

# 高氯酸盐与铬复合污染对水稻幼苗生长的影响

杨杰峰<sup>1,2,3</sup>, 陈桂葵<sup>1,2</sup>, 黎华寿<sup>1,2</sup>

(1. 华南农业大学农业部生态农业重点开放实验室, 广州 510642; 2. 广东省高等学校农业生态与农村环境重点实验室, 广州 510642; 3. 广东外语艺术职业学院, 广州 510640)

**摘要:**通过营养液沙培盆栽试验,研究了水稻幼苗的根长、株高和鲜重对高氯酸盐( $\text{ClO}_4^-$ )、六价铬( $\text{Cr}^{6+}$ )及其复合污染( $\text{ClO}_4^-+\text{Cr}^{6+}$ )胁迫的响应。结果表明,随着污染物处理浓度的提高, $\text{ClO}_4^-$ 、 $\text{Cr}^{6+}$ 和  $\text{ClO}_4^-+\text{Cr}^{6+}$ 对水稻幼苗主要生长指标根长、株高和鲜重的抑制作用越明显,呈现出明显的浓度-效应关系;在同一浓度下, $\text{ClO}_4^-$ 、 $\text{Cr}^{6+}$ 和  $\text{ClO}_4^-+\text{Cr}^{6+}$ 对水稻幼苗根长、株高和鲜重的抑制率呈明显的时间-效应关系,处理时间越长,抑制率越高;复合污染对水稻生长的抑制效应大于其中任一污染物在同浓度条件下的单一污染的影响,且随着浓度和时间的增加,抑制作用也越明显;复合污染对水稻幼苗生长的交互作用类型因处理时间和浓度组合的不同而更趋复杂。

**关键词:**高氯酸盐;铬;复合污染;水稻;交互作用

**中图分类号:**X503.231 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)02-0223-06

## Effect of the Combined Pollution of Perchlorate and Hexavalent Chromium on Rice Seedling Growth

YANG Jie-feng<sup>1,2,3</sup>, CHEN Gui-kui<sup>1,2</sup>, LI Hua-shou<sup>1,2</sup>

(1.Key Laboratory of Ecological Agriculture, Ministry of Agriculture of the People's Republic of China, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2.Key Laboratory of Agroecology and Rural Environment of Guangdong Regular Higher Education Institutions, Guangzhou 510642, China; 3.Guangdong Teachers College of Foreign Language and Arts, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** A pot experiment with sand cultivating was conducted to study the stress effects of different concentration levels of perchlorate( $\text{ClO}_4^-$ ) and hexavalent chromium( $\text{Cr}^{6+}$ ) as well as their combination( $\text{ClO}_4^-+\text{Cr}^{6+}$ ) upon rice seedling growth. Results showed that an increase in  $\text{ClO}_4^-$ ,  $\text{Cr}^{6+}$ , and  $\text{ClO}_4^-+\text{Cr}^{6+}$  concentrations inhibited the root length, plant height and fresh weight of rice seedling significantly which showed dose-effect relationship. At the same concentration level, the inhibitory rate of rice seedling growth such as root length, plant height and fresh weight increased gradually as exposure time were raised, which showed time-effect relationship. The inhibition of the  $\text{ClO}_4^-+\text{Cr}^{6+}$  combined treatment were higher than that of individual  $\text{ClO}_4^-$  or  $\text{Cr}^{6+}$  treatment. And as  $\text{ClO}_4^-+\text{Cr}^{6+}$  concentrations and exposure time were raised, the inhibitory rate increased obviously. The interactions between perchlorate and hexavalent chromium had complicated influences on its inhibitory rate of rice seedling growth under the condition of the binary mixture, which were dependent on their concentration combinations and exposure time.

**Keywords:** perchlorates; hexavalent chromium; combined pollution; rice; interaction

较低浓度的高氯酸盐可干扰甲状腺的正常功能,从而影响人体正常的新陈代谢,阻碍人体正常的生长和发育,其环境污染问题已引起了人们高度关注,在 *Nature* 和 *Science* 等权威刊物上都先后报道了高氯酸盐的毒害作用和环境污染问题<sup>[1-3]</sup>。高氯酸盐具有高溶解低吸附性,通过水源灌溉,生物累积等传递给人类,

现已发现在土壤、草料、植物、牛奶、食品和人的尿液中均有高氯酸盐存在<sup>[4-5]</sup>。中国的环境中也存在高氯酸盐的污染,在自来水厂、污水淤泥、水稻、瓶装饮用水和牛奶中均能检测出<sup>[6-8]</sup>。目前关于高氯酸盐毒理方面的研究主要是动物毒理<sup>[9]</sup>,而植物毒理方面的研究尚未见报道,对于一个完整的生态系统而言,植物是非常重要的部分,要全面了解高氯酸盐的生态毒理作用,有必要开展相关的研究<sup>[10]</sup>。

铬是农业土壤中最主要的重金属污染物之一,其来源广泛,包括大气降尘、畜禽粪便<sup>[11]</sup>、城市污泥<sup>[12]</sup>、污水灌溉<sup>[13-14]</sup>和化肥等途径。据调查,我国重金属污染的

收稿日期:2009-09-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 30700099,30870413)

作者简介:杨杰峰(1982—),男,湖北人,男,硕士,讲师。

E-mail:2001yjf@163.com

通讯作者:黎华寿 E-mail:lihuashou@scau.edu.cn

农田超过0.2 亿 hm<sup>2</sup>, 占我国耕地的 1/5, 其中铬的污染甚为严重<sup>[15]</sup>。我国部分污灌区土壤存在明显的铬累积趋势<sup>[16]</sup>, 稻田土壤中铬含量的升高最为明显<sup>[17]</sup>。

