

DOI: 10.5846/stxb201311252808

王潇, 谢丽坤, 武慧斌. 铜镉污染土壤上 CO<sub>2</sub> 浓度升高对籼稻稻米品质的影响. 生态学报, 2015, 35(17): - .

Wang X, Xie L K, Wu H B. Effects of elevated CO<sub>2</sub> on indica rice quality in soils combined with Cu and Cd heavy metal. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(17): - .

## 铜镉污染土壤上 CO<sub>2</sub> 浓度升高对籼稻稻米品质的影响

王 潇<sup>1</sup>, 谢丽坤<sup>1,2</sup>, 武慧斌<sup>1</sup>, 邹洪涛<sup>3</sup>, 宋正国<sup>1,\*</sup>

1 农业部环境保护科研监测所生态毒理与环境修复研究中心, 天津 300191

2 天津师范大学, 天津 300387

3 沈阳农业大学, 沈阳 110866

**摘要:** 采用盆栽试验, 利用开顶式气室 (Open Top Chamber, OTC) 研究了 5 个籼稻品种在高、低铜镉复合污染土壤上, CO<sub>2</sub> 浓度升高对水稻生长及吸收 Cu、Cd 和矿质元素 Fe、Zn、Ca、Mn 的影响, 并对稻米中 Cd 的安全性进行了评价, 了解 Cd 污染对人类健康的潜在风险。结果表明: CO<sub>2</sub> 浓度升高, 显著降低了低复合污染土壤上稻米的生物量, 而显著增加了高复合污染土壤上的稻米生物量。CO<sub>2</sub> 浓度升高降低了低污染土壤上稻米 Cu 含量, 降低幅度为 4.75%—24.49%, 增加了高污染土壤上稻米 Cu 含量, 增加幅度为 6.60%—40.37%; 而稻米 Cu 的总吸收量在低、高复合污染土壤上均是降低的。低、高复合污染土壤上, CO<sub>2</sub> 浓度升高显著降低了三香优 974 稻米的 Cd 含量和吸收量; 增加了其他 4 个品种稻米 Cd 含量和吸收量。CO<sub>2</sub> 浓度升高对不同品种稻米中 Fe、Zn、Ca、Mn 含量影响存在显著差异。CO<sub>2</sub> 浓度正常、升高条件下, 两种污染土壤上金优 463 稻米中 Cd 含量超过食品卫生标准 (Cd ≤ 0.2 mg/kg), 三香优 974 在正常 CO<sub>2</sub> 浓度条件下其稻米 Cd 含量超过食品卫生标准。在低、高复合污染土壤上, 金优 463 和三香优 974 稻米中 Cd 的 THQ 值均大于 1, 说明对人体暴露接触的潜在风险比较严重。CO<sub>2</sub> 浓度升高显著降低了三香优 974 稻米中 Cd 对人体暴露接触的潜在风险, 而对其他 4 个水稻品种稻米 Cd 的 THQ 值影响不明显。

**关键词:** CO<sub>2</sub> 浓度升高; 污染土壤; 镉; 籼稻; 标靶危害系数

## Effects of elevated CO<sub>2</sub> on indica rice quality in soils combined with Cu and Cd heavy metal

WANG Xiao<sup>1</sup>, XIE Likun<sup>1,2</sup>, WU Huibin<sup>1</sup>, ZOU Hongtao<sup>2</sup>, SONG Zhengguo<sup>1,\*</sup>

1 Argo-environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture, Tianjin 300191, China

2 Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China

3 Shenyang Agricultural University, Liaoning 110866, China

**Abstract:** CO<sub>2</sub> concentrations are presently elevated and are expected to continue increasing in the future, resulting in global warming and climate change. Heavy metal pollution is also a serious issue, particularly in copper mining areas. While there have been results published on each of these issues individually, these have been limited to single factors. Consequently, there have been limited data on the comprehensive combined effects of climate change and heavy metal pollution (for example, combined copper and cadmium pollution in soils). This study aimed to investigate the effects of elevated CO<sub>2</sub> levels on the uptake of Cu and Cd in rice varieties grown in soil contaminated with both of these pollutants. The study also considered concentrations of four mineral elements (Fe, Zn, Ca, and Mn), together with potential hazards of Cd contamination in rice to human health. A pot experiment was conducted in an open top chamber at two CO<sub>2</sub> concentration levels, i.e., normal level of ambient concentration (380 μmol/mol) and an elevated concentration level (760

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41071217)

收稿日期: 2013-11-25; 网络出版日期: 2014-11-03

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: forestman1218@163.com

$\mu\text{mol/mol}$ )。Five different varieties of rice were selected for purposes of this experiment. The results showed a reduction in dry biomass production of rice grown in soil subject to low-level contamination from multiple pollutants; conversely, dry biomass production was enhanced under conditions of elevated  $\text{CO}_2$  in soils with high-level contamination from multiple pollutants. Cu concentrations of the five indica rice grains decreased by 4.75%—24.49% in low-level multi-contaminated soils but increased by 6.6%—40.37% in high-level multi-contaminated soils with elevated  $\text{CO}_2$  concentrations. Total Cu uptake in rice decreased at both contamination levels under elevated  $\text{CO}_2$  concentrations. Similarly, Cd concentrations and total Cd uptake of the San Xian-you (974) grain declined significantly at both levels of contamination, with decreases in Cd content of 43.44%, 57.95%, and 47.01%, 60.56%, respectively. While Cd concentrations and total Cd uptake of the four rice varieties all increased, the range of increase was between 25.42%—103.07% and 12.62%—20.05%, respectively. The total uptake of Cd and Cu of the four rice varieties was higher in high-level multi-contaminated soils under elevated and ambient  $\text{CO}_2$  treatments, when compared to soils subject to a low level of contamination. There were significantly different effects on concentrations of Fe, Zn, Ca, and Mn in the five indica rice varieties of elevated  $\text{CO}_2$  concentrations. Zn concentrations of the San Xian-you (974) grain increased significantly in both low-level and high-level multi-contaminated soils with elevated  $\text{CO}_2$  concentrations. Similarly, Mn concentrations of San Xiang-you (974) and Jinyou-463 increased significantly at both contamination levels under elevated  $\text{CO}_2$  conditions. Cd concentrations in the Jinyou-463 grain exceeded food hygienic standards ( $\text{Cd} < 0.2 \text{ mg/kg}$ ) under both elevated and ambient  $\text{CO}_2$  treatments, at both levels of contamination. Cd concentrations of Sanxiangyou-974 also exceeded food hygienic standards under ambient  $\text{CO}_2$  levels. At both contamination levels, the target hazard quotient (THQ) for Cd of Jinyou-463 and Sanxiangyou (974) exceeded 1, indicating that the consumption of both rice varieties would lead to high potential human health risks.

