

张 敏,赵全利,王 钊,等. 外源硅和有机质对污染土壤中小麦砷、铅累积的影响[J]. 江苏农业科学,2017,45(24):285-288.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2017.24.075

外源硅和有机质对污染土壤中小麦砷、铅累积的影响

张 敏¹, 赵全利², 王 钊³, 杨 阳¹, 薛培英¹, 冯宇佳¹, 刘文菊¹

(1. 河北农业大学资源与环境科学学院, 河北保定 071000; 2. 河北农业大学教学试验场, 河北保定 071000;

3. 山东省肥城市环境保护局, 山东泰安 271600)

摘要:研究了外源硅和有机质对铅锌尾矿区污染土壤中生长的小麦各部位砷(As)、铅(Pb)累积的影响。结果表明,小麦不同部位砷、铅累积的规律为根系>秸秆>颖壳>籽粒;与对照相比,单施硅可促进小麦生长,降低小麦根系、秸秆和颖壳中 As 浓度,幅度分别为 19.7%、18.5%和 14.3%,同时也降低了小麦地上部 Pb 浓度,幅度为 27.6%~47.3%;添加有机质处理则抑制了小麦的生长且增加了小麦体内砷和铅的累积;同时施用硅和有机质的处理对小麦生长及其体内砷、铅的累积情况与单施硅处理没有显著差异。可见,单施硅可促进铅锌矿区农田土壤中小麦的生长并在一定程度上降低其体内砷、铅的累积。

关键词:硅;有机质;小麦;重金属;污染;电感耦合等离子体质谱法;铅锌矿区

中图分类号: X53 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2017)24-0285-04

土壤是人类赖以生存的主要自然资源之一,然而近年来遭受重金属污染的土壤面积逐渐扩大,且污染程度逐年加重^[1]。土壤重金属污染主要来源于自然因素和人为因素,其中工业“三废”的排放、污灌、污泥农用、矿山开采和冶炼过程是造成土壤重金属污染的主要原因^[2]。我国是矿产大国,其中铅锌矿分布广泛、资源丰富,是优势矿种^[3]。铅锌矿开采和冶炼产生的废水、废渣随意排放造成周边土壤和植物重金属污染^[4]。已有研究表明,铅锌矿区土壤中易遭受 Pb、Zn、Cd、Cu、As 的污染,其中 Pb、As 污染尤为严重^[5-7],从而影响了作物的正常生长,使农产品质量下降^[8],并进一步通过食物链危害人体健康^[9]。基于铅锌矿区附近农田土壤-粮食作物中重金属的污染问题,可通过农艺措施降低土壤中重金属的有效性,改变粮食作物不同部位对重金属的累积。研究表明,硅和有机质对土壤中砷的生物有效性及水稻中砷的累积都有一定的调控作用^[10-12]。施硅还可通过吸附和沉淀等作用降低土壤铅活性^[13],并竞争性地抑制砷在水稻体内转运^[14-15];增施有机肥可增加土壤重金属络合的吸附点位^[16],从而固定土壤重金属,降低其有效性和迁移性,这 2 项农艺措施具有较强的可行性,能够减少重金属在一些植物体内尤其是可食部位的累积。我国部分铅锌矿区主要的耕作方式为稻-麦轮作,硅和有机质的添加对水稻铅、砷吸收和累积的影响研究近年来较为受关注,而关于二者如何调控铅锌矿区小麦中铅、砷累积的研究较少。基于此,本研究拟采用铅锌尾矿

区污染土壤种植的小麦为对象,探讨外源硅和有机质对小麦各部位砷、铅累积的影响。

1 材料与方法

1.1 供试土壤和材料

供试小麦品种为石新 828。供试土壤采自某铅锌尾矿附近的农田(29°59′54.1″N,120°46′40.7″E),种植模式为水稻-小麦轮作,其基本理化性质见表 1。其中 pH 值用 H₂O 浸提,水土比为 2.5:1。参照《食用农产品产地环境质量评价标准》(HJ/T 332—2006),该土壤中的总锌含量在理想范围,且锌又是小麦必需的营养元素,故本研究只关注了土壤中砷和铅 2 个污染元素。

