

史高玲, 马鸿翔, 娄来清, 等. 小麦株高和茎秆不同部位砷镉磷含量与籽粒砷镉磷含量的关系[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(1): 8-15.

SHI Gao-ling, MA Hong-xiang, LOU Lai-qing, et al. Relationship between arsenic, cadmium, and phosphorous concentrations in different parts of wheat straw, wheat plant height and grain arsenic, cadmium, and phosphorous concentrations[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(1): 8-15.

小麦株高和茎秆不同部位砷镉磷 含量与籽粒砷镉磷含量的关系

史高玲^{1,2}, 马鸿翔¹, 娄来清², 蔡庆生^{2*}

(1.江苏省农业科学院省农业生物学重点实验室, 南京 210014; 2.南京农业大学生命科学学院, 南京 210095)

摘要:以 12 个小麦品种为供试材料, 利用盆栽试验研究了小麦穗下节间长、株高和茎秆不同部位砷、镉、磷含量在不同品种间的差异以及它们与小麦籽粒砷、镉、磷含量之间的关系。结果显示, 小麦株高、穗下节间长以及茎秆不同部位砷、镉、磷含量存在明显的品种差异。皮尔森相关性分析结果显示, 小麦籽粒砷含量与颖壳和穗轴部位砷含量显著正相关, 相关系数分别为 0.659 ($P<0.01$) 和 0.433 ($P<0.05$)。籽粒镉和磷含量与株高和穗下节间长呈显著负相关, 其相关系数: 镉分别为 -0.264 ($P<0.05$) 和 -0.345 ($P<0.01$), 磷分别为 -0.583 ($P<0.01$) 和 -0.437 ($P<0.01$)。籽粒磷含量分别与颖壳、穗轴和节间磷含量呈显著正相关, 相关系数分别为 0.526 ($P<0.01$)、0.430 ($P<0.05$) 和 0.532 ($P<0.01$)。籽粒砷和镉含量与颖壳和穗轴中磷含量均存在显著相关性。这些结果表明, 颖壳和穗轴部位砷含量大小可以用来表征籽粒砷含量, 选育植株较高的小麦品种有利于降低籽粒镉的积累。

关键词:砷; 镉; 小麦; 株高; 相关性

中图分类号:S512.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2017)01-0008-08 doi:10.11654/jaes.2016-1044

Relationship between arsenic, cadmium, and phosphorous concentrations in different parts of wheat straw, wheat plant height and grain arsenic, cadmium, and phosphorous concentrations

SHI Gao-ling^{1,2}, MA Hong-xiang¹, LOU Lai-qing², CAI Qing-sheng^{2*}

(1. Jiangsu Provincial Key Laboratory of Agrobiotechnology, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 2. College of Life Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: The differences in the upper-most internode length and plant height among 12 wheat cultivars and their relationship with grain arsenic (As), cadmium (Cd) and phosphorous (P) concentrations in soil "naturally" contaminated with both As and Cd were investigated by using pot experiments. The differences in As, Cd, and P accumulation in different parts of wheat straw and their relationship with grain As, Cd and P concentrations in 6 wheat cultivars were also investigated. The results showed that the plant height and upper-most internode length were significant differences among the 12 wheat cultivars. As, Cd, and P concentrations in wheat straw were significant differences among different cultivars and different parts of wheat straw. Grain As concentration was positively correlated with husk and rachis As concentrations, the correlation coefficients were 0.659 ($P<0.01$) and 0.433 ($P<0.05$), respectively. Grain Cd and P concentrations were negatively correlated with plant height and upper-most internode length, the correlation coefficients were -0.264 ($P<0.05$) and -0.345 ($P<0.01$) for Cd, -0.583 ($P<0.01$) and -0.437 ($P<0.01$) for P, respectively. Grain P concentration was positively correlated with husk, rachis and intern-

收稿日期: 2016-08-12

作者简介: 史高玲(1988—), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事植物环境生理研究。E-mail: shigaoling@jaas.ac.cn

* 通信作者: 蔡庆生 E-mail: qscail@njau.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(41601541, 41201524); 江苏省自然科学基金项目(BK20160593)

Project supported: The National Natural Foundation of China(41601541, 41201524); The Natural Science Foundation of Jiangsu Province(BK20160593)

ode P concentrations. Both As and Cd concentrations in wheat grain were significantly correlated to P concentration in wheat husk and rachis. These results indicated that plant height may be a potential selection criterion for breeding low Cd wheat cultivar. Arsenic concentrations in wheat husk and rachis can be used as indexes of As level in the grain.

Keywords: arsenic; cadmium; wheat; plant height; correlation

砷(As)和镉(Cd)均为致癌物质,在美国有害物质及疾病登记处的有害物质排名中分别排在第一和第七位^[1]。近年来,农田灌溉的地下水砷、磷超标,含砷化合物农药的大量使用以及矿业资源的过度开发,导致农田土壤砷、镉污染愈发严重^[2-4]。2014 年全国土壤污染调查报告显示,我国土壤污染总超标率为 16.1%,其中砷和镉的超标率分别为 2.7%和 7.0%^[5]。目前我国污染面积最大的是镉污染,健康风险最大的是砷污染。农田砷、镉污染不仅干扰植物的正常生长^[6],还会通过土壤-农作物迁移,进入食物链威胁人体健康^[7]。长期暴露于砷的毒害下会引发一系列的疾病,如皮肤癌、肺癌、膀胱癌等^[8]。长期食用镉含量超标的大米会使人患上一种名为“痛痛病”的骨癌^[9]。