**Key Words:** elevated  $\text{CO}_2$ ; contaminated soil; Cd; indica rice; target hazard quotient

目前,我国农田土壤中重金属污染状况呈现加剧趋势,主要由 Cd、Hg、Cr、Pb、Cu、Zn 等重金属引起<sup>[1,2]</sup>。重金属在农田土壤中的不断积聚,会阻碍农作物生长,导致农产品(如稻米)中重金属含量超标,降低其品质与安全性,直接影响到消费者的健康以及稻米的生产销售<sup>[3,4]</sup>。Cu 和 Cd 作为土壤中的 2 种重要的金属元素,对水稻的生长发育的影响已不容忽视。有研究报道,Cu、Cd 对水稻生长发育的各方面都有影响,尤其是抑制水稻的光合作用而导致生物量的下降<sup>[5]</sup>。也有研究表明,过量 Cu 可能通过拮抗或协同作用,引起植物体内其他元素的平衡失调<sup>[6]</sup>;Lidon 和 Henriques<sup>[7]</sup> 研究指出,过量 Cu 会抑制植物对 Mn、Fe、Ca 等的吸收,进而影响其安全品质。Cd 胁迫对水稻叶片矿质元素积累也有显著的抑制作用<sup>[8]</sup>,可通过影响细胞质膜的透性而影响一些营养元素的吸收和积累<sup>[9]</sup>。

大气环境是作物生长的重要环境因素之一, $\text{CO}_2$ 浓度升高会对种植业特别是农产品的产量和品质产生深远影响<sup>[10]</sup>。据预测,到本世纪末  $\text{CO}_2$ 浓度可达到  $800 \mu\text{L/L}$ <sup>[11]</sup>。有研究报道,大气中  $\text{CO}_2$ 浓度升高能够强化植物对重金属等污染物的吸收甚至诱导植物超积累某些重金属<sup>[12]</sup>。但由于阳离子之间的在土壤、植物根系表面的竞争,使得植物吸收 Cu、Cd 的相对有效性可能存在不同<sup>[13-15]</sup>。Tang 等<sup>[12]</sup>的研究表明, $\text{CO}_2$ 浓度升高对植物抵抗 Cu 胁迫环境有显著的促进作用,而且显著促进了植物的地上部生物量,还可诱导植物超积累 Cu。也有研究指出, $\text{CO}_2$ 浓度升高降低了稻米中的 Cu 含量<sup>[16-19]</sup>;Guo 等<sup>[20,21]</sup>研究发现  $\text{CO}_2$ 浓度升高会降低水稻籽粒的 Cu 含量,但稻米中 Cd 含量根据品种有升高有降低。李中阳等<sup>[22]</sup>发现, $\text{CO}_2$ 浓度升高会导致部分水稻品种高量吸收重金属,这将来会成为危害人体健康的一个潜在隐患,Cd 所带来的隐患比 Cu 严重。此外, $\text{CO}_2$ 作为植物光合作用的必要原料,其浓度的升高必然会对植物光合速率、生理代谢等因素产生影响,从而影响作物产量与生物量<sup>[23,24]</sup>,也势必会对稻米吸收营养元素产生影响。虽有研究报道,大气  $\text{CO}_2$ 浓度升高会增加水稻产量,但并不意味着稻米对营养元素吸收会增多,且目前关于  $\text{CO}_2$ 浓度升高对水稻籽粒矿质元素的影响报道结果并不一致。吴键<sup>[25]</sup>研究表明,大气  $\text{CO}_2$ 浓度升高显著影响了水稻籽粒中各营养元素的含量,其中 Cu 的

含量随大气 CO<sub>2</sub>浓度升高而呈逐步降低的趋势,Zn、Mn 含量呈增长趋势。庞静<sup>[26]</sup>研究表明 CO<sub>2</sub>浓度升高对稻米中 Ca、Cu、Zn、Mn、Fe 含量无显著影响。Lievering<sup>[27]</sup>研究表明,CO<sub>2</sub>浓度升高增加了 Zn 和 Mn 的含量,其他元素没有显著变化。Manderscheid<sup>[28]</sup>和 Fangmeier 等<sup>[29]</sup>指出,大气中 CO<sub>2</sub>浓度增高会降低农作物籽粒如小麦、稻米中某些营养元素的含量。Seneweera 和 Conroy<sup>[17]</sup>采用化学计量法证实了高浓度 CO<sub>2</sub>条件下水稻籽粒中的 Fe、Zn 含量均降低。

水稻作为我国的主要粮食作物之一,其品质优劣直接关系到我国居民的身体健康。目前,重金属污染农田 CO<sub>2</sub>浓度升高影响水稻吸收或超累积重金属的报道较少,对其安全评价的研究也不多见。因此,研究 CO<sub>2</sub>浓度的升高对其生长发育及稻米品质的影响势在必行。本文通过在 2 种不同污染程度的铜镉复合污染土壤上,研究 CO<sub>2</sub>浓度升高条件下 5 种籼稻稻米中 Cu、Cd、Fe、Zn、Ca、Mn 等含量的变化,分析不同水稻品种间的重金属含量差异,并对稻米的卫生安全进行评估,了解重金属污染对人类健康的潜在风险,以期对未来 CO<sub>2</sub>浓度升高条件下重金属污染土壤稻米的安全生产提供指导。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 供试土壤

本试验供试土壤为不同污染程度的铜镉复合污染土壤,采自江苏省南京市九华山(N 32°04.621';E 119°05.514')0—20 cm 农田耕层。该土壤类型为黄棕壤,污染为铜矿区污水灌溉所致。其低、高复合污染土壤中 Cu 和 Cd 含量接近或超出了农田土壤中重金属含量的国家二级标准<sup>[30]</sup>(100 mg Cu/kg 和 0.6 mg Cd/kg,pH 值≥7.5)。土壤自然风干后过 3 mm 不锈钢筛备用。土壤基本性质见表 1,具体测定方法参见农业环境监测实用手册<sup>[30]</sup>和土壤农业化学分析方法<sup>[31]</sup>。

表 1 污染土壤理化性质

Table 1 Physical and chemical characteristics of contaminated soil

分析项目 Analysis project	低污染土壤 Low contaminated soil, L	高污染土壤 High contaminated soil, H	分析项目 Analysis project	低污染土壤 Low contaminated soil, L	高污染土壤 High contaminated soil, H
全氮 Total Nitrogen/(g/kg)	1.93	2.05	全磷 Total Phosphorus/(g/kg)	0.96	0.98
全钾 Total Potassium/(g/kg)	11.70	12.20	pH 值 Water:Soil=2.5:1	7.86	7.78
有机质 Organic matter/(g/kg)	27.40	28.10	粘粒 Clay, %	11.6	12.4
全镉 Total Cadmium/(mg/kg)	1.65	3.31	全铜 Total Copper/(mg/kg)	82	607

试验数据分析测试在农业部产地环境质量重点实验室完成

### 1.2 供试作物

供试水稻品种为我国南方种植面积较广的 5 种籼稻,分别为金优 463、三香优 974 2 种杂交稻,中嘉早 17、湘早 6 号、湘早 42 3 种常规稻,编号依次为 1#、2#、3#、4#、5#。

