

土壤和叶面 Pb 污染对小麦生长及体内 Pb 分布和积累的影响

殷云龙^①, 李晓明, 华建峰, 徐建华

[江苏省·中国科学院植物研究所(南京中山植物园), 江苏 南京 210014]

摘要: 通过土壤添加 Pb 和叶面喷施 Pb 溶液的方式研究了 Pb 污染对小麦 (*Triticum aestivum* L.) 地上部分和籽粒干质量的影响, 并对 Pb 污染条件下小麦体内 Pb 的分布和积累规律以及 Pb 污染浓度与籽粒 Pb 含量的相关性、叶片 Pb 含量与籽粒 Pb 含量的相关性进行了分析。结果表明: 土壤中 Pb 添加量为 2 000 mg · kg⁻¹ 时, 小麦地上部分和籽粒的干质量分别较对照下降了 15.5% 和 13.3%, 差异显著 ($P < 0.05$); 叶面喷施 100 mg · L⁻¹ Pb 溶液, 小麦地上部分和籽粒干质量分别较对照下降了 10.3% 和 15.5%, 差异显著 ($P < 0.05$)。在土壤和叶面 Pb 污染条件下, 小麦各器官的 Pb 含量均随 Pb 污染浓度的提高而增大; 在土壤 Pb 污染条件下, 小麦根中的 Pb 含量远高于其他器官, 籽粒中的 Pb 含量最低; 在叶面 Pb 污染条件下, 小麦叶片中的 Pb 含量远高于其他器官, 籽粒和根中的 Pb 含量较低。回归分析结果表明, 小麦籽粒中的 Pb 含量与 Pb 污染浓度呈极显著正相关 ($P < 0.001$), 籽粒中的 Pb 含量与土壤 Pb 总含量和叶面 Pb 污染浓度的曲线方程分别为: $y = 0.269 + 0.00105x + 2.736 \times 10^{-7}x^2 - 1.707 \times 10^{-10}x^3$ 和 $y = 0.465 + 0.013x - 1.1 \times 10^{-5}x^2 + 3.96 \times 10^{-9}x^3$; 土壤中总的 Pb 毒性临界值为 209.3 mg · kg⁻¹, 叶面 Pb 的毒性临界值为 2.6 mg · L⁻¹; 在土壤和叶面 Pb 污染条件下, 小麦籽粒中的 Pb 含量与叶片 Pb 含量间呈极显著的正相关 ($P < 0.01$), 回归方程分别为: $y = 0.1201x + 0.076$ 和 $y = 0.0016x + 0.6011$, 据此, 在土壤和大气 Pb 污染条件下, 可通过测定小麦叶片的 Pb 含量预测小麦籽粒中的 Pb 含量。

关键词: Pb; 叶面污染; 土壤污染; 小麦; 分布; 毒性临界值

中图分类号: Q945.78; X171.5; S512.1 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2010)02-0028-06

Effects of Pb pollution of soil and leaf surface on growth, Pb distribution and accumulation of wheat (*Triticum aestivum*) YIN Yun-long^①, LI Xiao-ming, HUA Jian-feng, XU Jian-hua (Institute of Botany, Jiangsu Province and the Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210014, China), *J. Plant Resour. & Environ.* 2010, 19(2): 28-33

Abstract: Effect of Pb pollution on dry weights of above-ground part and grain of wheat (*Triticum aestivum* L.) was studied by adding Pb in soil or spraying Pb solution on leaf surface. Also, the distribution and accumulation rules of Pb in wheat, the correlation between Pb pollution concentration and Pb content in grain, and the correlation of Pb content between leaf and grain were analyzed. The results show that the dry weights of above-ground part and grain of wheat growing in soil added 2 000 mg · kg⁻¹ Pb decrease by 15.5% and 13.3% respectively, and those of wheat with sprayed 100 mg · L⁻¹ Pb on leaf surface decrease by 10.3% and 15.5% respectively, and all having significant difference compared with the control ($P < 0.05$). Under Pb pollution in soil or on leaf surface, Pb contents in different organs of wheat all increase with Pb concentration rising. Under Pb pollution in soil, Pb content in root is much higher than that in other organs, and that in grain is the lowest. Under Pb pollution on leaf surface, Pb content in leaf is much higher than that in other organs, and that in grain and root both are lower. The results of regression analysis reveal that there are extremely significantly positive correlations between Pb content in wheat grain and Pb pollution concentration ($P < 0.001$). And the regression equations of Pb

