

网络出版时间:2013-10-22 20:35
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20131022.2035.036.html>

铅铜复合胁迫对芥菜子叶抗性的影响

邹文桐

(福建师范大学 福清分校 生物与化学工程系,福建 福清 350300)

[摘 要] **【目的】**研究不同质量浓度铅铜复合胁迫对芥菜子叶抗性指标的影响,为揭示重金属复合胁迫对植物抗性的影响机制提供参考。**【方法】**以超富集植物福州宽秆芥菜为试验材料,通过种子萌发试验,研究铅铜复合胁迫处理(对照(CK):0 mg/L Pb(NO₃)₂+0 mg/L CuCl₂;处理 1:100 mg/L Pb(NO₃)₂+10 mg/L CuCl₂;处理 2:200 mg/L Pb(NO₃)₂+20 mg/L CuCl₂;处理 3:300 mg/L Pb(NO₃)₂+30 mg/L CuCl₂;处理 4:500 mg/L Pb(NO₃)₂+50 mg/L CuCl₂)对芥菜子叶中的可溶性蛋白质、可溶性糖、脯氨酸(Pro)、MDA 含量和 POD、SOD、CAT 活性以及光合色素含量等指标的影响。**【结果】**随铅铜复合胁迫的加剧,芥菜子叶中的可溶性蛋白质和可溶性糖含量均呈先增后减的变化趋势,Pro 和 MDA 含量较对照(CK)极显著增加,氧负离子产生速率呈增加趋势,POD 活性呈先升后降趋势,SOD 活性呈逐渐上升趋势,CAT 活性呈逐渐降低趋势,芥菜子叶中的叶绿素 a 和叶绿素 a+b 呈先增加后减少趋势,而叶绿素 b 和类胡萝卜素含量则呈递减趋势。**【结论】**在受到铅铜复合胁迫时,芥菜的抗逆性降低,但同时也对较低质量浓度铅铜胁迫表现出一定的抗性。

[关键词] 芥菜;铅;铜;抗性

[中图分类号] Q945.78;S637.201 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1671-9387(2013)11-0191-05

Effect of combined lead and copper stress on resistance of *Brassica juncea* cotyledon

ZOU Wen-tong

(Biology and Chemistry Engineering Department ,Fuqing Branch of Fujian Normal University ,Fuqing ,Fujian 350300 ,China)

Abstract: **【Objective】** This paper studied the effect of combined lead and copper stress on resistance of *Brassica juncea* cotyledon to reveal the mechanism of plant resistance to heavy metal stress. **【Method】** By seed sprouting test, taking the hyperaccumulation plant Fuzhou *B. juncea* as test material, the effects of combined lead and copper stress (control (CK):0 mg/L Pb(NO₃)₂+0 mg/L CuCl₂, treatment 1:100 mg/L Pb(NO₃)₂+10 mg/L CuCl₂, treatment 2:200 mg/L Pb(NO₃)₂+20 mg/L CuCl₂, treatment 3:300 mg/L Pb(NO₃)₂+30 mg/L CuCl₂, and treatment 4: 500 mg/L Pb(NO₃)₂+50 mg/L CuCl₂) on soluble protein, soluble sugar, Pro, MDA contents and POD, SOD, and CAT activities and photosynthetic pigment contents of *Brassica juncea* cotyledon were studied. **【Result】** With the aggravation of combined lead and copper stress, soluble protein and soluble sugar, POD activity, chlorophyll a and chlorophyll a+b of *B. juncea* cotyledon decreased after initial increase, Pro and MDA contents and O₂⁻ producing rate increased significantly compared to CK, SOD activity increased gradually, and CAT activity, chlorophyll b and carotenoid content decreased gradually. **【Conclusion】** Under combined lead and copper stress, stress resistance of *B. juncea* reduced, and the resistance of *B. juncea* to lead and copper in adversity was observed.

