

陈佳月, 姜洪进, 解静芳, 等. 模拟酸雨与镉复合胁迫对玉米幼苗生理状况的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2018, 35(6): 575-582.

CHEN Jia-yue, JIANG Hong-jin, XIE Jing-fang, et al. Effects of simulated acid rain and Cd combined stress on physiological condition of maize seedling[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2018, 35(6): 575-582.

模拟酸雨与镉复合胁迫对玉米幼苗生理状况的影响

陈佳月¹, 姜洪进¹, 解静芳^{1*}, 李 萌^{1,2}, 贾真真¹, 石 晶¹

(1. 山西大学环境与资源学院, 太原 030006; 2. 中国科学院上海硅酸盐研究所, 上海 200050)

摘 要:为探讨酸雨与重金属镉复合胁迫对作物(玉米幼苗)生长的影响机制,通过温室盆栽试验,分别进行了不同强度酸雨单一处理(酸雨pH分别为5、4、3、2)和不同强度酸雨(酸雨pH分别为5、4、3、2)与5 mg·kg⁻¹ Cd²⁺的复合处理两个试验系列。采用分光光度法等对玉米幼苗生长指标(种子萌发率和幼苗株高、根长、株质量、根质量)、抗氧化酶(过氧化物酶POD、过氧化氢酶CAT、超氧化物歧化酶SOD、谷胱甘肽-S-转移酶GST)活性及叶绿素含量进行了测定。结果表明,与其各自空白对照(pH=6.5)相比,随酸雨强度的增大,单一及复合胁迫均导致玉米种子萌发率降低;而幼苗株高、根长和植株鲜质量则呈先促后抑的趋势。单一和复合胁迫酸雨强度敏感点分别为pH值等于3和4。两种胁迫SOD、POD活性均先升后降,单一和复合胁迫酸雨强度敏感点分别为pH值等于3和4;CAT、GST活性单一胁迫下表现为持续上升,复合胁迫下则先升后降,pH值等于3为其敏感点。两种胁迫的叶绿素含量均先升后降,单一和复合胁迫敏感点分别为pH值等于4和5。酸雨单一胁迫及其与重金属镉复合胁迫对玉米幼苗的影响均随酸雨强度的升高表现为双阶段性:低强度促进、高强度抑制。与同强度酸雨单一处理相比,Cd²⁺的存在,加大了酸雨单独存在时对玉米幼苗的损害作用。

关键词:酸雨;镉;萌发率;抗氧化酶;叶绿素含量

中图分类号:X517;X171.5 文献标志码:A 文章编号:2095-6819(2018)06-0575-08 doi: 10.13254/j.jare.2018.0031

Effects of simulated acid rain and Cd combined stress on physiological condition of maize seedling

CHEN Jia-yue¹, JIANG Hong-jin¹, XIE Jing-fang^{1*}, LI Meng^{1,2}, JIA Zhen-zhen¹, SHI Jing¹

(1. College of Environment and Resource, Shanxi University, Taiyuan 030006, China; 2. Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

Abstract: In order to investigate the underlying mechanisms of effects on crops growth (maize seedling) under the compound stress of acid rain and cadmium (Cd), the pot experiments in greenhouse were carried out, including a single treatment with one of the acid rain intensity sets (the pH of 5, 4, 3, 2, respectively) and a compound treatment together with one of the intensity sets of acid rain (pH=5, 4, 3, 2) and 5 mg·kg⁻¹ of Cd²⁺. The maize seedling growth index (germination rate, plant height, root length, plant weight, root weight), antioxidant enzymes (peroxidase POD, catalase CAT, superoxide dismutase SOD and glutathione S-transferase GST) and chlorophyll content were determined by using the spectrophotometry, etc. Compared with the control pH=6.5, with the increase of acid rain intensity, single and compound stress both caused decreasing maize seeds germination rate, but the seedling plant height and weight, root length and weight showed the trend of promotion with low intensity and inhibition with high intensity. The acid rain intensity sensitive points of single and compound stress were pH 3 and pH 4, respectively. The activities of SOD and POD were increased first and then decreased, and the acid rain intensity sensitive points of single and compound stress were pH 3 and pH 4, respectively. For CAT and GST, single stress showed a continuous increasing trend; compound stress was first increased and then decreased, and acid rain intensity sensitive point was pH 3. The chlorophyll contents in

收稿日期:2018-01-26 录用日期:2018-04-12

基金项目:国家自然科学基金项目(30740037);国家公益性行业(农业)科研专项(201103024);大气重污染成因与治理攻关项目(DQGG0107)

作者简介:陈佳月(1992—),女,山西运城人,硕士研究生,研究方向为环境化学与生态毒理学。E-mail:975132931@qq.com

姜洪进与陈佳月同等贡献

*通信作者:解静芳 E-mail:xiejf@sxu.edu.cn

two kinds of stresses were increased first and then decreased. The acid rain intensity sensitive points of single and compound stress were pH 4 and 5, respectively. It was concluded there were two phases for the effects of acid rain or/and Cd stress on growth index and enzyme activity in maize seedlings, which appeared a promotion at the low intensity and an inhibition at the high intensity. Compared with the single treatment, Cd²⁺ aggravated the damage of acid rain treatment alone.

