

DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2019061704

陈俊彤, 谢恩耀, 金璘. 五酸钾对酸雨胁迫下茼蒿的防护[J]. 环境化学, 2020, 39(10): 2666-2672.

CHEN Juntong, XIE Enyao, JIN Jin. Potassium pyridine-2,3,4,5,6-pentacarboxylate protects *Artemisia selengensis* under acid rain stress[J]. Environmental Chemistry, 2020, 39(10): 2666-2672.

## 五酸钾对酸雨胁迫下茼蒿的防护\*

陈俊彤<sup>1</sup> 谢恩耀<sup>1,2</sup> 金璘<sup>1\*\*</sup>

(1. 苏州科技大学化学生物与材料工程学院, 苏州, 215009; 2. 上海启甄环境科技有限公司环境行为部, 上海, 201403)

**摘要** 为了探究新型化合物五酸钾对酸雨胁迫下植物抗逆性的影响, 本实验通过模拟酸雨环境和叶面喷施五酸钾溶液对盆栽茼蒿进行相关处理. 结果表明, 茼蒿幼苗在 pH=3.0 酸雨的胁迫下, 其相关的生理指标 CAT 活性、PRO 含量、MDA 含量、质膜透性及氧自由基产生速率均有着较为显著地提升, 而根系活力及叶绿素含量呈现出较为明显地下降趋势; 喷施 10 mg·L<sup>-1</sup> 五酸钾溶液后, 茼蒿幼苗叶绿素含量及根系活力下降的趋势得到缓解, 且在部分时间段出现升高趋势, CAT 活性、质膜透性、PRO 含量、MDA 含量和氧自由基产生速率显著降低. 喷施 10 mg·L<sup>-1</sup> 新型化合物五酸钾溶液可有效改善酸雨胁迫对茼蒿幼苗生理功能产生的伤害, 对酸雨胁迫下茼蒿幼苗的损伤起到明显地防护作用.

**关键词** 茼蒿幼苗, 五酸钾, 酸雨, 防护, 生理指标.

## Potassium pyridine-2,3,4,5,6-pentacarboxylate protects *Artemisia selengensis* under acid rain stress

CHEN Juntong<sup>1</sup> XIE Enyao<sup>1,2</sup> JIN Jin<sup>1\*\*</sup>

(1. School of Chemistry, Biological and Materials Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou, 215009, China; 2. Shanghai Qizhen Environmental Technology Co., Ltd, Shanghai, 201403, China)

**Abstract:** An investigation on plant resistance under simulated acid rain stress was carried out in this paper, where the plant *Artemisia selengensis* seedling was treated by a novel compound potassium pyridine-2,3,4,5,6-pentacarboxylate. As a experiment, some physiological indexes of *Artemisia selengensis* seedlings without any treatment were also studied. The results showed that they were obviously improved for CAT, PRO, MDA, intracellular plasma membrane permeability and free radical generation rate, while a significant decline was found in the root activity and chlorophyll content under acid rain stress (pH=3). However, a totally different phenomenon was observed when they were sprayed with 10 mg·L<sup>-1</sup> potassium pyridine-2,3,4,5,6-pentacarboxylate aqueous solution and exposed to the same acid rain stress. In that case, the chlorophyll content and root activity has been alleviated, and some time were increased, while the physiological indexes, such as CAT, PRO, MDA, intracellular plasma membrane permeability and the rate of oxygen free radical generation was significantly reduced. It suggested that spraying the new compound potassium pyridine-2,3,4,5,6-pentacarboxylate aqueous solution can improve the acid rain caused-damage

2019年6月17日收稿(Received: June 17, 2019).

\* 苏州市科技计划项目(SYN201413)和江苏省教育厅“高等学校大学生实践创新训练”(601630002)资助.

**Supported by** the Suzhou Science and Technology Plan Projects (SYN201413) and Jiangsu Provincial Department of Education “College Students Practice Innovation Training” (601630002).

\* \*\* 通讯联系人, Tel: 13862041395, E-mail: 871564458@qq.com

**Corresponding author**, Tel: 13862041395, E-mail: 871564458@qq.com

which was mainly on the physiological function of *Artemisia selengensis* seedlings, it was concluded that potassium pyridine-2,3,4,5,6-pentacarboxylate can protect plants from harming by acid rain stress.