目前,重金属/类金属元素在土壤-农作物系统中迁移规律及污染防治的研究大多只针对单一元素。然而,很多污染土壤中多个有害元素共存^[10],土壤监测结果显示我国一些农田土壤中砷和镉共同污染现象严重^[3,11-12],且它们之间存在交互作用。Sun 等^[13]认为一定浓度的砷可以缓解镉对水稻幼苗的毒害,而 Sánchez-Pardo 等^[14]研究表明低镉也可以缓解砷对刺棘蓟(*C. cardunculus* L.)造成的胁迫。因此,在研究砷镉复合污染时,并不能将它们各自的毒害及累积效应简单的相加。另一方面,砷酸盐与磷酸盐具有相似的化学性质,植物对五价砷的吸收通过磷转运蛋白进行^[15],磷还可以改变镉在植物细胞中的分布,并且可以增加 Cd-PO₄ 复合物的形成,减少植物对镉的吸收和转移^[16],说明磷在植物砷、镉的吸收与转移过程中起着关键的作用。

小麦是全世界最主要的粮食作物之一,在我国,小麦广泛种植于长江中下游、西南、黄淮及其以北地区。研究表明,当小麦生长在砷、镉污染的土壤上时,其籽粒中砷、镉的含量会显著增加^[17-18]。此外,小麦籽粒中的砷主要以无机砷的形态存在^[19-20],而无机砷的毒性要大于有机砷^[21]。因此,降低小麦籽粒中砷和镉的积累对人类的健康有着重要的意义。通常,根系将土壤中的砷、镉吸收进入植物体内后,先往上转移至茎秆中,再从茎秆转移进入籽粒。小麦根系和茎秆中

砷、镉含量远高于籽粒中砷、镉的含量^[22]。因此,根系和茎秆是保证籽粒砷、镉含量较低的两道关键壁垒。研究砷、镉在茎秆-籽粒中的迁移规律可以为减少小麦籽粒砷、镉的积累提供可靠的理论依据。

我们前期的研究结果显示,在砷镉复合污染的条件下,小麦茎秆和籽粒中砷和镉的含量存在明显的品种间差异,并且小麦籽粒砷、镉的积累与茎秆和籽粒磷的含量存在着显著的相关性^[12]。然而,至今尚不明确小麦茎秆性状与小麦籽粒砷、镉积累的关系。因此,本文在前期基础上,进一步研究小麦茎秆不同部位(节间、穗轴、颖壳等)砷、镉、磷含量以及茎秆长度与小麦籽粒砷、镉含量的关系,以期在器官水平上认识砷、镉在茎秆-籽粒中的迁移规律,为小麦生产中砷、镉安全控制技术体系和安全评价技术体系提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 土壤

供试土壤采自广东汕头一尾矿区稻田土壤^[23],该区域土壤同时受到砷和镉的污染。土样的采集主要集中在稻田的耕作层,运回实验室后,经自然风干,拣出杂物,过 4 mm 筛备用。土壤为粘壤土,有机质含量为 15.7 g·kg⁻¹,pH7.65(水土比为 1:2.5,W/V),总 N、P、K 含量分别为 1.47、1.61、14.1 g·kg⁻¹。土壤砷、镉、铜、铅、锌总量分别为 412、13.7、139、135、190 mg·kg⁻¹。土壤 CaCl₂ 提取态砷、镉含量分别为 0.985 mg·kg⁻¹ 和 0.120 mg·kg⁻¹,HAc 提取态含量分别为 45.3 mg·kg⁻¹ 和 1.32 mg·kg⁻¹^[12]。

1.2 小麦品种

根据前期实验结果,选取 12 个冬小麦品种(*Triticum aestivum* L.)用于本试验,分别为:绵麦 48(MM48)、青丰 1(QF1)、皖麦 19(WM19)、烟农 21(YN21)、晋麦 85(JM85)、绵麦 45(MM45)、临抗 11(LK11)、镇麦 5(ZM5)、百农 160(BN160)、小偃 22(XY22)、冀 5265(J5265)和济宁 12(JN12)。

1.3 试验设计及样品的收集

试验于南京农业大学牌楼实验基地(32°12'N, 118°28'E)进行,在室外条件下对小麦进行盆钵种植。

选取饱满一致的小麦种子,用 10% 双氧水 (H_2O_2 , m/m) 表面消毒 10 min 后,去离子水洗净,放在铺有潮湿滤纸的培养皿中催芽。培养皿置于光照培养箱中,光照强度为 $350 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,光周期为 12 h 光照 (25°C) 和 12 h 黑暗 (20°C),24 h 后取出。将露白的小麦种子播种到装有 6 kg 污染土壤的塑料盆钵中,每盆播种 8 粒。每个品种设置 5 个重复,共 60 盆。播种两周后,选取生长一致的 3 棵幼苗留作实验,其余的拔除。在播种前两周添加土壤基肥,基肥的添加形式为 N-P-K 复合肥, N、P、K 含量分别为 180、90、105 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 土壤。同时在小麦生长的拔节孕穗时期施加追肥。所有盆钵随机放置,每隔一个月重新摆放。

待小麦成熟后,测量小麦的株高和穗下节间长。对每盆小麦分别收获,将根系和地上部分分开。收获的植株经去离子水洗净, 60°C 烘干至恒重后将籽粒和茎秆分开,称重。将小麦茎秆分成两份,其中一份进一步细分为穗轴(包括小穗轴)、颖壳(包括颖片、内稃、外稃和麦芒)和节间(包括节和叶片)等部分。节间的命名顺序从顶端开始,分别为节间 I、节间 II 和其他节间(剩下的所有节间)。

