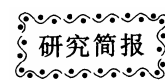


DOI: 10.3724/SP.J.1006.2013.01303



土壤砷对大豆主要性状及叶绿素含量的影响

李海波¹ 杨兰芳^{1,*} 李亚东²

¹湖北大学资源环境学院, 湖北武汉 430062; ²湖北大学生命科学学院, 湖北武汉 430062

摘 要: 设置土壤加砷的大豆盆栽试验, 测定大豆株高、结荚期与鼓粒期的叶绿素含量和大豆成熟收获后的生物量。结果表明, 当土壤砷含量达 50 mg kg⁻¹ 时, 大豆表现明显的中毒症状, 植株矮化, 叶色暗绿, 叶片皱缩, 成熟延迟。大豆株高随土壤加砷量增加而降低, 高砷量也显著减少大豆生物量, 加砷量达 100 mg kg⁻¹ 时, 大豆株高、茎叶生物量、地上生物量、籽粒产量和总生物量分别下降 45.0%、36.6%、44.6%、56.1% 和 43.4%。高砷量增加根系与地上、茎叶与地上生物量的比值, 降低籽粒与地上、籽粒与茎叶、籽粒与总生物量的比值。土壤加砷量对大豆结荚期叶绿素含量无显著影响, 但是高砷量显著降低大豆结荚期叶绿素 a 与叶绿素 b 的比值。土壤加砷量为 50 mg kg⁻¹ 和 100 mg kg⁻¹ 时, 大豆鼓粒期的叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素总量和类胡萝卜素分别增加 120.4% 和 96.1%、112.2% 和 91.5%、117.8% 和 94.5%、104.4% 和 83.7%, 同时, 结荚期与鼓粒期叶绿素含量的比值显著降低。由此可见, 土壤中高砷含量对大豆植株有毒害作用, 影响大豆生物量的分配, 降低大豆地上生物量和籽粒产量, 改变叶绿素的构成。相对增加生长后期叶绿素的含量可能是大豆成熟延迟的重要原因。

关键词: 土壤砷; 大豆; 株高; 生物量; 叶绿素

Effects of Soil Arsenic on Soybean Main Traits and Chlorophyll Content at Different Growing Stage

LI Hai-Bo¹, YANG Lan-Fang^{1,*}, and LI Ya-Dong²

¹ Faculty of Resources and Environmental Science, Hubei University, Wuhan 430062, China; ² School of Life Science, Hubei University, Wuhan 430062, China

Abstract: Arsenic is ubiquitous in environment and has high toxicity to animal and plant. Investigating the effects of arsenic on plant growth is important for the recognition of the toxic mechanism of arsenic to plant and the food safety. To understand the relationship between soil arsenic pollution and plant growth, we conducted a soil pot experiment using a soybean variety with adding different amounts of arsenic into soil, in which the soybean growth condition was observed and the plant height, chlorophyll content at podding and grain filling stages and the biomass after harvest were determined. The results showed that visible symptom of arsenic toxicity to soybean was dwarfing of plants, dark green and crimped leaves, retarded maturity when soil arsenic addition was up to 50 mg kg⁻¹. The soybean plant height decreased and the soybean biomass significantly reduced when high soil arsenic contents. The soybean plant height, soybean stem biomass, aerial part biomass, grain yield and the total soybean biomass decreased by 45.0%, 36.6%, 44.6%, 56.1%, and 43.4%, respectively, in the treatments of 100 mg kg⁻¹ of arsenic. High soil arsenic amounts increased the biomass ratios of roots to aerial parts and stems to aerial parts, but decreased the ratios of grains to aerial parts, grains to stems and grains to total biomass. Soil arsenic amounts had no significant effects on chlorophyll content in soybean leaf but decreased the ratio of Chl a to Chl b at podding stage. At grain filling stage, 50 and 100 mg kg⁻¹ arsenic treatments increased 120.4% and 96.1% of Chl a, 112.2% and 91.5% of Chl b, 117.8% and 94.5% of total chlorophyll and 104.4% and 83.7% of carotenoid content, respectively. High soil arsenic amounts reduced the ratio of chlorophyll content at podding stage to that at grain filling stage significantly. In conclusion, high soil arsenic amounts are toxic to soybean growth, affect the allocation of soybean biomass, and decrease the biomass of aerial parts and grains yield. The important reason of the retardation of soybean maturity is the constitutional alteration of chlorophyll in soybean leaf and the relative increment of chlorophyll content in soybean leaves during later growing stage by high soil arsenic amounts.

