

刘文霞 郭华武 李博 等. 2011. 铅与丁草胺的交互作用对油麦菜生长和抗氧化酶活性的影响[J]. 环境科学学报 31(10): 2282-2289

Liu W X , Guo H W , Li B , et al. 2011. The influence of Pb^{2+} and butachlor interaction on growth and antioxidant enzyme activities of *Lactuca Sativa* L. [J]. Acta Scientiae Circumstantiae 31(10): 2282-2289

铅与丁草胺的交互作用对油麦菜生长和抗氧化酶活性的影响

刘文霞* 郭华武 李博 沈连峰

河南农业大学环境系 郑州 450002

收稿日期: 2011-06-05

修回日期: 2011-08-06

录用日期: 2011-08-12

摘要:盆栽土培试验研究了重金属铅与除草剂丁草胺的复合污染对油麦菜生长及生理生化的毒性效应。结果表明土壤铅浓度小于 $500\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 对油麦菜发芽率的影响不明显, 铅浓度为 $150\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 对油麦菜株高有促进作用, 但对叶片过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)活性有明显抑制作用。土壤铅浓度为 $500\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时, 油麦菜根活性、叶片 POD 和 CAT 酶活性较对照明显降低, 铅浓度越大, 根活性和叶片酶活性越低。丁草胺浓度为 $2\sim 6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时油麦菜发芽率明显降低, 丁草胺浓度增加, 油麦菜株高、生物量、根重和根活性受到抑制作用愈大, 叶片 POD 和 CAT 酶活性越低。低浓度(Pb^{2+} $150\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和丁草胺 $2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 和高浓度(Pb^{2+} $500\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和丁草胺 $6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 复合污染浓度越大, 油麦菜发芽率越低, 对油麦菜的抑制作用为根重 > 生物量 > 叶片 POD 酶 > CAT 酶 > 根活性, 但对叶片叶绿素的合成有促进作用。低浓度铅与丁草胺的交互作用对生物量抑制表现为协同作用, 根活性、CAT 酶和 POD 酶活性抑制均为拮抗作用。高浓度铅与丁草胺的交互作用对油麦菜株高、生物量和根活性的抑制为协同作用, 对 CAT 酶和 POD 酶活性抑制为拮抗作用, 而铅与丁草胺的交互作用对叶绿素的合成有协同效应。

关键词: 铅; 丁草胺; 油麦菜; 酶活性; 交互作用

文章编号: 0253-2468(2011)10-2282-08

中图分类号: X171.5 X503.2

文献标识码: A

The influence of Pb^{2+} and butachlor interaction on growth and antioxidant enzyme activities of *Lactuca Sativa* L.

LIU Wenxia* , GUO Huawu , LI Bo , SHEN Lianfeng

Department of Environmental Sciences , Henan Agricultural University , Zhengzhou 450002

Received 5 June 2011;

received in revised form 6 August 2011;

accepted 12 August 2011

Abstract: The pot experiment was conducted to study the toxic effects of combined pollution of Pb^{2+} and butachlor on the growth and physiology of *Lactuca sativa* L. The results indicated that germination rates of *L. sativa* were not obviously affected when the Pb^{2+} concentration was below $500\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. With the concentration of added Pb^{2+} of $150\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, the plant height was increased, but activities of peroxidase (POD) and catalase (CAT) in leaves were evidently inhibited. When the concentration of added Pb^{2+} reached $500\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, the root vitality and POD and CAT activities in leaves were inhibited; the inhibition effect was enhanced when the Pb^{2+} concentration was increased. Experiments with butachlor at concentrations of $2\sim 6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ showed inhibition effects on plant height, biomass, root weight and vitality, and POD and CAT activities in leaves. Further experiments with combination of two pollutants showed lower germination rates of *L. sativa* when the concentration of complex pollution was increased. At both low and high concentrations, the root weight of *L. sativa* was most severely inhibited and the root vitality was least affected, but the chlorophyll content in leaves was increased. Pb^{2+} and butachlor at low concentrations had synergistic effects on the inhibition of biomass and antagonistic effects on the inhibition of root vitality, POD and CAT activities. However, at high concentrations, the two pollutants had synergistic effects on inhibition of plant height, biomass and root vitality, and antagonistic effects on inhibition of POD and CAT activities. Additionally, Pb^{2+} and butachlor demonstrated synergistic effects on chlorophyll biosynthesis.

Keywords: Pb^{2+} ; butachlor; *Lactuca sativa* L.; enzyme activity; interaction effect

基金项目: 河南省自然科学基金项目 (No. 092300410114)

Supported by the Henan Natural Science Foundation of China (No. 092300410114)

作者简介: 刘文霞 (1967—), 女, 副教授 (博士), E-mail: hjxliuwenxia@163.com; * 通讯作者 (责任作者)

Biography: LIU Wenxia (1967—), female, associate professor (Ph. D.), E-mail: hjxliuwenxia@163.com; * Corresponding author

1 引言(Introduction)

重金属铅不是作物生长的必需元素,而是一种对作物有累积性危害的污染物质. 它通过污水灌溉、固体废弃物、肥料以及大气沉降等途径进入土壤(Davis *et al.*, 2001; Nicholson *et al.*, 2003; 陈同斌等 2006), 进入土壤后不能被微生物分解, 可以被植物吸收、富集, 被植物吸收并积累到一定程度就会影响种子的萌发, 使根系丧失正常功能, 妨碍养料的吸收, 且阻滞农作物的正常生长发育, 还会通过食物链的富集严重损害人的神经、消化、免疫和生殖系统. 丁草胺(butachlor) 为选择性、内吸性酰胺类除草剂, 是我国使用较多的 3 种除草剂之一(田芹等 2004), 主要适用于防除水稻、小麦、大麦田杂草, 还适用于小白菜、菠菜、菜豆等菜田除草. 由于丁草胺的大量使用, 水环境已受到污染, 并对鱼类等水生生物产生了毒害(Farah *et al.*, 2004); 对植物而言, 丁草胺主要通过幼芽和幼根被吸收体内, 进而影响植物的正常生长发育(Chen *et al.*, 2007).