1.4 化学分析

土壤基本理化性质按土壤农化常规分析法测定^[24]。土壤元素总量采用微波消解 (USEPA, 1996), ICP-OES (ICP-OES: Optima 2100DV, Perkin Elmer, Waltham, MA) 进行检测。微波消解过程中带入试剂空白样和土壤标准物质样品 (GBW 07406) 进行质量控制。本实验 As、Cu、Zn、Pb 和 P 的回收率分别为 94%~97%、100%~103%、85%~87%、96%~114% 和 92%~98%。根据 Luo 等^[25]和 Novozamsky 等^[26]的方法,分别使用 HAc 和 CaCl_2 提取土壤中可提取 As 和 Cd 的含量。

植物样品中砷、镉、磷总量的测定参考 Tao 等^[27]的方法,使用 HNO_3 - H_2O_2 (1:1, V/V) 进行电热消解,为了避免砷的挥发,消解温度控制在 125°C 以下。样品总砷含量用氢化物原子荧光仪 (HG-AFS, AFS-8230, 北京吉天仪器有限公司) 进行测定,镉和磷的含量用 ICP-OES 进行测定。本实验植物标准物质(柑橘叶, GBW10020)中砷、镉和磷的回收率分别为 89%~99%、95%~98% 和 95%~106%。

1.5 数据分析统计

所有数据运用 SPSS 16.0 和 Microsoft Excel 2003 进行统计分析。处理间显著性差异分析用 Duncan 多重比较法进行单因素方差分析,各指标间的相关性通过皮尔森相关性进行分析。

2 结果与分析

2.1 小麦株高和穗下节间长度及其与籽粒砷、镉含量的关系

小麦株高和穗下节间长存在明显的品种间差异 ($P < 0.001$),株高和穗下节间长度最大的为晋麦 85,最小的为小偃 22,晋麦 85 的株高和穗下节间长度分别是小偃 22 的 1.47、1.52 倍(图 1)。图 2 为 12 个小麦品种籽粒中砷、镉、磷含量,引自 Shi 等^[22]的结果。单样本 K-S 检验结果表明,小麦株高、穗下节间长和小麦籽粒砷、镉、磷含量均服从正态分布,符合皮尔森相关系数的计算。皮尔森相关性分析结果如表 1 所示。小麦株高与籽粒镉和磷含量显著负相关,其相关系数分别为 -0.246 ($P < 0.05$) 和 -0.583 ($P < 0.01$),与籽粒砷含量呈正相关,但相关性不显著 ($P = 0.075$);穗下节间长度与籽粒镉和磷含量同样呈显著负相关 ($P < 0.01$)。

2.2 6 个小麦品种茎秆不同部位砷、镉、磷含量

为了进一步研究小麦茎秆不同部位对砷和镉的

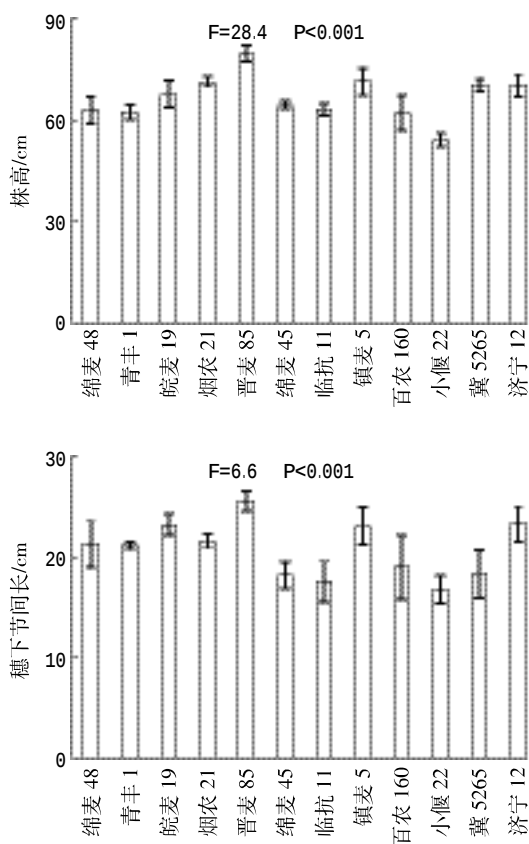


图 1 12 个小麦品种株高和穗下节间长

Figure 1 Plant height and the length of internode I (below the spike) among the 12 wheat cultivars

