

# 不同基因型小麦的 Pb 积累特性及 Pb 对矿质元素积累的影响

胡铁柱,李小军,丁卫华,张自阳,董娜,李淦,孙海燕,游晴晴,茹振钢  
(河南科技学院 小麦中心/河南省现代生物育种协同创新中心,河南 新乡 453003)

**摘要:** 利用 Hoagland's 营养液培养的方法,探讨了百农 1306、百农 1309、百农 160、百农 418、温麦 6 号、周麦 18、周麦 22 和周麦 26 等 8 个不同基因型小麦品种(系)的 Pb 积累特性,以筛选出籽粒 Pb 低积累型小麦品种(系),并研究了 Pb 对小麦 Ca、Mg、Fe 和 K 等矿质元素积累的影响,为解决重金属积累和矿质营养利用之间的矛盾奠定基础。结果表明,小麦籽粒 Pb 含量存在基因型差异,百农 418 籽粒 Pb 含量最低,温麦 6 号 Pb 含量最高。根据同一品种(系)的最高 Pb 含量部位,将 8 个小麦品种(系)分为籽粒型、颖壳型、叶片型,对应品种(系)分别为温麦 6 号,百农 1306、百农 1309、周麦 22,百农 160、百农 418、周麦 18、周麦 26。与不加 Pb(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 的对照相比,Pb(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 处理后,8 个小麦品种(系)不同部位的 Ca、K、Mg、Fe 含量变化不同。除周麦 22 茎秆中 Ca 含量显著增加外,其他 7 个品种(系)均降低;8 个品种(系)茎秆(周麦 22、26 除外)、叶片和颖壳中 K 含量均呈降低趋势;温麦 6 号和周麦 18 籽粒中 Mg 含量显著增加,其他 6 个品种(系)均显著降低;8 个品种(系)叶片中 Fe 含量均升高。百农 418 和周麦 26 的 Ca、百农 1306 和百农 418 的 K、周麦 18 和周麦 26 的 Mg 含量(籽粒除外)变化模式相同。

**关键词:** 小麦;基因型;Pb;矿质元素;积累

**中图分类号:** S512.1      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1004-3268(2017)05-0015-06

## Pb Accumulation Characteristics of Different Genotypes of Wheat and Effect of Pb on Mineral Elements Accumulation

HU Tiezhu, LI Xiaojun, DING Weihua, ZHANG Ziyang, DONG Na, LI Gan,  
SUN Haiyan, YOU Qingqing, RU Zhengang  
(Wheat Center, Henan Institute of Science and Technology/Henan Modern Biological  
Breeding Collaborative Innovation Center, Xinxiang 453003, China)

**Abstract:** In order to select grain low Pb accumulating genotypes, Bainong 1306, Bainong 1309, Bainong 160, Bainong 418, Wenmai No. 6, Zhoumai 18, Zhoumai 22 and Zhoumai 26 were grown in Hoagland's nutrient solution with Pb(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, the Pb accumulation characters were studied, and the effects of Pb on accumulation of Ca, Mg, Fe and K were explored, so as to provide basis for solving the contradiction between accumulation of heavy metal and utilization of mineral elements. The results showed that there was genotypic difference in Pb content in wheat grain. Bainong 418 and Wenmai No. 6 showed the lowest and the highest grain Pb content respectively. According to the organ with the highest Pb content, eight wheat cultivars(lines) were divided into three types, grain type, glume type, leaf type, the corresponding cultivars(lines) were Wenmai No. 6; Bainong 1306, Bainong 1309, Zhoumai 22; Bainong 160, Bainong 418, Zhoumai 18 and Zhoumai 26. Compared with the control without Pb, the change of Ca, K, Mg and Fe contents in different organs of eight cultivars(lines) had difference under Pb treatment. Cultivated in

Hoagland's nutrient solution with  $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ , the Ca concentration increased considerably in the culm of Zhoumai 22, but decreased considerably in the other seven cultivars (lines); the K concentration in glume, leaf and culm (except Zhoumai 22 and Zhoumai 26) of eight cultivars (lines) decreased; the Mg concentration increased considerably in the grain of Wenmai No. 6 and Zhoumai 18, but decreased considerably in other six cultivars (lines); the Fe concentration in the leaves of eight cultivars (lines) increased; the Ca content in Bainong 418 and Zhoumai 26, K content in Bainong 1306 and Bainong 418, Mg content in all tissues (except grain) of Zhoumai 18 and Zhoumai 26 had the same change patterns.

