

# 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

孙延东, 原海燕, 黄苏珍<sup>①</sup>

[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:** 采用水培法研究了 Cd - Cu 复合胁迫 ( $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Cd} - 10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Cu}$ ;  $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Cd} - 20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Cu}$ ;  $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Cd} - 10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Cu}$ ;  $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Cd} - 20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Cu}$ ) 条件下黄菖蒲 (*Iris pseudacorus* L.) 叶片和根系对 Cd 和 Cu 的积累作用及黄菖蒲体内 Cd 和 Cu 迁移率的变化规律。结果表明, 在 50 d 的胁迫期内, 黄菖蒲叶片和根系中的 Cd 和 Cu 含量分别随培养液中 Cd 和 Cu 浓度的提高而增加, 并随胁迫处理时间的延长基本呈增加的趋势, 在胁迫末期明显提高。在不同浓度 Cd - Cu 复合胁迫条件下, 黄菖蒲根系中的 Cd 和 Cu 积累量明显高于叶片。在 Cd 浓度不变的条件下, 黄菖蒲叶片和根系中的 Cd 含量随培养液中 Cu 浓度的提高而增加; 在 Cu 浓度不变的条件下, 黄菖蒲叶片中 Cu 含量随培养液中 Cd 浓度的提高而降低。在不同胁迫时间, 黄菖蒲植株对 Cd 的迁移率不同, 但培养液中 Cd 的浓度较高, 黄菖蒲植株对 Cd 的迁移率也较高; 黄菖蒲植株对 Cu 的迁移率随胁迫时间的延长基本上呈上升趋势。研究结果显示, 在 Cd - Cu 复合胁迫条件下, Cu 对黄菖蒲体内 Cd 的吸收具有一定的协同吸收作用, 而 Cd 对 Cu 的吸收则有一定的拮抗作用。

**关键词:** 黄菖蒲; Cd; Cu; 积累; 迁移率; Cd - Cu 复合胁迫

中图分类号: Q945.78; X173 文献标志码: A 文章编号: 1004-0978(2009)01-0022-06

**Effects of Cd-Cu combined stress on Cd and Cu accumulation in leaf and root and translocation rate in *Iris pseudacorus*** SUN Yan-dong, YUAN Hai-yan, HUANG Su-zhen<sup>①</sup> (Institute of Botany, Jiangsu Province and the Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210014, China), *J. Plant Resour. & Environ.* 2009, 18(1): 22-27

**Abstract:** Effects of Cd-Cu combined stress ( $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Cd} - 10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Cu}$ ;  $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Cd} - 20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Cu}$ ;  $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Cd} - 10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Cu}$ ;  $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Cd} - 20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Cu}$ ) on Cd and Cu accumulation in leaf and root of *Iris pseudacorus* L. and changes of translocation rate of Cd and Cu were studied by the water culture method. The results show that Cd and Cu contents in leaf and root of *I. pseudacorus* increase with the increase of Cd and Cu concentrations in medium with stress time prolonging during 50 d of stress time, and at the end of stress treatment, the contents of Cd and Cu rise significantly. Accumulation amount of Cd and Cu in root is markedly higher than that in leaf. When Cd concentration remains constant in medium, Cd accumulation in leaf and root of *I. pseudacorus* increases with Cu concentration increasing in medium. When Cu concentration remains constant in medium, Cu accumulation in leaf of *I. pseudacorus* decreases with Cd concentration increasing in medium. Translocation rate of Cd in *I. pseudacorus* varies at different stress stage, but overall it increases with Cd concentration increasing in medium. Basically, translocation rate of Cu in *I. pseudacorus* increases with stress time prolonging. It can be concluded that under Cd-Cu combined stress, Cu has a synergistic effect on Cd accumulation in *I. pseudacorus*, while Cd has an antagonistic effect on Cu accumulation.