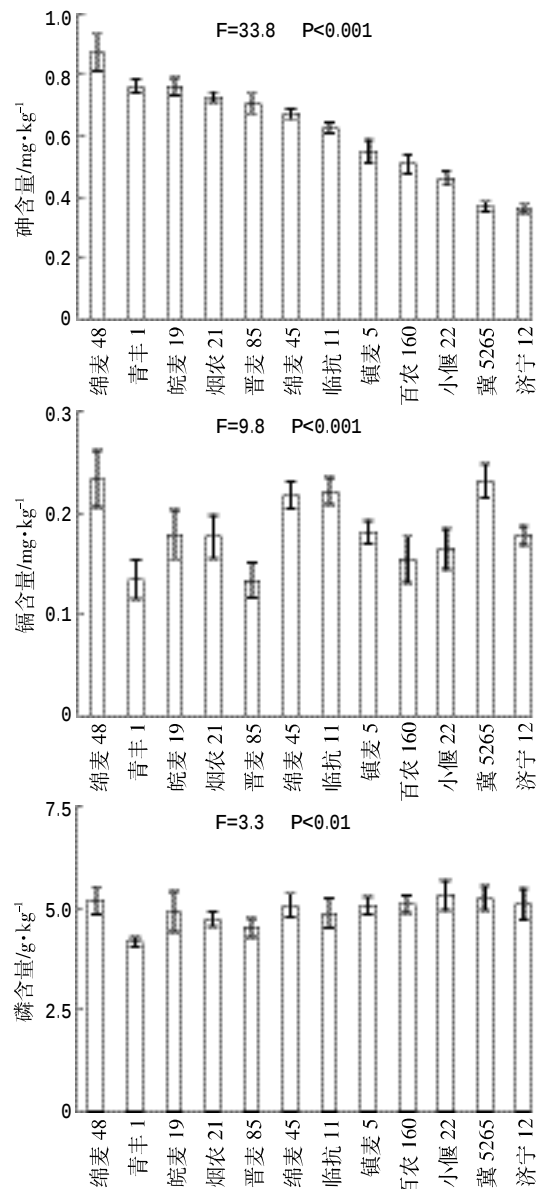


图 2 12 个小麦品种籽粒中砷、镉和磷的含量^[12]

Figure 2 Concentrations of As, Cd and P in grains of 12 wheat cultivars grown in contaminated soils^[12]

表 1 小麦株高和穗下节间长度与籽粒砷、镉、磷含量的相关性
Table 1 Pearson correlations between wheat plant height, the length of internode I and grain As, Cd, and P concentrations

	株高	穗下节间长	籽粒砷含量	籽粒镉含量	籽粒磷含量
株高	1	0.620**	0.242	-0.264*	-0.583**
穗下节间长		1	0.216	-0.345**	-0.437**
籽粒砷含量			1	0.182	-0.278*
籽粒镉含量				1	0.458**
籽粒磷含量					1

注: * 显著性水平为 $P<0.05$, ** 显著性水平为 $P<0.01$ 。下同。

Note: * Significant correlation at $P<0.05$, ** Significant correlation at $P<0.01$. The same below.

积累情况,从 12 个小麦品种中选取籽粒砷、镉积累差异较大的 6 个小麦品种(晋麦 85、绵麦 45、济宁 12、小偃 22、皖麦 19、青丰 1),分析了砷、镉、磷在小麦颖壳、穗轴、节间 I、节间 II 和其他节间中的含量(图 3)。如图 3 所示,小麦茎秆不同部位对砷、镉、磷的积累在不同品种及不同部位间存在显著差异($P<0.01$)。晋麦 85、皖麦 19 和青丰 1 茎秆对砷的积累量较高,分别达到 $8.4、9.0、10.3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,绵麦 45 和小偃 22 的积累量较低,仅仅为 $5.4、4.6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。茎秆不同部位砷含量顺序为:节间 I>节间 II>其他节间,节间 I>穗轴>颖壳。晋麦 85 茎秆不同部位砷含量分别是绵麦 45 和小偃 22 的 1.4~2.3 倍和 1.1~2.2 倍。节间 I 中砷含量分别是节间 II 的 1.1~1.5 倍、其他节间的 1.1~2.3

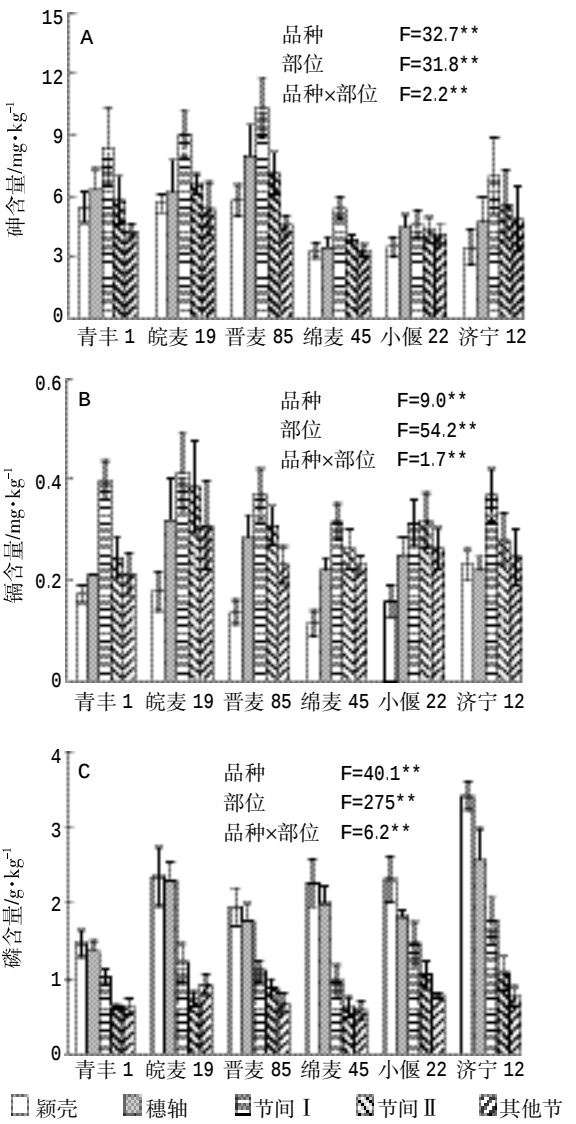


图 3 6 个小麦品种茎秆不同部位砷、镉和磷含量

Figure 3 Concentrations of As, Cd and P in the different parts of wheat straw among the 6 cultivars

