

不同种类蔬菜幼苗对铅的敏感性研究

王 玲, 刘凤枝, 蔡彦明, 刘 铭, 刘 岩, 王 伟, 刘传娟

(农业部环境保护科研监测所, 天津 300191)

摘 要:采用水培方法,探讨了小白菜(叶菜类)、黄瓜、豇豆(瓜果类)和萝卜(根茎类)幼苗对重金属 Pb 的吸收累积量大小及 Pb 对其幼苗生长发育的影响。结果表明,蔬菜幼苗根和茎叶累积 Pb 量均随 Pb 处理浓度的增加而显著增加($P<0.05$),且同一处理浓度下根中 Pb 含量远高于茎叶中 Pb 含量。蔬菜苗期根对 Pb 的敏感性排序为黄瓜>小白菜>萝卜>豇豆,茎叶为小白菜>萝卜>黄瓜>豇豆。低浓度的 Pb 对叶绿素的合成有一定程度的刺激作用,随 Pb 浓度增加,叶片中叶绿素含量降低。小白菜过氧化氢酶(CAT)含量随着 Pb 浓度的增大先增大后缓慢降低,其他 3 种蔬菜则表现为先减小后增大的趋势。此外,黄瓜和豇豆出芽率显著降低,4 种蔬菜幼苗根长均明显受到抑制。

关键词:铅;蔬菜;幼苗;敏感性

中图分类号:X503.231 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)09-1646-07

Sensitivity of Different Vegetable Seedlings to Lead

WANG Ling, LIU Feng-zhi, CAI Yan-ming, LIU Ming, LIU Yan, WANG Wei, LIU Chuan-juan

(Institute of Agro-environmental Protection, Ministry of Agriculture, Tianjin 300191, China)

Abstract: Lead is not a necessary element to crop growth but a pollutant with accumulation problems. In this study, we defined that the higher cumulative amount of Pb in the vegetable seedlings, the more sensitivity of vegetables to Pb. According to the sensitivities of different types of vegetables to Pb, we could infer the influences of Pb on the vegetable growth. The effects of Pb of different concentrations on seed germination rates, seedling growth, physiological responses and Pb contents in shoots and roots of four kinds of vegetables (leafy vegetables: Chinese cabbage; fruit vegetables: cucumber, cowpea; root vegetables: radish) were studied by means of water culture experiment. The results showed that Pb contents in all roots and shoots of the four vegetable seedlings had highly positive correlation with the concentration of Pb ($P<0.05$), and Pb was easily absorbed and accumulated in roots than in shoots. The ascending sort of Pb enrichment capacity in the roots of these tested vegetable seedlings was cucumber> Chinese cabbage> radish> cowpea, and in the shoots, it was Chinese cabbage> radish> cucumber> cowpea. These indicated that cucumber was most sensitive to Pb among the roots of tested vegetables, while Chinese cabbage was most sensitive to Pb among the shoots. With the increase of the Pb concentration, chlorophyll contents in the four tested vegetables increased first and decreased afterwards. Catalase (CAT) contents in Chinese cabbage had the same performance as the chlorophyll, but which in the other tested vegetables had a reversed trend. By the way, we could get another conclusion that vegetable germination rates of cucumber and cowpea, seedling root lengths of all decreased significantly under the same experiment conditions.

Keywords: lead; vegetables; seedling at nursery stage; sensitivity

重金属铅(Pb)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,它可通过灌溉水(特别是污灌)、固体废弃物、肥料以及大气沉降^[1]等途径进入土壤。重金属 Pb 进入土壤后不能被微生物降解,一方面在土壤中残留、富集;另一方面被作物吸收,表现出毒害效应,并且可通过食物链危害人体健康。因此,研究 Pb 对农作物的影响,Pb 在农作物体内的吸收累积规律,具有重要意义。

国内外对蔬菜受 Pb 污染的研究较多,主要集中

收稿日期:2010-03-23

基金项目:质检公益性行业科研专项项目(200910201):食用农产品产地土壤质量安全等级评价方法及重金属限量标准研究;中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目(农业部环境保护科研监测所):我国农业环境污染事故处理的实证性研究

作者简介:王 玲(1984—),女,湖北随州人,生态学在读硕士,主要从事农产品产地监测与评价方面的研究。

E-mail: wangling19842003@163.com

通讯作者:刘凤枝 E-mail: liufengzhi@cae.org.cn

在 Pb 对蔬菜生长发育^[2-4]、生理生化特性^[5-6]、迁移累积规律^[7-9]以及 Pb 和其他重金属复合交互作用对蔬菜的影响等方面。已有的研究证明,同一蔬菜种类对不同重金属的吸收富集能力不同,不同种类的蔬菜对同一种重金属的吸收富集能力也不同。但在同一试验条件下对多种蔬菜种类(叶菜类、根茎类和瓜果类等)受 Pb 污染影响的系统性研究还较少。本研究选择各地普遍种植的 4 种蔬菜:小白菜(叶菜类)、黄瓜和豇豆(瓜果类)、萝卜(根茎类),采用水培试验,探讨 Pb 对蔬菜幼苗生长发育的影响及幼苗根和茎叶对 Pb 的吸收累积量大小,并根据对 Pb 的累积量多少进行敏感性排序,同一条件下吸收累积 Pb 量越多定义为该蔬菜对 Pb 越敏感,旨在找出不同种类蔬菜幼苗对 Pb 的敏感性差异,从而推断 Pb 对不同种类蔬菜安全质量的影响程度,为农产品产地种植结构调整提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

