

赵兴梅, 胡宇聪, 谢琪琪, 等. 硫酸亚铁对六价铬[Cr(VI)]污染条件下水稻幼苗生长的影响[J]. 江苏农业学报, 2025, 41(12): 2307-2314.  
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2025.12.003

# 硫酸亚铁对六价铬[Cr(VI)]污染条件下水稻幼苗生长的影响

赵兴梅, 胡宇聪, 谢琪琪, 张云华, 鲁洪娟

(农田生态保育与污染防控安徽省重点实验室/安徽农业大学资源与环境学院, 安徽 合肥 230036)

**摘要:** 为探究硫酸亚铁对六价铬[Cr(VI)]污染条件下水稻幼苗铬吸收、积累的影响, 采用土壤盆栽的方法, 基于同一重铬酸钾( $K_2Cr_2O_7$ )含量基础上添加不同含量梯度的 $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ , 共设置6个处理[分别为CK( $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ 添加量为0 mg/kg)、T1( $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ 添加量为40 mg/kg)、T2( $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ 添加量为80 mg/kg)、T3( $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ 添加量为120 mg/kg)、T4( $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ 添加量为160 mg/kg)、T5( $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ 添加量为200 mg/kg)], 研究 $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ 对铬污染条件下水稻幼苗的生长、铬吸收状况及抗氧化系统的影响。结果表明, T3处理、T5处理茎叶鲜重和根系鲜重显著高于CK ( $P < 0.05$ ); 添加 $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ 后, 水稻地上部和根系的铬含量显著下降 ( $P < 0.05$ )。  $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ 可以显著降低土壤Cr(VI)含量 ( $P < 0.05$ ); 此外, 施用适量 $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ 能有效提高土壤脲酶和土壤过氧化氢酶的活性以及水稻过氧化物酶(*POD*)和谷胱甘肽S转移酶(*GST*)的活性。总之, 施用适量硫酸亚铁能够提高水稻抗氧化酶的活性, 增强水稻对铬胁迫的耐受性, 增加水稻幼苗的生物量, 减少土壤和水稻中Cr(VI)的含量, 减轻Cr(VI)对水稻的毒害作用。

**关键词:** 六价铬; 硫酸亚铁; 水稻幼苗; 酶

**中图分类号:** S511      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-4440(2025)12-2307-08

## Effects of ferrous sulfate on the growth of rice seedlings under Cr(VI) pollution conditions

ZHAO Xingmei, HU Yucong, XIE Qiqi, ZHANG Yunhua, LU Hongjuan

(Anhui Province Key Lab of Farmland Ecological Conservation and Pollution Prevention/School of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China)

**Abstract:** In order to explore the effect of ferrous sulfate on the absorption and accumulation of chromium in rice seedlings under Cr(VI) pollution conditions, the method of soil potting was adopted. Based on the same potassium dichromate ( $K_2Cr_2O_7$ ) content, different content gradients of  $FeSO_4 \cdot 7H_2O$  were added. A total of six treatments were set up, namely CK (with an addition of  $FeSO_4 \cdot 7H_2O$  of 0 mg/kg), T1 (with an addition of  $FeSO_4 \cdot 7H_2O$  of 40 mg/kg), T2 (with an addition of  $FeSO_4 \cdot 7H_2O$  of 80 mg/kg), and T3 (with an addition of  $FeSO_4 \cdot 7H_2O$  of 120 mg/kg), T4 (with an addition of  $FeSO_4 \cdot 7H_2O$  of 160 mg/kg), and T5 (with an addition of  $FeSO_4 \cdot 7H_2O$  of 200 mg/kg), to investigate the influence of  $FeSO_4 \cdot 7H_2O$  on the growth, chromium uptake and the antioxidant system of rice seedlings under chromium stress. The results showed that the fresh weights of stems, leaves and roots in treatments T3 and T5 were significantly higher than those in CK ( $P < 0.05$ ). After the addition of  $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ , the chromium content in the aboveground and root

systems of rice decreased significantly ( $P < 0.05$ ). Addition of  $FeSO_4 \cdot 7H_2O$  could significantly reduce the Cr(VI) content in soil ( $P < 0.05$ ). In addition, the application of an appropriate amount of  $FeSO_4 \cdot 7H_2O$  could effectively enhance the activities of soil urease and soil catalase, as well as the activities of rice peroxidase (*POD*) and gluta-

收稿日期: 2025-01-24

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFD2302900); 2021、2022  
淮南市耕地质量等级更新评价项目(KJ2021553)

作者简介: 赵兴梅(2001-), 女, 安徽合肥人, 硕士研究生, 从事重金属污染修复方面的研究。(E-mail) 3335227153@qq.com

通讯作者: 鲁洪娟, (E-mail) hjlu@ahau.edu.cn

thione S-transferase (GST). In conclusion, the application of appropriate ferrous sulfate can enhance the activity of antioxidant enzymes in rice, strengthen its resistance to chromium stress, increase the biomass of rice seedlings, reduce the content of Cr(VI) in the soil and rice, and alleviate the toxic effects of Cr(VI) on rice.

