

# 高氯酸盐与铅复合污染对 8 种空心菜幼苗生长的影响

张 茹<sup>1,2</sup>, 陈桂葵<sup>1,2\*</sup>, 黎华寿<sup>1,2</sup>, 贺鸿志<sup>1,2</sup>, 张泽民<sup>1\*</sup>

(1.华南农业大学农学院, 广州 510642; 2.华南农业大学 农业部华南热带农业环境重点实验室, 广州 510642)

**摘 要:**通过室内滤纸法试验研究发现,  $\text{ClO}_4^-$ 、Pb 及其复合污染对 8 个品种空心菜(*Ipomoea aquatica* Forsskal)幼苗根长、芽长以及鲜重的影响总体呈现出低浓度促进、高浓度抑制的规律, 对空心菜幼苗根部的抑制效果最为明显, 其中泰国空心菜和香港纯白大叶空心菜在  $\text{ClO}_4^-$  和 Pb 复合污染下的根长分别仅为对照组的 31.66% 和 38.64%。 $\text{ClO}_4^-$  和 Pb 复合污染对空心菜的抑制效果因空心菜品种、污染物的类型、浓度及其组合的不同而不同, 且呈现出复杂的交互作用, 多数空心菜品种在低浓度( $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的  $\text{ClO}_4^-$  +  $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的 Pb)和中浓度( $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的  $\text{ClO}_4^-$  +  $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的 Pb)的复合条件下的交互作用类型表现为协同作用, 而在高浓度( $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的  $\text{ClO}_4^-$  +  $500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的 Pb)的复合条件下则主要表现为拮抗作用。空心菜对  $\text{ClO}_4^-$ 、Pb 及其复合污染的耐性都存在明显的品种差异, 其中耐性较强的品种是泰国柳叶空心菜、港种青绿梗竹叶空心菜和金龙白骨柳叶空心菜, 耐性较差的品种是泰国空心菜和香港纯白大叶空心菜。

**关键词:**高氯酸盐; 铅; 复合污染; 空心菜; 交互作用

中图分类号: X503.231 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2015)03-0415-09 doi:10.11654/jaes.2015.03.002

## Combined Effects of Perchlorate and Lead on Seedling Growth of Eight *Ipomoea aquatica* Forsskal Varieties

ZHANG Ru<sup>1,2</sup>, CHEN Gui-kui<sup>1,2\*</sup>, LI Hua-shou<sup>1,2</sup>, HE Hong-zhi<sup>1,2</sup>, ZHANG Ze-min<sup>1\*</sup>

(1.College of Agriculture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2.Key Laboratory of Agro-Environment in the Tropics, Ministry of Agriculture, P.R. China, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

**Abstract:** Perchlorate ( $\text{ClO}_4^-$ ) and lead (Pb) are both inorganic contaminants in soils. However, their interactive effects on plants have not been well investigated. Here the root length, shoot length and biomass of 8 *Ipomoea aquatica* Forsskal varieties were examined under different rates of  $\text{ClO}_4^-$  and Pb and their combinations. Results showed that increasing  $\text{ClO}_4^-$ , Pb, and  $\text{ClO}_4^-$  + Pb concentrations increased inhibitory effects on the root length, shoot length and fresh weight of *I. aquatica* seedlings, with the most obvious inhibition found in the root length, in which a significant dose-effect relationship ( $P < 0.05$ ) was present. Different varieties of *I. aquatica* responded differently to  $\text{ClO}_4^-$  and Pb. The root lengths of Thailand and wide-leaf white skin (Hong Kong) *I. aquatica* were only 31.66% and 38.64% of that of the controls. The interaction of  $\text{ClO}_4^-$  and Pb showed synergism for most varieties of *I. aquatica* at low concentrations, but antagonism at higher concentrations. The narrow-leaf (Thailand), narrow-leaf green-skin (Hong Kong) and narrow-leaf white-skin *I. aquatica* were relatively tolerant to, whereas the Thailand and wide-leaf white-skin (Hong Kong) varieties were susceptible to perchlorate and lead stresses.

**Keywords:** perchlorate; lead; combined pollution; *Ipomoea aquatica* Forsskal; interaction

高氯酸盐( $\text{ClO}_4^-$ )是一种新型持久性环境污染物, 它可抑制人体甲状腺吸收碘, 干扰甲状腺的正常功能, 从而危害人体健康, 因此其环境污染问题已成为近年医学及环境科学的研究热点<sup>[1-3]</sup>。 $\text{ClO}_4^-$ 既可天然存

在又可人工合成, 天然存在的  $\text{ClO}_4^-$  常被用作化肥的原料<sup>[4-5]</sup>, 人工合成的则广泛用于橡胶制造、润滑油添加剂、烟花爆竹生产、电镀等行业<sup>[6-7]</sup>, 并作为氧化添加剂用于火箭、导弹的固体推进器中。由于其使用范围广泛, 且本身具有稳定、易溶于水等特点,  $\text{ClO}_4^-$  能在环境中迅速扩散, 并持久存在, 严重威胁人体健康。目前, 在许多地方都能检测出  $\text{ClO}_4^-$  的存在, 如自来水<sup>[8]</sup>、地下水、地表水、土壤<sup>[9-10]</sup>, 甚至在牛奶、蔬菜等人类膳食<sup>[11-12]</sup>及人体体液<sup>[9, 13]</sup>中也能检测出。高氯酸盐最早在

收稿日期: 2014-09-28

基金项目: 863 项目(2013AA102402)

作者简介: 张 茹(1989—), 女, 在读研究生, 主要从事污染生态学研究。E-mail: 990193750@qq.com

\* 通信作者: 陈桂葵 E-mail: guikuichen@scau.edu.cn;  
张泽民 E-mail: zmzhang@scau.edu.cn

美国见诸报道,近年来很多其他国家也开始了关于高氯酸盐方面的研究<sup>[4,6-11,13-14]</sup>。

铅(Pb)是土壤和水体中主要重金属污染物之一,其主要来源包括汽车蓄电池、电缆、弹药军火、合金、染料等,它对生态系统以及人体都具有毒害作用<sup>[15-17]</sup>。铅被植物吸收并积累到一定程度后会影响到种子的萌发<sup>[16-18]</sup>,妨碍植物对养分的吸收,阻碍植物的正常生长发育,降低农作物的产量和品质<sup>[19-21]</sup>,进而通过食物链严重损害人体的神经、免疫、消化和生殖系统。

环境中存在着多种元素,这些元素并不是单独存在,往往是共同作用而形成复合污染<sup>[21-22]</sup>,它们对生命组分发生危害前后,相互之间还要发生交互作用,导致其对生态系统的毒性发生改变<sup>[22]</sup>。重金属污染主要以复合污染存在<sup>[23-24]</sup>,污染物会对植物的生长生理指标产生影响,从而影响植物对污染物的吸收富集能力。因此,研究不同浓度的复合污染对植物生长的影响,对于污染土壤的利用以及植物对污染土壤的修复具有理论和实践意义<sup>[22-23]</sup>。中国是  $\text{ClO}_4^-$  的主要生产国,高流动扩散性、高水溶性和低吸附性的高氯酸盐可通过灌溉用水进入农田与重金属形成复合污染,但目前关于高氯酸盐与铅对空心菜生长的影响尚未见报道。本文通过研究  $\text{ClO}_4^-$ 、Pb 及其复合污染对不同品种空心菜生长的影响,探讨  $\text{ClO}_4^-$  和 Pb 污染对蔬菜的毒害机理及其品种差异,从而为  $\text{ClO}_4^-$  和 Pb 污染的防治提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