**Key words:** *Iris pseudacorus* L.; Cd; Cu; accumulation; translocation rate; Cd-Cu combined stress

收稿日期: 2008-01-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(30771520)

作者简介: 孙延东(1981—), 男, 江苏南通人, 硕士, 主要从事观赏植物种质资源的抗逆生理研究。

<sup>①</sup>通讯作者 E-mail: hsz1959@163.com

近年来,随着现代工农业的迅速发展和矿产资源的大规模开发,生态环境尤其是农田重金属污染越来越严重<sup>[1]</sup>,当重金属通过土壤-植物系统迁移转化并经食物链的积累和放大之后会对生物产生更大的毒害作用。研究表明,重金属污染的发生常常是两种或两种以上重金属元素形成的复合污染<sup>[2]</sup>,重金属元素之间除主要表现为毒害增强的协同作用外,还表现出独立、加和甚至拮抗作用等现象<sup>[3-4]</sup>,因此,只对单一重金属污染进行研究并不能有效反映出重金属的毒性效应以及植物对重金属的积累和耐受能力,因而,对复合重金属污染的研究已成为近年来环境科学领域重要的探索方向之一<sup>[5-6]</sup>。

Cd 是最常见且危害很大的重金属元素之一;Cu 虽然是作物生长的必需元素,但在作物体内积累过量也会产生明显的生物学效应<sup>[7-9]</sup>。黄菖蒲 (*Iris pseudacorus* L.) 为鸢尾科 (Iridaceae) 鸢尾属 (*Iris* L.) 多年生湿生或挺水宿根草本植物,对单一的 Cd 或 Cu 胁迫均具有较强的耐性,并且具有较强的 Cd 和 Cu 的富集能力<sup>[10-12]</sup>,但在 Cd - Cu 复合胁迫条件下黄菖蒲是否也具有较强的积累和耐受能力尚未见研究报道。

作者采用水培实验方法,研究了不同浓度 Cd - Cu 复合胁迫下黄菖蒲对 Cd 和 Cu 吸收能力的动态变化及 Cd 和 Cu 在黄菖蒲体内的迁移规律,以期为利用黄菖蒲进行复合重金属污染的植物修复提供理论基础。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材 料

供试用黄菖蒲 (*Iris pseudacorus* L.) 种子为无性繁殖群体自然结实的当年种子,栽培于江苏省·中国科学院植物研究所鸢尾种质圃内。实验于 2006 年秋季在本所温室内进行,室内温度 15 ℃ ~ 30 ℃,自然光照。

### 1.2 方 法

1.2.1 Cd - Cu 复合胁迫处理方法 黄菖蒲种子用自来水冲洗干净后于温室内常温下浸种催芽约 1 个月,待种子萌发后,选择萌发整齐一致的种子播种于干净的石英砂中培养,3 周后选生长一致的黄菖蒲幼苗置于 500 mL 的培养瓶中以 1/2 Hoagland 营养液预培养,预培养 2 周后分别以 CdCl<sub>2</sub> · 2.5H<sub>2</sub>O 和

CuSO<sub>4</sub> · 5H<sub>2</sub>O 的形式添加不同量的 Cd 和 Cu,每一培养瓶中 5 株幼苗,3 次重复,每处理共 15 株黄菖蒲幼苗。分别于处理后第 10、20、30、40 和 50 天取样测定黄菖蒲叶片和根系中的 Cd 和 Cu 含量。各处理的 Cd 和 Cu 浓度设置为:CK, 0 mg · L<sup>-1</sup> Cd 和 0 mg · L<sup>-1</sup> Cu; T1, 5 mg · L<sup>-1</sup> Cd 和 10 mg · L<sup>-1</sup> Cu; T2, 5 mg · L<sup>-1</sup> Cd 和 20 mg · L<sup>-1</sup> Cu; T3, 25 mg · L<sup>-1</sup> Cd 和 10 mg · L<sup>-1</sup> Cu; T4, 25 mg · L<sup>-1</sup> Cd 和 20 mg · L<sup>-1</sup> Cu。

1.2.2 Cd 和 Cu 的含量测定方法 采用 HNO<sub>3</sub> - HClO<sub>4</sub> 湿法消化法进行黄菖蒲叶片和根系 Cd 和 Cu 样品液的制备。用去离子水冲洗幼苗根系,置于 20 mmol · L<sup>-1</sup> EDTA - Na<sub>2</sub> 溶液中浸泡交换 30 min,以去除根系表面附着的金属离子,然后将叶片和根系分开,分别用去离子水冲洗干净,吸干表面水分后,烘干至恒质量并分别称其干质量。将干燥的黄菖蒲根系及叶片分别用研钵磨碎后准确称取 0.2 g,用 10 mL HNO<sub>3</sub> - HClO<sub>4</sub> (V:V = 87:13) 混合液消煮,消化至近干后,加 10 mL 体积分数 5% 的 HNO<sub>3</sub> 溶解,用 Hitachi 180 - 80 火焰原子分光光度计 (AAS) 测定 Cd 和 Cu 含量<sup>[13]</sup>。