**Key words:** hexavalent chromium; ferrous sulfate; rice seedlings; enzyme

铬(Cr)是一种常见的土壤污染物,土壤中重金属铬来源广泛,木材防腐、制革、钢铁、电镀、采矿等行业在生产过程中都会将铬释放到土壤里<sup>[1]</sup>。这种污染情况不容小觑,中国有近 1.1% 的土地遭受铬污染<sup>[2]</sup>,近 0.21% 的耕地因铬含量严重超标,无法用于耕种而被弃用<sup>[3]</sup>。铬主要以三价铬[Cr(III)]和六价铬[Cr(VI)]的形态存在于自然界中<sup>[4]</sup>。三价铬是机体必需的一种元素,能维护细胞内糖类、脂类和蛋白质的稳态,毒性小,稳定性好。而六价铬具有毒性大、迁移性强、难以生物降解等特点,是土壤环境中极具危害的污染物。物理方法、化学方法和生物方法是常见的缓解土壤Cr(VI)污染的技术<sup>[5]</sup>,将土壤中高毒Cr(VI)还原为低毒Cr(III)被认为是缓解土壤Cr(VI)污染较为可行的化学方法之一<sup>[6]</sup>。基于此,科研人员探索了各类还原剂在化学修复中的应用,硫化物、零价铁以及硫酸亚铁等都在研究范围内<sup>[7]</sup>。熊琴等<sup>[8]</sup>研究发现,向铬污染土壤中施用 FeSO<sub>4</sub>和腐熟猪粪,有利于降低土壤中铬浸出产生的毒素浓度;Shi 等<sup>[9]</sup>和 Li 等<sup>[10]</sup>也指出,施用 FeSO<sub>4</sub>对Cr(VI)污染土壤有明显修复效果;张亭亭等<sup>[11]</sup>研究指出,硫酸亚铁可通过氧化还原反应调控土壤中铬的赋存形态转化,显著增强对重金属污染土壤的修复效能。

水稻是全球近半数人口的粮食来源,是中国主要粮食作物之一。水稻对铬元素表现出较强的吸收能力。重金属铬的存在,既严重影响水稻产量,又会通过土壤向植株转移,从而危害人类的健康<sup>[12-13]</sup>。因此,如何有效抑制水稻对铬的吸收与积累,已成为保障水稻安全生产、维护食物链健康的关键环节。本研究拟选取具有典型代表性的黄褐土作为供试土壤,以常见水稻作为供试作物,设置盆栽试验,通过添加不同剂量的硫酸亚铁,研究硫酸亚铁对铬污染条件下土壤水稻幼苗不同部位铬分布、积累状况及相关酶活性的影响。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试土壤

供试土壤为采自安徽农业大学农萃园表层(0~

20 cm)的黄褐土。取样时,清除土壤表面的枯枝、落叶等杂物。取样后,将土样摊开,让其自然风干,除去根部等杂质,然后用橡胶锤击碎,过 10 目筛网,待用。供试土壤物理和化学特性见表 1,其中总铬含量为 69.10 mg/kg,低于农用地土壤污染风险筛选值(250.0 mg/kg)。

表 1 供试土壤的基本理化性质

Table 1 Basic physicochemical properties of the studied soils

指标	测定值	指标	测定值
pH	6.70	碱解氮含量(mg/kg)	39.05
有机质含量(g/kg)	26.24	有效磷含量(mg/kg)	8.37
全氮含量(g/kg)	1.43	速效钾含量(mg/kg)	175.98
全磷含量(g/kg)	0.38	总铬含量(mg/kg)	69.10
全钾含量(g/kg)	11.37	Cr(VI)含量(mg/kg)	未测出

### 1.2 水稻育苗

本研究所用水稻(*Oryza sativa* L.)品种为特优 63,是一种被广泛种植的籼型杂交水稻。在试验准备阶段,于 2022 年 3 月 24 日开展了种子处理工作。首先,选取适量的特优 63 水稻种子,将其浸泡在双氧水中,目的是利用双氧水的强氧化性对种子表面的微生物进行有效杀灭,浸泡时长控制为 30 min,以确保消毒效果的同时避免对种子造成过度损伤。消毒完成后,使用蒸馏水冲洗种子,彻底去除种子表面残留的双氧水,为后续的试验操作提供清洁无污染的种子材料。将尼龙网状物平放于盛有蒸馏水的盘子内,用夹钳将其 4 个角分别扣紧,然后将水稻种子置于尼龙网状织物上,调整蒸馏水的水位,让其与蒸馏水相接触。当种子发芽后,采用 KimuraB 型营养液进行栽培,在培养室内进行 30 d 的培养过程中,每隔 5 d 更换 1 次营养液。1~7 d 给 1/4 的营养液,8~14 d 给 1/2 的营养液,然后再换成全营养液。

### 1.3 试验设计

2022 年 4 月 24 日,称取 1 kg 磨细后的风干土于 1.2 L 的塑料桶中,Cr(VI)(K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>形式)的添加量为 60 mg/kg,即 1 盆 60 mg。7 d 后施入基肥,每盆加入的

基肥中,N(尿素形式)0.60 g/kg,P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(过磷酸钙形式)0.2 g/kg,K<sub>2</sub>O(氯化钾形式)0.60 g/kg。依据FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O添加量的不同设置6个处理,分别为CK(FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O添加量为0 mg/kg)、T1(FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O添加量为40 mg/kg)、T2(FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O添加量为80 mg/kg)、T3(FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O添加量为120 mg/kg)、T4(FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O添加量为160 mg/kg)、T5(FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O添加量为200 mg/kg),每个处理重复3次。

