

高氯酸钾浸种对水稻种子萌发及幼苗生理特性的影响

陶功胜^{1,2}, 田雪瑶¹, 谢寅峰^{1*}, 陈倩¹, 时蕾¹

(1. 南京林业大学森林资源与环境学院, 南京 210037; 2. 桐城师范高等专科学校理工学系, 桐城 231400)

摘要: 以水稻为实验材料, 在水培及控制条件下, 探讨不同浓度 (0、20、50、100 和 300 mg·L⁻¹) 的高氯酸钾浸种胁迫对水稻种子萌发及幼苗生长生理的影响。结果表明, 低浓度胁迫 (20 mg·L⁻¹) 对种子萌发有一定的刺激作用, 萌发率、根长和根数均大于对照, 随着胁迫浓度和时间的增加, 种子萌发及幼苗生长受抑制程度逐渐增大, 并且茎的生长比根受影响程度更大。与对照相比, 幼苗叶片叶绿素、蛋白质和 MDA 含量均随胁迫浓度的增高而下降, 而 SOD 活性呈先升后降的趋势, POD 活性持续增强, CAT 则明显下降。综合各指标的变化及相关性分析结果表明, 高氯酸钾抑制水稻种子萌发及导致的幼苗生理伤害与活性氧代谢失调有关, 其伤害机制尚待进一步探讨。

关键词: 水稻; 高氯酸钾胁迫; 种子萌发; 生理特性

中图分类号: S511; X171.5

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2014)04-0545-06

Effects of KClO₄ solution on seed germination and seedling physiological characteristics in rice

TAO Gongsheng^{1,2}, TIAN Xueyao¹, XIE Yinfeng¹, CHEN Qian¹, SHI Lei¹

(1. College of Forest Resources and Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037;

2. Department of Science and Technology, Tongcheng Teachers College, Tongcheng 231400)

Abstract: Rice (*Oryza sativa* L.) seed was treated with different concentrations (0, 20, 50, 100 and 300 mg·L⁻¹) of KClO₄ solution. Seed germination, growth and physiological characteristics of seedling under hydroponic and controlled conditions were determined. The results showed that low concentration (20 mg·L⁻¹) of KClO₄ treatment stimulated seed germination with a higher germination index, root length and root number of seedlings than those of the control (CK). With an increase of KClO₄ concentration and treatment time, seed germination and seedling growth were gradually inhibited, and such an inhibition effect of KClO₄ was greater on stems than on the roots of seedlings. With an increase of KClO₄ concentration, chlorophyll content, soluble protein and MDA content, CAT activity decreased. The POD activity increased. The SOD activity increased first, then decreased in seedling leaves compared to the control. The results of correlation analysis between different indexes suggested that the inhibition of seed germination and physiological damage of rice seedling under KClO₄ stress might be related to disturbance of active oxygen metabolism in KClO₄-treated seeds and seedlings. The damage mechanism caused by KClO₄ need to be further studied.

Key words: *Oryza sativa* L.; KClO₄ stress; seed germination; physiological characteristics

高氯酸盐是一种新型的污染物质, 具有稳定性高, 持久性强, 扩散速度快等特点。作为一种甲状腺干扰物质, 在较低浓度下就会影响甲状腺的正常功能, 干扰人类正常的新陈代谢。高氯酸盐的污染问题引起了人们的广泛关注^[1-4], 在 *Nature* 和 *Science* 等权威刊物上都先后报道了高氯酸盐的毒害和污染问题^[5-7]。

高氯酸盐可经过土壤、水体等途径被植物吸收、富集, 通过食物链进入人体。由于高氯酸盐易溶于水, 且扩散速度快, 随着水的流动容易在环境中迁移, 以致在地表水、饮用水、水果和一些蔬菜中, 都检出了高氯酸盐^[8-11]。高氯酸盐在中国环境中也是普遍存在的, 在污水淤泥、水稻、瓶装饮用水和牛奶中均已检测到^[12]。水稻作为世界最主要的粮食