[收稿日期] 2012-12-13
[基金项目] 福建省教育厅 A 类项目(JA12357)
[作者简介] 邹文桐(1981—),男,福建福清人,实验室,硕士,主要从事植物营养生理生化研究。E-mail:wtz_5267370@163.com

Key words: *Brassica juncea*; lead; copper; resistance

铜是植物生长发育必需的微量营养元素,但过量的铜会抑制植物的生长,且会造成污染。重金属铅具有长期性和非移动性等特征,土壤被铅污染后,会对作物、农产品和地下水产生次级污染,并通过食物链影响人类健康;铅是地球上分布广泛、含量丰富且最严重的环境污染物,易与铜污染相复合。关于重金属复合污染对于植物生理生化影响,国内已有许多报道^[1-2],且主要集中在铅镉^[3-4]、铜锌^[5]、镉铜^[6]、铜铬^[7]等复合污染方面。如曹莹等^[4]研究铅镉复合胁迫对不同耐性玉米衰老特性的影响后得出,随着铅镉复合浓度的升高,玉米幼苗叶片中的丙二醛(MDA)含量增加,叶绿素含量和超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)活性降低。王广林等^[8]发现,随着铜锌复合胁迫的加剧,丁香蓼的SOD、过氧化氢酶(CAT)活性均呈下降趋势,MDA含量呈增加趋势。孙延东等^[9]研究表明,黄菖蒲地上部分的MDA和游离脯氨酸(Pro)含量随镉铜复合处理浓度的增加而增大;而SOD和POD活性在较低浓度处理前期上升,在较高浓度处理后期下降;叶片中的叶绿素a和叶绿素b含量均随镉铜复合处理浓度的增加而降低。铅是环境污染的主要元素之一,但有关铅铜复合胁迫对植物抗逆性影响的研究至今未见报道。芥菜为十字花科芸苔属植物,营养齐全,富含蛋白质,是粤东地区加工和鲜食的主要蔬菜品种。芥菜喜冷凉湿润的气候,生长适温15~20℃,结球形成以10~15℃最为适宜,低于10℃容易抽薹,超过25℃不利于结球。芥菜作为一种耐重金属铅类作物^[10],其复合铅铜胁迫下的抗性有待于进一步探讨。为此,本研究以福州宽秆芥菜为试验材料,采用种子萌发试验,研究铅铜复合胁迫对芥菜抗性的影响,通过芥菜在铅铜复合胁迫下的抗性生理指标来初步反映其对铅铜复合胁迫的抗性,为十字花科芸苔属植物铅铜复合胁迫抗性的研究提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料

供试植物材料为福州宽秆芥菜种子,购自福建福清市种子站。

1.2 试验设计

挑选籽粒饱满、大小比较均匀的芥菜种子,用质量分数0.4%高锰酸钾溶液表面消毒6 min后,用自

来水冲洗数次,再用去离子水反复冲洗,然后用滤纸将水吸干备用。将处理好的种子于25℃生化培养箱中用去离子水浸种24 h。将浸种后的种子播种于铺有2张滤纸的9 cm培养皿中,每皿100粒种子,为1个重复。试验设5个铅铜复合胁迫处理,分别为对照(CK):0 mg/L Pb(NO₃)₂ + 0 mg/L CuCl₂;处理1:100 mg/L Pb(NO₃)₂ + 10 mg/L CuCl₂;处理2:200 mg/L Pb(NO₃)₂ + 20 mg/L CuCl₂;处理3:300 mg/L Pb(NO₃)₂ + 30 mg/L CuCl₂;处理4:500 mg/L Pb(NO₃)₂ + 50 mg/L CuCl₂。每个处理重复3次,在各处理的培养皿中添加10 mL对应的铅铜混合溶液,然后置于人工气候箱(参数设定为温度25.0℃,光照强度6 000 lx,光照时间12 h/d,湿度≥80%)内培养,培养期间每天补充一定量的处理液,保证种子不完全浸没在处理液中,以利于种子进行有氧呼吸。