供试的空心菜种子(泰国空心菜、柳叶空心菜、泰国柳叶空心菜、港种青绿梗竹叶空心菜、香港纯白大叶空心菜、台湾纯白柳叶空心菜、台湾纯青柳叶空心菜、香港金龙白骨柳叶空心菜)直接购自广州种子市场。

### 1.2 实验设计

选用饱满的空心菜种子用 10% 的  $\text{H}_2\text{O}_2$  浸泡 10 min,去离子水漂洗干净后,每 20 粒种子放入一个培养皿中,内铺两层滤纸,加 10 mL 去离子水浸泡 48 h,放入控温( $25\pm 1$ )℃房内催芽,48 h 后挑选发芽一致的 10 粒种子留下,更换滤纸,加入 10 mL 各浓度污染物溶液。每天更换一次滤纸和加入 10 mL 相应浓度的污染物溶液,处理 7 d 后进行根长、芽长及幼苗鲜重的测定。

根据预实验中  $\text{ClO}_4^-$  和 Pb 单一处理时对空心菜

种子发芽率的影响,选择对空心菜种子发芽抑制率在 20%~60%之间的浓度,将高氯酸盐单一处理浓度设为 1、20、200  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,在本文中分别记为  $\text{P}_1$ 、 $\text{P}_{20}$ 、 $\text{P}_{200}$ ;铅单一处理浓度为 5、50、500  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,记为  $\text{Pb}_5$ 、 $\text{Pb}_{50}$ 、 $\text{Pb}_{500}$ ;高氯酸盐和铅复合处理的浓度为 1  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{ClO}_4^-$  + 5  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  Pb、20  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{ClO}_4^-$  + 50  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  Pb 和 200  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{ClO}_4^-$  + 500  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  Pb,分别记为  $\text{P}_1+\text{Pb}_5$ 、 $\text{P}_{20}+\text{Pb}_{50}$  和  $\text{P}_{200}+\text{Pb}_{500}$ 。以不加污染物的去离子水为对照,共 10 个处理,每个处理重复 3 次。先配置 200  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的  $\text{ClO}_4^-$  溶液和 500  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的 Pb 溶液,再用去离子水稀释到所需要的各种浓度。

### 1.3 主要药品和试剂

高氯酸钾( $\text{KClO}_4\cdot\text{H}_2\text{O}$ , AR),乙酸铅(AR)。

### 1.4 生长指标的测定

将待测空心菜幼苗过水洗净,直接用游标卡尺测量其绝对根长和芽长;然后吸干水分,用万分之一天平(Sartorius AG,德国生产)称空心菜的鲜重。

### 1.5 统计分析

所有数据均采用 Excel 和 SPSS17.0 进行计算和统计分析。并用 Duncan 检验法对显著性差异( $P<0.05$ )进行多重比较。

为了比较不同水平的污染物处理对空心菜各生长指标的影响,按以下方法计算其耐性指数( $T_i$ )和抑制率( $R_i$ ):

$$\text{耐性指数}^{[30]} T_i = T/C \times 100;$$

$$\text{抑制率 } R_i = (1 - T/C) \times 100;$$

式中: $C$  为对照值; $T$  为处理值。

### 1.6 复合污染交互作用类型的计算

前人研究<sup>[25]</sup>表明,复合污染物之间存在着复杂的交互作用,根据 Bliss 的提出的交互作用类型:相加、拮抗和协同作用,本文将复合污染交互作用的类型定义如下<sup>[24]</sup>。

相加作用:

$\text{ClO}_4^-$  和 Pb 单一处理之和 =  $\text{ClO}_4^-$ 、Pb 复合污染;

拮抗作用:

$\text{ClO}_4^-$  和 Pb 单一处理之和 >  $\text{ClO}_4^-$ 、Pb 复合污染;

协同作用:

$\text{ClO}_4^-$  和 Pb 单一处理之和 <  $\text{ClO}_4^-$ 、Pb 复合污染。

先计算各处理组(包括单一处理和复合处理)的抑制率,将相应浓度的  $\text{ClO}_4^-$  和 Pb 单一处理的抑制率相加,并与其对应浓度的复合污染进行比较,再根据上面三个计算式来判断复合污染的交互作用类型。

## 2 结果与分析

### 2.1 对不同品种空心菜幼苗根长的影响

经不同浓度的  $\text{ClO}_4^-$  与 Pb 及其复合污染处理后,各品种空心菜幼苗的根长见表1。试验结果表明,污染物的类型、浓度及其组合不同,对空心菜幼苗根长的影响也不同,总体呈现出低浓度促进、高浓度抑制的趋势。

从表1可看出:  $1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的  $\text{ClO}_4^-$  对泰国柳叶空心菜、台湾纯白柳叶空心菜和香港纯白大叶空心菜幼苗的根长无显著影响,而对其他五品种空心菜的幼苗根长有显著的促进作用;  $20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的  $\text{ClO}_4^-$  对港种青绿梗竹叶空心菜幼苗根长有显著的抑制作用,而对其他7个品种空心菜幼苗根长无显著影响; 在  $200\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的  $\text{ClO}_4^-$  处理下,除泰国空心菜和台湾纯青柳叶空心菜的根长与对照无显著性差异之外,其他6个品种空心菜幼苗的根长都显著低于对照组,表明这两个品种对  $\text{ClO}_4^-$  有较强的耐受性,其中泰国空心菜对  $\text{ClO}_4^-$  的耐性最强,其根长为对照组的  $100.85\%$ ,而香港纯白大叶空心菜的耐性最弱,只有对照组的  $52.82\%$ 。

$5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的 Pb 处理下,除对柳叶空心菜幼苗的

根长有明显促进作用外,其他7个品种的根长与对照组无显著性差异;  $50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的 Pb 处理对泰国空心菜、柳叶空心菜、泰国柳叶空心菜和港种青绿梗竹叶空心菜4个品种的幼苗根长有明显的抑制作用,其中泰国空心菜对 Pb 的耐性最弱,其幼苗根长仅为对照组的  $64.73\%$ ; 当 Pb 浓度为  $500\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时,除台湾纯青柳叶空心菜外,其他7个品种空心菜的幼苗根长都明显低于其对照组,其中对泰国空心菜和香港纯白大叶空心菜的抑制最为显著,其根长分别只有对照的  $26.49\%$  和  $28.32\%$ ,而台湾纯青柳叶空心菜的根长为对照的  $74.73\%$ ,对 Pb 的耐性最强。

不同浓度的  $\text{ClO}_4^-$  与 Pb 复合处理对不同品种空心菜幼苗根长的影响也不同。当两种污染物低浓度 ( $1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{ ClO}_4^-+5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{ Pb}$ ) 复合时,对柳叶空心菜和台湾纯青柳叶空心菜幼苗根长有明显的促进作用,而对港种青绿梗竹叶空心菜有显著的抑制作用,对其他5个品种空心菜则无明显影响; 当两种污染物中等浓度 ( $20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{ ClO}_4^-+50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{ Pb}$ ) 复合时,对台湾纯青柳叶空心菜幼苗根长有明显的促进作用,对泰国空心菜、泰国柳叶空心菜和港种青绿梗竹叶空心菜3个品种的幼苗根长都有显著的抑制作用,而对其他4品种

表1 不同浓度的高氯酸盐、铅及其复合污染对不同品种空心菜幼苗根长的影响(cm)

