

铅胁迫对茶树生长及叶片生理指标的影响

夏建国, 兰海霞, 吴德勇

(四川农业大学资源环境学院, 四川 雅安 625014)

摘要:通过盆栽试验,研究了不同土壤铅浓度对茶叶生长及叶片生理特性的影响。结果表明,随着土壤铅浓度的升高,夏茶叶绿素含量显著下降,并有失绿现象,茶树生长受到一定程度的抑制。春茶叶绿素含量呈上升趋势,夏茶叶绿素含量呈先增加后降低的趋势。当铅浓度为 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,叶绿素含量达到最大值 $2.93 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$;铅浓度为 $1500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,叶绿素含量达到最小值 $2.28 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$;随铅浓度增加,叶片中游离脯氨酸、丙二醛含量显著增加,两者与铅浓度呈显著正相关,春茶的相关系数分别为 $0.922(P<0.01)$ 和 $0.880(P<0.01)$,夏茶的相关系数为 $0.871(P<0.05)$ 和 $0.971(P<0.01)$,且夏茶中的游离脯氨酸、丙二醛含量大于春茶。铅对春茶、夏茶中可溶性糖的合成有一定的抑制作用,相关系数分别为 $-0.715(P<0.01)$ 和 $-0.912(P<0.01)$ 。在铅浓度为 $0\sim 200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,春茶可溶性糖有小幅增加;在铅浓度为 $200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,春茶、夏茶可溶性糖含量都同时达到最大值。

关键词:铅;茶树生长;茶叶;生理指标

中图分类号:Q945.78 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)01-0043-06

Lead Stress on Growth of Tea Trees and Physiological Index in Leaves of Tea

XIA Jian-guo, LAN Hai-xia, WU De-yong

(College of Resources and Environment, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, China)

Abstract: Effects of different lead concentrations on growth and physiological index in leaves of tea were studied with the tea cultured in pots. The results showed that, with the increasing concentrations of lead, lead had a significant effect to the yield of summer tea, and the green deficiency symptoms were visible, and the growth of tea was inhibited. The chlorophyll (Chl) content of spring tea was enhanced with the increasing concentrations; The Chl content of summer tea was first stimulated and then inhibited with increasing concentration of lead. When the lead concentration in nutrient solution was $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, the Chl content reached the maximum $2.93 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ and when the concentration was $1500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Chl content reached the minimum $2.28 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$. Meanwhile, with increasing concentration of lead, the free proline and malondialdehyde (MDA) content in leaves were significantly enhanced, There was a positive correlation between the free proline, MDA content and the lead concentration, which the coefficient of correlation is $0.922(P<0.01)$ and $0.880(P<0.01)$ respectively on spring tea, and, the coefficient of correlation is $0.871(P<0.05)$ and $0.971(P<0.01)$ on summer tea, and then the summer tea's was higher than spring tea's; Lead would inhibit the synthesis of soluble sugar in the tea, the coefficient of correlation is $-0.715(P<0.01)$ and $-0.912(P<0.01)$ respectively. The soluble sugar of spring tea has a little increase when the lead concentration was $0\sim 100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and the soluble sugar of spring tea and summer tea reached the maximum at the same time when the lead concentration was $200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Keywords: lead; growth of tea tree; tea leaves; physiological index

铅是毒性很强的重金属元素,是植物非必需元素。通过植物的根系或叶片等器官进入植物体内的外源铅,通常会改变细胞膜透性,叶绿体、线粒体、细胞

核等亚显微结构也受到一定程度的破坏,并且竞争性地取代某些酶活性中心的金属元素而影响酶的正常活性,从而引起植物光合作用、呼吸作用、氮素代谢、核酸代谢等一系列生理生化过程的紊乱^[1-4]。此外铅还能通过拮抗作用导致植物体内元素失调,造成营养胁迫,间接影响植物的生长发育^[5]。

茶树是我国重要的经济作物之一,从国内外茶叶发展与开发品种的趋势看,茶叶生产引向“无公害自

收稿日期:2009-05-05

基金项目:国家科技支撑计划(2008BAD98B05);四川农业大学双支计划(2009)