### 1.3 实验设计与方法

本试验采用完全随机试验设计。2 种不同污染程度的铜镉复合污染土壤,2 种 CO<sub>2</sub>浓度((380±50) μmol/mol 和(760±50) μmol/mol),完全组合,共 4 个处理,每个处理重复 3 次。分别标记为 AL(低污染土壤正常 CO<sub>2</sub>)、AH(高污染土壤正常 CO<sub>2</sub>)、EL(低污染土壤 CO<sub>2</sub>浓度升高)、EH(高污染土壤 CO<sub>2</sub>浓度升高)。

采用土培盆栽试验。塑料桶尺寸(高×直径)为:26 cm×22 cm,每桶装 7.5 kg 风干土,栽种 3 株水稻。幼苗移栽前,每桶土中添加底肥分别为 N:0.20 g/kg,P:0.10 g/kg,K:0.20 g/kg(试验所施用的 N、P、K 肥料种类分别为 CO(NH)<sub>2</sub>、KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>、K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>,购自天津市赢达稀贵化学试剂厂,试剂纯度≥99.0%),施肥后平衡 2 周。试验于 2012 年 4—9 月在农业部环境保护科研监测所的 6 个 OTC 装置中进行。3 个 OTC 通 CO<sub>2</sub>气体,控制浓度为(760±50) μmol/mol,以 3 个 OTC 不通 CO<sub>2</sub>气体(正常大气 CO<sub>2</sub>浓度(380±50) μmol/mol)作为对照。CO<sub>2</sub>

的通气时间为每天 8:30—18:30,共 10 个小时。

水稻完全成熟后采收稻穗,经自然风干后进行手工脱粒,然后用砻谷机(JGMJ8098,上海嘉定里粮油仪器有限公司)脱壳后磨碎备用。称取磨碎后的稻米 0.2—0.3 g 到 100 mL 高型烧杯中,加入 8 mLHNO<sub>3</sub>和 2 mLH<sub>2</sub>O<sub>2</sub>,静置过夜后于电热板上进行消煮。消煮液定容至 50 mL 容量瓶,过滤至 50 mL 塑料瓶中备用。用 ICP-MS(Agilent 7500)测其 Cu、Cd、Fe、Zn 的含量。同时测定标准样品进行质量控制与结果校正。

#### 1.4 健康风险评价模型

为了评估人群食用 CO<sub>2</sub>浓度升高后生长于重金属污染土壤上的稻米所造成的健康风险,根据 Zheng 等人<sup>[32]</sup>提出的方法及美国整合风险信息系统(Integrated Risk Information System, IRIS)<sup>[33]</sup>,将标靶危害系数(Target hazard quotients, THQ)运用到本研究中。标靶危害系数是一种用于人体通过食物摄取重金属风险的评估方法,其公式如下:

$$EDI = \frac{C \times Con \times EF \times ED}{Bw \times AT \times 365}$$

$$THQ = \frac{EDI}{RfD}$$

式中, *C* 为稻米中重金属含量(μg/kg), *Con* 为每人每日食用的稻米量(g 人<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>), *EF* 为暴露频率(365 d/a), *ED* 为暴露年限(70 a), *Bw* 为成人的平均体重(65 kg/人), *AT* 为生命期望值(70 a), 365 为转化系数, *RfD* 为消化食物的比率(μg kg<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>)。

潘晓群等人<sup>[34]</sup>研究报道,成年人平均每天的稻米食用量为 261.1 g 人<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>。根据美国整合风险信息系统, Cd 的 *RfD* 值为 1.0 μg kg<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>。THQ 计算结果中,当 THQ ≤ 1.0 时,则人体负荷的重金属对人体健康造成的影响不明显;当 10 ≥ THQ > 1.0 时,表明对人体健康产生影响的可能性很大;当 THQ > 10 时,表明存在慢性毒性。

#### 1.5 数据处理方法

采用 Excel 2003、SPSS 17.0 统计软件进行数据处理,并利用新复极差法(Duncan 法)进行差异显著性检验(*P* < 0.05)。

## 2 结果与分析

### 2.1 铜镉污染土壤上 CO<sub>2</sub>浓度升高对稻米生物量的影响

在低、高铜镉复合污染土壤上, CO<sub>2</sub>浓度升高对 5 种籼稻稻米干物重影响差异显著(*P* < 0.05)(图 1)。在正常 CO<sub>2</sub>浓度下,低、高铜镉复合污染土壤上,5 种籼稻稻米干物重范围分别为 34.91—66.35 g/pot、38.41—71.27 g/pot,其中均是湘早 6 号稻米干物重最低。在低复合污染土壤上,5 种籼稻除湘早 6 号外 CO<sub>2</sub>浓度升高均显著降低了稻米干物重,降低幅度为 5.57%—15.56%,湘早 6 号显著增加了 16.37%。在高复合污染土壤上,5 种籼稻除三香优 974 外 CO<sub>2</sub>浓度升高均显著增加了稻米干物重,增加幅度为 5.68%—20.47%,三香优 974 显著降低了 6.37%。

### 2.2 铜镉污染土壤上, CO<sub>2</sub>浓度升高对稻米中 Cu、Cd 含量及吸收量的影响

在低、高铜镉复合污染土壤上, CO<sub>2</sub>浓度升高对 5

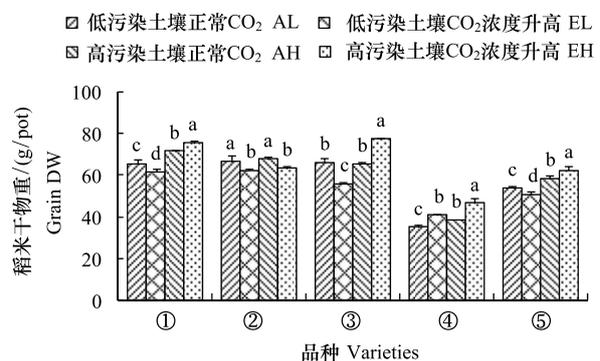


图 1 铜镉污染土壤上 CO<sub>2</sub>浓度升高对稻米干物重的影响

Fig.1 Effects of elevated CO<sub>2</sub> on the grain dry weight of rice at Cu and Cd contaminated soil levels

AL: 低污染土壤正常 CO<sub>2</sub>; EL: 低污染土壤 CO<sub>2</sub>浓度升高; AH: 高污染土壤正常 CO<sub>2</sub>; EH: 高污染土壤 CO<sub>2</sub>浓度升高

种籼稻稻米中 Cu 含量及吸收量的影响存在差异 ( $P < 0.05$ ) (图 2)。在正常 CO<sub>2</sub> 浓度下,低、高铜镉复合污染土壤上,5 种稻米中 Cu 含量范围分别为 4.42—5.70 mg/kg、5.10—5.85 mg/kg。在 CO<sub>2</sub> 浓度正常、升高条件下,高复合污染土壤处理相较于低复合污染土壤处理其 5 种稻米中 Cu 含量基本呈现增加的趋势,增加幅度分别为 1.60%—32.37%、32.88%—105.80%;其中均是中嘉早 17 增加幅度最大。在低复合污染土壤上,CO<sub>2</sub> 浓度升高降低了稻米中 Cu 含量,其降低幅度为 4.75%—24.49%;而在高复合污染土壤上,CO<sub>2</sub> 浓度升高均增加了稻米中 Cu 含量,其增加幅度为 6.60%—40.37%,且基本都达到显著水平 ( $P < 0.05$ )。