1.3 测定指标及方法

在宽秆芥菜种子萌发第9天,采集各处理相同叶龄的芥菜子叶进行相关生理代谢指标的测定。称0.40 g新鲜芥菜子叶,加2 mL酶提取液(38.125 mL 0.2 mol/L Na₂HPO₄ · 12H₂O + 24.375 mL 0.2 mol/L NaH₂PO₄ · 2H₂O),冰浴下研磨成匀浆,转入离心管,再分别用4 mL酶提取液(pH 7.0, 50 mmol/L PBS)少量多次冲洗研钵并入离心管,总体积共6 mL,离心机先预冷,后于-4℃、10 000 r/min离心10 min,将上清液倒入另一离心管,于-4℃冰箱中保存,用于测定芥菜的相关生理指标。可溶性蛋白质含量参照李合生^[11]的方法测定,用牛血清蛋白作标准曲线;可溶性糖、Pro、MDA含量及POD、CAT活性参照李合生^[11]的方法测定;氧负离子(O₂⁻)产生速率参照王爱国等^[12]的方法测定;SOD活性参照Giannoplitis等^[13]的方法测定;子叶光合色素含量用乙醇丙酮混合液法提取,7200型分光光度计测定^[14]。

1.4 数据处理与分析

试验数据采用DPS 2005软件进行方差分析,利用LSD法进行差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 铅铜复合胁迫对芥菜子叶生理指标的影响

由表1可知,随着铅铜复合质量浓度的增加,芥菜子叶的可溶性蛋白质含量呈先上升后下降的趋

势,且以处理 1 的最高,与对照相比增加了 38.78% ($P<0.05$);此后,随着铅铜复合质量浓度的继续增加,芥菜子叶中的可溶性蛋白质含量逐渐下降;处理 4 芥菜子叶中的可溶性蛋白质含量仅较对照上升了 7.76%,差异不显著($P>0.05$)。

由表 1 可以看出,随着铅铜复合质量浓度的增加,芥菜子叶的可溶性糖含量呈现先增加后减少的趋势,且以处理 2 最高,与对照相比增加了 37.52% ($P<0.01$);随着铅铜复合胁迫的进一步加剧,芥菜子叶中的可溶性糖含量逐渐减少;但各胁迫处理芥菜子叶中的可溶性糖含量均极显著高于对照($P<$

0.01)。

由表 1 还可以看出,随铅铜复合质量浓度的升高,芥菜子叶中脯氨酸含量呈增加趋势,处理 1~4 分别较对照增加了 22.79%,36.52%,56.08%和 63.92%,均达极显著水平($P<0.01$)。

由表 1 可知,芥菜子叶中的氧负离子产生速率随铅铜复合胁迫的加剧呈增加趋势。其中,处理 1 芥菜子叶的氧负离子产生速率较对照显著增加了 18.30% ($P<0.05$);处理 2、处理 3 和处理 4 较对照均极显著增加,增幅分别为 75.00%,90.62%和 113.84%。

表 1 铅铜复合胁迫对芥菜子叶可溶性蛋白质、可溶性糖、脯氨酸和氧负离子产生速率的影响

Table 1 Effects of combined lead and copper stress on protein,soluble sugar, proline content and O ₂ ⁻ producing rate of <i>B. juncea</i> cotyledon				
处理 Treatment	可溶性蛋白质/ (mg·g ⁻¹) Soluble protein	可溶性糖/ (μmol·g ⁻¹) Soluble sugar	脯氨酸/ (μg·g ⁻¹) Pro	氧负离子产生速率/ (nmol·mg ⁻¹ ·min ⁻¹) O ₂ ⁻ producing rate
CK	4.77±0.71 cA	60.58±2.67 dC	48.00±2.84 dC	2.24±0.12 eC
1	6.62±1.21 aA	71.73±1.95 cB	58.94±1.14 cB	2.65±0.14 dC
2	6.43±0.75 aA	83.31±2.67 aA	65.53±2.56 bB	3.92±0.12 cB
3	6.31±0.58 abA	76.93±2.38 bAB	74.92±2.97 aA	4.27±0.19 bB
4	5.14±0.48 bcA	71.35±1.81 cB	78.68±4.85 aA	4.79±0.21 aA

注:同列数据后标不同小写字母表示在 $P=0.05$ 水平上有显著差异,标不同大写字母表示在 $P=0.01$ 水平上有极显著差异。下同。
Note:Lowercase and uppercase letters following data in the same column mean significant difference at $P=0.05$ and $P=0.01$ level respectively. The same below.