Keywords: acid rain; cadmium; germination rate; antioxidant enzymes; chlorophyll content

酸雨指pH值小于5.6的降水^[1]。化石燃料的燃烧导致空气中二氧化硫(SO₂)和氮氧化物(NO_x)逐年增多,而SO₂和NO_x是形成酸雨的重要前体物^[2-3]。目前,酸雨与全球气候变暖、臭氧层破坏并列为当今世界三大生态环境灾难,已经引起各国政府及环境界的高度重视^[4-5]。目前,我国酸雨区主要分布在长江中下游以南的省份,北方受酸雨污染较轻^[6]。镉(Cd)是有毒性的重金属元素^[7],被美国毒物管理委员会(ATSDR)列为第6位危及人体健康的有毒物质,有研究表明,2014年我国土壤Cd污染点位超标率达到7%,远高于其他重金属污染物^[8-9],且重金属对植物生长状况的影响通常表现出低水平促进、高水平抑制的趋势^[10]。

自然环境中存在各种各样的污染物,而污染物经常以复合形式存在,在土壤中形成复合污染^[11]。太原市农田土壤污染监测结果显示,小店区污灌区Cd²⁺浓度为0.118~0.453 mg·kg⁻¹^[12]。Cd易在土壤中累积,且土壤中Cd溶解度随酸雨强度的增加而升高,两者胁迫使植物的生长环境遭到破坏^[13-14]。有研究表明,酸雨会改变植物内部的酸碱平衡,伤害植物叶片、降低叶绿素含量、抑制植物的光合作用及物质合成^[15-16];也有研究表明较低强度的酸雨或较低剂量的Cd对植物的伤害较小,有时还会促进植物生长,激发抗氧化酶活性;而污染水平增加则会加重对植物的损害,降低抗氧化酶活性^[17-18]。本实验室前期研究发现,Cd²⁺浓度为0~10 mg·L⁻¹时,玉米种子萌发率显著升高,幼苗株高和根长均随Cd浓度的增大略有升高,Cd²⁺浓度为10~50 mg·L⁻¹时,玉米种子萌发率变化不显著,但株高和根长均显著降低,植株矮小、叶片较小且发黄,高浓度处理下植株趋于死亡^[19]。与对照相比,土壤Cd含量为5 mg·kg⁻¹对玉米种子萌发、幼苗生长、酶活性、叶绿素含量及叶绿素荧光的变化均没有显著影响,但对玉米幼苗代谢物含量及代谢途径存在明显影响($P<0.05$)^[20]。本实验室也研究了不同浓度Cd²⁺处理对菠菜幼苗生长状况的影响,结果表明:Cd²⁺浓度为0~10 mg·L⁻¹时,可促进菠菜株高及叶面积的生长;Cd²⁺浓度为10~50 mg·L⁻¹时,则抑制菠菜株高及叶面积的生长;Cd²⁺浓度为0~10 mg·L⁻¹时,随Cd²⁺浓度的增大

菠菜对Cd的富集作用增强,Cd²⁺浓度为10~50 mg·L⁻¹时,菠菜富集Cd²⁺速率变缓^[21]。

目前,国内外学者十分关注酸雨和重金属污染的生态环境效应研究,在对作物的影响方面主要侧重于单一污染对物质合成、生长和光合作用等方面的影响,而酸雨与Cd复合胁迫对玉米幼苗生长及酶活性的影响研究还不多见,特别是在土壤偏碱性的北方地区。现阶段我国酸雨呈现由南向北蔓延的趋势^[6],且北方多地因污、废水灌溉导致土壤重金属污染严重。本文通过测定酸雨与Cd复合胁迫处理玉米幼苗的生长指标、抗氧化酶活性及叶绿素含量的变化情况,研究酸雨与Cd复合胁迫对其生长影响的作用机制,继而为农业土壤综合污染修复、工业污染场地土壤修复提供理论指导和数据支持。

1 材料与方法

1.1 试验材料与设备

试验玉米种子购自山西大丰种业有限公司,品种为大丰30。试验土壤采自山西省太原市小店区0~10 cm土层,风干后过2 mm筛,备用。根据2015年中国环境状况公报和太原地区近15年降水pH值时空分布特征^[22],以及太原市降水主要阴阳离子监测结果(酸雨中S:N=6:1),以硫酸根(SO₄²⁻):硝酸根(NO₃⁻)=6:1的比例配制酸雨原液。使用时,将原液用蒸馏水稀释至pH值分别为5、4、3、2的溶液。氯化镉CdCl₂·2.5H₂O(分析纯)购自天津市化学试剂二厂。

试验设备:光照培养箱(LI15,美国SHELLAB有限公司);紫外分光光度计(UV2100,尤尼柯上海有限公司);高速冷冻离心机(Z36HK,德国哈默公司)。

1.2 试验设计

根据前期调查分析以及查阅文献可知,太原污染土壤中Cd含量最高可达0.5 mg·kg⁻¹左右^[12],所以本研究选择土壤Cd含量为其一般污染的10倍进行试验。

试验设单一酸雨和酸雨+Cd复合胁迫两个系列,每个系列分别设置对照(pH值为6.5)和4个不同pH值的酸雨处理,每处理4个重复,共40个样品。对照

组用蒸馏水浇灌,处理组分别用不同pH值的酸雨浇灌。单一和复合胁迫不同处理pH值均分别设置为5、4、3、2。复合胁迫中, Cd^{2+} 质量浓度均设置为 $5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

1.3 试验方法

称取试验风干土(180 ± 0.3) g装入圆形塑料钵钵(尺寸为 $8\text{ cm}\times6\text{ cm}\times7\text{ cm}$,底部有排水孔),单一处理系列和复合处理系列分别加入50 mL蒸馏水和含 Cd^{2+} 的水溶液(使得复合处理系列土壤 Cd^{2+} 含量为 $5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),放置过夜^[23]。试验前先对该批种子进行挑选,选择大小一致、颗粒饱满、无霉变的玉米种子,测定其发芽率,确定所选种子发芽率达100%,再进行后续试验。对挑选的种子用75%乙醇溶液浸泡10 min消毒,用蒸馏水冲洗3~5次,然后将种子胚芽朝上摆放于钵钵中。每钵钵放置8粒种子,分别用40 g土壤覆盖,覆膜。培养过程均在光照培养箱中进行,试验温度(25 ± 2) $^{\circ}\text{C}$,相对湿度40%~60%。光照培养箱设置昼/夜时间为12 h/12 h。待玉米种子发芽后,拆除覆膜,待植株长到“三叶一心”后每日定时浇灌喷洒15 mL不同pH值的酸雨。玉米种子培养7 d,记录其在各花盆中的萌发情况;玉米幼苗发芽后14 d,测定株高、根长、株质量、根质量等生长指标,以及抗氧化酶活性和叶绿素含量^[19-20]。

