

## 外源亚精胺对水稻吸收积累镉砷的影响

刘书锦, 黄益宗, 李颜, 魏祥东, 铁柏清

引用本文:

刘书锦, 黄益宗, 李颜, 等. 外源亚精胺对水稻吸收积累镉砷的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(10): 2172–2180.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0828>

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### 蚯蚓粪对镉在土壤-水稻系统中迁移转化影响

张晓绪, 张嘉伟, 孙星星, 徐轶群, 许健, 朱靖

农业环境科学学报. 2020, 39(8): 1723–1733 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0110>

### 海藻糖对镉胁迫下水稻幼苗生长的影响

李昉峻, 周其文, 漆新华, 宋正国

农业环境科学学报. 2019, 38(8): 1827–1834 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0114>

### 稻田镉砷污染阻控原理与技术应用

于焕云, 崔江虎, 乔江涛, 刘传平, 李芳柏

农业环境科学学报. 2018, 37(7): 1418–1426 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0730>

### 水分状况对水稻镉砷吸收转运的影响

吴佳, 纪雄辉, 魏维, 谢运河

农业环境科学学报. 2018, 37(7): 1427–1434 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0299>

### 镉胁迫下不同改良剂对水稻种子萌发和镉吸收积累的影响

王丙烁, 黄益宗, 李娟, 龙健, 王农, 黄永春

农业环境科学学报. 2019, 38(4): 746–755 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0770>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

刘书锦, 黄益宗, 李颜, 等. 外源亚精胺对水稻吸收积累镉砷的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(10): 2172–2180.

LIU Shu-jin, HUANG Yi-zong, LI Yan, et al. The effects of exogenous spermidine on the cadmium and arsenic uptake and accumulation in rice[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(10): 2172–2180.



开放科学 OSID

## 外源亚精胺对水稻吸收积累镉砷的影响

刘书锦<sup>1,2</sup>, 黄益宗<sup>1\*</sup>, 李颜<sup>1</sup>, 魏祥东<sup>3</sup>, 铁柏清<sup>3</sup>

(1. 农业农村部环境保护科研监测所, 天津 300191; 2. 华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070; 3. 湖南农业大学资源环境学院, 长沙 410128)

**摘要:** 通过水培试验和大田试验, 研究外源亚精胺(Spd)对水稻吸收积累Cd、As的影响。结果表明: 水培试验中, 在 $10\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的Cd胁迫下, 外源添加 $250\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的Spd能显著降低水稻茎叶Cd含量58.0%, 在 $50\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的As胁迫下, 添加同样浓度的Spd可以显著降低水稻茎叶As含量20.1%, 阻止了水稻根系中Cd、As向茎叶的转运累积; 在大田试验中, 外源添加 $1\ 000\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的Spd显著降低了水稻根系、叶片和籽粒中Cd的积累, 分别降低了25.8%、51.9%和37.4%, 同时降低了水稻茎和根系中As的含量, 分别降低了23.9%和31.2%。研究表明, 外源施用Spd可以降低苗期水稻对Cd、As的吸收积累, 同时可显著降低水稻籽粒中Cd的含量。因此, 可合理使用亚精胺缓解Cd、As对水稻的胁迫, 为提高粮食安全提供有力保障。

**关键词:** 亚精胺; 水稻; 镉; 砷; 农田重金属污染

中图分类号: S511; X173 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2020)10-2172-09 doi:10.11654/jaes.2020-0828

### The effects of exogenous spermidine on the cadmium and arsenic uptake and accumulation in rice

LIU Shu-jin<sup>1,2</sup>, HUANG Yi-zong<sup>1\*</sup>, LI Yan, WEI Xiang-dong<sup>3</sup>, TIE Bai-qing<sup>3</sup>

(1. Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin 300191, China; 2. College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 3. College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

**Abstract:** Hydroponic and field experiments were performed to investigate the effects of exogenous spermidine (Spd) on the absorption and accumulation of cadmium (Cd) and arsenic (As) in rice. In the hydroponic experiment, under  $10\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  Cd stress and the exogenous addition of  $250\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  Spd, the rice stem and leaf Cd contents were significantly reduced (58.0%). Under  $50\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  Cd stress and an equivalent Spd concentration, the stem and leaf As contents were significantly reduced (20.1%), and the transport of Cd and As from the root to the stems and leaves (and subsequent accumulation) was prevented. In the field experiment,  $1\ 000\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  Spd significantly reduced the root, leaf, and grain Cd accumulation by 25.8%, 51.9%, and 37.4%, respectively, and the stem and root As contents were reduced by 23.9% and 31.2%, respectively. These results support prior studies showing that the exogenous application of spermidine reduced the absorption and accumulation of Cd and As in rice at the seedling stage, and significantly reduced the Cd content in rice grains. Therefore, spermidine can be used to alleviate rice Cd and As stress and improve food security.

**Keywords:** spermidine; rice; cadmium; arsenic; farmland heavy metal pollution

收稿日期: 2020-07-19 录用日期: 2020-09-07

作者简介: 刘书锦(1994—), 男, 天津人, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤重金属修复。E-mail: shujinliu@126.com

\*通信作者: 黄益宗 E-mail: yizonghuang@126.com

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0801500)

Project supported: National Key R&D Program of China(2017YFD0801500)

随着工业的发展,其生产过程中产生的废水、废气和固体废弃物造成了严重的农田土壤重金属污染,影响了农作物的生长发育,产生了一系列的粮食安全问题,每年因此造成的粮食污染多达1 200万t<sup>[1]</sup>。此外,重金属可通过食物链传导进而威胁动物和人类的健康<sup>[2]</sup>。Cd作为“五毒”之首,一旦进入环境就很难被消除,其会长期影响大气、水体以及土壤的环境质量安全<sup>[3]</sup>。根据已公布的资料显示,截止到2014年我国农田Cd超标率达到了16.1%<sup>[4]</sup>,过量摄入Cd会对人体造成严重损伤,具有致畸、致癌和致突变的风险,甚至导致死亡<sup>[5]</sup>。As也是一种对动植物以及人类具有强烈毒害作用的污染物,由于自然地质活动、矿采及农药的滥用使得环境中积累了过量的As<sup>[6]</sup>。与美洲大陆和日本相比,我国土壤环境中的As本底值含量较高<sup>[7]</sup>。有研究结果显示,我国土壤中As浓度超过10  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的污染土地面积达到58万 $\text{km}^2$ ,有大量居民生活在高风险地区<sup>[8]</sup>。As具有高毒性,会损伤人体皮肤、造血和免疫等系统,甚至会引发癌症<sup>[9]</sup>。