收稿日期: 2009-11-18

基金项目: 江苏省自然科学基金重点资助项目 (BK2006711-2)

作者简介: 殷云龙 (1964—), 男, 江苏丹阳人, 博士, 研究员, 主要从事植物景观与生态工程等方面的研究。

^①通信作者 E-mail: yinyun066@sina.com

content in wheat grain with Pb concentration in soil or on leaf surface are $y=0.269+0.00105x+2.736\times 10^{-7}x^2-1.707\times 10^{-10}x^3$ or $y=0.465+0.013x-1.1\times 10^{-5}x^2+3.96\times 10^{-9}x^3$, respectively. The toxicity critical value of Pb in soil is $209.3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ and that on leaf surface is $2.6\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. There is extremely significantly positive correlation of Pb content between grain and leaf of wheat ($P<0.01$) under Pb pollution in soil or on leaf surface, and regression equations are $y=0.1201x+0.076$ or $y=0.0016x+0.6011$, respectively. Thus, Pb content in wheat grain can be predicted by measuring Pb content in leaf under Pb pollution in soil or on leaf surface.

Key words: Pb; pollution on leaf surface; soil pollution; wheat (*Triticum aestivum* L.); distribution; toxicity critical value

近年来,公路两侧土壤和农作物的 Pb 污染问题一直备受人们的关注^[1-4]。汽车尾气中的 Pb 可以通过沉降于土壤和经由大气沉降于植物表面这 2 种途径被植物吸收^[5],关于这 2 种污染途径对植物可食部分 Pb 含量的影响程度,不同研究者的看法存在较大分歧。李湘洲^[6]对公路边农作物中 Pb 含量进行了研究,认为大气中的 Pb 对小麦(*Triticum aestivum* L.)籽粒 Pb 含量的影响较明显;郑路等^[7]测定了生长在污染空气中的蔬菜 Pb 含量,认为 50% 以上的 Pb 是叶片从大气中吸收的;还有部分研究者认为,农作物从大气中吸收 Pb 只是次要途径,主要途径还是通过根系吸收土壤中的 Pb,且不同作物表现各异^[7-9]。

Pb 的毒性临界值是制定食品 Pb 安全标准的重要依据,关于土壤中 Pb 污染毒性临界值的研究较多,但关于大气中 Pb 污染对食品安全影响的研究还较少。作者通过模拟土壤和叶面 Pb 污染的方法,探讨了土壤和大气 Pb 污染条件下,小麦各器官中 Pb 的积累和转移规律,为公路两侧土壤和大气 Pb 污染对农作物的影响评价提供参考依据。

1 材料和方法

1.1 材料

供试土壤于 2007 年 10 月取自江苏省·中国科学院植物研究所(南京中山植物园)实验苗圃,为地表 40 cm 以内的黄棕壤土, pH 7.6; 土壤中的全氮含量为 $1.85\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、全磷含量为 $0.55\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、全钾含量为 $0.657\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、Pb 含量为 $44.25\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[10]。土壤去除明显杂质后,风干、混匀,过 $1\text{ cm}\times 1\text{ cm}$ 筛,备用。