**Key words:** wheat; genotype; Pb; mineral element; accumulation

重金属是农业环境和农产品的重要污染物质。随着工业化和现代农业的快速发展,我国重金属污染事件频繁发生,受重金属污染的耕地面积超过 2 000 万  $\text{hm}^2$ , 每年因此造成的粮食减产达 1 000 万 t, 重金属污染的粮食达 1 200 万 t, 合计农业损失至少在 200 亿元以上<sup>[1]</sup>。土壤中的重金属分为植物必需的微量元素 (Cu、Zn 等) 和非必需元素 (Pb、Cd 和 Hg 等), 其中 Pb 是土壤的重要污染源。土壤中的 Pb 主要来源于采矿和冶炼工业以及含 Pb 涂料、纸张、汽油、炸药等的生产和使用, 城市污水、淤泥中也含有大量的 Pb。因此, 不能自主移动的植物不可避免地会受到 Pb 污染的毒害, 继而通过食物链危及人类的身体健康<sup>[2-7]</sup>。小麦 (*Triticum aestivum*) 是我国重要的粮食作物, 研究其对 Pb 的吸收、转运以及累积特性对于降低食用风险有重要意义。以往关于 Pb 对小麦影响的研究多集中于生物学性状以及抗氧化酶活性等生理效应方面<sup>[8-10]</sup>, 对 Pb 吸收能力的品种差异研究较少<sup>[11-12]</sup>, 而且关于 Pb 对小麦中必需矿质元素积累的影响研究未见报道。鉴于此, 以 8 个不同基因型小麦品种 (系) 为材料, 分析其 Pb 积累、分配特征及 Pb 对 Ca、Mg、Fe 和 K 等矿质元素积累的影响, 以期更深入地了解小麦对 Pb 和必需矿质元素的吸收、分配规律, 解决重金属积累和矿质营养利用之间的矛盾, 降低重金属对作物产量和质量的影响, 并为籽粒 Pb 低积累型小麦新品种的选育和应用奠定基础。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验材料

供试材料为温麦 6 号、百农 160、周麦 26、周麦 22、百农 418、周麦 18、百农 1306 和百农 1309 等 8 个不同基因型的小麦品种 (系), 均由河南科技学院小麦中心提供。

### 1.2 试验设计

将从河南科技学院辉县试验基地挑选的四叶一心、长势一致且通过春化作用的 8 个品种 (系) 的小麦苗做 2 种处理: 一种是直接在 Hoagland's 营养

液<sup>[13]</sup>中培养 (CK), 另一种是在添加  $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$  的 Hoagland's 营养液中培养,  $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$  的终质量浓度为 140 mg/L。每处理 24 株。前期每 2 周更换一次营养液, 6 周后根据营养液的损耗情况酌情补充, 直至成熟。

### 1.3 元素含量测定

成熟期, 采集小麦茎秆 (地上部 1~3 节)、叶片 (旗叶和倒二叶)、颖壳和籽粒, 置于烘干箱中 70 °C 烘干至恒质量, 用千分之一电子天平称量 0.500 g 干燥样品, 置于含有 12 mL 混合液 (硝酸: 高氯酸 = 3:1) 的四氟坩埚中硝解 12 h。然后在通风橱中置于电热板 (约 170 °C) 上赶酸, 冷却后用 3% 的硝酸定容至 25 mL, 摇匀待用。用美国 PE 公司 Optima 2100DV 电感耦合等离子体发射光谱仪测定 Pb、Ca、Fe、K 和 Mg 含量。

### 1.4 数据分析

试验数据用 Excel 2010 和 SAS 8.01 进行处理和分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同基因型小麦的 Pb 积累及分配特征