收稿日期: 2014-01-14

基金项目: 江苏高校优势学科建设工程项目 (PAPD) 和南京林业大学科技创新项目 (CX2011-23) 共同资助。

作者简介: 陶功胜, 硕士。E-mail: 549257222@qq.com

* 通信作者: 谢寅峰, 博士, 教授, 博士生导师。E-mail: xxyff@njfu.com.cn

作物之一,同时也是我国第一大粮食作物,具有种植面积和分布面积广的特点。前期研究结果表明^[13]高氯酸盐胁迫导致水稻幼苗净光合速率下降,对水稻的生长产生了明显的抑制效应,但伤害机理尚不清楚,更重要的是高氯酸盐在水稻体内积累,并沿着食物链进入人体,最终威胁人类的健康。国内外有关高氯酸盐污染胁迫对水稻种子萌发影响的研究鲜见报道,为此,作者以水稻作为实验材料,在水培及可控条件下,研究高氯酸盐对水稻种子的萌发及幼苗的形态指标、生理指标的影响,以期高氯酸盐的植物生态毒理作用的研究提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料培养与处理

供试水稻种子武运粳7号,购于江苏省农科院种子分公司,发芽率>90%。高氯酸盐胁迫采用KClO₄(AR,为高氯酸盐污染主要盐类^[14-15])浸种处理。培养液配方为国际水稻研究所常规营养液配方^[16]。选择饱满、大小相近的种子用自来水浸泡,选择沉底的种子用10%的H₂O₂消毒15 min,然后用自来水冲洗2 h,再用蒸馏水冲洗2~3遍。选取消毒后的种子吸干,分别选取50粒放入直径9 cm的培养皿中,用不同浓度的高氯酸钾溶液浸种48 h,盐浓度设置为:0、20、50、100和300 mg·L⁻¹,以0 mg·L⁻¹处理为对照,分别标记为CK, C20, C50, C100和C300。各处理先在30℃黑暗培养箱中催芽48 h,然后置于光照培养箱中培养(光周期为12 h/12 h,温度为25℃±1℃,光强为70 μmol·m⁻²·s⁻¹)。每个处理设置4个重复,每个重复选取10株幼苗标记,用于生长定位跟踪测定。每天更换1次处理液。

1.2 指标测定方法

1.2.1 种子萌发及生长测定 从水稻种子移入光照培养箱开始,每天记录发芽的个数,计算出发芽率,

持续10 d,3 d时的发芽率定为发芽势^[17-18];每3 d跟踪测定标记水稻种子的株鲜重、株高、根长及根数等生长指标,相对生长量等指标分别参考邱念伟等^[19]的方法进行计算。

1.2.2 叶绿素含量、可溶性蛋白(Pr)含量、丙二醛(MDA)含量测定 幼苗叶片叶绿素含量,按照李合生^[20]的方法测定。可溶性蛋白质(Pr)含量的测定,采用考马斯亮蓝G-250染色法^[20]。MDA含量的测定采用硫代巴比妥酸(TBA)方法^[21]测定。

1.2.3 保护酶活性测定 过氧化物酶(POD)活性用愈创木酚法进行测定^[22];超氧化物歧化酶(SOD)活性采用NBT光化还原法测定^[23];过氧化氢酶(CAT)活性的测定采用紫外分光光度法^[23]。每个指标至少3个重复。

1.3 数据分析

采用EXCEL、STST2和SPSS17.0软件对实验数据进行图表分析、方差分析及Duncan检验法对显著性差异($P<0.05$)进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 高氯酸盐浸种对水稻种子萌发的影响