在正常 CO<sub>2</sub> 浓度下,低、高铜镉复合污染土壤上,5 种稻米中 Cu 吸收量范围分别为 0.20—0.31 mg/pot、0.22—0.41 mg/pot,其中均是金优 463 最高湘早 6 号最低。相较于低复合污染土壤处理,高复合污染土壤处理均显著增加了 5 种稻米中 Cu 的吸收总量,在正常 CO<sub>2</sub> 浓度和 CO<sub>2</sub> 浓度升高条件下增加幅度分别为:5.50%—30.46%、63.14%—185.01%。在低复合污染土壤上,除湘早 6 号稻米 Cu 吸收量增加 8.14%外,其他品种稻米 Cu 吸收量在 CO<sub>2</sub> 浓度升高条件下均有所降低,降低幅度为 10.68%—28.65%,其中嘉早 17 和湘早 42 达到显著水平 ( $P < 0.05$ )。在高复合污染土壤上,CO<sub>2</sub> 浓度升高均降低了 5 种籼稻稻米 Cu 吸收量,降低幅度为 12.46%—62.09%,其中除金优 463 外均达到显著水平 ( $P < 0.05$ )。

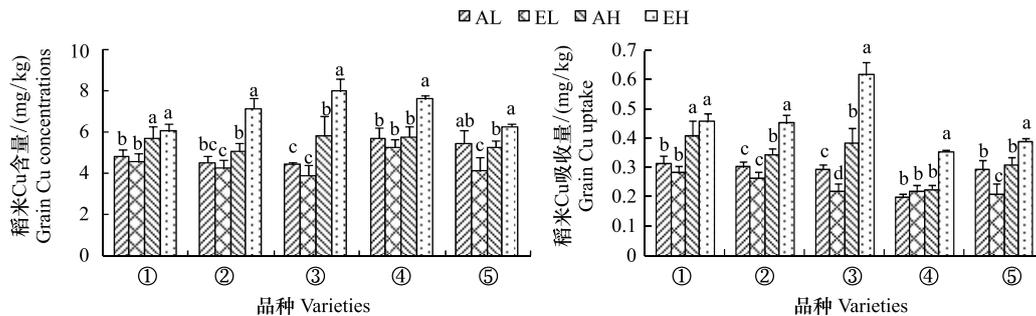


图 2 铜镉污染土壤上 CO<sub>2</sub> 浓度升高对稻米中 Cu 含量及吸收量的影响

Fig.2 Effects of elevated CO<sub>2</sub> on the grain Cu concentrations and uptake of rice at Cu and Cd contaminated soil levels

CO<sub>2</sub> 浓度升高对 5 种籼稻稻米中 Cd 含量及吸收量的影响存在差异 ( $P < 0.05$ ) (图 3)。在正常 CO<sub>2</sub> 浓度下,低、高复合污染土壤上,5 种水稻的稻米中 Cd 含量范围分别为 35.93—306.87 μg/kg、79.04—383.78 μg/kg。在 CO<sub>2</sub> 浓度正常、升高条件下,与低污染土壤处理相比,高污染土壤上稻米中 Cd 含量除两种杂交稻在高污染土壤上略有降低外其他均显著增加 ( $P < 0.05$ ),增加幅度分别为 14.77%—177.24%、22.00%—44.63%。在低、高复合污染土壤上,CO<sub>2</sub> 浓度升高均显著降低了三香优 974 稻米中 Cd 含量,其降低幅度分别为 43.44%、57.95%;其他 4 个水稻品种除金优 463 和湘早 6 号稻米 Cd 含量在高污染土壤上略有降低外,其他在低、高复合污染土壤上,CO<sub>2</sub> 浓度增加均显著增加了稻米中 Cd 含量 ( $P < 0.05$ ),其增加幅度分别为 25.42%—103.07%、12.62%—20.05%。

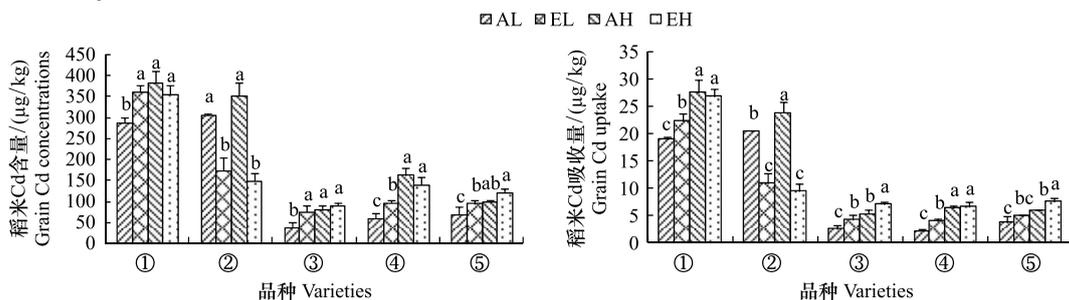


图 3 铜镉污染土壤上 CO<sub>2</sub> 浓度升高对稻米中 Cd 含量及吸收量的影响

Fig.3 Effects of elevated CO<sub>2</sub> on the grain Cd concentrations and uptake of rice at Cu and Cd contaminated soil levels

在正常 CO<sub>2</sub> 浓度下,低、高铜镉复合污染土壤上,5 种稻米中 Cd 吸收量范围分别为 2.05—20.36 μg/pot、5.16—27.38 μg/pot。相较于低复合污染土壤处理,高复合污染土壤处理均显著增加了 5 种稻米中 Cd 的吸收总量,在正常 CO<sub>2</sub> 浓度和 CO<sub>2</sub> 浓度升高条件下增加幅度分别为:16.64%—203.98%、20.48%—68.92%。在低复合污染土壤上,除三香优 974 稻米 Cd 吸收量显著降低 47.01%外,其他品种稻米 Cd 吸收量在 CO<sub>2</sub> 浓度升高条件下均显著增加,增加幅度为 10.68%—28.65%。在高复合污染土壤上,CO<sub>2</sub> 浓度升高均降低了 2 种杂交籼稻米 Cd 吸收量,降低幅度分别为:2.33%、60.56%,其中三香优 974 达到显著水平,而 CO<sub>2</sub> 浓度升高增加了 3 种常规稻米 Cd 吸收量,分别增加 33.06%、3.82%、27.71%,其中中嘉早 17 和湘早 42 达到显著水平 ( $P < 0.05$ )。