由图 1 可知, 不同基因型小麦相同部位的 Pb 积累差异较大。根据籽粒 Pb 含量, 8 个小麦品种 (系) 可以分为 5 类: 温麦 6 号 Pb 含量最高, 达 44.6  $\mu\text{g/g}$ ; 其次是周麦 26, Pb 含量为 11.1  $\mu\text{g/g}$ ; 周麦 18、百农 1309 和周麦 22 属同一类型, Pb 含量介于 7.2 ~ 8.1  $\mu\text{g/g}$ ; 百农 1306 和百农 160 属同一类型, Pb 含量分别为 5.2  $\mu\text{g/g}$  和 3.8  $\mu\text{g/g}$ ; 百农 418 籽粒 Pb 含量最低, 为 2.1  $\mu\text{g/g}$ 。颖壳中 Pb 含量为 16.5 ~ 39.9  $\mu\text{g/g}$ , 8 个小麦品种 (系) Pb 含量从低到高依次为温麦 6 号、百农 418、百农 160、百农 1309、周麦 18、百农 1306、周麦 26、周麦 22。叶片 Pb 含量变异幅度较大 (10.1 ~ 109.3  $\mu\text{g/g}$ ), 其中含量最高的为周麦 26 (109.3  $\mu\text{g/g}$ ), 其次为百农 160 (72.9  $\mu\text{g/g}$ )、周麦 18 (41.7  $\mu\text{g/g}$ ), 百农 1306、百农 1309、百农 418、温麦 6 号和周麦 22 等 5 个品种 (系) 含量较低且差异较小。茎秆 Pb 含量为 8.0 ~ 15.8  $\mu\text{g/g}$ , 其中百农 1309、温麦 6 号和周麦 22

含量较低, 百农 160 和周麦 26 含量较高, 百农 1306、百农 418 和周麦 18 含量居中。

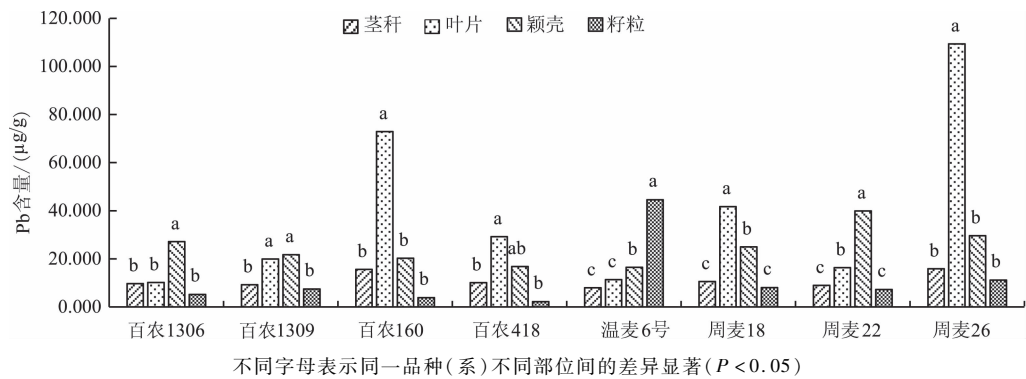


图 1 不同基因型小麦各部位 Pb 含量情况

根据同一品种(系)的最高 Pb 含量部位, 将 8 个小麦品种(系)分为 3 种类型。籽粒 Pb 含量最高型: 温麦 6 号; 颖壳 Pb 含量最高型: 百农 1306、百农 1309 和周麦 22; 叶片 Pb 含量最高型: 百农 160、百农 418、周麦 18 和周麦 26。除温麦 6 号外, 其他 7 个品种(系)籽粒和茎秆的 Pb 含量差异不显著。

2.2 Pb 对不同基因型小麦矿质元素积累的影响

2.2.1 Ca 由表 1 可知, Pb 对 8 个不同基因型小麦籽粒、颖壳、叶片和茎秆中 Ca 积累的影响不同。

与 CK 相比, Pb 处理后百农 1306 和百农 1309 籽粒中 Ca 含量显著增加, 周麦 22 显著降低; 百农 1309、百农 418、温麦 6 号和周麦 26 颖壳中 Ca 含量显著增加, 周麦 18 和周麦 22 显著下降; 百农 1309、百农 418 和周麦 26 叶片中 Ca 含量显著增加, 百农 1306、温麦 6 号和周麦 22 显著降低; 周麦 22 茎秆中 Ca 含量显著增加, 其余 7 个品种(系)均降低, 且除百农 1309 外, 差异均达到显著水平。