**Keywords:** *Artemisia selengensis* seedlings, potassium pyridine-2,3,4,5,6-pentacarboxylate, acid rain, protection, physiological index.

目前我国已经成为了世界第三大酸雨灾害地区,据不完全统计,近年来我国酸雨降水面积逼近我国国土总面积的 40%<sup>[1]</sup>.酸雨问题已经对我国的生态环境产生了较大压力,其对农作物生长带来的危害更甚.植物幼苗期对降水的理化条件极为敏感,酸雨会对其生长发育过程起到阻碍作用.当降水的 pH 值达到植物的承受阈值时,会对植物造成严重地伤害,同时酸雨亦会对降水区域土壤的理化性质产生一定影响,从而间接地影响本地区各种植物的生长代谢活动<sup>[2]</sup>.

大量研究表明,酸雨区域植物生长发育过程普遍受阻.王艾平等<sup>[3]</sup>的研究结果表明,水稻种子萌发过程中贮藏消耗率与物质运转率,在 pH 5 酸雨条件下便会明显受阻,当 pH 值进一步降低到 2 时,水稻种子便无法萌发.酸雨胁迫环境不仅对植物的生长发育产生极为严重地阻碍,同时影响植物幼苗的生理活动及生化指标.YU 等<sup>[4]</sup>的早期研究结果显示,黄瓜幼苗遭受酸雨胁迫后,叶片中的抗氧化系统遭受损伤,最终导致产量下降,其光合速率及光合量子的平均产量都有明显地降低,丙二醛含量(MDA)及超氧化物歧化酶活性(SOD)有着较为显著地提升.随着研究的不断深入,目前有关酸雨胁迫对植物发育过程及生理生化指标的研究已有很多,但至今仍未有成熟可靠的技术用来减轻酸雨对植物造成的危害.

相较于基因工程、温室育种等技术,采用化学防控对酸雨胁迫所造成的危害进行修复更具可行性,简单便捷、即用即显、便于规模化推广,化学防控酸雨危害在近几年受到了普遍重视.

新型化合物—吡啶-2,3,4,5,6-五甲酸二钾(下文简述为五酸钾),是通过乙酰乙酸乙酯和乙醛在有机胺催化下发生反应,再与氨反应、硝酸氧化、KOH 水解、KMnO<sub>4</sub> 氧化等一系列反应合成的一种低成本化合物,该化合物含有丰富的柠檬酸根和大量的 K<sup>+</sup>.

茼蒿又被称为皇帝菜,气香味美,在江浙沪片区有着悠久地种植历史.本文以苏州地产茼蒿为研究对象,设计并研究了酸雨胁迫条件下五酸钾对其的防护作用,为新型化合物五酸钾的推广及应用提供实验依据,填补五酸钾在实际应用中的空白,为后续扩展五酸钾的应用范围及应用方式提供参考.

## 1 材料及方法 (Materials and methods)

### 1.1 实验材料

酸雨配制参照张耀民等<sup>[5]</sup>方法,SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>:NO<sub>3</sub><sup>-</sup>=4.7:1(V:V)配制成 pH=1 的母液备用,根据研究需要添加少量磷酸盐缓冲液配制成 pH 3.0 的酸雨,并用 pH S-29A 酸度计校准.

供试蔬菜—茼蒿幼苗,由苏州蔬菜研究所提供,培育温度为(25±1)℃,光强为 2000 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>,光暗比 10 h/14 h,培育过程中定期添加 Hoagland 培养液,幼苗培养至 15 d 备用.

五酸钾(potassium pyridine-2,3,4,5,6-pentacarboxylate),由苏州科技大学化学生物与材料工程学院自行合成并获专利,实验设置见表 1.

表 1 实验组设置方法

Table 1 Grouping of experimental methods

时间 Time	对照组 Control group	酸雨组 Acid rain group	防护组 Protection group
第一天	蒸馏水	蒸馏水	10 mg·L <sup>-1</sup> 五酸钾
第二天	蒸馏水	酸雨(pH 3.0)	酸雨(pH 3.0)

五酸钾的喷施浓度由前期预实验叶绿素含量和质膜透性两个指标比对后确定,其最佳浓度为 10 mg·L<sup>-1</sup>.在溶液配置过程中加入 1—2 滴吐温-80 以增强喷施溶液的附着力,喷施用量以叶面滴液为

限.喷施酸雨 24 h 后开始计时,分别测定第 1 d、6 d、11 d、16 d 茼蒿幼苗的生理指标.每种处理设立 3 组平行.