倍、穗轴的 1.0~1.6 倍、颖壳的 1.3~2.0 倍。

镉在茎秆不同部位的含量大小顺序与砷的结果一致,其顺序为:节间 I > 节间 II > 其他节间,节间 I > 穗轴 > 颖壳。皖麦 19 茎秆不同部位对镉的积累量较高,绵麦 45 对镉的积累量较低。皖麦 19 茎秆不同部位镉含量是绵麦 45 的 1.3~1.6 倍。除了济宁 12 外,其他品种穗轴中镉含量显著高于颖壳中镉含量,是颖壳中镉含量的 1.2~2.1 倍。

与砷和镉不同,磷在小麦茎秆不同部位含量顺序为:颖壳 > 穗轴 > 节间 I > 节间 II > 其他节间。颖壳中磷含量分别是穗轴的 1.2 倍、节间 I 的 1.8 倍、节间 II 的 2.8 倍、其他节间的 3.2 倍。在 6 个小麦品种间,茎秆不同部位磷含量最高的是济宁 12,最低的是青丰 1。

2.3 茎秆不同部位砷、镉、磷含量分别与籽粒中砷、镉、磷含量的关系

单样本 K-S 检验结果显示,小麦茎秆不同部位砷、镉、磷含量均服从正态分布,因此可以对本试验数据进行皮尔森相关性分析。从表 2 可以看出,小麦籽粒砷含量与颖壳砷含量呈极显著正相关($P<0.01$)、与穗轴和节间 I 中砷含量呈显著正相关($P<0.05$)、与节间 II 和其他节间中砷含量无显著相关性;并且砷含量在颖壳、穗轴、节间 I 和节间 II 之间都呈现显著正相关($P<0.05$)。与砷的结果不同,籽粒中镉的含量与茎秆不

表 2 小麦地上部不同部位砷/镉/磷含量之间的相关性

Table 2 The correlation coefficients(r) of As/Cd/P concentration in different parts of the 6 wheat cultivars

项目	籽粒	颖壳	穗轴	节间 I	节间 II	其他节间
砷						
籽粒	1	0.659**	0.433*	0.450*	0.312	0.046
颖壳		1	0.876**	0.819**	0.800**	0.547**
穗轴			1	0.848**	0.832**	0.623*
节间 I				1	0.946**	0.740**
节间 II					1	0.854**
其他节间						1
镉						
籽粒	1	-0.049	-0.148	-0.096	-0.041	0.110
颖壳		1	0.347	0.532**	0.425*	0.538**
穗轴			1	0.716**	0.810**	0.736**
节间 I				1	0.750**	0.709**
节间 II					1	0.830**
其他节间						1
磷						
籽粒	1	0.526**	0.430*	0.532**	0.440*	0.213
颖壳		1	0.842**	0.639**	0.588**	0.321
穗轴			1	0.596**	0.451*	0.493**
节间 I				1	0.820**	0.482**
节间 II					1	0.531**
其他节间						1

同部位镉含量均无显著相关性;然而,颖壳和穗轴中镉含量却与节间 I、节间 II 和其他节间中镉含量呈显著正相关。磷与砷有着类似的结果,籽粒磷含量与颖壳、穗轴、节间 I 和节间 II 中磷含量呈显著正相关。

2.4 茎秆不同部位磷含量与籽粒砷、镉含量的关系

从表 3 可以看出,小麦籽粒砷含量与穗轴中磷含量呈显著负相关($P<0.05$),与颖壳、节间 I 和节间 II 中磷含量呈极显著正相关($P<0.01$),与其他节间无显著相关性。与砷的结果相反,籽粒镉与不同部位磷之间的相关性主要为正相关,籽粒镉含量与颖壳、穗轴和其他节间中磷含量呈显著正相关($P<0.05$)。

表 3 籽粒砷、镉含量与茎秆不同部位磷含量的相关性

Table 3 Pearson correlations between grain As, grain Cd concentration and the different parts of P concentration

不同部位磷	籽粒砷	籽粒镉
颖壳	-0.685**	0.439*
穗轴	-0.415*	0.507*
节间 I	-0.672**	0.187
节间 II	-0.652**	0.048
其他节间	-0.147	0.444*

3 讨论

国内外已有研究报道指出,小麦籽粒和茎秆对砷、镉的积累能力在不同品种间存在很大差异^[18, 28-29]。Kundu 等^[18]在污染条件下种植 4 个小麦品种,发现砷积累量最高的小麦品种籽粒、叶片和茎秆中砷含量是最低品种的 1.2~2.7 倍。Gao 等^[29]在田间试验条件下进行了多点试验,发现籽粒镉含量在其所种植的 15 个小麦品种间的差异为 2~3 倍。本研究在砷镉复合污染的条件下进行试验,同样发现小麦茎秆对砷、镉的积累存在明显的品种间差异,茎秆不同部位砷、镉含量在 12 个品种间的差异分别达到 1.4~2.3 倍和 1.3~1.6 倍(图 3)。小麦茎秆通常被用于饲养牲畜或者还田,因此茎秆中的砷和镉可能会通过食物链再次进入人体,对人体造成潜在的危害。砷镉复合污染的土壤上种植小麦时,保证籽粒砷镉含量不超标的情况下,可根据茎秆的用途,合理选择小麦品种进行种植。比如,茎秆作饲养用时,可选择茎秆砷、镉含量较低的小麦品种,在本研究中绵麦 45 和小偃 22 茎秆中砷、镉含量要低于其他小麦品种;若小麦茎秆用作土壤重金属修复使用时,可选择茎秆中砷、镉含量较高的品种种植。