随着除草剂的普遍使用, 重金属-除草剂复合污染对生态环境的影响越来越受到关注(Yang *et al.*, 2007; 侯宪文等 2007). 重金属与除草剂丁草胺污染对土壤的生物区系及微生物群落和酶活性产生了不同程度的影响(Wang *et al.*, 2007a; 2007b), 表现出不同的复合污染效应. 土壤中 Pb 抑制了土壤中苄嘧磺隆的降解, 使残留量提高、消失率降低. Pb^{2+} 和阿特拉津不同比例浓度时(Su *et al.*, 2005), 水稻对这两种污染物的富集, Pb^{2+} 既可以增加也可以减少阿特拉津在稻芽中的浓度. 镉与苄嘧磺隆复合污染破坏水稻根尖的细胞结构, 使表皮细胞破裂, 核仁解体(吴庆钰等 2007a; 2007b). 水培条件下, 丁草胺浓度的增加显著加剧了 Cd^{2+} 胁迫下水稻生长抑制程度, 进一步导致叶绿素含量显著下降, 加剧了水稻 Cd^{2+} 胁迫时植株活性氧代谢不平衡过程(余保文等, 2008). 汞和丁草胺复合污染(刘文霞等 2010), 随着复合污染浓度升高, 对油麦菜的生长和叶片叶绿素含量表现出抑制作用, 对叶片细胞膜的破坏程度增大. 不同浓度铅和乙草胺的交互作用对小麦、大白菜和大豆的根长抑制率表现为拮抗或协同作用(Chao *et al.*, 2007).

现在铅污染已较为普遍, 许多情况下单独铅污染尚在安全标准以下, 但若其它污染因素与之结

合, 交互作用可能会增加对植物的危害程度, 从而会影响到植物的生长及食用安全(Zhou *et al.*, 2001). 丁草胺具有较高的持留性并被大量使用(田芹等 2004), 目前关于铅和丁草胺交互作用对油麦菜生长、叶绿素及抗氧化酶的影响研究报道较少. 本试验以植株发芽率、株高、生物量、根活性和叶片酶活性为测试指标, 研究铅与丁草胺复合污染的联合毒性效应, 以期对土壤复合污染的风险评价提供科学依据.

2 材料与方法(Materials and methods)

2.1 试验材料

供试土壤采自河南农业大学毛庄实验基地, 土壤类型为轻壤质潮土, 土壤 pH 为 6.80, 有机质含量为 $22.63\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$. 供试油麦菜品种为正兴牌香油麦. 化学试剂 $Pb(NO_3)_2$ (分析纯), 中国派尼化学试剂厂生产; 丁草胺为 50% 乳油, 江苏绿利来股份有限公司生产.

2.2 试验方法

试验土壤采集后, 去除动植物残体、石块, 风干. 外源铅以 $Pb(NO_3)_2$ 水溶液, 丁草胺以乙醇溶液喷洒施入土壤中, 并加入 N、P、K 作底肥, N、P、K 施用量均为 $0.1\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (干土), 混合均匀. 土壤中铅与丁草胺投加浓度见表 1, 共 7 个处理. 铅污染浓度以国内土壤环境质量的三级标准($pH > 6.5$, $Pb \leq 500\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 作为高剂量浓度, 以其 1/3 作为低剂量浓度. 用 32 孔穴盘作为盆钵, 每孔上口径为 60 mm, 下口径为 33 mm, 高度为 55 mm, 容积为 75 mL. 每个穴盘为一个处理, 每孔装染毒后土壤 0.10 kg, 加水至田间持水量的 70%, 后于阴凉处平衡 7d. 然后种入已催芽的油麦菜种子, 每孔 1 粒. 在人工气候室中培养, 白天温度 $20\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, 晚上 $18\text{ }^{\circ}\text{C}$. 生长期定期定量浇水, 观察油麦菜的发芽和生长情况, 记录油麦菜的株高变化情况. 49 d 收获时测量其生物量和根重(以鲜重计算).

2.3 测定方法

取样时, 先用自来水反复冲洗植株, 再用双蒸水浸泡根部 15 min, 去除根部表面吸附的污染物, 最后用双蒸水冲洗干净, 用吸水纸将表面的水吸干, 测定各生理指标.

油麦菜叶绿素相对含量(SPAD 值) 采用 TYS-A 叶绿素测定仪测定. 每株油麦菜叶绿素含量测量值由各叶片叶绿素含量的平均值确定. 根系活性采用

TTC 法测定植物根系活性,过氧化物酶(POD)活性的测定采用愈创木酚法,过氧化氢酶(CAT)活性测定采用高锰酸盐滴定法(李合生 2000).