本研究由湖北省教育厅科学技术研究计划重点项目(D20091009)资助。

* 通讯作者(Corresponding author): 杨兰芳, E-mail: lfyang@hubu.edu.cn, Tel: 18971612858

第一作者联系方式: E-mail: lhb@hubu.edu.cn, Tel: 13607186519

Received(收稿日期): 2012-10-09; Accepted(接受日期): 2013-03-11; Published online(网络出版日期): 2013-04-23.

URL: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1809.S.20130423.1333.008.html>

Keywords: Soil arsenic; Soybean (*Glycine max*); Plant height; Biomass; Chlorophyll

砷是广泛存在于自然界中对生物具有很高毒性的元素^[1], 一般认为砷具有致癌、致畸、致突变等危害作用^[2-3]。砷的丰度在自然中处于第20位, 海水中排在第14位, 人体中排在第12位^[4]。由于人为和自然的原因, 砷污染现象在世界很多地方存在。全世界饮用高砷水的国家多达70多个, 有1.5亿人面临着砷的危害^[5]。由于砷具有广泛的用途, 所以人为原因引起的砷污染越来越严重, 全球每年输入土壤中的砷达5.2~11.2万吨, 因矿石煅烧释放进入大气的砷大约为6万吨^[6]。砷虽然不是植物的必需元素, 但是土壤中的砷可以被植物吸收富集, 然后又通过食物链进入人体而危害人体健康。因此研究土壤砷污染与植物之间的关系, 不仅可以揭示砷对植物的影响机制, 也对于食品安全和人类健康具有重要意义。砷对植物也具有毒害作用, 砷通过影响水分代谢、呼吸和能量代谢、碳代谢、脂质过氧化等影响植物生长^[7]。砷会激发一系列的抑制作物生长的反应, 干扰光合作用和呼吸系统, 刺激次级代谢, 植物通过超积累、抗氧化防御系统和植物螯合等机制响应砷的毒害^[8]。水培试验表明, 砷抑制大豆种子发芽、苗的发育和早期的生长^[9]。有关砷对植物的毒害机制研究还相当欠缺, 可能机制为巯基学说和离子拮抗学说^[7]。明确土壤砷污染对大豆生长发育和叶绿素的影响有利于揭示大豆砷毒害的机制, 而当前有关这方面的研究尚少见报道。我们拟通过盆栽大豆试验研究土壤加砷对大豆长势、株高、生物量和不同时期叶绿素含量与构成的影响, 为认识大豆对土壤砷污染的响应机制提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土壤为红壤土类, 棕红壤亚类, 采自湖北省武汉市鲁磨路南望山麓旁的荒芜耕地, 采回后剔除石块和植物残体, 在室内自然风干后过5 mm筛备用。供试土壤含有机质16.1 g kg⁻¹, 碱解氮、速效磷、速效钾和砷各98.1、5.5、68.8和3.6 mg kg⁻¹, CEC(阳离子交换量)为10.7 cmol (+) kg⁻¹, 土壤pH 5.76, 土壤质地为黏壤土。

所用大豆为春大豆, 品种为有限结荚型, 株型矮而紧凑, 适宜于用作盆栽试验。种子由中国农业科学院油料作物研究所提供。

1.2 盆栽试验

用高15 cm, 体积为3.2 L的圆台形陶瓷钵作为盆栽钵, 每盆装土3.0 kg。按每kg土施入72 mg N、54 mg P₂O₅、120 mg K₂O作基肥, 以(NH₄)₂SO₄、KH₂PO₄和KCl配制成含N、P₂O₅、K₂O分别为21.6、16.2、36.0 mg mL⁻¹的溶液, 每盆加入10 mL; 用亚砷酸钠配制成0、0.6、1.2、3.6、6.0和12.0 mg mL⁻¹的系列溶液; 每盆加入25 mL, 连同基肥一起拌均匀后装入盆栽钵中, 即得土壤含砷0、5、10、30、50和100 mg kg⁻¹的各处理, 每处理重复3次。

2009年5月10日装盆播种, 每盆播饱满、大小一致的种子3粒, 播种后灌足水分, 将所有盆钵放置在1.2 m×2.0 m的可移动推车上, 雨天将车推进玻璃房内, 非雨天则将车推到玻璃房外的露天里, 使生长条件接近自然状态。待苗高5 cm左右时, 每盆保留长势较一致的苗1株。大豆生长期, 每天通过外加去离子水保持土壤含水量在25%左右, 并观察记录植物生长状况。平时管理中及时收集每盆大豆的黄叶, 分别将其装入标号的相应纸袋中, 放在阴凉通风处, 最后作为茎叶的生物量计算。

1.3 叶绿素的测定

在大豆结荚期即2009年7月8日和大豆鼓粒期即2009年8月1日, 选取每株从顶端往下的第3片完整叶, 将其洗净吸干水, 剪碎混匀, 称取一定重量, 用一定体积的95%的酒精提取, 用分光光度计测665、649和470 nm 3个波长的吸光度, 根据公式计算叶绿素a、叶绿素b、叶绿素总量和类胡萝卜素的含量^[10]。