表 1 供试土壤的基本理化性质

成分	含量
pH 值	7.72
有机质含量(g/kg)	19.8
碱解氮含量(mg/kg)	49.9
速效磷含量(mg/kg)	12.9
速效钾含量(mg/kg)	287
总砷含量(mg/kg)	383
总铅含量(mg/kg)	3 327
总锌含量(mg/kg)	367
有效硅含量(SiO ₂ ,mg/kg)	410

1.2 试验设计

根据前期的研究结果^[17],加硅处理采用 20 g/kg 硅胶土,以硅胶(含 81.6% SiO₂·H₂O)的形式加入。因为腐殖酸对金属离子有较高的吸附量,风化煤腐殖酸同土壤有机质中天然存在的腐殖酸有相似的结构和性质,所以添加有机质处理采用 10 g/kg 风化煤腐殖酸土,供试风化煤腐殖酸为黑色粉末,含水量≤25%,有机质含量(干基)75%,总腐殖酸含量(干基)40%。每个处理设 4 个重复,小麦 4 株/盆,随机排列。

收稿日期:2016-05-10

基金项目:国家自然科学基金(编号:41471398)。

作者简介:张 敏(1991—),女,河北邢台人,硕士研究生,主要从事农业环境污染与治理研究,E-mail:zmin04@163.com;共同第一作者:赵全利(1971—),男,河北沧州人,农艺师,主要从事退化土壤地力提升方面的研究,E-mail:ndnczql@163.com。

通信作者:刘文菊,博士,教授,博士生导师,主要从事土壤污染与防治研究。E-mail:liuwj@hebau.edu.cn。

小麦采用盆(内径 10.5 cm,高 16 cm)栽培养,盆土为采集的土壤风干后磨碎,过 2 mm 筛后混入底肥。底肥中氮磷钾的施入量分别为 0.15 g/kg P_2O_5 ($CaH_2PO_4 \cdot H_2O$),N(尿素)和 K_2O (KCl)各 0.2 g/kg。试验设 4 个处理,以不加硅胶和风化煤为对照(CK),每盆装土 1 kg;添加硅处理(+Si)每盆土壤加入 20 g 硅胶;添加有机质处理(+OM)每盆土壤加入 10 g 风化煤腐殖酸;添加硅和有机质处理(+Si+OM)每盆供试土壤加入 20 g 硅胶和 10 g 风化煤腐殖酸。盆土与硅胶及风化煤,充分混合均匀后装盆、灌水,土壤含水量保持在田间持水量的 75%,平衡 4 周后播种小麦。选取籽粒饱满、均匀的小麦种子若干,用 10%的 H_2O_2 浸泡 15 min 后,用去离子水洗净,播种后定期浇水,于人工光照室内进行培养,室内环境条件为昼夜室温 28 ℃/15 ℃,光照时间 14 h/d,光照度(240 ± 20) $\mu mol/(m^2 \cdot s)$ 。小麦生长至成熟后收获(本试验时间为 2012 年 10 月至 2013 年 6 月)。

1.3 试验方法

小麦成熟后采集小麦秸秆、籽粒和颖壳、根系,用去离子水、超纯水冲洗干净后装入牛皮纸袋,再干燥磨粉。小麦秸秆和根系放入烘箱(GZX-9140 MEB,上海博讯实业有限公司医疗设备厂),在 85 ℃下杀青 30 min,在 70 ℃下烘至恒质量,称量干物质质量。然后用不锈钢内胆的粉碎机研磨,直至细致均匀的粉末,待消解测定总砷含量。小麦籽粒和颖壳放入冷冻干燥机(LGJ-10,北京四环科学仪器厂)进行冷冻干燥,称量干物质质量。然后用瓷质研钵进行脱壳、研磨,用于籽粒和颖壳中砷总量的测定。