表1表明,CK和各处理组的种子萌发率随着时间的延长均表现为逐渐升高的趋势。与CK相比,C20处理在萌发的前7 d内均大于CK,以后略小于CK。而C50、C100和C300处理组在各萌发时间段内的萌发率均小于CK,并且与CK的差距随着高氯酸钾浸种浓度的增加而增大。在第10天时,C50、C100和C300的萌发率分别降为CK的91.30%、86.96%和83.70%,统计分析表明,均与CK差异显著($P<0.05$)。以上结果说明,一定时间内低浓度的高氯酸盐浸种处理(C20)对水稻种子的萌发有一定的刺激作用,随着浓度增加则明显抑制了水稻种子的萌发,呈现质量浓度效应。

表1 不同浓度高氯酸钾浸种对水稻种子萌发的影响

Table 1 Effect of different concentrations of potassium perchlorate soaking on the germination of *Oryza sativa* L. seed

t/d	CK	C20	C50	C100	C300
1	0.350±0.024	0.285±0.033	0.260±0.037	0.250±0.045	0.200±0.027
2	0.685±0.022	0.690±0.022	0.650±0.050	0.570±0.031	0.550±0.033
3	0.780±0.028	0.820±0.028	0.700±0.038	0.675±0.033	0.640±0.029
4	0.820±0.028	0.840±0.050	0.745±0.047	0.700±0.035	0.690±0.04
5	0.850±0.030	0.865±0.027	0.800±0.025	0.720±0.024	0.700±0.036
6	0.870±0.030	0.880±0.027	0.835±0.041	0.740±0.039	0.720±0.035
7	0.880±0.036	0.885±0.038	0.835±0.037	0.770±0.027	0.740±0.035
8	0.920±0.027	0.900±0.038	0.840±0.033	0.785±0.031	0.770±0.038
9	0.920±0.027	0.900±0.038	0.840±0.033	0.800±0.025	0.770±0.038
10	0.920±0.027	0.900±0.038	0.840±0.033	0.800±0.025	0.770±0.038

注:表中的数值为平均值±标准误差。下同。Note: The data in the table were showed as mean ± standard error. The same below.

2.2 高氯酸盐浸种对水稻幼苗生长的影响

图 1 和图 2 表明, 不同浓度的高氯酸盐浸种对水稻幼苗根数和根长的影响基本一致。随着水稻幼苗生长, CK 和各处理的根数和根长均呈上升趋势。与 CK 相比, 在试验期间 C20 处理的根数、根长与 CK 基本一致, 后期略高于 CK, 说明一定时间内, 低浓度的高氯酸盐处理可能对水稻幼苗发根和根的生长有一定的刺激作用。而其他各处理组在试验期间的根数和根长均小于 CK。处理第 12 天, C50、C100 和 C300 的根数和根长分别降为 CK 的 77.19%、59.69%, 44.69%、85.08%, 64.01%、42.21%; 统计分析表明, 均与 CK 差异显著 ($P < 0.05$)。

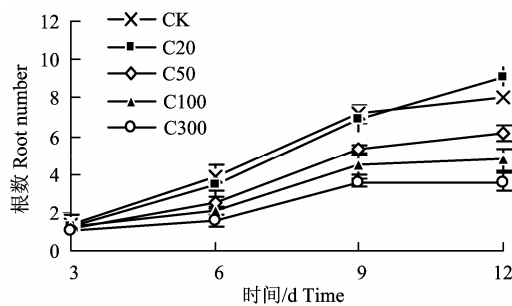


图 1 不同浓度高氯酸钾浸种对水稻幼苗根数的影响
Figure 1 Effects of different concentrations of potassium perchlorate soaking on the root number of rice seedling

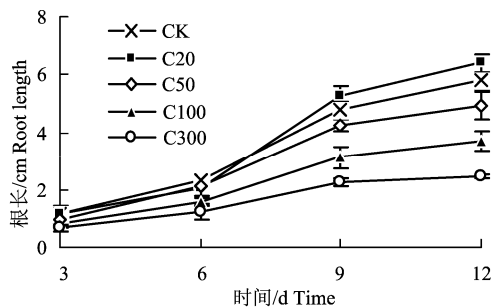


图 2 不同浓度高氯酸钾浸种对水稻幼苗根长的影响
Figure 2 Effects of different concentrations of potassium perchlorate soaking on the root length of rice seedling