1.4 大豆株高和生物量的测定

待大豆生长到叶片枯黄脱落, 豆荚发褐, 豆荚和茎秆开始变干时, 将盆钵带入室内, 收获大豆, 并用钢卷尺测量大豆株高, 以土面为起点, 到大豆植株顶端的高度作为株高。

收获大豆时, 先将植株按地上和地下部分分开。将土壤弄碎, 取出根系, 将根系用自来水洗净, 再用蒸馏水清洗, 剪成不超过1 cm的小段, 装入纸袋。将籽粒用蒸馏水洗涤后, 装入搪瓷杯。将剥出籽粒后的地上部分, 连同平时收集的黄叶一起作为大豆茎叶部分, 先用自来水洗净, 然后用蒸馏水清洗, 再剪成小段后, 装入纸袋。最后将大豆根、茎叶和籽粒放入鼓风干燥箱, 在60~70℃下烘干并在干燥器中冷却后分别称重, 测得大豆各部位的生物量, 各部位生物量之和即为总生物量。

1.5 土壤基本理化性质的测定

用常规法测定土壤基本理化性质^[11], 即用硫酸-重铬酸钾外加热容量法测有机质, 用碱解扩散法测碱解氮, 用钼蓝法分光光度法测速效磷, 用火焰光度法测速效钾, 用醋酸铵法测CEC, 用电位法测pH, 用吸管法测土壤质地。

1.6 数据计算与处理

用Microsoft Excel 2003计算所有数据平均值、标准差, 并作图, 用SPSS10.0进行方差分析和用LSD法多重比较。

2 结果与分析

2.1 土壤砷对大豆长势的影响

从图1可见砷对大豆长势有明显影响。鼓粒期含砷50 mg kg⁻¹和100 mg kg⁻¹处理的植株明显矮于其他处理, 叶片颜色比其他处理暗绿, 叶片皱缩。成熟期含砷50 mg kg⁻¹和100 mg kg⁻¹处理的植株成熟比其他处理延迟, 其他处理叶片基本脱落, 豆荚已经变褐变干, 而这2个高砷处理的叶片仍为绿色, 豆荚依然为青色(图1)。

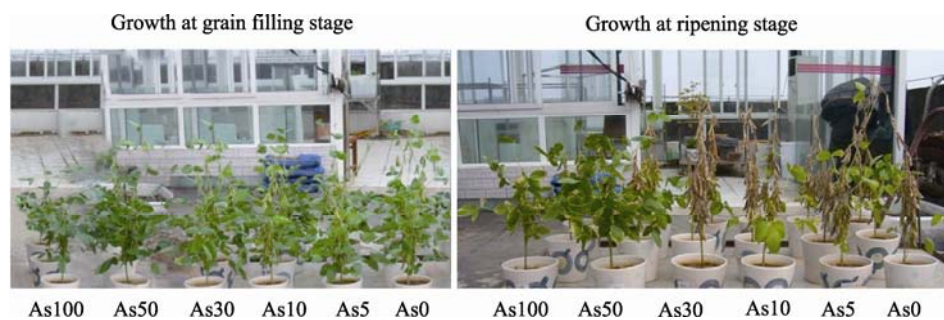


图 1 土壤砷对大豆长势的影响

Fig. 1 Effects of soil arsenic on soybean growth

As100、As50、As30、As10 和 As5 分别表示土壤砷含量为 100、50、30、10 和 5 mg kg^{-1} 。

As100, As50, As30, As10, and As5 denote that the contents of soil arsenic are 100, 50, 30, 10, and 5 mg kg^{-1} , respectively.

2.2 土壤砷对大豆株高的影响

随着土壤砷水平的增加, 大豆株高呈降低的趋势(图 2)。除土壤含砷 5 mg kg^{-1} 处理的株高与对照无显著差异外, 其余处理的株高均显著低于对照。同对照相比, 土壤加砷后大豆株高下降了 6.0%~45.0%, 其中加砷 50 mg kg^{-1} 和 100 mg kg^{-1} 的株高下降最为显著, 分别下降 28.3% 和 45.0%。相关分析表明, 大豆株高与土壤加砷量之间呈极显著负指数相关($r = -0.985$, $P < 0.01$)。