小麦籽粒、颖壳、秸秆和根系采用高压闷罐消解法^[5]进行前处理。称取植物样品 0.2 g(精确至 0.000 1 g)放入聚四氟乙烯内胆中(颖壳称取 0.1 g),加入 5 mL 优级纯的浓硝酸,放置过夜,次日装罐放入烘箱(GZX-9140 MEB,上海博讯实业有限公司医疗设备厂)中进行消解。采用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)(Agilent7500a)测定消煮液中总砷

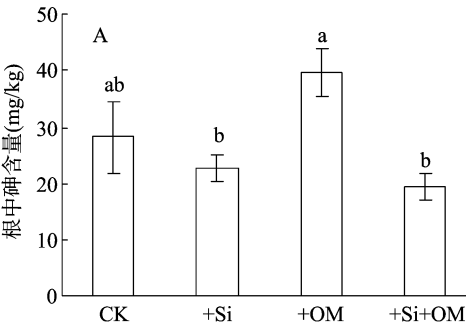


图1 外源硅和有机质对小麦根中砷与铅浓度的影响

2.3 外源硅和有机质对小麦秸秆中砷、铅含量的影响

从图 2-A 可以看出, +Si、+OM 和 +Si+OM 处理的小麦秸秆中 As 含量范围为 2.08~2.89 mg/kg,与 CK 相比差异不显著,与对照相比, +Si 处理的秸秆中 As 含量降低了 18.5%。从图 2-B 可以看出,各处理小麦秸秆中 Pb 含量范围为 5.04~9.97 mg/kg,处理间差异显著($P < 0.05$)。+OM 处理的小麦秸秆中 Pb 含量最高,为 9.97 mg/kg,显著高于其他处理($P < 0.05$)。

农作物种植和畜牧业生产过程中的青贮饲料或有机肥原

含量和铅的含量。

1.4 数据分析

采用 Microsoft Excel 2007 进行数据整理,SPSS 17.0 进行数据分析。

2 结果与分析

2.1 外源硅和有机质对小麦生物量的影响

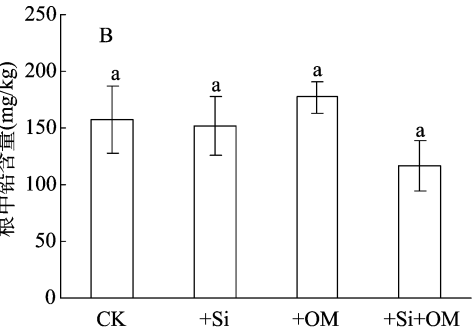
从小麦秸秆的生物量(表 2)来看, +Si 处理的小麦秸秆生物量最高,显著高于 +OM 处理,但与对照和 +Si+OM 处理差异不显著,较二者分别高出 11.9% 和 7.4%。穗质量是小麦总生物量中最为重要的一部分,各处理与秸秆趋势一致, +Si 处理的小麦穗质量最高,比对照和 +Si+OM 处理高出 47.6% 和 36.9%,二者之间的差异不显著,但显著高于有机质(+OM)处理,增加幅度为 83.1%。可见,铅锌矿区的砷、铅污染土壤施用硅可以促进小麦的生长。

表 2 外源硅和有机质对小麦秸秆和麦穗干质量的影响

处理	秸秆质量(g)	麦穗质量(g)
CK	1.483 ± 0.054ab	0.174 ± 0.023ab
+Si	1.684 ± 0.072a	0.332 ± 0.089a
+OM	1.274 ± 0.093b	0.056 ± 0.011b
+Si+OM	1.559 ± 0.159ab	0.210 ± 0.034ab