(1)Pb 标准溶液:1 000 mg·L⁻¹。准确称取 1.598 5 g 优级纯 Pb(NO₃)₂,加少许蒸馏水溶解并定容至 1 L。

(2)供试蔬菜。叶菜类:小白菜(*Brassica chinensis* L.,早熟五号);根茎类:萝卜(*Rhaphanus sativas* L.,卫青萝卜);瓜果类:黄瓜(*Cucumis sativus* L.,神农春四)、豇豆(*Vigna unguiculata* L.,科选特长)。

(3)清水(自来水):晾晒 24 h 后备用。自来水有关成分测定结果见表 1。

1.2 水培试验

水培试验在农业部环境保护科研监测所环境监测总站水培实验室进行。室内日间温度 21~26 ℃,湿度 88%~95%;夜间温度 17~22 ℃,湿度 83%~90%。试验用 Pb 标准溶液配制一系列 Pb 浓度梯度(0.5、1.0、2.0、4.0、8.0、16.0、32.0 mg·L⁻¹),调节 pH 为中性。各浓度梯度设置 5 个平行,以自来水作为对照(CK)。

水培器皿为 400 mL 的烧杯,烧杯口以纱布作支撑,将配置好的 Pb 溶液倒入烧杯里,水培液液面高度以刚好浸润纱布为准。挑选饱满健壮的蔬菜种子均匀播种在纱布上,每杯播 15 粒,14 d 后收获。播种后从

第 2 d 起每 12 h 补加一次同等浓度的水培液 10 mL,并记录温、湿度,观察发芽、出苗及生长发育情况。

1.3 测定指标与分析方法

试验测定经 14 d 培养后的不同 Pb 溶液下的各种蔬菜的出芽率、根长、叶片叶绿素及过氧化氢酶、根和茎叶累积 Pb 含量。各指标测定方法如下:

(1)出芽率:参见《常用农业计算方法》^[10]。

(2)根长:分别测量经 14 d 培养后不同 Pb 浓度下各蔬菜幼苗的主根长,取平均值。

(3)叶绿素和过氧化氢酶:参见《植物生理学实验指导》^[11]。

(4)根和茎叶累积 Pb 量:将根和茎叶自然风干后磨碎,过 40 目筛,密闭微波消解后,用 ICP-MS 测定其中 Pb 含量。

1.4 统计分析方法

试验数据用统计分析软件 DPS v7.05 进行分析,考虑 95%的置信水平,应用最小显著差异法(LSD)对不同浓度进行多重比较分析。数据采用 SPSS17.0 进行回归分析。

2 结果与分析

2.1 蔬菜幼苗对 Pb 吸收累积量及 Pb 对幼苗生理指标的影响

2.1.1 蔬菜幼苗根和茎叶中 Pb 含量(均以干重计)

考虑实际生产中产地环境 Pb 的浓度,在考察幼苗对 Pb 的吸收累积量时 Pb 浓度设定为 8 mg·L⁻¹。不同 Pb 浓度水培液中,小白菜、萝卜、黄瓜和豇豆幼苗根和茎叶对 Pb 的吸收累积量分别见表 2 和表 3。

4 种蔬菜幼苗根和茎叶中 Pb 含量均随 Pb 处理浓度的增加而增加,二者呈显著正相关($P<0.05$),相关系数均在 0.9 以上,且同一条件下幼苗根中 Pb 含量远高于茎叶中 Pb 含量。如 Pb 浓度为 8 mg·L⁻¹ 时,4 种蔬菜根中 Pb 含量是茎叶的 16~63 倍。这说明 Pb 在植株内主要富集在根部,只有很小一部分向茎中转运,由根部到地上部分浓度是逐渐降低的^[12-14]。植物叶片也能吸收铅,但大气中以固体颗粒存在的铅大部分仅沉降在叶的表面,它们大多不能透过蜡质层和角质层而进入叶片内部^[15]。