2.4 数据处理

各生态毒性指标的抑制率

$$I = (1 - N_i / N_0) \times 100\% \quad (1)$$

式中 N_0 、 N_i 分别为对照和污染处理组的指标测定值. 正值为抑制作用,负值为促进作用. 统计分析采用 SPSS12.0 软件.

3 结果与讨论(Results and discussion)

3.1 铅与丁草胺处理对油麦菜发芽率和株高的影响

铅与丁草胺处理对油麦菜发芽率和株高的影响见表 1. 铅浓度在 150 ~ 500 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 范围内对油麦菜发芽率的影响不显著,而丁草胺浓度为 2 ~ 6 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 对油麦菜发芽率有明显影响,发芽率降低至 28.1%. 铅与丁草胺的复合污染与对照相比油麦

菜发芽率明显降低,复合污染的浓度越大,发芽率越低. 铅浓度在土壤环境质量三级标准之内,铅和丁草胺复合污染时,丁草胺对油麦菜发芽的影响起主导作用.

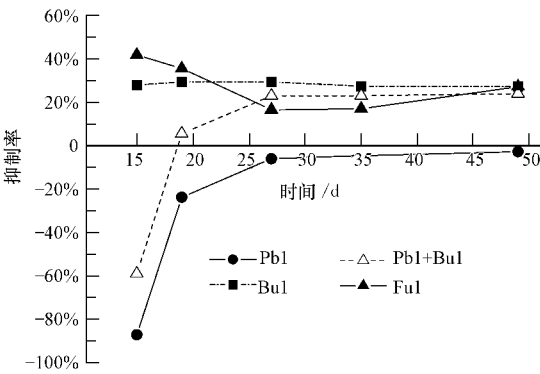
低浓度铅(150 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 处理与对照相比,在 15 ~ 49 d 对油麦菜株高均表现出促进作用(图 1), 15 d 时比对照高出 87.2%,促进作用最强,随着培养时间的增加,对株高的促进作用不断减小,对株高的促进率由 87.2% 下降到 2.8%,与对照的株高越来越接近,后期阶段长势缓慢(表 1). 土壤低浓度铅在油麦菜幼苗生长初期,促进幼苗的发育,随着时间的延长,植株吸收铅的量也增多,促进作用减小,从而使植株后期阶段生长发育缓慢,其结果和苗明升等(2003)的研究结果相似,低浓度铅对玉米发育初期植株的株高有刺激作用. 高浓度铅(500 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 处理在 15 ~ 49 d 对株高的影响不明显,与对照的株高相比,促进率低于 5.4%,可见土壤中铅浓度为 500 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,对油麦菜株高影响不大.

表 1 铅与丁草胺处理对油麦菜发芽率和株高的影响

Table 1 The influence of Pb^{2+} and butachlor stress on the germination rates and height of *L. sativa*

系列	铅 $I/(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$	丁草胺 $I/(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$	发芽率	株高/($\text{cm} \cdot \text{株}^{-1}$)				
				15 d	19 d	27 d	35 d	49 d
CK	0	0	81.3%	2.58 ± 1.20	6.08 ± 2.15	10.18 ± 2.27	12.14 ± 1.16	12.36 ± 1.16
Pb1	150	0	78.1%	4.83 ± 1.17	8.25 ± 0.69	10.79 ± 1.55	12.71 ± 0.57	12.71 ± 0.57
Pb2	500	0	75.0%	2.63 ± 1.11	6.06 ± 3.07	10.28 ± 2.47	12.80 ± 1.34	12.90 ± 1.20
Bu1	0	2	50.0%	1.86 ± 0.63	4.29 ± 1.25	7.19 ± 0.75	8.81 ± 1.13	9.00 ± 1.49
Bu2	0	6	28.1%	1.50 ± 0.87	1.75 ± 1.06	2.25 ± 0.25	5.50 ± 0.71	8.75 ± 0.35
Fu1	150	2	37.5%	1.50 ± 0.82	3.92 ± 1.50	8.50 ± 1.32	10.08 ± 1.35	9.00 ± 0.96
Fu2	500	6	28.1%	1.00 ± 0.25	1.00 ± 0.00	1.75 ± 1.04	3.75 ± 0.87	7.00 ± 1.76

丁草胺浓度为 2 ~ 6 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,对油麦菜株高



抑制作用明显(图 1),丁草胺浓度为 2 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 与对

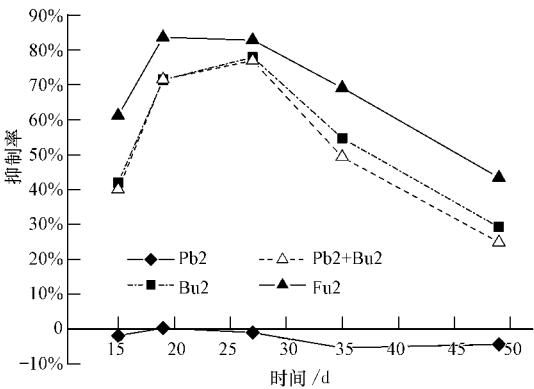


图 1 铅与丁草胺处理对油麦菜株高的影响

Fig. 1 The influence of Pb^{2+} and butachlor stress on the height of *L. sativa*

(注: Pb1 + Bu1 表示单一低浓度铅和丁草胺对油麦菜株高抑制率之和; Pb2 + Bu2 表示单一高浓度铅和丁草胺对油麦菜株高抑制率之和; Fu1 和 Fu2 分别表示低浓度和高浓度复合污染对油麦菜株高抑制率)