## 1.2 测定指标及方法

TTC 法<sup>[6]</sup>测定根系活力;SPAD502 手持式叶绿素测定仪<sup>[7]</sup>测定叶绿素含量;电导率法<sup>[8]</sup>测定质膜透性;紫外吸收法<sup>[9]</sup>测定过氧化氢酶活性(CAT);巴比妥酸法<sup>[10]</sup>测定丙二醛含量(MDA);茚三酮法<sup>[10]</sup>测定脯氨酸含量(PRO);羟胺法<sup>[10]</sup>测定氧自由基产生速率.

## 1.3 数据分析

数据均取用 3 组平行样均值统计,SPSS 软件进行统计分析.

# 2 结果与讨论(Results and discussion)

## 2.1 五酸钾对酸雨胁迫下茼蒿幼苗根系活力的影响

根系是植物生长发育过程的核心器官,其承担固着、传递养分的重任,因此对其活力的研究具有重要的意义<sup>[11]</sup>.图 1 所示,3 组实验中茼蒿根系活力总体呈现先扬后抑的趋势,第 11 d 后随着植物生长趋于稳定,根系活力降低趋势有所减缓.五酸钾处理后的防护组的根系活力显著高于酸雨组( $P < 0.05$ ),其中第 1 d 和第 11 d 与对照组十分接近,并未产生显著差异,实验实施过程,防护组相较于酸雨组根系活力增幅分别达到 79.98%、82.80%、96.13%、79.05%.五酸钾溶液的喷施使得茼蒿幼苗根系活力增幅均超过了 70%,说明五酸钾对酸雨胁迫环境下茼蒿幼苗根系活力有着较为明显的保护作用.

酸雨胁迫会大幅度降低植株根系活力从而影响植物的生长代谢活动,通过施加外部保护物质能够有效地缓解酸雨所带来的危害,此结论与魏祯祯等<sup>[11]</sup>和朱迎迎等<sup>[12]</sup>的研究结果相类似,其通过施加稀土元素改善了植物的根系活力,本文所施加的五酸钾从效果上分析明显优于稀土元素,五酸钾不仅可以为酸雨胁迫下的茼蒿提供柠檬酸根形成缓冲体系,减少极端 pH 所带来的伤害,同时可以提供  $K^+$  进一步调节茼蒿的水分平衡及营养平衡,调节气孔开度,有效提高茼蒿根系的抗逆性.

## 2.2 五酸钾对酸雨胁迫下茼蒿幼苗叶绿素含量的影响

叶绿素是植物体进行光合作用的必要因素,其可以有效地反映植物动态变化过程中的生理生态活性<sup>[13]</sup>.图 2 所示,茼蒿幼苗叶片的叶绿素含量总体分布在 30—50 SPAD 之间,防护组叶绿素含量比酸雨组分别高出了 2.23%、2.89%、0.40%、5.45%,防护组虽总体高于酸雨组,但并未达到显著差异.相较于对照组,防护组与酸雨组第 1 d 均未产生显著差异,而后期(第 6 d、第 11 d、第 16 d)叶绿素含量均显著低于对照组( $P < 0.05$ ).此结果说明五酸钾的喷施虽对酸雨胁迫下茼蒿幼苗叶绿素含量的下降趋势起到缓解作用,但效果不显著.

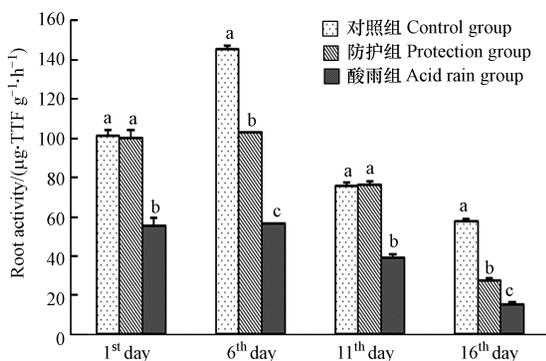


图 1 五酸钾对酸雨胁迫下茼蒿幼苗根系活力的影响 (不同字母表示各处理间差异显著,  $P < 0.05$ )