表 1 水培试验用自来水中相关成分测定值

Table 1 Components in tap water after laying in the air for 24 h

pH	TN/mg·L ⁻¹	TP/mg·L ⁻¹	K/mg·L ⁻¹	Ca/mg·L ⁻¹	Mg/mg·L ⁻¹	Na/mg·L ⁻¹	Cu/μg·L ⁻¹	Zn/μg·L ⁻¹	Pb/μg·L ⁻¹	Cd/μg·L ⁻¹	As/μg·L ⁻¹	Cr/μg·L ⁻¹	Ni/μg·L ⁻¹
7.15	1.83	0.17	5.49	57.03	21.39	28.22	2.33	664.9	4.27	0.25	0.91	4.81	1.13

表 2 蔬菜幼苗根中 Pb 含量(mg·kg⁻¹)

Table 2 Pb contents in roots of tested vegetable seedlings(mg·kg⁻¹)

Pb 浓度/mg·L ⁻¹	CK	0.5	1.0	2.0	4.0	8.0	相关系数
小白菜	30.64f	2 335e	2 814d	3 880c	4 883b	6 333a	0.900*
萝卜	32.53f	1 464e	2 434d	3 323c	3 570b	5 461a	0.915*
黄瓜	15.82f	1 727e	2 863d	3 203c	5 355b	7 229a	0.949**
豇豆	16.91f	342e	1 032d	1 260c	1 786b	3 000a	0.972**

注: * 表示 $P<0.05$; ** 表示 $P<0.01$ 。数据后的不同字母表明具有显著性差异($P<0.05$)。下同。

表 3 蔬菜幼苗茎叶中 Pb 含量(mg·kg⁻¹)

Table 3 Pb contents in shoots of tested vegetable seedlings(mg·kg⁻¹)

Pb 浓度/mg·L ⁻¹	CK	0.5	1.0	2.0	4.0	8.0	相关系数
小白菜	4.4f	80e	172d	225c	304b	378a	0.909*
萝卜	7.1f	88e	126d	178c	229b	280a	0.900*
黄瓜	1.9e	46d	50cd	57c	74b	115a	0.924**
豇豆	5.4d	14cd	18c	33b	42b	54a	0.941**

从上表还可以看出,在 Pb 浓度相同的情况下,不同种类蔬菜根和茎叶中 Pb 含量存在较大差异。黄瓜根中 Pb 含量最高,小白菜稍高于萝卜,豇豆里含量最低。在 Pb 浓度 8 mg·L⁻¹ 时,豇豆根中 Pb 含量仅是黄瓜根中的 47%。而对于 4 种蔬菜的茎叶部分,小白菜 Pb 含量最高,其次是萝卜,黄瓜和豇豆对 Pb 的吸收累积量都小于萝卜,且黄瓜的累积量大于豇豆。因此,相同环境条件下,4 种蔬菜中,黄瓜根对 Pb 有较强的累积能力,而小白菜茎叶对 Pb 有较强的累积能力。蔬菜中 Pb 含量的高低,主要取决于蔬菜种类,由于其生长习性、生理代谢过程的差异,对 Pb 的积累也存在较大差异^[16]。

由以上分析可以得出,供试蔬菜根对 Pb 的吸收累积强弱顺序即对 Pb 的敏感性排序为黄瓜>小白菜>萝卜>豇豆;茎叶对 Pb 的敏感性排序为小白菜>萝卜>黄瓜>豇豆。

2.1.2 对叶绿素的影响

光合作用是受 Pb 影响最敏感的过程之一^[12]。植物长时间遭受 Pb 胁迫后,光合色素减少、叶绿体结构改变及 CO₂ 同化酶的活性降低,另外通过阻碍叶绿素的生物合成使叶绿素含量减少,表现为植株叶片出现褪绿现象。不同浓度下 Pb 对供试蔬菜叶片叶绿素的影响趋势见图 1。

由图 1 可以看出,随着 Pb 浓度的增大,4 种蔬菜叶片的叶绿素含量变化趋势相似。在 Pb 浓度为 0.5 mg·L⁻¹ 时,4 种蔬菜的叶绿素含量相对对照均有下降,黄瓜叶片叶绿素含量在 Pb 浓度为 1 mg·L⁻¹ 时降到最低。但随着 Pb 浓度的升高,叶绿素含量均开始增