照相比,在 15 ~ 49 d,对株高抑制率为 27.2% ~ 29.4%,抑制作用随油麦菜的培养时间变化不大;丁草胺浓度为 $6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,在 15 ~ 49 d,对株高抑制率为 29.2% ~ 77.9%,27 d 时抑制率最高,以后抑制作用降低,收获期株高抑制率最小。丁草胺处理浓度为 $2 \sim 6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,随丁草胺浓度增加,对油麦菜的株高抑制作用越大。

铅和丁草胺交互作用对油麦菜株高均表现出抑制作用,低浓度复合污染,在 15 ~ 49 d,对株高抑制率为 16.5% ~ 41.9%,15 d 时对株高的抑制作用最强。高浓度铅和丁草胺交互作用对株高的抑制作用大,在 15 ~ 49d,对株高抑制率为 43.4% ~ 83.6%。随着铅和丁草胺交互作用浓度的增加,油麦菜的株高受到抑制作用增大。

油麦菜生长前期(15 ~ 19 d),低浓度复合污染对油麦菜株高的抑制率为 $\text{Fu1} > \text{Pb1} + \text{Bu1}$ (图 1),生长中后期(27 ~ 35 d),对株高抑制率为 $\text{Fu1} < \text{Pb1} + \text{Bu1}$,表明低浓度铅与丁草胺复合污染在生长前期对株高的抑制作用表现为协同作用(戴树桂,2006),生长中后期对株高抑制作用表现为拮抗作用。在油麦菜的整个生长期,高浓度铅与丁草胺的

交互作用对株高抑制率为 $\text{Fu2} > \text{Pb2} + \text{Bu2}$,表明高浓度铅与丁草胺的交互作用对株高抑制表现为协同作用。

3.2 铅与丁草胺处理对油麦菜生物量、根重和根活性的影响

铅与丁草胺处理对油麦菜生物量和生理生化的影响见表 2。150 ~ 500 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 铅处理,油麦菜生物量、根重和对照之间差异不显著。 $2 \sim 6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 丁草胺处理,油麦菜生物量、根重和对照之间差异显著($p < 0.01$)。各浓度丁草胺处理对油麦菜生物量、根重表现出抑制作用,随丁草胺浓度增加,对油麦菜生物量和根重的抑制作用愈明显。原因可能是丁草胺干扰大分子的合成(Singh *et al.*, 2005),也抑制发芽种子 α -淀粉酶及蛋白酶的活性,从而抑制幼芽和根生长,因此丁草胺的浓度越大,对油麦菜的生长抑制程度就越大,株高、生物量和根重就越小。相关性分析表明,油麦菜根重和生物量之间存在显著正相关($p < 0.01$),根重和生物量与丁草胺处理浓度存在显著负相关($p < 0.01$),而与铅处理浓度之间相关性不显著,表明在复合污染中除草剂丁草胺对油麦菜根重和生物量的抑制起主导作用。

表 2 铅与丁草胺处理对油麦菜生理生化的影响

Table 2 The influence of Pb^{2+} and butachlor stress on physiological and biochemical index of *L. sativa*

系列	生物量 ($\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$)	根部		叶部		
		根重 ($\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$)	根活性 ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)	叶绿素	POD 活性 ($\text{U} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$)	CAT 活性 ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$)
CK	6.34 ± 2.46	1.56 ± 0.34	0.066 ± 0.0059	100.00%	131.42 ± 10.14	6.19 ± 0.05
Pb1	6.80 ± 1.83	1.49 ± 0.56	0.057 ± 0.0037	102.24%	94.14 ± 3.41	3.63 ± 0.39
Pb2	6.50 ± 3.58	1.44 ± 0.61	0.056 ± 0.0074	92.20%	46.88 ± 3.49	3.47 ± 0.12
Bu1	2.25 ± 0.99	0.34 ± 0.14	0.062 ± 0.0000	104.07%	61.53 ± 3.48	2.77 ± 0.03
Bu2	1.85 ± 0.21	0.20 ± 0.10	0.056 ± 0.0041	125.93%	40.99 ± 5.27	2.75 ± 0.10
Fu1	1.97 ± 0.91	0.28 ± 0.20	0.059 ± 0.0044	124.07%	75.54 ± 3.45	4.37 ± 0.20
Fu2	0.95 ± 0.50	0.16 ± 0.16	0.034 ± 0.0052	208.56%	27.30 ± 15.85	1.68 ± 0.08

低浓度和高浓度的铅和丁草胺交互作用与对照相比,对油麦菜生物量抑制率分别为 68.9% 和 85.0%,铅和丁草胺复合污染对油麦菜的生物量均表现出抑制作用,随复合污染浓度增加,对油麦菜生物量的抑制作用愈强。铅与丁草胺复合污染对油麦菜生物量抑制率为 $\text{Fu1} > \text{Bu1} + \text{Pb1}$, $\text{Fu2} > \text{Pb2} + \text{Bu2}$ (图 2),可见铅和丁草胺交互作用对油麦菜生物量抑制表现出协同作用;对油麦菜根重抑制率为 $\text{Fu1} \approx \text{Bu1} + \text{Pb1}$, $\text{Fu2} \approx \text{Pb2} + \text{Bu2}$,表明铅和丁草胺的交互作用对油麦菜根重抑制表现出加合作用。高浓度铅和丁草胺的交互作用对油麦菜株高和生