关于小麦株高、穗下节间长度与小麦产量和抗倒伏之间的关系前人已有研究^[30-31]。然而,小麦株高和穗下节间长度与籽粒砷、镉、磷含量之间的关系还未见报道。本研究结果表明,小麦株高、穗下节间长与籽粒镉、磷的含量呈显著负相关(表1)。这表明,小麦茎秆对镉和磷的残留会减少籽粒镉和磷的积累。季书勤等^[32]在田间试验条件下也得到类似的结果,他们的研究结果显示,小麦根和叶对镉的残留可以有效减少果实部分镉的积累。对于这一现象,可以从地上部生物量稀释作用和地上部运输距离两方面进行解释。从图2可以看出,小麦节间中镉和磷的含量从下往上呈现逐渐增加的趋势,因此小麦的节间数越多,茎秆的长度越高,生物量越大,茎秆中残留的镉和磷的含量将会越多。在总吸收一定的情况下,较大的地上部生物量将会起到更好的稀释作用。Arduini等^[33]在硬粒小麦中的研究结果同样表明,籽粒镉含量较低的品种具有较长的株高和较大的地上部生物量。然而,小麦籽粒中镉和磷的含量不仅取决于小麦根系对镉和磷的吸收能力,还取决于茎秆向籽粒的运输能力^[12]。因此,穗下节间越长,镉与磷从节间和叶片往穗部的运输可能就需要更多的能量和转运蛋白去完成。与镉和磷不同,小麦株高和穗下节间长与籽粒砷含量无显著相关性(表1)。小麦籽粒中砷的含量主要取决于砷从根系往地上部以及地上部往籽粒的转运,并且穗轴在砷向籽粒转运的过程中起着关键的作用,砷从穗轴向籽粒的转运系数仅为0.12,从穗轴向颖壳的转运系数为0.85^[12]。因此,小麦籽粒中砷的含量与茎秆长度无显著相关性,主要取决于砷在不同器官的分配与再分配过程。

Liu等^[22]和Wang等^[34]进行了大范围的田间试验,分别得出小麦不同部位砷、镉含量的大小顺序为:根系>茎秆>籽粒。本研究同样表明,砷和镉在茎秆不同部位的含量大小顺序为:节间Ⅰ>穗轴>颖壳>籽粒;此外,我们还发现砷、镉含量在不同节间中的大小顺序为:节间Ⅰ>节间Ⅱ>其他节间(图3A和3B)。这些结果表明,节间Ⅰ和穗轴可能是保证小麦籽粒砷镉含量较低的关键部位。与砷和镉的结果不同,小麦茎秆不同部位磷含量从下往上表现出逐渐增加的趋势(图3C)。这些结果表明,砷、镉与磷在小麦地上部运输和分配的过程中存在不一样的机制。这可能由于磷是植物必需的大量元素,并且在植物体内移动性较强,植物在低磷胁迫下会使体内更多的磷优先分配到生殖器官,并且籽粒是小麦体内主要的磷库^[35],籽粒中的

磷含量是茎秆中磷含量的5.2倍^[12]。砷和镉是植物体内非必需元素,并且是有害元素,减少砷和镉往植物地上部的运输,并且进一步减少其往植物生殖器官的运输,可能是植物应对砷镉毒害时的一种自我保护机制^[36-38]。

目前,就土壤理化性质与小麦籽粒镉积累的关系进行了很多研究^[39],并且发现籽粒镉积累与土壤磷含量存在显著相关性。然而,小麦籽粒砷、镉含量与茎秆不同部位砷、镉、磷含量的关系却鲜有报道。我们的研究结果显示,小麦籽粒砷含量与颖壳、穗轴和节间Ⅰ中砷的含量呈显著($P<0.05$)正相关(表2),与节间Ⅱ和其他节间中砷含量无显著相关性。这表明,小麦籽粒砷含量与茎秆上部一些靠近籽粒部位的器官中砷含量变化趋势一致,颖壳中砷含量大小可以很好地表征籽粒砷含量大小。与砷的结果不同,籽粒镉含量与茎秆不同部位镉含量均无显著相关性,因此小麦籽粒镉含量在不同品种间的差异很难用其他部位镉含量进行预估。小麦籽粒砷含量不仅与茎秆不同部位砷含量之间存在相关性,与茎秆中磷含量也存在相关性。我们前期研究结果表明,小麦籽粒砷含量与籽粒磷含量具有显著负相关性^[12],本研究结果进一步表明小麦籽粒砷含量与颖壳、穗轴、节间Ⅰ和节间Ⅱ中磷含量同样呈显著($P<0.05$)负相关(表3)。这些结果与Norton等^[40]在水稻中的研究结果一致,可能是由于磷酸盐与五价砷有着相似的化学结构,磷酸盐会抑制植物对五价砷的吸收和转运^[45]。此外,小麦籽粒中五价砷的含量也占有一定的比例^[19-20],因而小麦茎秆中较高的磷含量会导致籽粒中砷含量较低。除了砷与磷存在显著相关性外,小麦体内镉与磷同样存在显著相关性。小麦籽粒镉含量不仅与籽粒磷含量显著正相关^[12],与穗轴、颖壳中磷含量同样呈显著($P<0.05$)正相关。这与Perrier等^[41]在硬粒麦中的研究结果相似。Qiu等^[46]同样发现磷在花菜(*Brassica parachinensis* L.)镉积累及转移方面起着关键的作用,他们发现镉与磷之间可以形成一些 $Cd-PO_4$ 复合物,这些复合物可能正是植物体内磷与镉显正相关的原因。然而,磷与镉在小麦体内是否可以有效结合,它们结合的量是否可以有效影响小麦籽粒中镉的含量,还需要进一步试验验证。