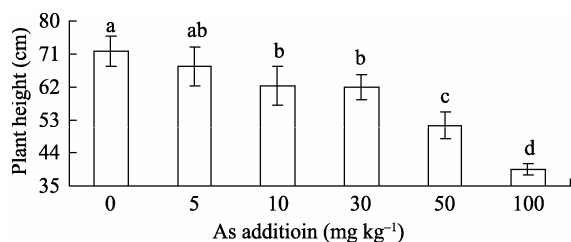
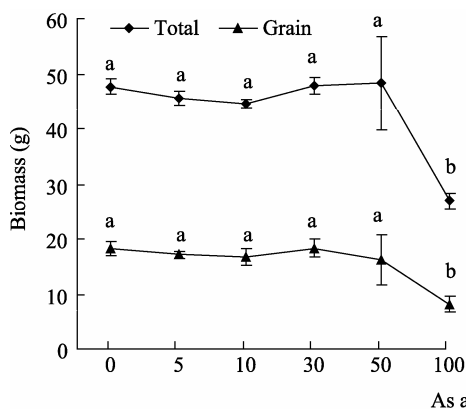


图 2 土壤砷对大豆株高的影响

Fig. 2 Effects of soil arsenic on soybean plant height

图柱上字母的不同表示柱间差异达到 0.05 的显著水平。

Band superscripted by different letters are significantly different at $P < 0.05$.



2.3 土壤砷对大豆生物量的影响

图 3 表明, 各处理大豆根系的生物量无显著差异, 与对照相比, 土壤加砷 100 mg kg^{-1} 显著降低了大豆茎叶、籽粒、地上生物量和总生物量, 其降低率分别达 36.6%、56.1%、44.6% 和 43.4%。

由表 1 可见, 土壤加砷影响根系与地上部分、茎叶与地上部分、籽粒与地上部分、籽粒与茎叶、籽粒与总生物量的比值。与对照相比, 加砷 50 mg kg^{-1} 和 100 mg kg^{-1} 显著增加了根系与地上生物量和茎叶与地上生物量的比值, 显著降低了籽粒与茎叶和籽粒与总生物量的比值, 加砷 100 mg kg^{-1} 还显著降低了籽粒与地上生物量的比值。

2.4 土壤砷对大豆结荚期和鼓粒期叶绿素含量的影响

图 4 表明, 加砷水平下不同时期的叶绿素含量各不相同。大豆结荚期各加砷处理的叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素总量和类胡萝卜素的含量与对照的差异均没有达到显著水平, 但在鼓粒期, 土壤加砷 50 mg kg^{-1} 和 100 mg kg^{-1} 的大豆叶片叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素总量和类胡萝卜素的含量均显著高于对照和其他加砷处理, 土壤加砷 50 mg kg^{-1} 和 100 mg kg^{-1} 的处理使大豆鼓粒期叶绿素 a

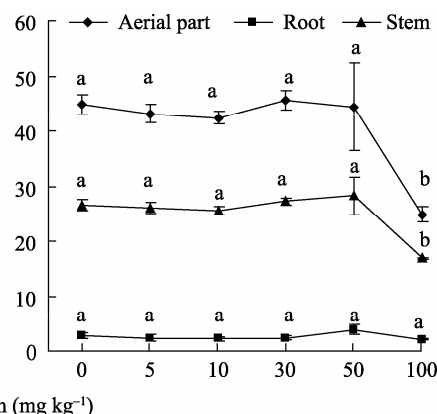


图 3 土壤加砷对大豆生物量的影响

Fig. 3 Effects of soil arsenic amounts on soybean biomass

同一折线图上的不同字母表示差异达到 0.05 的显著水平。

The different letters indicated the statistical significance for the effects of soil arsenic. Biomass with the same letter are not different at $P < 0.05$.

表1 大豆不同部位生物量的比值
Table 1 Biomass ratio of each soybean parts

砷水平 As level (mg kg ⁻¹)	根系/地上 Root/aerial part	茎叶/地上 Stem/aerial part	籽粒/地上 Grain/aerial part	籽粒/茎叶 Grain/stem	籽粒/总量 Grain/total
0	0.064±0.002 a	0.59±0.02 a	0.41±0.02 b	0.69±0.03 c	0.38±0.03 b
5	0.056±0.002 a	0.61±0.02 a	0.40±0.01 b	0.66±0.03 c	0.38±0.02 b
10	0.053±0.001 a	0.61±0.02 a	0.39±0.03 b	0.65±0.02 c	0.38±0.01 b
30	0.053±0.002 a	0.60±0.02 a	0.40±0.02 b	0.67±0.02 c	0.38±0.01 b
50	0.088±0.016 b	0.64±0.01 b	0.37±0.03 b	0.58±0.07 b	0.30±0.03 a
100	0.085±0.005 b	0.68±0.01 c	0.32±0.02 a	0.48±0.01 a	0.30±0.02 a

同栏数据标以不同字母的值差异达 0.05 的显著水平。

Values followed by different letters within the same column are significantly different at $P<0.05$.