物量的抑制都表现出协同作用,而低浓度铅和丁草胺的交互作用在油麦菜生长不同时期对株高抑制作用较为复杂,而对收获期生物量抑制表现为协同作用。

铅和丁草胺单一处理与对照相比,对油麦菜根活性均表现出抑制作用。随着处理浓度增加,油麦菜的根活性受到抑制作用愈大。相关性分析表明,油麦菜根活性与铅处理浓度呈显著负相关(相关系数为 -0.630 $p < 0.01$),与丁草胺处理浓度也存在明显的负相关(相关系数为 -0.523 $p < 0.05$),表明铅对油麦菜根活性的影响比较大。原因可能是由

于铅通过韧皮部向地上部的运输十分困难,根部累积铅过量, Pb^{2+} 与根系 DNA 分子中带负电的磷酸基团结合,使 DNA 的构象改变,活性降低 (Chen *et al.*, 2003)。

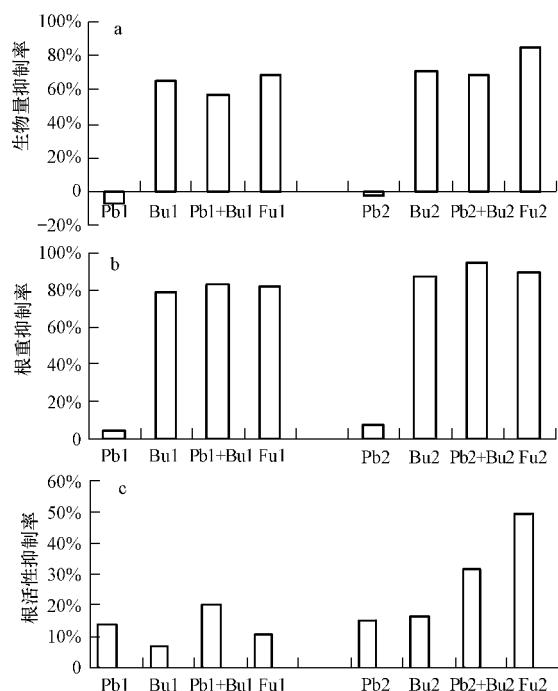


图2 铅与丁草胺交互作用对油麦菜生物量、根重和根活性的影响

Fig. 2 The influence of Pb^{2+} and butachlor stress on the biomass, root weight and vitality of *L. sativa*

低浓度铅和丁草胺复合污染,油麦菜根活性与对照之间差异不显著,而高浓度铅和丁草胺复合污染,油麦菜根活性与对照之间差异显著 ($p < 0.01$)。低浓度和高浓度复合污染与对照相比,油麦菜根活性抑制率分别为 11.0% 和 49.3%,对油麦菜根活性均表现出抑制作用,随着复合污染浓度的增加,抑制作用愈大。铅和丁草胺复合污染对根活性抑制率为 $Fu1 < Bu1 + Pb1$, $Fu2 > Bu2 + Pb2$ (图 2),表明低浓度铅和丁草胺交互作用对根活性抑制为拮抗作用,而高浓度铅和丁草胺的交互作用对根活性抑制为协同作用。可见,高浓度铅和丁草胺的交互作用对油麦菜株高、生物量和根活性抑制有协同作用,表明铅增大丁草胺对油麦菜株高、生物量和根活性的抑制作用,而丁草胺也增大了铅对株高、生物量和根活性的抑制作用。原因可能是重金属对土壤丁草胺降解有不同程度的抑制效应 (Moon, 1990),重金属抑制一些具有降解丁草胺能力的微生物的生物活性,使土壤丁草胺降解速率降低,对油麦菜株

高、生物量和根活性抑制作用增大。铅和丁草胺之间产生协同作用的另一种机制可能是二者均会破坏植物细胞膜的结构和功能。重金属胁迫能诱导植物体内活性氧的积累,而活性氧进一步攻击脂质蛋白质,从而使细胞造成过氧化损伤,使细胞膜及多种细胞器的膜系统遭受破坏,透性增强 (何冰等, 2003)。而除草剂丁草胺能诱导活性氧的产生,导致脂质过氧化产物丙二醛的积累和膜透性的改变 (余保文等, 2008)。因此一种污染物对细胞膜的作用,使另一种污染物更容易进入植物体内,加剧了对植物的危害,而表现出协同作用。所以,在评价与预测土壤农药污染状况时,必须同时考虑到重金属的污染状况,以减少和避免发生重金属和农药的协同效应。

3.3 铅与丁草胺处理对油麦菜叶绿素、抗氧化酶活性的影响

叶绿素含量的高低表明植物光合作用的大小, $150 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 铅处理与对照相比油麦菜叶绿素含量高 2.2% (表 2), $500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 铅处理叶片叶绿素含量降低 7.8%。相关性分析表明,叶绿素含量与铅处理浓度的相关性不显著 ($p > 0.05$),表明土壤中铅浓度为 $150 \sim 500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 对油麦菜叶片叶绿素的影响不明显,这一研究结果和杜连彩 (2008) 的研究结果相类似,土壤中铅浓度为 $500 \sim 2000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,小白菜幼苗叶片叶绿素变化不明显。