稻米是我国主要粮食作物。食用被重金属污染的大米,会使重金属在人体内富集积累<sup>[10]</sup>,所以通过人为干预减少水稻对重金属的富集积累十分重要。因此,探究更多更合适的物质以缓解Cd、As对水稻的毒害尤为迫切。多胺是低分子量脂肪族含氮碱,植物代谢过程中普遍会产生多胺。多胺类物质可以通过其离子键和氢键与核酸、蛋白质带负电荷基团的磷脂和其他生物大分子结合,广泛影响着植物的生物活性<sup>[11]</sup>。亚精胺(Spd)是一种三胺化合物,研究发现其可以缓解因重金属胁迫产生的氧化胁迫、清除活性氧、减少重金属对水稻的毒害作用<sup>[12]</sup>。隋立华等<sup>[13]</sup>研究发现外源喷施Spd可以有效缓解臭氧对小麦的氧化胁迫作用。近年来外源Spd在修复外源胁迫对植物的影响方面发挥着重要作用,但其在水稻Cd、As复合污染方面的研究还鲜见报道。本文通过水培实验和大田实验,研究外源添加Spd对Cd、As胁迫下水稻幼苗生长的影响以及水稻对Cd、As吸收积累的变化规律,为Spd的实际应用提供理论依据,对缓解农田重金属污染以及粮食安全生产具有重要的指导意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

#### 1.1.1 水稻品种

水稻(*Oryza. sativa* L.)品种为中嘉早17,属籼型常规水稻,是由中选181与D001-2杂交选育而成的

水稻品种。在长江中下游作双季早稻种植,全生育期平均109.0 d。株型适中,株高88.4 cm,穗长18.0 cm,每穗总粒数122.5粒,结实率82.5%,千粒质量26.3 g。

#### 1.1.2 化学试剂及药品

实验所用Cd为氯化镉( $\text{CdCl}_2\cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$ ),分析纯;As为砷酸钠( $\text{Na}_3\text{AsO}_4\cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ),分析纯;亚精胺(Spd),化学名称为N-乙酰基-5-甲氧基色胺,分子式为 $\text{C}_7\text{H}_{19}\text{N}_3$ ,优级纯。

### 1.2 实验方案

#### 1.2.1 水培实验

Cd胁迫实验中,Cd处理浓度为0、10、30  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ,Spd处理浓度为0、100、250  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ,共9个处理;As胁迫实验中,As处理浓度为0、25、50  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ,Spd处理浓度为0、100、250  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ,共9个处理。每个处理重复3次。实验过程中选取饱满的水稻种子,用5%的 $\text{H}_2\text{O}_2$ 浸泡消毒15 min,然后用去离子水冲洗3~5遍,放置于恒温培养箱中(28  $^{\circ}\text{C}$ )避光催芽。挑选萌发的种子于人工气候箱中(温度28~30  $^{\circ}\text{C}$ ,光强200  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ,光照为16 h光/8 h暗,相对湿度65%)培养,1周后,从中选取长势均匀的幼苗4个一组包裹海绵移至多孔板上,放置于8 L的水培箱中,加入1/10的霍格兰营养液,配方<sup>[14]</sup>见表1,将pH调节至5.5。每日观察幼苗长势,待其长至三叶一心时,进行胁迫处理,营养液和处理液每3 d更换1次,胁迫处理2周。

#### 1.2.2 大田实验

在湖南省浏阳市蕉溪乡Cd、As复合污染农田进行小区实验,土壤pH 5.75、总Cd含量0.81  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、总As含量42.1  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,有机质含量31.4  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,阳离子交换量12.3  $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。在种植水稻的农田中设置小

表1 营养液配方( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )

Table 1 Nutrient solution formula( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )

| 化学药品 Chemicals                                                     | 浓度 Concentration |
|--------------------------------------------------------------------|------------------|
| $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$                | 945              |
| $\text{H}_3\text{BO}_3$                                            | 2.86             |
| $\text{MnCl}_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$                           | 1.81             |
| $\text{ZnSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$                           | 0.22             |
| $\text{CuSO}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O}$                           | 0.08             |
| $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ | 0.02             |
| $\text{KNO}_3$                                                     | 607.00           |
| $\text{NH}_4\cdot \text{H}_2\text{PO}_4$                           | 115.00           |
| $\text{MgSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$                           | 493.00           |
| $\text{FeSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$                           | 27.85            |
| $\text{EDTA-Na}_2$                                                 | 37.25            |

区,小区长3 m、宽2 m,面积为6 m<sup>2</sup>,小区之间设置隔离带。实验共设4个Spd处理,浓度分别为0(CK)、100、500、1 000  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ,每个处理3次重复,共12个小区,随机区组排列。在水稻扬花期进行叶面喷施Spd,喷施量为400 mL·m<sup>-2</sup>,连续喷施2 d,每日上午和下午各喷施1次。收获时随机选择长势均匀的水稻,带土整株采集,清洗后将水稻根系、茎秆、叶片及籽粒分开,烘干,分别进行As、Cd含量分析。

### 1.3 测定方法

苗高、根长和地上部鲜质量、根鲜质量的测定:从每个处理中选取长势均匀的水稻幼苗,分为地上部和根部两部分,吸干表面水分,10株为一组,称质量,取平均值。

水稻植株中Cd含量的测定采用混酸(HNO<sub>3</sub>:H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>,体积比为7:1)消解法消解,赶酸,定容至25 mL,过滤,用原子吸收分光光度计-石墨炉法(AnalytikJena, ZEEnit700)测定。

水稻植株中As含量的测定采用硝酸消解法消解,用双道原子荧光光度计(AFS-9760)测量。

### 1.4 数据处理与分析

#### 1.4.1 转移系数分析

转移系数(Translocation factor, TF)表示重金属As(Cd)在植物各种器官(根、茎、叶和籽粒)之间相对转移的能力,其计算公式:

$TF_{(\text{根-茎})}$ 表示根向茎转移As(或Cd)的能力,  
 $TF_{(\text{根-茎})} = \frac{\text{茎As(Cd)含量}}{\text{根As(Cd)含量}}$

$TF_{(\text{茎-叶})}$ 表示茎向叶转移As(或Cd)的能力,  
 $TF_{(\text{茎-叶})} = \frac{\text{叶As(Cd)含量}}{\text{茎As(Cd)含量}}$

$TF_{(\text{叶-籽粒})}$ 表示叶向籽粒转移As(或Cd)的能力,  
 $TF_{(\text{叶-籽粒})} = \frac{\text{籽粒As(Cd)含量}}{\text{叶As(Cd)含量}}$

#### 1.4.2 数据分析

采用Excel 2016和SPSS 21 统计分析软件对实验所得数据进行分析及差异显著性检验,对同一Spd处理浓度下的不同处理的数据进行单因素方差分析和Duncan多重比较。文中数据均为平均值±标准差。