表 1 Pb 对不同基因型小麦 Ca 积累的影响 μg/g

品种(系)	处理	籽粒	颖壳	叶片	茎秆
百农 1306	CK	2 507.1 ± 75.5b	16 199.5 ± 250.1a	3 367.4 ± 51.9a	877.6 ± 54.4a
	Pb	2 892.0 ± 141.2a	17 128.6 ± 595.4a	1 800.1 ± 61.9b	628.1 ± 50.9b
百农 1309	CK	3 150.6 ± 58.7b	12 214.3 ± 240.8b	1 571.9 ± 143.3b	694.3 ± 54.1a
	Pb	3 669.3 ± 72.1a	17 295.5 ± 586.8a	2 921.5 ± 19.2a	533.9 ± 104.3a
百农 160	CK	3 322.5 ± 81.5a	14 516.0 ± 271.1a	3 749.6 ± 424.9a	649.4 ± 61.9a
	Pb	3 517.9 ± 147.3a	15 279.7 ± 538.1a	3 050.8 ± 176.3a	482.0 ± 40.4b
百农 418	CK	2 095.0 ± 108.1a	10 541.6 ± 149.7b	1 210.5 ± 111.9b	1 056.6 ± 87.5a
	Pb	2 142.1 ± 335.5a	13 577.9 ± 1 033.6a	2 070.0 ± 148.8a	500.2 ± 47.6b
温麦 6 号	CK	2 386.4 ± 337.4a	11 897.8 ± 341.2b	1 182.2 ± 43.7a	5 473.7 ± 76.8a
	Pb	2 669.1 ± 41.7a	16 940.2 ± 974.1a	606.0 ± 14.9b	3 636.9 ± 120.6b
周麦 18	CK	2 626.9 ± 98.2a	15 921.3 ± 772.5a	1 661.2 ± 32.3a	1 357.2 ± 39.5a
	Pb	3 648.7 ± 733.3a	13 733.3 ± 933.1b	2 328.5 ± 544.9a	742.3 ± 69.2b
周麦 22	CK	4 323.5 ± 86.7a	19 088.5 ± 499.2a	3 795.4 ± 68.3a	763.4 ± 18.5b
	Pb	3 153.0 ± 62.1b	17 945.6 ± 401.8b	2 355.6 ± 83.4b	1 354.7 ± 43.3a
周麦 26	CK	4 250.1 ± 63.0a	16 206.8 ± 371.4b	3 201.9 ± 599.3b	711.8 ± 19.9a
	Pb	3 902.5 ± 699.5a	17 816.7 ± 410.8a	4 195.7 ± 67.6a	472.7 ± 54.6b

注: 同列不同字母表示同一品种(系)不同处理之间差异显著(P < 0.05), 下同。

2.2.2 K 由表 2 可知, 与 CK 相比, Pb 处理后百农 1306、百农 160、百农 418、周麦 18 和周麦 26 籽粒中 K 含量显著增加, 百农 1309、温麦 6 号和周麦 22 显著降低; 除百农 1309 颖壳中、周麦 18 叶片中及百农 160、周麦 22、周麦 26 茎秆中 K 含量变化不显著外, 其他小麦品种(系)的颖壳、叶片和茎秆中的 K 含量均显著降低。另外, 对比同一品种不同部位 K 含量发现, 与 CK 相比, Pb 处理后温麦 6 号 4 个部位 K 含量均显

著降低; 百农 1306 和百农 418 籽粒中 K 含量显著增加, 而其他 3 个部位 K 含量均显著降低。

2.2.3 Mg 由表 3 可知, 与 CK 相比, Pb 处理后温麦 6 号和周麦 18 籽粒 Mg 含量显著增加, 其余 6 个品种(系)均显著降低; 温麦 6 号和周麦 18 颖壳中 Mg 含量显著增加, 百农 1306、百农 160 和周麦 22 显著降低; 百农 1309、百农 418、周麦 18 和周麦 26 叶片中 Mg 含量显著增加, 温麦 6 号也增加, 但差异不

显著,其他 3 个品种(系)均显著降低;周麦 22 茎秆中 Mg 含量显著增加,百农 418、温麦 6 号、周麦 18 和周麦 26 显著降低,其他 3 个品种差异不显著。另外,对比同一品种不同部位 Mg 含量发现,与 CK 相比,Pb 处理后百农 1306 和百农 160 茎秆中 Mg 含量变化不显著,而其余 3 个部位均显著降低;周麦 18 茎秆中 Mg 含量显著降低,而其他 3 个部位均显著升高,周麦 22 的变化模式与周麦 18 相反。