### 2.3 铜镉污染土壤上,CO<sub>2</sub> 浓度升高对稻米中营养元素 Fe、Zn 含量的影响

在铜镉复合污染土壤上,CO<sub>2</sub> 浓度升高对 5 种籼稻稻米中 Fe、Zn 含量的影响存在明显差异 ( $P < 0.05$ ) (图 4)。正常 CO<sub>2</sub> 浓度下,在低、高复合污染土壤处理上,5 种籼稻稻米中 Fe 含量范围分别为 19.62—31.75 mg/kg、20.01—34.56 mg/kg,其中均是中嘉早 17 稻米 Fe 含量最高,湘早 42 最低。在低、高复合污染土壤上,CO<sub>2</sub> 浓度升高均降低了两种杂交稻的稻米 Fe 含量,且金优 463 达到显著水平 ( $P < 0.05$ ),降低幅度分别为:15.93%、22.96%;而三种常规稻中除湘早 6 号在高污染土壤上略有降低外,其他均有增加趋势,增加幅度分别为:25.44%—43.37%、4.76%—52.98%,且湘早 42 均达到显著水平 ( $P < 0.05$ )。

正常 CO<sub>2</sub> 浓度下,5 个籼稻品种在低、高铜镉复合污染土壤上的稻米中 Zn 含量范围分别为 34.86—68.67 mg/kg、31.98—85.92 mg/kg。在低污染土壤上,CO<sub>2</sub> 浓度升高显著增加了三香优 974 稻米 Zn 含量 ( $P < 0.05$ ),增加幅度为 51.08%,其他四个品种有升高有降低,但都未达到显著水平。在高污染土壤上,CO<sub>2</sub> 浓度升高显著降低了三香优 974 和中嘉早 17 的稻米 Zn 含量 ( $P < 0.05$ ),其降低幅度分别为:27.42%、37.33%;而 CO<sub>2</sub> 浓度升高显著增加了湘早 6 号和湘早 42 的稻米 Zn 含量 ( $P < 0.05$ ),其增加幅度分别为:91.00%、23.28%。

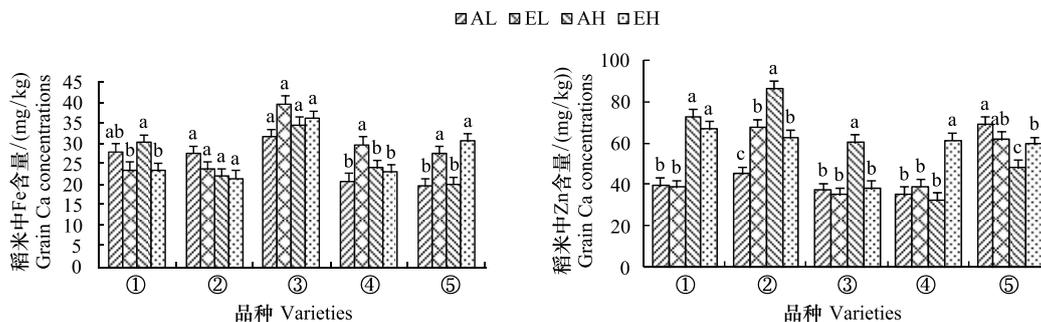


图 4 铜镉污染土壤上 CO<sub>2</sub> 浓度升高对稻米中 Fe、Zn 含量的影响

Fig.4 Effects of elevated CO<sub>2</sub> on the grain Fe and Zn concentrations of rice at Cu and Cd contaminated soil levels

### 2.4 铜镉污染土壤上,CO<sub>2</sub> 浓度升高对稻米中营养元素 Ca、Mn 含量的影响

在铜镉复合污染土壤上,CO<sub>2</sub> 浓度升高对 5 种籼稻稻米中 Ca 和 Mn 的含量影响存在很大的品种差异 ( $P < 0.05$ ) (图 5)。正常 CO<sub>2</sub> 浓度下,5 个水稻品种在低、高污染土壤处理下的稻米 Ca 含量范围分别为:96.61—159.15 mg/kg、104.60—195.76 mg/kg,其中均是三香优 974 稻米中 Ca 含量最高。CO<sub>2</sub> 浓度升高对稻米中 Ca 含量的影响品种差异显著,在低污染土壤上,CO<sub>2</sub> 浓度升高显著增加了金优 463 和三香优 974 籽粒 Ca 含量 ( $P < 0.05$ ),分别增加了 14.67%、33.03%;而显著降低了湘早 42 稻米的 Ca 含量 ( $P < 0.05$ ),降低幅度为 11.13%。在高污染土壤上,CO<sub>2</sub> 浓度升高仅显著增加了中嘉早 17 稻米 Ca 含量 ( $P < 0.05$ ),增加幅度为 22.62%。

正常 CO<sub>2</sub> 浓度下,5 种籼稻在低、高污染土壤处理下的稻米 Mn 含量范围分别为:48.25—55.06 mg/kg、37.48—52.94 mg/kg,其中均是金优 463 稻米 Mn 含量最高。在 CO<sub>2</sub> 浓度正常、升高条件下,高污染土壤处理相较于低污染土壤处理其稻米 Mn 含量均降低,降低幅度分别为:3.84%—23.76%、5.79%—13.35%,其中中嘉早 17、湘早 6 号和湘早 42 均达到显著水平 ( $P < 0.05$ )。在低污染土壤上,CO<sub>2</sub> 浓度升高均降低了稻米中 Mn 的含

量,降低幅度为:4.59%—12.32%。在高污染土壤上,CO<sub>2</sub>浓度升高降低了两种杂交稻稻米 Mn 含量,降低幅度分别为:12.24%、2.45%,而 3 种常规籼稻的稻米 Mn 含量均有所增加,增加幅度为:2.26%—8.34%。

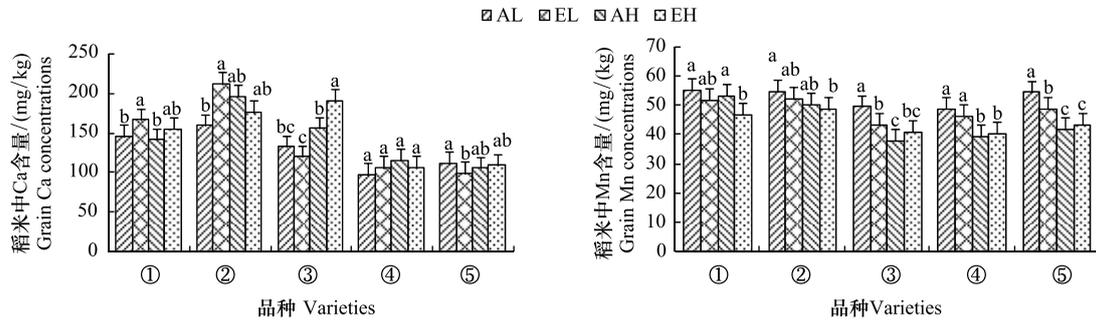


图5 铜镉污染土壤上 CO<sub>2</sub> 浓度升高对稻米中 Ca、Mn 含量的影响

Fig.5 Effects of elevated CO<sub>2</sub> on the grain Ca and Mn concentrations of rice at Cu and Cd contaminated soil levels