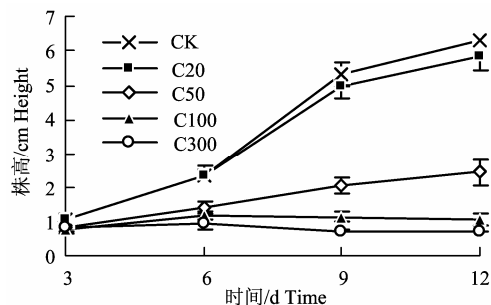


图 3 不同浓度高氯酸钾浸种对水稻幼苗株高的影响
Figure 3 Effects of different concentrations of potassium perchlorate soaking on the height of rice seedling

图 3 和图 4 表明, 高氯酸盐浸种胁迫下, 水稻幼苗的株高和鲜重变化总体趋势大致相同。与 CK 相比, 试验期间各处理的株高和鲜重随着胁迫浓度的升高增幅逐渐变小, 表现出一定的浓度效应。试验后期, 高浓度胁迫导致水稻幼苗生长停滞。处理第 12 天后, C50、C100 和 C300 的株高和鲜重分别降为 CK 的 38.55%、16.63%, 11.16%、79.50%, 61.61%、51.21%。统计分析表明, 均与 CK 达差异显著水平 ($P < 0.05$)。

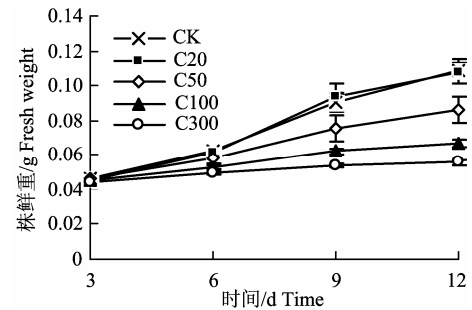


图 4 不同浓度高氯酸钾浸种对水稻幼苗鲜重的影响
Figure 4 Effects of different concentrations of potassium perchlorate soaking on the fresh weight of rice seedling

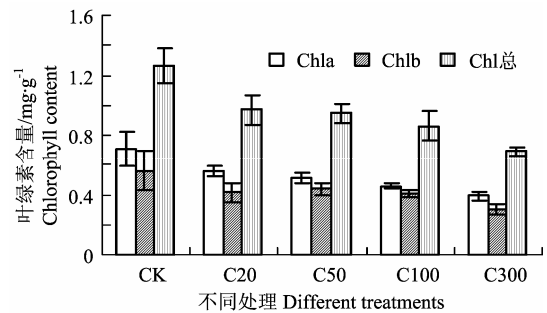


图 5 不同浓度高氯酸钾浸种对水稻幼苗叶绿素含量影响
Figure 5 Effects of different concentrations of potassium perchlorate soaking on chlorophyll content of rice seedling leaves

2.3 高氯酸盐浸种对水稻幼苗生理特性的影响

图 5 表明, 处理第 12 天后, 与 CK 相比, 各处理水稻幼叶的叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素总含量以及叶绿素 a 与叶绿素 b 的比值 (chl a/chl b) 均呈不同程度的下降, C20、C50、C100 和 C300 的叶绿素 a 和叶绿素 b 分别降为 CK 的 78.86%、72.35%、64.62%、55.62% 和 73.95%、78.11%、72.50%、53.67%, 统计分析表明均与对照组差异达显著水平 ($P < 0.05$)。

表 2 显示, 处理第 12 天后, C20 的可溶性蛋白质含量略高于 CK, 而 C50、C100 和 C300 处理组相比于 CK 和 C20 有明显的下降。C50、C100 和