## 2 结果与分析

### 2.1 外源Spd对Cd、As胁迫下水稻幼苗生长的影响

#### 2.1.1 对Cd胁迫下水稻苗生长的影响

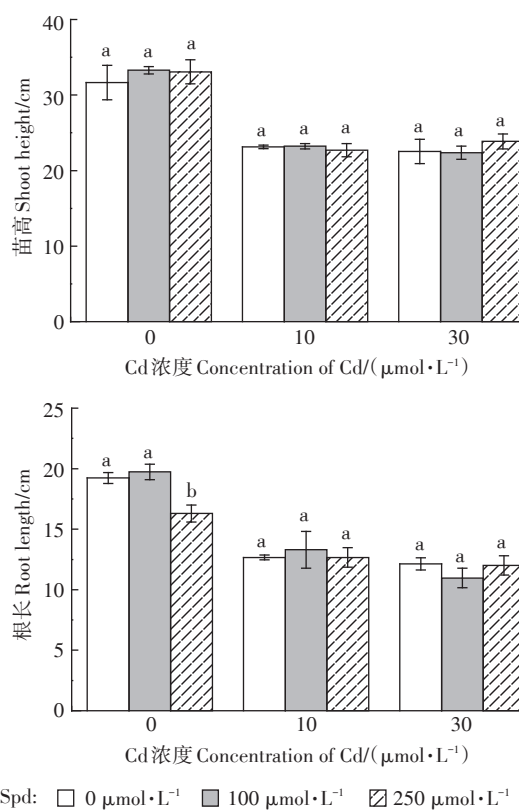
图1为Spd对Cd胁迫下水稻苗高和根长的影响。在10  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和30  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的Cd胁迫下,水稻幼苗的苗高和根长明显降低,说明Cd抑制水稻的生长。在水稻幼苗正常生长过程中,外源添加Spd不会显著

影响水稻幼苗的生长;在10  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和30  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的Cd胁迫条件下,外源添加Spd对苗高和根长也没有显著影响。

图2是Spd对Cd胁迫下水稻幼苗生物量的影响。在没有Cd胁迫的情况下,外源添加100  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的Spd能显著增加水稻幼苗地上部和地下部的生物量,茎叶和根的鲜质量分别增加了23.9%和69.0%。在10  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的Cd胁迫下,外源添加Spd对水稻幼苗地上部和地下部鲜质量影响不显著。在30  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的Cd胁迫下,外源添加250  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的Spd能显著增加根的鲜质量。

#### 2.1.2 对Cd胁迫下水稻苗吸收积累Cd的影响

图3是Spd对Cd胁迫下水稻吸收和积累Cd的影响。由于种子中残留Cd,因此在没有胁迫的情况下水稻中也有Cd检出,Cd胁迫浓度越高,水稻吸收积累的Cd也越多。外源添加Spd对Cd胁迫下水稻幼苗



不同小写字母表示同一重金属处理下添加不同浓度Spd的处理之间的差异显著( $P<0.05$ )。下同

Different lowercase letters indicate significant differences between treatments with different concentrations of spermidine in the same heavy metal treatment ( $P<0.05$ ). The same below

图1 Spd对Cd胁迫下水稻苗高和根长的影响

Figure 1 Effects of Spd on the height of shoots and length of roots under Cd stress

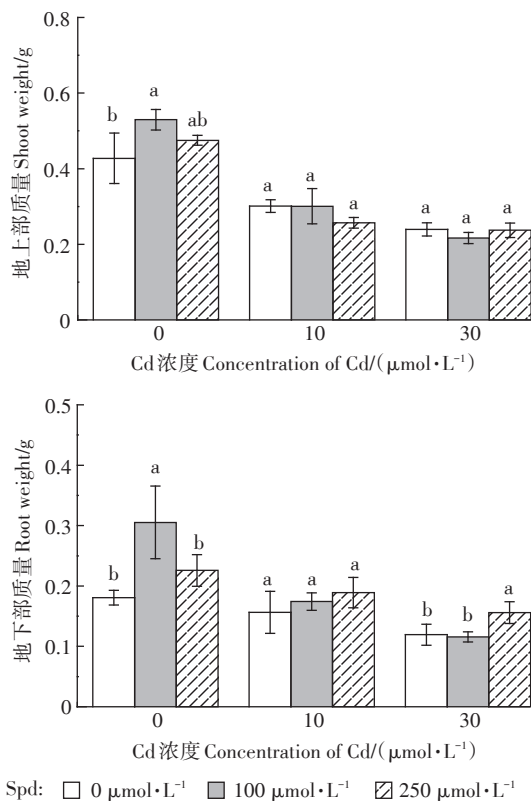


图2 Spd对Cd胁迫下水稻生物量的影响

Figure 2 Effects of Spd on rice biomass under Cd stress

地上部和地下部吸收积累Cd的影响不同。在10 μmol·L⁻¹和30 μmol·L⁻¹的Cd胁迫下,外源添加Spd对水稻地下部Cd吸收积累的影响不显著,但能显著降低水稻地上部对Cd的吸收积累,与未添加Spd组相比,外源添加250 μmol·L⁻¹的Spd分别使水稻地上部对Cd的吸收积累量降低58.0%和34.6%,阻止了水稻地下部Cd向地上部的转运累积。

### 2.1.3 对Cd胁迫下水稻苗根茎之间转移系数的影响

表2是Spd对Cd胁迫下水稻幼苗根茎之间转移系数的影响。在没有外源添加Cd时,外源添加250 μmol·L⁻¹的Spd可以显著促进Cd从根向地上部转移。在外源添加10 μmol·L⁻¹和30 μmol·L⁻¹的Cd时,外源添加250 μmol·L⁻¹的Spd可以显著降低水稻幼苗从地下部向地上部转移Cd。

### 2.1.4 对As胁迫下水稻苗生长的影响

图4为Spd对As胁迫下水稻苗高、根长的影响。在As的胁迫下,水稻幼苗的苗高和根长显著降低,说明As对水稻幼苗的生长有抑制作用。在没有As胁迫时,外源添加250 μmol·L⁻¹的Spd显著抑制了水稻根系的生长,抑制率为15.2%。在25 μmol·L⁻¹和50 μmol·L⁻¹的As胁迫下,外源添加Spd对水稻幼苗根系