表 2 Pb 对不同基因型小麦 K 积累的影响 μg/g

品种(系)	处理	籽粒	颖壳	叶片	茎秆
百农 1306	CK	7 240.4 ± 451.1b	12 986.1 ± 349.0a	24 630.1 ± 431.2a	4 283.3 ± 244.7a
	Pb	10 312.6 ± 697.5a	9 872.1 ± 336.4b	13 253.7 ± 236.6b	3 322.5 ± 127.7b
百农 1309	CK	13 553.6 ± 156.9a	8 584.9 ± 391.8a	25 166.3 ± 430.9a	4 583.9 ± 283.7a
	Pb	9 917.2 ± 131.0b	8 471.3 ± 94.2a	10 911.6 ± 129.9b	3 200.6 ± 114.8b
百农 160	CK	6 357.4 ± 185.7b	11 516.0 ± 218.8a	23 479.3 ± 1 030.6a	4 149.9 ± 242.6a
	Pb	10 170.3 ± 162.6a	10 324.9 ± 299.6b	7 732.8 ± 166.0b	3 736.7 ± 148.1a
百农 418	CK	7 577.5 ± 279.5b	14 106.0 ± 1 026.1a	23 050.0 ± 585.0a	5 582.3 ± 201.2a
	Pb	9 921.2 ± 107.5a	10 052.4 ± 805.1b	16 308.5 ± 1 376.3b	3 723.1 ± 103.4b
温麦 6 号	CK	27 210.0 ± 327.9a	9 913.6 ± 174.7a	5 171.1 ± 136.2a	15 654.2 ± 137.8a
	Pb	9 506.9 ± 315.9b	6 437.9 ± 263.4b	2 742.2 ± 418.7b	7 984.1 ± 141.8b
周麦 18	CK	6 177.5 ± 153.7b	15 841.7 ± 177.3a	22 016.3 ± 509.5a	6 759.9 ± 139.3a
	Pb	6 734.2 ± 393.9a	14 066.7 ± 475.6b	20 618.4 ± 1 305.0a	4 339.9 ± 174.3b
周麦 22	CK	6 903.2 ± 276.8a	9 663.5 ± 231.1a	20 871.3 ± 171.4a	3 321.3 ± 164.6a
	Pb	6 381.6 ± 174.9b	6 166.6 ± 520.9b	17 541.9 ± 787.9b	3 387.0 ± 122.0a
周麦 26	CK	6 410.2 ± 361.4b	15 227.4 ± 860.2a	22 486.7 ± 1 399.4a	3 510.4 ± 113.2a
	Pb	9 332.9 ± 813.1a	8 274.2 ± 448.0b	16 919.9 ± 1 005.1b	3 641.8 ± 224.1a

表 3 Pb 对不同基因型小麦 Mg 积累的影响 μg/g

品种(系)	处理	籽粒	颖壳	叶片	茎秆
百农 1306	CK	1 958.0 ± 22.7a	6 078.3 ± 83.2a	1 723.9 ± 42.4a	1 668.3 ± 87.6a
	Pb	1 745.6 ± 45.6b	5 360.2 ± 301.8b	1 018.3 ± 16.2b	1 691.4 ± 139.4a
百农 1309	CK	2 479.7 ± 81.6a	4 919.5 ± 89.6a	1 037.5 ± 47.9b	1 795.8 ± 58.4a
	Pb	2 143.4 ± 99.3b	4 714.3 ± 172.8a	1 517.0 ± 32.1a	1 843.1 ± 84.5a
百农 160	CK	1 963.9 ± 58.0a	6 123.8 ± 146.5a	4 182.1 ± 363.9a	1 566.7 ± 69.6a
	Pb	1 684.5 ± 44.8b	4 831.0 ± 136.7b	2 913.1 ± 123.9b	1 588.6 ± 39.3a
百农 418	CK	2 870.8 ± 140.0a	5 307.0 ± 233.9a	721.7 ± 155.6b	3 443.2 ± 84.6a
	Pb	1 783.7 ± 82.5b	4 540.0 ± 495.2a	1 185.6 ± 84.2a	1 483.3 ± 164.5b
温麦 6 号	CK	1 519.8 ± 55.5b	5 023.4 ± 129.1b	1 787.7 ± 56.5a	4 094.4 ± 144.4a
	Pb	2 727.5 ± 122.5a	6 399.9 ± 361.1a	1 837.2 ± 69.4a	3 163.0 ± 116.5b
周麦 18	CK	1 920.1 ± 71.5b	5 151.1 ± 129.7b	1 159.8 ± 124.7b	2 840.3 ± 130.6a
	Pb	3 080.3 ± 177.4a	5 810.4 ± 295.6a	1 759.0 ± 236.1a	2 077.2 ± 80.2b
周麦 22	CK	3 348.2 ± 156.1a	6 750.5 ± 47.6a	2 404.1 ± 48.6a	1 956.9 ± 80.1b
	Pb	2 515.5 ± 82.9b	5 980.9 ± 75.6b	1 348.9 ± 56.1b	2 402.5 ± 15.8a
周麦 26	CK	3 409.7 ± 101.7a	6 242.5 ± 145.1a	1 568.9 ± 256.9b	1 974.5 ± 11.8a
	Pb	2 968.8 ± 191.2b	6 272.9 ± 243.6a	2 553.8 ± 35.9a	1 813.6 ± 172.2b