C300 的可溶性蛋白质含量分别降为对照组 CK 的 82.88%、78.64%和 78.15%，统计分析表明，均与 CK 差异达显著水平 ($P < 0.05$)。而各处理水稻幼叶的 MDA 含量与蛋白质含量变化相反，随着高氯酸

盐胁迫浓度的提高,MDA 含量不断提高,C50、C100 和 C300 的 MDA 含量分别比 CK 增加了 16.11%、36.13%和 77.89%，统计分析表明均与 CK 差异达显著水平 ($P < 0.05$)

表 2 不同浓度高氯酸钾浸种 12 d 后对水稻幼苗叶片部分生理指标的影响

Table 2 Effects of different concentrations of potassium perchlorate soaking on five physiological index in rice seedling leaves on the 12th day

不同处理 Different treatments	可溶性蛋白质含量 /mg·g ⁻¹ Soluble protein content (FW)	丙二醛含量 /μmol·g ⁻¹ MDA content (FW)	SOD 活性 /U·g ⁻¹ SOD activity (FW)	POD 活性 /U·min ⁻¹ POD activity (FW)	CAT 活性 /U·min ⁻¹ CAT activity (FW)
CK	0.846±0.059	8.779±0.559	120.6524±26.132	71.667±6.322	683.333±63.322
C20	0.848±0.067	9.019±1.699	277.681±23.220	70.000±4.881	633.333±14.434
C50	0.701±0.060	10.193±1.216	259.420±35.160	82.500±6.585	475.000±90.139
C100	0.665±0.022	11.951±1.097	202.899±33.278	107.292±11.010	316.667±52.042
C300	0.661±0.050	15.617±0.995	20.652±16.909	135.625±20.578	208.334±38.188

表 3 处理 12 d 后生长及生理指标间的相关系数

Table 3 Correlation coefficients between different growth and physiological indexes after treatment for 12 days

指标 Index	株鲜重 Fresh weight of plant	根数 Root number	根长 Root length	株高 Plant height	叶绿素含量 Chlorophyll content
根数 Root number	0.982**				
根长 Root length	0.980**	0.987**			
株高 Plant height	0.970**	0.953*	0.916*		
叶绿素含量 Chl content	0.855	0.757	0.782	0.845	
蛋白质含量 Protein content	0.949*	0.948*	0.896*	0.994**	0.791
MDA 含量 MDA content	-0.938*	-0.913*	-0.962**	-0.843	-0.856
SOD 活性 SOD activity	0.516	0.584	0.671	0.322	0.248
POD 活性 POD activity	-0.960**	-0.939*	-0.981**	-0.867	-0.833
CAT 活性 CAT activity	0.996**	0.964**	0.968**	0.968**	0.896*

指标 Index	蛋白质含量 Protein content	MDA 含量 MDA activity	SOD 活性 SOD activity	POD 活性 POD activity
根数 Root number				
根长 Root length				
株高 Plant height				
叶绿素含量 Chl content				
蛋白质含量 Protein content				
MDA 含量 MDA content	-0.800			
SOD 活性 SOD activity	0.299	-0.700		
POD 活性 POD activity	-0.828	0.992**	-0.496	
CAT 活性 CAT activity	0.940*	-0.944*	0.246	-0.960**

注: **表示显著相关; ***表示极显著相关。

Note: ** Correlation is significant at the 0.05 level; *** Correlation is significant at 0.01 the level.

高氯酸盐胁迫下,各保护酶反应表现不协调(表 2), C20、C50 和 C100 的 SOD 活性均高于 CK, 而 C300 的 SOD 活性却均小于各组,C20、C50 和 C100 的 SOD 活性分别是 CK 的 2.3 倍、1.68 倍和 2.15 倍, 而 C300 仅为 CK 的 17.12%, 统计分析表明, 各胁迫 CK 差异均达显著水平 ($P < 0.05$)。而 C50、C100