30 d后进行秧苗取样,并将秧苗分成根和茎叶2个部分,分别用自来水和去离子水冲洗,擦去水分,分别测定地上部和地下部的鲜重。水稻分为茎叶与根系2个部分,一部分保存在-80℃的超低温冷藏库内,用于测定抗氧化酶活性(取样时取从上部至下部数第3张叶中间部);将另一部分茎叶放入纸袋中,105℃炉内烘干30 min,然后在70℃烘干至恒重。

#### 1.4 测定指标与测定方法

1.4.1 土壤Cr(VI)含量测定 称取土壤样本5.0 g,置于250 mL的烧杯内,向其中添加50.0 mL的碱萃取液,然后添加400 mg的MgCl<sub>2</sub>及0.5 mL的K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>-KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>缓冲液。倒入搅拌器内,用1张聚乙烯纸封住,然后将其放置在搅拌加热设备上,加热至90~95℃,保持1 h。然后将烧杯移开,让溶液在常温下降温。将过滤后的液体放入烧杯中,用硝酸将其pH调整到7.5±0.5。将过滤后的液体转移到100 mL的瓶子里,至标线后摇匀,测定Cr(VI)含量。

1.4.2 土壤总铬含量测定 参照《土壤总铬的测定 火焰原子吸收分光光度法》(HJ 491-2009)<sup>[14]</sup>对土壤中的总铬含量进行测定。

1.4.3 水稻总铬含量测定 水稻总铬含量采用光谱仪测定。

1.4.4 水稻幼苗相关酶活性的测定 用比色法测定过氧化氢酶(CAT)活性,将1 μmol过氧化氢在1 min内催化1 μmol酶作为1个活性单位<sup>[15]</sup>;本研究采用愈创木酚法测定过氧化物酶(POD)活性,以1 min内催化1 μmol愈创木酚的酶为1个活性单元。参照Mauch等<sup>[16]</sup>的方法测定谷胱甘肽S转移酶(GST)活性。

1.4.5 土壤相关酶活性的测定方法 土壤脲酶(UE)和过氧化氢酶(CAT)活性参照《土壤酶及其研究法》<sup>[17]</sup>进行检测。

#### 1.5 数据处理与分析

采用Excel 2016对数据进行统计分析,采用SPSS22.0进行显著性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O对Cr(VI)污染条件下水稻生物量的影响

如图1所示,在Cr(VI)污染土壤中添加不同含量的硫酸亚铁后,茎叶鲜重和根鲜重均比CK提高,其中T3处理、T4处理、T5处理茎叶鲜重显著高于CK( $P < 0.05$ ),T3处理和T5处理根鲜重高于CK。与对照组相比,硫酸亚铁在特定水平上有效缓解了Cr(VI)对水稻幼苗的负面效应。在硫酸亚铁的作用下,水稻植株的地上部茎叶与地下部根系系统呈现出生物量同步增长的趋势,生长态势更好。这一结果表明,硫酸亚铁对减轻Cr(VI)污染对水稻幼苗的负面影响、促进水稻生长具有积极作用。

### 2.2 FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O对Cr(VI)污染条件下水稻总铬含量和铬转运系数的影响

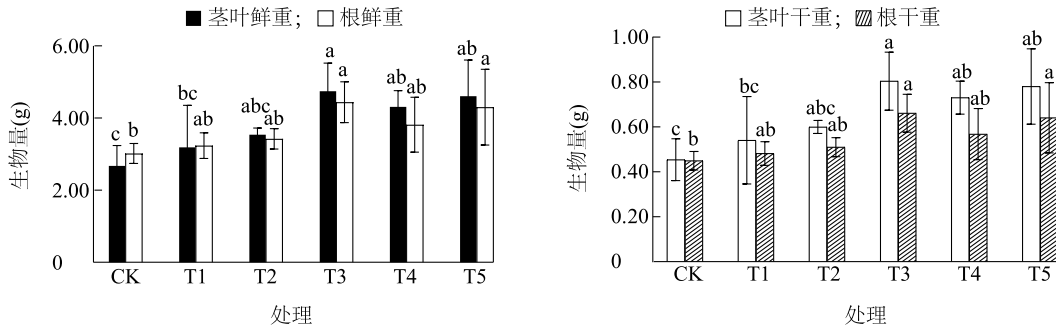
从图2能够清晰地看出,不同处理的水稻各器官的总铬含量差异显著。水稻茎叶中总铬含量为6.96~26.70 μg/g,而根系中的总铬含量为100.72~340.51 μg/g。说明根部的总铬含量远高于茎叶,这表明Cr主要集中于水稻根部。与CK相比,添加FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O可以显著降低水稻茎叶和根系总铬含量( $P < 0.05$ ),添加FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O后,茎叶总铬含量较CK下降了58.60%~73.95%,与对照相比,各处理的水稻根系总铬含量显著下降,下降了54.53%~70.42%。而相较于CK,T1~T5处理铬转运系数无显著差异。由此可见,FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O显著抑制了水稻茎秆和根系对Cr的吸收,减轻了Cr对水稻的毒害作用。