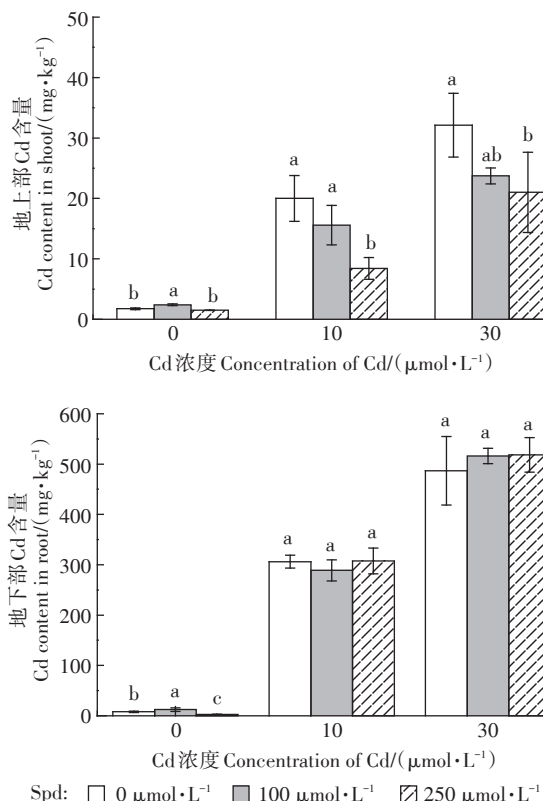


图3 Spd对Cd胁迫下水稻吸收积累Cd的影响

Figure 3 Effects of Spd on Cd uptake and accumulation under Cd stress

表2 不同浓度的Spd处理对水稻幼苗根茎之间Cd转运系数的影响

Table 2 Effects of different concentrations of Spd on Cd transfer coefficient of rice seedlings

| Spd 浓度 Concentration of Spd/(μmol·L⁻¹) | Cd 浓度 Concentration of Cd/(μmol·L⁻¹) |             |              |
|----------------------------------------|--------------------------------------|-------------|--------------|
|                                        | 0                                    | 10          | 30           |
| 0                                      | 0.22±0.04b                           | 0.07±0.01a  | 0.07±0.02a   |
| 100                                    | 0.20±0.45b                           | 0.05±<0.01a | 0.05±<0.01ab |
| 250                                    | 0.53±0.11a                           | 0.03±<0.01b | 0.04±0.01b   |

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著(P&lt;0.05)。下同。

Note: The different lowercase letters in a column indicate significant differences among treatments at P&lt;0.05 levels. The same below.

的生长无显著影响;当As胁迫浓度为50 μmol·L⁻¹时,外源添加250 μmol·L⁻¹的Spd显著抑制了水稻幼苗的苗高,抑制率为7.6%。

图5为Spd对As胁迫下水稻生物量的影响。在As胁迫下,水稻幼苗的地上部和地下部的鲜质量显著降低,As胁迫抑制水稻生长降低了其生物量。在没有As胁迫的情况下,外源添加100 μmol·L⁻¹的Spd能显著增加水稻幼苗的生物量,使茎叶和根系的鲜质

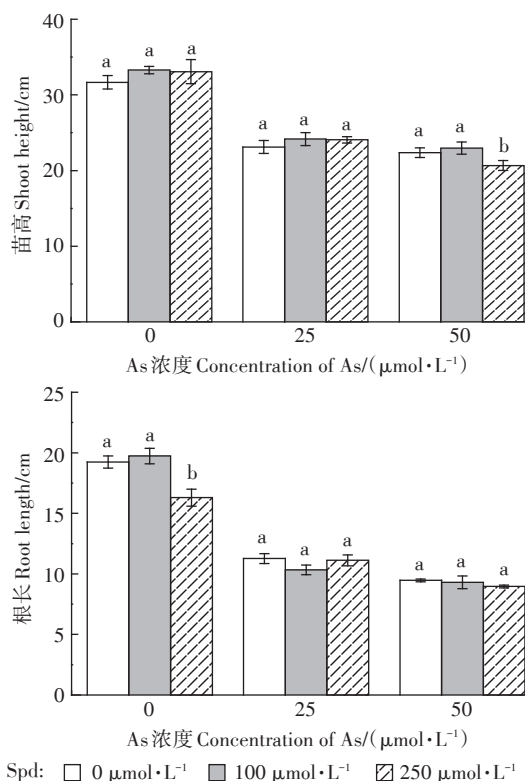


图4 Spd对As胁迫下水稻苗高和根长的影响

Figure 4 Effects of Spd on the height of shoots and length of roots under As stress

量分别增加了23.9%和69.0%。在50  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的As胁迫下,外源添加250  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的Spd使水稻幼苗地上部鲜质量显著降低了36.4%。

#### 2.1.5 对As胁迫下水稻苗吸收积累As的影响

图6是Spd对As胁迫下水稻幼苗吸收和积累As的影响。在未添加As的处理中水稻幼苗及根系中均无As检出,随着As处理浓度的升高,水稻吸收积累的As增多。在25  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的As胁迫下,外源添加250  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的Spd可显著降低水稻幼苗根系对As的吸收累积,降低幅度为28.3%;在50  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的As胁迫下,外源添加Spd对水稻幼苗根系吸收累积As无显著影响。在As胁迫条件下,外源添加100  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和250  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的Spd均能减少水稻地上部对As的吸收积累。在25  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的As胁迫下,与未添加Spd组相比,外源添加100  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的Spd使水稻地上部对As吸收积累量降低了47.8%;在50  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的As胁迫下,外源添加100  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和250  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的Spd分别使水稻地上部对As吸收积累量降低了19.0%和20.1%。