Fig.1 Effects of potassium pyridine-2,3,4,5,6-pentacarboxylate on root vigor of *Artemisia selengensis* seedlings under acid rain stress

(Columns with different letters are significantly different at  $P < 0.05$ )

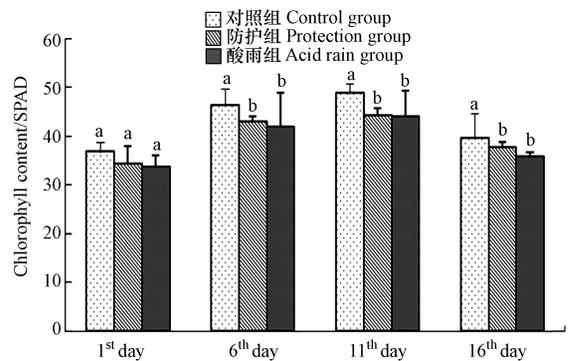


图 2 五酸钾对酸雨胁迫下茼蒿幼苗叶绿素含量的影响 (不同字母表示各处理间差异显著,  $P < 0.05$ )

Fig.2 Effects of potassium pyridine-2,3,4,5,6-pentacarboxylate on chlorophyll content of *Artemisia selengensis* seedlings under acid rain stress

(Columns with different letters are significantly different at  $P < 0.05$ )

陈琪等<sup>[13]</sup>的研究发现,叶绿素的动态变化相较于植株根系具有一定的滞后性,而夏红霞等<sup>[14]</sup>的研究亦论证了叶绿素的动态变化受到多种酶系的共同作用.因此酸雨胁迫效应及五酸钾缓解效应通过叶绿素含量表现相对迟缓,这也解释了茼蒿幼苗叶绿素含量在第 1 d 并未产生显著性差异的原因.五酸钾的施加对叶绿素含量后续的动态变化并未起到显著的缓解效应,可推断为叶绿素的代谢受到多种酶系的综合作用,五酸钾所提供的柠檬酸根离子和  $K^+$  对叶绿素的代谢调节有限,叶绿素含量略有增加但并未达到显著效果.

### 2.3 五酸钾对酸雨胁迫下茼蒿幼苗质膜透性及脯氨酸含量的影响

细胞质膜透性对于调节细胞内外离子平衡及物质交换有着十分重要的意义<sup>[15]</sup>,脯氨酸含量(即 PRO 含量)在植物代谢过程中参与渗透调节<sup>[6,16]</sup>.因此逆境条件下质膜透性及 PRO 含量的变化可以较为直观地显示植物对外界逆境的应急反应状态.

图 3 分别显示了五酸钾对酸雨胁迫下茼蒿幼苗质膜透性及 PRO 含量的影响.在整个实验阶段,防护组相较于酸雨组质膜透性均出现了显著性的降低( $P < 0.05$ ),降幅分别为为 31.82%、21.05%、50.04%、48.59%,在实验的后期防护组的质膜透性显著低于对照组(第 11 d、第 16 d),该结果表明喷施五酸钾溶液对酸雨胁迫下的茼蒿的质膜透性有着明显的改善.3 组的 PRO 含量与质膜透性变化趋势大致相似,防护组的 PRO 含量在整个实验阶段均显著低于酸雨组( $P < 0.05$ ),分别为酸雨组的 70.13%、88.49%、88.73%、79.92%,说明五酸钾的施用抑制了 PRO 的产生.

谢恩耀等<sup>[17]</sup>的研究显示,类柠檬酸类的化合物对多种植物生理指标改善具有显著作用,可以提高植物的生理活性,其结论与本文的结果相吻合.五酸钾的施加在起到缓冲作用的同时,还可以在酸性条件下吸收  $H^+$  并置换和释放出足量的  $K^+$ ,从而更好地维持质膜的稳定性. $K^+$  可以通过调节气孔控制  $CO_2$  和水的进出,从而调节植物细胞的水分平衡<sup>[18]</sup>, $K^+$  还可以提高植物的光合效率、调节植物细胞的阴阳离子平衡以及促进蛋白质的合成及代谢,因此五酸钾的施用对调节和平衡植物细胞内外渗透压效果明显.