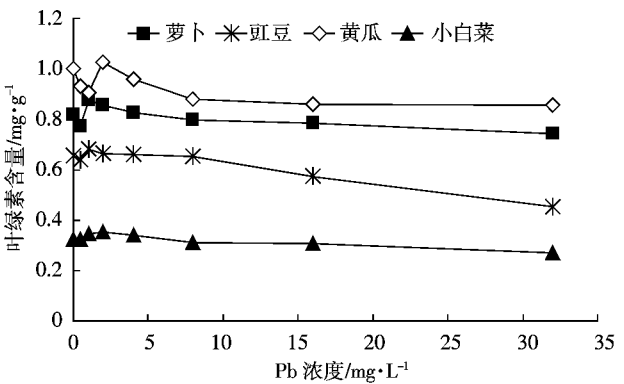


图 1 Pb 对 4 种蔬菜叶绿素的影响

Figure 1 Effects of Pb on chlorophyll of the four vegetables

加,萝卜和豇豆在 Pb 浓度为 1 mg·L⁻¹ 时含量达到最大,黄瓜和小白菜在 Pb 浓度为 2 mg·L⁻¹ 时含量达到最大,这说明低浓度的 Pb 对叶绿素的合成和光合作用活性有一定程度的刺激作用^[17]。随着 Pb 浓度的继续升高,叶片叶绿素含量开始下降,这可能是因为 Pb²⁺能取代叶绿素分子中的 Mg²⁺,破坏了叶绿素的结构,从而使叶绿素的生理功能受到抑制,影响光合作用的正常进行^[18]。

2.1.3 对过氧化氢酶(CAT)活性的影响

CAT 是一种含 Fe 的血红蛋白酶类,在生物体内氧化还原反应中起重要作用,能有效清除生物体内的 H₂O₂ 对生物分子的氧化作用。不同 Pb 浓度对 4 种蔬菜叶片中 CAT 含量的影响变化如图 2。

在低浓度的 Pb 水平下,小白菜叶片内的 CAT 含量逐渐增加,说明小白菜对低浓度的 Pb 有一定的应激性反应^[19],铅浓度达到 2 mg·L⁻¹ 时开始缓慢下降,

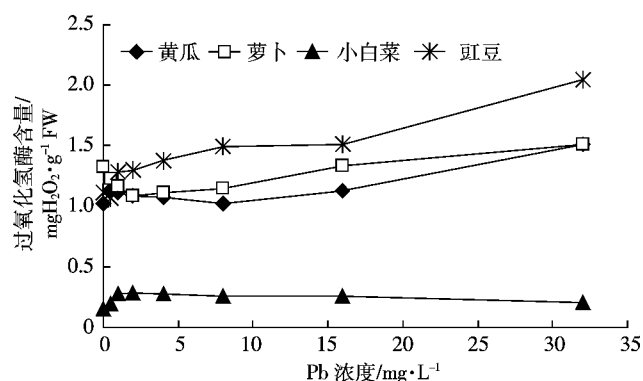


图2 Pb对4种蔬菜过氧化氢酶含量的影响

Figure 2 Effects of Pb on CAT of the four vegetables

因为Pb胁迫浓度的增加超过了小白菜幼苗所能承受的阈值。黄瓜叶片内的CAT含量在低浓度时变化不明显,到 $8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时开始增大。豇豆在 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时CAT含量最小,随着Pb浓度增大,CAT含量增大。萝卜体内CAT含量在低浓度时逐渐减小,在Pb浓度为 $4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时含量开始增大。这可能是由于铅胁迫尚未超过这3种蔬菜的承受能力,蔬菜叶片还处于相对伤害较轻的阶段。

2.2 Pb对蔬菜幼苗生长发育的影响

蔬菜种子出芽及幼苗生长期是蔬菜生长发育的最脆弱时期,也是最关键时期^[20],因此用出芽率及幼苗生长发育受Pb危害程度可推断Pb对蔬菜产量的影响。

2.2.1 播种14 d后蔬菜幼苗的生长情况

蔬菜对Pb的反应,苗期抗性较弱。从4种蔬菜幼苗的生长状况来看,根部是受Pb影响最严重的部位,地上部受Pb胁迫的危害要比根系小得多。在生长初期,高浓度的Pb培养下的幼苗叶片卷曲且边缘泛黄,但随着培养时间的延长,叶片长势差异逐渐不明显。蔬菜在较大的Pb吸收量下仍能保持较好的生长状态,而且植株对重金属持续处理具有耐受作用,多次投加后表现出一定抗性。虽然其体内浓度增加,而受害症状逐渐变得不明显,说明在持续污染下,作物不安全隐患既增加而又不易表现。图3列出了4种蔬菜的生长状况。