### 2.5 铜镉污染土壤上 CO<sub>2</sub> 浓度升高对稻米安全风险评价分析

根据标靶危害系数计算模型可知,5 个籼稻品种生产的稻米进入人体 Cd 暴露接触的 THQ 值存在差异(图 6)。在正常 CO<sub>2</sub> 浓度条件下,低、高复合污染土壤上两种杂交稻稻米中 Cd 的 THQ 值均大于 1,3 种常规稻品种其稻米 Cd 的 THQ 值均小于 1,说明金优 463 和三香优 974 稻米中 Cd 对人体健康存在潜在风险。在低污染土壤处理下,CO<sub>2</sub> 浓度升高降低了三香优 974 稻米 Cd 的 THQ 值,且 THQ 值小于 1,说明 CO<sub>2</sub> 浓度升高显著降低了三香优 974 稻米 Cd 对人体的潜在风险;其他四个品种稻米 Cd 的 THQ 值均有所增加,但只有金优 463 稻米 Cd 的 THQ 值大于 1,说明 CO<sub>2</sub> 浓度升高增加了金优 463 稻米对人体暴露接触 Cd 所带来的潜在风险。在高污染土壤上,CO<sub>2</sub> 浓度升高降低了两种杂交稻稻米 Cd 的 THQ 值,且使三香优 974 稻米 Cd 的 THQ 值降到 1 以下,显著降低了人体暴露接触 Cd 所带来的潜在风险,而金优 463 稻米 Cd 的 THQ 值仍大于 1;CO<sub>2</sub> 浓度升高对三种常规稻米 Cd 的 THQ 值影响不明显。

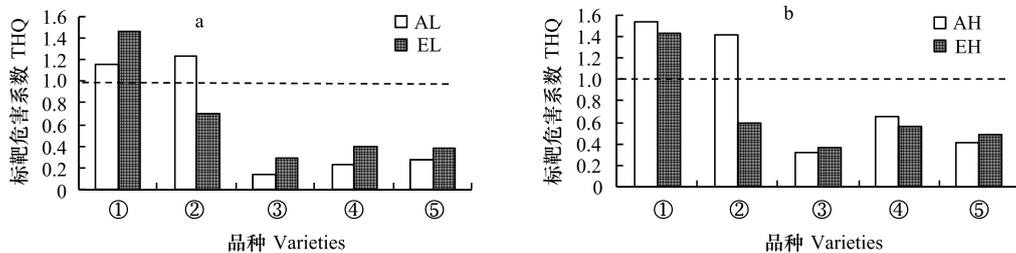


图6 铜镉污染土壤上 CO<sub>2</sub> 浓度升高对稻米中 Cd 的 THQ 值影响

Fig.6 Effects of elevated CO<sub>2</sub> on the grain Cd THQ values of rice at Cu and Cd contaminated soil levels

## 3 讨论

### 3.1 不同处理对 5 种籼稻稻米生物量的影响

有研究表明,重金属胁迫会导致水稻生长发育受阻,可降低水稻的生物产量<sup>[35]</sup>,Cu、Cd 可抑制水稻的光合作用而导致生物量的下降<sup>[5]</sup>。有研究结果显示,CO<sub>2</sub> 浓度升高水稻各个部分的变化比例非常大<sup>[36]</sup>,但也有研究认为 CO<sub>2</sub> 浓度升高能够促进水稻的生长发育及干物质形成,但水稻的产量却没有提高<sup>[37]</sup>。在本实验中,CO<sub>2</sub> 浓度升高显著降低了低复合污染土壤上的稻米干物重,而显著增加了高复合污染土壤上的稻米干物重。说明铜镉复合污染土壤处理及 CO<sub>2</sub> 浓度升高的交互作用对水稻稻米生物量的影响存在很大品种差异。

### 3.2 不同处理对 5 种籼稻稻米中 Cu、Cd 含量及吸收量的影响

在 CO<sub>2</sub> 浓度升高引起生物量增加的情况下,被水稻稻米吸收的重金属含量,将会出现三种情况:稀释、增

加、变化不大。目前作物对 Cu 和 Cd 吸收的品种差异受土壤污染程度和 CO<sub>2</sub> 浓度升高的影响早有报道<sup>[38-42]</sup>。本试验研究结果表明:在低污染土壤上,CO<sub>2</sub> 浓度升高均降低了稻米中 Cu 含量及吸收量,这与吴键<sup>[25]</sup>、Yang 等<sup>[18]</sup>、Seneweera 等<sup>[16,17]</sup> 和 Jia 等<sup>[19]</sup> 研究结果一致,而在高污染土壤上,CO<sub>2</sub> 浓度升高均增加了稻米中 Cu 的含量,但总吸收量却是有所降低。在两种污染土壤上,CO<sub>2</sub> 浓度升高均降低了三香优 974 稻米 Cd 含量及吸收量,而其他 4 种水稻稻米 Cd 含量及吸收量基本上均显著增加。说明阳离子之间的竞争,使得水稻吸收 Cu、Cd 的相对有效性存在不同<sup>[13-15]</sup>,且根据水稻品种的不同对 Cu、Cd 的吸收差异也较大。

### 3.3 不同处理对 5 种籼稻稻米中矿质元素 Fe、Zn、Ca、Mn 含量的影响

大量文献报道,重金属胁迫与 CO<sub>2</sub> 浓度升高均会对水稻吸收矿质元素产生影响。有研究指出,过量 Cu 会抑制植物对 Mn、Fe、Ca 等的吸收<sup>[7]</sup>,Cd 胁迫对水稻矿质元素积累也有显著的抑制作用<sup>[8]</sup>。庞静<sup>[26]</sup> 研究表明 CO<sub>2</sub> 浓度升高对籽粒中 Ca、Zn、Mn、Fe 含量无显著影响,而 Lieffering<sup>[27]</sup> 研究表明,CO<sub>2</sub> 浓度升高可增加了 Zn 和 Mn 的含量,其他元素没有显著变化。本试验研究表明,铜镉复合污染土壤上,CO<sub>2</sub> 浓度升高对稻米中 Fe、Zn、Ca、Mn 含量变化的影响品种差异显著,有升高有降低。在两种污染土壤上,CO<sub>2</sub> 浓度升高显著降低了金优 463 稻米 Fe 含量,显著增加了湘早 42 稻米 Fe 含量,这和庞静<sup>[26]</sup>、Seneweera 等<sup>[17]</sup> 部分研究结果一致。在低污染土壤上,CO<sub>2</sub> 浓度升高显著增加了三香优 974 稻米 Zn、Ca 含量,显著降低了湘早 42 稻米 Ca 含量,其他品种影响不明显,这和庞静<sup>[26]</sup>、Lieffering<sup>[27]</sup> 和 Seneweera<sup>[17]</sup> 部分结果相一致;CO<sub>2</sub> 浓度升高均降低了 5 种籼稻稻米中 Mn 的含量,这与庞静<sup>[26]</sup> 和 Lieffering<sup>[27]</sup> 研究结果相反。在高污染土壤上,CO<sub>2</sub> 浓度升高显著降低了三香优 974 和中嘉早 17 稻米 Zn 含量,却显著增加了湘早 6 号和湘早 42 稻米 Zn 含量,这和庞静<sup>[19]</sup> 研究结果不一致,与 Lieffering<sup>[27]</sup> 部分研究结果一致;CO<sub>2</sub> 浓度升高增加了三种常规稻米中 Ca、Mn 含量,而两种杂交稻米 Ca、Mn 有降低趋势。因此,水稻籽粒对矿质元素的吸收在铜镉复合污染土壤处理和 CO<sub>2</sub> 浓度升高条件下存在很大品种差异。