1.4 测定方法

1.4.1 抗氧化酶活性测定

超氧化物歧化酶(SOD)采用氮蓝四唑法测定^[24];过氧化物酶(POD)采用愈创木酚法测定^[25];过氧化氢酶(CAT)采用过氧化氢分解法测定^[26];谷胱甘肽-S-转移酶(GST)参照南京建成试剂盒的测试方法测定。

1.4.2 叶绿素含量测定

取0.1 g新鲜玉米叶片,剪碎置于比色管中,加入50 mL丙酮/乙醇溶液(体积比1:1),混匀,置于4 $^{\circ}\text{C}$ 冰箱中^[26]。待叶片完全变白,叶绿素被充分提取后,测定吸光值。

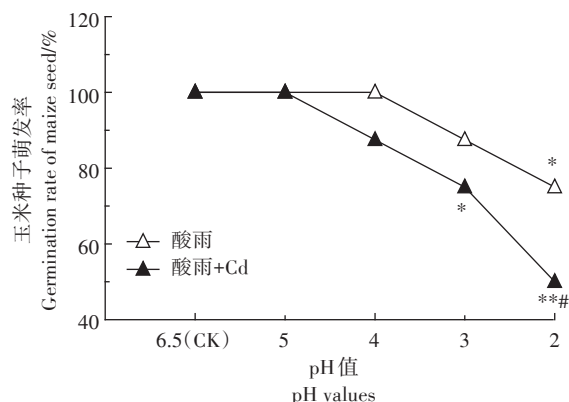
1.5 数据处理

使用Excel 2010进行数据处理,SPSS 17.0统计软件对不同处理数据进行 t 检验,使用Origin画图。

2 结果与分析

2.1 玉米幼苗生长情况

单一和复合处理随酸雨强度的增大,玉米种子萌发率如图1所示。与各自空白对照相比,两种胁迫的萌发率均随酸雨强度的增大而呈现降低趋势。pH范围为5~3时,单一胁迫对玉米种子萌发率均无显著影



*、**、***分别表示与各自空白对照相比在 $P<0.05$ 、 $P<0.01$ 、 $P<0.001$ 水平上差异显著;#、##、###分别表示复合胁迫与同强度酸雨单一胁迫相比在 $P<0.05$ 、 $P<0.01$ 、 $P<0.001$ 水平上差异显著。下同
*, **, *** indicates significant difference compared with the blank control at $P<0.05$, $P<0.01$, $P<0.001$, respectively; #, ##, ### indicates significant difference compared with the single stress of acid rain at $P<0.05$, $P<0.01$, $P<0.001$, respectively. The same below

图1 不同处理对玉米种子萌发率的影响

Figure 1 Effects of different treatments on germination rate of maize seeds

响($P>0.05$);当pH值为2时,两种胁迫均诱导玉米种子萌发率显著降低($P<0.05$, $P<0.01$)。与同强度酸雨单一胁迫相比,复合胁迫在pH为2时对玉米种子萌发率的影响显著低于单一胁迫($P<0.05$)。说明复合胁迫加重了对植物的毒害作用。

单一和复合处理随酸雨强度的增大,玉米幼苗生长指标的变化情况详见图2。由图2可知,随着酸雨强度的增大,两种胁迫玉米幼苗的株高、根长、株质量和根质量均表现为先促后抑。与各自空白对照相比,酸雨单一胁迫在pH范围为5~3时,株高、根长、株质量、根质量均逐渐增大,且在pH为4和3时具有不同程度的显著意义($*P<0.05$, $**P<0.01$, $***P<0.001$);pH为2时,4种生长指标均显著降低($*P<0.05$, $**P<0.01$);复合胁迫在pH范围为5~4时,4种生长指标亦逐渐增大,在pH为4时有显著差异($*P<0.05$, $**P<0.01$);之后随着pH降为3~2时,上述指标均显著下降($*P<0.05$, $**P<0.01$, $***P<0.001$)。结果表明pH值等于3、4分别为单一和复合胁迫对玉米幼苗生长变化影响的敏感点。与同强度酸雨单一胁迫相比,复合胁迫仅在pH范围为3~2时显著低于单一胁迫($P<0.05$)。综上所述,复合胁迫4种指标均在敏感点之前高于单一胁迫,敏感点之后低于单一胁迫。