### 1.3 数 据 处 理

黄菖蒲体内 Cd 和 Cu 迁移率按下列公式计算<sup>[14]</sup>: 迁移率 = (叶片中某重金属元素的含量 / 整株植物中某重金属元素的总含量) × 100%。

实验数据采用 Excel 和 SAS 软件进行分析处理。

## 2 结果与分析

### 2.1 Cd - Cu 复合胁迫对黄菖蒲叶片和根系中 Cd 积累的影响

不同浓度 Cd - Cu 复合胁迫下黄菖蒲叶片和根系中 Cd 含量的变化见表 1 和表 2。

由表 1 可以看出,不同浓度 Cd - Cu 复合胁迫下,黄菖蒲叶片中 Cd 含量均随胁迫时间的延长呈增加趋势。在 Cd 浓度为 5 mg · L<sup>-1</sup> 的胁迫条件下,黄菖蒲叶片中 Cd 含量较低;而在 Cd 浓度为 25 mg · L<sup>-1</sup> 的胁迫条件下,Cd 含量明显提高。可见,Cd - Cu 复合胁迫条件下,黄菖蒲叶片中 Cd 的含量与培养液中的 Cd 浓度有极大的相关性。另外,培养液中 Cu 浓度的提高对黄菖蒲叶片中 Cd 的积累有一

定的影响,在 Cd 浓度不变的条件下,提高培养液中的 Cu 浓度,黄菖蒲叶片中 Cd 的含量增加(表1)。

不同浓度 Cd - Cu 复合胁迫下,黄菖蒲根系中 Cd 含量的变化趋势与叶片中 Cd 含量的变化趋势相似(表2),但根系对 Cd 的积累量明显高于叶片,至胁迫处理结束时,T1 (5 mg · L<sup>-1</sup> Cd - 10 mg · L<sup>-1</sup> Cu)、T2 (5 mg · L<sup>-1</sup> Cd - 20 mg · L<sup>-1</sup> Cu)、T3 (25 mg · L<sup>-1</sup> Cd - 10 mg · L<sup>-1</sup> Cu) 和 T4 (25 mg · L<sup>-1</sup> Cd - 20 mg · L<sup>-1</sup> Cu) 处理组黄菖蒲根系中的 Cd 含量分别是叶片的 3.86、3.96、3.10 和 2.98 倍。黄菖蒲根系中 Cd 含量也随胁迫时间的延长而增加,但当培养液中 Cd 浓度由 5 mg · L<sup>-1</sup> 提高至 25 mg · L<sup>-1</sup> 时,黄菖蒲根系中 Cd 含量的增幅低于叶片,且在 25 mg · L<sup>-1</sup> Cd 胁迫条件下,随培养液中 Cu 浓度的增加,根系内的 Cd 含量上升幅度也小于叶片。在胁迫处理的第 40 天,在培养液中 Cd 浓度 (25 mg · L<sup>-1</sup>) 不变的情况下,20 mg · L<sup>-1</sup> Cu 处理组黄菖蒲根系的 Cd 含量是 10 mg · L<sup>-1</sup> Cu 处理组的 93.8%,而 20 mg · L<sup>-1</sup> Cu 处理组黄菖蒲叶片的 Cd 含量则是 10 mg · L<sup>-1</sup> Cu 处理组的 120.4%;在胁迫处理的第 50 天时,在培养液中 Cd 浓度 (25 mg · L<sup>-1</sup>) 不变的情况下,20 mg · L<sup>-1</sup> Cu 处理组黄

菖蒲根系中的 Cd 含量比 10 mg · L<sup>-1</sup> Cu 处理组增加了 5.9%,而 20 mg · L<sup>-1</sup> Cu 处理组黄菖蒲叶片的 Cd 含量比 10 mg · L<sup>-1</sup> Cu 处理组增加了 10.2%。