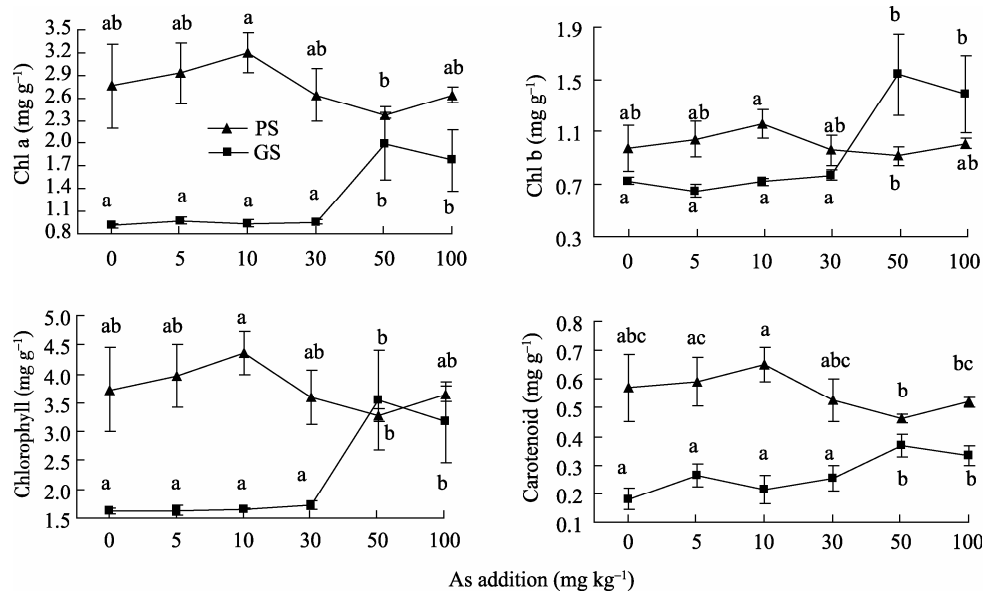


图 4 土壤加砷对大豆叶片色素含量的影响

Fig. 4 Effects of soil arsenic amounts on content of pigment in soybean leaf

PS: 结荚期; GS: 鼓粒期; 同一折线图的不同字母表示差异达到 0.05 的显著水平。

PS: podding stage; GS: grain filling stage. The different letters indicated the statistical significance for the effects of soil arsenic. Pigment with the same letter are not different at $P<0.05$.

增加了 120.4%和 96.1%，使叶绿素 b 增加了 112.2%和 91.5%，使类胡萝卜素增加了 104.4%和 83.7%，使总叶绿素增加了 117.8%和 94.5%。

结荚期各处理的叶绿素 a 和类胡萝卜素含量显著高于鼓粒期，两生育期叶绿素 b 和叶绿素总量的差异随土壤加砷量而变化，当土壤加砷小于 50 mg kg⁻¹ 时，结荚期显著高于鼓粒期，当土壤加砷为 50 mg kg⁻¹ 和 100 mg kg⁻¹ 时则是鼓粒期显著高于结荚期，而两生育期的叶绿素总量的差异不显著。从结荚期与鼓粒期叶绿素含量的比值可以更加明显看出土壤加砷量对两生育期叶绿素含量差异的影响。随土壤加砷量的增加，两生育期叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素总量和类胡萝卜素的比值变化分别为 1.2~3.0、0.6~1.7、0.9~2.7 和 1.2~3.4，加砷 50 mg kg⁻¹ 和 100 mg kg⁻¹ 的处理的比值显著低于对照和其他处理。

从叶绿素的构成即叶绿素 a 与叶绿素 b 的比值来看(图 5)，结荚期在 2.5~2.9 之间，加砷 50 mg kg⁻¹ 和 100 mg kg⁻¹

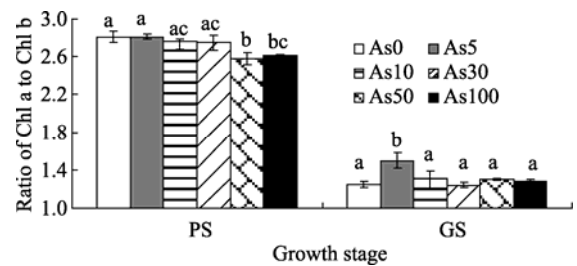


图 5 土壤加砷对大豆叶绿素构成的影响

Fig. 5 Effects of soil arsenic amounts on the chlorophyll constitution in soybean leaves

PS: 结荚期; GS: 鼓粒期; 柱形图上字母的不同表示柱间差异达到 0.05 的显著水平。

PS: podding stage; GS: grain filling stage. Band superscripted by different letters are significantly different at $P<0.05$.