2.2 抗氧化酶活性变化情况

当植物受到外界胁迫或影响时,其体内会积累过多的活性氧自由基(Reactive Oxygen Species, ROS)^[25],

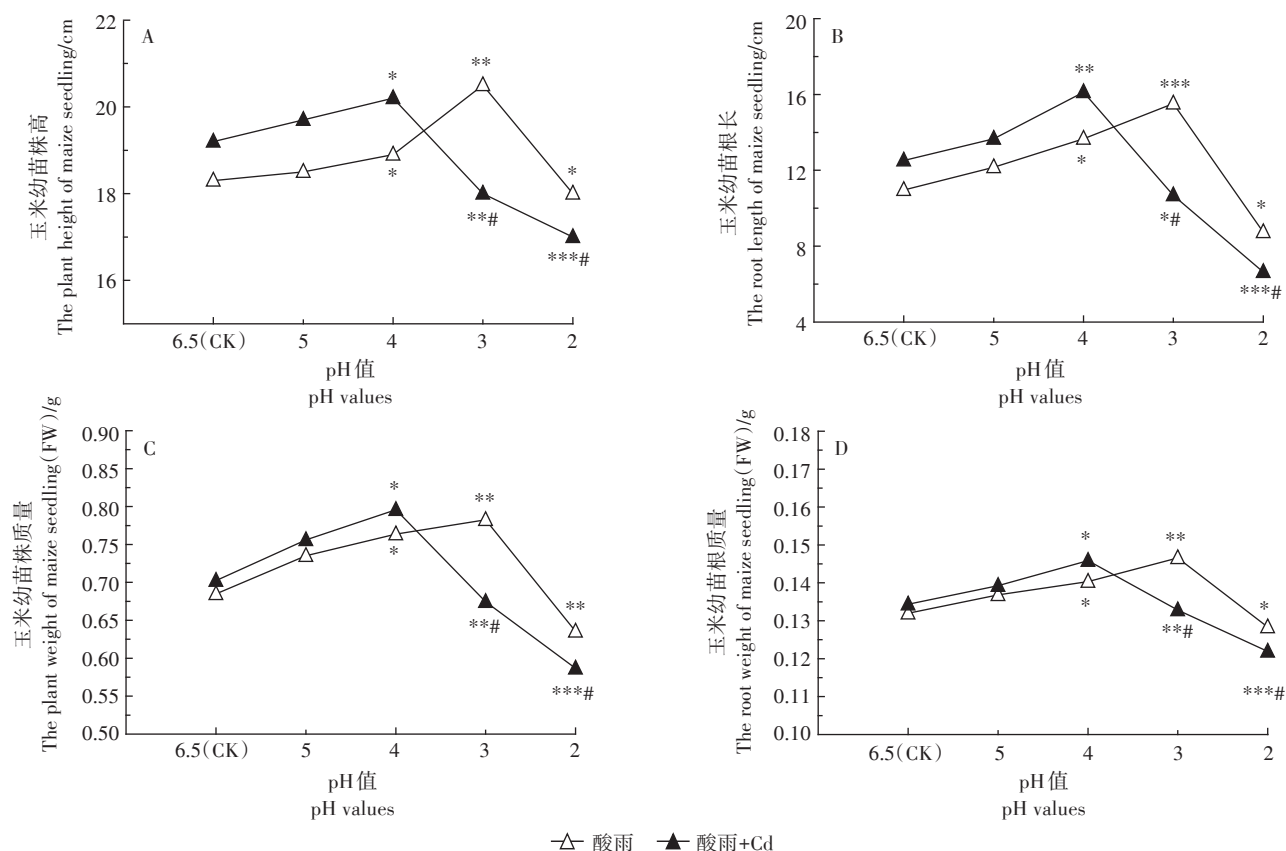


图2 不同处理对玉米幼苗生长指标的影响

Figure 2 Effects of different treatments on growth indicators of maize seedlings

这是造成细胞损伤的主要因素。因此,玉米幼苗抗氧化酶活性的变化,是衡量幼苗是否受到胁迫的重要指标。单一和复合处理随酸雨强度的增大,玉米幼苗SOD、POD、CAT、GST活性的变化情况见图3。由图3可知,与各自空白对照相比,除酸雨单一胁迫CAT、GST活性均随酸雨强度的增大逐渐增强外,其余处理均随酸雨强度的增大呈现先升后降趋势。SOD和POD酶活性随酸雨强度的增大二者变化趋势基本一致,与各自空白对照相比,单一胁迫在pH范围为5~3时,玉米幼苗SOD、POD活性显著增强(* P <0.05, ** P <0.01, *** P <0.001); pH为2时, SOD、POD活性则显著降低(* P <0.05, *** P <0.001);复合胁迫在pH范围为5~4时, SOD、POD活性亦显著增强(* P <0.05, ** P <0.01); pH范围为3~2时, SOD、POD活性显著降低(** P <0.01, *** P <0.001)。所以, pH值等于3、4分别为单一和复合胁迫对玉米幼苗SOD、POD活性变化的敏感点; pH值等于3为复合胁迫对玉米幼苗CAT、GST活性变化的敏感点。与同强度酸雨单一胁迫相比,当pH为5~4时,复合胁迫SOD、POD活性明显高于单一胁迫(# P <0.05);当pH为4~2时,复合胁迫

SOD、POD活性则显著低于单一胁迫(# P <0.05)。CAT和GST活性变化,与各自空白对照相比,单一胁迫在pH范围为5~2时, CAT、GST活性逐渐增大,且无明显的敏感点;复合胁迫在pH范围为5~3时, CAT、GST活性逐渐增大, pH为2时,活性显著降低(** P <0.01, *** P <0.001),所以, pH等于3为复合胁迫对CAT、GST活性的敏感点。与同强度酸雨单一胁迫相比, pH范围为5~3时,复合胁迫CAT、GST活性虽然高于单一胁迫,但并无统计学意义(P >0.05),只在pH为2时,复合胁迫CAT、GST活性显著低于单一胁迫(## P <0.01, ### P <0.001)。综上所述,复合胁迫4种酶活性变化类似于生长指标,均在敏感点之前高于单一胁迫,敏感点之后低于单一胁迫。

2.3 叶绿素含量变化情况

叶绿素是植物进行光合作用所必需的色素。图4分别为单一和复合胁迫随酸雨强度的增大,叶绿素a、叶绿素b及总叶绿素含量的变化情况。由图4可以看出,随着酸雨强度的不断增大,两种胁迫叶绿素a、叶绿素b及总叶绿素含量均呈先升后降的趋势。与各自空白对照相比,单一酸雨胁迫在pH范围为5~4