水稻是世界上最主要的粮食作物之一, 高水溶性、低吸附性和高流动扩散性的高氯酸盐可通过灌溉用水进入农田。国内(高)氯酸盐厂家的污水和废渣中主要污染物为高氯酸盐和铬, 工厂周边农田面临两者可能产生的复合污染, 如南方某氯酸盐厂家曾出现过稻田污染纠纷现象<sup>[18]</sup>。目前有关高氯酸盐与铬复合污染对水稻毒理效应的研究未见报道。本文通过研究高氯酸盐、铬及其复合污染对水稻根长、株高、鲜重的影响, 探讨水稻在外源复合污染胁迫下的响应及其交互作用, 从而为高氯酸盐和铬污染的防治以及水稻抗性育种提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试水稻材料为华南地区主要推广品种之一的桂农占(常规品种籼稻, 为广适性优质超级稻), 由广东省农科院提供。

选用饱满的水稻种子用 10% 的 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 消毒 10 min, 蒸馏水浸泡 48 h 后, 置于 30 ℃培养箱中催芽, 萌芽后均匀播在装有 350 g 河沙(过 2 mm 筛, 150 ℃下消毒 12 h)的塑料杯(直径 9 cm, 高 6 cm)中, 置于光照培养箱中培养(白天 14 h, 湿度 80%, 温度 28 ℃; 夜间 10 h, 湿度 75%, 温度 25 ℃), 以 Hoagland 营养液培养。

1.2 试验设计

本试验采用二因素 4 水平的完全组合试验方案设计, Cr<sup>6+</sup> 的浓度分别为 0、5、10、20 mg·L<sup>-1</sup> (分别用 Cr<sub>0</sub>、Cr<sub>5</sub>、Cr<sub>10</sub>、Cr<sub>20</sub> 表示), ClO<sub>4</sub><sup>-</sup> 的浓度分别为 0、10、20、40 mg·L<sup>-1</sup> (分别用 P<sub>0</sub>、P<sub>10</sub>、P<sub>20</sub>、P<sub>40</sub> 表示), 共 16 个处理(见表 1)。每个处理设 3 个重复, 对照组用不含 Cr<sup>6+</sup> 或 ClO<sub>4</sub><sup>-</sup> 的去离子水均匀加入。幼苗 1 叶龄时按表 1 中所

设浓度进行污染物处理, 污染物和营养液每 3 d 更换一次, 试验期间随时添加去离子水以补充因蒸发蒸腾而散失的水分。

1.3 主要药品和试剂

高氯酸钾(KClO<sub>4</sub>·H<sub>2</sub>O)(AR), 重铬酸钾(K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>)(AR), 其他试剂均为化学分析纯试剂。

1.4 生长指标的测定

将待测水稻幼苗小心拔出, 洗净, 直接用直尺测量其绝对根长和绝对株高; 然后吸干水分, 用千分之一天平(JA1003N)称水稻的鲜重。

1.5 统计分析

所有数据均采用 Microsoft Excel 和 SPSS14.0 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。

为了比较不同污染物处理水平对水稻各生长指标的影响, 按以下方法计算其抑制率(R<sub>i</sub>):

$$R_i = (1 - T/C) \times 100$$

式中 C 为对照值, T 为处理值。

当 R<sub>i</sub> ≥ 0 时, 表示处理组与对照组相比具有抑制作用;

当 R<sub>i</sub> < 0 时, 表示处理组与对照组相比具有促进作用。

1.6 复合污染交互作用类型的计算

复合污染物之间存在复杂的交互作用<sup>[19-20]</sup>。根据 Bliss<sup>[21]</sup>提出的污染物间的交互作用类型(相加、拮抗和协同作用), 本文把本研究中 ClO<sub>4</sub><sup>-</sup> 和 Cr<sup>6+</sup> 的交互作用的类型定义为:

(1) 相加作用: ClO<sub>4</sub><sup>-</sup> 和 Cr<sup>6+</sup> 单一处理之和 = ClO<sub>4</sub><sup>-</sup>、Cr<sup>6+</sup> 复合污染;

(2) 拮抗作用: ClO<sub>4</sub><sup>-</sup> 和 Cr<sup>6+</sup> 单一处理之和 > ClO<sub>4</sub><sup>-</sup>、Cr<sup>6+</sup> 复合污染;

(3) 协同作用: ClO<sub>4</sub><sup>-</sup> 和 Cr<sup>6+</sup> 单一处理之和 < ClO<sub>4</sub><sup>-</sup>、Cr<sup>6+</sup> 复合污染。

2 结果与分析

2.1 复合污染对水稻幼苗根长的影响

不同浓度的 ClO<sub>4</sub><sup>-</sup>、Cr<sup>6+</sup> 和 ClO<sub>4</sub><sup>-</sup>+Cr<sup>6+</sup> 处理、不同时间后, 水稻幼苗根长见表 2, 不同浓度污染物处理对水稻幼苗根长的抑制率见表 2 中括号内数据。随着处理浓度的提高, ClO<sub>4</sub><sup>-</sup>、Cr<sup>6+</sup> 和 ClO<sub>4</sub><sup>-</sup>+Cr<sup>6+</sup> 对水稻幼苗根长的抑制作用更为明显, 呈现出明显的浓度-效应关系(P<0.05)。在同一浓度下, ClO<sub>4</sub><sup>-</sup>、Cr<sup>6+</sup> 和 ClO<sub>4</sub><sup>-</sup>+Cr<sup>6+</sup> 对水稻幼苗根长的抑制率呈明显的时间-效应关系, 处理