作者简介:夏建国(1967—),男,博士,教授,主要从事土地利用与环境演变研究。E-mail: xiajianguo@126.com

然茶”已成为必然。铅不仅影响茶叶的产量和品质,对人体健康也会产生不利影响,同时也是茶叶卫生检验中比较被关注的元素。相关报道表明,茶叶中铅含量呈现出逐年升高的趋势已成为不争的事实^[6]。近年来,关于重金属铅对植物生理影响的研究越来越多,但只集中于铅在小麦、玉米等农作物和青菜、辣椒等蔬菜等方面的影响研究^[7-10]。此外,在铅对烟草、番茄等的生长发育、生理生化的影响,国内外作了不少工作^[11-15]。在较高铅浓度胁迫下,茶树生长发育、生理指标如何变化等方面的报道还不多见^[16]。

本研究以茶树为材料,通过土培试验研究受不同浓度铅胁迫后,茶植株症状表现及生物量、叶片膜脂过氧化物丙二醛(MDA)含量、叶绿素(Chl)含量以及可溶性糖、脯氨酸活性的变化。初步揭示了不同浓度铅胁迫对茶树叶片生长和生理指标的影响,为铅对茶树伤害机理和提高茶叶品质的研究提供一些科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试茶叶品种为蒙山早熟 213 号,供试土壤为为酸性紫色土,由白垩系夹关组砂岩坡积物发育而成,采于四川蒙顶山。盆栽试验于 2005 年 9 月至 2006 年 8 月在四川农业大学新区农场进行,将采回的土壤混合均匀作为供试土壤。取多个点的土壤混合,经风干,压碎,过筛后测定其基本理化性质(表 1)。

1.2 试验方法

2005 年 9 月,称取供试土壤 16 kg·盆⁻¹,向土壤中施入 Pb,进行 Pb 胁迫处理。Pb 以醋酸铅[Pb(CH₃COO)₂·3H₂O]形式添加,分别称取 0.0、1.3、2.7、5.5、11.0、22.0、41.2 g 醋酸铅,将其溶于 1 000 mL 蒸馏水,分次浇灌于 16 kg 土中,混合均匀并装盆,定时(间隔 15 d)浇水以不从盆底渗出为度,如此反复,钝化 90 d。施入量折合成每盆土(风干土)Pb 浓度分别为:0、50、100、200、400、800、1 500 mg·kg⁻¹土(以纯金属计算),其中 0 处理为对照处理。共 7 个处理,每个处理重复 4 次,共计 28 盆。

2005 年 11 月底移栽长势一致的茶树,每盆 2

株。在 2006 年 4、7 月分别采集相同植株部位芽下第二、三片成熟叶片进行茶叶(春茶、夏茶)生理指标的测定,期间并观察其生长状况。

1.3 茶叶生长及生理指标分析方法

(1)生物量——采集 30 个长势一致的一芽两叶,称其鲜重。

(2)叶绿素——丙酮-乙醇浸泡提取法,分光光度法于 663 nm(叶绿素 a)和 645 nm(叶绿素 b)处测量^[16]。

(3)丙二醛(MDA)——硫代巴比妥酸法^[18]。

(4)脯氨酸——3%的磺基水杨酸提取,2.5%茚三酮显色,甲苯萃取,分光光度法于 520 nm 处测量^[18]。

(5)可溶性糖——恩酮比色法^[17]。

2 结果与讨论

2.1 铅对茶树生长及生物量的影响

铅浓度的升高并没有对春茶产生伤害,相反,对茶树的生长还有一定的促进作用。主要表现为叶色浓绿、有光泽、叶间距长、新叶较多、生长茂盛。在铅胁迫浓度为 400~1 500 mg·kg⁻¹时,铅对夏茶植株的生长有一定的毒害作用,主要表现为发芽较少、叶片失绿、无光泽、萎蔫,还有少量叶片发黄,并且随铅浓度的升高植株的受害程度逐渐加深。但没有明显的毒害作用或将茶树植株致死(表 2)。