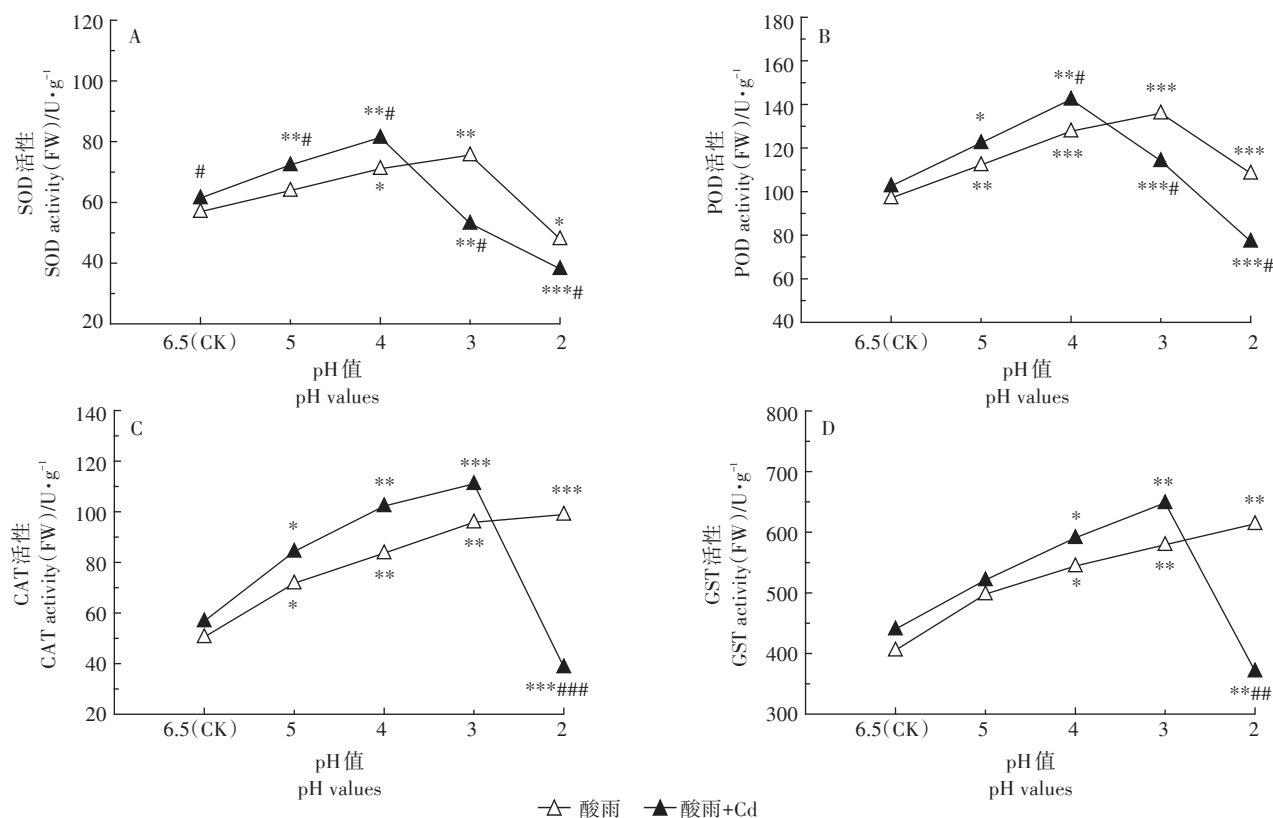


图3 不同处理对玉米幼苗抗氧化酶活性的影响

Figure 3 Effects of different treatments on antioxidant enzyme activity of maize seedlings

时,叶绿素含量逐渐升高,在pH为4时有显著差异(* $P<0.05$);pH为3~2时,叶绿素含量显著降低(* $P<0.05$,** $P<0.01$),特别是pH值为2时,单一酸雨胁迫对玉米叶片叶绿素a、叶绿素b及总叶绿素含量的抑制率分别达到了47.89%、32.52%和40.11%;复合胁迫则在pH范围为5~2时,叶绿素含量逐渐呈现不同程度的降低(* $P<0.05$,** $P<0.01$),pH值为2时,复合胁迫对玉米叶片叶绿素a、叶绿素b及总叶绿素含量的抑制率分别达到了49.96%、39.11%和44.36%。所以,pH值等于4、5分别为单一和复合胁迫对玉米幼苗叶绿素含量影响的敏感点。与同强度酸雨单一胁迫相比,在pH范围为4~2时,复合胁迫叶绿素含量显著低于单一胁迫(# $P<0.05$,## $P<0.01$)。综上所述,复合胁迫叶绿素含量始终低于单一胁迫。

3 讨论

植物受到外界胁迫后,其生长状况会受到一定程度的影响。胡雁春^[27]研究表明,随酸雨强度的增加三叶草和花生种子的萌发率不断降低,三叶草萌发率的pH临界值域是2.5~3.5。聂呈荣等^[28]发现pH小于4.5的酸雨使花生种子萌发率显著降低,而曾庆玲等^[29]发

现酸雨pH值小于3对小麦种子发芽率影响较大。本研究中两种胁迫玉米种子萌发率均随酸雨强度增大而呈现降低趋势,且复合处理加重了对玉米种子萌发率的影响,单一和复合处理分别在pH等于2和3时玉米种子萌发率显著下降。就其生长状况看来,酸雨强度较低促进玉米幼苗的生长,酸雨强度较高则诱使幼苗出现明显的毒害现象,植株较矮、叶片较小且发黄,主根短小粗壮,须根少。复合胁迫对株高、根长、株质量和根质量的影响更为严重,使单一胁迫下玉米幼苗4种生长指标对酸雨的敏感点由pH值等于3提前至4。由此可推断,Cd²⁺在酸雨强度较低时促进玉米幼苗生长,强度较高时抑制生长。这与贺萌萌等^[30]研究的Cd对植物早期生长有很强的毒性,诱导植物产生生理生化异常或病理变化等试验结果一致。综上所述,当植物受到外界酸雨与Cd胁迫时,玉米种子发芽率和幼苗株高、根长、株质量、根质量等生长指标在酸雨pH值范围为5~4时表现为促进,pH范围为3~2时表现为抑制。