处理显著低于对照和其余加砷处理。大豆鼓粒期各处理的叶绿素 a 与叶绿素 b 的比值在 1.2~1.6 之间，明显低于结荚期，且除加砷 5 mg kg⁻¹ 处理显著高于对照之外，其余

处理与对照之间均无显著差异。

3 讨论

3.1 土壤砷污染对大豆生长的影响

砷不是植物的必需营养元素, 但有关研究表明, 低浓度的砷对植物生长有促进作用, 而超过一定浓度就对植物有毒害作用。如土壤喷洒低浓度砷酸盐能促进药用植物黄芩(*Scutellaria baicalensis* Georgi)的生长和根系发育, 而高浓度的砷则降低其生物量^[12]; 用亚砷酸钠水培日本小松菜(*Brassica rapa* L. var. *pervirdis*)也证明低浓度的砷能促进生长, 高浓度砷则抑制生长^[13]。本试验表明, 土壤加砷 10 mg kg⁻¹ 时大豆株高就显著低于对照, 从长势来看, 土壤加砷量达到 50 mg kg⁻¹ 时, 大豆表现出毒害症状, 即叶色暗绿, 植株矮化, 叶片皱缩, 成熟延迟; 从生物量来看, 土壤加砷量达到 100 mg kg⁻¹ 时具有显著影响, 以籽粒减产率最高, 达 56%。本试验观察到砷对大豆的毒害症状与砷对水稻^[14]、小麦和油菜^[15]的毒害症状类似。当然, 砷对作物的毒性因其含量、价态、土壤的 pH 值、土壤类型和质地, 以及作物的种类、基因型的不同而不同^[7]。As³⁺的毒性比 As⁵⁺毒性更大^[16], 而砷的价态又与土壤环境有关。酸性以及还原土壤条件下以 As³⁺为主, 而碱性或强氧化土壤条件下以 As⁵⁺为主^[8,17]。本试验所用土壤为酸性土壤, 大豆在土壤加砷 50 mg kg⁻¹ 时才表现毒害症状, 说明大豆对土壤砷污染具有一定的耐受能力。本试验虽然没观察到低浓度砷对大豆的促进作用, 但是高浓度砷对大豆的毒害症状则十分明显。从生物量来看, 在本试验条件下, 大豆对土壤砷最大耐受浓度应该是小于或接近 50 mg kg⁻¹。

仅从生物量上不能看出砷是如何影响植物生长的, 我们通过不同部位生物量的比值与土壤加砷量的关系可发现砷对大豆生长影响的机理。高砷条件下, 根系生物量与地上部分生物量的比值、茎叶生物量与地上生物量的比值显著高于对照, 而且所有加砷量的根系生物量与对照无显著差异, 这说明高砷环境对根系的损伤相对较小, 对地上部分的损伤相对较大, 即高砷相对地抑制了地上部分的生长; 同时, 高砷条件下籽粒与其他部位以及总生物量的比值均显著低于对照, 且籽粒的减产率最高, 说明高砷对大豆籽粒的损害作用最大。由此可见, 砷通过影响大豆生物量的分配来影响植物生长。砷酸盐对豌豆(*Pisum sativum*)苗期的毒性试验也表明, 豌豆地上部分的生长比根系更容易受到砷的危害^[18], 水培日本小松菜(*Brassica rapa* L. var. *pervirdis*)也表明, 亚砷酸钠对根系的毒害要小于地上部分^[13]。总之, 改变生物量在不同部位之间的分配是大豆适应砷污染环境的一种机制。