研究结果显示,在不同浓度 Cd - Cu 复合胁迫条件下,随胁迫时间的延长,黄菖蒲叶片和根系中 Cd 的积累量逐渐增加,并且黄菖蒲体内 Cd 的积累量与培养液中的 Cd 浓度密切相关,培养液中 Cd 浓度高,黄菖蒲叶片和根系中 Cd 的积累量也高;虽然黄菖蒲体内 Cd 的积累量也随培养液中 Cu 浓度的升高有一定程度的提高,但 Cu 浓度对 Cd 积累量的影响不明显,表现出一定的协同吸收作用。此外,随胁迫时间的延长,各胁迫处理组黄菖蒲根系对 Cd 的积累量明显高于叶片。

## 2.2 Cd - Cu 复合胁迫对黄菖蒲叶片和根系中 Cu 积累的影响

在不同浓度 Cd - Cu 复合胁迫下黄菖蒲叶片和根系中 Cu 含量的变化见表 3 和表 4。

由表 3 可见,随胁迫时间的延长,在不同浓度 Cd - Cu 复合胁迫条件下,黄菖蒲叶片中的 Cu 含量基本上呈增加趋势。随培养液中 Cu 浓度的提高,黄菖蒲叶片中 Cu 的积累量增加。与黄菖蒲对 Cd 的吸收不同,黄菖蒲叶片中 Cu 的含量并没有随 Cd 浓度

表 1 不同浓度 Cd - Cu 复合胁迫下黄菖蒲叶片中 Cd 含量的变化 ( $\bar{X} \pm SD$ )<sup>1)</sup>

Table 1 Change of Cd content in *Iris pseudacorus* L. leaf under Cd-Cu combined stress with different concentrations ( $\bar{X} \pm SD$ )<sup>1)</sup>

处理 Treatment	浓度/mg · L <sup>-1</sup> Concentration		不同胁迫时间的 Cd 含量/μg · g <sup>-1</sup> Cd content at different stress times				
	Cd	Cu	10 d	20 d	30 d	40 d	50 d
CK	0	0	0.43 ± 0.10	1.43 ± 0.41	2.63 ± 0.49	4.93 ± 0.77	5.83 ± 1.20
T1	5	10	4.22 ± 0.79	5.99 ± 0.09	10.83 ± 1.06	13.03 ± 1.36	15.66 ± 2.10
T2	5	20	6.81 ± 0.89	7.64 ± 1.19	9.43 ± 1.64	14.31 ± 1.26	20.76 ± 0.93
T3	25	10	22.84 ± 1.20	26.30 ± 1.04	34.15 ± 2.76	38.02 ± 0.44	46.44 ± 2.81
T4	25	20	28.62 ± 0.20	32.48 ± 1.97	44.10 ± 0.10	45.77 ± 2.48	51.20 ± 1.98

<sup>1)</sup>表中数据为 3 次重复的平均值 The datums in the table are the average of the three replications.

表 2 不同浓度 Cd - Cu 复合胁迫下黄菖蒲根系中 Cd 含量的变化 ( $\bar{X} \pm SD$ )<sup>1)</sup>

Table 2 Change of Cd content in *Iris pseudacorus* L. root under Cd-Cu combined stress with different concentrations ( $\bar{X} \pm SD$ )<sup>1)</sup>

处理 Treatment	浓度/mg · L <sup>-1</sup> Concentration		不同胁迫时间的 Cd 含量/μg · g <sup>-1</sup> Cd content at different stress times				
	Cd	Cu	10 d	20 d	30 d	40 d	50 d
CK	0	0	2.58 ± 1.08	4.03 ± 1.74	5.30 ± 1.01	5.59 ± 0.95	6.16 ± 0.72
T1	5	10	23.24 ± 0.91	35.54 ± 3.30	48.63 ± 2.61	59.51 ± 3.50	60.44 ± 2.99
T2	5	20	22.50 ± 2.22	41.13 ± 4.41	50.71 ± 2.86	77.55 ± 0.66	82.26 ± 3.19
T3	25	10	85.99 ± 4.35	97.76 ± 1.01	108.32 ± 2.48	126.34 ± 5.25	144.10 ± 2.26
T4	25	20	95.09 ± 2.24	106.91 ± 0.38	110.64 ± 0.77	118.53 ± 3.44	152.54 ± 3.69

<sup>1)</sup>表中数据为 3 次重复的平均值 The datums in the table are the average of the three replications.