2.2 外源硅和有机质对小麦根中砷、铅含量的影响

从图 1-A 可见,各处理根中 As 含量存在较大差异,其中 +OM 处理的 As 含量最高,为 39.9 mg/kg,显著高于其他处理($P < 0.05$)。与对照相比, +Si 和 +Si+OM 处理根中砷含量分别低 19.7% 和 30.6%,而 +OM 处理较对照高 29.4%。各处理根中铅含量(图 1-B)差异相对较小,处理间差异不显著, +Si、+OM 和 +Si+OM 处理的小麦根中 Pb 含量在 117~177 mg/kg 之间,与对照相比 +Si 和 +Si+OM 处理根中 Pb 含量分别降低了 3.91% 和 25.9%,而 +OM 处理却增加了 12.3%。



料均以冬小麦秸秆为原料,因此冬小麦秸秆中重金属含量必须符合《饲料卫生标准》(GB 13078—2001)(As ≤ 10 mg/kg, Pb ≤ 8 mg/kg)和有机肥料中重金属限量标准(NY 525—2012《有机肥料》)(As ≤ 15 mg/kg, Pb ≤ 50 mg/kg)。由图 2 可知,除了对照, +OM 处理的秸秆中 Pb 含量接近或略高于国家饲料卫生标准中的安全限值外, +Si 处理及 +Si+OM 处理下小麦秸秆中 As、Pb 含量均未超过我国饲料卫生标准的安全限值,但是秸秆中砷和铅的浓度远低于有机肥料中重金属限量标准。由此可见,施用硅后小麦秸秆无论是做动物饲料还是

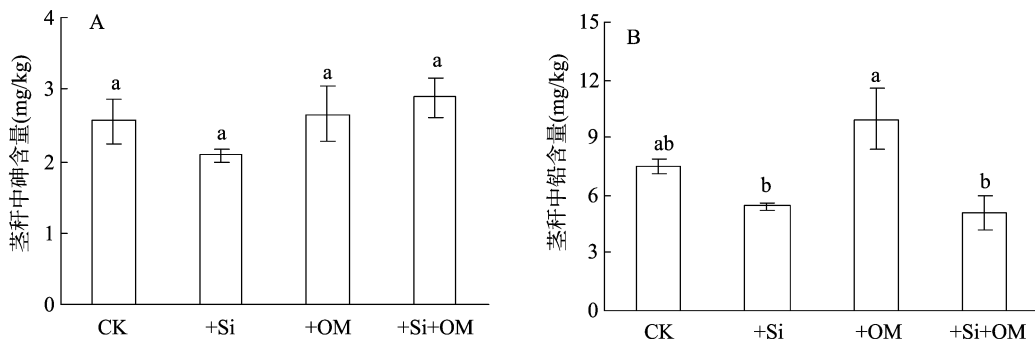


图2 外源硅和有机质对小麦秸秆中砷与铅浓度影响

作为加工有机肥的原料都是安全的。

2.4 外源硅和有机质对小麦颖壳中砷、铅含量的影响

从图 3-A 可以看出,各处理小麦颖壳中 As 含量范围为 0.85 ~ 1.20 mg/kg,处理间差异不显著,+Si、+OM 和 +Si + OM 处理分别比对照低 14.3%、29.4% 和 10.2%。从图 3-B

各处理颖壳中铅含量的数据来看,各处理小麦颖壳中 Pb 含量差异显著 ($P < 0.05$),范围为 0.95 ~ 2.09 mg/kg。+Si、+OM 和 +Si + OM 处理的小麦颖壳中 Pb 含量显著低于对照,降低幅度分别为 47.3%、41.2% 和 54.4%,但 3 个处理之间铅含量差异不显著。