4 结论

(1)小麦茎秆不同部位砷镉含量存在明显的品种差异。

(2)小麦株高和穗下节间长与小麦籽粒镉含量呈显著负相关、与籽粒砷含量无显著相关性。

(3)小麦籽粒砷含量与颖壳、穗轴和节间 I 中砷含量呈显著正相关,与颖壳和穗轴中磷含量具有显著负相关性;籽粒镉含量与颖壳和穗轴中磷含量呈显著正相关。

参考文献:

- [1] ATSDR Website. Priority list of hazardous substances[EB]. US Department of Health and Human Services. <http://www.atsdr.cdc.gov/SPL/index.html>. 2015.
- [2] Wei B, Yang L. A review of heavy metal contaminations in urban soils, urban road dusts and agricultural soils from China[J]. *Microchem J*, 2010, 94(2):99-107.
- [3] Li Y, Wang H, Wang H, et al. Heavy metal pollution in vegetables grown in the vicinity of a multi-metal mining area in Gejiu, China: Total concentrations, speciation analysis, and health risk[J]. *Environ Sci Pollut Res*, 2014, 21(21):12569-12582.
- [4] Zhao F J, Ma Y, Zhu Y G, et al. Soil contamination in China: Current status and mitigation strategies[J]. *Environ Sci Technol*, 2015, 49(2):750-759.
- [5] 环境保护部, 国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[EB]. <http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/qt/201404/t20140417270670.htm>. 2014. The Ministry of Environmental Protection, The Ministry of Land and Resources. Report on the national soil contamination survey[EB]. <http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/qt/201404/t20140417270670.htm>. 2014.
- [6] 聂胜委, 黄绍敏, 张水清, 等. 不同种类重金属胁迫对两种小麦产量及构成因素的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2012, 31(3):455-463. NIE Sheng-wei, HUANG Shao-min, ZHANG Shui-qing, et al. Effects of varieties heavy metals stress on wheat grain yields of two genotypes and the main ingredients[J]. *J Agro-Environ Sci*, 2012, 31(3):455-463.
- [7] Clemens S, Ma J F. Toxic heavy metal and metalloid accumulation in crop plants and foods[J]. *Annu Rev Plant Biol*, 2016, 67:489-512.
- [8] Smith A H, Steinmaus C M. Health effects of arsenic and chromium in drinking water: Recent human findings[J]. *Ann Rev Publ Health*, 2009, 30:107-122.
- [9] Horiguchi H, Aoshima K, Oguma R, et al. Latest status of cadmium accumulation and its effects on kidneys bone, and erythropoiesis in inhabitants of the formerly cadmium-polluted Jinzu River Basin in Toyama, Japan, after restoration of rice paddies[J]. *Int Arch Occup Environ Health*, 2010, 83(8):953-970.
- [10] Wu Q, Leung J Y S, Geng X, et al. Heavy metal contamination of soil and water in the vicinity of an abandoned e-waste recycling site: Implications for dissemination of heavy metals[J]. *Sci Total Environ*, 2015, 506/507:217-225.
- [11] 储彬彬, 罗立强. 南京栖霞山铅锌矿地区土壤重金属污染评价[J]. *岩矿测试*, 2010, 29(1):5-8. CHU Bin-bin, LUO Li-qiang. Evaluation of heavy metal pollution in soils from Nanjing Qixiashan lead-zinc mines[J]. *Rock Miner Anal*, 2010, 29(1):5-8.
- [12] Shi G L, Zhu S, Bai S, et al. The transportation and accumulation of arsenic, cadmium, and phosphorus in 12 wheat cultivars and their relationships with each other[J]. *J Hazard Mater*, 2015, 299:94-102.
- [13] Sun Y, Li Z, Guo B, et al. Arsenic mitigates cadmium toxicity in rice seedlings[J]. *Environ Exp Bot*, 2008, 64(3):264-270.
- [14] Sánchez-Pardo B, Cantero C, Zornoza P. Alleviation of arsenic stress in cardoon plants via the supply of a low cadmium concentration[J]. *Environ Exp Bot*, 2015, 109:229-234.
- [15] Wu Z, Ren H, McGrath S P, et al. Investigating the contribution of the phosphate transport pathway to arsenic accumulation in rice[J]. *Plant Physiol*, 2011, 157(1):498-508.
- [16] Qiu Q, Wang Y, Yang Z, et al. Effects of phosphorus supplied in soil on subcellular distribution and chemical forms of cadmium in two Chinese flowering cabbage (*Brassica parachinensis* L.) cultivars differing in cadmium accumulation[J]. *Food Chem Toxicol*, 2011, 49(9):2260-2267.
- [17] Stolt P, Asp H, Hultin S. Genetic variation in wheat cadmium accumulation on soils with different cadmium concentrations[J]. *J Agro Crop Sci*, 2006, 192(3):201-208.
- [18] Kundu R, Bhattacharyya K, Majumder A, et al. Response of wheat cultivars to arsenic contamination in polluted soils of West Bengal, India [J]. *Cereal Res Commun*, 2013, 41(1):66-77.
- [19] Zhao F J, Stroud J L, Eagling T, et al. Accumulation, distribution, and speciation of arsenic in wheat grain[J]. *Environ Sci Technol*, 2010, 44(14):5464-5468.
- [20] Shi G L, Lou L Q, Zhang S, et al. Arsenic, copper, and zinc contamination in soil and wheat during coal mining, with assessment of health risks for the inhabitants of Huaibei, China[J]. *Environ Sci Pollut Res*, 2013, 20(12):8435-8445.
- [21] Styblo M, Del Razo L M, Vega L, et al. Comparative toxicity of trivalent and pentavalent inorganic and methylated arsenicals in rat and human cells[J]. *Arch Toxicol*, 2000, 74(6):289-299.
- [22] Liu W X, Liu J W, Wu M Z. Accumulation and translocation of toxic heavy metals in winter wheat (*Triticum aestivum* L.) growing in agricultural soil of Zhengzhou, China[J]. *Bull Environ Contam Toxicol*, 2009, 82(3):343-347.
- [23] Liu C, Luo C, Gao Y, et al. Arsenic contamination and potential health risk implications at an abandoned tungsten mine, Southern China[J]. *Environ Pollut*, 2010, 158(3):820-826.
- [24] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000. BAO Shi-dan. Analysis of agrichemistry in soil[M]. 3rd Edition. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [25] Luo X S, Yu S, Li X D. The mobility, bioavailability, and human bioaccessibility of trace metals in urban soils of Hong Kong[J]. *Appl Geochem*, 2012, 27(5):995-1004.
- [26] Novozamsky I, Lexmond T M, Houba V J G. A single extraction procedure of soil for evaluation of uptake of some heavy-metals by plants[J]. *Int J Environ Chem*, 1993, 51(1/2/3/4):47-58.
- [27] Tao Y, Zhang S, Jian W, et al. Effects of oxalate and phosphate on the release of arsenic from contaminated soils and arsenic accumulation in