Table 1 Effects of perchlorate, lead and their combinations on root length of different *I. aquatica* varieties

| 处理 Treatment               | 泰国空心菜                    | 柳叶空心菜                    | 泰国柳叶空心菜                 | 港种青绿梗竹叶空心菜              | 香港纯白大叶空心菜               | 台湾纯白柳叶空心菜               | 台湾纯青柳叶空心菜                | 金龙白骨柳叶空心菜                |
|----------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 对照                         | 26.62±1.30bc<br>(100.00) | 23.29±1.99c<br>(100.00)  | 36.56±1.24a<br>(100.00) | 30.8±2.57b<br>(100.00)  | 15.04±2.07a<br>(100.00) | 20.48±2.41a<br>(100.00) | 8.39±0.22cd<br>(100.00)  | 13.25±0.44bc<br>(100.00) |
| $\text{ClO}_4^-$           | P <sub>1</sub>           | 36.23±1.45a<br>(136.10)  | 40.57±1.5a<br>(174.21)  | 36.77±1.32a<br>(100.59) | 40.85±2.47a<br>(132.65) | 11.12±1.75ab<br>(73.91) | 21.38±3.25a<br>(104.37)  | 10.88±1.19b<br>(129.76)  |
|                            | P <sub>20</sub>          | 29.07±1.83b<br>(109.21)  | 24.29±2.06c<br>(104.29) | 33.46±1.32ab<br>(91.52) | 23.15±1.33c<br>(75.16)  | 10.73±1.7ab<br>(71.32)  | 14.97±2.90abc<br>(73.09) | 8.64±0.65c<br>(103.05)   |
|                            | P <sub>200</sub>         | 26.84±1.38bc<br>(100.85) | 17.78±0.88d<br>(76.37)  | 29.31±1.26b<br>(80.17)  | 20.28±1.08cd<br>(65.84) | 7.95±1.09bc<br>(52.82)  | 14.33±3.24bc<br>(69.98)  | 8.15±0.77cd<br>(97.15)   |
| Pb                         | Pb <sub>5</sub>          | 28.49±1.25b<br>(107.04)  | 28.49±2.05b<br>(122.34) | 37.62±1.25a<br>(102.90) | 30.93±1.43b<br>(100.42) | 13.58±0.86a<br>(90.29)  | 20.48±2.41a<br>(100.00)  | 7.46±0.4cde<br>(88.92)   |
|                            | Pb <sub>50</sub>         | 17.23±0.9d<br>(64.73)    | 16.37±0.81d<br>(70.28)  | 31.22±1.19b<br>(85.40)  | 22.93±1.12c<br>(74.44)  | 12.05±1.52ab<br>(80.07) | 19.91±0.96ab<br>(97.22)  | 6.14±0.36de<br>(73.19)   |
|                            | Pb <sub>500</sub>        | 7.05±0.49e<br>(26.49)    | 7.98±0.42e<br>(34.25)   | 23.24±1.99c<br>(63.57)  | 16.42±1.08de<br>(53.32) | 4.26±0.41c<br>(28.32)   | 7.13±0.37c<br>(34.80)    | 6.27±0.25cde<br>(74.73)  |
| $\text{ClO}_4^-+\text{Pb}$ | P <sub>1+Pb5</sub>       | 23.95±1.44c<br>(89.96)   | 28.74±1.58b<br>(123.42) | 33.79±1.78ab<br>(92.42) | 19.51±1.03cd<br>(63.33) | 14.44±1.81a<br>(95.99)  | 18.14±1.59ab<br>(88.55)  | 16.32±1.46a<br>(194.56)  |
|                            | P <sub>20+Pb50</sub>     | 19.86±1d<br>(74.62)      | 21.76±1.29c<br>(93.46)  | 30.37±1.22b<br>(83.07)  | 19.85±1.1cd<br>(64.45)  | 10.55±0.97ab<br>(70.11) | 17.91±1.61ab<br>(87.46)  | 11.61±1.14b<br>(138.40)  |
|                            | P <sub>200+Pb500</sub>   | 8.43±0.54e<br>(31.66)    | 10.93±0.56e<br>(46.93)  | 24.67±1.38c<br>(67.49)  | 13.57±0.81e<br>(44.05)  | 5.81±0.67c<br>(38.64)   | 11.72±4.09bc<br>(57.23)  | 5.29±0.33e<br>(63.01)    |

注:表中数据为平均值±标准误( $n=30$ );同一列中不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ );括号内数据为耐性指数。下同。

Note: Values in table are mean ± SE ( $n=30$ ); Data with different letters within one column differ significantly ( $P<0.05$ ); data in parentheses are tolerance index. The same below.

无显著影响;当两种污染物高浓度( $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ ClO}_4^- + 500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Pb}$ )复合时,8个品种空心菜的幼苗根长都显著低于其对照组,其中泰国空心菜和香港纯白大叶空心菜对 $\text{ClO}_4^-$ 与 $\text{Pb}$ 复合污染的耐性最弱,其根长仅为对照组的31.66%和38.64%。

## 2.2 对不同品种空心菜幼苗芽长的影响

研究结果(表2)显示: $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 $\text{ClO}_4^-$ 对泰国空心菜、柳叶空心菜、港种青绿梗竹叶空心菜和金龙白骨柳叶空心菜4个品种的幼苗芽长有显著的促进作用,而对台湾纯白柳叶空心菜幼苗芽长有显著的抑制作用,对其他3个品种芽长则无显著影响; $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 $\text{ClO}_4^-$ 对台湾纯白柳叶空心菜幼苗芽长有显著的抑制作用,而对其他7个品种芽长则无显著影响; $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 $\text{ClO}_4^-$ 对香港纯白大叶空心菜、台湾纯白柳叶空心菜和台湾纯青柳叶空心菜3个品种的幼苗芽长有显著的抑制作用,而对其他5个品种芽长则无显著影响。试验结果表明,台湾纯白柳叶空心菜对 $\text{ClO}_4^-$ 的耐受性最差。

$5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 $\text{Pb}$ 处理下,除对柳叶空心菜和金龙白骨柳叶空心菜幼苗的芽长有显著促进作用外,其他6个品种的芽长与对照组无显著性差异; $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 $\text{Pb}$ 对台湾纯青柳叶空心菜的幼苗芽长有显著的抑制作用,其幼苗芽长为对照组的74.82%,而对金龙白骨

柳叶空心菜幼苗的芽长有显著的促进作用,对其他6个品种则无显著影响;当 $\text{Pb}$ 浓度高达 $500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,除金龙白骨柳叶空心菜的幼苗芽长与对照无显著性差异外,其他7个品种空心菜的幼苗芽长都明显低于相应对照组,其中台湾纯白柳叶空心菜的幼苗芽长分别只有对照的48.45%。这说明金龙白骨柳叶空心菜对 $\text{Pb}$ 的耐受性最强,而台湾纯白柳叶空心菜对 $\text{Pb}$ 的耐受性最弱。

低浓度的 $\text{ClO}_4^-$ 和 $\text{Pb}$ 复合处理对柳叶空心菜和金龙白骨柳叶空心菜幼苗芽长有显著的促进作用,对其他6个品种则无显著影响;中浓度的 $\text{ClO}_4^-$ 和 $\text{Pb}$ 复合处理对柳叶空心菜和金龙白骨柳叶空心菜幼苗的芽长也有显著的促进作用,而对港种青绿梗竹叶空心菜和香港纯白大叶空心菜的幼苗芽长有显著的抑制作用,对其他4个品种则无显著影响;高浓度的 $\text{ClO}_4^-$ 和 $\text{Pb}$ 复合处理对金龙白骨柳叶空心菜的幼苗芽长无显著影响,而对其他7个品种都有显著的抑制作用,其中台湾纯白柳叶空心菜对 $\text{ClO}_4^-$ 与 $\text{Pb}$ 复合污染的耐性最弱,其芽长仅为对照组的61.79%。