#### 2.1.6 对As胁迫下水稻苗根茎之间转移系数的影响

表3是Spd对As胁迫下水稻幼苗根茎之间的转

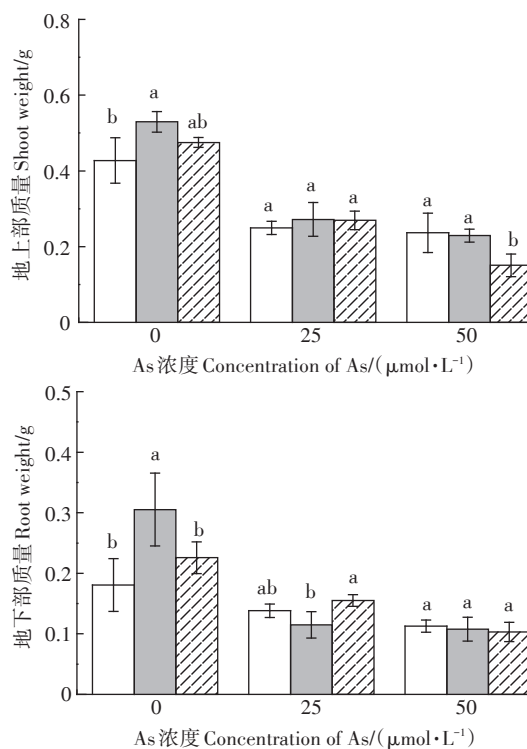


图5 Spd对As胁迫下水稻生物量的影响

Figure 5 Effects of Spd on rice biomass under As stress

移系数的影响。从表中数据可知,外源添加Spd对水稻幼苗根茎之间的转移系数影响不显著。

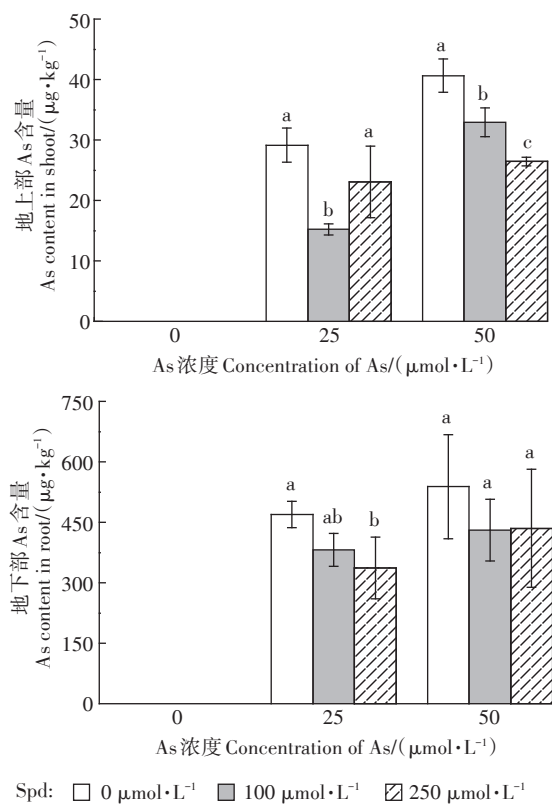
## 2.2 外源Spd对Cd、As污染农田中水稻生长的影响

### 2.2.1 外源喷施Spd对水稻吸收积累Cd的影响

为了进一步验证外源添加Spd对水稻吸收累积Cd、As的影响,进行了大田实验。图7是外源Spd对水稻各器官吸收累积Cd的影响情况,可以看出,不同浓度的Spd对水稻各器官Cd含量影响不同。与CK处理相比,外源添加1 000  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的Spd使水稻根系、叶和籽粒中Cd的含量,分别显著降低了25.8%、51.9%和37.4%;外源添加500  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的Spd使水稻叶片中的Cd含量,降低了47.4%;而添加100  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的Spd提高了水稻籽粒中Cd的含量,与CK相比提高了30.4%,这说明不同浓度的Spd对Cd在水稻体内的转运累积产生了不同的影响。因此,要选择合适的浓度,才能使Spd作为液面肥喷施达到降Cd效果。

### 2.2.2 外源喷施Spd对水稻吸收积累As的影响

图8为不同浓度的Spd对水稻各器官As含量的影响情况。由图可知,不同浓度的Spd对水稻各器官As含量影响不同。与CK处理相比,施用不同浓度的Spd均没有显著影响水稻籽粒中的As含量;外源添加



Spd: □ 0  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  ■ 100  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  ▨ 250  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$

图6 Spd对As胁迫下水稻吸收积累As的影响

Figure 6 Effects of Spd on As uptake and accumulation under As stress

表3 不同浓度的Spd处理对水稻幼苗根茎之间As转运系数的影响

Table 3 Effects of different concentrations of Spd on As transfer coefficient of rice seedlings

| Spd 浓度<br>Concentration of Spd/<br>$(\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1})$ | As 浓度<br>Concentration of As/<br>$(\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1})$ |            |            |
|------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|------------|------------|
|                                                                        | 0                                                                    | 25         | 50         |
| 0                                                                      | —                                                                    | 0.06±0.01a | 0.08±0.02a |
| 100                                                                    | —                                                                    | 0.04±0.06a | 0.08±0.02a |
| 250                                                                    | —                                                                    | 0.07±0.03a | 0.07±0.02a |

1 000  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的Spd使水稻茎和根中As的含量分别显著降低了23.9%和31.2%,而提高了水稻叶片中As的含量,这可能是因为喷施外源Spd提高了水稻中As从根系向叶片中的转运。

### 2.2.3 外源Spd对污染农田水稻转移系数的影响

表4是Spd对污染农田中水稻Cd转移系数的影响。从表中数据可知,外源喷施Spd可以提高水稻根茎之间Cd的转移系数,促进Cd从根部向茎部转移,降低茎叶之间Cd的转运系数,降低Cd从茎向叶的转移,但施用500  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和1000  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的Spd时促

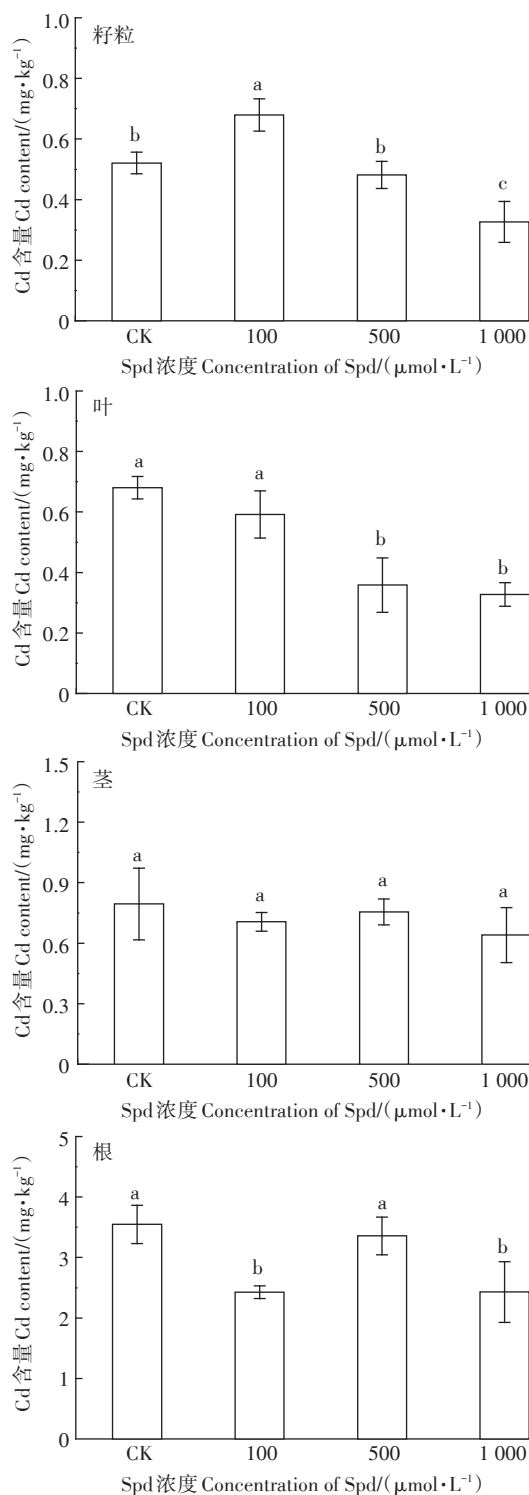


图7 外源喷施不同浓度Spd对水稻植株吸收积累Cd的影响

Figure 7 Effects of exogenous spermidine with different concentrations on the absorption and accumulation of Cd in rice plants