铅处理对茶叶鲜重的影响较为明显,春茶鲜重相对对照都有缓慢增加的趋势,但是在整个处理期间变化并不显著,最大增加量是对照的 102.12%;夏茶鲜重随铅浓度的升高而明显下降($r=-0.937, P<0.01$),鲜重减少的最少量是对照的 75.45%,而铅浓度为 200 mg·kg⁻¹时达到最大量,是对照的 101.60%(图 1)。

铅对春茶及低浓度铅胁迫的夏茶的生长有一定的刺激作用。在土壤中加入 0~1 500 mg·kg⁻¹铅后培养 5 个月,春茶百芽重未受到严重影响,并没有发现茶产生毒害症状。这可能与铅在土壤中比较稳定,不易移动有关。同时,茶树有较强的保水力,对铅也具有较高的耐受性,低剂量或短时间的胁迫可能对茶树的生长有一定的刺激作用。这与康孟利等^[19]的研究结果一致。培养 8 个月后,高浓度铅使茶叶叶片失绿、无光

表 1 供试土壤养分含量状况

Table 1 Nutrients content of experimental soil

土壤类型 Soil type	有机质 O.M/ g·kg ⁻¹	全氮 Total N/ g·kg ⁻¹	碱解氮 Alkali-hydroly sable N/mg·kg ⁻¹	速效磷 Available P/ mg·kg ⁻¹	速效钾 Available K/ mg·kg ⁻¹	pH 值 (pH)	有效铅 Avail Pb/ mg·kg ⁻¹	全铅 Total Pb/ mg·kg ⁻¹
酸性紫色土	10.65	1.24	45.56	2.93	45.32	4.73	3.27	31.25

表 2 铅胁迫对茶树生长发育的影响
Table 2 Effects of lead stress on growth of tea

铅浓度 Lead concentrations/ mg·kg ⁻¹	植株生长特征	
	春茶 Spring tea	夏茶 Summer tea
0	生长正常 Grow normally	生长正常 Grow normally
50	生长正常 Grow normally	生长正常 Grow normally
100	新叶较多、叶间距较 CK 长、叶色浓绿 More new leaves, longer length and greener leaves	新叶有所增加、叶间距较 CK 长 New leaves were more and the distances between Leaves were longer
200	叶光泽、新叶较 CK 少 Leaves were lustered and new leaves were less	生长正常 Grow normally
400	新叶较多、叶间距长 More new leaves, and longer length	叶片失绿发黄、发芽较少 Some leaves become yellow. Some little bud
800	叶片较 CK 大、生长茂盛 Leaves were bigger and more	叶片失绿发黄、发芽较少、叶间距短 Some leaves become yellow. Some little bud and shorter length
1 500	叶色浓绿、新叶较多、生长茂盛 Greener and more new leaves	发芽较少、叶片失绿、有少量黄叶、无光泽 Some little bud, leaves become yellow

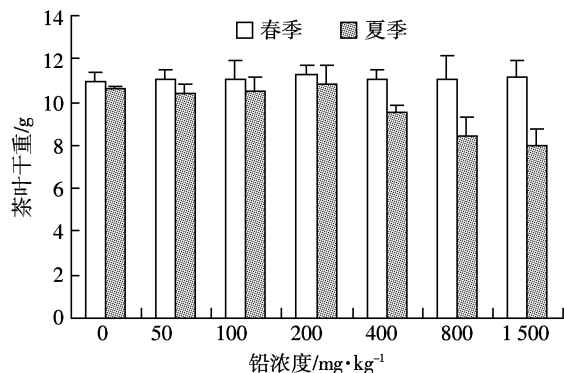


图 1 铅胁迫对茶生物量(一芽两叶)的影响
Figure 1 Effects of lead stress on yield of tea leaves

泽、有少量叶片发黄、萎蔫、百芽重减少。土壤中铅浓度过高时抑制茶树生长,这可能是因为铅作为非必须元素,在植物体内累积到一定程度,会影响细胞分裂和生长,干扰营养物质的吸收和分配^[9],引起植物光合作用、呼吸作用、氮素代谢和核酸代谢等一系列生理生化过程的紊乱^[1-4],导致氧化过程和光合过程及脂肪代谢过程强度减弱。