供试小麦品种为‘杨麦 158 号’,购自江苏明天种业科技有限公司。实验在江苏省·中国科学院植物研究所内的通风玻璃房中进行。

1.2 方法

1.2.1 Pb 污染处理方法 本研究设置了土壤和叶面 Pb 污染 2 组盆栽实验。土壤 Pb 污染处理共设 8 个处理组, Pb 添加量分别为 0(对照)、10、50、100、300、500、1 000 和 2 000 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 根据土壤干质量计算 Pb 的添加量并换算成 $\text{Pb}(\text{OAc})_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 的添加量。将 10 kg 土壤、适量的 $\text{Pb}(\text{OAc})_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 以及 20 g 佳馥牌复合肥(江苏常州中东化肥有限公司生产)混匀装入塑料桶(直径 29.5 cm、高 25 cm)中,每个处理 8 桶(即 8 次重复)。分别注水至土壤水饱和,放置 2 周后,每桶直播 50 粒小麦种子,待苗高 5~6 cm 后定苗,每桶定植 30 株,整个生育期通过称重法严格控制土壤含水量。

叶面 Pb 污染处理共设 7 个处理组, Pb 溶液的质量浓度分别为 0(对照)、10、50、100、500、1 000 和 2 000 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 将 10 kg 土壤和 20 g 佳馥牌复合肥混匀后装入塑料桶中,每个处理 4 桶(即 4 次重复)。分别注水至土壤水饱和,放置 2 周后,每桶直播 50 粒小麦种子,至苗高 5~6 cm 后定苗,每桶定植 30 株,整个生育期通过称重法严格控制土壤含水量。在小麦抽穗前每 5 天于上午 9 时对叶面喷施 1 次 Pb 溶液,每次 200 mL,连续喷施 9 次。为了避免喷施 Pb 溶液时造成土壤 Pb 污染,喷施时将桶体侧放,两面均匀高度雾化喷施,待叶子上的溶液基本干时再将桶体扶正。

1.2.2 样品采集和 Pb 含量测定方法 土壤样品以四分法取样,风干、碾磨并过 100 目筛,经 HCl-KClO_4 (体积比为 4:1)混合消化后,采用 TAS990 石墨炉原子吸收分光光度计(北京普析通用仪器有限责任公司生产)测定 Pb 含量。同时,选用中国地质科学院地球物理化学勘探研究所的土壤标准样品(GBW07406)控制分析的准确性。

在收获期一次性采集小麦样品。为了控制植物

样品的分析数量,土壤 Pb 污染组选择 0、300 和 2 000 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 3 个处理组,叶面 Pb 污染组选择 0、100 和 2 000 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 3 个处理组,采集小麦根、茎、叶和籽粒,用于小麦体内 Pb 积累和转移的研究;其他处理组则只采集小麦的叶片和籽粒,用于叶片和籽粒中 Pb 含量的相关性分析。

各部分样品依次用表面活性剂清洗 10 s,自来水冲洗 3 遍,再用去离子水冲洗 3 遍,于 100 $^{\circ}\text{C}$ 杀青 10 min 后,80 $^{\circ}\text{C}$ 烘干 48 h,称取干质量后,粉碎、备用。植物样品经 HCl-KClO_4 (体积比 4:1) 混合消化后,用 TAS990 石墨炉原子吸收分光光度计测定小麦各部位的 Pb 含量,并选用中国地质科学院地球物理化学勘探研究所的植物标准样品 (GBW07603) 控制分析的准确性。

1.3 数据处理

采用 SPSS 13.0 软件进行相关性与差异显著性分析,采用 Duncan 多重比较方法分析各处理间的差异显著性 ($P < 0.05$)。

表 1 土壤和叶面 Pb 污染对小麦地上部分及籽粒干质量的影响¹⁾

Table 1 Effects of Pb pollution in soil or on leaf surface on dry weights of above-ground part and grain of wheat (*Triticum aestivum* L.)¹⁾