### 3.4 不同处理对 5 种籼稻稻米中 Cd 安全评价分析

参照《农业环境监测实用手册》稻米中重金属含量的允许量标准值 Cd ≤ 0.2 mg/kg<sup>[30]</sup>。本试验中,在正常 CO<sub>2</sub> 浓度和 CO<sub>2</sub> 浓度升高条件下,低、高复合污染土壤上金优 463 稻米中 Cd 含量均超标,三香优 974 仅在正常 CO<sub>2</sub> 浓度条件下稻米 Cd 含量超标,而在 CO<sub>2</sub> 浓度升高条件下其稻米 Cd 含量未超标;其他 3 个水稻品种稻米中 Cd 含量均未超标。

THQ 值是一种广泛应用于人体通过食物摄取重金属风险的评估方法<sup>[43,44]</sup>。本试验中,在正常 CO<sub>2</sub> 浓度条件下,低、高复合污染土壤上 5 种籼稻中,两种杂交稻金优 463 和三香优 974 稻米中 Cd 的 THQ 值均大于 1,说明稻米中 Cd 含量对人体暴露接触的潜在风险范围扩大比较严重。在低污染土壤上,CO<sub>2</sub> 浓度升高使三香优 974 稻米 Cd 的 THQ 值小于 1,明显降低了其稻米中 Cd 对人体的潜在风险,其他四个水稻品种稻米中 Cd 的 THQ 值均有所增加,说明 CO<sub>2</sub> 浓度升高增加了人体暴露接触 Cd 所带来的潜在风险。在高污染土壤上,CO<sub>2</sub> 浓度升高明显降低了三香优 974 稻米 Cd 的 THQ 值,使人体暴露接触 Cd 所带来的潜在风险大大降低;而 CO<sub>2</sub> 浓度升高对其他四种水稻稻米中 Cd 的 THQ 值影响不明显。

## 4 结论

CO<sub>2</sub> 浓度升高均降低了低污染土壤上的稻米 Cu 含量及吸收量,增加了高污染土壤上的稻米 Cu 含量而降低了 Cu 的吸收量。两种污染土壤上,CO<sub>2</sub> 浓度升高降低了三香优 974 的稻米 Cd 含量及吸收量,而增加了其他 4 种水稻稻米 Cd 含量及吸收量。在正常 CO<sub>2</sub> 浓度和 CO<sub>2</sub> 浓度升高条件下,两种污染土壤上金优 463 稻米中 Cd 含量均超标,三香优 974 仅在正常 CO<sub>2</sub> 浓度条件下稻米 Cd 含量超标。

铜镉复合污染土壤上,CO<sub>2</sub> 浓度升高对稻米矿质元素 Fe、Zn、Ca、Mn 含量变化的影响表现为显著增加、显著降低或无影响,品种差异显著。

在低、高复合污染土壤上,金优 463 和三香优 974 稻米中 Cd 含量对人体暴露接触的潜在风险范围扩大比

较严重。CO<sub>2</sub>浓度升高显著降低了三香优 974 稻米中 Cd 对人体暴露接触的潜在风险,对其他四个水稻品种稻米 Cd 的 THQ 值影响不明显。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] 史海娃, 宋卫国, 赵志辉. 我国农业土壤污染现状及其成因. 上海农业学报, 2008, 24(2): 122-126.
- [ 2 ] 孙波, 周生路, 赵其国. 基于空间变异分析的土壤重金属复合污染研究. 农业环境科学学报, 2003, 22(2): 248-251.
- [ 3 ] 肖美秀, 梁义元, 梁康迢, 林文雄. 水稻重金属污染及其控制技术的研究进展. 亚热带农业研究, 2005, 1(3): 40-43.
- [ 4 ] 程式华, 胡培松. 中国水稻科技发展战略. 中国水稻科学, 2008, 22(3): 20-24.
- [ 5 ] Kastori R, Petrovic M, Petrovic N. Effects of excess lead, cadmium, copper, and zinc on water relations in sunflower. Journal of Plant Nutrition, 1992, 15(11): 2427-2439.
- [ 6 ] 徐加宽, 杨连新, 王志强, 王云霞, 徐俊, 王洁琼, 黄建晔, 王余龙. 土壤铜含量对水稻氮素吸收利用及其产量的影响. 扬州大学学报: 农业与生命科学版, 2008, 29(2): 72-76.
- [ 7 ] Lidon F C, Henriques F S. Effects of copper toxicity on growth and uptake and translocation of metals in rice plants. Journal of Plant Nutrition, 1993, 16(8): 1449-1464.
- [ 8 ] 杨春刚, 朱智伟, 章秀福, 牟仁祥, 陈铭学, 王丹英, 廖西元, 陈温福, 周淑清. 重金属镉对水稻生长影响和矿质元素代谢的关系. 中国农学通报, 2005, 21(11): 176-178.
- [ 9 ] Zhang G P, Fukami M, Sekimoto H. Influence of cadmium on mineral concentrations and yield components in wheat genotypes differing in Cd tolerance at seedling stage. Field Crops Research, 2002, 77(2/3): 93-98.
- [ 10 ] Kimball B A, Kobayashi K, Bindi M. Responses of agricultural crops to free-air CO<sub>2</sub> enrichment. Advances in Agronomy, 2002, 77: 293-368.
- [ 11 ] IPCC. Climate Change 2007: Synthesis Report. UK: Cambridge University Press. 2007.
- [ 12 ] Tang S, Xi L, Zheng J, Li H. Response to elevated CO<sub>2</sub> of Indian mustard and sunflower growing on copper contaminated soil. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2003, 71(5): 988-997.
- [ 13 ] Andrews J A, Schlesinger W H. Soil CO<sub>2</sub> dynamics, acidification, and chemical weathering in a temperate forest with experimental CO<sub>2</sub> enrichment. Global Biogeochemical Cycles, 2001, 15(1): 149-162.
- [ 14 ] Groenenberg J E, Koopmans G F, Comans R N J. Uncertainty analysis of the nonideal competitive adsorption-donnan model: effects of dissolved organic matter variability on predicted metal speciation in soil solution. Environmental Science & Technology, 2010, 44(4): 1340-1346.
- [ 15 ] Cheng L, Zhu J, Chen G, Zheng X, Oh N H, Ruffy T W, de Richter D, Hu S. Atmospheric CO<sub>2</sub> enrichment facilitates cation release from soil. Ecology Letters, 2010, 13(3): 284-291.
- [ 16 ] Seneweera S, Blakeney A, Milham P, Basra A S, Barlow E W R, Conroy J. Influence of rising atmospheric CO<sub>2</sub> and phosphorus nutrition on the grain yield and quality of rice (*Oryza sativa* cv. Jannah). Cereal Chemistry, 1996, 73(2): 239-243.
- [ 17 ] Seneweera S P, Conroy J P. Growth, grain yield and quality of rice (*Oryza sativa* L.) in response to elevated CO<sub>2</sub> and phosphorus nutrition. Soil Science and Plant Nutrition, 1997, 43: 1131-1136.
- [ 18 ] Yang L X, Wang Y L, Dong G C, Gu H, Huang J Y, Zhu J G, Yang H J, Liu G, Han Y. The impact of free-air CO<sub>2</sub> enrichment (FACE) and nitrogen supply on grain quality of rice. Field Crops Research, 2007, 102(2/5): 128-140.
- [ 19 ] Jia H X, Guo H Y, Yin Y, Wang Q, Sun Q, Wang X R, Zhu J G. Responses of rice growth to copper stress under free-air CO<sub>2</sub> enrichment (FACE). Chinese Science Bulletin, 2007, 52(19): 2636-2641.
- [ 20 ] Guo H Y, Jia H X, Zhu J G, Wang X R. Influence of the environmental behavior and ecological effect of cropland heavy metal contaminants by CO<sub>2</sub> enrichment in atmosphere. Chinese Journal of Geochemistry, 2006, 25(1): 212-212.
- [ 21 ] Guo H Y, Zhu J G, Zhou H, Sun Y Y, Yin Y, Pei D P, Ji R, Wu J C, Wang X R. Elevated CO<sub>2</sub> levels affects the concentrations of copper and cadmium in crops grown in soil contaminated with heavy metals under fully open-air field conditions. Environmental Science and Technology, 2011, 45(16): 6997-7003.
- [ 22 ] 李中阳, 唐世荣, 邓小芳, 王瑞刚, 宋正国. 不同品种水稻在 CO<sub>2</sub>浓度升高下对 Cu 和 Cd 吸收差异性的比较研究 // 第三届全国农业环境科学学术研讨会论文集. 天津: 中国农业生态环境保护协会, 2009.
- [ 23 ] 赵天宏, 王美玉, 张巍巍, 张鑫. 大气 CO<sub>2</sub>浓度升高对植物光合作用的影响. 生态环境, 2006, 15(5): 1096-1100.
- [ 24 ] 徐玲, 赵天宏, 胡莹莹, 曹莹, 史奕. CO<sub>2</sub>浓度升高对春小麦光合作用和籽粒产量的影响. 麦类作物学报, 2008, 28(5): 867-872.
- [ 25 ] 吴健. 大气 CO<sub>2</sub>浓度升高对水稻生育生理及产量品质影响的研究 [D]. 合肥: 安徽农业大学, 2008.
- [ 26 ] 庞静, 朱建国, 谢祖彬, 陈改革, 刘刚, 张雅丽. 自由空气 CO<sub>2</sub>浓度升高对水稻营养元素吸收和籽粒中营养元素含量的影响. 中国水稻科学, 2005, 19(4): 350-354.