表 1 ClO<sub>4</sub><sup>-</sup>、Cr<sup>6+</sup>处理水稻幼苗的试验设计方案  
Table 1 Experimental design of perchlorate and hexavalent chromium for rice cultivation

| Cr <sup>6+</sup> /mg·L <sup>-1</sup> | ClO <sub>4</sub> <sup>-</sup> /mg·L <sup>-1</sup> |                                   |                                   |                                   |
|--------------------------------------|---------------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
|                                      | 0                                                 | P <sub>10</sub>                   | P <sub>20</sub>                   | P <sub>40</sub>                   |
| Cr <sub>0</sub>                      | Cr <sub>0</sub>                                   | P <sub>10</sub>                   | P <sub>20</sub>                   | P <sub>40</sub>                   |
| Cr <sub>5</sub>                      | Cr <sub>5</sub>                                   | Cr <sub>5</sub> +P <sub>10</sub>  | Cr <sub>5</sub> +P <sub>20</sub>  | Cr <sub>5</sub> +P <sub>40</sub>  |
| Cr <sub>10</sub>                     | Cr <sub>10</sub>                                  | Cr <sub>10</sub> +P <sub>10</sub> | Cr <sub>10</sub> +P <sub>20</sub> | Cr <sub>10</sub> +P <sub>40</sub> |
| Cr <sub>20</sub>                     | Cr <sub>20</sub>                                  | Cr <sub>20</sub> +P <sub>10</sub> | Cr <sub>20</sub> +P <sub>20</sub> | Cr <sub>20</sub> +P <sub>40</sub> |

时间越长,抑制率越高( $P<0.05$ )。

表 2 中数据表明各浓度的高氯酸盐单一处理在第 9 d 之前对水稻幼苗根长都没有显著影响,到第 12 d 时浓度为  $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的高氯酸盐处理对水稻幼苗根长没有显著影响,而浓度为 20 和  $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的高氯酸盐对水稻幼苗根长有显著抑制作用,到第 15 d 时 3 种浓度处理对水稻幼苗根长都有显著的抑制作用。

在第 9 d 之前,低浓度的铬( $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )单一处理后水稻幼苗根长与对照之间没有显著性差异,第 12 和 15 d 时差异性显著,而当铬浓度高于  $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时,从第 3 d 开始就对根长具有明显的抑制作用。

不同浓度的  $\text{ClO}_4^-$  与  $\text{Cr}^{6+}$  复合处理对水稻幼苗根长有显著的抑制作用,而且其抑制效应大于其中任一污染物在同浓度条件下的单一污染影响,随着浓度和天数的增加,抑制作用也越明显,高浓度的( $\text{ClO}_4^-$  浓度为  $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{Cr}^{6+}$  浓度为  $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 复合污染对根长的抑制率在第 15 d 时高达 46.4%。

## 2.2 复合污染对水稻幼苗株高的影响

不同处理不同时间的水稻幼苗株高及其抑制率见表 3。总的来看, $\text{ClO}_4^-$ 、 $\text{Cr}^{6+}$  和  $\text{ClO}_4^- + \text{Cr}^{6+}$  对水稻幼苗株高的抑制作用也呈现出明显的浓度-效应关系和时间-效应关系。

本试验结果表明,高氯酸盐单一处理在第 3 d 时各浓度处理对株高都表现为促进作用,但与对照比无

显著差异。第 6 和 9 d 时高浓度( $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )处理组对株高有显著抑制作用,其他两组与对照组相比无显著差异。第 12 d 时中、高浓度(20 和  $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )处理对水稻株高有显著的抑制作用。到第 15 d 时 3 种浓度处理组的株高都显著小于对照组。

低浓度( $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )的铬单一处理在第 9 d 前与对照组无显著差异,从第 12 d 开始有显著抑制水稻株高生长的作用。中、高浓度(10 和  $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )铬处理对水稻株高在前 3 d 无显著影响,从第 6 d 开始表现为显著的抑制效应。

低浓度的  $\text{ClO}_4^-$  与  $\text{Cr}^{6+}$  复合处理在第 9 d 前与对照无显著差异,从第 12 d 开始有显著抑制水稻株高生长的作用。其他浓度复合处理组从第 3 d 开始就有显著抑制作用,其抑制效应大于其中任一污染物在同浓度条件下的单一污染影响,且随着浓度和时间的增加,抑制作用也越明显。

## 2.3 复合污染对水稻幼苗鲜重的影响

不同处理不同时间的水稻幼苗鲜重及其抑制率见表 4。结果表明, $\text{ClO}_4^-$ 、 $\text{Cr}^{6+}$  和  $\text{ClO}_4^- + \text{Cr}^{6+}$  对水稻幼苗鲜重的抑制作用同样呈现出明显的浓度-效应关系和时间-效应关系。

低浓度的高氯酸盐单一处理对水稻幼苗鲜重在前 12 d 都无明显影响,在第 15 d 时表现为显著的抑制作用。中、高浓度(20 和  $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )的高氯酸盐处理

表 2 不同浓度  $\text{ClO}_4^-$ 、 $\text{Cr}^{6+}$  和  $\text{ClO}_4^- + \text{Cr}^{6+}$  对水稻幼苗根长的影响(cm)