### 2.3 FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O对Cr(VI)污染条件下水稻铬积累量的影响

由表2可知,添加FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O后水稻茎叶Cr积累量(T5处理除外)、根系Cr积累量以及水稻Cr总积累量均显著低于CK( $P < 0.05$ )。相较于对照,T1~T4处理下的茎叶铬积累量显著降低,降幅为32.95%~58.24%。其中,T4处理的下降幅度最为突出,Cr积累量降至5.12 μg。相较于CK,T1~T5处理根系铬积累量显著下降,降幅为46.42%~61.98%。经统计,所有处理的水稻茎叶铬平均积累

量为 7.30  $\mu\text{g}$ , 根系铬平均积累量为 83.71  $\mu\text{g}$ , 表明

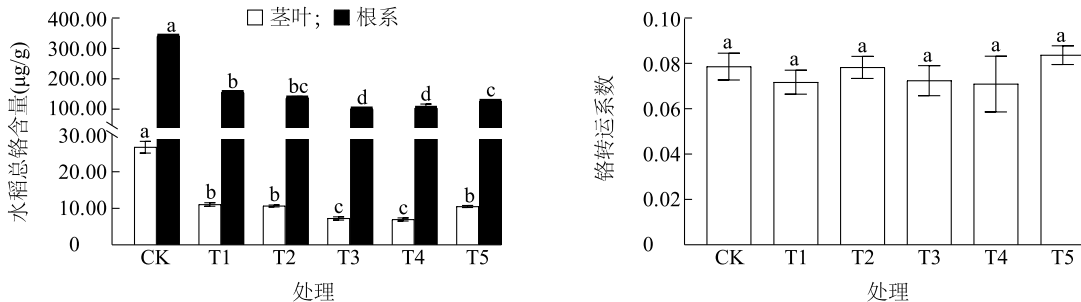
水稻地上部的铬积累量显著小于地下部。



不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。CK:  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  添加量为 0 mg/kg; T1:  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  添加量为 40 mg/kg; T2:  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  添加量为 80 mg/kg; T3:  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  添加量为 120 mg/kg; T4:  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  添加量为 160 mg/kg; T5:  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  添加量为 200 mg/kg。

图 1  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  对 Cr(VI) 污染条件下水稻生物量的影响

Fig.1 Effects of  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  on the biomass of rice under Cr(VI) pollution conditions



不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。CK:  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  添加量为 0 mg/kg; T1:  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  添加量为 40 mg/kg; T2:  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  添加量为 80 mg/kg; T3:  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  添加量为 120 mg/kg; T4:  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  添加量为 160 mg/kg; T5:  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  添加量为 200 mg/kg。

图 2  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  对 Cr(VI) 污染条件下水稻总铬含量以及铬转运系数的影响

Fig.2 Effects of  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  on the total chromium content and transport coefficient in rice under Cr(VI) pollution conditions

表 2 水稻 Cr 积累量

Table 2 Cr accumulation in rice

处理	茎叶 Cr 积累量 ( $\mu\text{g}$ )	根系 Cr 积累量 ( $\mu\text{g}$ )	Cr 总积累量 ( $\mu\text{g}$ )
CK	12.26 $\pm$ 3.56a	152.94 $\pm$ 12.69a	165.20 $\pm$ 15.37a
T1	5.90 $\pm$ 1.75b	74.45 $\pm$ 6.89bc	80.35 $\pm$ 8.07bc
T2	6.38 $\pm$ 0.03b	69.63 $\pm$ 4.74bc	76.02 $\pm$ 4.73bc
T3	5.89 $\pm$ 1.56b	66.66 $\pm$ 10.41bc	72.55 $\pm$ 10.83bc
T4	5.12 $\pm$ 1.06b	58.15 $\pm$ 18.24c	63.27 $\pm$ 19.03c
T5	8.22 $\pm$ 2.05ab	80.42 $\pm$ 19.54b	88.65 $\pm$ 21.05b

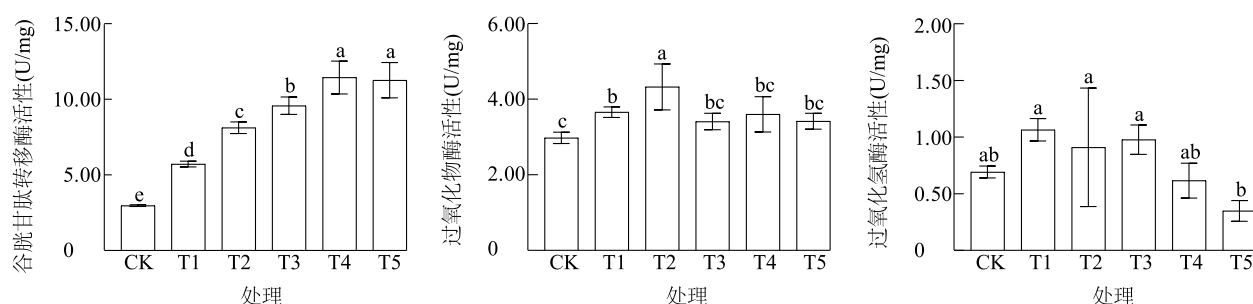
不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。CK:  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  添加量为 0 mg/kg; T1:  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  添加量为 40 mg/kg; T2:  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  添加量为 80 mg/kg; T3:  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  添加量为 120 mg/kg; T4:  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  添加量为 160 mg/kg; T5:  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  添加量为 200 mg/kg。