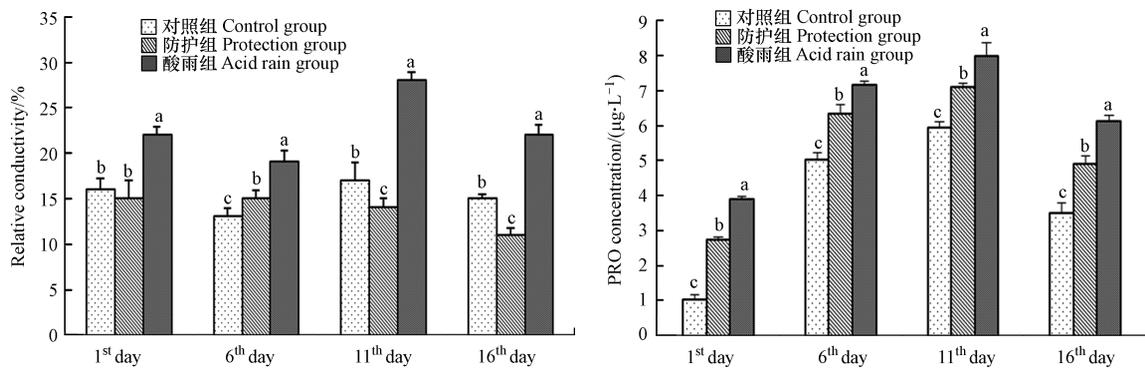


图 3 五酸钾对酸雨胁迫中茼蒿幼苗膜透性和 PRO 含量的影响

(不同字母表示各处理间差异显著,  $P < 0.05$ )

Fig.3 Effects of potassium pyridine-2,3,4,5,6-pentacarboxylate on the plasma membrane permeability and PRO Content of *Artemisia selengensis* seedlings under acid rain stress  
(Columns with different letters are significantly different at  $P < 0.05$ )

### 2.4 五酸钾对酸雨胁迫下茼蒿幼苗丙二醛含量的影响

丙二醛(MDA)是植物抗逆生长过程一种必然出现的集聚性代谢产物,因此是抗逆实验中一项重要的检测指标<sup>[12]</sup>.图 4 所示,随着胁迫时间的不断延长,茼蒿幼苗的 MDA 含量显现出不断升高的趋势,防护组(第 6 d—16 d)与酸雨组产生了显著差异( $P < 0.05$ ).五酸钾的施加明显降低了 MDA 含量,甚至出现了低于对照组的现象(第 16 d).对照组与酸雨组之间均产生了显著性差异( $P < 0.05$ ),酸雨组分别升高了 28.55%(第 6 d)、33.41%(第 11 d)和 53.17%(第 11 d).五酸钾的使用可以明显减少茼蒿幼苗 MDA 的产生,减少细胞膜的损伤.

### 2.5 五酸钾对酸雨胁迫下茼蒿幼苗氧自由基产生速率的影响

逆境条件下植物体内氧自由基(ROS)产生速率会大幅度提高,进而对植物的生长发育产生不可

逆的损伤,因此逆境下对植物体内氧自由基产生速率的有效的控制是十分必要的<sup>[18]</sup>.图5显示,从试验第1d开始,酸雨组的ROS产生速率明显高于对照组的情况,差异显著( $P<0.05$ ),五酸钾的施加,使防护组的ROS产生速率比酸雨组均有所降低,在第1d、第6d、第16d时达到显著水平( $P<0.05$ ),相较于酸雨组分别降低了5.65%、14.77%、28.95%,此结果与金璠等<sup>[19]</sup>对小麦的研究结果类似.五酸钾的施加给芦蒿幼苗体内多种抗氧化酶系提供合适的内环境,使得多种抗氧化酶体系可以协调发挥作用,有效降低了ROS产生速率,提高芦蒿幼苗对酸雨的抗性.