丁草胺处理浓度为 $2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,油麦菜叶绿素含量比对照分别高 4.1% 和 25.9%,不同丁草胺处理对油麦菜叶绿素的合成均表现出促进作用。相关性分析表明,丁草胺处理浓度和叶绿素含量的相关性呈显著水平 ($p < 0.01$),表明丁草胺处理浓度为 $2 \sim 6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时对油麦菜叶片叶绿素的合成影响非常明显。这表明丁草胺处理浓度为 $2 \sim 6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 对油麦菜的光合作用和叶绿素合成有一定的刺激作用,但浓度继续增大到 $8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,叶片叶绿素含量下降,影响光合作用的正常进行 (刘文霞等, 2010)。这种现象与丁草胺对食用蓝藻葛仙米的光合作用影响相似 (Chen *et al.*, 2007),低浓度丁草胺促进葛仙米的光合作用,而高浓度抑制其光合作用。

低浓度、高浓度的铅和丁草胺复合污染,油麦菜叶绿素比对照分别高 24.1% 和 108.6%,复合污染对油麦菜叶绿素的合成均表现出促进作用。随着复合处理浓度增加,促进作用增强。铅和丁草胺复

合污染对叶绿素促进作用为 $Fu1 > Bu1 + Pb1$, $Fu2 > Bu2 + Pb2$ (图 3), 表明铅和丁草胺复合污染对叶绿素的合成表现为协同作用, 铅和丁草胺的交互作用促进了油麦菜的光合作用, 而使叶绿素的含量增加。

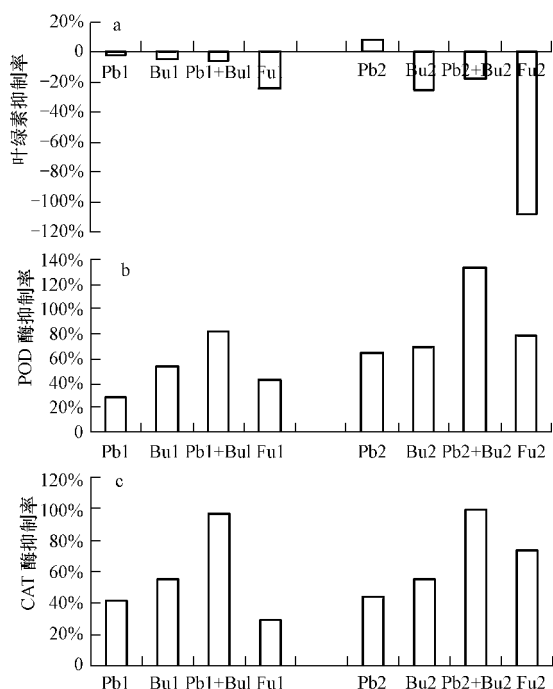


图 3 丁草胺与铅交互作用对油麦菜叶绿素、抗氧化酶活性的影响

Fig. 3 The influence of Pb^{2+} and butachlor stress on the chlorophyll content and antioxidant enzymes of *L. sativa*

抗氧化酶系统主要有过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)、超氧化物歧化酶(SOD)等,它们参与清除大部分植株体内的活性氧分子,减少及消除活性氧对植物的损害。各浓度铅处理,油麦菜叶部 POD、CAT 酶活性与对照之间差异显著 ($p < 0.01$)。油麦菜 POD、CAT 酶活性显著降低。铅浓度为 $150 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,POD、CAT 酶活性分别较对照下降 28.4% 和 64.3%、41.4% 和 43.9%。铅浓度增大,油麦菜叶部 POD 酶活性降低幅度较大,而 CAT 酶活性变化幅度较小。

各浓度丁草胺处理下,油麦菜叶部 POD 和 CAT 酶活性与对照之间差异显著 ($p < 0.01$)。POD 和 CAT 酶活性降低。 $2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 丁草胺处理与对照相比,POD、CAT 酶活性分别下降了 53.2% 和 68.8%、55.3% 和 55.6%。随丁草胺浓度增大,油麦菜叶部 POD 酶活性变化较 CAT 酶活性变化幅度大。

油麦菜叶片保护酶活性与铅和丁草胺浓度的相关性见表 3, CAT 与 POD 酶活性存在显著正相关 ($p < 0.01$), POD 酶活性与铅浓度存在显著负相关 ($p < 0.05$), 而 CAT 酶活性与铅浓度无相关性。POD 和 CAT 酶活性均与丁草胺浓度存在显著负相关 ($p < 0.01$), 表明油麦菜 POD 和 CAT 酶活性受丁草胺的影响比较大, 丁草胺浓度越大, 叶片 POD 和 CAT 酶活性就越低。正常情况下, 植物体内的活性氧代谢保持平衡, 但当受到铅和丁草胺及其代谢产物胁迫时, 植物体内的活性氧代谢失调 (何冰等, 2003; 余保文等, 2008), 活性氧水平上升, 植物启动抗氧化酶系统。本试验中, 随铅和丁草胺浓度的增加, POD 和 CAT 酶活性降低。这可能是由于油麦菜植株体内相对高浓度铅和丁草胺时, 胁迫增强, 急剧产生大量活性氧, 超越了抗氧化酶的有效极限, 随即大量超氧自由基 ($O_2^{\cdot -}$) 和过氧化氢 (H_2O_2) 反应产物抑制了 SOD 等活性导致抗氧化系统紊乱, POD 和 CAT 酶活性功能也因此受到抑制而活性降低。

表 3 油麦菜叶片抗氧化酶与铅和丁草胺浓度的相关性

Table 3 The correlation with antioxidant enzymes in leaves and Pb^{2+} and butachlor concentrations

系列	CAT 酶活性	POD 酶活性	铅浓度	丁草胺浓度
CAT 酶活性	1	0.891 **	-0.430	-0.604 **
POD 酶活性		1	-0.582 *	-0.725 **
铅浓度			1	0.047
丁草胺浓度				1