## 2.3 对不同品种空心菜幼苗鲜重的影响

随着污染物浓度的增加,空心菜幼苗鲜重逐渐降低,总体呈现出明显的浓度-效应关系。

实验结果(表3)显示, $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ ClO}_4^-$ 对香港纯白

表2 不同浓度的高氯酸盐、铅及其复合污染对不同品种空心菜幼苗芽长的影响(cm)

Table 2 Effects of perchlorate, lead and their combinations on bud length of different *I. aquatic* varieties

| 处理 Treatment                 | 泰国空心菜                        | 柳叶空心菜                    | 泰国柳叶空心菜                   | 港种青绿梗竹叶空心菜               | 香港纯白大叶空心菜                | 台湾纯白柳叶空心菜                | 台湾纯青柳叶空心菜                | 金龙白骨柳叶空心菜                |
|------------------------------|------------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 对照                           | 48.04±1.6b<br>(100.00)       | 39.88±1.86bc<br>(100.00) | 53.54±2.67abc<br>(100.00) | 43.9±1.73b<br>(100.00)   | 27.91±1.81ab<br>(100.00) | 33.65±1.92a<br>(100.00)  | 25.39±1.88ab<br>(100)    | 24.71±0.89b<br>(100)     |
| $\text{ClO}_4^-$             | $\text{P}_1$                 | 54.86±1.46a<br>(114.2)   | 50.08±1.63a<br>(125.58)   | 59.67±2.5a<br>(111.45)   | 52.15±1.84a<br>(118.8)   | 26.25±1.35abc<br>(94.05) | 29.13±1.67ab<br>(86.57)  | 24.59±1.52bc<br>(96.85)  |
|                              |                              | 44.92±1.23b<br>(93.5)    | 41.11±1.44b<br>(103.09)   | 52.69±1.47abc<br>(98.41) | 45.63±1.53b<br>(103.94)  | 23.22±1.51bc<br>(83.2)   | 28.18±2.8bc<br>(83.74)   | 23.33±1.19bc<br>(91.87)  |
|                              |                              | 45.02±1.38b<br>(93.71)   | 35.72±1.33c<br>(89.57)    | 50.69±1.56c<br>(94.67)   | 42.39±2.26b<br>(96.56)   | 21.28±1.16c<br>(76.26)   | 19.48±0.56c<br>(57.89)   | 18.37±0.71d<br>(72.32)   |
| $\text{Pb}$                  | $\text{Pb}_5$                | 49.08±1.57b<br>(102.17)  | 46.57±1.97a<br>(116.77)   | 58.73±3.22ab<br>(109.69) | 43.46±1.62b<br>(99.00)   | 27.63±2.78ab<br>(99.01)  | 28.14±1.55abc<br>(83.64) | 23±1.45bc<br>(90.56)     |
|                              |                              | 46.72±1.43b<br>(97.25)   | 41.62±1.98b<br>(104.37)   | 58.31±1.72ab<br>(108.9)  | 42.04±1.29b<br>(95.75)   | 29.24±2.71a<br>(104.78)  | 27.05±1.68abc<br>(80.38) | 19±1.12d<br>(74.82)      |
|                              |                              | 33.05±0.91c<br>(68.81)   | 27.75±0.89d<br>(69.58)    | 42.99±1.72d<br>(80.29)   | 35.83±1c<br>(81.62)      | 20.8±1.59c<br>(74.52)    | 16.30±5.2c<br>(48.45)    | 14.86±0.51e<br>(58.51)   |
| $\text{ClO}_4^- + \text{Pb}$ | $\text{P}_{1+} \text{ Pb}_5$ | 45.72±2.22b<br>(95.17)   | 47.82±1.22a<br>(119.91)   | 53.21±2.47abc<br>(99.37) | 42.18±0.92b<br>(96.08)   | 23.42±1.34bc<br>(83.94)  | 31.62±0.52a<br>(93.96)   | 28.91±0.87a<br>(113.83)  |
|                              |                              | 47.2±1.66b<br>(98.25)    | 46.52±1.34a<br>(116.66)   | 51.84±1.54bc<br>(96.82)  | 36.85±1.14c<br>(83.93)   | 22±1.57c<br>(78.82)      | 27.82±1.56abc<br>(82.67) | 26.47±1.65ab<br>(104.23) |
|                              |                              | 30.29±1.33c<br>(63.05)   | 30.06±0.95d<br>(75.37)    | 43.31±1.75d<br>(80.89)   | 33.79±1.11c<br>(76.96)   | 21.67±0.71c<br>(77.66)   | 20.79±6.9bc<br>(61.79)   | 21.05±1.03cd<br>(82.89)  |

大叶空心菜和台湾纯白柳叶空心菜幼苗的鲜重有显著的抑制作用,对金龙白骨柳叶空心菜的鲜重有显著的促进作用,而对其他 5 品种空心菜的幼苗鲜重并无显著影响;20 mg·L<sup>-1</sup> ClO<sub>4</sub><sup>-</sup>对香港纯白大叶空心菜和台湾纯白柳叶空心菜幼苗鲜重有显著的抑制作用,而对其他 6 个品种空心菜幼苗鲜重则无显著影响;在 200 mg·L<sup>-1</sup> ClO<sub>4</sub><sup>-</sup>处理下,除泰国柳叶空心菜、港种青绿梗竹叶空心菜、台湾纯青柳叶空心菜、金龙白骨柳叶空心菜的鲜重与对照无显著性差异之外,其他 4 个品种空心菜幼苗的鲜重都显著低于对照组,表明这 4 个品种对 ClO<sub>4</sub><sup>-</sup>有较强的耐受性,其中金龙白骨柳叶空心菜对 ClO<sub>4</sub><sup>-</sup>的耐性最强,其鲜重为对照组的 91.46%,而台湾纯白柳叶空心菜的耐性最弱,只有对照组的 37.34%。

5 mg·L<sup>-1</sup> Pb 处理对港种青绿梗竹叶空心菜和金龙白骨柳叶空心菜幼苗的鲜重有显著的促进作用,对柳叶空心菜和泰国柳叶空心菜的鲜重无显著性影响,对其他 4 个品种的鲜重则有显著的抑制作用;当 Pb 浓度为 50 mg·L<sup>-1</sup> 时,除了对泰国空心菜、香港纯白大叶空心菜、台湾纯白柳叶空心菜和台湾纯青柳叶空心菜的幼苗鲜重有显著的抑制作用外,对其他 4 个品种空心菜幼苗的鲜重并无显著影响;500 mg·L<sup>-1</sup> Pb 处理下,泰国柳叶空心菜和金龙白骨柳叶空心菜幼苗的鲜

重与对照并无显著差异,表明这 2 个品种对 Pb 的耐受性较强,其中泰国柳叶空心菜幼苗的耐铅性最强,其幼苗鲜重为对照的 95.10%。其他 6 个品种空心菜的幼苗鲜重都明显低于其对照组,其中对台湾纯青柳叶空心菜的抑制最为显著,表明台湾纯青柳叶空心菜对铅的耐受性最差,其鲜重只有对照的 36.39%。