土壤中 Pb 添加量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Pb addition amount in soil	干质量/g Dry weight		叶面 Pb 质量浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb concentration on leaf surface	干质量/g Dry weight	
	地上部分 Above-ground part	籽粒 Grain		地上部分 Above-ground part	籽粒 Grain
0 (CK)	229.6±15.4bc	47.2±3.6ab	0 (CK)	233.5±1.4a	46.4±3.1a
10	244.3±13.4a	49.4±2.4a	10	223.0±11.6ab	44.2±4.9ab
50	233.8±15.7ab	47.3±3.7ab	50	220.0±10.6ab	43.0±4.5ab
100	218.0±1.9d	48.4±2.5a	100	209.5±27.3b	39.2±4.6b
300	225.5±9.6bcd	50.2±3.4a	500	231.8±15.8ab	44.6±5.9ab
500	230.1±14.4bc	43.3±3.7bc	1 000	218.0±12.4ab	48.8±1.8a
1 000	218.8±14.9cd	42.6±8.1bc	2 000	222.8±2.9ab	49.6±1.1a
2 000	194.0±8.7e	40.9±4.9c			

¹⁾ 同列中不同的小写字母分别表示在 $P=0.05$ 水平上差异显著 (Duncan 法) Different small letters in same column indicate the significant difference at $P=0.05$ level by Duncan method.

($P < 0.05$)。土壤中 Pb 的添加量为 2 000 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,小麦籽粒的干质量显著低于对照 ($P < 0.05$),减产达到 13.3%;其他处理组的小麦籽粒干质量均与对照差异不显著。

由表 1 还可以看出,在叶面喷施 100 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb 溶液,小麦地上部分以及籽粒的干质量均显著低于对照 ($P < 0.05$),分别较对照降低了 10.3% 和 15.5%;其他处理组小麦地上部分以及籽粒的干质量与对照没有显著差异。

2 结果和分析

2.1 Pb 污染对小麦地上部分和籽粒干质量的影响

进入植物体内后,Pb 可以改变细胞膜透性,从而对叶绿体、线粒体和细胞核等亚显微结构均有一定程度的破坏作用^[11-12]。Pb 能够竞争性地取代某些酶活性中心的金属元素从而影响这些酶的正常活性,引起植物光合作用、呼吸作用、氮素代谢及核酸代谢等一系列生理生化过程的紊乱^[13]。Pb 还可以通过拮抗作用使植物体内元素水平失调,造成营养胁迫,间接影响植物的生长发育^[14]。

土壤和叶面 Pb 污染对小麦地上部分以及籽粒干质量的影响见表 1。由表 1 可见,土壤中 Pb 的添加量达到 10 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,小麦地上部分的干质量较对照显著增加 ($P < 0.05$),增幅达 6.4%;而土壤中 Pb 的添加量为 100 和 2 000 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,小麦地上部分的干质量比对照分别减少 5.1% 和 15.5%,差异显著

2.2 Pb 污染对小麦植株各器官 Pb 含量的影响

经过根或叶面的吸收后,Pb 进入植株体内并在植株体内积累。在土壤或叶面 Pb 污染条件下小麦植株各器官的 Pb 含量分别见表 2 和表 3。

表 2 的数据显示,与对照相比,在土壤 Pb 污染条件下,随土壤中 Pb 添加量的提高小麦各器官的 Pb 含量均显著提高 ($P < 0.05$),300 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Pb 处理组及对照组小麦各器官中 Pb 含量从高至低依次为根、茎、叶、籽粒,2 000 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Pb 处理组小麦各器官中 Pb

含量由高至低依次为根、叶、茎、籽粒,且不同处理组及对照组间的含量差异不同。对照组小麦籽粒中的 Pb 含量仅为根中 Pb 含量的 3.69%; 300 mg · kg⁻¹ Pb 处理组小麦根中的 Pb 含量远远高于其他器官,其中籽粒中的 Pb 含量为根中 Pb 含量的 0.18%; 2 000 mg · kg⁻¹ Pb 处理组小麦根中的 Pb 含量也远高于其他器官,其中籽粒 Pb 含量仅为根中 Pb 含量的 0.13%。在土壤 Pb 污染条件下,小麦地上部分各器官的 Pb 含量远低于地下部分,说明根系从土壤中吸收的 Pb 大部分都积累在根系中,少部分转移至其他器官,显示出一定的就近积累效应。