3.2 土壤砷污染对大豆叶绿素含量与构成的影响

砷对植物叶绿素影响方面的研究还非常欠缺, 现有文献报道相互不一致。刘全吉等^[19]研究认为较低浓度砷

不影响叶绿素合成, 高砷浓度使叶绿素含量显著下降。土壤加砷栽培水稻(*Oryza sativa*)的试验表明, 水稻叶片叶绿素 a 和叶绿素 b 的含量均随着土壤砷浓度升高而显著降低, 但 5 个品种的叶绿素含量受砷影响的敏感性不同^[20]。土壤加砷栽培番茄(*Lycopersicon esculentum*)的试验表明, 土壤加砷 25 mg kg⁻¹ 叶绿素含量显著高于对照, 而加砷 50 mg kg⁻¹ 和 100 mg kg⁻¹ 的叶绿素含量则显著低于对照^[21]。水培玉米(*Zea mays*)试验表明, 加砷降低叶绿素和类胡萝卜素的含量, 也降低光合效率^[22]。本试验结果表明, 砷对大豆叶绿素含量和构成的影响随生长时期不同而变化, 结荚期土壤加砷量对叶绿素含量没有显著影响, 但是高砷水平下叶绿素 a 与叶绿素 b 的比值下降, 而在鼓粒期, 高砷水平却使叶绿素含量增加。本试验结果与上述结果不一致的原因除了植物类型、试验环境不同外, 上述文献都只是某个时期或者短时间的结果, 而我们的试验是从大豆的播种到收获的整个生长期。土壤加砷栽培豌豆 32 d 的结果显示, 砷处理使叶片叶绿素含量增加, 但是使叶绿素 a 与叶绿素 b 的比值降低^[18], 该结果与我们的结果基本一致。我们高砷水平使大豆成熟延迟的结果, 与鼓粒期高砷处理的叶绿素含量显著升高相符合。叶绿素的分解与植物衰老成熟有关, 用水稻试验研究表明, 叶绿素含量随叶片衰老逐渐下降, 而且叶绿素 a 比叶绿素 b 降解速度更快^[23], 植物叶片成熟与衰老的普遍表现就是由叶绿素的降解而引起的变黄^[24]。高等植物主要有叶绿素 a 和叶绿素 b 两种, 在颜色上, 叶绿素 a 呈蓝绿色, 叶绿素 b 呈黄绿色, 它们的含量之比约为 3 : 1^[25]。本试验表明, 所有处理鼓粒期的叶绿素 a 与叶绿素 b 的比值远远低于结荚期。结荚期叶绿素 a 与叶绿素 b 的比值在 2.5~2.9 之间, 比较接近 3, 而鼓粒期的比值只有 1.2~1.5, 远低于 3, 这也说明越靠近成熟期, 叶绿素 a 的含量越低, 叶绿素 b 的相对含量越高, 在成熟衰老过程中, 叶绿素 a 的降解速度比叶绿素 b 快。高砷处理降低了叶绿素 a 和叶绿素 b 的比值, 说明高砷抑制叶绿素 a 的形成或者加速叶绿素 a 的降解。本试验发现, 各处理的叶绿素 a 和类胡萝卜素都是结荚期高于鼓粒期, 而叶绿素 b 则不同, 在低砷量下, 是结荚期高于鼓粒期, 而在高砷水平下, 却是鼓粒期反比结荚期高, 这说明高砷一方面加速了叶绿素 a 的降解, 另一方面还促进了叶绿素 b 的形成, 也可能是促进叶绿素 a 向叶绿素 b 转化。从两生育期叶绿素含量的比值可以明显反映出砷对叶绿素的影响, 由于高砷条件下结荚期与鼓粒期叶绿素比值显著降低, 说明高砷水平阻碍了大豆生长后期叶绿素的降解, 使叶绿素的降解比对照和低砷水下慢, 从而延迟了植物的成熟, 而高砷水平的生物量、株高都显著低于对照, 表明高砷水平下, 虽然叶绿素含量处于较高水平, 但是植物的光合效率并不高。