2.2.2 对出芽率的影响

4种蔬菜种子的出芽率见表4。用不同浓度的Pb溶液处理4种蔬菜种子,小白菜和萝卜种子发芽快,

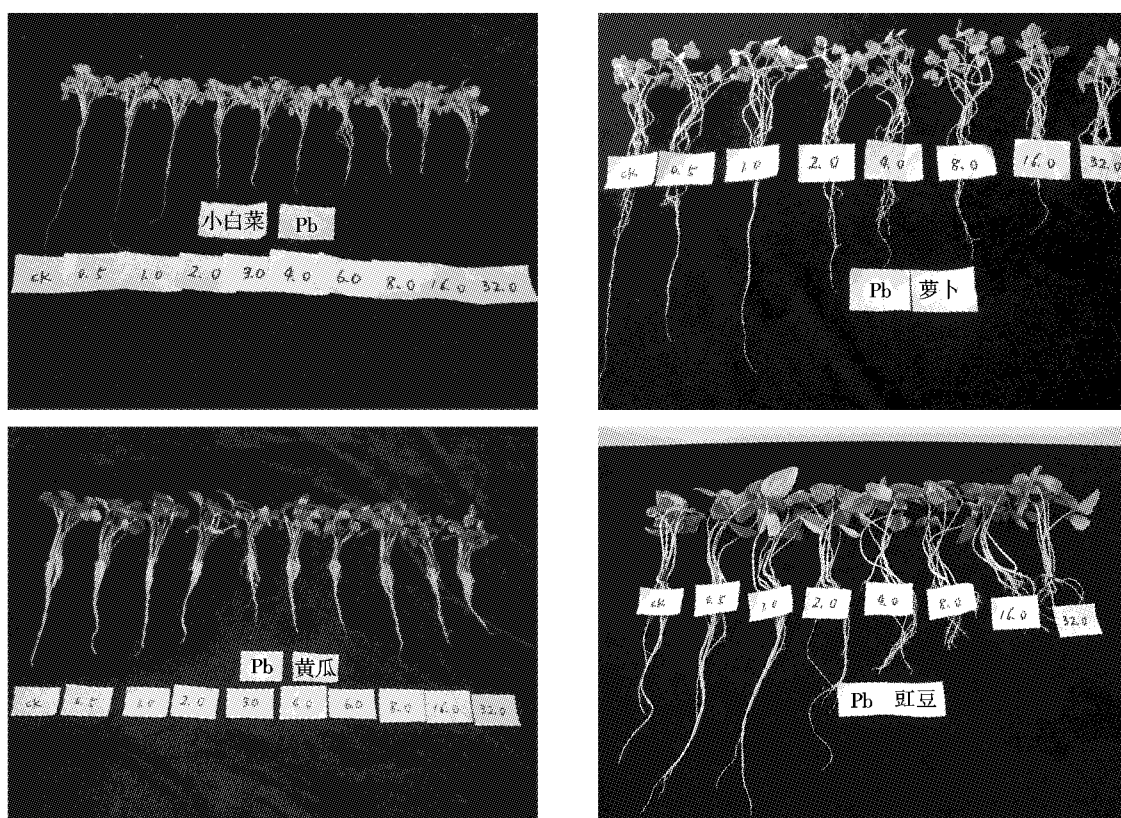


图3 播种14 d 4种蔬菜的生长状况

Figure 3 The growth status of four vegetable seedlings after 14 days

表 4 4 种蔬菜种子的出芽率(%)
Table 4 The germination rates of four vegetables(%)

Pb 浓度/mg·L ⁻¹	CK	0.5	1.0	2.0	4.0	8.0	16.0	32.0
小白菜	100.00±0.00a	97.50±4.33ab	97.50±2.50ab	96.67±4.73ab	97.50±1.25ab	95.83±5.05ab	96.25±3.31ab	94.58±9.38b
萝卜	78.33±6.67b	87.78±6.94a	81.11±18.36ab	81.11±6.94ab	78.89±11.09b	78.89±9.18b	78.33±11.67b	70.55±11.10c
黄瓜	84.44±18.36a	64.44±39.77bc	73.33±37.86ab	53.33±34.64c	55.55±45.26bc	63.33±49.10bc	61.11±47.41bc	52.22±34.05c
豇豆	91.67±14.43a	81.94±20.56ab	79.17±32.54abc	75.00±36.33bc	66.67±34.10bc	73.61±38.71bc	73.61±34.95bc	63.89±23.69c

注:表中数据为平均值±标准差,数据后的不同字母表明具有显著性差异($P<0.05$)。下同。

且发芽率较高,黄瓜和豇豆种子在高浓度下发芽很慢且种子容易腐烂而不发芽。低浓度的 Pb 溶液对萝卜种子发芽有稍微的促进作用,随着浓度的增大,种子发芽率降低。不同水平的 Pb 溶液对小白菜的发芽率影响不明显,只有在最大浓度时才表现出显著性差异。低浓度的 Pb 溶液对豇豆和黄瓜的发芽影响不大,当浓度达到 2 mg·L⁻¹ 时开始抑制种子发芽。当 Pb 浓度为 32 mg·L⁻¹ 时黄瓜种子发芽率比对照降低 38%,豇豆种子降低 30%。