表 3 数据显示,与对照相比,当叶面分别喷施 100 和 2 000 mg · L⁻¹ Pb 溶液时,小麦茎、叶和籽粒中的 Pb 含量均显著增加($P < 0.05$),但根中的 Pb 含量并没

有显著差异。对照组小麦各器官中的 Pb 含量从高至低依次为根、茎、叶、籽粒;在 100 mg · L⁻¹ Pb 处理组中,小麦各器官的 Pb 含量从高至低依次为叶、茎、根、籽粒,且叶片中的 Pb 含量远高于其他器官,籽粒中的 Pb 含量仅为叶片 Pb 含量的 0.41%;在 2 000 mg · L⁻¹ Pb 处理组中,小麦各器官的 Pb 含量从高至低依次为叶、茎、籽粒、根,且叶片中的 Pb 含量远高于其他器官,籽粒中的 Pb 含量仅为叶片 Pb 含量的 0.19%。结果显示,在叶面 Pb 污染条件下,小麦根中 Pb 含量受叶面 Pb 污染的影响小于其他器官,且小麦叶片中的 Pb 含量远高于其他器官,说明叶片吸收的 Pb 大部分积累在叶片中,仅有少部分转移至地上部分的其他器官,转移至根系中的 Pb 更少,也同样显示出就近积累效应。

表 2 土壤 Pb 污染条件下小麦植株各器官 Pb 含量的比较¹⁾

Table 2 Comparison of Pb content in different organs of wheat (*Triticum aestivum* L.) under Pb pollution in soil¹⁾

Pb 添加量/mg · kg ⁻¹ Pb addition amount	不同器官 Pb 含量/μg · g ⁻¹ Pb content in different organs			
	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	籽粒 Grain
0 (CK)	6.77±0.90a	3.76±0.64a	2.05±0.39a	0.25±0.01a
300	316.14±115.42b	5.25±0.81b	4.54±0.97b	0.56±0.04b
2 000	1 632.03±923.09c	12.12±0.89c	16.29±1.99c	2.11±0.23c

¹⁾ 同列中不同的小写字母分别表示在 $P=0.05$ 水平上差异显著 (Duncan 法) Different small letters in same column indicate the significant difference at $P=0.05$ level by Duncan method.

表 3 叶面 Pb 污染条件下小麦植株各器官 Pb 含量的比较¹⁾

Table 3 Comparison of Pb content in different organs of wheat (*Triticum aestivum* L.) under Pb pollution on leaf surface¹⁾

Pb 质量浓度/mg · L ⁻¹ Pb concentration	不同器官 Pb 含量/μg · g ⁻¹ Pb content in different organs			
	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	籽粒 Grain
0 (CK)	7.02±1.19a	3.97±0.63a	2.05±0.41a	0.24±0.04a
100	7.07±2.01ab	7.08±0.92b	501.26±118.93b	2.06±1.34b
2 000	9.70±1.63b	100.71±23.07c	8 046.81±1 057.17c	15.40±1.40c

¹⁾ 同列中不同的小写字母分别表示在 $P=0.05$ 水平上差异显著 (Duncan 法) Different small letters in same column indicate the significant difference at $P=0.05$ level by Duncan method.

2.3 Pb 污染浓度与小麦籽粒中 Pb 含量的相关性和 Pb 毒性临界值分析

小麦籽粒中 Pb 含量与 Pb 污染浓度之间的相关性分析结果显示,小麦籽粒中的 Pb 含量与 Pb 污染浓度呈极显著正相关($P < 0.001$)。为了精确估测土壤和叶面 Pb 污染对小麦籽粒中 Pb 含量的影响,采用三次曲线方程对 Pb 污染浓度与籽粒中的 Pb 含量进行拟合,各方程的 R^2 都达到了极显著水平($P < 0.001$)。