植物受到外界胁迫后,体内ROS大量积累,造成代谢失调,破坏植物机体的平衡^[31]。本研究结果表明,酸雨强度较低时,机体可能通过增加SOD活性催

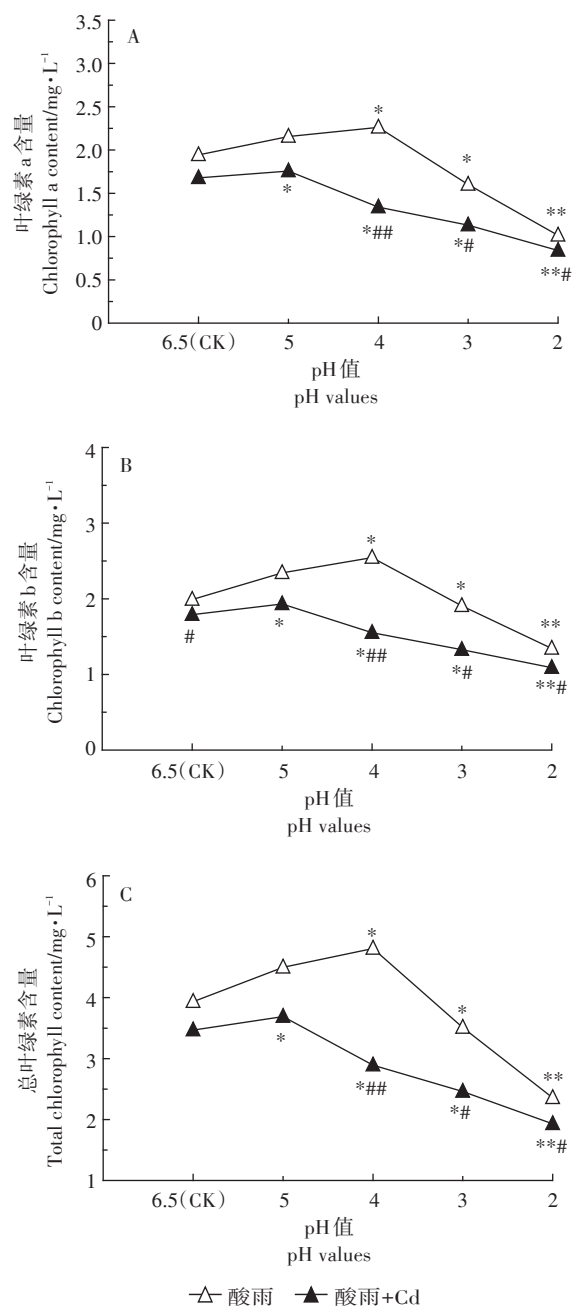


图4 不同处理对玉米幼苗叶绿素含量的影响

Figure 4 Effects of different treatments on chlorophyll content of maize seedlings

化歧化反应,使活性氧生成 H_2O_2 和 $\text{O}_2^{\cdot-}$,同时增强 POD 活性促使 H_2O_2 降解^[32-33],从而减轻或避免 ROS 对细胞的损害;酸雨强度较高时,因植株处于恶劣的环境条件下,幼苗体内 ROS 不断积累,膜脂过氧化产物不断增多,使细胞膜通透性增强,机体受到的胁迫超过本身的防御能力,抗氧化系统紊乱,导致 SOD、POD 活性下降,即 SOD、POD 超过一定阈值后酸雨会对玉米幼苗产生损伤^[34]。因此,植物遭受酸雨胁迫,都存

在一定的 pH 值敏感点或阈值范围,敏感点即该点或阈值范围前后,植株对酸雨的应激反应表现不同。对于低强度酸雨具有一定的缓冲、抵抗作用,随着酸雨强度的增加,在敏感点后植株应激反应失衡,表现出明显的毒害作用。此外, Cd^{2+} 的加入会对玉米幼苗抗氧化系统的损害加大,使得单一胁迫下 SOD、POD 活性的敏感点由 pH 值等于 3 提前至 4。本研究结果显示,在整个酸雨强度研究范围内, CAT、GST 的活性随酸雨强度的增大持续上升,这表明玉米幼苗受到外界酸雨胁迫后,机体内积累过多的 H_2O_2 被 CAT 转化成 H_2O 和 O_2 ,使得体内过多的 H_2O_2 得到清除^[35],同时在本试验研究的酸雨强度范围内, GST 解毒反应也在不断地发挥作用。而 Cd^{2+} 的加入,使得 CAT、GST 活性在 pH 值为 5~3 时上升,在 pH 值为 2 时下降。这表明高强度酸雨胁迫下 Cd^{2+} 的加入,一方面使 H_2O_2 在机体中大量积累,导致抗氧化系统受到损伤, CAT 活性降低;另一方面 CAT 可能会发生光失活,与 H_2O_2 和 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 反应形成复合物,抑制 CAT 活性^[24]。同时,玉米幼苗在复合污染中,随着胁迫强度的增强,解毒反应不断进行,特别在 pH 值为 2 时,幼苗体内还原型谷胱甘肽被大量消耗,亦会造成 GST 活性降低^[36]。

本研究中,酸雨强度较低时,玉米叶片叶绿素含量增加是因为酸雨中 NO_3^- 的施氮效应加速了叶绿素的合成^[37],且玉米幼苗对低强度酸雨具有一定的耐性。但随着酸雨强度的增加,叶绿素含量明显下降且伴随着叶片边缘失绿,畸形、扭曲或皱缩,叶片变短,棕色焦枯等症状,这是因为高强度酸雨胁迫下,玉米幼苗体内活性氧积累并造成膜脂过氧化损伤,抗氧化系统紊乱,导致幼苗叶绿体等膜质器官的解体。与单一胁迫相比,复合胁迫叶绿素含量始终低于单一胁迫,这可能是因为酸雨促进了土壤中其他重金属的溶解,土壤中其他重金属与 Cd^{2+} 复合,加大对玉米幼苗叶绿体结构的损害,加快叶绿素的降解速度。此外,低强度酸雨与 Cd 复合胁迫虽可通过增强玉米幼苗的抗氧化酶活性来抵御环境胁迫,但机体内积累过多的 ROS 并未得到有效清除,幼苗虽表现为生长促进,但叶绿体结构受到了损伤,叶绿素含量下降。

4 结论

(1)单一酸雨胁迫会对玉米幼苗的生长产生影响。酸雨强度较低时,玉米幼苗抗氧化酶活性提高,叶绿素含量增大,光合作用速率加大,有表观上促进玉米幼苗生长的现象;酸雨强度较高时,机体抗氧化系统受到损

伤,导致抗氧化酶活性降低,阻碍叶绿素的合成,光合速率降低,抑制玉米幼苗生长。SOD和POD酶活性变化敏感点为pH值等于3,叶绿素含量变化的敏感点则为pH值等于4。

(2)对于酸雨与Cd的复合胁迫,Cd²⁺加入后表现为在酸雨强度较低时,促进玉米幼苗的生长和抗氧化酶活性升高;酸雨强度较高时,抑制玉米幼苗的生长和抗氧化酶活性。但酶活性和叶绿素含量变化的敏感点,均较单一酸雨胁迫敏感点的pH值大。亦即,Cd²⁺的加入使酸雨单一胁迫的效应在较高pH值时出现。在本研究pH值范围内,复合胁迫叶绿素含量始终低于单一胁迫。