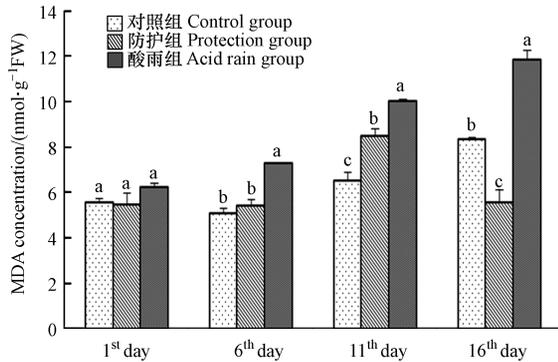


图4 五酸钾对酸雨胁迫下茼蒿幼苗MDA含量的影响  
(不同字母表示各处理间差异显著, $P<0.05$ )

Fig.4 Effects of potassium pyridine-2,3,4,5,6-pentacarboxylate on MDA Content of *Artemisia selengensis* seedlings under acid rain stress  
(Columns with different letters are significantly different at  $P<0.05$ )

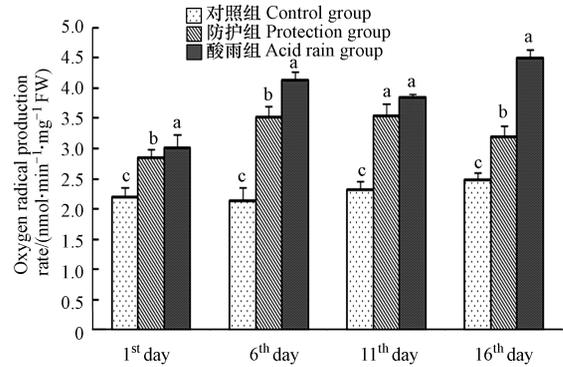


图5 五酸钾对酸雨胁迫下茼蒿幼苗氧自由基产生速率的影响  
(不同字母表示各处理间差异显著, $P<0.05$ )

Fig.5 Effects of potassium pyridine-2,3,4,5,6-pentacarboxylate on the production rate of oxygen free radicals in *Artemisia selengensis* seedlings under acid rain stress  
(Columns with different letters are significantly different at  $P<0.05$ )

## 2.6 五酸钾对酸雨胁迫下茼蒿幼苗过氧化氢酶活性的影响

过氧化氢酶(CAT)作为植物体内主要的抗氧化酶,对植物体内多种氧化性物质均能起到有效的抑制,减少过氧化现象对植物带来的危害<sup>[17]</sup>.图6显示,茼蒿幼苗体内的CAT酶活性总体呈现随实验时间的延长而上升的现象,胁迫初期(第1d、第6d),酸雨组与对照组之间差异不明显,随着胁迫时间加长(第11d、16d),酸雨组与对照组出现了显著差异( $P<0.05$ ).

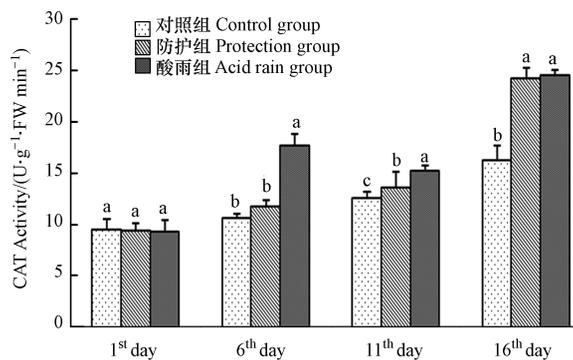


图6 五酸钾对酸雨胁迫下茼蒿幼苗CAT活性的影响  
(不同字母表示各处理间差异显著, $P<0.05$ )

Fig.6 Effects of potassium pyridine-2,3,4,5,6-pentacarboxylate on CAT Activity of *Artemisia selengensis* seedlings under acid rain stress  
(Columns with different letters are significantly different at  $P<0.05$ )

防护组与酸雨组相比,五酸钾的施加在第6d、11d时,CAT活性出现了显著地降低( $P<0.05$ ),但到第16d时,五酸钾作用不再明显,两组间无显著差异,显示胁迫初期,多种氧化性物质的增加不明显,

CAT 活性 3 组差别不大,胁迫中期五酸钾的加入有效降低多种氧化性物质的产生,酶活比酸雨组有明显地降低.但到胁迫后期,五酸钾的作用不再明显,此结果也揭示五酸钾作用的时效性,随着作用时间的延长,五酸钾的效果也在逐渐减弱,需要增加频次以保证作用的稳定发挥.