低浓度的 ClO<sub>4</sub><sup>-</sup>和 Pb 复合处理对泰国空心菜和台湾纯青柳叶空心菜幼苗鲜重有显著的抑制作用,而对港种青绿梗竹叶空心菜和金龙白骨柳叶空心菜有显著的促进作用,对其他 4 个品种空心菜则无显著影响;中浓度的 ClO<sub>4</sub><sup>-</sup>和 Pb 复合处理,对港种青绿梗竹叶空心菜和金龙白骨柳叶空心菜 2 个品种的幼苗鲜重有显著促进作用,而对柳叶空心菜、泰国柳叶空心菜无显著影响,对其他 4 个品种空心菜幼苗的鲜重有明显的抑制作用;当两种污染物高浓度 (200 mg·L<sup>-1</sup> ClO<sub>4</sub><sup>-</sup>+500 mg·L<sup>-1</sup> Pb)复合时,除柳叶空心菜、泰国柳叶空心菜和港种青绿梗竹叶空心菜的幼苗鲜重与对照组无显著差异外,其他 5 个品种空心菜的幼苗鲜重都显著低于其对照组,表明这三个品种对 ClO<sub>4</sub><sup>-</sup>与 Pb 复合污染的耐性较强,其中泰国柳叶空心菜的长势最好,为对照的 88.9%。而台湾纯白柳叶空心菜和台湾纯青柳叶空心菜对 ClO<sub>4</sub><sup>-</sup>与 Pb 复合污染的耐性最弱,其鲜重仅为对照组的 26.53%和 30.87%。

表 3 不同浓度高氯酸盐、铅及其复合作用对不同品种空心菜幼苗鲜重的影响(mg·株<sup>-1</sup>)

Table 3 Effects of perchlorate, lead and their combinations on seedling fresh weight of different *I. aquatic* varieties

| 处理 Treatment                      | 泰国空心菜                               | 柳叶空心菜                    | 泰国柳叶空心菜                   | 港种青绿梗竹叶空心菜                 | 香港纯白大叶空心菜                  | 台湾纯白柳叶空心菜                | 台湾纯青柳叶空心菜                | 金龙白骨柳叶空心菜                |
|-----------------------------------|-------------------------------------|--------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 对照                                | 156±1.69ab<br>(100.00)              | 165.53±6.69a<br>(100.00) | 111.67±13.01a<br>(100.00) | 156.43±2.88cde<br>(100.00) | 92.61±15.72a<br>(100.00)   | 65.8±1.86a<br>(100.00)   | 312.00±3.38a<br>(100.00) | 107.08±1.9de<br>(100.00) |
| ClO <sub>4</sub> <sup>-</sup>     | P <sub>1</sub>                      | 167.3±10.67a<br>(107.24) | 165.19±6.01a<br>(99.79)   | 102.14±20.97a<br>(91.46)   | 171.2±13.66abc<br>(109.44) | 52.98±5.16cd<br>(57.21)  | 28.4±2.44cde<br>(43.16)  | 289.92±44.82a<br>(92.92) |
|                                   | P <sub>20</sub>                     | 139.63±4.73bc<br>(89.5)  | 147.54±5.25ab<br>(89.13)  | 110.69±10.85a<br>(99.12)   | 143.8±1.59def<br>(91.92)   | 46.85±8.1cd<br>(50.59)   | 26.88±4.71bc<br>(40.85)  | 285.96±3.65a<br>(91.65)  |
|                                   | P <sub>200</sub>                    | 125.76±3.1cd<br>(80.62)  | 116.58±5.73b<br>(70.42)   | 99.07±7.91a<br>(88.71)     | 141.27±5.5def<br>(90.3)    | 43.95±12.49cd<br>(47.46) | 24.57±5.33e<br>(37.34)   | 282.08±11.93a<br>(90.41) |
| Pb                                | Pb <sub>5</sub>                     | 96.27±4.46e<br>(61.71)   | 144.41±26.71ab<br>(87.24) | 102.97±18.15a<br>(92.21)   | 180.4±2.71ab<br>(115.32)   | 61.43±3.14bc<br>(66.33)  | 43.10±2.28bcd<br>(65.50) | 106.89±7.15b<br>(34.26)  |
|                                   | Pb <sub>50</sub>                    | 99.28±3.48e<br>(63.64)   | 136.45±5.06ab<br>(82.43)  | 126.93±4.29a<br>(113.67)   | 161.67±1.49bcd<br>(103.35) | 54.31±1.8c<br>(58.64)    | 31.57±4.23cde<br>(47.97) | 95.83±1.08b<br>(30.72)   |
|                                   | Pb <sub>500</sub>                   | 76.87±7.28f<br>(49.28)   | 120.56±11.27b<br>(72.83)  | 106.2±6.12a<br>(95.10)     | 133.39±9.94f<br>(85.27)    | 46.05±1.51cd<br>(49.73)  | 30.82±3.09cde<br>(47.97) | 113.53±5.58b<br>(36.39)  |
| ClO <sub>4</sub> <sup>-</sup> +Pb | P <sub>1</sub> + Pb <sub>5</sub>    | 129.57±1.03cd<br>(83.06) | 150.24±4.43ab<br>(90.76)  | 92.32±16.23a<br>(82.67)    | 189.77±7.97a<br>(121.31)   | 80.63±10.06ab<br>(87.07) | 53.62±10.23ab<br>(81.49) | 141.84±10.16b<br>(45.46) |
|                                   | P <sub>20</sub> + Pb <sub>50</sub>  | 112.71±3.74de<br>(72.25) | 145.61±16ab<br>(87.96)    | 87.05±15.07a<br>(77.95)    | 179.53±6.77ab<br>(114.76)  | 60.05±4.31bc<br>(64.85)  | 43.72±1.76bc<br>(66.44)  | 106.63±9.3b<br>(34.18)   |
|                                   | P <sub>200</sub> +Pb <sub>500</sub> | 97.99±10.38e<br>(62.82)  | 127.59±4.46ab<br>(77.08)  | 99.28±10.42a<br>(88.90)    | 135.4±2.56ef<br>(86.55)    | 30.24±4.09d<br>(32.65)   | 17.46±7.15e<br>(26.53)   | 96.31±4.85b<br>(30.87)   |

2.4 复合污染对空心菜幼苗生长的交互作用类型

不同浓度的  $\text{ClO}_4^-$  和 Pb 复合对空心菜幼苗生长的交互作用类型(按抑制率计算)见表 4。结果表明,  $\text{ClO}_4^-$  和 Pb 复合污染对空心菜根长、芽长、鲜重的影响具有交互作用, 总体来说, 大多数品种空心菜在高浓度  $\text{ClO}_4^-$  和 Pb 复合时的交互作用类型表现为拮抗作用, 而在低浓度复合时则以协同为主。

2.5 空心菜幼苗相对生长量聚类分析

不同品种的空心菜对铅和高氯酸盐的耐受性不同, 本文以空心菜幼苗的根长、芽长和鲜重的耐性指数为指标, 并设它们为等权重, 采用层级聚类(Hierarchical clustering) 法对高浓度的  $\text{ClO}_4^-$ 、Pb 单一及其复合处理下的 8 个空心菜品种进行了聚类分析, 结果见图 1。