2.2.4 Fe 由表 4 可知,Pb 处理对 8 个不同基因型小麦籽粒、颖壳、叶片和茎秆中 Fe 积累的影响也不相同。与 CK 相比,Pb 处理后百农 160 和周麦 18 籽粒中 Fe 含量显著增加,百农 1309 和周麦 22 显著降低;百农 160、百农 418、温麦 6 号和周麦 26 颖壳中 Fe 含量显著增加,百农 1309、周麦 18 和周麦 22 显著降低,百农 1306 变化不显著;除周麦 18 和周麦 22 叶片中 Fe 含量变化不显著外,其余 6 个品种(系)均显著增加;周麦 26 茎秆中 Fe 含量显著降低,温麦 6 号和周麦 22 显著增加,其余品种(系)变化不显著。

表 4 Pb 对不同基因型小麦 Fe 积累的影响 μg/g

品种(系)	处理	籽粒	颖壳	叶片	茎秆
百农 1306	CK	218.6 ± 10.2a	262.8 ± 13.5a	82.8 ± 4.4b	91.3 ± 17.0a
	Pb	208.5 ± 12.3a	249.1 ± 21.5a	100.3 ± 6.6a	103.4 ± 10.6a
百农 1309	CK	278.5 ± 2.8a	302.6 ± 13.0a	50.2 ± 5.8b	84.0 ± 4.6a
	Pb	249.0 ± 3.7b	233.1 ± 11.8b	74.4 ± 1.1a	98.8 ± 11.3a
百农 160	CK	173.5 ± 5.6b	358.7 ± 11.4b	85.4 ± 2.5b	77.0 ± 4.0a
	Pb	238.6 ± 1.8a	488.6 ± 8.4a	102.2 ± 0.4a	86.6 ± 5.5a

续表 4 Pb 对不同基因型小麦 Fe 积累的影响					μg/g
品种(系)	处理	籽粒	颖壳	叶片	茎秆
百农 418	CK	257.7 ± 1.8a	337.4 ± 11.4b	47.6 ± 6.4b	136.3 ± 20.4a
	Pb	285.7 ± 17.6a	415.0 ± 20.5a	82.2 ± 6.0a	103.0 ± 25.1a
温麦 6 号	CK	80.7 ± 6.6a	311.9 ± 12.8b	91.6 ± 6.5b	112.3 ± 1.8b
	Pb	74.6 ± 12.1a	414.7 ± 18.7a	111.4 ± 5.4a	253.7 ± 9.6a
周麦 18	CK	145.6 ± 8.7b	346.7 ± 11.3a	69.6 ± 5.3a	98.6 ± 15.4a
	Pb	219.4 ± 22.2a	299.4 ± 8.2b	87.5 ± 12.0a	98.0 ± 9.3a
周麦 22	CK	394.7 ± 17.9a	338.4 ± 8.7a	72.9 ± 1.8a	109.8 ± 21.9b
	Pb	250.0 ± 4.5b	317.7 ± 8.9b	73.7 ± 0.5a	200.0 ± 28.6a
周麦 26	CK	231.2 ± 19.7a	333.8 ± 18.9b	91.6 ± 15.2b	108.6 ± 3.4a
	Pb	222.3 ± 20.7a	378.0 ± 9.6a	144.6 ± 22.1a	106.8 ± 26.4b