研究结果提示,在酸雨与重金属Cd复合胁迫中,厘清酸雨单一胁迫和复合胁迫对作物的pH值敏感点和阈值范围,对作物受胁迫后采取措施进行修复有重要的指导意义。

参考文献:

- [1] 王 君,张武平,张 勇,等.模拟酸雨对土壤中铁、锰、锌的浸出特征[J].化学研究与应用,2006,18(4):422-425.
WANG Jun, ZHANG Wu-ping, ZHANG Yong, et al. Characteristics of Fe, Mn and Zn leached from soils by simulative acid rain[J]. *Chemical Research and Application*, 2006, 18(4):422-425.
- [2] Driscoll C T, Lawrence G B, Bulger A J, et al. Acidic deposition in the northeastern United States: Sources and inputs, ecosystem effects, and management strategies[J]. *BioScience*, 2001, 51(3):180-198.
- [3] 张 寒,胡正华,陈书涛,等.模拟酸雨对大豆田土壤N₂O通量及植株和土壤氮含量的影响[J].生态环境学报,2017,26(4):590-596.
ZHANG Han, HU Zheng-hua, CHEN Shu-tao, et al. Effects of simulated acid rain on soil N₂O emissions and nitrogen contents of plant and soil in soybean farmland[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, 26(4):590-596.
- [4] Livingston R A. Acid rain attack on outdoor sculpture in perspective[J]. *Atmospheric Environment*, 2016, 146:332-345.
- [5] Singh S, Elumalai S P, Pal A K. Rain pH estimation based on the particulate matter pollutants and wet deposition study[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 563/564:293-301.
- [6] 许新辉,郜洪文.中国南方酸雨的分布特征及其成因分析[J].四川环境,2011,30(4):135-139.
XU Xin-hui, GAO Hong-wen. Analysis of the distribution and causes of acid rain in southern China[J]. *Sichuan Environment*, 2011, 30(4):135-139.
- [7] Das P, Samantaray S, Rout G R. Studies on cadmium toxicity in plants: A review[J]. *Environmental Pollution*, 1997, 98(1):29-36.
- [8] 环境保护部,国土资源部.全国土壤污染状况调查公报[J].中国环保产业,2014(5):10-11.
Ministry of Environmental Protection, Ministry of Land and Resources. Bulletin of the national soil pollution survey[J]. *China Environmental Protection Industry*, 2014(5):10-11.
- [9] 彭 鸥,铁柏清,叶长城,等.稻米镉关键积累时期研究[J].农业资源与环境学报,2017,34(3):272-279.
PENG Ou, TIE Bo-qing, YE Chang-cheng, et al. The key period of cadmium accumulation in rice[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2017, 34(3):272-279.
- [10] 黄 辉,李 升,郭娇丽.镉胁迫对玉米幼苗抗氧化系统及光合作用的影响[J].农业环境科学学报,2010,29(2):211-215.
HUANG Hui, LI Sheng, GUO Jiao-li. The influence of cadmium (Cd²⁺) to the antioxidant system and photosynthesis of seedling of *Zea mays* L[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(2):211-215.
- [11] 周东美,王慎强,陈怀满,等.土壤有机污染物-重金属复合污染的交互作用[J].土壤与环境,2000,9(2):143-145.
ZHOU Dong-mei, WANG Shen-qiang, CHEN Huai-man, et al. Interaction of organic pollutants and heavy metal in soil[J]. *Soil and Environmental Sciences*, 2000, 9(2):143-145.
- [12] 张 萌,毋燕妮,解静芳,等.太原市污灌区土壤镉存在形态与生物可利用性研究[J].环境科学学报,2015,35(10):3276-3283.
ZHANG Meng, WU Yan-ni, XIE Jing-fang, et al. Chemical speciation and bioavailability of cadmium in sewage-irrigated farm soils in Taiyuan[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(10):3276-3283.
- [13] Wang D Z, Jiang X, Rao W, et al. Kinetics of soil cadmium desorption under simulated acid rain[J]. *Ecological Complexity*, 2009, 6(4):432-437.
- [14] Liao B H, Liu H Y, Zeng Q R, et al. Complex toxic effects of Cd²⁺, Zn²⁺, and acid rain on growth of kidney bean (*Phaseolus vulgaris* L.) [J]. *Environment International*, 2005, 31(6):891-895.
- [15] 麦博儒,郑有飞,梁 骏,等.模拟酸雨对小麦叶片同化物、生长和产量的影响[J].应用生态学报,2008,19(10):2227-2233.
MAI Bo-ru, ZHENG You-fei, LIANG Jun, et al. Effects of simulated acid rain on leaf photosynthate, growth, and yield of wheat[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(10):2227-2233.
- [16] Chen J, Wang W H, Liu T W, et al. Photosynthetic and antioxidant responses of *Liquidambar formosana* and *Schima superba* seedlings to sulfuric-rich and nitric-rich simulated acid rain[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2013, 64:41-51.
- [17] 徐苏凌,方 勇,邢承华.酸雨和Cd复合胁迫对紫花苜蓿生长和抗氧化酶系统的影响[J].浙江大学学报(农业与生命科学版),2008,34(4):467-472.
XU Su-ling, FANG Yong, XING Cheng-hua. Complex effects of acid rain and cadmium on growth and antioxidase system of alfalfa[J]. *Journal of Zhejiang University (Agriculture & Life Sciences)*, 2008, 34(4):467-472.
- [18] 余苹中,廖柏寒,宋稳成,等.模拟酸雨和Cd对小白菜四季豆生理生化特性的影响[J].农业环境科学学报,2004,23(1):43-46.
YU Ping-zhong, LIAO Bo-han, SONG Wen-cheng, et al. Effects of simulated acid rain and soil Cd on physiological and biochemical characteristics of *Brassica chinensis* and *Phaseolus vulgaris* L[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, 23(1):43-46.
- [19] 李 萌,解静芳,吕佳莉,等.污水与镉复合胁迫对玉米幼苗抗氧化酶活性的影响[J].山西农业科学,2017,45(2):172-177.