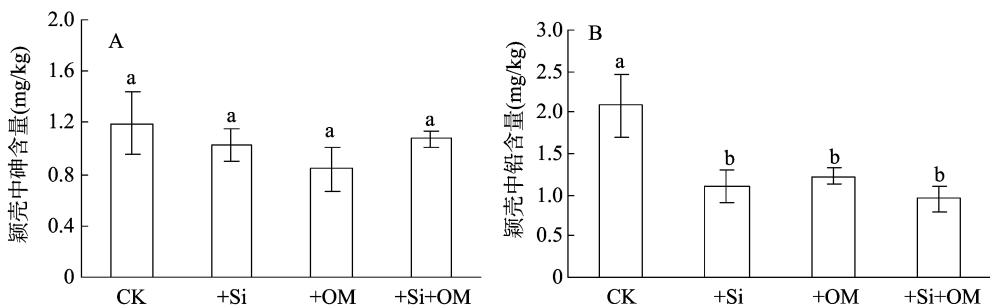


图3 外源硅和有机质对小麦颖壳中砷与铅浓度影响

2.5 外源硅和有机质对小麦籽粒中砷、铅含量的影响

由图 4 可见,无论对照还是处理,污染土中生长的小麦籽粒中 As、Pb 含量均超过食品安全国家标准的食物中污染物限量标准 (GB 2762—2012) ($As \leq 0.5$ mg/kg, $Pb \leq 0.2$ mg/kg)。小麦籽粒中 As 含量在对照及处理间差异不显著 ($P > 0.05$),含量范围为 0.54 ~ 0.69 mg/kg,超出标准限值 9.0% ~ 38.7%。各处理小麦籽粒中 Pb 含量差异显著 ($P < 0.05$),含量范围为 0.53 ~ 0.86 mg/kg,为标准限值的 2.7 ~ 4.3 倍。+Si + OM 处理的小麦籽粒中铅含量最低,为 0.53 mg/kg,显著低于 CK ($P < 0.05$),其次为 +Si 和 +OM 处理,籽粒中铅含量分别为 0.6 和 0.78 mg/kg,比对照低 30.4% 和 9.3%。

2.6 外源硅和有机质对小麦秸秆、籽粒富集系数的影响

图 5 为不同处理下小麦秸秆 As、Pb 富集系数,可见小麦秸秆对土壤中重金属 As、Pb 的富集能力存在显著差异 ($P < 0.05$)。秸秆中 As 的富集系数范围为 0.040 ~ 0.104, +OM 处理小麦秸秆中 As 富集系数最高,为 0.104,显著高于其他处理 ($P < 0.05$)。与对照相比, +Si 和 +Si + OM 处理的小麦秸秆中 As 富集系数差异不显著, +OM 处理的小麦秸秆中 As 富集系数比对照高 1.3 倍。秸秆中 Pb 的富集系数范围为 0.0015 ~ 0.0030, +OM 处理小麦秸秆中 Pb 富集系数最高,为 0.0030,显著高于其他处理 ($P < 0.05$)。+Si 和 +Si + OM 处理的小麦秸秆中 Pb 富集系数低于对照, +OM 处理的小麦秸秆中 Pb 富集系数高于对照,但差异不显著。