#### 2.4 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 对 Cr(VI) 污染条件下水稻相关酶活性的影响

图 3 显示, 与对照相比, 添加  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  后,

谷胱甘肽转移酶 (*GST*) 活性呈逐渐上升的趋势。与 CK 相比, T1~T5 处理水稻的 *GST* 活性增幅为 92.52%~285.27%, 且均显著高于 CK ( $P < 0.05$ )。其中, T4 处理组水稻的 *GST* 活性增幅最大, 表明添加  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  能够显著提升水稻的 *GST* 活性。

随着  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  添加量的递增, 水稻 *POD* 活性呈现出先升高后降低的趋势, 各处理组的 *POD* 活性均高于 CK, 其中, T1 处理和 T2 处理的水稻 *POD* 活性显著高于 CK ( $P < 0.05$ )。与 CK 相比, T1~T5 处理的 *POD* 活性增幅为 22.86%~45.23%。与 CK 相比, T1~T3 处理提高了过氧化氢酶 (*CAT*) 活性, 分别增加了 53.62%、31.88% 和 42.03%, 但差异不显著。说明添加一定量的  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  能够使水稻 *POD* 活性增加。



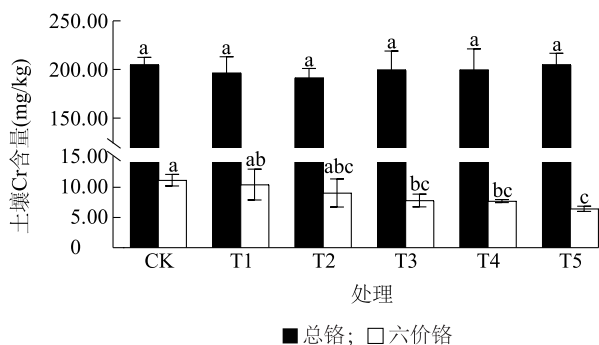
不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。CK:  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  添加量为 0 mg/kg; T1:  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  添加量为 40 mg/kg; T2:  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  添加量为 80 mg/kg; T3:  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  添加量为 120 mg/kg; T4:  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  添加量为 160 mg/kg; T5:  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  添加量为 200 mg/kg。

图3  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 对Cr(VI)污染条件下水稻相关酶活性的影响

Fig.3 Effects of  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  on rice enzyme activity under Cr(VI) pollution conditions

## 2.5 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 对Cr(VI)污染条件下土壤Cr含量的影响

图4显示,相较于CK, T1~T5处理土壤总铬含量并无显著变化。对照土壤Cr(VI)含量为11.18 mg/kg,添加 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 后,各处理土壤Cr(VI)含量均出现不同程度的下降,其中, T3~T5处理土壤Cr(VI)含量为6.44~7.82 mg/kg,显著低于CK ( $P < 0.05$ )。由此可见,  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 能够明显降低对土壤具有负面影响的Cr(VI)的含量,对土壤铬污染的修复具有积极作用。



不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。CK:  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  添加量为 0 mg/kg; T1:  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  添加量为 40 mg/kg; T2:  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  添加量为 80 mg/kg; T3:  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  添加量为 120 mg/kg; T4:  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  添加量为 160 mg/kg; T5:  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  添加量为 200 mg/kg。

图4  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 对Cr(VI)污染条件下土壤Cr含量的影响

Fig.4 Effects of  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  on Cr content of soil under Cr(VI) pollution conditions

## 2.6 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 对Cr(VI)污染条件下土壤酶活性的影响

土壤酶活性能够敏锐地反映土壤理化特性的微

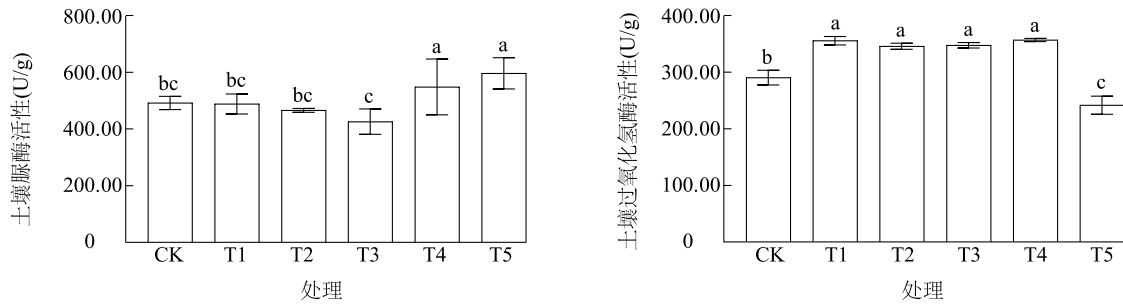
妙变化,还能精准地揭示土壤受重金属污染的程度。由图5可知,  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 对土壤中UE活性的影响具有一定的差异,相较于CK, T4处理、T5处理土壤UE活性分别显著提高了11.45%和21.22% ( $P < 0.05$ )。