和 C300 的 POD 活性要比 CK 和 C20 高, 分别比 CK 增加 15.12%、53.27%和 64.39%, 统计分析表明, 与 CK 差异达显著性水平 ($P < 0.05$)。随着高氯酸盐浸种浓度的升高, 水稻种子幼叶的 CAT 活性逐渐降低, 表现出一定的浓度效应。C20、C50、C100 和 C300 的 CAT 活性分别降为 CK 的 92.68% ($P >$

0.05)、69.51%、46.34%和 30.49%。统计分析表明, CK 与 C50、C100 和 C300 差异均达显著水平 ($P < 0.05$)。

2.4 生长指标和生理指标间的相关性分析

各指标间的相关性分析结果表明, 鲜重与根数、根长、株高、CAT 活性、Pr 之间存在显著正相关, 而与 MDA、POD 活性之间存在显著负相关; 根数与根长、株高、CAT 活性、可溶性蛋白之间存在显著正相关, 而与 MDA、POD 活性之间存在显著负相关; 根长与株高、CAT 活性、Pr 含量之间存在显著正相关, 而与 MDA、POD 活性之间存在显著负相关; 株高与 Pr 含量、CAT 活性之间存在显著正相关; Chl 含量和 Pr 含量与 CAT 活性呈显著正相关; Pr 含量与 CAT 活性呈极显著正相关; MDA 与 POD 活性之间存在极显著正相关性而与 CAT 活性呈显著负相关; POD 活性与 CAT 活性之间存在极显著负相关性 (表 3)。

3 讨论

通过高氯酸钾浸种胁迫下水稻种子萌发及幼苗生长指标变化的分析表明, 高氯酸钾浸种处理对水稻种子萌发和幼苗的发根数、根长、株高和鲜重等总体上均产生了抑制作用, 且抑制效应随胁迫时间和浓度的增加而加大。但低浓度处理 (C20) 具有一定的刺激效应, 表现为萌发势、幼苗发根数及根长比对照有所增加, 呈现“低促高抑”现象, 与多种胁迫表现的低浓度促进高浓度抑制的现象一致^[24-25]。此外, 从幼苗根长、根数及株高的变化来看 (图 1~图 3), 茎的生长受胁迫抑制的程度更大, 尤其在高浓度处理下差距较为明显。说明幼苗茎的生长比根的生长对高氯酸钾胁迫更加敏感。试验中我们还发现高浓度高氯酸钾浸种水稻幼苗的顶端生长受到明显抑制, 顶芽不能萌发甚至坏死。产生上述现象的原因可能与根系吸收的高氯酸盐主要在地上部分累积、尤其是顶芽和幼叶等幼嫩部位的积累有关^[26], 其机制尚待进一步探讨。

植物的生长是内部生理变化的综合表现。高氯酸钾胁迫在抑制种子萌发及幼苗生长的同时, 也使幼苗叶绿素含量、可溶性蛋白含量明显降低, 叶片 MDA 含量逐渐升高, 并表现出浓度和时间效应。MDA 是膜脂过氧化作用形成的最终分解产物, 其含量代表着植物细胞遭受逆境伤害的程度和膜脂过氧化程度, 细胞膜脂过氧化程度越高, 细胞膜受害程度愈大^[27-28]。本试验中, MDA 含量随着高氯酸盐浸种胁迫浓度的提高而增加, 说明随胁迫程度

