

矿井废水灌溉对小麦生理特性及重金属积累的影响 *

马守臣^{1,2} 马守田² 邵云² 姜丽娜² 李春喜^{2*}

(¹河南理工大学测绘与国土信息工程学院矿山空间信息技术国家测绘局重点实验室, 河南焦作 454000; ²河南师范大学生命科学学院, 河南新乡 453007)

摘要 以井水灌溉为对照 (CK), 采用盆栽试验研究了矿井废水灌溉对小麦生理特性和重金属积累的影响。设置了3个矿区废水灌溉处理:洗煤废水(T_1)、经沉淀处理的洗煤废水(T_2)和煤矸石淋溶水(T_3), 于返青期开始进行矿区废水灌溉处理。结果表明:矿井废水灌溉处理对小麦的生长发育和产量均有不同程度的负面影响。到开花期时, T_1 、 T_2 和 T_3 处理小麦的单茎质量和叶面积、根系活力和光合速率均显著低于对照 ($P<0.05$), T_3 处理小麦株高和叶绿素含量 (SPAD 值) 显著降低 ($P<0.05$); T_1 、 T_2 和 T_3 处理的籽粒产量分别比对照下降 15.4%、9.8% 和 17.8%。此外, 矿井废水灌溉处理小麦籽粒中 Cr、Pb、Cu 和 Zn 的含量均显著高于对照, 表明矿井废水灌溉导致重金属在小麦籽粒中积累。

关键词 矿井废水 灌溉 生理特性 冬小麦 重金属

文章编号 1001-9332(2013)11-3243-06 **中图分类号** X53 **文献标识码** A

Effects of irrigation with mine wastewater on physiological characters and heavy metals accumulation of winter wheat. MA Shou-chen^{1,2}, MA Shou-tian², SHAO Yun², JIANG Li-na², LI Chun-xi² (¹Key Laboratory of Mine Spatial Information Technologies of SBSM, School of Surveying and Land Information Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, Henan, China; ²College of Life Science, Henan Normal University, Xinxiang 453007, Henan, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2013, 24(11): 3243–3248.

Abstract: A pot experiment was conducted to study the effects of irrigation with mine wastewater on the physiological characters and heavy metals accumulation of winter wheat. Three treatments were installed, i. e., irrigation with coal-washing wastewater (T_1), irrigation with coal-washing wastewater after its precipitation (T_2), and irrigation with coal gangue leachate (T_3), taking the well water irrigation as the control (CK). The plants were irrigated with mine wastewater after the turning green stage. Irrigation with mine wastewater had negative effects on the winter wheat growth and grain yield. At anthesis stage, the leaf area, dry mass per stem, root activity, and net photosynthetic rate of winter wheat in treatments T_1 , T_2 , and T_3 were significantly lower than those in CK ($P<0.05$), the plant height and leaf chlorophyll content in T_3 decreased significantly ($P<0.05$), and the grain yield in T_1 , T_2 and T_3 was decreased by 15.4%, 9.8%, and 17.8%, respectively. In addition, the heavy metals (Cr, Pb, Cu and Zn) contents in the grain of winter wheat under mine wastewater irrigation were significantly higher than those in CK, suggesting that the irrigation with mine wastewater could result in the heavy metals accumulation in wheat grain.

Key words: mine wastewater; irrigation; physiological character; winter wheat; heavy metal.

随着国民经济的快速发展, 农业灌溉用水不断被工业和城市生活用水所挤占。为了缓解农业用水的紧张形势, 越来越多的污水(包括工业废水、生活污水等)被用于农业灌溉。在污水灌溉弥补农业用

水不足的同时, 所带来生态和食品安全问题也逐渐引起人们的重视, 尤其是污水中的重金属、非金属有毒物质和无机盐类对作物和土壤环境造成危害倍受关注^[1-4]。近年来针对污水灌溉的安全性展开了大量研究^[5-7], 但是研究内容主要局限于城市生活污水和工业废水灌溉及其对土壤和农作物造成的影响。在煤矿区, 矿井废水是一种具有行业特点的污染