注: * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$ 。

铅和丁草胺复合污染, 油麦菜 POD 和 CAT 酶活性与对照之间差异显著 ($p < 0.01$)。油麦菜 POD 和 CAT 酶活性均受到抑制, 低浓度、高浓度复合污染酶活性之间差异显著 ($p < 0.01$)。随着复合污染浓度增加, 油麦菜叶部 POD 和 CAT 酶活性受到抑制作用愈大。铅和丁草胺复合污染对 POD 和 CAT 酶活性抑制率为 $Fu1 < Bu1 + Pb1$, $Fu2 < Bu2 + Pb2$ (图 3), 表明铅和丁草胺交互作用对油麦菜叶片 POD 和 CAT 酶活性均表现出拮抗作用, 铅和丁草胺的交互作用减少了对油麦菜 POD 和 CAT 酶活性的影响。

4 结论 (Conclusions)

1) 铅浓度小于 $500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 对油麦菜发芽率的影响不明显, $150 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 铅对油麦菜株高有促进作

用,对生物量、根重、根活性及叶片叶绿素影响不显著,而对叶片 POD 和 CAT 酶活性有明显的抑制作用。 $500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 铅对根活性、POD 和 CAT 酶活性均有明显的抑制作用,随着铅浓度增大,抑制作用增强。

2) 丁草胺浓度为 $2 \sim 6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时油麦菜发芽率明显降低,随丁草胺浓度增加,油麦菜的株高、生物量、根重、根活性、叶片 POD 和 CAT 酶活性受到抑制作用愈明显,但对油麦菜叶绿素的合成有促进作用。

3) 铅与丁草胺的复合污染浓度越大,油麦菜发芽率越低,对油麦菜的抑制作用为根重 > 生物量 > 叶片 POD 酶 > CAT 酶 > 根活性。低浓度 ($\text{Pb}^{2+} 150 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和丁草胺 $2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 的交互作用在油麦菜生长前期株高抑制表现为协同作用,后期表现为拮抗作用,高浓度 ($\text{Pb}^{2+} 500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和丁草胺 $6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 的交互作用对油麦菜生长期的株高抑制表现为协同作用。铅和丁草胺的复合污染对油麦菜生物量抑制和叶绿素的合成表现出协同作用,对叶片 POD 酶和 CAT 酶活性抑制表现出拮抗作用。低浓度复合污染对油麦菜根活性抑制表现出拮抗作用,而高浓度复合污染对根活性抑制表现出协同作用。铅和丁草胺的复合污染,铅对油麦菜的根活性影响较大,丁草胺对油麦菜发芽率、株高、生物量、根重、叶片叶绿素和酶活性影响起主导作用。

参考文献 (References):

- Chao L, Zhou Q, Chen S, *et al.* 2007. Single and joint stress of acetochlor and Pb on the three agricultural crops in northeast China [J]. *J Environ Sci*, 19(6): 719-724
- Chen S, Sun T, Zhou Q. 2003. Effects of combined pollution of heavy metals on root vitality of wheat seeds [J]. *Plant Physiol*, 14(4): 577-580
- 陈同斌, 宋波, 郝袁明, 等. 2006. 北京市菜地土壤和蔬菜铅含量及其健康风险评估 [J]. *中国农业科学*, 39(8): 1589-1597
- Chen T B, Song B, Zheng Y M, *et al.* 2006. A survey of lead concentrations in vegetables and soils in Beijing and their health risks [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 39(8): 1589-1597 (in Chinese)
- Chen Z, Juneau P, Qiu B. 2007. Effects of three pesticides on the growth, photosynthesis and photoinhibition of edible cyanobacterium *Ge-Xian-Mi (Nostoc)* [J]. *Aquatic Toxicology*, 81(3): 256-265
- 戴树桂. 2006. 环境化学 [M]. 北京: 高等教育出版社. 361
- Dai S G. 2006. *Environment Chemistry* [M]. Beijing: Higher Education Press. 361 (in Chinese)
- Davis A P, Shokouhian M, Ni S. 2001. Loading estimates of lead, copper, cadmium, and zinc in urban runoff from specific sources [J]. *Chemosphere*, 44(5): 997-1009
- 杜连彩. 2008. 铅胁迫对小白菜幼苗叶绿素含量和抗氧化酶系统的影响 [J]. *中国蔬菜*, (5): 17-19
- Du L C. 2008. Effects of lead stress on chlorophyll content and antioxidant system of Pakchoi [J]. *China Vegetables*, (5): 17-19 (in Chinese)
- Farah M A, Ateeg B, Ali M N, *et al.* 2004. Studies on lethal concentration and toxicity stress of some xenobiotics on aquatic organisms [J]. *Chemosphere*, 55(2): 257-265
- 何冰, 叶海波, 扬肖娥. 2003. 铅胁迫下不同生态型东南景天叶片抗氧化酶活性及叶绿素含量比较 [J]. *农业环境科学学报*, 22(3): 274-278
- He B, Ye H B, Yang X E. 2003. Effects of Pb on chlorophyll contents and antioxidant enzyme activity in leaf for Pb-accumulating and Non-accumulating ecotypes of *Sedum. alfredii* (Hance) [J]. *J Agro-Environ Sci*, 22(3): 274-278 (in Chinese)
- 侯宪文, 吴建军, 徐建明. 2007. 铅-苯噻磺隆对土壤微生物活性与群落结构的影响 [J]. *中国环境科学*, 27(6): 738-742
- Hou X W, Wu J J, Xu J M. 2007. The influence of complex pollution of lead-bensulfuron-methyl on soil microbial activities and community structure [J]. *China Environ Sci*, 27(6): 738-742 (in Chinese)
- 李合生. 2000. 植物生理生化实验原理和技术 [M]. 北京: 高等教育出版社. 119-167
- Li H S. 2000. *Experiment Theory and Technique of Plant Physiological and Biochemical* [M]. Beijing: Higher Education Press. 119-167 (in Chinese)
- 刘文霞, 郭华武, 孟祥远, 等. 2010. 汞与丁草胺对油麦菜生长和生理特性的影响 [J]. *河南农业科学*, (3): 51-54
- Liu W X, Guo H W, Meng X Y, *et al.* 2010. Effects of mercury and butachlor on growth and physiological characteristics of *Lactuca Sativa* L. [J]. *J Henan Agricultural Sci*, (3): 51-54 (in Chinese)
- 苗明升, 朱圆圆, 曹明霞, 等. 2003. 重金属铅对玉米萌发和早期生长发育的影响 [J]. *山东师范大学学报(自然科学版)*, 18(1): 82-84
- Miao M S, Zhu Y Y, Cao M X, *et al.* 2003. The influence of lead on the bourgeon and development of *Zea mays* [J]. *J Shandong Normal University (Natural Science)*, 18(1): 82-84 (in Chinese)
- Moon Y H. 1990. Effects of heavy metal on the degradation of fenitrothion, IBP and butachlor in flooded soil [J]. *Han'guk Nonghwa Hakhoe Chi*, 33(2): 138-142
- Nicholson F A, Smith S R, Alloway B J, *et al.* 2003. An inventory of heavy metals inputs to agricultural soils in England and Wales [J]. *Sci Total Environ*, 311(3): 205-219
- Singh S, Datta P. 2005. Growth and survival potential of immobilized diazotrophic cyanobacterial isolates exposed to common ricefield herbicides [J]. *World J Microbiol Biotechnol*, 21: 441-446
- Su Y H, Zhu Y G. 2005. Influence of lead on atrazine uptake by rice (*Oryza sativa* L.) seedlings from nutrient solution [J]. *Environ Sci Pollut Res*, 12(1): 21-27
- 田芹, 周志强, 江树人, 等. 2004. 丁草胺在环境中降解行为的研究