2.2 铅铜复合胁迫对芥菜子叶抗氧化相关指标的影响

由表 2 可知,随着铅铜复合胁迫的加剧,芥菜子叶中的 MDA 含量呈逐渐上升的趋势,与对照相比,处理 1~4 分别增加了 188.63%,201.89%,250.71%和 278.20%,差异均达极显著水平($P<0.01$)。

由表 2 可以看出,在铅铜复合胁迫下,芥菜子叶中的 POD 活性随胁迫程度的加剧呈先升后降的趋势。处理 1 和处理 2 芥菜子叶的 POD 活性较对照分别提高了 7.48%和 52.36% ($P<0.01$);处理 3 和处理 4 芥菜子叶的 POD 活性分别较对照下降了

23.34%和 55.86% ($P<0.01$)。

由表 2 可知,随着铅铜复合质量浓度的增加,芥菜子叶的 SOD 活性呈上升趋势,处理 1~4 分别较对照提高了 14.47%,42.21%,44.38%和 85.29%。方差分析结果表明,处理 2、处理 3 和处理 4 芥菜子叶的 SOD 活性极显著($P<0.01$)高于对照,处理 1 与对照差异未达到显著水平。

从表 2 可知,芥菜子叶中的 CAT 活性随铅铜胁迫程度的加剧呈逐渐下降趋势,各胁迫处理的 CAT 活性均较对照极显著降低,其中处理 4 的 CAT 活性较对照降低了 83.41% ($P<0.01$)。

表 2 铅铜复合胁迫对芥菜子叶 MDA 含量及 POD、SOD 和 CAT 活性的影响

Table 2 Effects of combined lead and copper stress on MDA content and POD, SOD and CAT activities of <i>B. juncea</i> cotyledon				
处理 Treatment	MDA/ (nmol·g ⁻¹)	POD/ (U·mg ⁻¹ ·min ⁻¹)	SOD/ (U·mg ⁻¹ ·min ⁻¹)	CAT/ (U·mg ⁻¹ ·min ⁻¹)
CK	2.11±0.25 dC	82.20±1.65 cC	20.66±1.39 cC	227.91±21.10 aA
1	6.09±0.27 cB	88.35±0.77 bB	23.65±0.75 cC	127.94±14.07 bB
2	6.37±0.14 cB	125.24±2.25 aA	29.38±1.46 bB	105.67±16.65 bB
3	7.40±0.21 bA	63.01±1.58 dD	29.83±2.34 bB	63.53±6.94 cC
4	7.98±0.15 aA	36.28±1.85 eE	38.28±2.81 aA	37.81±2.29 cC

2.3 铅铜复合胁迫对芥菜子叶光合色素含量的影响

由表 3 可知,随着铅铜复合质量浓度的增加,芥

菜子叶中的叶绿素 a 和叶绿素 a+b 均呈先增后减的趋势,且均以处理 1 的最大,但与对照相比差异均

不显著;此后,随铅铜复合胁迫的加剧,芥菜子叶的叶绿素 a 和叶绿素 a+b 均呈减少趋势,处理 4 的叶绿素 a 和叶绿素 a+b 含量较对照分别减少了 21.21%($P<0.05$)和 25.24%($P<0.01$)。芥菜子叶的叶绿素 b 和类胡萝卜素含量随铅铜复合胁迫的

加剧呈递减趋势,且均以处理 4 最低,与 CK 相比,分别极显著降低了 32.43%和 33.33%。叶绿素 a/叶绿素 b 随铅铜复合胁迫加剧总体呈增大趋势,但与对照的差异均未达显著水平。