* 河南省重点科技攻关项目(122102310353)和国家“十二五”科技支撑计划项目(2012BAD14B08)资助。

* * 通讯作者。E-mail: 13703731637@sina.com

2013-02-01 收稿, 2013-09-02 接受。

源,但也是一种宝贵的水资源。全国每年矿井水排放量约有 42 亿 m^3 ^[8],是矿区农田灌溉的潜在水资源。然而,当前针对矿区废水用于农业灌溉安全性的研究鲜见报道。矿区废水中普遍含有以煤粉和岩粉形成的悬浮物以及重金属等有毒、有害物质,有的矿区废水还呈现出高矿化度或酸性。虽然有些矿区矿井废水经过了净化处理,但仍然存在少量的污染物,长期用于农业灌溉也会给土壤环境带来一定的风险。近年来重金属污染因其化学行为和生态效应的复杂性以及对人类健康危害的严重性,在煤矿区已引起广泛的关注,并对重金属污染问题进行了大量的相关研究,但已有研究主要集中在矿区土壤环境质量评价及其生物有效性等方面^[9-12],对矿区污染农田作物的生理生态特性和粮食生产安全问题的研究相对较少。我国煤矿业主要集中在半干旱、干旱的华北、东北、华东和中原地区,而这些区域同时也是我国的农业主产区,在这些地区矿粮复合区面积占耕地总面积的 42.7%^[13],小麦是该地区的主要粮食作物。由于在小麦生长季节干旱少雨,补充灌溉是这些地区保证粮食丰产的重要农业措施。在矿粮复合区针对矿井废水灌溉开展研究,对于开发利用矿井废水资源、保障矿区粮食和食品生产安全意义重大。本研究采用盆栽试验,探讨不同类型矿井废水处理下小麦的生理生态特征和重金属积累情况,对矿井水灌溉作物的可行性进行研究,以期为科学、安全利用矿井水资源提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料与试验设计

采用盆栽试验,供试品种为郑麦 9023,于 2010 年 10 月至 2011 年 6 月在河南新乡中国农业科学院农田灌溉研究所遮雨棚下进行。每盆(直径 30 cm,高 40 cm)装干土 15 kg,盆栽用土取自该研究所小麦试验田耕层土壤(0~20 cm),土壤 pH 值为 7.6,土壤有机质含量 13.33 g·kg⁻¹,全氮含量 1.13 g·kg⁻¹,速效氮含量 217 mg·kg⁻¹,速效磷含量 9.19 mg·kg⁻¹,速效钾含量 213.10 mg·kg⁻¹。设 3 个矿区废水灌溉处理:洗煤废水(T_1)、经沉淀处理的洗煤废水(T_2)和煤矸石淋溶水(T_3),以井水灌溉作为对照(CK)。每个处理重复 8 盆(5 盆用于破坏性取样,3 盆用来测产),每盆点播 30 粒种子,于三叶期每盆定苗 12 株。返青前各处理均浇灌井水,使土壤含水量保持在 60%~75% 田间持水量。于返青期开始进行矿区废水灌溉处理,每周浇灌一次矿井

废水,每次每盆浇矿井废水约 750 mL,一周内如土壤含水量低于 60% 田间持水量,浇灌对照井水使土壤含水量始终保持在 60%~75% 田间持水量。

表 1 为试验土壤中 4 种重金属的含量以及河南省的土壤元素背景值。与背景值比较,试验土壤中除 Zn 以外,Cu、Cr、Pb 含量的实测值均低于河南省的土壤元素环境背景值。与国家土壤环境质量二级标准相比,试验土壤中 Zn、Cd、Cu、Cr 含量的实测值均低于国家二级标准。试验灌溉用水水质如表 2,3 个类型矿井废水均呈酸性,Cr 和 Pb 含量超过国家农田灌溉水质标准。

1.2 测定项目与方法

1.2.1 株高、叶面积和单茎干物质 于拔节期、开花期每个处理随机取 15 茎(在破坏取样盆中取样,每盆取 3 茎)测株高和叶面积。之后将样品用自来水冲洗干净,装入纸袋中,105 °C 杀青 1 h,85 °C 烘至恒量,称量。

1.2.2 叶绿素含量(SPAD 值) 于拔节期、开花期每个处理随机取 15 茎,采用日本 Konica Minolta 公司生产的 SPAD-502 分别测定倒二叶、旗叶的叶绿素值。

1.2.3 净光合速率(P_n) 在拔节期、开花期选取

表 1 试验土壤重金属元素背景值

Table 1 Background value of heavy metals content in test soil (mg·kg⁻¹)

元素 Element	河南省背景值 Background value in Henan Province	土壤质量二级标准 National Environmental Quality Standards Grade II	试验土壤实测值 Measured value in test soil
Zn	≤74.2	≤200	180.15
Pb	≤19.6	≤250	13.2
Cr	≤63.8	≤150	14.6
Cu	≤19.7	≤50	13.84

表 2 灌溉用水的水质

Table 2 Water quality of irrigation water

处理 Treatment	pH	Cr (mg·kg ⁻¹)	Cu (mg·kg ⁻¹)	Pb (mg·kg ⁻¹)	Zn (mg·kg ⁻¹)
T_1	5.8	0.57	0.32	0.35	0.98
T_2	6.0	0.39	0.29	0.30	0.77
T_3	5.2	0.61	0.37	0.51	1.19
CK	7.8	0.03	0.21	0.10	1.06
农田灌溉标准 Standard of agricultural irrigation	5.5~8.5	0.1	1.0	0.2	2.0

T_1 :洗煤废水 Coal washing wastewater; T_2 :经沉淀处理的洗煤废水 Coal washing wastewater after precipitating; T_3 :煤矸石淋溶水 Leachate of coal gangue; CK:井水 Well water. 下同 The same below.