Table 2 Effect of concentrations of perchlorate, hexavalent chromium and their combination on root length of rice seedling(cm)

| 处理 Treatment                      |                                   | 时间 Time/d          |                   |                    |                    |                    |
|-----------------------------------|-----------------------------------|--------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
|                                   |                                   | 3                  | 6                 | 9                  | 12                 | 15                 |
| 0                                 |                                   | 5.13±0.19bc        | 5.57±0.24ab       | 5.97±0.29ab        | 6.50±0.12a         | 8.27±0.29a         |
| $\text{ClO}_4^-$                  | P <sub>10</sub>                   | 5.57±0.23ab(-8.6)  | 5.70±0.29a(-2.3)  | 6.13±0.19a(-2.7)   | 6.57±0.19ab(-1.1)  | 6.87±0.27b(16.9)   |
|                                   | P <sub>20</sub>                   | 5.67±0.09a(-10.5)  | 5.77±0.23a(-3.6)  | 5.80±0.12ab(2.8)   | 5.90±0.21bc(9.2)   | 6.47±0.29bc(21.8)  |
|                                   | P <sub>40</sub>                   | 5.67±0.12a(-10.5)  | 5.73±0.12a(-2.9)  | 5.50±0.35abc(7.9)  | 5.70±0.12c(12.3)   | 5.97±0.32cd(27.8)  |
| $\text{Cr}^{6+}$                  | Cr <sub>5</sub>                   | 4.63±0.22cde(9.7)  | 5.40±0.32ab(3.1)  | 5.50±0.23abc(7.9)  | 5.67±0.19c(12.8)   | 5.80±0.27de(29.9)  |
|                                   | Cr <sub>10</sub>                  | 3.87±0.09fgh(24.6) | 4.30±0.06cd(22.8) | 4.47±0.27def(25.1) | 4.73±0.09gf(27.2)  | 4.97±0.09fg(39.9)  |
|                                   | Cr <sub>20</sub>                  | 3.53±0.03h(31.2)   | 4.33±0.18cd(22.3) | 4.50±0.12def(24.6) | 4.60±0.10fgh(29.2) | 4.87±0.09fg(41.1)  |
| $\text{ClO}_4^- + \text{Cr}^{6+}$ | P <sub>10</sub> +Cr <sub>5</sub>  | 4.87±0.09cd(5.1)   | 4.93±0.07bc(11.5) | 5.07±0.20cd(15.1)  | 4.97±0.10ef(23.5)  | 5.17±0.09ef(37.5)  |
|                                   | P <sub>10</sub> +Cr <sub>10</sub> | 4.13±0.15fg(19.5)  | 4.30±0.21cd(22.8) | 4.47±0.09def(25.1) | 4.80±0.15efg(26.2) | 4.97±0.03fg(39.9)  |
|                                   | P <sub>10</sub> +Cr <sub>20</sub> | 4.07±0.12fg(20.7)  | 4.33±0.20cd(22.3) | 4.37±0.27ef(26.8)  | 4.43±0.12ghi(31.8) | 4.43±0.09g(46.4)   |
|                                   | P <sub>20</sub> +Cr <sub>5</sub>  | 4.37±0.26ef(14.8)  | 4.33±0.34cd(22.3) | 4.83±0.23cde(19.1) | 5.17±0.19de(20.5)  | 5.40±0.27def(34.7) |
|                                   | P <sub>20</sub> +Cr <sub>10</sub> | 4.00±0.06fgh(22.0) | 4.13±0.19d(25.9)  | 4.30±0.20ef(28.0)  | 4.67±0.09fgh(28.2) | 4.83±0.18fg(41.6)  |
|                                   | P <sub>20</sub> +Cr <sub>20</sub> | 3.90±0.21fgh(24.0) | 3.73±0.15d(33)    | 3.90±0.10f(34.7)   | 4.10±0.10i(36.9)   | 4.43±0.34g(46.4)   |
|                                   | P <sub>40</sub> +Cr <sub>5</sub>  | 4.20±0.0efg(18.1)  | 4.40±0.21cd(21.0) | 5.30±0.22bc(11.2)  | 5.53±0.45cd(14.9)  | 5.43±0.20def(34.3) |
|                                   | P <sub>40</sub> +Cr <sub>10</sub> | 4.00±0.15fgh(22.0) | 4.27±0.15cd(23.3) | 4.23±0.12ef(29.1)  | 4.73±0.45fde(27.2) | 5.00±0.15fg(39.5)  |
|                                   | P <sub>40</sub> +Cr <sub>20</sub> | 3.70±0.11gh(27.9)  | 3.90±0.21d(30.3)  | 4.33±0.09ef(27.5)  | 4.30±0.658hi(33.8) | 4.43±0.12g(46.4)   |

注:表中数据为平均值±标准误( $n=3$ ),同一列中不同小写字母表示差异显著(Duncan 检验法, $P=0.05$ ),括号内数据为抑制率(%).下同。

表 3 不同浓度  $\text{ClO}_4^-$ 、 $\text{Cr}^{6+}$  和  $\text{ClO}_4^- + \text{Cr}^{6+}$  对水稻幼苗株高的影响 (cm)