的加深, 膜脂过氧化作用增大, 膜系统受破坏程度增大。超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化物酶 (POD) 和过氧化氢酶 (CAT) 是植物体内重要的活性氧清除酶, 在清除超氧自由基, 过氧化氢, 过氧化物以及减少羟基自由基等方面通过协同效应发挥重要作用^[29-30]。本实验中, SOD 活性除 C300 外均高于对照组, CAT 活性逐渐降低, POD 活性升高, 表明保护酶系统的 3 种酶活性在高氯酸钾胁迫下反应并不协调。水稻幼苗叶片内的 SOD 酶活性在 C20 时达到最高, 说明在低浓度高氯酸钾胁迫下, 细胞内即产生了较多的活性氧, 刺激了 SOD 酶活性的急剧增高。但是 C300 的活性低于对照组, 与对照组差异显著, 可能是高浓度的高氯酸钾使水稻幼苗受到严重的胁迫伤害, 植物体内积累了大量的活性氧, 超出了 SOD 的清除能力, 并对 SOD 活性产生抑制^[31]。POD 代表了细胞中另一类 H_2O_2 降解酶, 参与植物细胞木质素合成、IAA 降解以及植物对生物和非生物的胁迫反应^[32]。POD 活性的上升, 是植物遭受逆境产生的普遍生理响应, 一方面在过氧化氢的刺激下, POD 增加了对过氧化氢的清除能力, 另一方面表明细胞遭受氧化损伤的程度加剧。高氯酸盐胁迫下水稻叶片 POD 活性上升与株鲜重呈极显著负相关 (-0.960^{**} , $P < 0.01$), 说明 POD 活性的升高可能与幼苗生长抑制有关。胁迫下, POD 可能通过催化木质素的合成, 提高细胞壁木质化程度, 降低细胞壁伸展性, 从而阻碍幼苗的生长^[33]。

从不同指标间的相关性分析结果来看, 鲜重与 MDA、POD 及 CAT 活性呈显著或极显著相关, MDA 含量与 POD 和 SOD 活性呈显著相关, 也反映了高氯酸钾胁迫下水稻生长受抑与活性氧代谢平衡失调有关, 同时表明 CAT、POD 等可作为表征水稻幼苗受高氯酸钾胁迫伤害的有效指标。

目前高氯酸盐对植物生长生理影响的研究尚少, 其对植物的毒理机制尚不清楚。高氯酸盐污染胁迫对水稻种子萌发影响的研究国内外尚未见报道。本研究初步表明了高氯酸钾污染胁迫对水稻种子萌发及幼苗生长生理的抑制作用, 并从活性氧代谢角度初步探讨了高氯酸盐胁迫伤害的可能机制, 研究结果为深入探讨高氯酸盐生态毒理作用的研究提供依据。但高氯酸盐对植物伤害的具体机制, 尚待进一步研究。

参考文献:

- [1] Fang Q L, Chen B L. A review of phyto-microbial remediation of perchlorate-contaminated soil and groundwater[J].

- Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, 31(8): 1569-1579.
- [2] Chen W F, Lin S Y, Cheng M T. Adsorption of perchlorate by surfactant-modified activated carbon and its regeneration. *China Environmental Science*, 2012, 32(3): 461-466.
- [3] 王蕊, 刘菲, 张苑, 等. 环境介质中高氯酸盐污染及微生物修复技术研究进展[J]. *岩矿测试*, 2012, 31(4): 689-698.
- [4] 王蕊, 刘菲, 秦莉红, 等. 高氯酸盐在硝酸盐还原条件下的厌氧生物降解[J]. *地球科学(中国地质大学学报)*, 2012, 37(2): 307-312.
- [5] Coates J D, Achenba C H. Microbial perchlorate reduction: rocket-fuelled metabolism[J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2004, 2(7): 569-580.
- [6] Stokstad E. Perchlorate study suggests lower risk [J]. *Science*, 2005, 307(5707): 191.
- [7] Stokstad E. Debate continues over safety of water spiked with rocket fuel [J]. *Science*, 2005, 307(5709): 507.
- [8] David T, Robert A H, Anna M F, et al. Development of a health-protective drinking water level for per-chlorate [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2006, 114(6): 881-886.
- [9] Alison S W, Evan E C, Elizabeth A E. Perchlorate-reducing microorganisms isolated from contaminated sites [J]. *Environmental Microbiology*, 2004, 6(5): 517-527.
- [10] Kipa A B, Martinelango P K, Tilan K, et al. Perchlorate and iodide in dairy and breast milk [J]. *Environment Science Technology*, 2005, 39: 2011-2017.
- [11] Jackson W A, Joseph P, Laxman P, et al. Perchlorate accumulation in forage and edible vegetation [J]. *Journal of Agricultural Food Chemistry*, 2005, 53: 369-373.
- [12] 陈桂葵, 孟凡静, 骆世明, 等. 高氯酸盐环境行为与生态毒理研究进展[J]. *生态学报*, 2008, 17(6): 2503-2510.
- [13] 陈倩, 陶功胜, 谢寅峰, 等. 高氯酸钾胁迫对水稻幼苗光合作用及保护酶活性的影响[J]. *江苏农业学报*, 2013, 29(4): 715-721.
- [14] Sorial G A. The perchlorate dilemma in drinking water [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2004(1): 1-2.
- [15] Xie Y F, Cai X L, Liu W L, et al. Effects of lanthanum nitrate on growth and chlorophyll fluorescence characteristics of *Alternanthera philoxeroides* under perchlorate stress [J]. *Journal of Rare Earths*, 2013, 31(8): 823-829.
- [16] 毛达如. 植物营养研究法[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2001, 16.
- [17] 王丽燕, 郑世英. 镉、铅及其复合污染对小麦种子萌发的影响[J]. *麦类作物学报*, 2009, 29(1): 146-148.
- [18] 刘拥海, 俞乐, 吴国创. 不同 pH 值条件下酸铝对水稻种子萌发和根系生长的影响[J]. *安徽农业科学*, 2008, 36(11): 4397-4398.
- [19] 邱念伟, 马宗琪, 王凤德, 等. 一种测定植物相对生长量的方法[J]. *山东科学*, 2007, 20(2): 24-28.
- [20] 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.
- [21] 赵世杰. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2004: 26-34.
- [22] 陈建勋, 王晓峰. 植物生理学实验指导[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2002: 120-121.
- [23] 李玲. 植物生理学模块实验指导[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 95-97.
- [24] He J Y, Ren Y F, Zhu C. Effects of cadmium stress on seed germination, seedling growth and seed amylase activities in rice (*Oryza sativa*)[J]. *Rice Science*, 2008, 15 (4): 399-404.
- [25] 张义贤. 汞、镉、铅胁迫对油菜的毒害效应[J]. *山西大学学报*, 2004, 27(4): 410-413.
- [26] Sanchez C A, Krieger R I, Khandaker N R, et al. Accumulation and perchlorate exposure potential of lettuce produced in the Lower Colorado River Region [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2005, 53: 5479-5486.
- [27] 徐芬芬. 镉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.
- [28] Gao F Q, Liu C, Qu C X, et al. Was improvement of spinach growth by nano-TiO₂ treatment related to the changes of Rubisco activase? [J]. *Biometals*, 2007, 21(2): 211-217.
- [29] Bowler C, Van M, Inzc D. Superoxide dismutase and stress tolerance [J]. *Annual Review Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 1992(43): 83-116.
- [30] Chaudhray M Q, Pricee N R. Insect mortality at doses of phosphine which produce equivalent uptake in susceptible and phosphine-resistant strains of *Rhyzopertha dominica*[J]. *Journal of Stored Products Research*. 1990, 26(2): 101-107.
- [31] 王应军, 邓仕槐, 姜静, 等. 酸雨对木芙蓉幼苗光合作用及抗氧化酶活性的影响[J]. *核农学报*, 2011, 25(3): 588-593.
- [32] 王海华, 彭喜旭, 严明理, 等. 模拟酸雨和镍复合污染红壤中莴笋的生长与抗氧化反应[J]. *水土保持学报*, 2007, 21(3): 99-102.
- [33] Gajewsk A E, Sklodowsk A M, Slab A M, et al. Effect of nickel on antioxidative enzyme activities, proline and chlorophyll contents in wheat shoots[J]. *Biologia Plantarum*, 2006, 50(4): 653-659.