2.2.3 对根长的影响

在蔬菜生长过程中,根系不但从土壤中摄取各种营养物质,也会因吸入污染物质使生长受到抑制,严重时可导致死亡。本试验中,4 种蔬菜的根长与水培液的 Pb 浓度有较好的负相关性: $r(\text{小白菜})=-0.783^*$, $r(\text{萝卜})=-0.810^*$, $r(\text{黄瓜})=-0.683$, $r(\text{豇豆})=-0.770^*$ ($*$ 表示 $P<0.05$, $**$ 表示 $P<0.01$,下同)。图 4 中,与对照相比,不同浓度的 Pb 溶液对小白菜、萝卜和黄瓜的根长均是抑制作用,且随着 Pb 浓度增大抑制作用加大。当 Pb 浓度为 2 mg·L⁻¹ 时,小白菜的根长比对照减少 34%,萝卜减少 39%,黄瓜减少 21%。当 Pb 浓度为 32 mg·L⁻¹ 时,小白菜的根长比对照减少 57%,萝卜减少 69%,黄瓜减少 38%。低浓度的 Pb 溶液对豇豆的根长有刺激作用,但是当 Pb 浓度大于 2 mg·L⁻¹ 时,对豇

豆的根长抑制作用越来越大:Pb 浓度为 4 mg·L⁻¹ 时,抑制率为 25%;Pb 浓度为 32 mg·L⁻¹ 时,抑制率达到 64%。

计算不同 Pb 浓度下 4 种蔬菜的根长相对对照的抑制率,并以浓度(x)-抑制率(y)进行回归分析,根据回归方程得出 4 种蔬菜的 EC_{90} 值(指蔬菜根伸长抑制率为 90%时的 Pb 浓度)见表 5。回归方程如下:

小白菜: $y=0.932\ 9x+30.257,r=0.956^{**}$
萝卜: $y=1.438\ 1x+31.596,r=0.866^*$
黄瓜: $y=0.588\ 2x+17.594,r=0.686$
豇豆: $y=2.521\ 5x+2.720\ 4,r=0.753$

表 5 4 种蔬菜的 EC_{90} 值(mg·L⁻¹)
Table 5 The EC_{90} values of four vegetables(mg·L⁻¹)

蔬菜	小白菜	萝卜	黄瓜	豇豆
EC_{90}	64.04	40.61	123.10	34.61

EC_{90} 值可以作为蔬菜受重金属毒害致死的临界值,铅浓度超过 EC_{90} 值蔬菜几乎不能生长,这为确保蔬菜的安全性生产提供了依据。由表 5 可以看出,Pb 对 4 种蔬菜的毒性效应不同。黄瓜对 Pb 的 EC_{90} 值最高,其次是小白菜,萝卜和豇豆对 Pb 的 EC_{90} 值相差不大,豇豆稍低于萝卜,表明豇豆对 Pb 的毒性效应响应最灵敏。4 种蔬菜对 Pb 的 EC_{90} 值大小为:黄瓜>小

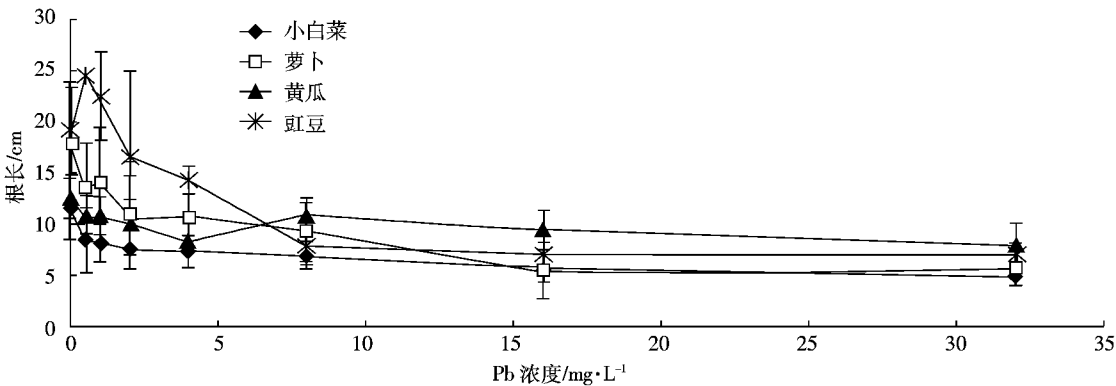


图 4 不同 Pb 溶液对 4 种蔬菜的根长的影响
Figure 4 Effects on root lengths with different concentrations of Pb

白菜>萝卜>豇豆。这和前面根对 Pb 的敏感性排序一致,说明 4 种蔬菜根对 Pb 的敏感性大小为:黄瓜>小白菜>萝卜>豇豆。

3 讨论

本试验结果表明,不同蔬菜种类对同种重金属吸收富集能力并不相同,有的差别甚至很大,这与人研究结果一致^[2,5,7,9,21-22]。正因为各类蔬菜品种对重金属 Pb 的积累特性不同,本研究探讨了小白菜(叶菜类)、萝卜(根茎类)、黄瓜和豇豆(瓜果类)幼苗对 Pb 的吸收累积量大小,吸收累积量越大,蔬菜对 Pb 越敏感。试验得出的敏感性排序为:根:黄瓜>小白菜>萝卜>豇豆;茎叶:小白菜>萝卜>黄瓜>豇豆。排序越靠前的蔬菜种类,对 Pb 越敏感,在 Pb 污染区种植时 Pb 含量越容易超标。