Table 3 Effect of concentrations of perchlorate, hexavalent chromium and their combination on plant height of rice seedling (cm)

| 处理 Treatment                      |                                  | 时间 Time/d            |                     |                       |                      |                     |
|-----------------------------------|----------------------------------|----------------------|---------------------|-----------------------|----------------------|---------------------|
|                                   |                                  | 3                    | 6                   | 9                     | 12                   | 15                  |
| 0                                 |                                  | 13.17±0.38abcd       | 17.87±0.40ab        | 22.47±0.95a           | 23.87±0.72a          | 27.53±0.78a         |
| $\text{ClO}_4^-$                  | $\text{P}_{10}$                  | 14.30±0.49a(-8.6)    | 17.40±0.49ab(2.6)   | 22.17±1.6a(1.3)       | 22.57±0.42ab(5.4)    | 23.43±0.71bc(14.9)  |
|                                   | $\text{P}_{20}$                  | 13.57±0.17abc(-3.0)  | 16.80±0.63abc(6.0)  | 19.17±0.58abc(14.7)   | 21.20±0.59bcd(11.2)  | 23.50±1.25bc(14.6)  |
|                                   | $\text{P}_{40}$                  | 13.70±0.42ab(-4.0)   | 16.00±0.27cd(10.5)  | 18.07±0.68bc(19.6)    | 20.63±0.73bcde(13.6) | 21.23±0.81cd(22.9)  |
| $\text{Cr}^{6+}$                  | $\text{Cr}_5$                    | 13.20±0.46abcd(-0.2) | 18.07±0.17a(-1.1)   | 19.17±0.88abc(14.7)   | 21.30±0.52bc(10.8)   | 24.63±1.14b(10.5)   |
|                                   | $\text{Cr}_{10}$                 | 12.43±0.52bcdef(5.6) | 15.17±0.35def(15.1) | 17.23±1.34bcde(23.3)  | 20.33±0.82cde(14.8)  | 20.43±1.25cde(25.8) |
|                                   | $\text{Cr}_{20}$                 | 12.40±0.25cdef(5.8)  | 12.60±0.44h(29.5)   | 13.87±1.14efg(38.3)   | 14.57±0.44h(39.0)    | 15.53±0.20f(43.6)   |
| $\text{ClO}_4^- + \text{Cr}^{6+}$ | $\text{P}_{10} + \text{Cr}_5$    | 13.17 ±0.48abcd(0.0) | 16.60±0.15bc(7.1)   | 19.77±0.61ab(12.0)    | 21.47±0.38bc(10.1)   | 22.37±0.87bcd(18.7) |
|                                   | $\text{P}_{10} + \text{Cr}_{10}$ | 12.60±0.99bcde(4.3)  | 15.00±0.66def(16.1) | 16.40±0.35bcdef(27.0) | 19.30±0.67def(19.1)  | 20.20±0.67de(26.6)  |
|                                   | $\text{P}_{10} + \text{Cr}_{20}$ | 12.20±0.36defg(7.4)  | 14.40±0.63efg(19.4) | 15.83±0.61cdefg(29.6) | 17.87±1.20fg(25.1)   | 18.40±1.30ef(33.2)  |
|                                   | $\text{P}_{20} + \text{Cr}_5$    | 12.63±0.39efgh(4.1)  | 15.70±0.49cde(12.1) | 17.53±0.99bcd(22.0)   | 19.10±0.35efg(20.0)  | 21.40±0.32bcd(22.3) |
|                                   | $\text{P}_{20} + \text{Cr}_{10}$ | 11.37±0.15efgh(13.7) | 14.23±0.50fg(20.4)  | 14.30±1.99defg(36.4)  | 18.93±0.29efg(20.7)  | 19.43±0.97de(29.4)  |
|                                   | $\text{P}_{20} + \text{Cr}_{20}$ | 11.20±0.36fgh(15.0)  | 13.53±0.49gh(24.3)  | 14.30±0.90defg(36.4)  | 17.30±0.78g(27.5)    | 20.10±0.83de(27.0)  |
|                                   | $\text{P}_{40} + \text{Cr}_5$    | 11.00±0.46fg(16.5)   | 15.67±0.24cde(12.3) | 17.87±0.97bc(20.5)    | 19.67±0.56cdef(17.6) | 20.00±1.56bcd(27.4) |
|                                   | $\text{P}_{40} + \text{Cr}_{10}$ | 11.03±0.41fg(16.2)   | 14.33±1.5efg(19.8)  | 15.93±0.55cdefg(29.1) | 17.70±0.20fg(25.8)   | 19.30±0.99de(29.9)  |
|                                   | $\text{P}_{40} + \text{Cr}_{20}$ | 10.50±0.06f(20.3)    | 12.87±0.65h(28.0)   | 13.23±1.33fg(41.1)    | 15.00±0.40h(37.2)    | 15.73±0.79f(42.9)   |

表 4 不同浓度  $\text{ClO}_4^-$ 、 $\text{Cr}^{6+}$  和  $\text{ClO}_4^- + \text{Cr}^{6+}$  对水稻幼苗鲜重的影响 ( $\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$ )Table 4 Effect of concentrations of perchlorate, hexavalent chromium and their combination on plant fresh weight of rice seedling ( $\text{g} \cdot \text{plant}^{-1}$ )