由图 1(a)可看出, 在  $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的  $\text{ClO}_4^-$  处理下, 对  $\text{ClO}_4^-$  耐性最差的品种是香港纯白大叶空心菜和台湾纯白柳叶空心菜, 耐性最强的是泰国空心菜和台湾纯青柳叶空心菜, 其他 4 个品种对  $\text{ClO}_4^-$  耐性居中, 包括港种青绿梗竹叶空心菜、金龙白骨柳叶空心菜、泰国柳叶空心菜和柳叶空心菜。图 1(b)为高浓度( $500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 的 Pb 处理下对空心菜幼苗的相对生长量的聚类分析, 由图可知: 对 Pb 耐性较弱的空心菜品种主要是泰国空心菜、柳叶空心菜、香港大叶空心菜和台湾纯白柳叶空心菜; 耐 Pb 性较强的空心菜品种主要是泰国柳叶空心菜、港种青绿梗竹叶空心菜和金龙白骨柳叶空心菜; 台湾纯青柳叶空心菜的耐 Pb 性居中。图 1(c)是在高浓度的  $\text{ClO}_4^-$  与 Pb 的复合污染处理下, 对 8 个空心菜品种相对生长量的聚类分析, 同样可以分为三类, 其中第一类是对复合污染耐性较差的泰国空心菜和香港纯白大叶空心菜; 第二类是对复合污染耐性较强的 4 个品种, 包括柳叶空心菜、泰国柳叶空

心菜、港种青绿梗竹叶空心菜和金龙白骨柳叶空心菜; 第三类是对复合污染耐性居中的台湾纯白柳叶空心菜和台湾纯青柳叶空心菜。

3 讨论

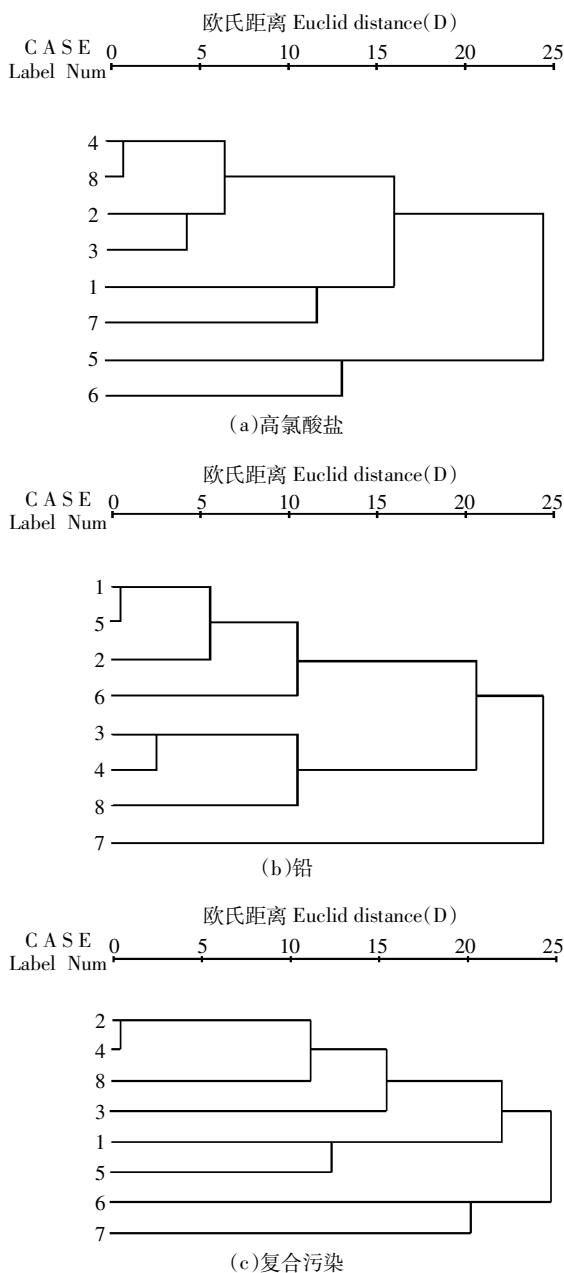
3.1 复合污染对空心菜幼苗生长的交互作用

复合污染较之单一污染来说, 由于污染物的交互作用, 其环境效应可能会产生变化。单一污染处理下, 主要是污染物的理化性质和浓度决定了其对植物的毒性效应, 已有研究表明, 单一高氯酸盐或铅污染对植物的效应会呈现出“低促高抑”的规律<sup>[17-18]</sup>; 复合污染对生物的毒性效应不仅与污染物的理化性质、浓度有关, 还与污染物之间的交互作用有关<sup>[23]</sup>。杨杰锋<sup>[24]</sup>等的实验表明, 高浓度的高氯酸盐与铬复合污染处理趋向于拮抗, 低浓度组合则以协同为主。孙建伶等<sup>[19]</sup>研究发现, Pb/Cd 之间存在复杂的交互作用, 低浓度复合时相互促进吸收, 高浓度复合时优先吸收 Cd 而抑制韭菜对 Pb 的吸收; 锌在高浓度 Pb/Cd 污染时表现出优良的拮抗作用, 可有效降低 Pb、Cd 的生物有效性并促进韭菜生长。Chen 等<sup>[20]</sup>在研究铅、镉复合污染影响时发现, 低浓度铅和镉复合处理对茼蒿的生长表现为协同作用, 而高浓度的 Cd 与 Pb 复合处理则为拮抗作用。Han 等<sup>[26]</sup>的研究表明, NaCl 会明显减少镉从根部向地上部的转运与吸收, 缓解 Cd 对植株侧枝发育的抑制。Qiu 等<sup>[27]</sup>的研究也发现, 外源添加 Zn 会降低柔毛委陵菜根部对 Cd 的吸收。这些研究已证实, 重金属复合污染大多在低浓度时呈协同作用, 其主要原因是: 在低浓度复合时可以互相促进植物吸收, 而在高浓度复合时一种重金属反而会抑制植物吸收另一种重金属, 从而植物的毒性效应表现为拮抗。

在本试验中, 中低浓度复合污染条件下, 其交互

表 4 高氯酸盐和铅复合污染对空心菜幼苗生长的交互作用类型  
Table 4 Interactive effects of perchlorate and lead on *I. aquatica* seedling growth

| 处理 Treatment                     | 指标 | 泰国空心菜 | 柳叶空心菜 | 泰国柳叶空心菜 | 港种青绿梗竹叶空心菜 | 香港纯白大叶空心菜 | 台湾纯白柳叶空心菜 | 台湾纯青柳叶空心菜 | 金龙白骨柳叶空心菜 |
|----------------------------------|----|-------|-------|---------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| $\text{P}_1+\text{Pb}_5$         | 根长 | 协同    | 协同    | 协同      | 协同         | 拮抗        | 协同        | 拮抗        | 协同        |
|                                  | 芽长 | 协同    | 协同    | 协同      | 协同         | 协同        | 拮抗        | 拮抗        | 协同        |
|                                  | 鲜重 | 拮抗    | 拮抗    | 协同      | 协同         | 拮抗        | 拮抗        | 拮抗        | 协同        |
| $\text{P}_{20}+\text{Pb}_{50}$   | 根长 | 拮抗    | 拮抗    | 拮抗      | 拮抗         | 拮抗        | 拮抗        | 拮抗        | 协同        |
|                                  | 芽长 | 拮抗    | 拮抗    | 协同      | 协同         | 协同        | 拮抗        | 拮抗        | 协同        |
|                                  | 鲜重 | 拮抗    | 拮抗    | 协同      | 拮抗         | 拮抗        | 拮抗        | 拮抗        | 拮抗        |
| $\text{P}_{200}+\text{Pb}_{500}$ | 根长 | 拮抗    | 拮抗    | 拮抗      | 拮抗         | 拮抗        | 拮抗        | 协同        | 拮抗        |
|                                  | 芽长 | 拮抗    | 拮抗    | 拮抗      | 协同         | 拮抗        | 拮抗        | 拮抗        | 协同        |
|                                  | 鲜重 | 拮抗    | 拮抗    | 拮抗      | 协同         | 拮抗        | 拮抗        | 拮抗        | 协同        |