表 3 不同浓度 Cd - Cu 复合胁迫下黄菖蒲叶片中 Cu 含量的变化 ( $\bar{X} \pm SD$ )<sup>1)</sup>Table 3 Change of Cu content in *Iris pseudacorus* L. leaf under Cd-Cu combined stress with different concentrations ( $\bar{X} \pm SD$ )<sup>1)</sup>

处理 Treatment	浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Concentration		不同胁迫时间的 Cu 含量/ $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ Cu content at different stress times				
	Cd	Cu	10 d	20 d	30 d	40 d	50 d
CK	0	0	2.85 ± 0.50	4.17 ± 1.52	5.16 ± 0.57	5.16 ± 1.15	5.83 ± 1.52
T1	5	10	11.95 ± 1.53	16.67 ± 2.68	19.16 ± 4.50	23.77 ± 1.39	27.90 ± 2.63
T2	5	20	18.90 ± 1.81	23.86 ± 3.33	26.12 ± 4.51	31.89 ± 2.12	45.53 ± 2.56
T3	25	10	9.38 ± 0.85	12.52 ± 1.35	16.11 ± 1.20	21.60 ± 0.17	26.67 ± 1.26
T4	25	20	14.39 ± 1.67	21.81 ± 1.95	21.14 ± 1.50	27.29 ± 0.58	32.81 ± 0.36

<sup>1)</sup>表中数据为 3 次重复的平均值 The datums in the table are the average of the three replications.

表 4 不同浓度 Cd - Cu 复合胁迫下黄菖蒲根系中 Cu 含量的变化 ( $\bar{X} \pm SD$ )<sup>1)</sup>Table 4 Change of Cu content in *Iris pseudacorus* L. root under Cd-Cu combined stress with different concentrations ( $\bar{X} \pm SD$ )<sup>1)</sup>

处理 Treatment	浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Concentration		不同胁迫时间的 Cu 含量/ $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ Cu content at different stress times				
	Cd	Cu	10 d	20 d	30 d	40 d	50 d
CK	0	0	5.04 ± 0.55	10.86 ± 4.71	8.02 ± 1.81	16.59 ± 0.97	14.83 ± 6.50
T1	5	10	297.28 ± 1.73	378.37 ± 1.85	399.13 ± 7.53	422.87 ± 1.01	537.05 ± 7.84
T2	5	20	466.32 ± 0.95	485.34 ± 1.04	555.99 ± 3.75	651.81 ± 1.25	675.28 ± 6.86
T3	25	10	409.79 ± 2.13	336.78 ± 4.59	388.83 ± 7.12	431.31 ± 3.09	490.09 ± 1.05
T4	25	20	493.18 ± 1.85	498.47 ± 1.10	611.40 ± 1.06	487.73 ± 4.74	683.33 ± 2.10

<sup>1)</sup>表中数据为 3 次重复的平均值 The datums in the table are the average of the three replications.

的升高而增加,在培养液中 Cu 浓度不变的条件下,提高培养液中 Cd 的浓度,黄菖蒲叶片对 Cu 的积累量降低。在胁迫处理的第 30 天, T3 (25  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  Cd - 10  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  Cu) 处理组黄菖蒲叶片中的 Cu 含量为 T1 (5  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  Cd - 10  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  Cu) 处理组的 84.1%, T4 (25  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  Cd - 20  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  Cu) 处理组黄菖蒲叶片中的 Cu 含量为 T2 (5  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  Cd - 20  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  Cu) 处理组的 80.9%; 在胁迫处理的第 40 天, T3 处理组黄菖蒲叶片中的 Cu 含量为 T1 处理组的 90.9%, T4 处理组黄菖蒲叶片中的 Cu 含量为 T2 处理组的 85.6%。