不同 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 添加量对土壤中的CAT活性影响具有显著差异,与CK相比, T1~T4处理土壤CAT活性提高了19.12%~22.88%,均达到显著水平 ( $P < 0.05$ ),然而,值得注意的是, T5处理土壤的CAT活性显著低于对照 ( $P < 0.05$ )。说明添加一定量 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 能够显著提高土壤CAT的活性。

## 3 讨论

### 3.1 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 对Cr(VI)污染条件下水稻生长及吸收Cr状况的影响

土壤中的铬会影响水稻的根系功能,影响水稻对养分的吸收,诱导活性氧的产生,从而影响水稻的光合作用,导致水稻的生长发育受阻,直至枯死<sup>[18]</sup>。在土壤遭受铬污染的过程中,植株的生长量及株高可直接反映Cr对植株的毒害作用<sup>[19]</sup>。根据 Chop-pala等<sup>[20]</sup>的研究结果,土壤中的Cr(VI)会对植物的正常生长产生阻碍作用,随着土壤六价铬的含量增加,植株生物量出现了下降。石贵玉<sup>[21]</sup>指出, Cr(VI)会抑制水稻植株和根的生长,降低水稻的干重和鲜重。已有大量研究结果证实,硫酸亚铁有利于提升水稻品质,促进水稻根系活性及抗氧化能力提高,进而改善水稻的生长状态,减小铬对水稻的有害效应,最终降低铬对人体可能带来的负面影响<sup>[22-23]</sup>。本研究中,随着 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 的添加,水稻



不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。CK:  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  添加量为 0 mg/kg; T1:  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  添加量为 40 mg/kg; T2:  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  添加量为 80 mg/kg; T3:  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  添加量为 120 mg/kg; T4:  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  添加量为 160 mg/kg; T5:  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  添加量为 200 mg/kg。

图 5  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  对 Cr(VI) 污染条件下稻田土壤酶活性的影响

Fig.5 Effects of  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  on soil enzyme activity under Cr(VI) pollution conditions

茎叶鲜重和根鲜重均比对照明显提高,尤其是 T3 处理、T5 处理的地上部分和地下部分的鲜重显著高于对照,这表明,在土壤中加入硫酸亚铁能够减轻六价铬对秧苗的毒性,从而促进秧苗的生长。

水稻不同器官的 Cr 含量存在显著差异,呈现出根部大于茎秆的分布特征,这表明 Cr 主要集中在水稻根部。这一结果与过往研究结果一致,即在相关研究中,水稻根的铬含量始终处于最高水平,茎叶次之,籽粒最少<sup>[24-26]</sup>。植物根系作为直接与土壤溶液中 Cr 接触的器官,其细胞结构和生理功能更易受到 Cr 离子的干扰和损伤,相对吸收也最多<sup>[27]</sup>。添加  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  后,与对照相比,水稻茎叶中的 Cr 含量显著下降;根中的 Cr 含量同样显著降低。同时,水稻茎叶和根部 Cr 积累量以及 Cr 总积累量总体均呈现下降的趋势。因此,  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  显著抑制了水稻茎秆和根系对 Cr 的吸收,减缓了 Cr 从根部向地上部分茎叶的迁移和运输,有效减轻了 Cr 对水稻的负面影响。

### 3.2 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 对 Cr(VI) 污染条件下水稻相关酶活性的影响

过氧化氢酶 (CAT) 在植物细胞的抗氧化防御系统中发挥核心作用,是不可或缺的抗氧化酶,其核心功能便是将细胞内过多的  $\text{H}_2\text{O}_2$  分解为  $\text{O}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$ , 避免细胞受到损害。研究表明,当水稻受到重金属胁迫时,由于应激强度大小不同,以及这种胁迫持续时间的长短各异,水稻整体 CAT 活性会产生差异<sup>[28]</sup>。水稻受到严重 Cr(VI) 胁迫时产生大量  $\text{H}_2\text{O}_2$ , 使得 CAT 活性降低<sup>[29]</sup>。本研究中,在不同添加量的硫酸亚铁作用下,水稻中过氧化氢酶 (CAT) 活性整

体呈现出先升高后降低的趋势。

过氧化物酶 (POD) 可以清除过量  $\text{H}_2\text{O}_2$ , 缓解氧化应激损伤,调控植保素生物合成,减轻植物在胁迫条件下遭受损伤。Cr 胁迫会导致水稻 POD 活性降低,添加  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  后,POD 活性降低得到一定缓解,且随着  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  添加量的增加,POD 活性展现出显著的动态变化,POD 活性呈现先上升后下降的态势。在整个试验阶段,各处理的 POD 活性均高于 CK,其中, T1 处理和 T2 处理 POD 活性显著高于 CK。上述结果表明,  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  可以在一定程度上增强水稻的抗氧化能力<sup>[30]</sup>。

谷胱甘肽转移酶 (GST) 作为一种具有多重生物学功能的关键酶类,在植物抗逆调控网络中发挥着核心作用<sup>[31]</sup>,成为连接植物解毒代谢与抗氧化应激反应的重要枢纽蛋白质<sup>[32]</sup>,在本研究中,与 CK 相比,添加  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  后水稻 GST 活性呈现逐渐增加的趋势,可见  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  的加入提高了 GST 活性,从而提高了水稻对 Cr 的耐受性。