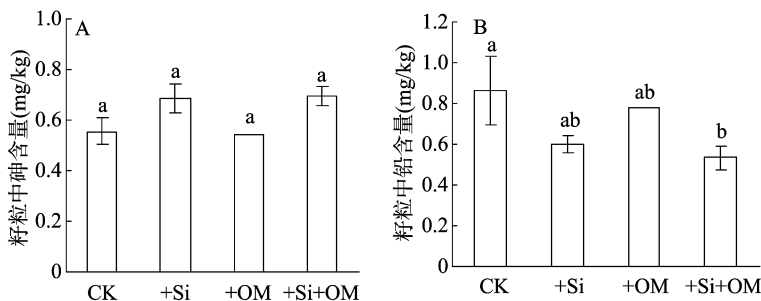


图4 外源硅和有机质对小麦籽粒中砷与铅浓度影响

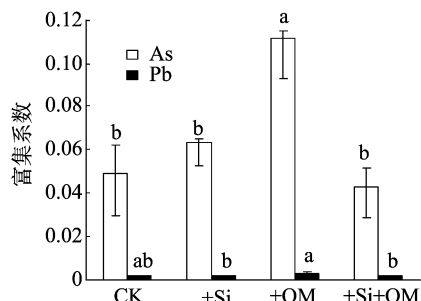


图5 外源硅和有机质对小麦秸秆 As、Pb 富集系数的影响

图 6 为不同处理下小麦籽粒 As、Pb 富集系数。从图 6 可以看出,不同处理下小麦籽粒 As、Pb 富集系数差异不显著,范围分别为 0.001 ~ 0.002 和 0.000 2 ~ 0.000 3,均低于 0.002。小麦秸秆和籽粒的砷富集系数要远高于铅富集系数,说明在同一种土壤上小麦对砷的累积能力要远高于铅。

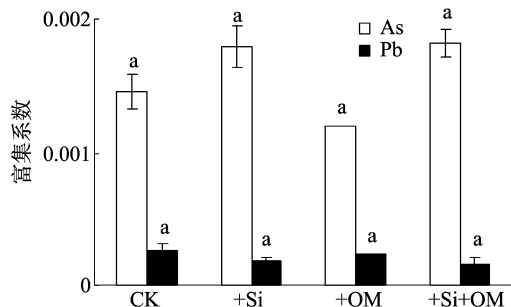


图 6 外源硅和有机质对小麦籽粒 As、Pb 富集系数的影响

3 讨论

重金属在作物中累积进而危害人体健康,因此降低土壤中重金属有效性及其在作物中累积是保障农产品安全和人体健康的有效途径。本研究发现硅在一定程度上可以促进污染土壤中小麦生长,而有机质的添加抑制了污染土壤中小麦的生长。这是因为硅是植物生长的有益元素,添加外源硅势必会促进小麦的生长,小麦植株生长旺盛从而增强其抵抗重金属毒性的能力。从本研究结果还可看到,加硅处理降低了小麦对砷的吸收,降低了砷、铅在秸秆中累积(图 1 和图 2)。

本研究的土壤是铅锌矿区周围的农田污染土壤,在小麦种植季土壤保持良好的通气状态,土壤溶液中的砷主要以氧化态五价砷酸根和砷酸氢根的阴离子形式存在,带负电的有机胶体不吸附以阴离子形式存在的砷,使大量砷残留在土壤溶液中(土壤溶液中砷的含量为 800 ~ 1 000 $\mu\text{g/L}$),无疑大大增加了土壤中砷的生物有效性,易对小麦产生生物毒害,添加有机质降低了小麦秸秆和穗子的生物量,抑制了小麦的生长,并且增加了小麦对砷铅的吸收(图 1)及其在地上部的累积(图 2、图 4)。因此,在铅砷复合污染的土壤上种植小麦,为了促进作物生长和降低其体内污染物的含量,宜施用硅肥但不宜施用腐殖酸类有机肥。

研究表明,小麦秸秆中 As、Pb 含量均未超过国家饲料卫生标准($\text{As} \leq 10 \text{ mg/kg}$, $\text{Pb} \leq 8 \text{ mg/kg}$)和有机肥料中重金属限量标准($\text{As} \leq 15 \text{ mg/kg}$, $\text{Pb} \leq 50 \text{ mg/kg}$),只有 +OM 处理的秸秆中 Pb 含量略高于标准。因此,此污染土中种植的小麦秸秆可用作青贮饲料,也可用作有机肥或生产商品有机肥的原料。小麦籽粒中 As、Pb 含量均超过食品安全国家标准的污染物限量标准($\text{As} \leq 0.5 \text{ mg/kg}$, $\text{Pb} \leq 0.2 \text{ mg/kg}$)。可见,小麦对 As 具有较强的由秸秆向籽粒转运的能力,小麦籽粒中 As 主要来源于 As 从秸秆向籽粒中的转运。有研究表明,土壤和农作物中 Pb 含量与大气中 Pb 的干湿沉降存在正相关关系,且在污染源附近及下风向的土壤-农作物尤为严重^[18-19]。因此小麦籽粒中的 Pb 除了来源于对土壤中重金属的吸收积累外,还可能来源于大气沉降。加硅处理对于降低小麦体内