在不同浓度 Cd - Cu 复合胁迫下黄菖蒲根系 Cu 含量的变化见表 4。由表 4 可见,随胁迫时间的延长,在不同浓度 Cd - Cu 复合胁迫条件下,黄菖蒲根系中的 Cu 含量基本上呈增加趋势;随培养液中 Cu 浓度的提高,黄菖蒲根系中 Cu 含量基本表现出增加的趋势。与叶片中 Cu 积累规律不同的是,当培养液中 Cu 浓度较低 (10  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 时,提高培养液中的 Cd 浓度,黄菖蒲根系中 Cu 含量降低;当培养液中 Cu 浓度较高 (20  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 时,提高培养液中的 Cd 浓度,黄菖蒲根系中的 Cu 含量基本表现出增加的趋势。另外,在不同浓度 Cd - Cu 复合胁迫条件下,黄

菖蒲根系对 Cu 的积累量明显高于叶片,至胁迫处理结束时 (第 50 天), T1、T2、T3 和 T4 处理组黄菖蒲根系中的 Cu 含量分别是叶片的 19.25、14.83、18.38 和 20.83 倍。

研究结果显示,在不同浓度 Cd - Cu 复合胁迫条件下,随胁迫时间的延长,黄菖蒲叶片和根系中 Cu 的积累量逐渐增加,并且黄菖蒲体内 Cu 的积累量与培养液中的 Cu 浓度密切相关,培养液中 Cu 的浓度高,黄菖蒲叶片和根系中 Cu 的含量也高;黄菖蒲根系与叶片中的 Cu 含量与培养液中 Cd 浓度的关系较为复杂,但总体上有 Cd 对 Cu 的吸收表现出一定的拮抗作用。此外,随胁迫时间的延长,各胁迫处理组黄菖蒲根系对 Cu 的积累量明显高于叶片。

### 2.3 Cd - Cu 复合胁迫对黄菖蒲体内 Cd 和 Cu 迁移率的影响

不同浓度 Cd - Cu 复合胁迫条件下,不同胁迫时间黄菖蒲体内 Cd 的迁移率变化见图 1。由图 1 可以看出,在复合胁迫第 10 天, T2 (5  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  Cd - 20  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  Cu)、T3 (25  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  Cd - 10  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  Cu) 和 T4 (25  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  Cd - 20  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  Cu) 处理组的黄菖蒲植株对 Cd 的迁移率相对较高,达 21.0% ~ 23.2%; 而 T1 (5  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  Cd - 10  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  Cu) 处理

组对 Cd 的迁移率相对较低,仅为 15.3%。在复合胁迫第 20 天,T2 处理组的黄菖蒲植株对 Cd 的迁移率降到 15.7%,而 T1、T3 和 T4 处理组的黄菖蒲植株对 Cd 的迁移率无明显变化;在复合胁迫的第 30 天,T1、T3 和 T4 处理组黄菖蒲植株对 Cd 的迁移率均提高;在复合胁迫的第 50 天,T2 处理组黄菖蒲植株对 Cd 的迁移率提高至 20.2%,而 T4 处理组对 Cd 的迁移率则有所降低。总体上看,黄菖蒲植株对 Cd 的迁移率与培养液中 Cd 的浓度有一定的关系,培养液中 Cd 的浓度较高,黄菖蒲植株对 Cd 的迁移率也较高。

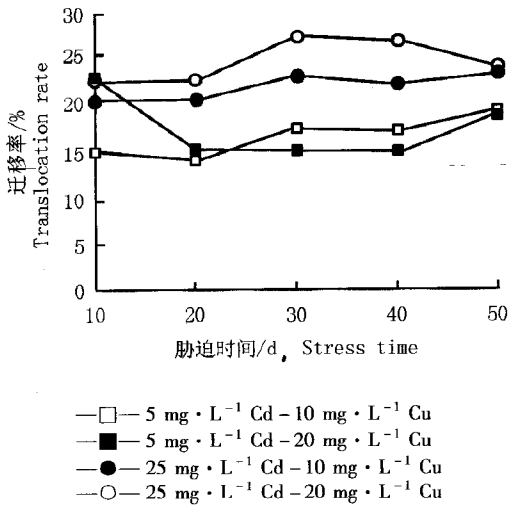


图 1 不同浓度 Cd-Cu 复合胁迫下黄菖蒲体内 Cd 迁移率的变化  
Fig. 1 Change of Cd translocation rate in *Iris pseudacorus* L. under Cd-Cu combined stress with different concentrations

