜的土壤 Cu 阈值参考水平为 400  $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 。在实际污染修复过程中常将叶片对 Cu 的积累量作为首要参考指标,在 Cu 添加量为 600  $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  的土壤中花菖蒲叶片的 Cu 积累量最高,且花菖蒲的生长状况也最好,因此,花菖蒲适宜的土壤 Cu 阈值参考水平为 600  $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 。根据国家土壤环境质量标准,溪荪和花菖蒲均适用于轻度(400  $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ )和中度(600  $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ )Cu 污染土壤的植物修复。

溪荪和花菖蒲未达到 Cu 超积累植物的标准<sup>[11]</sup>,但由于这 2 种植物对土壤 Cu 污染具有一定的耐性,并具有一定的吸收和积累 Cu 的能力,同时还具有观赏性高、生长较快、易繁殖、环境适生性广等优点,因而,溪荪和花菖蒲也可以作为 Cu 污染土壤修复观赏植物,在轻度和中度 Cu 污染土壤的植物修复和环境美化等方面具有潜在的应用价值。

#### 参考文献:

[1] Nriagu J O, Pacyna J M. Quantitative assessment of worldwide contamination of air, water and soils by trace metals[J]. Nature, 1988, 333: 134-139.

- [2] Chaney R L, Malik M, Li Y M, et al. Phytoremediation of soils metals[J]. Current Opinion in Biotechnology, 1997, 8(3): 279-284.
- [3] 周启星,宋玉芳. 植物修复的技术内涵及展望[J]. 安全与环境学报, 2001, 1(3): 48-53.
- [4] 李福燕,张黎明,李许明,等. 剑麻对铜的耐性及累积效应研究初探[J]. 中国农学通报, 2006, 22(12): 417-420.
- [5] 张开明,黄苏珍,原海燕,等. 水生花卉黄菖蒲  $\text{Cu}^{2+}$  胁迫抗(耐)性研究[J]. 江苏农业科学, 2006, 32(6): 217-220.
- [6] 郭智,黄苏珍,原海燕. Cd 胁迫对马蔺和鸢尾幼苗生长、Cd 积累及微量元素吸收的影响[J]. 生态环境, 2008, 17(2): 651-656.
- [7] 张开明,佟海英,黄苏珍,等. Cu 胁迫对黄菖蒲和马蔺 Cu 富集及其他营养元素吸收的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2007, 16(1): 18-22.
- [8] Han Y L, Huang S Z, Gu J G, et al. Tolerance and accumulation of lead by species of *Iris* L. [J]. Ecotoxicology, 2008, 17(8): 853-859.
- [9] 原海燕,黄苏珍,郭智,等. 锌对镉胁迫下马蔺生长、镉积累及生理抗性的影响[J]. 应用生态学报, 2007, 18(9): 2111-2116.
- [10] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2005.
- [11] Baker A J M, Brooks R R, Pease A J, et al. Studies on copper and cobalt tolerance in three closely related taxa within the genus *Silene* L. (Caryophyllaceae) from Zaire[J]. Plant and Soil, 1983, 73: 377-385.
- [12] 韦朝阳,陈同斌. 重金属超富集植物及植物修复技术研究进展[J]. 生态学报, 2001, 21(7): 1196-1203.
- [13] 陆欣. 土壤肥科学[M]. 1 版. 北京: 中国农业大学出版社, 2006.
- [14] 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.
- [15] Brooks R R. Plants that Hyperaccumulate Heavy Metals[M]. 1st ed. Wallingford: CAB International, 1998: 1-15.
- [16] Marschner H. Mineral Nutrition of Higher Plants[M]. 2nd ed. London: Academic Press, 1995: 333-347.
- [17] 田生科,李廷轩,杨肖娥,等. 植物对铜的吸收运输及毒害机理研究进展[J]. 土壤通报, 2006, 37(2): 387-392.

(责任编辑: 佟金凤)