| 处理 Treatment                      |                                  | 时间 Time/d            |                        |                      |                        |                      |
|-----------------------------------|----------------------------------|----------------------|------------------------|----------------------|------------------------|----------------------|
|                                   |                                  | 3                    | 6                      | 9                    | 12                     | 15                   |
| 0                                 |                                  | 0.117±0.006ab        | 0.158±0.010abcd        | 0.240±0.008a         | 0.285±0.008a           | 0.325±0.008a         |
| $\text{ClO}_4^-$                  | $\text{P}_{10}$                  | 0.120±0.006a(-2.6)   | 0.169±0.011abc(-7.0)   | 0.233±0.009ab(2.9)   | 0.273±0.008ab(4.2)     | 0.287±0.005b(11.7)   |
|                                   | $\text{P}_{20}$                  | 0.120±0.011a(-2.6)   | 0.164±0.0010abcd(-3.8) | 0.190±0.017cd(20.8)  | 0.248±0.011abcd(13.0)  | 0.266±0.006bc(18.2)  |
|                                   | $\text{P}_{40}$                  | 0.120±0.007a(-2.6)   | 0.152±0.005abcde(3.8)  | 0.183±0.008cde(23.8) | 0.231±0.026bcdef(18.9) | 0.246±0.008cde(24.3) |
| $\text{Cr}^{6+}$                  | $\text{Cr}_5$                    | 0.107±0.011ab(8.5)   | 0.180±0.019a(-13.9)    | 0.182±0.013cde(24.2) | 0.241±0.015bcde(15.4)  | 0.273±0.012bc(16.0)  |
|                                   | $\text{Cr}_{10}$                 | 0.101±0.143ab(13.7)  | 0.140±0.006bcde(11.4)  | 0.183±0.006cde(23.8) | 0.204±0.016cdef(28.4)  | 0.221±0.006def(32.0) |
|                                   | $\text{Cr}_{20}$                 | 0.104±0.006ab(11.1)  | 0.117±0.007e(25.9)     | 0.128±0.007g(46.7)   | 0.133±0.012g(53.3)     | 0.155±0.013Ag(52.3)  |
| $\text{ClO}_4^- + \text{Cr}^{6+}$ | $\text{P}_{10} + \text{Cr}_5$    | 0.124 ±0.011a(-6.0)  | 0.176±0.016ab(-11.4)   | 0.205±0.006bc(14.6)  | 0.250±0.015abc(12.3)   | 0.263±0.006bc(19.1)  |
|                                   | $\text{P}_{10} + \text{Cr}_{10}$ | 0.111±0.006ab(5.1)   | 0.169±0.012abc(-7.0)   | 0.206±0.010bc(14.2)  | 0.235±0.008bcdef(17.5) | 0.250±0.010cd(23.1)  |
|                                   | $\text{P}_{10} + \text{Cr}_{20}$ | 0.097±0.006ab(17.1)  | 0.153±0.006abcde(3.2)  | 0.182±0.006cde(24.2) | 0.205±0.020cdef(28.1)  | 0.204±0.011f(37.2)   |
|                                   | $\text{P}_{20} + \text{Cr}_5$    | 0.093±0.007Dab(20.5) | 0.147±0.009abcde(7.0)  | 0.178±0.008cde(25.8) | 0.225±0.013cdef(21.1)  | 0.229±0.012def(29.5) |
|                                   | $\text{P}_{20} + \text{Cr}_{10}$ | 0.098±0.018ab(16.2)  | 0.130±0.015cde(17.7)   | 0.166±0.010def(30.8) | 0.211±0.014cdef(26.0)  | 0.215±0.013ef(33.8)  |
|                                   | $\text{P}_{20} + \text{Cr}_{20}$ | 0.093±0.010ab(20.5)  | 0.139±0.010bcde(12.0)  | 0.153±0.006efg(36.3) | 0.193±0.014f(32.3)     | 0.211±0.013f(35.1)   |
|                                   | $\text{P}_{40} + \text{Cr}_5$    | 0.082±0.004b(29.9)   | 0.148±0.101abcde(6.3)  | 0.177±0.011cde(26.3) | 0.218±0.011cdef(23.5)  | 0.217±0.014ef(33.2)  |
|                                   | $\text{P}_{40} + \text{Cr}_{10}$ | 0.098±0.004ab(16.2)  | 0.134±0.017cde(15.2)   | 0.154±0.009efg(35.8) | 0.203±0.009def(28.8)   | 0.196±0.013f(39.7)   |
|                                   | $\text{P}_{40} + \text{Cr}_{20}$ | 0.087±0.006b(25.6)   | 0.131±0.013cde(17.1)   | 0.145±0.013fg(39.6)  | 0.199±0.004ef(30.2)    | 0.198±0.007f(39.1)   |

在第 9 d 后表现为显著的抑制作用。

低浓度 ( $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 的铬单一处理后, 水稻幼苗鲜重在前 6 d 与对照组无显著性差异, 从第 9 d 开始有显著性差异。中浓度 ( $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 的铬处理对水稻幼苗鲜重在前 6 d 无显著影响, 从第 9 d 开始表现为显著的抑制效应, 高浓度 ( $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 则从第 6 d 开始表现

为显著的抑制效应。

各浓度的  $\text{ClO}_4^-$  与  $\text{Cr}^{6+}$  复合处理对水稻幼苗鲜重在前 6 d 无显著影响, 从第 9 d 开始有显著抑制效应。从同一浓度处理的不同天数之间的动态观察发现, 到后期时, 部分处理幼苗鲜重出现增长较慢甚至减小的情况, 这是因为高浓度处理的幼苗已经出现萎蔫。