表 3 铅铜复合胁迫对芥菜子叶光合色素含量的影响

Table 3 Effects of combined lead and copper stress on photosynthetic pigment contents of *B. juncea* cotyledon

处理 Treatment	叶绿素 a/ (mg · g ⁻¹) Chlorophyll a	叶绿素 b/ (mg · g ⁻¹) Chlorophyll b	叶绿素 a+b/ (mg · g ⁻¹) Total chlorophyll	类胡萝卜素/ (mg · g ⁻¹) Carotenoid	叶绿素 a/ 叶绿素 b Chl a/Chl b
CK	0.66±0.09 abAB	0.37±0.03 aA	1.03±0.11 aAB	0.12±0.02 aA	1.78±0.13 aA
1	0.72±0.02 aA	0.35±0.02 aAB	1.07±0.01 aA	0.11±0.01 abAB	2.03±0.16 aA
2	0.57±0.04 bcAB	0.28±0.04 bBC	0.85±0.08 bBC	0.09±0.01 bcAB	2.08±0.17 aA
3	0.56±0.03 bcB	0.28±0.01 bBC	0.84±0.04 bBC	0.08±0.01 cB	1.97±0.06 aA
4	0.52±0.04 cB	0.25±0.02 bC	0.77±0.03 bC	0.08±0.01 cB	2.03±0.26 aA

3 结论与讨论

本研究结果表明,芥菜子叶中的可溶性蛋白质和可溶性糖含量均随铅铜复合胁迫的加剧呈先增加后减少的趋势。这可能是因为铅铜的积累干扰了芥菜子叶中营养物质的吸收和分配,导致氧化光合及脂肪代谢强度减弱,从而使子叶内的可溶性蛋白质和可溶性糖含量减少,该结果与杨远祥等^[1]的研究结论一致;但徐澜等^[15]的研究表明,随铬铅复合胁迫的加剧,小麦叶片中仅有可溶性蛋白质含量减少。

本研究结果显示,随铅铜复合胁迫的加重,芥菜子叶中的 Pro 和 MDA 含量均较对照极显著增加。这可能是因为芥菜体内活性氧产生和清除的平衡遭到破坏,使体内产生并积累了大量的活性氧,导致膜脂过氧化,使芥菜的抗逆性减弱。本研究中随铅铜复合胁迫加剧 MDA 含量增加的结果,与王启明^[16]在玉米幼苗、杨远祥等^[1]在小鳞苔草上的研究结果相似。而姬俊华等^[17]认为,低浓度的 Cr³⁺、Pb²⁺ 复合污染会使小麦叶片中的 Pro 含量显著增加,但高浓度处理下 Pro 含量反而下降。

本研究结果表明,低质量浓度的铅铜积累提高了芥菜子叶的 POD 活性,但随铅铜积累量的逐渐增大,芥菜子叶的 POD 活性受到严重抑制;而高扬等^[18]认为,非超富集植物玉米和萝卜的 POD 活性总体上随铅镉复合质量浓度的增加而提高。这可能与 POD 功能不专一以及重金属的富集过程有关,POD 具有多功能性,除了作为抗氧化酶之外,还参与木质素的合成及叶绿素的降解。另外,POD 同工酶在不同器官中的分布、含量及其表达的差异性也可能是原因之一。

本研究中,随铅铜复合胁迫的加剧,芥菜子叶的

SOD 活性呈逐渐上升趋势,这与高扬等^[18]的研究结果一致。而李志豪等^[19]研究认为,随铅镉复合污染的加剧,云和雪梨叶片的 SOD 活性表现为先降后升再下降的趋势。这可能是由于芥菜属于耐重金属铅类作物^[10],因此其 SOD 活性一直随铅铜胁迫加剧而逐渐升高。