另一方面,铅可促使水的吸收量减少,耗氧量增大,从而阻碍植物生长,百芽重减少,甚至引起植物死亡。铅引起铁的进入遭到破坏而产生的失绿病可导致茶树叶片失绿、发黄^[20]。

2.2 铅对茶树部分生理特性的影响

2.2.1 铅对茶树叶绿素的影响

铅胁迫下春茶叶片叶绿素比对照有所增加,铅浓度为 200 mg·kg⁻¹ 时,叶绿素含量增加最少。夏茶叶片叶绿素含量变化较复杂,铅浓度为 0~800 mg·kg⁻¹ 时,叶绿素含量都比对照高。在 0~200 mg·kg⁻¹ 和 200~

800 mg·kg⁻¹ 两个浓度段间都呈现相同的变化趋势,即先升高后降低。1 500 mg·kg⁻¹ 处理时,叶绿素含量低于对照。100 mg·kg⁻¹ 处理时,叶绿素含量最高,说明低浓度的铅可增加叶片叶绿素的含量,随着铅处理浓度的增加及时间的延长,叶绿素的增加量开始下降。这与赵菲佚、任安芝等^[8,13]的研究结果一致。

总的来说,在较低铅浓度处理下夏茶叶片叶绿素 a、叶绿素 a+b 高于春茶,在较高铅浓度处理下则相反;整个处理期间春茶叶绿素 b 高于夏茶,叶绿素 a/b 则相反;春茶、夏茶叶绿素 a/b 总的呈下降趋势(表 3)。

叶绿素含量和叶绿素 a/b 比值是表示植物光合器官生理状况的重要指标^[21]。在低浓度、短时间铅胁迫下,叶绿素的含量小幅度上升,这可能是叶绿素合成系统的一种应激性反应。但随着铅浓度的增大和胁迫时间的加长,光合作用系统受到破坏,表现为植株受到严重伤害,叶绿素含量降低。其原因可能是重金属离子的积累抑制叶绿素酸酐还原酶和影响氨基-γ-戊酮酸的合成,从而影响叶绿素的生物合成,同时使叶绿体膜系统在结构上受到逐渐破坏,导致叶绿素总量的下降^[22]。

2.2.2 铅对茶树叶片膜脂过氧化作用的影响

春茶、夏茶叶片丙二醛(Malondialdehyde,MDA)的变化趋势有较大差异,夏茶 MDA 含量高于春茶(图 2)。随铅处理浓度的增加,春茶 MDA 含量呈增加趋势,其相关系数 $r=0.880$,为极显著正相关($P<0.01$);夏茶叶片 MDA 含量随着铅浓度的增加而增加,且 0~400 mg·kg⁻¹ 处理间增加缓慢,800~1 500 mg·kg⁻¹ 处理时,MDA 含量明显增加,其相关系数 $r=0.971$,为极显著正相关($P<0.01$)。

表 3 铅胁迫对茶树叶绿素含量的影响
Table 3 Effects of lead stress on chlorophyll contents of tea

铅浓度 Lead concentrations/ mg·kg ⁻¹	春茶 Spring tea/mg·g ⁻¹				夏茶 Summer tea/mg·g ⁻¹			
	叶绿素 a Chlorophylla	叶绿素 b Chlorophyllb	叶绿素 a+b Chlorophyll a+b	叶绿素 a/b Chlorophyll a/b	叶绿素 a Chlorophylla	叶绿素 b Chlorophyllb	叶绿素 a+b Chlorophyll a+b	叶绿素 a/b Chlorophyll a/b
0	1.34±0.01d	0.57±0.01c	1.91	2.34	1.96±0.05a	0.67±0.03c	2.63	2.91
50	1.91±0.09bc	0.84±0.04b	2.75	2.28	2.00±0.04a	0.68±0.01c	2.68	2.93
100	1.96±0.03bc	0.84±0.03b	2.80	2.33	2.16±0.19a	0.77±0.05a	2.93	2.82
200	1.87±0.04c	0.83±0.01b	2.70	2.24	1.97±0.02a	0.68±0.01c	2.65	2.90
400	2.01±0.06ab	0.89±0.02ab	2.90	2.27	2.10±0.01a	0.74±0.01ab	2.84	2.82
800	2.11±0.06a	0.94±0.00a	3.05	2.25	2.02±0.07a	0.71±0.00bc	2.73	2.86
1 500	2.02±0.00ab	0.91±0.00a	2.93	2.23	1.69±0.02b	0.60±0.00d	2.28	2.83