- wheat[J]. Chemosphere, 2006, 65(8):1281-1287.
- [28] Kubo K, Kobayashi H, Fujita M, et al. Varietal differences in the absorption and partitioning of cadmium in common wheat (*Triticum aestivum* L.)[J]. Environ Exp Bot, 2016, 124:79-88.
- [29] Gao X, Mohr R M, McLaren D L, et al. Grain cadmium and zinc concentrations in wheat as affected by genotypic variation and potassium chloride fertilization[J]. Field Crop Res, 2011, 122(2):95-103.
- [30] 闵东红, 王 辉, 孟超敏, 等. 不同株高小麦品种抗倒伏性与其亚性状及产量相关性研究[J]. 麦类作物学报, 2001, 21(4):76-79.
MIN Dong-hong, WANG Hui, MENG Chao-min, et al. Studies on the lodging resistance with its subtraits of different height wheat varieties and correlation between plant height and yield[J]. J Trit Crops, 2001, 21(4):76-79.
- [31] 朱新开, 郭文善, 李春燕, 等. 小麦株高及其构成指数与产量及品质的相关性[J]. 麦类作物学报, 2009, 29(6):1034-1038.
ZHU Xin-kai, GUO Wen-shan, LI Chun-yan, et al. Relationship of plant height component indexes with grain yield and quality in wheat [J]. J Trit Crops, 2009, 29(6):1034-1038.
- [32] 季书勤, 郭 瑞, 王汉芳, 等. 河南省主要小麦品种重金属污染评价及镉吸收规律研究[J]. 麦类作物学报, 2006, 26(6):154-157.
JI Shu-qin, GUO Rui, WANG Han-fang, et al. Estimate of pollution by heavy metals on wheat in Henan and the rule of cadmium absorption in wheat[J]. J Trit Crops, 2006, 26(6):154-157.
- [33] Arduini I, Masoni A, Mariotti M, et al. Cadmium uptake and translocation in durum wheat varieties differing in grain-Cd accumulation[J]. Plant Soil, 2014, 60(1):43-49.
- [34] Wang C, Ji J, Yang Z, et al. Effects of soil properties on the transfer of cadmium from soil to wheat in the Yangtze River Delta Region, China: A typical industry-agriculture transition area[J]. Biol Trace Elem Res, 2012, 148(2):264-274.
- [35] Peng Z, Li C. Transport and partitioning of phosphorus in wheat as affected by P with drawal during flag-leaf expansion[J]. Plant Soil, 2005, 268(1):1-11.
- [36] Verbruggen N, Hermans C, Schat H. Mechanisms to cope with arsenic or cadmium excess in plants[J]. Curr Opin Plant Biol, 2009, 12(3):364-372.
- [37] Liu W, Wood B A, Raab A, et al. Complexation of arsenite with phytochelatins reduces arsenite efflux and translocation from roots to shoots in Arabidopsis[J]. Plant Physiol, 2010, 152(4):2211-2221.
- [38] Seyfferth A L, McCurdy S, Schaefer M V, et al. Arsenic concentrations in paddy soil and rice and health implications for major rice-growing regions of Cambodia[J]. Environ Sci Technol, 2014, 48(9):4699-4706.
- [39] Nan Z, Zhao C, Li J, et al. Relations between soil properties and selected heavy metal concentrations in spring wheat (*Triticum aestivum* L.) grown in contaminated soils[J]. Water, Air, Soil Pollut, 2002, 133(1/2/3/4):205-213.
- [40] Norton G J, Islam M R, Duan G L, et al. Arsenic shoot-grain relationships in field grown rice cultivars[J]. Environ Sci Technol, 2010, 44(4):1471-1477.
- [41] Perrier F, Yan B, Candaup F, et al. Variability in grain cadmium concentration among durum wheat cultivars: Impact of aboveground biomass partitioning[J]. Plant Soil, 2016, 404(1):307-320.