1 泰国空心菜; 2 柳叶空心菜; 3 泰国柳叶空心菜; 4 港种青绿梗竹叶空心菜; 5 香港纯白大叶空心菜; 6 台湾纯白柳叶空心菜; 7 台湾纯青柳叶空心菜; 8 金龙白骨柳叶空心菜

图1 基于高浓度的高氯酸盐和铅处理下幼苗生长参数的耐性指数对8个品种空心菜的聚类分析

Figure 1 Dendrogram showing relationship of eight *I. aquatica* varieties based on cluster analysis of three growth parameters under different perchlorate and lead levels

作用主要表现为协同作用,而高浓度条件下,则主要表现为拮抗作用。其原因可能也与不同条件下空心菜对这两种污染物的吸收积累有关。我们在实验室的研究(数据未发表)也发现,当高氯酸盐浓度较低时会促

进植物吸收重金属,而当高氯酸盐浓度较高时反而会抑制植物吸收重金属。高氯酸盐是一种强氧化剂,当它与重金属以不同浓度配比时,为何会增加或减少植物吸收重金属呢?其机理还有待进一步的探讨。

### 3.2 空心菜对高氯酸盐和铅复合污染耐性的品种差异

本实验结果表明,空心菜对  $\text{ClO}_4^-$ 、Pb 及其复合污染的响应存在着明显的品种间差异,如:泰国柳叶空心菜、港种青绿梗竹叶空心菜和金龙白骨柳叶空心菜对铅的耐性高于其他品种;泰国空心菜和台湾纯青柳叶空心菜对  $\text{ClO}_4^-$  的耐性最强,而香港纯白大叶空心菜和台湾纯白柳叶空心菜耐性最差。国内外大量研究<sup>[28-30]</sup>表明,由于遗传上的差异,不同品种作物对重金属的吸收、积累乃至在体内的分配上存在很大差异,进而会导致不同品种间株高、根长、生物量及产量等差异显著。这点在农业生产上是非常有意义的。我们可以利用这些特点,筛选供食用器官重金属富集能力较弱但生长、产量却不受影响的品种在中、轻度重金属污染土壤中种植,既可达到农田重金属污染治理目标,又可抑制其进入食物链,有效降低农产品的重金属污染风险。已有研究也表明,不同植物吸收积累  $\text{ClO}_4^-$  的能力有差异<sup>[31]</sup>,甚至同一植物的不同基因型对  $\text{ClO}_4^-$  的吸收积累也差异较大<sup>[32]</sup>。我们研究发现,不同水稻品种对  $\text{ClO}_4^-$  的耐性以及吸收、积累  $\text{ClO}_4^-$  的能力存在明显差异<sup>[14,24]</sup>。但目前关于不同作物品种对  $\text{ClO}_4^-$  与 Pb 复合污染的耐性或吸收积累能力的差异研究尚未见报道。

作物应对外来胁迫具有品种差异这一现象,国内外学者也做了大量相关研究,试图从植物的细胞结构、光合特性、营养吸收等多个角度去揭示环境胁迫导致品种间差异的机理<sup>[14,27,33-34]</sup>。如有研究<sup>[33]</sup>表明不同的植物品种所含有的植物螯合肽不同,对外来胁迫的响应也不相同,耐性品种一般可合成较多的植物螯合肽,而螯合作用和金属结合复合物(MBC)及金属络合蛋白(MBP)被认为在植物重金属耐性中起重要作用;也有研究认为重金属对芦苇、玉米、甘蓝等的耐性品种中的营养元素(S、P)和矿质元素(Mn、Mg、Fe等)吸收和运输的影响较小或不受影响,可能是它们耐重金属的原因之一<sup>[34-35]</sup>。Seyfferth 等研究发现,营养液内的  $\text{NO}_3^-$  及  $\text{H}^+$  浓度与莴苣叶内的高氯酸盐累积量呈负相关,因此他们认为植物吸收  $\text{NO}_3^-$  与  $\text{ClO}_4^-$  可能是同一个通道<sup>[36]</sup>。本研究也发现,对  $\text{ClO}_4^-$  耐性不同的水稻品种体内的  $\text{NO}_3^-$  含量也存在明显差异<sup>[14]</sup>。由此可见,植物品种不同,对同一污染物的响应也会不同,其机理

非常复杂,但总的来看,是因为品种间的生物遗传学特性所导致的差异。本试验所用到的空心菜品种,从外表形态上看差异很大,我们推测其他生物遗传学特性也应该差异较大,因此对  $\text{ClO}_4^-$  和 Pb 复合污染胁迫会表现出明显的品种差异,但其内在主要机理还不清楚,有待进一步的研究。

## 4 结论

(1)  $\text{ClO}_4^-$ 、Pb 及其复合污染对空心菜幼苗根长、芽长以及鲜重的影响总体呈现出低浓度促进、高浓度抑制的规律,其抑制效应的大小因空心菜品种、污染物的类型、浓度及其组合的不同而不同。

(2)  $\text{ClO}_4^-$ 、Pb 及其复合污染对空心菜的抑制作用与其植株部位有关,对空心菜幼苗根长的抑制作用更为明显。

(3) 多数空心菜品种在中低浓度复合污染条件下的交互作用类型表现为协同作用,而在高浓度复合污染条件下则主要表现为拮抗作用。

(4) 空心菜对  $\text{ClO}_4^-$  和 Pb 复合污染的耐性存在明显的品种差异,总的来看,香港纯白大叶空心菜对  $\text{ClO}_4^-$  和 Pb 的耐性最差,而泰国柳叶空心菜、港种青绿梗竹叶空心菜和金龙白骨柳叶空心菜的耐性较强。