3 结论与讨论

重金属污染土壤修复与利用一直是科学家研究的热点。客土法、施用石灰或者螯合剂法、化学淋溶法以及近年来发展起来的植物修复技术等对污染土壤改良或修复虽具有一定的作用,但在实践中却均存在一些局限<sup>[14-16]</sup>,而培育和应用对重金属吸收低、积累低的作物品种对于提高作物质量和产量有重要意义<sup>[17-18]</sup>。研究重金属对必需矿质元素吸收、转运等的影响有助于更深入地理解其毒性效应,对解决矿质营养利用和重金属积累之间的矛盾具有参考价值<sup>[19]</sup>。大白菜、玉米、大麦等作物的 Pb 积累特性及 Pb 在各器官的分配存在基因型差异<sup>[17-18,20]</sup>。本研究结果表明,小麦对 Pb 的吸收及 Pb 在不同器官的分配也存在基因型差异。杨素勤等<sup>[21]</sup>在 pH 值 7.72、有机质含量 26.23 g/kg、速效磷含量 29.28 mg/kg、速效钾含量 148.30 mg/kg、碱解氮含量 200.35 mg/kg、全铅含量 808.92 mg/kg、有效态铅含量 173 mg/kg、碳酸盐态铅含量 328 mg/kg 以及存在砷、汞、铜、锌、镉等污染的耕地土壤中研究发现,所有 20 个小麦品种 Pb 含量均表现为茎叶 > 籽粒。本研究结果表明,不同基因型小麦 Pb 的分布有不同特点,根据同一品种(系)的 Pb 含量最高部位,8 个品种(系)可以分为籽粒最高型、颖壳最高型和叶片最高型。上述 2 种结果的差异可能是因为试验所用小麦品种不同,也可能是因为试验条件和方法不同。本研究结果也说明了培育籽粒 Pb 低积累型品种的可行性。

由于不同场地的污染源、土壤、受体等的差别,土壤污染危害具有显著的场地差别性特点。为了便于结果比较,试验采取营养液水培的方式控制试验条件的一致性。我国土壤环境质量标准(GB 15618—1995)中规定,Ⅱ类一般农田 pH 值 < 6.5 时,Pb 含量不超过 250 mg/kg;在该标准修订版征求意见稿中规定,农业用地水田、旱地二级土壤 Pb 含量不超过 80 mg/kg。Hoagland's 营养液 pH 值为 6.0,同时考

虑到水培条件更利于植物对矿质元素的吸收,如果 Pb 的添加量过高,不管是否会对小麦生长造成表观危害,对 Pb 低积累小麦的生产也失去指导意义,因此,不宜添加过多的 Pb,故本试验中将 Pb(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 的添加量设为 140 mg/L,折合 Pb 含量约为 85 mg/kg。食品安全国家标准(GB 2762—2012)中小麦制品的 Pb 限量为 0.5 mg/kg,即使本研究中籽粒 Pb 富集最低的品种百农 418,其含量也远超过该标准,这主要是因为水培条件非常有利于小麦对矿质元素的吸收。

在 Hoagland's 营养液中添加 Pb(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 条件下,小麦改变了对 Ca、Mg、Fe、K 的吸收和分配情况,但这 4 种元素之间是否存在彼此促进或抑制的关系尚不清楚,土壤与营养液条件下,小麦对 Pb 和其他矿质元素的富集情况是否存在对应关系也需要进一步研究。

参考文献:

[1] 龚继明. 重金属污染的缓与急[J]. 植物生理学报, 2014,50(5):567-568.

[2] Sharma P,Dubey R S. Lead toxicity in plants[J]. Brazilian Journal of Plant Physiology,2005,17:35-52.

[3] 李红霞,赵新华,马伟芳. 河道污染沉积物中 Pb,Cd 有机物的植物修复作用[J]. 华北农学报,2008,23(1): 186-188.

[4] 杨军,陈同斌,雷梅,等. 北京市再生水灌溉对土壤、农作物的重金属污染风险[J]. 自然资源学报,2011,26(2):209-217.

[5] 宋伟,陈百明,刘琳. 中国耕地土壤重金属污染概况[J]. 水土保持研究,2013,20(2):293-298.

[6] 段德超,于明革,施积炎. 植物对铅的吸收、转运、累积和解毒机制研究进展[J]. 应用生态学报,2014,25(1):287-296.

[7] Gall J E,Boyd R S,Rajakaruna N. Transfer of heavy metals through terrestrial food webs: A review [J]. Environ Monit Assess, 2015, 187(4): 201. DOI: 10. 1007/s10661-015-4436-3.

[8] 武际,郭熙盛,王允青,等. 不同氮钾水平对小麦产量和氮钾养分吸收利用的影响[J]. 安徽农业科学, 2009,37(24):11469-11470,11472.

[9] Marschner H, Kirkby E A, Engels C. Importance of cycling and recycling of mineral nutrients within plants for growth and development [J]. Plant Biology, 1997, 110 (4):265-273.

[10] 孙慧敏,于振文,颜红,等. 施磷水平对小麦品质和产量及氮素利用的影响[J]. 麦类作物学报,2006,26 (2):135-138.

[11] 边秀芝,盖嘉慧,郭金瑞,等. 玉米施磷肥的生物效应[J]. 玉米科学,2008,16(5):120-122.