进了Cd从叶向籽粒的转移。

表5是Spd对污染农田中水稻As转移系数的影响。由表中数据可知,外源喷施Spd对根茎之间和茎

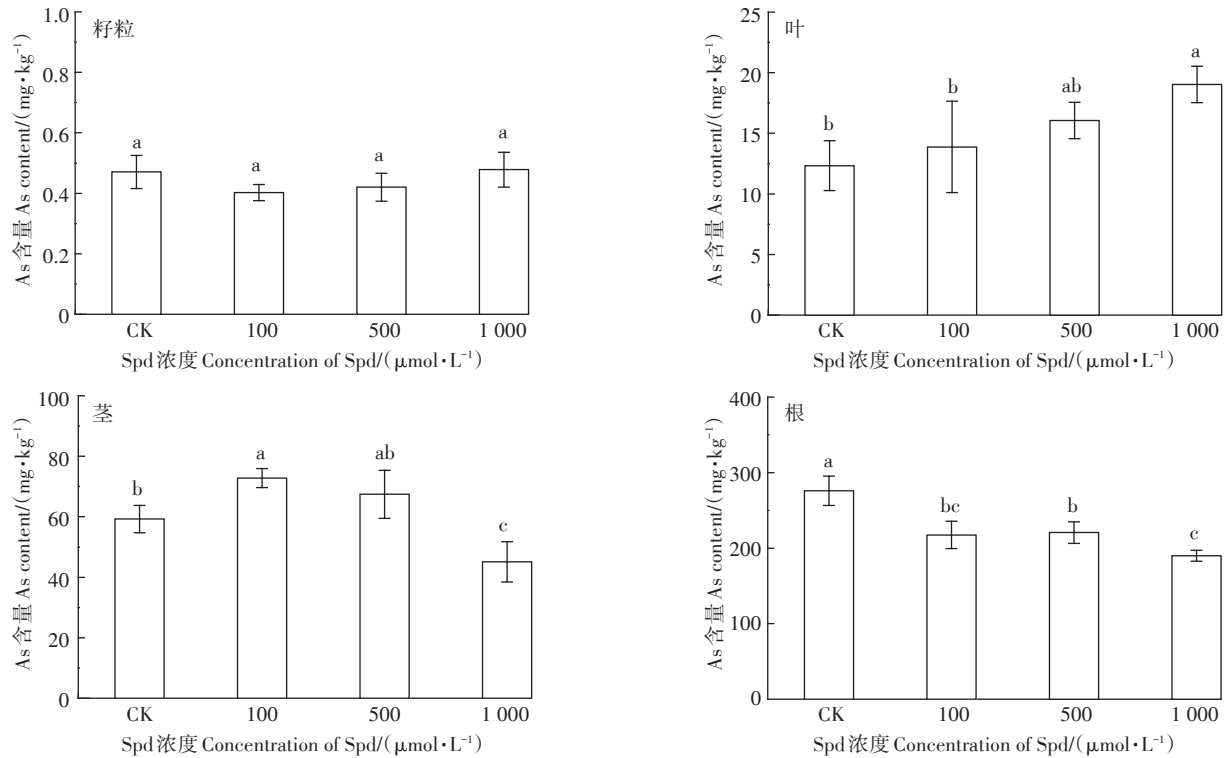


图8 外源喷施不同浓度Spd对水稻植株吸收积累As的影响

Figure 8 Effects of exogenous spermidine with different concentrations on the absorption and accumulation of As in rice plants

叶之间的转移系数影响不显著,外源喷施 500  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  和 1 000  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  的 Spd 可以显著降低水稻叶和籽粒之间的转移系数,减少籽粒对 As 的吸收积累。

3 讨论

3.1 外源施用 Spd 对水稻生长的影响

人类生产活动使得农田中 Cd、As 污染严重,水稻在生长过程中,其根系在吸收营养及水分的同时不可避免地会吸收土壤中的 Cd、As,这不但会损伤水稻的器官正常功能,还会抑制根系生长,进而影响稻谷的产量和品质<sup>[15]</sup>。有研究表明,多胺是参与植物在生物胁迫和非生物胁迫反应信号传导中的关键化合物,可以调节植物的生长发育<sup>[16]</sup>。Spd 作为一种重要的多胺

类化合物,研究其对植物在胁迫条件下生长发育的调节意义重大。水稻的根长、苗高、根鲜质量和叶鲜质量等可用于评价 Spd 对 Cd、As 胁迫下水稻生长的影响。在 Cd、As 胁迫下,外源添加一定浓度的 Spd 增加了水稻的根质量,从而在一定程度上提高了水稻对 Cd、As 的耐受性。施用 Spd 并没有缓解 Cd、As 诱导的水稻根长的下降趋势,这可能是因为外源添加 Spd 促使水稻长出更多的侧根和细根。这和 Groppa 等<sup>[17]</sup>观察到的结果相似,其研究表明 Spd 作为信号分子促进了 Cd 胁迫下小麦根系的生长,但这和 Choudhary 等<sup>[18]</sup>的研究结果不一致。Spd 对根系生长的不同影响可能与不同的植物种类、不同的金属胁迫以及不同的实验方法有关,这需要进一步的研究来证明。

表4 不同浓度的 Spd 处理对农田水稻 Cd 转运系数的影响  
Table 4 Effects of different concentrations of Spd on As transport coefficient in paddy rice

| Spd 浓度 Concentration of Spd/( $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ) | TF <sub>(根-茎)</sub> | TF <sub>(茎-叶)</sub> | TF <sub>(叶-籽粒)</sub> |
|-------------------------------------------------------------------|---------------------|---------------------|----------------------|
| 0(CK)                                                             | 0.20±0.05b          | 1.17±0.18a          | 0.90±0.38a           |
| 100                                                               | 0.29±0.05ab         | 0.86±0.12b          | 1.40±0.05a           |
| 500                                                               | 0.23±0.07ab         | 0.35±0.16c          | 1.03±0.43a           |
| 1 000                                                             | 0.31±0.12a          | 0.52±0.23c          | 0.97±0.42a           |

表5 不同浓度的 Spd 处理对农田水稻 As 转运系数的影响  
Table 5 Effects of different concentrations of Spd on As transport coefficient in paddy rice

| Spd 浓度 Concentration of Spd/( $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ) | TF <sub>(根-茎)</sub> | TF <sub>(茎-叶)</sub> | TF <sub>(叶-籽粒)</sub> |
|-------------------------------------------------------------------|---------------------|---------------------|----------------------|
| 0(CK)                                                             | 0.32±0.12a          | 0.19±0.05a          | 0.04±0.01a           |
| 100                                                               | 0.37±0.07a          | 0.19±0.05a          | 0.03±0.01ab          |
| 500                                                               | 0.37±0.10a          | 0.21±0.06a          | 0.03±0.01b           |
| 1 000                                                             | 0.27±0.20a          | 0.43±0.25a          | 0.03±<0.01b          |