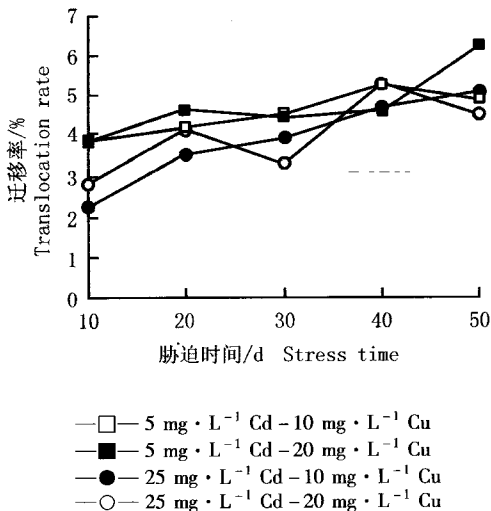


图 2 不同浓度 Cd-Cu 复合胁迫下黄菖蒲体内 Cu 迁移率的变化  
Fig. 2 Change of Cu translocation rate in *Iris pseudacorus* L. under Cd-Cu combined stress with different concentrations

不同浓度 Cd-Cu 复合胁迫条件下,不同胁迫时间黄菖蒲体内 Cu 的迁移率变化见图 2。从图 2 可以看出,除胁迫第 30 天时 T4 处理组黄菖蒲植株对 Cu 的迁移率明显降低外,各处理组黄菖蒲植株对 Cu 的迁移率基本上随胁迫时间的延长呈上升趋势。在胁迫初期,Cd 浓度较低的处理组(T1 和 T2)的黄菖蒲植株对 Cu 的迁移率高于 Cd 浓度较高的处理组(T3 和 T4)。

### 3 讨 论

Cd 和 Cu 均是土壤中的主要重金属污染物,近年来由于污灌、污泥和城市垃圾的利用以及农药和化肥使用的增加,土壤的 Cd 和 Cu 污染日益严重。低浓度的 Cu 是植物生长所必需的,而过量的 Cu 和 Cd 会阻滞作物的生长发育、降低产量,并通过食物链对人类健康造成严重危害。

植物对 Cd 和 Cu 的吸收不仅受土壤类型和作物种类的影响,还与土壤中的共存金属元素有关。王友保等<sup>[15]</sup>研究了 As、Cu 及其复合污染对大豆 [*Glycine max* (L.) Merr.] 生长的影响,结果显示,Cu、As 共同存在时,随二者比例不同出现不同程度的拮抗效应,可以降低和缓解单一污染物的毒害作用。余国营等<sup>[16]</sup>的研究结果也显示,大豆幼苗中 Cu 含量受 Pb 的影响较大,两者之间存在着拮抗效应。本文的研究结果显示,在不同浓度 Cd-Cu 复合胁迫条件下,黄菖蒲叶片和根系中的 Cd 和 Cu 含量基本上均随胁迫时间的延长而增加,在培养液中 Cd 浓度不变的条件下,Cu 浓度的提高均增加了黄菖蒲叶片和根系对 Cd 的吸收,表现出一定的协同吸收作用;在培养液中 Cu 浓度不变的条件下,Cd 浓度的提高使黄菖蒲叶片对 Cu 的吸收减少,表现出一定的吸收拮抗作用。因此,植物对重金属的吸收量除受元素自身特性及浓度的影响外,还与共存元素的性质和浓度比例有关<sup>[17-18]</sup>。

迁移率是表示重金属由植物的根系向茎、叶运输能力的一个重要指标,植株茎和叶中元素含量与整株元素含量比值的高低直接反映了重金属元素在植物体中由地下部根系向地上茎、叶迁移的能力<sup>[14]</sup>,迁移率高则表明植株地上部可以积累更多的重金属,这对于发挥植物对重金属的富集能力起到了非常关键的作用。在本实验中,除 T2(5 mg · L<sup>-1</sup>