[12] 柴颖. 氮磷肥配施对土壤速效养分及玉米产量的影响[D]. 石河子:石河子大学,2015.

[13] 姬景红,李玉影,刘双全,等. 平衡施肥对玉米产量、效益及土壤-作物系统养分收支的影响[J]. 中国土壤与肥料,2010(4):37-41.

[14] 武继承,杨永辉,郑惠玲,等. 水肥互作对小麦-玉米周年产量及水分利用率的影响[J]. 河南农业科学, 2015,44(7):67-72.

[15] 胡霁堂. 植物营养学[M]. 北京:中国农业大学出版社,2003.

[16] 孙颖,郭世荣,颜志明,等. 不同肥料配比对大棚丝瓜品质与产量的影响[J]. 北方园艺,2016(8):178-181.

[17] 黄绍文,孙桂芳,金继运,等. 氮、磷和钾营养对优质玉米籽粒产量和营养品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2004,10(3):225-230.

[18] 徐钰,刘兆辉,江丽华,等. 不同氮肥运筹对冬小麦氮肥利用率和土壤硝态氮含量的影响[J]. 水土保持学报,2010,24(4):90-93,98.

[19] 臧贺藏,王言景,张杰,等. 不同氮肥模式下 2 个高产玉米品种物质积累与产量效益特性研究[J]. 核农学报,2015,29(12):2402-2409.

[20] 李梁,陶洪斌,周祥利,等. 吉林省不同地区高产春玉米养分吸收及分配规律研究[J]. 华北农学报,2011, 26(4):159-166.

[21] 邢月华,韩晓日,汪仁,等. 平衡施肥对玉米养分吸收、产量及效益的影响[J]. 中国土壤与肥料,2009 (2):27-29.

(上接第 19 页)

[8] 李妍. 铅镉胁迫对小麦幼苗抗氧化酶活性及丙二醛含量的影响[J]. 麦类作物学报,2009,29(3):514-517.

[9] 王丽燕,郑世英. 镉、铅及其复合污染对小麦种子萌发的影响[J]. 麦类作物学报,2009,29(1):146-148.

[10] 乔莎莎,张永清,杨丽雯,等. 有机肥对铅胁迫下小麦生长的影响[J]. 应用生态学报,2011,22(4):1094-1100.

[11] Harmankaya M,Gezgin S,Özcan M M. Variation of heavy metal and micro and macro element concentrations of bread and durum wheat and their relationship in grain of Turkish wheat cultivars [J]. Environ Monit Assess, 2012,184:5511-5521.

[12] Liu W T,Liang L C,Zhang X,et al. Cultivar variations in cadmium and lead accumulation and distribution among 30 wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars[J]. Environmental Science and Pollution Research,2015,22(11):8432-8441.

[13] 李卓坤,彭涛,张卫东,等. 利用“永久 F<sub>2</sub>”群体进行小麦幼苗根系性状 QTL 分析[J]. 作物学报,2010,36 (3):442-448.

[14] Chaney R L,Malikz M,Li Y M,et al. Phytoremediation of soil metals [J]. Current Opinion in Biotechnology, 1997,8(3):279-284.

[15] 胡鹏杰,李柱,钟道旭,等. 我国土壤重金属污染植物吸取修复研究进展[J]. 植物生理学报,2014,50(5):577-584.

[16] 聂亚平,王晓维,万进荣,等. 几种重金属(Pb、Zn、Cd、Cu)的超富集植物种类及增强植物修复措施研究进展[J]. 生态科学,2016,35(2):174-182.

[17] 刘维涛,周启星. 重金属污染预防品种的筛选与培育[J]. 生态环境学报,2010,26(6):1452-1458.

[18] Liu W,Zhou Q,Zhang Y,et al. Lead accumulation in different Chinese cabbage cultivars and screening for pollution-safe cultivars [J]. Journal of Environmental Management,2010 91(3):781-788.

[19] 陈久耿,晁代印. 矿质元素互作及重金属污染的研究进展[J]. 植物生理学报,2014,50(5):585-590.

[20] 李月芳,刘领,陈欣,等. 模拟铅胁迫下玉米不同基因型生长与铅积累及各器官间的分配规律[J]. 农业环境科学学报,2010,29(12):2260-2267.

[21] 杨素勤,程海宽,张彪,等. 不同品种小麦 Pb 积累差异性研究[J]. 生态与农村环境学报,2014,30(5):646-651.