基于蔬菜质量安全考虑,小白菜是供试蔬菜中对 Pb 高积累的品种,而小白菜又是一年种植面积较广、产量较高的蔬菜,其食用安全问题与人们健康密切相关,在生产中要特别注意产地土壤环境质量,在 Pb 污染区禁止栽培。根茎类蔬菜萝卜对 Pb 的积累能力也较强,生产中对土壤环境质量也应加以重视。瓜果类蔬菜中黄瓜的根对 Pb 积累能力强,但是 Pb 向地上部分转移很少,有研究表明瓜果类蔬菜各个器官对 Pb 的累积量大小为根>>茎叶>>果实^[5],因此黄瓜和豇豆是 Pb 低积累蔬菜品种,在生产中可以利用这一特点,宜在 Pb 含量偏高的地区种植黄瓜或豇豆。

不同种类蔬菜对 Pb 的敏感性研究有待进一步深入,例如增加蔬菜种类,对生理生化指标的影响等,以完善这个敏感性排序。在生产中可以根据敏感性排序,推断出 Pb 对不同种类蔬菜生长发育和安全品质的不同影响程度,然后考虑受污染土壤适宜种植的作物,这样可以最大限度地保障农产品的质量安全,保障人民的身体健康。

4 结论

(1)蔬菜幼苗对 Pb 有很强的吸收累积作用,且根的累积作用远大于茎叶,根对 Pb 的累积强弱顺序即根对 Pb 的敏感性排序为黄瓜>小白菜>萝卜>豇豆,茎叶对 Pb 的敏感性排序为小白菜>萝卜>黄瓜>豇豆。

(2)低浓度的 Pb 对供试蔬菜叶片叶绿素的合成有刺激作用,但随 Pb 浓度增大叶绿素含量开始下降,从而降低光合作用。酶活性是植物在 Pb 胁迫下较为敏感的生理指标,小白菜 CAT 活性随 Pb 浓度的

增大先增大后降低,而其他 3 种蔬菜的 CAT 活性则逐渐升高。

(3)4 种蔬菜幼苗的生长发育在 Pb 胁迫下受到不同程度的影响。高浓度 Pb 处理下,黄瓜和豇豆的发芽率受到明显抑制,在生长初期叶片受害症状明显,随培养时间延长,这种受害症状表现逐渐不明显 4 种蔬菜根系的生长则明显受到抑制。

参考文献:

- [1] Allen P Davis, Mohammad Shokouhian, Shubei Ni. Loading estimates of lead, copper, cadmium, and zinc in urban runoff from specific sources [J]. *Chemosphere*, 2001, 44(5):997-1009.
- [2] 宗良纲, 孙静克, 沈倩宇, 等. Cd、Pb 污染对几种叶类蔬菜生长的影响及其毒害症状[J]. *生态毒理学报*, 2007, 2(1):63-68.
ZONG Liang-gang, SUN Jing-ke, SHEN Qian-yu, et al. Impacts of cadmium and lead pollution in soil on leaf vegetables growth and toxic-symptoms[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2007, 2(1):63-68.
- [3] 宋玉芳, 许华夏, 任丽萍, 等. 土壤重金属对白菜种子发芽与根伸长的生态毒性效应[J]. *环境科学*, 2002, 23(1):103-107.
SONG Yu-fang, XU Hua-xia, REN Li-ping, et al. Eco-toxicological effects of heavy metals on the inhibition of seed germination and root elongation of Chinese cabbages in soils[J]. *Environmental Science*, 2002, 23(1):103-107.
- [4] 张建新, 纳明亮, 徐明岗. 土壤 Cu、Zn、Pb 污染对蔬菜根伸长的抑制剂毒性效应[J]. *农业环境科学学报*, 2007, 26(3):945-949.
ZHANG Jian-xin, NA Ming-liang, XU Ming-gang. Inhibition and toxicity of Cu, Zn, Pb on root elongation of vegetable in contaminated soil[J]. *Journal of Agro-environment Science*, 2007, 26(3):945-949.
- [5] 张永志, 郑纪慈, 徐明飞, 等. 铅对茄果类蔬菜生长特性及其细胞组织超微结构的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2008, 27(2):482-487.
ZHANG Yong-zhi, ZHENG Ji-ci, XU Ming-fei, et al. Effect of Pb on growth characteristics and cell ultrastructure of solanaceous vegetables [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(2):482-487.
- [6] 刘素纯, 萧浪涛, 廖柏寒, 等. 铅胁迫对黄瓜幼苗内源水杨酸的影响[J]. *湖南农业科学*, 2006(3):25-28.
LIU Su-chun, XIAO Lang-tao, LIAO Bo-han, et al. Effects on endogenous salicylic acid of cucumber seedlings under lead and cadmium stress[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2006(3):25-28.
- [7] 徐明飞, 郑纪慈, 阮美颖, 等. 不同类型蔬菜重金属 (Pb, As, Cd, Hg) 积累量的比较[J]. *浙江农业学报*, 2008, 20(1):29-34.
XU Ming-fei, ZHENG Ji-ci, RUAN Mei-ying, et al. Comparison of the amounts of heavy metals accumulated by different groups of vegetables [J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2008, 20(1):29-34.
- [8] Judicaëlle Brunet, Anne Repellin, Gilles Varrault, et al. Lead accumulation in the roots of grass pea (*Lathyrus sativus* L.): A novel plant for phytoremediation systems? [J]. *Comptes Rendus Biologies*, 2008, 331(11):859-864.
- [9] H Deng, Z H Ye, M H Wong. Accumulation of lead, Zinc, copper and cadmium by 12 wetland plant species thriving in metal-contaminated