### 3 结论 (Conclusion)

10 mg·L<sup>-1</sup>的五酸钾溶液的喷施,有效地改善了酸雨胁迫对茼蒿幼苗生理代谢损伤.相较于酸雨组,防护组茼蒿幼苗体内 CAT 活性、PRO 含量、MDA 含量、质膜透性及自由基产生速率等指标显著升高的趋势得到了有效抑制,根系活力得到了明显地改善.五酸钾不仅能有效抑制和减少茼蒿幼苗体内 MDA 的产生,减少其毒害作用,其置换出的 K<sup>+</sup>能够协调细胞内外的渗透压平衡,保护质膜的完整性,并且重新建立起过氧化物保护酶系(如 CAT)与 ROS 之间的动态平衡,对茼蒿幼苗形成多维度、全方位、立体化的保护.

#### 参考文献 (References)

- [ 1 ] 吴玺,严丹丹,梁婵娟.酸雨与铅对不同生育期大豆生长与光合的复合影响[J].环境化学,2014,33(7):1241-1242.  
WU X, YAN D D, LIANG C J. Compound effects of acid rain and lead on growth and photosynthesis of soybean at different growth stage [J]. Environmental Chemistry, 2014, 33(7): 1241-1242 (in Chinese).
- [ 2 ] WANG L H, WANG W, ZHOU Q, et al. Combined effects of lanthanum (Ⅲ) chloride and acid rain on photosynthetic parameters in rice [J]. Chemosphere, 2014, 112:355-361.
- [ 3 ] 王艾平,沈文静.酸雨胁迫对水稻种子萌发的影响及其生理机制研究[J].杂交水稻,2019,34(1):70-72.  
WANG A P, SHEN W J. Effects of acid rain stress on seed germination of rice and its physiological mechanism [J]. Hybrid Rice, 2019, 34(1): 70-72 (in Chinese).
- [ 4 ] YU J Q, YE S F, HUANG L F. Effects of simulated acid precipitation on photosynthesis, chlorophyll fluorescence, and antioxidative enzymes in *Cucumis sativus* L. [J]. Photosynthetica, 2002, 40(3): 331-335.
- [ 5 ] 张耀民,吴丽英,王晓霞,等.酸雨对农作物的叶片伤害及生理特性的影响[J].农业环境保护,1996(5):197-208,227,240.  
ZHANG Y M, WU L Y, WANG X X, et al. Effects of acid rain on leaves and physiological characters of crops [J]. Agro-Environmental Protection, 1996(5): 197-208, 227, 240 (in Chinese).
- [ 6 ] 邱晓丽,周洋子,董莉,等.生物有机肥对马铃薯根际土壤生物活性及根系活力的影响[J].干旱地区农业研究,2019,37(3):162-169.  
QIU X L, ZHOU Y Z, DONG L, et al. Effects of bio-organic fertilizers on bioactivity and root activity of rhizosphere soil of potato [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2019, 37(3): 162-169 (in Chinese).
- [ 7 ] 侯明,张兴龙,路畅,等.V(V)、Cr(VI)单一和复合胁迫对小麦幼苗生长和生理特性的影响[J].环境化学,2012,31(7):1016-1022.  
HOU M, ZHANG X L, LU C, et al. Effects of V(V) and Cr(VI) single and combined stress on the growth and physiological characteristics of wheat seedlings [J]. Environmental Chemistry, 2012, 31(7): 1016-1022 (in Chinese).
- [ 8 ] 姚梦婕,金铨.铈对酸雨胁迫下水稻幼苗期防护与修复作用[J].环境化学,2016,35(12):2553-2558.  
YAO M J, JIN J. Protective and remediation effects of cerium on rice seedling stage under acid rain stress [J]. Environmental Chemistry, 2016, 35(12): 2553-2558 (in Chinese).
- [ 9 ] 裴玲芳,范贵鹏,肖美玲,等.两种方法测定土壤中过氧化氢酶比较[J].科技创新与应用,2019(15):145-146,149.  
PEI L F, FAN G P, XIAO M L, et al. Comparison of two methods for determination of catalase in soil [J]. Science & Technology Innovation and Application, 2019(15): 145-146, 149 (in Chinese).
- [ 10 ] 张志良,瞿伟菁,李小方.植物生理学实验指导[M].4版.北京:高等教育出版社,2009:218-227.  
ZHANG Z L, QU W Q, LI X F. Laboratory physiology experiment guide [M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 2009: 218-227 (in Chinese).
- [ 11 ] 魏祯祯,安子宁,张蕾,等.模拟酸雨对4种草坪草种子萌发和幼苗生长的影响[J].种子,2019,38(2):93-97.  
WEI Z Z, AN Z N, ZHANG L, et al. Effects of simulated acid rain on seed germination and seedling growth of four turfgrasses [J]. Seed, 2019, 38(2): 93-97 (in Chinese).
- [ 12 ] 朱迎迎,金铨,朱勇良.两种叶面肥对酸雨胁迫下水稻分蘖期生理指标影响[J].分子植物育种,2018,16(14):4785-4792.  
ZHU Y Y, JIN J, ZHU Y L. Effects of two foliar fertilizers on physiological indexes of rice in tillering stage under acid rain stress [J]. Molecular Plant Breeding, 2018, 16(14): 4785-4792 (in Chinese).
- [ 13 ] 陈琪,朱润良,葛飞,等.两种典型粘土矿物对狐尾藻镉毒害效应的缓解作用[J].环境化学,2017,36(7):1596-1601.  
CHEN Q, ZHU R L, GE F, et al. Mitigation effects of two typical clay minerals on cadmium toxicity of *Myriophyllum* sp. [J]. Environmental