- [27] Lieffering M, Kim H Y, Kobayashi K, Okada M. The impact of elevated CO<sub>2</sub> on the elemental concentrations of field-grown rice grains. *Field Crops Research*, 2004, 88(2/3): 279-286.
- [28] Manderscheid R, Bender H J, Jäger H J, Weigel H J. Effects of season long CO<sub>2</sub> enrichment on cereals. II Nutrient concentrations and grain quality. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 1995, 54(3): 175-185.
- [29] Fangmeier A, Temmerman L D, Mortensen L, Kemp K, Burke J, Mitchell R, Van Oijen M, Weigel H J. Effects on nutrients and on grain quality in spring wheat crops grown under elevated CO<sub>2</sub> concentrations and stress conditions in the European, multiple-site experiment 'ESPACE-wheat'. *European Journal of Agronomy*, 1999, 10(3/4): 215-229.
- [30] 刘凤枝. 农业环境监测实用手册. 北京: 中国标准出版社, 2001: 93-191, 609-687.
- [31] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 30-103.
- [32] Zheng N, Wang Q C, Zhang X W, Zheng D M, Zhang Z S, Zhang S Q. Population health risk due to dietary intake of heavy metals in the industrial area of Huludao City. *Science of the Total Environment*, 2007, 387(1/3): 96-104.
- [33] US-EPA, IRIS, United States, Environmental Protection Agency, Integrated Risk Information System, [http://cfpub.epa.gov/ncea/iris/index.cfm?Fuseaction=iris.show Substance List](http://cfpub.epa.gov/ncea/iris/index.cfm?Fuseaction=iris.show+Substance+List) (Accessed January 2008).
- [34] 潘晓群, 袁宝君, 史祖民, 戴月. 江苏省城乡居民膳食状况调查研究. *江苏预防医学*, 2007, 18(4): 6-9.
- [35] Verma S, Dubey R S. Effect of cadmium on soluble sugars and enzymes of their metabolism in rice. *Biologia Plantarum*, 2001, 44(1): 117-123.
- [36] Cheng W G, Sakai H, Yagi K, Hasegawa T. Interactions of elevated [CO<sub>2</sub>] and night temperature on rice growth and yield. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, 149(1): 51-58.
- [37] 王立志. 面对未来 CO<sub>2</sub> 浓度升高环境下水稻生产的思考. *黑龙江农业科学*, 2002, (5): 39-40.
- [38] Yang L X, Huang J Y, Yang H J, Dong G C, Liu G, Zhu J G, Wang Y L. Seasonal changes in the effects of free-air CO<sub>2</sub> enrichment (FACE) on dry matter production and distribution of rice (*Oryza sativa* L.). *Field Crops Research*, 2006, 98(1): 12-19.
- [39] Liu J G, Qian M, Cai G L, Yang J C, Zhu Q S. Uptake and translocation of Cd in different rice cultivars and the relation with Cd accumulation in rice grain. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 143(1/2): 443-447.
- [40] Cui Y J, Zhang X H, Zhu Y G. Does copper reduce cadmium uptake by different rice genotypes. *Journal of Environmental Sciences*, 2008, 20(3): 332-338.
- [41] Huang Y Z, Hu Y, Liu Y X. Combined toxicity of copper and cadmium to six rice genotypes (*Oryza sativa* L.). *Journal of Environmental Sciences*, 2009, 21(5): 647-653.
- [42] Shi J, Li L Q, Pan G X. Variation of grain Cd and Zn concentrations of 110 hybrid rice cultivars grown in a low-Cd paddy soil. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, 21(2): 168-172.
- [43] 邹晓锦, 仇荣亮, 周小勇, 黄穗虹. 蔬菜重金属暴露接触对大宝山矿区及周边居民的健康风险. *地理研究*, 2008, 27(4): 854-862.
- [44] Hang X S, Wang H Y, Zhou J M, Ma C L, Du C W, Chen X Q. Risk assessment of potentially toxic element pollution in soils and rice (*Oryza sativa*) in a typical area of the Yangtze River Delta. *Environmental Pollution*, 2009, 157(8-9): 2542-2549.