As、Pb 的累积有一定作用,但是并没有把籽粒中这 2 种重金属的含量降低到安全限值内,可能的原因是本研究野外采集的原状污染土中砷铅的浓度过高(As : 383 mg/kg , Pb : 3 327 mg/kg),而加入硅的量仅为硅胶 20 g/kg ,因此,加入的硅不足以大幅度降低砷、铅在土壤中有有效性,从而使一部分砷、铅被小麦根系吸收后被转运至籽粒。因此,在今后的研究中应考虑硅的不同施用量和施用方式对轻一中一重度污染土中砷、铅在小麦体内累积和转运的影响。

参考文献:

- [1] 刘志勇. 小麦重金属污染及防治[J]. 中国经济报告, 2013(7): 23-24.
- [2] 邵学新, 吴明, 蒋科毅. 土壤重金属污染来源及其解析研究进展[J]. 广东微量元素科学, 2007, 14(4): 1-6.
- [3] 雷力, 周兴龙, 文书明, 等. 我国铅锌矿资源特点及开发利用现状[J]. 矿业快报, 2007, 23(9): 1-4.
- [4] 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, 13.
- [5] 王莹, 赵全利, 胡莹, 等. 上虞某铅锌矿区周边土壤植物重金属含量及其污染评价[J]. 环境化学, 2011, 30(7): 1354-1360.
- [6] Shikazono N, Zakir H M, Sudo Y. Zinc contamination in river water and sediments at Taisyu Zn-Pb mine area, Tsushima Island, Japan[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2008, 98(3): 80-88.
- [7] Cappuyns V, Swennen R, Vandamme A, et al. Environmental impact of the former Pb-Zn mining and smelting in East Belgium[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2006, 88(1/2/3): 6-9.
- [8] 梁桂莲, 钱建平, 张力. 我国铅锌矿污染特点及修复技术[J]. 矿业研究与开发, 2011, 31(4): 84-87.
- [9] 徐佩, 吴超. 我国铅锌矿山土壤重金属污染综述及现状分析[J]. 环境保护前沿, 2014(4): 187-194.
- [10] 王钊, 杨阳, 崔江慧, 等. 外源硅和有机质对水稻土溶液中砷形态变化的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(2): 183-188.
- [11] 王莹. 水稻根际砷的行为及其调控机制研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2011.
- [12] 陈丽娜, 柳晓娟, 刘文菊, 等. 水分管理模式对水稻根区砷铁磷动态变化规律的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(1): 93-98.
- [13] 颜奕华, 李金星, 郑子成, 等. 磷和硅对土壤-烟草系统中铅迁移的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2014, 30(5): 640-645.
- [14] 刘文菊, 赵方杰. 植物砷吸收与代谢的研究进展[J]. 环境化学, 2011, 30(1): 56-62.
- [15] 赵方杰. 水稻砷的吸收机理及阻控对策[J]. 植物生理学报, 2014, 50(5): 569-576.
- [16] 吴曼, 徐明岗, 徐绍辉, 等. 有机质对红壤和黑土中外源铅镉稳定化过程的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(3): 461-467.
- [17] Liu W J, McGrath S P, Zhao F J. Silicon has opposite effects on the accumulation of inorganic and methylated arsenic species in rice[J]. Plant and Soil, 2014, 376(1/2): 423-431.
- [18] 章明奎, 刘兆云, 周翠. 铅锌矿区附近大气沉降对蔬菜中重金属积累的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2010, 36(2): 221-229.
- [19] 孙洪欣, 薛培英, 赵全利, 等. 镉、铅积累与转运在冬小麦品种间的差异[J]. 麦类作物学报, 2015, 35(8): 1161-1167.