- LI Meng, XIE Jing-fang, LÜ Jia-li, et al. Effects of sewage and Cd compound stress on maize seedling antioxidant enzyme activity[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2017, 45(2):172-177.
- [20] 李 萌. 模拟酸雨与镉复合胁迫对玉米幼苗的影响研究[D]. 太原: 山西大学, 2017.
- LI Meng. Effects of simulated acid rain and Cd combined stress on maize seedlings[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2017.
- [21] 毋燕妮, 韩 琦, 张 萌, 等. 污水灌溉和镉胁迫对菠菜镉积累及其生长过程的影响[J]. 华北农学报, 2014, 29(1):178-182.
- WU Yan-ni, HAN Qi, ZHANG Meng, et al. Effects of sewage irrigation and cadmium stresses on the cadmium accumulation and growth process of spinach[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2014, 29(1):178-182.
- [22] 王旭东, 许可文. 太原地区近15年降水pH值时空分布特征分析[J]. 科技情报开发与经济, 2011, 21(3):173-175.
- WANG Xu-dong, XU Ke-wen. Analysis on the space-time distribution characteristics of precipitation pH value in recent 15 years in Taiyuan area[J]. *Sci-Tech Information Development & Economy*, 2011, 21(3):173-175.
- [23] 赵丽娟, 张 洪, 解静芳, 等. 土壤残留氯磺隆和镉联合胁迫对菠菜代谢产物的影响[J]. 生态毒理学报, 2016, 11(1):274-282.
- ZHAO Li-juan, ZHANG Hong, XIE Jing-fang, et al. Joint effects of soil residual chlorsulfuron and cadmium on metabolites of *Spinacia oleracea* L[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2016, 11(1):274-282.
- [24] Jiang L, Ma L, Sui Y, et al. Effect of manure compost on the herbicide prometryne bioavailability to wheat plants[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 184(1/2/3):337-344.
- [25] Zhou Z S, Wang S J, Yang Z M. Biological detection and analysis of mercury toxicity to alfalfa (*Medicago sativa*) plants[J]. *Chemosphere*, 2008, 70(8):1500-1509.
- [26] 李得孝, 郭月霞, 员海燕, 等. 玉米叶绿素含量测定方法研究[J]. 中国农学通报, 2005, 21(6):153-155.
- LI De-xiao, GUO Yue-xia, YUAN Hai-yan, et al. Determined methods of chlorophyll from maize[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2005, 21(6):153-155.
- [27] 胡雁春. 模拟酸雨对三叶草种子萌发及幼苗生理指标的影响[J]. 安徽农业科学, 2014, 42(1):85-86, 89.
- HU Yan-chun. Study on the influence of simulated acid rain on clover[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2014, 42(1):85-86, 89.
- [28] 聂呈荣, 陈思果, 温玉辉, 等. 模拟酸雨对花生种子萌芽及幼苗生长的影响[J]. 中国油料作物学报, 2003, 25(1):34-36.
- NIE Cheng-rong, CHEN Si-guo, WEN Yu-hui, et al. Effect of acid rain on seed germination and seedling growth of peanut[J]. *Chinese Journal on Oil Crop Sciences*, 2003, 25(1):34-36.
- [29] 曾庆玲, 黄晓华, 周 青. 酸雨对水稻、小麦和油菜种子萌发的影响[J]. 环境科学, 2015, 26(1):181-184.
- ZENG Qing-ling, HUANG Xiao-hua, ZHOU Qing. Effect of acid rain on seed germination of rice, wheat and rape[J]. *Environmental Science*, 2015, 26(1):181-184.
- [30] 贺萌萌, 徐 猛, 杜艳丽, 等. 镉在北京褐潮土中对玉米幼苗及其根际微生物的毒性效应[J]. 生态毒理学报, 2013, 8(3):404-412.
- HE Meng-meng, XU Meng, DU Yan-li, et al. Toxic effects of cadmium on maize seedlings and rhizosphere microbes in fluvo-aquic soils of Beijing[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2013, 8(3):404-412.
- [31] Allen R D. Dissection of oxidative stress tolerance using transgenic plants[J]. *Plant Physiology*, 1995, 107(4):1049-1054.
- [32] 王兴明, 涂俊芳, 李 晶, 等. 镉处理对油菜生长和抗氧化酶系统的影响[J]. 应用生态学报, 2006, 17(1):102-106.
- WANG Xing-ming, TU Jun-fang, LI Jing, et al. Effects of Cd on rape growth and antioxidant enzyme system[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(1):102-106.
- [33] 赵士诚, 孙静文, 马有志, 等. 镉对玉米幼苗活性氧代谢、超氧化物歧化酶和过氧化氢酶活性及其基因表达的影响[J]. 中国农业科学, 2008, 41(10):3025-3032.
- ZHAO Shi-cheng, SUN Jing-wen, MA You-zhi, et al. Effects of cadmium on reactive oxygen species metabolism, activities and gene expressions of superoxide dismutase and catalase in maize (*Zea Mays*) seedling[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(10):3025-3032.
- [34] 宇克利, 邹 婧, 邹金华. 镉胁迫对玉米幼苗抗氧化酶系统及矿质元素吸收的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(6):1050-1056.
- YU Ke-li, ZOU Jing, ZOU Jin-hua. Effects of cadmium stress on antioxidant enzyme system and absorption of mineral elements in maize seedlings[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(6):1050-1056.
- [35] 崔宏莉, 解静芳, 杨 彪, 等. 污水与镉胁迫对菠菜几种抗氧化酶活性的影响[J]. 生态毒理学报, 2010, 5(2):274-279.
- CUI Hong-li, XIE Jing-fang, YANG Biao, et al. Effects of sewage irrigation and cadmium stresses on the activities of several antioxidant enzymes of spinach[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2010, 5(2):274-279.
- [36] Yin X L, Jiang L, Song N H, et al. Toxic reactivity of wheat (*Triticum aestivum*) plants to herbicide isoproturon[J]. *Journal of Agriculture & Food Chemistry*, 2008, 56(12):4825-4831.
- [37] Shan Y. Effects of simulated acid rain on *Pinus densiflora*: Inhibition of net photosynthesis by the pheophytization of chlorophyll[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 1998, 103(1/2/3):121-127.