注:同一列相同小写字母表示其差异不显著($P>0.05$),下同。

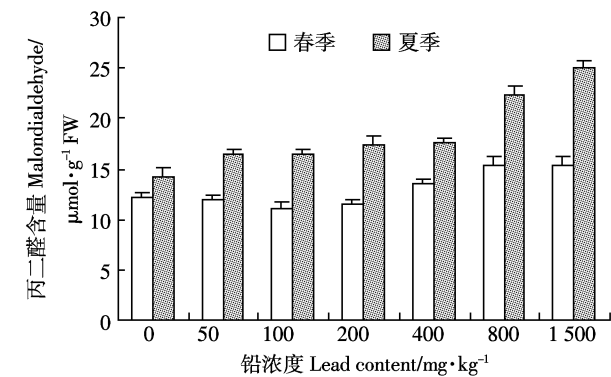


图 2 铅胁迫对茶叶丙二醛含量的影响
Figure 2 Effects of lead stress on malondialdehyde contents of tea

植物器官衰老时或在逆境条件下,往往发生膜脂过氧化作用,而 MDA 是其产物之一,因此,通常利用它作为脂质过氧化指标,表示细胞膜脂过氧化程度和植物对逆境条件反应的强弱。通过丙二醛含量的测定可了解膜脂过氧化伤害的程度,比较植物抗逆性的差异^[18-19]。茶树受到铅污染后,体内的丙二醛含量发生了变化(图 2)。由此表明,茶树处于高浓度铅胁迫的逆境时,茶叶体内活性氧产生和清除的平衡受到破坏,体内产生并积累的大量活性氧会引发膜脂过氧化,产生 MDA 等有害的膜脂过氧化产物,并且 MDA 的含量常会随胁迫浓度的增加而增加^[6]。

2.2.3 铅对茶树叶片游离脯氨酸的影响

铅胁迫处理下,游离脯氨酸含量变化见表 4。春茶游离脯氨酸含量均较对照高,且随着铅浓度的增加而增加的量越大,其相关系数 $r=0.922$,为极显著正相关($P<0.01$);夏茶游离脯氨酸含量均较对照高,低浓度处理变化不明显,随着铅浓度增加,增加趋势趋于显著,其相关系数达 $r=0.871$,为显著正相关($P<$

表 4 铅胁迫对茶叶游离脯氨酸含量的影响
Table 4 Effects of lead stress on free proline content of tea

铅处理浓度 Lead concentrations/mg·kg ⁻¹	春茶 Spring tea	夏茶 Summer tea
	游离脯氨酸 Free proline/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\text{ DW}$	游离脯氨酸 Free proline/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\text{ DW}$
0	134.83±8.86d	189.57±15.44c
50	144.72±9.24d	218.72±13.61b
100	151.51±11.50cd	207.35±6.37b
200	173.93±8.96bc	191.56±6.70bc
400	150.68±3.59cd	199.41±12.95bc
800	180.07±14.53b	252.69±3.31a
1500	214.10±8.14a	264.47±9.73a