本研究发现,芥菜子叶的 CAT 活性随铅铜复合胁迫的加重呈逐渐降低的趋势。然而廖雪兰等^[20]研究表明,革叶耳蕨的 CAT 活性在低铅镉复合质量浓度下表现为促进,在高铅镉复合质量浓度下表现为抑制。芥菜子叶的氧负离子产生速率随铅铜复合胁迫的加剧呈增加趋势,这是由于 CAT 活性不断下降,植物体内的超氧阴离子 O₂⁻ 及 H₂O₂ 等氧自由基无法彻底清除,因此导致氧负离子的积累。

本研究表明,在低质量浓度铅铜(100 mg/L Pb(NO₃)₂+10 mg/L CuCl₂)复合胁迫下,芥菜子叶中的叶绿素 a 和叶绿素 a+b 呈增加趋势,但与对照差异不显著;而黄国勇等^[21]研究认为,秋茄叶在铅镉汞复合胁迫下,叶绿素含量明显减少。这可能是由于芥菜是超富集重金属铅的植物^[10],低质量浓度的铅处理对其没有太大影响。但铅铜复合质量浓度增加时,芥菜子叶的所有光合色素含量均低于对照。

综上所述,铅铜复合胁迫能显著降低芥菜的抗性,表现为芥菜子叶中的 MDA 和 Pro 含量增加,氧负离子产生速率逐渐上升,CAT 活性不断下降;但作为一种超富集植物,芥菜对铅铜复合胁迫也表现出了一定的抗性,体现为在一定胁迫程度下,其子叶中的可溶性蛋白质、可溶性糖、POD 活性、SOD 活性、叶绿素含量等均有所增加,并可初步判定芥菜对 100 mg/L Pb(NO₃)₂+10 mg/L CuCl₂~200 mg/L

$\text{Pb}(\text{NO}_3)_2 + 20 \text{ mg/L CuCl}_2$ 铅铜复合胁迫表现出抗性。本研究结果为探讨芥菜在污染土壤中的抗性表现及十字花科芸苔属植物对重金属铅铜复合胁迫的抗性提供了参考。

[参考文献]