Cd-20 mg·L<sup>-1</sup> Cu) 处理组外, 胁迫后期黄芩蒲植株对 Cd 的迁移率基本上都高于初期, 而各处理组黄芩蒲植株对 Cu 的迁移率均为胁迫后期高于胁迫前期。这可能是由于胁迫初期黄芩蒲植株较小, 代谢能力较弱, 吸收的 Cd 和 Cu 主要聚集在地下部根系, 而随着黄芩蒲幼苗的生长, 植株生物量不断增加, 且对 Cd 和 Cu 的吸收、积累及转运能力均有所增强。Barazani<sup>[19]</sup> 的研究结果也显示, 在 Cd 处理后的 28 d 内, 北葱 (*Allium schoenoprasum* L.) 体内 Cd 的迁移率持续增加。因此, 植物对重金属元素的迁移率可能与植物种类、重金属元素的浓度及处理时间有关, 而 Cd 和 Cu 之间的相互作用对 Cd 和 Cu 在植物体内的吸收积累及迁移率的变化也有一定的影响。

#### 参考文献:

- [1] 李其林, 何九江, 刘光德, 等. 菜地土壤和蔬菜中几种重金属的分布特征[J]. 矿物学报, 2004, 24(4): 373-377.
- [2] 林大松, 徐应明, 孙国红, 等. 土壤重金属污染复合效应对小白菜生长及重金属累积的影响[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(增刊): 72-75.
- [3] 王 新, 梁仁禄, 周启星. Cd-Pb 复合污染在土壤-水稻系统中生态效应的研究[J]. 农村生态环境, 2001, 17(2): 41-44.
- [4] 宋 菲, 郭玉文, 刘孝义, 等. 土壤中重金属镉铅复合污染的研究[J]. 环境科学学报, 1996, 16(4): 431-436.
- [5] 周启星, 程 云, 张倩茹, 等. 复合污染生态毒理效应的定量关系分析[J]. 中国科学(C辑), 2003, 33(6): 566-573.
- [6] Shen G Q, Cao L K, Lu Y T, et al. Influence of phenanthrene on cadmium toxicity to soil enzymes and microbial growth [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2005, 12(5): 259-263.
- [7] 黄宝圣. 镉的生物毒性及其防治策略[J]. 生物学通报, 2005, 40(11): 26-28.
- [8] 储 玲, 晋 松, 吴学峰, 等. 铜污染对天蓝苜蓿幼苗生长及活性氧代谢的影响[J]. 生态学杂志, 2006, 25(12): 1481-1485.
- [9] 张义贤. 重金属对大麦 (*Hordeum vulgare*) 毒性的研究[J]. 环境科学学报, 1997, 17(2): 199-205.
- [10] 仇 硕, 黄苏珍. Cd 胁迫下黄芩蒲幼苗根系生长与 Cd 积累的研究[J]. 植物资源与环境学报, 2008, 17(3): 33-38.
- [11] 张开明, 佟海英, 黄苏珍, 等. Cu 胁迫对黄芩蒲和马蔺 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.
- [12] 张开明, 黄苏珍, 原海燕, 等. 水生花卉黄芩蒲 Cu<sup>2+</sup> 胁迫抗(耐)性研究[J]. 江苏农业科学, 2006(6): 217-220.
- [13] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 12-24.
- [14] 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 Zaïre [J]. Plant and Soil, 1983, 73(3): 377-385.
- [15] 王友保, 刘登义, 张 莉, 等. 铜、砷及其复合污染对黄豆 (*Glycine max*) 影响的初步研究[J]. 应用生态学报, 2001, 12(1): 117-120.
- [16] 余国营, 吴燕玉, 王 新. 重金属复合污染对大豆生长的影响及其综合评价研究[J]. 应用生态学报, 1995, 6(4): 433-439.
- [17] 李忠海, 王海燕, 梁文彬, 等. 土壤镉、锌、铅复合污染对芹菜的影响[J]. 中南林学院学报, 2002, 22(1): 36-39.
- [18] 宗良纲, 丁 园. 土壤重金属(Cu、Zn、Cd)复合污染的研究现状[J]. 农业环境保护, 2001, 20(2): 126-128, 封三.
- [19] Barazani O, Dudai N, Khadka U R, et al. Cadmium accumulation in *Allium schoenoprasum* L. grown in an aqueous medium[J]. Chemosphere, 2004, 57(9): 1213-1218.