0.05),且夏茶游离脯氨酸含量明显高于春茶。
游离脯氨酸是植物体内最重要的渗透调节物质之一。根据 Csonka(1991)和 J.Pang(2003)等的报道,脯氨酸的积累对细胞的渗透调节、细胞结构的稳定、氧化的降低具有非常重要的作用^[23-24]。茶叶脯氨酸含量在高铅胁迫下急剧增加,从而支持了以往对于脯氨酸具有清除活性氧的作用,与植物抗氧化关系十分密切,是植物对逆境的一种适应性反应^[25]。由于当植物遭受逆境时,体内游离脯氨酸的含量增高,常以游离脯氨酸含量作为植物多重抗逆性的指标^[18]。表 4 还说明茶树在受到铅低浓度处理时,生长旺盛,生长状况较好。随处理时间的延长和处理浓度的增加,游离脯氨酸含量增加,茶树生长受到一定的抑制。

2.2.4 铅对茶树叶片可溶性糖的影响

春茶、夏茶叶片中可溶性糖变化趋势如下:春茶可溶性糖高于夏茶,与铅浓度的相关系数分别为 $r=-0.715$, $r=-0.912$,均为极显著负相关($P<0.01$)。铅浓度在 0~200 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 间,春茶可溶性糖逐渐增加,夏茶

则相反;铅浓度在 $400\sim 1\,500\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 间,两季茶叶可溶性糖都呈下降趋势。铅浓度为 $200\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时春夏茶可溶性糖含量同时达到最高值,分别是对照的 111.62% 、 106.49% ;铅浓度在 $800\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时春茶可溶性糖达到最低值,在 $1\,500\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时夏茶可溶性糖达到最低值,分别为对照的 92.41% 和 71.51% (图3)。

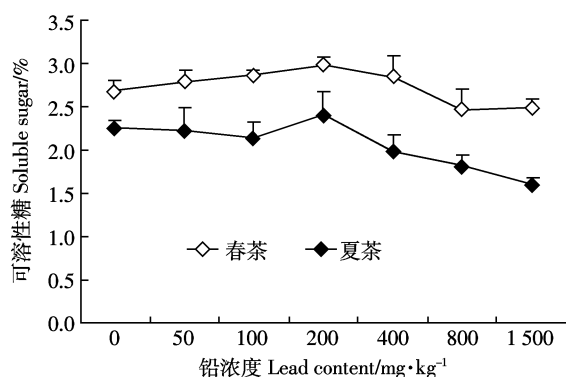


图3 铅胁迫对茶叶可溶性糖含量的影响

Figure 3 Effects of lead stress on soluble sugar contents of tea

作物叶内可溶性糖含量代表碳水化合物的运转情况,亦可以作为生理指标之一来反映铅污染对作物的毒害作用。低浓度铅可促进春茶可溶性糖的合成,夏茶则相反;高浓度铅使可溶性糖的合成受到抑制。这可能是因为铅的积累干扰营养物质的吸收和分配,导致氧化过程和光合过程及脂肪代谢过程强度减弱,从而使叶内可溶性糖含量减少。

3 结论

(1)低浓度铅对茶树生长有刺激作用。主要表现为叶色浓绿、叶间距长、新叶较多。高浓度铅处理下茶树受到一定的伤害,并且随铅浓度的升高和处理时间的加长受害程度逐渐加深,主要表现为发芽较少、有少量叶片发黄、萎蔫,但没有茶树植株因毒害而致死。铅胁迫处理期间,春茶生物量无明显变化,夏茶则显著下降。

(2)春茶叶绿素含量大多高于对照。铅浓度为 $0\sim 200\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时春茶可溶性糖含量小幅度上升,这与春茶 MDA 含量有所下降,但差异不显著相一致。随着铅胁迫的强度增加和胁迫时间的加长,茶叶叶片超氧自由基产生与消除间的平衡破坏,自由基浓度增大,导致脂质过氧化作用加强,春茶、夏茶丙二醛、春茶游离脯氨酸含量上升,与铅浓度呈现极显著正相关关系。茶叶体内防御系统保护机能下降,茶树生长受到抑制,夏茶可溶性糖与铅浓度呈极显著负相关。

参考文献:

- [1] 杨丹慧. 重金属对高等植物光合膜结构和功能的影响 [J]. 植物学通报, 1991, 8(3):26-29.
YANG Dan-hui. The effects of heavy metals on the structure and function of photosynthetic[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 1991, 8(3):26-29.
- [2] 周 鸿, 曲仲湘, 王焕校. 铅对几种农作物的影响及迁移积累初探[J]. 环境科学学报, 1983, 3(3):222-233.
ZHOU Hong, QU Zhong-xiang, WANG Huan-xiao. The effects and preliminary for transport accumulation of lead on the different crops. [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1983, 3(3):222-233.
- [3] Van Assche F, Clijster H. Effects of metal on enzyme activity in plants[J]. *Plant Cell Environ*, 1990, 13:195-206.
- [4] 张义贤. 重金属对大麦(*Hordeum vulgare*)毒性的研究[J]. 环境科学学报, 1997, 17(2):199-205.
ZHANG Yi-xian. Toxicity of heavy metals to *Hordeum vulgare* [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1997, 17(2):199-205.
- [5] Koeppe D E. Lead: understanding the minimal toxic of lead in plants[C]. Lepp N W. Effect of heavy metal pollution on plants. London New Jersey: App Sci Pub, 1981:55-57.
- [6] 姜红艳, 龚淑英. 茶叶中铅含量现状及研究动态[J]. 茶叶, 2004, 30(4):210-212.
JIANG Hong-yan, GONG Shu-yin. A review on research of lead pollution in tea[J]. *Journal of Tea*, 2004, 30(4):210-212.
- [7] 刘秀梅, 聂俊华, 王庆仁. Pb 对农作物的生理生态效应[J]. 农业环境保护, 2002, 21(3):201-203.
LIU Xiu-mei, NIE Jun-hua, WANG Qing-ren. Eco-physiological response of several crops to Lead[J]. *Agro-Environmental Protection*, 2002, 21(3):201-203.
- [8] 赵菲伏, 翟禄新, 陈 荃, 等. Cd、Pb 复合处理下 2 种离子在植物体内的分布及其对植物生理指标的影响 [J]. 西北植物学报, 2002, 22(3):595-601.
ZHAO Fei-yi, ZHAI Lu-xin, CHEN Quan, et al. Effect under combined treatment of cadmium and lead on their distribution of plants and physiological indications[J]. *Acta Bot Boreal-Occident Sin*, 2002, 22(3):595-601.
- [9] 郑春霞, 王文全, 骆建敏, 等. 重金属 Pb^{2+} 对玉米苗生长的影响[J]. 光谱学与光谱分析, 2005, 25(8):1361-1365.
ZHENG Chun-xia, WANG Wen-quan, LUO Jian-min, et al. The corn seedlings are affected by the heavy metal Pb^{2+} [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2005, 25(8):1361-1365.
- [10] 李远方. 铅对小麦幼苗某些生理特性的影响[J]. 河南科学, 2001, 19(2):209-211.
LI Fang-yuan. The influences of lead in wheat seedlings' some physiological characteristics[J]. *Henan Science*, 2001, 19(2):209-211.
- [11] 李荣春. Cd、Pb 及其复合污染对烤烟叶片生理生化及细胞亚显微结构的影响[J]. 植物生态学报, 2000, 24(2):238-242.
LI Rong-chun. Effects of cadmium and lead on physiological and ultra-structural features in tobacco leaves[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, 24(2):238-242.
- [12] 宋勤飞, 樊卫国. 铅胁迫对番茄生长及叶片生理指标的影响[J]. 山