## 2.4 复合污染对水稻生长的交互作用

通过计算不同浓度的污染物处理对水稻幼苗生长抑制作用的强度(以抑制率表示),可以得出  $\text{ClO}_4^-$  和  $\text{Cr}^{6+}$  复合处理之间的交互作用结果(按抑制率计算)见表 5。结果表明  $\text{ClO}_4^-$  和  $\text{Cr}^{6+}$  复合处理时对水稻根长、株高、鲜重的影响具有交互效应,交互作用类型随时间和浓度组合的变化而不同,在高浓度组合以及在低浓度组合长时间暴露条件下趋向于拮抗作用,而在低浓度组合及高浓度组合短时间暴露条件下趋于表现为协同作用。

### 3 讨论

单因子污染胁迫下, 污染物对生物的毒性效应, 主要取决于污染物本身的理化性质和浓度<sup>[22-23]</sup>。而复合污染胁迫下, 除了污染物的理化性质和浓度外, 更重要的是污染物之间的交互作用。研究表明, 污染物本身的化学性质对复合污染生态效应所起的作用, 要比其浓度组合关系的影响小得多, 污染物暴露的浓度组合关系更为直接, 在一定条件下甚至起决定作用<sup>[24-25]</sup>。本研究结果表明,  $\text{ClO}_4^-$ 、 $\text{Cr}^{6+}$ 和  $\text{ClO}_4^- + \text{Cr}^{6+}$ 对水稻幼苗根长、株高和鲜重的抑制作用呈现出明显的浓度-效应关系和时间-效应关系, 两者复合时的交互作用因处理时间和浓度组合关系的变化而不同, 在高浓度组合以及在低浓度组合长时间暴露条件下趋向于拮抗作用, 而在低浓度组合及高浓度组合短时间暴露条件下趋于表现为协同作用。

复合污染生态效应还与生物种类,特别是生态系统类型有关,也与这些污染物作用的生物部位有关。周启星等的研究表明,重金属等污染物在生物体不同的组织部位,由于污染物与污染物之间、污染物与生

物体内部各种组分之间都有可能发生不同的交互作用,导致不同的生态毒理效应,包括导致生物体不同组织、部位对重金属有不同的积累能力<sup>[24]</sup>。目前关于复合污染的作用机理主要有竞争结合位点、影响生物酶的活性、干扰生物正常的生理过程、改变生物细胞结构和功能、螯合(或络合)和沉淀作用以及干扰生物大分子的结构和功能等几种学说<sup>[19,26-27]</sup>。本研究结果也表明, $\text{ClO}_2^-$ 和  $\text{Cr}^{6+}$ 复合污染对水稻幼苗根长的抑制作用比其他部位更明显,试验中两种污染物都属于强氧化性质,当它们以不同浓度配比时,是否会加快或减弱其中一种的还原过程?有关其交互作用机理还有待更深入的研究。

## 4 结论

(1) 随着污染物处理浓度的提高,  $\text{ClO}_4^-$ 、 $\text{Cr}^{6+}$ 和  $\text{ClO}_4^- + \text{Cr}^{6+}$ 对水稻幼苗生长的抑制作用越明显, 高浓度的( $\text{ClO}_4^-$ 浓度为  $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{Cr}^{6+}$ 浓度为  $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )复合污染对根长的抑制率在第 15 d 时高达 46.4%。

(2) 在同一浓度下,  $\text{ClO}_4^-$ 、 $\text{Cr}^{6+}$ 和  $\text{ClO}_4^- + \text{Cr}^{6+}$ 对水稻幼苗生长的抑制率呈明显的时间-效应关系, 处理时间越长, 其抑制率越高。

(3) 复合污染  $\text{ClO}_4^- + \text{Cr}^{6+}$  对水稻幼苗生长的抑制作用大于  $\text{ClO}_4^-$  或  $\text{Cr}^{6+}$  在同浓度条件下单一污染时对水稻的影响。

(4)  $\text{ClO}_4^- + \text{Cr}^{6+}$ 两者复合时在高浓度组合以及在低浓度组合长时间暴露条件下趋向于拮抗作用,而在低浓度组合及高浓度组合短时间暴露条件下趋向于协同作用。

(5)  $\text{ClO}_4^-$  和  $\text{Cr}^{6+}$  复合污染对水稻幼苗地下部(根长)的抑制作用比地上部(株高)的抑制作用更明显。

表 5  $\text{ClO}_4^-$  和  $\text{Cr}^{6+}$  复合污染对水稻幼苗生长的交互作用类型

Table 5 Types of interaction of the combined pollution of perchlorate and hexavalent chromium on rice seedling growth

[illegible]