铬进入稻田土壤中,促使其产生大量的 ROS, 这些 ROS 会造成植株的细胞膜损伤,从而丧失其活性,造成水稻中毒甚至枯死<sup>[33]</sup>。本研究发现,  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  的添加可以显著提高 GST 和 POD 活性<sup>[34]</sup>,原因是  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  的添加减少了水稻对 Cr 的积累,提高了水稻幼苗中 CAT、GST 和 POD 的活性,缓解了 Cr 胁迫对水稻的毒性。

### 3.3 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 对土壤中 Cr 含量及相关酶活性的影响

本研究结果表明,添加  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  后,土壤总

铬含量变化不大,但是Cr(VI)含量降低,且随着 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 添加量的递增,土壤Cr(VI)含量降幅增加,T3~T5处理土壤Cr(VI)含量显著低于对照。添加 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 后,水稻幼苗Cr含量和积累量均低于CK,整体来看,随着 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 的加入,土壤Cr(VI)转化为其他形态,从而缓解了Cr(VI)对水稻的毒性。

土壤酶活性作为表征土壤微生物代谢强度的关键指标<sup>[35-37]</sup>,其动态变化能够灵敏地反映土壤环境质量的演变过程<sup>[38]</sup>。由于土壤酶参与土壤中碳、氮、磷、硫等营养元素的转化和迁移,其活性特征已被广泛用于土壤重金属污染的生态毒性诊断<sup>[39-40]</sup>。值得注意的是脲酶,它能够促进土壤中有有机物向作物可利用的有效态转化,对土壤中氮素供应意义重大,其活性值可以作为评估土壤重金属污染状况的有效指标<sup>[41]</sup>。Cr污染能抑制土壤的酶活性,降低其循环和代谢能力<sup>[42]</sup>。卢秀霞等<sup>[43]</sup>研究发现,土壤中重金属Cr可以抑制土壤脲酶活性,土壤中Cr、Cd含量与过氧化氢酶活性、蔗糖酶活性、脲酶活性、碱性磷酸酶活性均存在负相关。本研究发现,添加一定量的 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 能够显著提升土壤脲酶和过氧化氢酶的活性,当向土壤中添加硫酸亚铁后,土壤的化学性质发生了明显改变,为土壤微生物营造了更为适宜的生存环境,极大地增强了土壤微生物的活动能力。本研究结果充分说明,硫酸亚铁的添加对UE和CAT活性有着不同程度的正向影响。其作用机制在于,加入硫酸亚铁降低了土壤中重金属铬的含量,从而减轻了重金属对土壤微生物的胁迫。

#### 参考文献:

- [1] BAO Z J, FENG H Y, TU W Y, et al. Method and mechanism of chromium removal from soil: a systematic review[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2022, 29(24): 35501-35517.
- [2] LI Y Y, ZHANG T T, NING Z, et al. Characteristics and applications of sewage sludge biochar modified by ferrous sulfate for remediating Cr(VI)-contaminated soils[J]. Advances in Civil Engineering, 2020, 2020(1): 6521638.
- [3] 曹俊雅,张婧,张文茜,等. 土壤中重金属铬(VI)污染修复技术的研究进展[J]. 土壤通报, 2022, 53(5): 1220-1227.
- [4] HU G, HE Y, ZHU K F, et al. Experimental study on the remediation of hexavalent chromium contaminated cohesive soil by injection of ferrous sulfate[J]. Environmental Geoscience, 2023, 82: 185.
- [5] 曹宁宁,李林记,石勇丽,等. 土壤六价铬污染修复技术研究进展与应用探讨[J]. 磷肥与复肥, 2023, 38(4): 42-48.
- [6] LI Y J, WANG W Y, ZHOU L Q, et al. Remediation of hexavalent chromium spiked soil by using synthesized iron sulfide particles[J]. Chemosphere, 2017, 169: 131-138.
- [7] WANG D H, LI G H, QIN S Q, et al. Remediation of Cr(VI)-contaminated soil using combined chemical leaching and reduction techniques based on hexavalent chromium speciation[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2021, 208: 111734.
- [8] 熊琴,颜雪冬,辛立庆. 施用硫酸亚铁和腐熟猪粪改良铬污染土壤研究[J]. 环境保护科学, 2019, 45(2): 121-126.
- [9] SHI K Y, ZHANG Y X, DING G Y, et al. Remediation of Cr(VI)-contaminated soil mixed with chromite ore processing residue by ferrous sulfate and enzyme residue[J]. The Science of the Total Environment, 2023, 892: 164743.
- [10] LI R Q, XIAN Y Z, GAO Y, et al. New insight into the mechanism of remediation of chromium containing soil by synergetic disposal of ferrous sulfate and digestate[J]. Science of the Total Environment, 2022, 837: 155539.
- [11] 张亭亭,李江山,王平,等.  $\text{FeSO}_4$ 对铬污染土的稳定性及风险评价试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(10): 3928-3936.
- [12] 徐芬芬. 铬胁迫对水稻幼苗生长和生理特性的影响[J]. 杂交水稻, 2012, 27(3): 76-78.
- [13] ALI CHANDIO T, KHAN M N, MUHAMMAD M T, et al. Health risk assessment of chromium contamination in the nearby population of mining plants, situated at Balochistan, Pakistan[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(13): 16458-16469.
- [14] 中国环境监测总站. 土壤总铬的测定 火焰原子吸收分光光度法: HJ 491-2009[S]. 北京: 环境保护部, 2009.
- [15] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [16] MAUCH F, DUDLER R. Differential induction of distinct glutathione-S-transferases of wheat by xenobiotics and by pathogen attack[J]. Plant Physiology, 1993, 102(4): 1193-1201.
- [17] 关松荫,张德生,张志明. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- [18] DOTANIYA M L, RAJENDIRAN S, SAURABH K, et al. Immobilization of chromium bioavailability through application of organic waste to Indian mustard (*Brassica juncea*) under chromium-contaminated Indian soils[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2022, 195(1): 31.
- [19] 周彩玉,林隽,唐钰焱,等. 硫肥对水稻幼苗生长及砷、镉和铬累积的影响[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(7): 1458-1467.
- [20] CHOPPALA G, BOLAN N, KUNHIKRISHNAN A, et al. Concomitant reduction and immobilization of chromium in relation to its bioavailability in soils[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, 22(12): 8969-8978.
- [21] 石贵玉. 重金属 $\text{Cr}^{6+}$ 对水稻幼苗的毒害效应[J]. 广西科学,