- 地农业生物学报, 2004, 23(2):134-138.
- SONG Qing-fei, FAN Wei-guo. Effects of lead stress on growth and physiological index in leaves of tomato[J]. *Journal of Mountain Agriculture and Biology*, 2004, 23(2):134-138.
- [13] 任安芝, 高玉葆, 刘 爽. 铬、镉、铅胁迫对青菜叶片几种生理生化指标的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2000, 6(2):112-116.
- REN An-zhi, Gao Yu-bao, Liu Shuang. Effects of Cr, Cd and Pb on free praline content etc in leaves of brassica Chinensis L[J]. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2000, 6(2):112-116.
- [14] 王 林, 史衍玺. 镉、铅及其复合污染对辣椒生理生化特性的影响[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2005, 36(1):107-112.
- WANG Lin, SHI Yan-xi. Effects of cadmium, lead and their combined pollution on the physiological and biochemical characteristics of *Capsicum Annuum*[J]. *Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science)*, 2005, 36(1):107-112.
- [15] 秦天才, 吴玉树, 王焕校. 镉、铅及其相互作用对小白菜生理生化特性的影响[J]. 生态学报, 1994(1):46-49.
- QIN Tian-cai, WU Yu-shu, WANG Huang-xiao. Effects of cadmium, lead and their interactions on the physiological and biochemical characteristics[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1994(1):46-49.
- [16] 骆耀平, 康孟利, 任明兴. 铅污染对茶树生育及相关保护酶活性的影响[J]. 茶叶, 2004, 30(4):213-216.
- LUO Yao-ping, KANG Meng-li, REN Ming-xing. Effect of lead pollution on tea plant growth and activity of its protective enzymes[J]. *Journal of Tea*, 2004, 30(4):213-216.
- [17] 王晶英, 敖 红, 张 杰, 等. 植物生理生化实验技术与原理[M]. 哈尔滨:东北林业大学出版社, 2003.
- WANG Jing-ying, AO Hong, ZHANG Jie, et al. The technology and principle of plant physiology biochemical experimental[M]. Ha erbin: Northeast Forestry University Press, 2003.
- [18] 熊庆娥. 植物生理学实验教程[M]. 成都:四川科学技术出版社, 2003.
- XIONG Qing-e. Plant physiology experimental course[M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 2003.
- [19] 康孟利, 骆耀平, 石元值, 等. 茶树对铅的吸收与累积特性[J]. 茶叶, 2004, 30(2):88-90.
- KANG Meng-li, LUO Yao-ping, SHI Yuan-zhi, et al. A study on properties of uptake and accumulation of lead by tea plant[J]. *Journal of Tea*, 2004, 30(2):88-90.
- [20] 李湘洲. 重金属铅和镉对土壤与作物的危害及防治[J]. 经济林研究, 2000, 18(4):12-13.
- LI Xiang-zhou. The damage of heavy metal lead and cadmium to soil and crops with reference to the control measures[J]. *Economic Forest Researches*, 2000, 18(4):12-13.
- [21] 谷 魏, 施新固, 杜开和, 等. 汞、镉复合污染对轮叶狐尾藻的毒害影响[J]. 南京师大学报(自然科学版), 2001, 24(3):75-79.
- GU Wei, SHI Xing-gu, DU Kai-he, et al. The toxic effect of Hg^{2+} and Cd^{2+} combined pollution on *Myriophyllum verticillatum* Linn[J]. *Journal of Nanjing Normal University(Natural Science)*, 2001, 24(3):75-79.
- [22] 姜虎生, 石德成. Hg、Cd 复合污染对玉米生理指标的影响[J]. 陕西农业科学, 2005(6):7-9.
- JIANG Hu-sheng, SHI De-cheng. Effects of Hg, Cd and their combined pollution on the physiological and biochemical characteristics of corn[J]. *Shanxi Journal of Agricultural Sciences*, 2005(6):7-9.
- [23] Pang J, Chan G S Y, Zhang J, et al. Physiological aspects of vetiver grass for rehabilitation in abandoned metalliferous mine wastes [J]. *Chemosphere*, 2003, 52:1559-1570.
- [24] Csonka I N. Physiological and genetic responses of bacteria to osmotic stress[J]. *Microbial Rev*, 1989, 53:121-147.
- [25] 徐卫红, 熊治庭, 李文一, 等. 4 品种黑麦草对重金属 Zn 的耐性及 Zn 积累研究 [J]. 西南农业大学学报 (自然科学版), 2005, 27(6):785-790.
- XU Wei-hong, XIONG Zhi-ting, LI Wen-yi, et al. Tolerance and accumulation of zinc in four varieties of ryegrass [J]. *Journal of Southwest Agricultural University(Natural Science)*, 2005, 27(6):785-790.