在土壤 Pb 污染条件下,小麦籽粒中的 Pb 含量与

Pb 添加量间的曲线方程为: $y = 2.108 + 0.06x + 8.27 \times 10^{-6}x^2 - 3.9 \times 10^{-9}x^3$, $R^2 = 0.987$ ($P < 0.001$); 籽粒中的 Pb 含量与土壤中总 Pb 含量的曲线方程为: $y = 0.269 + 0.00105x + 2.736 \times 10^{-7}x^2 - 1.707 \times 10^{-10}x^3$, $R^2 = 0.987$ ($P < 0.001$)。在叶面 Pb 污染条件下,小麦籽粒中的 Pb 含量与 Pb 污染浓度间的曲线方程为: $y = 0.465 + 0.013x - 1.1 \times 10^{-5}x^2 + 3.96 \times 10^{-9}x^3$, $R^2 = 0.999$ ($P < 0.001$)。根据曲线方程计算得出,在土壤本底 Pb 含量为 44.25 mg · kg⁻¹ 的情况下,以小麦籽粒中 Pb 毒

性临界值 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (GB 14935—94) 为标准, 向土壤中添加的 Pb 毒性临界值为 $165 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 土壤中总的 Pb 毒性临界值为 $209.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 叶面喷施的 Pb 溶液毒性临界值为 $2.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

2.4 Pb 污染条件下小麦叶片与籽粒中 Pb 含量的相关性分析

在 Pb 污染条件下, 小麦叶片与籽粒中 Pb 含量的相关性分析结果见图 1。由图 1 可见, 小麦叶片和籽粒中的 Pb 含量有显著的正相关关系。在土壤 Pb 污

染条件下, 小麦籽粒 Pb 含量 (y) 与叶片 Pb 含量 (x) 间的相关方程为: $y=0.1201x+0.076$, $R^2=0.9816$ ($P<0.001$); 在叶面 Pb 污染条件下, 小麦籽粒中的 Pb 含量 (y) 与叶片 Pb 含量 (x) 间的相关方程为: $y=0.0016x+0.6011$, $R^2=0.9036$ ($P<0.01$)。由于植物叶片中污染物的含量常被用于指示大气环境中重金属的污染状况, 因此, 通过以上方程式可根据小麦叶片中的 Pb 含量对籽粒中的 Pb 含量进行预测。

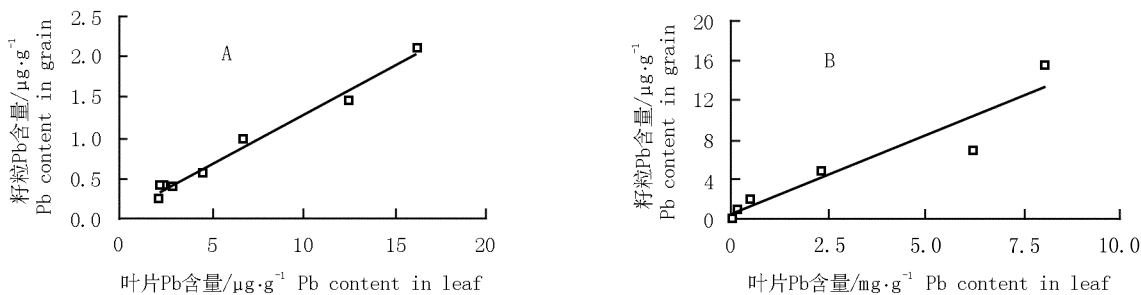


图 1 土壤 (A) 和叶面 (B) Pb 污染条件下小麦叶片与籽粒中 Pb 含量的相关性
Fig. 1 Correlations between Pb content in leaf and grain of wheat (*Triticum aestivum* L.) under Pb pollution in soil (A) or on leaf surface (B)