- 进展[J]. 农药, 43(5): 205-208
- Tian Q, Zhou Z Q, Jiang S R, *et al.* 2004. Research progress in butachlor degradation in the environment [J]. Chinese J Pesticides, 43(5): 205-208 (in Chinese)
- Wang J H, Lu Y T, Ding H. 2007a. Effect of cadmium alone and in combination with butachlor on soil enzymes [J]. Environ Geochemical Health, 29(5): 395-403
- Wang J H, Lu Y T, Shen G Q. 2007b. Combined effects of cadmium and butachlor on soil enzyme activities and microbial community structure [J]. Environ Geol, 51(7): 1221-1228
- Wang M, Zhou Q. 2005. Single and joint toxicity of chlorimuron-ethyl, cadmium, and copper acting on wheat (*Triticum aestivum*) [J]. Ecotoxicol Environ Safety, 60(2): 169-175
- 吴庆钰, 杨俊诚, 张建峰, 等. 2007a. 镉与苄嘧磺隆复合污染对水稻某些生物学特性的影响 [J]. 农业环境科学学报, 26(5): 1789-1796
- Wu Q Y, Yang J C, Zhang J F, *et al.* 2007a. Effect of cadmium and bensulfuron methyl co-contamination on some biological characteristics of rice [J]. J Agro-Environ Sci, 26(5): 1789-1796 (in Chinese)
- 吴庆钰, 杨俊诚, 张建峰, 等. 2007b. 镉与苄嘧磺隆复合污染对水稻细胞、DNA 的毒害作用 [J]. 农业环境科学学报, 26(6): 2216-2220
- Wu Q Y, Yang J C, Zhang J F, *et al.* 2007b. Toxicity of co-contamination with bensulfuron methyl and cadmium to cell and DNA of rice [J]. J Agro-Environ Sci, 26(6): 2216-2220 (in Chinese)
- Yang C, Sun T, He W, *et al.* 2007. Single and joint effects of pesticides and mercury on soil urease [J]. J Environ Sci, 19(2): 210-216
- 殷宪强, 王昌钊, 易磊, 等. 2010. 小青菜酶活性与铅形态关系的研究 [J]. 干旱地区农业研究, 28(5): 133-137
- Yin X Q, Wang C Z, Yi L *et al.* 2010. Study on relationship between Pb chemical forms and enzyme activity in *Brassica Chinensis* [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 28(5): 133-137 (in Chinese)
- 余保文, 朱诚. 2008. 丁草胺对镉胁迫条件下水稻生长、镉积累及活性氧代谢的影响 [J]. 环境科学学报, 28(9): 1878-1886
- Yu B W, Zhu C. 2008. Effects of butachlor on the growth, cadmium accumulation and oxidative metabolism of rice under Cd^{2+} stress [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 28(9): 1878-1886 (in Chinese)
- Zhou D M, Chen H M, Hao X Z, *et al.* 2001. Fractionation of heavy metals in soils as affected by soil types and metal load quantity [J]. Pedosphere, 12(4): 309-320