## 参考文献:

- [1] Coates J D, Achenbach L A. Microbial perchlorate Reduction: rocket-fuelled metabolism[J]. *Nature*, 2004(2): 569-580.
- [2] Stokstad E. Perchlorate study suggests lower risk[J]. *Science*, 2005, 307(5707): 191.
- [3] Stokstad E. Debate continues over safety of water spiked with rocket fuel [J]. *Science*, 2005, 307(5709): 507.
- [4] Kirk A B. Environmental perchlorate: Why it matters[J]. *Anal Chim Acta*, 2006, 567: 4-12.
- [5] Stetson S J, Wanty R B, Helsel D R, et al. Stability of low levels of perchlorate in drinking water and natural water samples[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2006, 567(1): 108-113.
- [6] Liu Y J, Mou S F. Determination of trace level haloacetic acids and perchlorate in drinking water by ion chromatography with direct injection[J]. *Journal of Chromatography A*, 2003, 997(1-2): 225-235.
- [7] 刘勇建, 牟世芬, 林爱武, 等. 北京市饮用水中溴酸盐、卤代乙酸及高氯酸盐研究[J]. *环境科学*, 2004, 25(2): 51-55.  
LIU Yong-jian, MOU Shi-fen, LIN Ai-wu, et al. Investigation of bromate, haloacetic acids and perchlorate in Beijing's drinking water[J]. *Environmental Science*, 2004, 25(2): 51-55.
- [8] Shi Y L, Zhang P, Wang Y W, 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.
- [9] 蔡贤雷, 谢寅峰, 刘伟龙, 等. 高氯酸盐污染及修复的研究进展[J]. *生态学报*, 2008, 28(11): 5592-5600.  
CAI X L, XIE Y F, LIU W L, et al. An overview of researches on environmental contamination by perchlorate and its remediation [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(11): 5592-5600.
- [10] 陈桂葵, 孟凡静, 骆世明, 等. 高氯酸盐环境行为与生态毒理研究进展[J]. *生态环境*, 2008, 17(6): 2503-2510.  
CHEN Gui-kui, MENG Fan-jing, LUO Shi-Ming, et al. Research advance in environmental behavior and ecotoxicological effects of perchlorate[J]. *Ecology and Environment*, 2008, 17(6): 2503-2510.
- [11] Nicholson F A, Smith S R, Alloway B J, et al. An inventory of heavy metals inputs to agricultural soils in England and Wales[J]. *The Science of the Total Environment*, 2003, 311(1-3): 205-219.
- [12] 陈同斌, 黄启飞, 高定, 等. 中国城市污泥的重金属含量及其变化趋势[J]. *环境科学学报*, 2003, 23(5): 561-569.  
CHEN Tong-bin, HUANG Qi-fei, GAO Ding, et al. Heavy metal concentrations and their decreasing trends in sewage sludges of China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2003, 23(5): 561-569.
- [13] Mapanda F, Mangwayana E N, Nyamangara J, et al. The effect of long-term irrigation using wastewater on heavy metal contents of soils under vegetables in Harare, Zimbabwe[J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2005, 107(2-3): 151-165.
- [14] Muchuweti M, Birkett J W, Chinyanga E, et al. Heavy metal content of vegetables irrigated with mixtures of wastewater and sewage sludge in Zimbabwe: Implications for human health[J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2006, 112(1): 41-48.
- [15] 宋波, 高定, 陈同斌, 等. 北京市菜地土壤和蔬菜铬含量及其健康风险评估[J]. *环境科学学报*, 2006, 26(10): 1707-1715.  
SONG Bo, GAO Ding, CHEN Tong-bin, et al. survey of chromium concentrations in vegetables and soils in Beijing and the potential risks to human health[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 26(10): 1707-1715.
- [16] 陈怀满, 陈英旭, 朱月珍. 土壤-植物系统中的重金属污染[M]. 北京: 科学出版社, 1996: 71-81.  
CHEN Hai-man, CHEN Ying-xu, ZHU Yue-zhen. Heavy metal pollution in the soil-plant system[M]. Beijing: Science Press, 1996: 71-81.
- [17] 郑袁明, 陈同斌, 郑国砥, 等. 北京市不同土地利用方式下土壤铬和镍的积累[J]. *资源科学*, 2005, 27(6): 162-166.  
ZENG Y M, CHEN T B, ZHENG G D, et al. Chromium and nickel accumulations in soils under different land uses in Beijing municipality [J]. *Resources Science*, 2005, 27(6): 162-166.
- [18] 黎华寿. 氯酸盐的农业生态污染效应及其调控措施研究[D]. 广州: 华南农业大学博士学位论文, 2008: 78.  
LI Hua-shou. The etoxic effects of chlorates in agroecosystem and its controls[D]. Guangzhou: Doctoral dissertation of South China Agricultural University, 2008: 78.
- [19] 何勇田, 熊先哲. 复合污染研究进展[J]. *环境科学*, 1994, 15(6): 79-83.  
HE Yong-tian, XIONG Xian-zhe. Advance in the study on compound-ed pollutions[J]. *Environmental Science*, 1994, 15(6): 79-83.
- [20] 周东美, 王玉军, 仓龙, 等. 土壤及土壤-植物系统中复合污染的研究进展[J]. *环境污染治理技术与设备*, 2004, 5(10): 1-8.  
ZHOU Dong-mei, WANG Yu-jun, CANG Long, 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.
- [21] Bliss C I. The toxicity of poisons applied jointly[J]. *Annals of Applied Biology*, 1939, 26(3): 585-615.
- [22] Prakash J, Nirmalakhandan N, Sun B, et al. Toxicity of binary mixtures of organic chemicals to microorganisms[J]. *Water Research*, 1994, 30: 1459-1463.
- [23] Zhou Q, Sun T. Effects of chromium(VI) on extractability and plant uptake of fluorine in agricultural soils of Zhejiang Province, China[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2002, 133: 145-160.
- [24] 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.
- [25] CHAO Lei, ZHOU Qi-xing, CHEN Su, et al. Single and joint stress of acetochlor and Pb on three agricultural crops in northeast China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2007, 19: 719-724.
- [26] Sharma S S, Schat H. Vooijs R, et al. Combination toxicology of copper, zinc, and cadmium in binary mixtures: concentration dependent antagonistic, nonadditive, and synergistic effects on root growth in *Silene vulgaris*[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1999, 18(2): 348-355.
- [27] Flora S J S, Bhadauria S, Kannan G M, et al. Arsenic induced oxidative stress and the role of antioxidant supplementation during chelation: A review[J]. *Journal of Environmental Biology*, 2007, 28(2): 333-347.