- [1] 杨远祥,邹开贵,朱雪梅,等. 铅锌胁迫对铅超富集植物小鳞苔草生理代谢特性的影响 [J]. 陕西农业科学, 2009(6): 83-85, 95.
Yang Y X, Zou K G, Zhu X M, et al. Effects of lead and zinc stress on the physiological metabolism parameter of *Carex gentiles* Franch of super enriching lead [J]. Shaanxi Agricultural Sciences, 2009(6): 83-85, 95. (in Chinese)
- [2] 赵化银,蒋小军,杨远祥,等. 铅锌复合胁迫对铅富集植物假繁缕根系活力及碳氮代谢的影响 [J]. 陕西农业科学, 2009(5): 58-61, 78.
Zhao H Y, Jiang X J, Yang Y X, et al. Effects of combined lead and zinc on the root activity and carbon and nitrogen metabolism of *Pseudostellaria* of super enriching lead [J]. Shaanxi Agricultural Sciences, 2009(5): 58-61, 78. (in Chinese)
- [3] 武文飞,南忠仁,王胜利,等. 单一与复合胁迫下油菜对镉、铅的吸收效应 [J]. 环境科学, 2012, 33(9): 3253-3260.
Wu W F, Nan Z R, Wang S L, et al. Uptake effect of Cd and Pb by rape under single Cd/Pb and Cd-Pb combined stress [J]. Environmental Science, 2012, 33(9): 3253-3260. (in Chinese)
- [4] 曹莹,赵艺欣,刘洋,等. 铅镉复合胁迫对不同耐性玉米衰老特性的影响 [J]. 玉米科学, 2011, 19(6): 70-73.
Cao Y, Zhao Y X, Liu Y, et al. Effect of the combined stress of cadmium and lead on senescence characteristics of maize with different tolerances [J]. Journal of Maize Sciences, 2011, 19(6): 70-73. (in Chinese)
- [5] 杨红飞,王友保,李建龙. 铜、锌污染对水稻土中油菜 (*Brassica chinensis* L.) 生长的影响及累积效应研究 [J]. 生态环境学报, 2011, 20(10): 1470-1477.
Yang H F, Wang Y B, Li J L. Impacts of Cu and Zn pollution on rape (*Brassica chinensis* L.) growth and its accumulation effect of heavy metals in paddy soil [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2011, 20(10): 1470-1477. (in Chinese)
- [6] 崔秀敏,吴小宾,李晓云,等. 铜、镉毒害对番茄生长和膜功能蛋白酶活性的影响及外源 NO 的缓解效应 [J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(2): 349-357.
Cui X M, Wu X B, Li X Y, et al. Responses of growth, functional enzyme activity in biomembrane of tomato seedlings to excessive copper, cadmium and the alleviating effect of exogenous NO [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2011, 17(2): 349-357. (in Chinese)
- [7] 胡一鸿. 铜、锌、铬对水稻幼苗抗氧化酶的影响 [J]. 安徽农业科学, 2010, 38(5): 2283-2284.
Hu Y H. Effect of the copper, zinc and chromium on the antioxidant enzyme of rice seedling [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2010, 38(5): 2283-2284. (in Chinese)
- [8] 王广林,张金池,王丽,等. 铜、锌胁迫对丁香蓼生理指标的影响 [J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2009, 33(4): 43-47.
Wang G L, Zhang J C, Wang L, et al. Effects of Cu and Zn stress on physiological indications of *Ludwigia prostrate* Roxb [J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition, 2009, 33(4): 43-47. (in Chinese)
- [9] 孙延东,黄苏珍. 镉、铜复合胁迫下黄菖蒲部分生理抗性研究 [J]. 江苏农业科学, 2007(6): 308-311.
Sun Y D, Huang S Z. Some studies of physiological resistance of combined cadmium and copper on *Huang Changpu* [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2007(6): 308-311. (in Chinese)
- [10] 李剑敏,杨劲松,杨晓英,等. EDTA 对铅污染土壤上芥菜生长及铅积累特性的影响 [J]. 土壤通报, 2007, 38(6): 1178-1181.
Li J M, Yang J S, Yang X Y, et al. Influence of EDTA application on the growth and lead accumulation of mustard seedlings planted in Pb-contaminated soils [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2007, 38(6): 1178-1181. (in Chinese)
- [11] 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: 184-185.
Li H S. Experimental principles and techniques for plant physiology and biochemistry [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000: 184-185. (in Chinese)
- [12] 王爱国,罗广华. 植物的超氧化物自由基与羟胺反应的定量关系 [J]. 植物生理学通讯, 1990(6): 55-57.
Wang A G, Luo G H. Quantitative relation between the reaction of hydroxylamine and superoxide anion radicals in plants [J]. Plant Physiology Communications, 1990(6): 55-57. (in Chinese)
- [13] Giannopolitis C N, Rice S K. Superoxide dismutase purification and quantitative relationship with water-soluble protein in seedlings [J]. Plant Physiol, 1997(59): 315-318.
- [14] 沈伟其. 测定水稻叶片叶绿素含量的混合液提取法 [J]. 植物生理学通讯, 1988(3): 62-64.
Shen W Q. Extraction of mixed solution for determination of chlorophyll content in rice leaf blade [J]. Plant Physiology Communications, 1988(3): 62-64. (in Chinese)
- [15] 徐澜,杨锦忠,安伟,等. Cr、Pb 单一及其复合胁迫对小麦生理生化的影响 [J]. 中国农学通报, 2010, 26(6): 119-126.
Xu L, Yang J Z, An W, et al. Influences of chromium and lead multiple stresses on physiological and biochemical character of wheat [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(6): 119-126. (in Chinese)
- [16] 王启明. 铅、镉单一及复合胁迫对玉米幼苗生理生化特性的影响 [J]. 安徽农业科学, 2006, 34(10): 2036-2037, 2048.
Wang Q M. Effects of Pb^{2+} , Cd^{2+} and combined stress on the physiological and biochemical parameter of maize seedling [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2006, 34(10): 2036-2037, 2048. (in Chinese)