3 讨 论

通过监测公路两侧土壤以及农作物中的 Pb 含量, Nabulo 等^[15]认为, Pb 污染的主要途径为大气沉降。Dollard^[16]研究了萝卜 (*Raphanus sativus* L.) 叶片对 Pb 的吸收以及 Pb 在萝卜中的分布情况, 发现叶片吸收的 Pb 占根系 Pb 吸收总量的 35%。本实验结果表明, 在叶面 Pb 污染条件下, 随 Pb 污染浓度的提高, 小麦茎、叶和籽粒中的 Pb 含量均显著增加, 其中籽粒中的 Pb 含量均显著高于其毒性临界值 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (GB 14935—94)。可见, Pb 能够穿透小麦叶片表面的蜡质层, 并通过维管束系统进行传输^[16]。Nasralla 等^[17]认为, 植物果实中 Pb 含量的多少主要取决于叶片中的 Pb 含量而不是根系或土壤中的 Pb 含量; Dalenberg 等^[18]甚至发现小麦籽粒中的 Pb 全部来源于大气沉降。在本研究中, 土壤 Pb 污染条件下, 小麦籽粒 Pb 含量与根部 (被污染部位) Pb 含量的百分比均小于叶面 Pb 污染条件下籽粒 Pb 含量与叶片 (被污染部位) Pb 含量的百分比, 据此推测小麦叶片中的 Pb

可能更容易向籽粒中转移, 即小麦叶面 Pb 污染对粮食安全的危害性可能更大。另外, 本实验中叶面 Pb 处理为间歇性处理, 而土壤 Pb 处理则贯穿整个生育期, 可以预见, 如果在整个生育期叶面连续遭受 Pb 污染, 其危害性可能更大。这一推断与 Salim 等^[19]以萝卜为实验对象得出的研究结论基本一致。

土壤和叶面 Pb 污染条件下, 小麦籽粒中的 Pb 含量与 Pb 污染浓度有极显著的正相关关系, 这与 Whatmuff^[20]和 McBride^[21]的实验结果相似。同样, 小麦叶片 Pb 含量与籽粒 Pb 含量间也有显著的正相关关系, 类似的结果在水稻 (*Oryza sativa* L.) 中也得到了验证^[22]。由此可见, 通过叶片 Pb 含量来检测土壤和大气 Pb 污染状况及其向植物可食部分的转移状况是可行的^[22-23]。

关于土壤 Pb 对农作物的毒性临界值的研究已有很多报道, 但大多集中在水稻^[22, 24-25]上。宋玉芝^[24]以水稻品种“两优培九”为实验材料进行土壤 Pb 污染条件下水稻体内 Pb 毒性研究, 并建立了曲线方程, 得出土壤 Pb 对水稻的毒性临界值为 $211.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 李晓明等^[22]估测了土壤和叶面 Pb 污染对水稻籽粒

Pb含量的影响,结果显示,向土壤中施加Pb的毒性临界值为 $77.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,土壤Pb总的毒性临界值为 $95.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,向水稻叶面施加Pb溶液的毒性临界值为 $46.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。本实验中,小麦土壤Pb总的毒性临界值为 $209.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,与陈怀满等^[10]通过在黄棕壤中添加 $\text{Pb}(\text{OAc})_2$ 获得的小麦Pb毒性临界值($206 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)十分接近,均明显低于国家土壤环境质量标准值 $350 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (GB 15618—1995)。据此,笔者认为,在黄棕壤中小麦Pb的限量标准值需进行进一步的研究和修订。

参考文献:

- [1] Yin Y L, Zhang T L, Luo Y M, et al. Spatial and diurnal variations in concentration of atmospheric NO_x along urban-rural roadways in Nanjing, Southeastern China [J]. *International Journal of Environment and Pollution*, 2008, 32(3): 332–340.
- [2] 殷云龙, 骆永明, 张桃林, 等. 南京市城乡公路蜀桧叶片中金属元素和氮、硫含量分析[J]. *应用生态学报*, 2005, 16(5): 929–932.
- [3] 殷云龙, 宋静, 骆永明, 等. 南京市城乡公路绿地土壤重金属变化及其评价[J]. *土壤学报*, 2005, 42(2): 206–210.
- [4] 杨奕如, 殷云龙, 於朝广, 等. 205国道两侧农田土壤和水稻叶片及糙米中重金属含量的空间分布特征[J]. *植物资源与环境学报*, 2009, 18(2): 73–79.
- [5] 索有瑞, 黄雅丽. 西宁地区公路两侧土壤和植物中铅含量及其评价[J]. *环境科学*, 1996, 17(2): 74–76.
- [6] 李湘洲. 公路系统沿线作物铅累积状况的研究[J]. *中南林学院学报*, 2002, 22(1): 40–42.
- [7] 郑路, 常江. 合肥市菜园蔬菜和土壤的铅污染调查[J]. *环境污染与防治*, 1989, 11(5): 33–37.
- [8] 刘玉萃, 李保华, 吴明作. 大气-土壤-小麦生态系统中铅的分布和迁移规律研究[J]. *生态学报*, 1997, 17(4): 418–425.
- [9] 石元值, 马立峰, 韩文炎, 等. 汽车尾气对茶园土壤和茶叶中铅、铜、镉元素含量的影响[J]. *茶叶*, 2001, 27(4): 21–24.
- [10] 陈怀满, 陈能场, 陈英旭, 等. 土壤-植物系统中的重金属污染[M]. 北京: 科学出版社, 1996: 210–250.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 杨丹慧. 重金属离子对高等植物光合膜结构与功能的影响[J]. *植物学通报*, 1991, 8(3): 26–29.
- [14] Van Assche F, Clijsters H. Effects of metals on enzyme activity in plants [J]. *Plant, Cell and Environment*, 1990, 13(3): 195–206.
- [15] Nabulo G, Oryem-Origa H, Diamond M. Assessment of lead, cadmium, and zinc contamination of roadside soils, surface films, and vegetables in Kampala City, Uganda [J]. *Environmental Research*, 2006, 101(1): 42–52.
- [16] Dollard G J. Glasshouse experiments on the uptake of foliar applied lead [J]. *Environmental Pollution Series A, Ecological and Biological*, 1986, 40(2): 109–119.
- [17] Nasralla M M, Ali E A. Lead accumulation in edible portions of crops grown near Egyptian traffic roads [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 1985, 13(1): 73–82.
- [18] Dalenberg J W, Van Driel W. Contribution of atmospheric deposition to heavy metal concentrations in field crops [J]. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 1990, 38: 369–379.
- [19] Salim R, Al-Subu M M, Atallah A. Effects of root and foliar treatments with lead, cadmium, and copper on the uptake distribution and growth of radish plants [J]. *Environment International*, 1993, 19(4): 393–404.
- [20] Whatmuff M S. Applying biosolids to acid soils in New South Wales: are guideline soil metal limits from other countries appropriate? [J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2002, 40(6): 1041–1056.
- [21] McBride M B. Toxic metals in sewage sludge-amended soils: has promotion of beneficial use discounted the risks? [J]. *Advances in Environmental Research*, 2003, 8(1): 5–19.
- [22] 李晓明, 殷云龙, 黄玉洁, 等. 土壤和叶面铅污染对铅在水稻体内的分布和积累的影响[J]. *土壤*, 2009, 41(4): 556–561.
- [23] Alfani A, Baldantoni D, Maisto G, et al. Temporal and spatial variation in C, N, S, and trace element contents in the leaves of *Quercus ilex* within the urban area of Naples [J]. *Environmental Pollution*, 2000, 109(1): 119–129.
- [24] 宋玉芝. 土壤铅污染对水稻生长影响的研究[J]. *南京气象学院学报*, 2005, 28(4): 536–542.
- [25] 康立娟, 赵成爱, 李呐. 铅在砂壤水稻土/水稻体系中污染效应及累积规律的研究[J]. *吉林农业大学学报*, 2000, 22(2): 68–70.