- Chemistry, 2017, 36(7): 1596-1601 (in Chinese).
- [14] 夏红霞, 朱启红. Pb, Zn 及其交互作用对蜈蚣草抗氧化酶及叶绿素含量的影响[J]. 环境化学, 2013, 32(6): 959-963.  
XIA H X, ZHU Q H. Effects of Pb, Zn and their interactions on antioxidant enzymes and chlorophyll content of centipede grass [J]. Environmental Chemistry, 2013, 32(6): 959-963 (in Chinese).
- [15] 徐秋曼, 元英进, 程景胜, 等. 稀土元素铈对红豆杉细胞膜透性的影响[J]. 稀土, 2004(2): 50-53.  
XU Q M, YUAN Y J, CHENG J S, et al. Cell membrane permeability changes induced by Ce<sup>4+</sup> in suspension cultures of *Taxus cuspidate* [J]. Chinese Rare Earths, 2004(2): 50-53 (in Chinese).
- [16] 杨柳, 何正军, 赵文吉, 等. 狭叶红景天幼苗对水分及遮阴的生长及生理生化响应[J]. 生态学报, 2017, 37(14): 4706-4714.  
YANG L, HE Z J, ZHAO W J, et al. Growth and physiological and biochemical responses of *Rhodiola sachalinensis* seedlings to water and shading [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(14): 4706-4714 (in Chinese).
- [17] 谢恩耀, 顾嘉豪, 饶福清, 等. 新型化合物对六种植物种子萌发及生理指标的影响[J]. 分子植物育种, 2019, 17(5): 1703-1710.  
XIE E Y, GU J H, RAO F Q, et al. Effects of new compounds on seed germination and physiological indexes of six plant species [J]. Molecular Plant Breeding, 2019, 17(5): 1703-1710 (in Chinese).
- [18] 金璘, 叶亚新, 王梅娟. 镉胁迫下番茄保护酶系统的动态分析[J]. 江苏农业科学, 2008(5): 142-145.  
JIN J, YE Y X, WANG M J. Dynamic analysis of tomato protective enzyme system under cadmium stress [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2008(5): 142-145 (in Chinese).
- [19] 金璘, 曹玲, 王洁敏, 等. La 的不同施用方法对酸雨胁迫下小麦保护酶系统的影响[J]. 江苏农业科学, 2010(3): 95-96.  
JIN J, CAO L, WANG J M, et al. Effects of La application methods on wheat protective enzyme system under acid rain stress [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2010(3): 95-96 (in Chinese).
- [20] 齐小芳, 程智慧. 植物对锗的吸收利用及其生理功能研究进展[J]. 中国蔬菜, 2020(8): 14-18.  
QI X F, CHENG Z H. Research progress on the absorption and utilization of germanium by plants and their physiological functions [J]. Chinese Vegetables, 2020(8): 14-18 (in Chinese).