## 参考文献:

- [1] Kunisue T, Fisher J W, Kannan K. Modulation of thyroid hormone concentrations in serum of rats coadministered with perchlorate and iodide-deficient diet[J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2011, 61(1): 151–158.
- [2] Bernhardt R R, Hippel F, O'Hara T M. Chronic perchlorate exposure causes morphological abnormalities in developing stickleback[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2011, 30(6): 1468–1478.
- [3] Lee J, Oh S, Oh J E. Monitoring of perchlorate in diverse foods and its estimated dietary exposure for Korea populations[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, 243(12): 52–58.
- [4] 方齐乐, 陈宝梁. 环境中高氯酸盐的自然来源、形成机制及其归趋行为[J]. *化学进展*, 2012, 24(10): 2040–2053.  
FANG Qi-le, CHEN Bao-liang. Natural, origins, formation, mechanism, and fate of environmental perchlorate[J]. *Progress in Chemistry*, 2012, 24(10): 2040–2053.
- [5] Lybrand R, Michalski G, Graham R, et al. The geochemical associations of nitrate and naturally formed perchlorate in the Mojave Desert, California, USA[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2013, 104(3): 136–147.
- [6] Shi Y, Zhang N, et al. Effect of fireworks display on perchlorate in air aerosols during the Spring Festival[J]. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(6): 1323–1327.
- [7] Gan Z, Sun H, Wang R, et al. Occurrence and exposure evaluation of perchlorate in outdoor dust and soil in mainland China[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 470–471(2): 99–106.
- [8] Kosaka K, Asami M, Matsuoka Y, et al. Occurrence of perchlorate in drinking water sources of metropolitan area in Japan[J]. *Water Research*, 2007, 41(15): 3474–3482.
- [9] Kannan K, Praamsma M L, Oldi J F, et al. Occurrence of perchlorate in drinking water, groundwater, surface water and human saliva from India [J]. *Chemosphere*, 2009, 76(1): 22–26.
- [10] Calderon R, Palma P, Parker D. Perchlorate levels in soil and waters from the Atacama Desert[J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2014, 66(2): 155–161.
- [11] Shi Y, Zhang P, Wang Y, et al. Perchlorate in sewage sludge, rice, bottled water and milk collected from different areas in China[J]. *Environment International*, 2007, 33(7): 955–962.
- [12] Sanchez C, Blount B, Valentin-Blasini L, et al. Perchlorate, thiocyanate, and nitrate in edible cole crops (*Brassica* sp.) produced in the lower Colorado River Region[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2007, 79(6): 655–659.
- [13] Zhang T, Wu Q, Sun H, et al. Perchlorate and iodide in whole blood samples from infants, children, and adults in Nanchang, China[J]. *Environmental Science and Technology*, 2010, 44(18): 6947–6953.
- [14] 陈桂葵, 骆世明, 贺鸿志, 等. 高氯酸盐胁迫对水稻生长发育和养分吸收的影响[J]. *生态学报*, 2014, 34(19): 5460–5469.  
CHEN Gui-kui, LUO Shi-ming, HE Hong-zhi, et al. Effect of perchlorate stress on the growth and development of rice and its nutrient uptake[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(19): 5460–5469.
- [15] 秦文淑, 邹晓锦, 仇荣亮, 等. 广州市蔬菜重金属污染现状及对人体健康风险分析[J]. *农业环境科学学报*, 2008, 27(4): 1638–1642.  
QIN Wen-shu, ZOU Xiao-jin, QIU Rong-liang, et al. Health risk of heavy metals to the general public in Guangzhou[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(4): 1638–1642.
- [16] 晁雷, 周启星. 铅与对二氯苯复合污染对小麦和大白菜种子发芽及幼苗期生长的毒性[J]. *生态学杂志*, 2006, 25(8): 944–949.  
CHAO Lei, ZHOU Qi-xing, et al. Joint toxicity of  $\text{Pb}^{2+}$  and PDB on seed germination and seedling growth of *Triticum aestivum* and *Brassica Pekinensis*[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(8): 944–949.
- [17] 徐芬芬, 袁盼, 邹阿凤, 等. 重金属铅胁迫对小白菜种子萌发的影响[J]. *湖南农业科学*, 2011, (9): 68–69, 74.  
XU Fen-fen, YUAN Pan, ZOU A-feng, et al. Influence of Pb stress on germination of Chinese cabbage[J]. *Journal of Hunan Agricultural Sciences*, 2011(9): 68–69, 74.
- [18] 单成海. 镉、铅胁迫对洋葱种子萌发的影响[J]. *江苏农业科学*, 2013, 41(4): 160–161.  
SHAN Cheng-hai. Influence of Pb and cadmium stress on germination of onion[J]. *Journal of Jiangsu Agricultural Sciences*, 2013, 41(4): 160–161.
- [19] 孙建伶, 罗立强. 土壤铅、镉单一和复合污染及与钙、锌交互作用对韭菜生长和铅镉积累特性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(6): 1100–1105.  
SUN Jian-ling, LUO Li-qiang. Influences of single and combined pollution of lead and cadmium and their interactions with calcium or zinc

- on growth and accumulation of lead and cadmium of leeks[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(6):1100-1105.
- [20] Chen H, Lai H, Wang S, et al. Effect of biosolids and Cd/Pb interaction on the growth and Cd accumulation of *Brassica rapa* grown in Cd-contaminated soils[J]. *Water Air and Soil Pollution*, 2010, 206(1-4):385-394.
- [21] Roivainen P, Makkonen S, Holopainen T, et al. Element interactions and soil properties affecting the soil-to-plant transfer of six elements relevant to radioactive waste in boreal forest[J]. *Radiation and Environmental Biophysics*, 2012, 51(1):1-10.
- [22] Zhou D M, Wang Y J, Cang L, et al. Advances in the research of combined pollution in soil and soil-plant systems[J]. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2004, 5(10):1-8
- [23] 夏红霞, 朱启红. Pb、Zn 及其交互作用对蜈蚣草抗氧化酶及叶绿素含量的影响[J]. *环境化学*, 2013, 31(6):959-963.
- XIA Hong-xia, ZHU Qi-hong. Effects of Pb, Zn and their interaction on antioxidant enzymes and the content of chlorophyll of *Pteris vittata* [J]. *Environmental Chemistry*, 2013, 31(6):959-963.
- [24] 杨杰峰, 陈桂葵, 黎华寿. 高氯酸盐与铬复合污染对水稻幼苗生长的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2010, 29(2):223-228.
- YANG Jie-feng, CHEN Gui-kui, LI Hua-shou. Effect of the combined pollution of perchlorate and hexavalent chromium on rice seedling growth[M]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(2):223-228.
- [25] Bliss C I. The toxicity of poisons applied jointly[J]. *Annals of Applied Biology*, 1939, 26(3):585-615.
- [26] Han R M, Lefevre I, Ruan C J, et al. NaCl differently interferes with Cd and Zn toxicities in the wetland halophyte species *Kosteletzkya virginica*(L.) Presl[J]. *Plant Growth Regulation*, 2012, 68(1):97-109.
- [27] Qiu R L, Thangavel P, Hu P J, et al. Interaction of cadmium and zinc on accumulation and sub-cellular distribution in leaves of hyperaccumulator *potentilla griffithii*[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 186(2-3):1425-1430.
- [28] 郭晓芳, 卫泽斌, 丘锦荣, 等. 玉米对重金属累积与转运的品种间差异[J]. *生态与农村环境学报*, 2010, 26(4):367-371.
- GUO Xiao-fang, WEI Ze-bin, QIU Jin-rong, et al. Differences between corn cultivars in accumulation and translation of heavy metal [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2010, 26(4):367-371.
- [29] 刘维涛, 周启星. 重金属污染预防品种的筛选与培育[J]. *生态环境学报*, 2010, 19(6):1452-1458.
- LIU Wei-tao, ZHOU Qi-xing. Selection and breeding of heavy metal pollution prevention varieties[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(6):1452-1458.
- [30] Grant A C, Clarke J A, Duguid S, et al. Selection and breeding of plant cultivars to minimize cadmium accumulation[J]. *Science of the Total Environment*, 2008, 390(2-3):301-310.
- [31] Seyfferth A L, Parker D R. Uptake and fate of perchlorate in higher plants[J]. *Advances in Agronomy*, 2008, 99:101-123.
- [32] Seyfferth A L, Parker D R. Effects of genotype and transpiration rate on the uptake and accumulation of perchlorate( $\text{ClO}_4^-$ ) in lettuce[J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, 41(9):3361-3367.
- [33] 邬飞波, 张国平. 植物螯合肽及其在重金属耐性中的作用[J]. *应用生态学报*, 2003, 14(4):632-636.
- WU Fei-bo, ZHANG Guo-ping. Phytochelatin and its function in heavy metal tolerance of higher plants[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(4):632-636.
- [34] Ali N A, Bermal M P, Ater M. Tolerance and bioaccumulation of copper in *Phragmites australis* and *Zeamays*[J]. *Plant and Soil*, 2002, 239(3):103-111.
- [35] 孙建云, 沈振国. 镉胁迫对不同甘蓝基因型光合特性和养分吸收的影响[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(11):2605-2610.
- SUN Jian-yun, SHEN Zhen-guo. Effects of Cd stress on photosynthetic characteristics and nutrient uptake of cabbages with different Cd-tolerance[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(11):2605-2610.
- [36] Seyfferth A L, Parker D R. Effects of common soil anions and pH on the uptake and accumulation of perchlorate in lettuce[J]. *Plant Soil*, 2008, 302(1-2):139-148.