总之, 土壤高砷对大豆具有毒害作用, 砷对地上部分生长的抑制作用大于根系, 高砷条件下不利于大豆籽粒的形成, 高砷延迟大豆成熟应该与高砷改变叶绿素的构

成和相对增加后期叶绿素含量相关。

References

- [1] Tripathi R D, Srivastava S, Mishra S, Singh N, Tuli F, Gupta D K, Maathuis F J M. Arsenic hazards: strategies for tolerance and remediation by plants. *Trends Biotechnol*, 2007, 25: 158–165
- [2] Mateos-Naranjo E, Andrades-Moreno L, Redondo-Gómez S. Tolerance to and accumulation of arsenic in the cordgrass *Spartina densiflora* Brongn. *Bioresource Technol*, 2012, 104: 187–194
- [3] Pillai A, Sunita G, Gupta V K. A new system for the spectrophotometric determination of arsenic in environmental and biological samples. *Anal Chimica Acta*, 2000, 408: 111–115
- [4] Mandal B K, Suzuki K T. Arsenic around the world: a review. *Talanta*, 2002, 58: 201–235
- [5] Brammer H, Ravenscroft P. Arsenic in groundwater: a threat to sustainable agriculture in South and Southeast Asia. *Environ Internatl*, 2009, 35: 647–654
- [6] Hu S-Y(胡省英), Ran W-Y(冉伟彦). Ecological effects of arsenic in soil environment. *Geophys Geochem Explorat* (物化与物探), 2006, 30(1): 83–91 (in Chinese with English abstract)
- [7] Chang S-M(常思敏), Ma X-M(马新明), Jiang Y-Y(蒋媛媛), He D-X(贺德先), Zhang G-L(张贵龙). Research progress on arsenic contamination in soils and arsenic toxicity in crops. *J Henan Agric Univ* (河南农业大学学报), 2005, 39(2): 161–167 (in Chinese with English abstract)
- [8] Garg N, Singla P. Arsenic toxicity in crop plants: physiological effects and tolerance mechanisms. *Environ Chem Lett*, 2011, 9: 303–321
- [9] Talano M A, Cejas R B, González P S, Agostini E. Arsenic effect on the crop symbiosis *Bradyrhizobium*-soybean. *Plant Physiol Biochem*, 2013, 63: 8–14
- [10] Zou Q(邹琦). Experimental Guidebook of Plant Physiology (植物生理实验指导书). Beijing: China Agriculture Press, 2000. pp 72–73 (in Chinese)
- [11] Lao J-C(劳家桢). Manual of Soil Agro-Chemical Analysis (土壤农化分析手册). Beijing: China Agriculture Press, 1988. pp 229–354 (in Chinese)
- [12] Cao H, Jiang Y, Chen J, Zhang H, Huang W, Li L, Zhang W. Arsenic accumulation in *Scutellaria baicalensis* Georgi and its effects on plant growth and pharmaceutical components. *J Hazardous Materials*, 2009, 171: 508–513
- [13] Shaibur M R, Kawai S. Effect of arsenic on visible symptom and arsenic concentration in hydroponic Japanese mustard spinach. *Environ Exp Bot*, 2009, 67: 65–70
- [14] Chen T-B(陈同斌), Liu G-L(刘更令). Effect of arsenic on rice (*Oryza sativa* L.) growth and development and its mechanism. *Sci Agric Sin* (中国农业科学), 1993, 26(6): 50–58 (in Chinese with English abstract)
- [15] Liu Q-J(刘全吉), Zheng C-M(郑床木), Tan Q-L(谭启玲), Sun X-C(孙学成), Hu C-X(胡承孝). Effects of high arsenic pollution in soil on growth of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) and rape (*Brassica napus*). *Acta Agric Zhejiangensis* (浙江农业学报), 2011, 23(5): 967–971 (in Chinese with English abstract)
- [16] Aposhian H V, Zakharyan R A, Avram M D, Sampayo-Reyes A, Wollemberg M L. A view of the enzymology of arsenic metabolism and a new potential role of hydrogen peroxide in the detoxication of the trivalent arsenic species. *Toxicol Appl Pharmacol*, 2004, 198: 327–335
- [17] Smith S E, Christophersen H M, Pope S, Smith F A. Arsenic uptake and toxicity in plants: integrating mycorrhizal influences. *Plant Soil*, 2010, 327: 1–21
- [18] Päivöke A E, Simola L K. Arsenate toxicity to *Pisum sativum*: mineral nutrients, chlorophyll content, and phytase activity. *Ecotoxicol Environ Safety*, 2011, 49: 111–121
- [19] Liu Q-J(刘全吉), Sun X-C(孙学成), Hu C-X(胡承孝), Tan Q-L(谭启玲). Growth and photosynthesis characteristics of wheat (*Triticum aestivum* L.) under arsenic stress condition. *Acta Ecol Sin* (生态学报), 2009, 29(2): 854–859 (in Chinese with English abstract)
- [20] Rahman M A, Hasegawa H, Rahman M M, Ialam M N, Miah M A M, Tasmen A. Effect of arsenic on photosynthesis, growth and yield of five widely cultivated rice (*Oryza sativa* L.) varies in Bangladesh. *Chemosphere*, 2007, 67: 1072–1079
- [21] Miteva E, Hristova D, Nenova V, Maneva S. Arsenic as a factor affecting virus infection in tomato plants: changes in plant growth, peroxidase activity and chloroplast pigments. *Sci Hort*, 2005, 105: 343–358
- [22] Stoeva N, Berova M, Zlatev Z. Physiological response of maize to arsenic contamination. *Biol Plant*, 2003, 47: 449–452
- [23] Xu Z-S(徐竹生), Liu D-H(刘道宏). Study of the senescence of rice leaves. *J Huazhong Agric Univ* (华中农业大学学报), 1986, 5(1): 33–39 (in Chinese with English abstract)
- [24] Li J R, Yu K, Wei J R, Ma Q, Wang B Q, Yu D. Gibberellin retards chlorophyll degradation during senescence of Paris polyphylla. *Biol Plant*, 2010, 54: 395–399
- [25] Guan J-Y(关锦毅), Hao Z-B(郝再彬), Zhang D(张达), Wang X-L(王秀丽). A review on the extraction, detection and biological function of chlorophyll. *J Northeast Agric Univ* (东北农业大学学报), 2009, 40(12): 130–134 (in Chinese with English abstract)