- sites in China[J]. *Environmental Pollution*, 2004, 132(1):29-40.
- [10] 李贵斌,刁荣生. 常用农业计算方法[M]. 贵阳:贵州人民出版社, 1977.
- LI Gui-bin, DIAO Rong-sheng. Traditional calculation methods of agriculture[M]. Guiyang: Guizhou People's Publishing House, 1977.
- [11] 陈建勋,王晓峰. 植物生理学实验指导[M]. 第2版. 广州:华南理工大学出版社, 2006.
- CHEN Jian-xun, WANG Xiao-feng. The guidance of plant physiology experiments[M]. 2nd Version. Guangzhou: South China University of Technology Press, 2006.
- [12] Patra M, Bhowmik N, Bandopadhyay B, et al. Comparison of mercury, lead and arsenic with respect to genotoxic effects on plant systems and the development of genetic tolerance[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2004, 52(3):199-233.
- [13] Reddy A M, Kumar S G, Jyothsnakumari G, et al. Lead induced changes in antioxidant metabolism of horsegram (*Macrotyloma uniflorum* (Lam.) Verdc.) and bengalgram (*Cicer arietinum* L.)[J]. *Chemosphere*, 2005, 60(1):97-104.
- [14] Yang Q W, Shu W S, Qiu J W, et al. Lead in paddy soils and rice plants and its potential health risk around Lechang Lead/Zinc Mine, Guangdong, China[J]. *Environment International*, 2004, 30(7):883-889.
- [15] 杨卓亚,张福锁. 土壤-植物体系中的铅[J]. 土壤学进展, 1993, 21(5):1-10.
- YANG Zhuo-ya, ZHANG Fu-suo. Lead in the soil-plant system[J]. *Progress in Soil Science*, 1993, 21(5):1-10.
- [16] 梁称福,陈正法,刘明月. 蔬菜重金属污染研究进展[J]. 湖南农业科学, 2002(4):45-48.
- LIANG Cheng-fu, CHEN Zheng-fa, LIU Ming-yue. Study processes on heavy metal pollution on vegetables[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2002(4):45-48.
- [17] Nyitrai P, Boka K, Gaspar L, et al. Characterization of the stimulating effect of low-dose stressors in maize and bean seedlings[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2003, 160(10):1175-1183.
- [18] Kupper H, Kupper F, Spiller M. Environmental relevance of heavy metal-substituted chlorophylls using the example of water plants[J]. *Journal of Experimental Botany*, 1996, 47(2):259-266.
- [19] 杨振德,王利英,覃寿艺,等. Pb^{2+} 、 Cr^{6+} 、 Cd^{2+} 单一及其复合污染对白蝴蝶叶片 CAT、POD 活性的影响[J]. 四川环境, 2006, 25(5):22-24.
- YANG Zhen-de, WANG Li-ying, QIN Shou-yi, et al. Effects of single and combined pollution by Pb^{2+} , Cr^{6+} and Cd^{2+} on activities of CAT and POD of syngonium podophyllum leaves[J]. *Sichuan Environment*, 2006, 25(5):22-24.
- [20] 蒋高明. 植物生理生态学[M]. 北京:高等教育出版社, 2004.
- JIANG Gao-ming. Plant physiological ecology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2004.
- [21] 杜应琼,何江华,陈俊坚,等. 铅、镉和铬在叶类蔬菜中的累积及其生长的影响[J]. 园艺学报, 2003, 30(1):51-55.
- DU Ying-qiong, HE Jing-hua, CHEN Jun-jian, et al. Effects of heavy metals of Pb, Cd and Cr on the growth of vegetables and their uptake[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2003, 30(1):51-55.
- [22] 纪玉琨,李广贺. 作物对重金属吸收能力的研究 [J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(增刊):104-108.
- JI Yu-kun, LI Guang-he. Adsorption of wheat and maize on heavy metals in soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(Suppl):104-108.