### 3.2 外源喷施Spd对水稻吸收累积Cd、As的影响

在Cd胁迫下水稻的生长会受到阻碍,生物量、细胞活力显著下降<sup>[19]</sup>。Ullah等<sup>[20]</sup>研究发现,Cd胁迫下大麦的生长受到抑制,且矿质营养素含量显著降低。Cd中毒会导致植物发育迟缓、产生萎黄病,而且Cd还会干扰植物对营养元素(Ca、Mg、P和K)和水的吸收、运输和利用<sup>[21]</sup>。当Cd进入细胞质时,植物体内部分金属结合配体被激活,例如硫代谢相关系统,从而导致形成重要的络合剂。多胺作为Cd胁迫反应信号传递的关键化合物,同时也可以作为金属螯合剂。有研究表明,外源施用Spd可以缓解干旱胁迫对玉米幼苗光合作用的抑制<sup>[22]</sup>,增强结缕草(*Zoysia japonica* Steud)对盐胁迫的耐受性<sup>[23]</sup>,提高绦柳(*Salix matsudana*)对Cd的耐受性<sup>[24]</sup>。本研究发现外源施用一定浓度的Spd可适当缓解Cd对水稻生长的抑制情况,可缓解Cd从水稻地下部到地上部的转运积累,降低水稻籽粒中的Cd,提高水稻的抗逆性,并且外源喷施Spd可以降低Cd向水稻籽粒的转移系数。这说明经Spd处理后,水稻的Cd耐受性增强,可能是因为:(1)Cd处理可以有效诱导氧化应激,诱导了Spd的合成<sup>[25]</sup>,Spd作为金属螯合剂<sup>[26]</sup>可以螯合重金属,并被隔离到液泡中<sup>[27]</sup>,有效降低了细胞质中游离金属的浓度;(2)Spd对植物抗氧化系统的调节作用,以及与植物内源激素的相互作用<sup>[25]</sup>,可刺激植物产生更多的植物螯合素,从而螯合重金属,降低细胞质中游离金属的浓度。Tang等<sup>[28]</sup>研究发现,在Cd胁迫下对香菜外源喷施一定浓度的Spd可以有效减少香菜对Cd的吸收积累。Rady等<sup>[29]</sup>研究发现,外源施用Spd可以缓解Cd对小麦的胁迫作用,提高小麦的产量。因此可以通过在水稻生长期外源添加一定浓度的Spd,在提高水稻幼苗抗逆性的同时还能减少水稻苗期对Cd的吸收积累量。

As会引起碳水化合物代谢的紊乱,干扰ATP的形成,对植物的生长产生毒害作用,还可通过改变酶的活性和破坏细胞内的能量流引起可溶性糖的积累<sup>[30]</sup>。As易与巯基结合,从而破坏蛋白质的功能<sup>[31]</sup>。Shri等<sup>[32]</sup>研究发现,As胁迫下水稻的生长会受到抑制,生物量会减少。水培实验表明,随着As浓度的提高,水稻的生长受到显著抑制,水稻的苗高、根长以及生物量显著降低。在水培实验中,外源添加一定浓度的Spd对提高As胁迫下水稻幼苗生物量无显著效果,但是却显著降低了As在水稻地上部的含量,缓解了As从根系向地上部的转运。在大田实验中,对水稻喷

施Spd没有显著降低水稻籽粒中As的含量,这可能是因为As是以亚砷酸盐的形式被植物吸收,外源添加Spd不能有效螯合砷酸盐,阻隔砷在水稻体内转运积累,但能够降低As从叶向籽粒的转移系数,降低籽粒对As的吸收积累,提高粮食安全性。因此,要根据重金属以及植物的属性,合理对Spd进行利用。

## 4 结论

(1)外源施用Spd可缓解Cd胁迫对水稻生长的抑制,降低水稻籽粒中Cd含量,缓解Cd从地下部到地上部的转运积累,提高水稻的抗Cd性。然而,Spd的分布、合成以及在提高水稻对Cd耐受性中的精确作用还需要进一步研究。

(2)在As胁迫下,外源施用Spd可显著降低水稻苗期茎和根中的As含量,对降低水稻籽粒中As含量效果不显著。因此,要根据不同植物、不同重金属性质,合理使用Spd,才能达到显著效果。

### 参考文献:

- [1] 张静. 浅析土壤污染现状与防治措施[J]. 农业与技术, 2020, 40(11):130-132.  
ZHANG Jing. Analysis of soil pollution status and prevention measures [J]. *Agriculture and Technology*, 2020, 40(11):130-132.
- [2] 黄益宗,郝晓伟,雷鸣,等. 重金属污染土壤修复技术及其修复实践[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(3):409-417.  
HUANG Yi-zong, HAO Xiao-wei, LEI Ming, et al. The remediation technology and remediation practice of heavy metals-contaminated soil [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(3):409-417.
- [3] 邓新,温璐璐,迟鑫妹. 镉对人体健康危害及防治研究进展[J]. 中国医疗前沿, 2010, 5(10):4-5.  
DENG Xin, WEN Lu-lu, CHI Xin-shu. Cadmium hazards to human health and the prevention and treatment research New[J]. *National Medical Frontiers of China*, 2010, 5(10):4-5.
- [4] 綦峥,齐越,杨红,等. 土壤重金属镉污染现状、危害及治理措施[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(7):2286-2294.  
QI Zheng, QI Yue, YANG Hong, et al. Status, harm and treatment measures of heavy metal cadmium pollution in soil[J]. *Journal of Food Safety and Quality*, 2020, 11(7):2286-2294.
- [5] 蔡嘉旖,张文丽. 人群暴露环境镉污染与健康危害的流行病学研究进展[J]. 环境卫生学杂志, 2019, 9(6):621-627.  
CAI Jia-yi, ZHANG Wen-li. Advances of epidemiological study on population exposure and health hazard of environmental cadmium pollution[J]. *Journal of Environmental Hygiene Dec*, 2019, 9(6):621-627.
- [6] 练旺民,徐薇,孟卓玲,等. 表油菜素内酯在缓解水稻砷毒害中的作用[J]. 江苏农业学报, 2018, 34(6):1267-1275.  
LIAN Wang-min, XU Wei, MENG Zhuo-ling, et al. Effects of supplementation of epibrassinolide on alleviation of arsenic stress in rice[J].

- Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2018, 34(6):1267-1275.
- [7] 魏复盛, 陈静生, 吴燕玉, 等. 中国土壤环境背景值研究[J]. 环境科学, 1991, 12(4):12-19, 94.
- WEI Fu-sheng, CHEN Jing-sheng, WU Yan-yu, et al. Study on soil environmental background content in China[J]. *Environmental Science*, 1991, 12(4):12-19, 94.
- [8] Berg M, Tran H C, Nguyen T C, et al. Arsenic contamination of ground water and drinking water in Vietnam: A human health threat[J]. *Environment Science & Technology*, 2001, 35(13):2621-2626.
- [9] 包稚群, 丘克强. 关于我国砷污染现状与治理砷建议[J]. 云南冶金, 2019, 48(3):60-64.
- BAO Zhi-qun, QIU Ke-qiang. The current status and treatment suggestions of arsenic pollution in China[J]. *Yunnan Metallurgy*, 2019, 48(3):60-64.
- [10] Qian Y, Chen C, Zhang Q, et al. Concentrations of cadmium, lead, mercury and arsenic in Chinese market milled rice and associated population health risk[J]. *Food Control*, 2010, 21(12):1757-1763.
- [11] 刘宽灿, 梁秋芬, 赵丽红, 等. 多胺在植物生长发育过程中的生理作用[J]. 氨基酸和生物资源, 2005, 27(1):22-26.
- LIU Kuan-can, LIANG Qiu-fen, ZHAO Li-hong, et al. Physiological roles of polyamines in plant growth and development[J]. *Amino Acids & Biotic Resources*, 2005, 27(1):22-26.
- [12] 刘书锦, 黄益宗, 保琼莉, 等. 外源亚精胺对  $As^{5+}$  胁迫下水稻种子萌发和 As 吸收积累的影响[J]. 环境科学, 2020, 41(3):1505-1512.
- LIU Shu-jin, HUANG Yi-zong, BAO Qiong-li, et al. Effects of Exogenous spermidine on seed germination and As uptake and accumulation of rice under  $As^{5+}$  stress[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(3):1505-1512.
- [13] 隋立华, 黄益宗, 王玮, 等. 臭氧胁迫下外源喷施亚精胺和 EDU 对小麦生理指标的影响[J]. 生态毒理学报, 2012, 7(1):71-78.
- SUI Li-hua, HUANG Yi-zong, WANG Wei, et al. Effects of spermidine and EDU on physiological indexes of wheat under ozone stress[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2012, 7(1):71-78.
- [14] 王丙烁, 黄益宗, 李娟, 等. 镉胁迫下不同改良剂对水稻种子萌发和镉吸收积累的影响[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(4):746-755.
- WANG Bing-shuo, HUANG Yi-zong, LI Juan, et al. Effects of different amendments on seed germination and cadmium uptake and accumulation in rice seedlings under cadmium stress[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(4):746-755.
- [15] Ronzan M, Piacentini D, Fattorini L, et al. Cadmium and arsenic affect root development in *Oryza sativa* L. negatively interacting with auxin[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2018, 151:64-75.
- [16] 王学, 施国新, 马广岳, 等. 外源亚精胺对苕菜抗  $Hg^{2+}$  胁迫能力的影响[J]. 植物生理与分子生物学学报, 2004, 30(1):69-74.
- WANG Xue, SHI Guo-xin, MA Guang-yue, et al. Effect of exogenous spermidine on resistance of *Nymphoides peltatum* to  $Hg^{2+}$  stress[J]. *Journal of Plant Physiology and Molecular Biology*, 2004, 30(1):69-74.
- [17] Groppa M D, Rosales E P, Iannone M F, et al. Nitric oxide, polyamines and Cd-induced phytotoxicity in wheat roots[J]. *Phytochemistry*, 2008, 69:2609-2615.
- [18] Choudhary S P, Kanwar M, Bhardwaj R, et al. Chromium stress mitigation by polyamine-brassinosteroid application involves phytohormonal and physiological strategies in *Raphanus sativus* L. [J]. *PLoS ONE*, 2012, 7(3):1-11.
- [19] Singh P, Shah K. Evidences for reduced metal-uptake and membrane injury upon application of nitric oxide donor in cadmium stressed rice seedlings[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2014, 83:180-184.
- [20] Ullah H A, Javed F, Wahid A, et al. Alleviating effect of exogenous application of ascorbic acid on growth and mineral nutrients in cadmium stressed barley (*Hordeum vulgare*) seedlings[J]. *International Journal of Agriculture and Biology*, 2016, 18(1):73-79.
- [21] Das P, Samantaray S, Rout G R. Studies on cadmium toxicity in plants: A review[J]. *Environmental Pollution*, 1997, 98(1):29-36.
- [22] Li L J, Gu W R, Li J, et al. Exogenously applied spermidine alleviates photosynthetic inhibition under drought stress in maize (*Zea mays* L.) seedlings associated with changes in endogenous polyamines and phytohormones[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2018, 129:35-35.
- [23] Li S C, Jin H, Zhang Q. The effect of exogenous spermidine concentration on polyamine metabolism and salt tolerance in *Zoysia japonica* Steud) subjected to short-term salinity stress[J]. *Front Plant Sci*, 2016, 7:1221-1233.
- [24] Tang C, Zhang R, Hu X, et al. Exogenous spermidine elevating cadmium tolerance in *Salix matsudana* involves cadmium detoxification and antioxidant defense[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2019, 4:305-315.
- [25] Anjum N A, Hasanuzzaman M, Hossain M A, et al. Jacks of metal/metalloid chelation trade in plants: An overview[J]. *Front Plant Sci*, 2015, 6:192-208.
- [26] Lomozik L, Gasowska A, Bregier J R, et al. Coordination chemistry of polyamines and their interactions in ternary systems including metal ions, nucleosides and nucleotides[J]. *Coord Chem Rev*, 2005, 249:2335-2350.
- [27] Pal M, Csavas G, Szalai G, et al. Polyamines may influence phytochelatin synthesis during Cd stress in rice[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2017, 340:272-280.
- [28] Tang C F, Zhang R Q, Wen S Z, et al. Effects of exogenous spermidine on subcellular distribution and chemical forms of cadmium in *Typha latifolia* L. under cadmium stress[J]. *Water Science and Technology*, 2009, 59(8):1487-1493.
- [29] Rady M M, Ahmed S M A, Elyazal M A S, et al. Alleviation of cadmium stress in wheat by polyamines[M]//Cadmium Tolerance in Plants, 2019, 463-496.
- [30] Geng C N, Zhu Y G, Hu Y, et al. Arsenate causes differential acute toxicity to two P-deprived genotypes of rice seedlings (*Oryza sativa* L.) [J]. *Plant and Soil*, 2006, 279(1/2):297-306.
- [31] Tripathi R D, Srivastava S, Mishra S, et al. Arsenic hazards: Strategies for tolerance and remediation by plants[J]. *Trends in Biotechnology*, 2007, 25(4):158-165.
- [32] Shri M, Kumar S, Chakrabarty D, et al. Effect of arsenic on growth, oxidative stress, and antioxidant system in rice seedlings[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2009, 72(4):1102-1110.