- 2004, 11(2): 154-156.
- [22] 任露陆, 蔡宗平, 王固宁, 等. 不同钝化机制矿物对土壤重金属的钝化效果及微生物响应[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(7): 1470-1480.
- [23] GAO Y, ZHAO F B, ZHAO Y H, et al. Enhancement of chromium contaminated soil remediation by ferrous sulfate with the addition of biogas residue[J]. Environmental Progress & Sustainable Energy, 2022, 41(4): e13816.
- [24] 孙宗全, 李合莲, 于修乐, 等. 不同作物对土壤中铬的富集能力的差异[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2019, 33(3): 255-260, 265.
- [25] ZENG F R, CHEN S, MIAO Y, et al. Changes of organic acid exudation and rhizosphere pH in rice plants under chromium stress[J]. Environmental Pollution, 2008, 155(2): 284-289.
- [26] 王威. 铬污染地区环境对植物吸收重金属的影响[J]. 天津师范大学学报(自然科学版), 2005, 25(1): 66-68.
- [27] 韦小了, 牟力, 付天岭, 等. 不同钝化剂组合对水稻各部位吸收积累 Cd 及产量的影响[J]. 土壤学报, 2019, 56(4): 883-894.
- [28] LIU H J, ZHANG C X, WANG J M, et al. Influence and interaction of iron and cadmium on photosynthesis and antioxidative enzymes in two rice cultivars[J]. Chemosphere, 2017, 171: 240-247.
- [29] VACULÍK M, PAVLOVIC A, LUX A. Silicon alleviates cadmium toxicity by enhanced photosynthetic rate and modified bundle sheath's cell chloroplasts ultrastructure in maize[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2015, 120: 66-73.
- [30] 曾凡荣. 水稻铬毒害和耐性的生理与分子机理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- [31] LABROU N E, PAPAGEORGIU A C, PAVLI O, et al. Plant GSTome: structure and functional role in xenome network and plant stress response[J]. Current Opinion in Biotechnology, 2015, 32: 186-194.
- [32] AGATI G, AZZARELLO E, POLLASTRI S, et al. Flavonoids as antioxidants in plants: location and functional significance[J]. Plant Science, 2012, 196: 67-76.
- [33] 吴嘉煜, 米楠. 重金属对植物抗氧化酶影响研究进展[J]. 浙江农业科学, 2022, 63(6): 1177-1181, 1304.
- [34] 张宇虹. 重金属铬对植物酶系统影响的研究进展[J]. 现代园艺, 2016(15): 13.
- [35] 唐瑜. 有机肥内在品质评价及其对土壤微生物和酶活性的影响[D]. 贵阳: 贵州大学, 2017.
- [36] 陈彦芳, 曹柳, 马建华, 等. 土壤重金属复合污染钝化修复对酶活性的影响[J]. 河南大学学报(自然科学版), 2020, 50(1): 1-10.
- [37] 王瑞飞, 孔盈利, 魏艺璇, 等. 菌剂对鸡粪-生物炭堆肥理化性质和微生物群落结构的影响[J]. 江苏农业学报, 2023, 39(4): 966-977.
- [38] 桑琳. 增温及秸秆施用对农田土壤呼吸及酶活性的影响[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2017.
- [39] BORAH P, SINGH P, RANGAN L, et al. Mobility, bioavailability and ecological risk assessment of cadmium and chromium in soils contaminated by paper mill wastes[J]. Groundwater for Sustainable Development, 2018, 6: 189-199.
- [40] 谭向平, 何金红, 郭志明, 等. 土壤酶对重金属污染响应及指示研究进展[J]. 土壤学报, 2023, 60(1): 50-62.
- [41] 李楠. 重金属形态与土壤酶活性关系研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2015.
- [42] 郭茹, 洪坚平. 生物炭腐植酸对盆栽油菜铬污染土壤化学性状及铬含量的影响[J]. 华北农学报, 2019, 34(5): 192-200.
- [43] 卢秀霞, 赵洋, 王晶, 等. 尾菜再生水灌溉对土壤酶活性与重金属含量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2023, 41(5): 110-120.

(责任编辑: 陈海霞)