晴朗天气9:00—11:00,采用美国Li-6400便携式光合测定系统分别测定倒二叶、旗叶的光合速率,每处理重复6次。

1.2.4 小麦根系活力于拔节期、开花期每处理随机取5株小麦的根系(在破坏取样盆中取样,每盆取1株),采用氯化三苯基四氮唑(TTC)法测定各处理小麦根系活力。

成熟期收获后测定各处理小麦的穗粒重、穗粒数、千粒重、生物产量和籽粒产量等指标,并将小麦植株分成根、茎秆+叶、穗轴+颖壳和籽粒4个部位,测定各部位中重金属Cu、Cr、Pb、Zn的含量。

1.3 数据处理

使用Excel软件对试验数据进行分析与作图,用SPSS软件对试验数据进行统计分析,采用LSD多重比较法进行方差分析和差异显著性检验($\alpha=0.05$)。

2 结果与分析

2.1 矿井废水灌溉对小麦株高、叶面积和干物质积累的影响

从表3可以看出,矿井废水灌溉对小麦的株高、叶面积和干物质有不同程度的影响。在拔节期和开花期,研石淋溶水灌溉(T_3)小麦的株高、叶面积和茎干物质均显著小于对照(CK)。 T_1 和 T_2 处理对株高没有显著影响。在拔节期 T_2 处理的单茎质量和叶面积与对照没有显著差异,但 T_1 处理的单茎质量和

叶面积显著下降($P<0.05$);到开花期时, T_1 和 T_2 处理的单茎质量和叶面积与对照相比均显著减少($P<0.05$)。表明矿井废水灌溉使小麦的生长受到一定程度的抑制,其中研石淋溶水灌溉处理(T_3)对小麦生长的抑制作用最大。

2.2 矿井废水灌溉对小麦叶绿素含量、净光合速率和根系活力的影响

从表4可以看出,在拔节期,矿井废水灌溉对小麦的叶绿素影响不大,3种矿井废水处理小麦的叶绿素含量(SPAD值)与对照无显著差异;到开花期时, T_3 处理小麦的叶绿素含量与对照相比显著下降。在拔节期, T_1 和 T_2 处理小麦的光合速率与对照相比无显著差异, T_3 处理小麦的光合速率与对照相比显著下降;到开花期时, T_1 、 T_2 和 T_3 处理小麦的光合速率与对照相比均显著下降,且 T_3 处理小麦的光合速率显著小于 T_1 和 T_2 处理。可见,短期矿井废水灌溉对小麦光合特性没有显著影响,长期用于灌溉则对小麦的光合功能起到显著抑制作用。

3种矿井废水灌溉处理均对小麦的根系活力有显著影响,在拔节期和开花期, T_1 、 T_2 和 T_3 处理的小麦根系活力均显著小于对照(CK),这说明矿井废水灌溉对小麦根系活力起抑制作用。在拔节期, T_1 处理对小麦的根系活力抑制作用最强, T_1 处理的根系活力比对照显著下降30.9%;在开花期 T_3 处理的根系活力最低,与对照相比显著下降37.5%。

表3 不同处理小麦的株高、叶面积和茎干质量

Table 3 Plant height, leaf area and dry mass per stem of winter wheat under different treatments

Treatment	拔节期 Jointing stage			开花期 Flowering stage		
	株高 Plant height (cm)	单茎质量 Dry mass per stem (g)	单茎叶面积 Leaf area per stem (cm ²)	株高 Plant height (cm)	单茎质量 Dry mass per stem (g)	单茎叶面积 Leaf area per stem (cm ²)
CK	41.2a	1.94a	45.6a	82.3a	2.82a	62.4a
T_1	39.3a	1.78b	42.2b	80.5a	2.32c	53.3b
T_2	40.4a	1.82a	44.4a	81.5a	2.58b	57.1b
T_3	37.4b	1.51c	38.8c	78.4b	2.24c	50.5c

同列不同字母表示差异显著($P<0.05$)。Different letters in the same column meant significant difference at 0.05 level. 下同 The same below.

表4 矿井废水灌溉对小麦叶绿素含量、光合速率和根系活力的影响

Table 4 Effects of irrigation with mine wastewater on chlorophyll content, net photosynthetic rate and root activity of winter wheat

Treat- ment	叶绿素含量(SPAD) Chlorophyll content		光合速率 Net photosynthetic rate ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)				根系活力 Root activity ($\mu\text{g TPF} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)	
	拔节期 Jointing stage	开花期 Flowering stage	拔节期 Jointing stage	开花期 Flowering stage	拔节期 Jointing stage	开花期 Flowering stage		
						CK	45.6a	
T_1	44.3a	54.3a	17.9a	20.2b	3807.7d	1400.3bc		
T_2	43.8a	56.5a	18.1a	20.9b	4806.9b	1600.4b		
T_3	46.2a	47.2b	16.9b	19.2b	4207.8c	1255.6c		

2.3 矿井废水灌溉对小麦产量性状的影响

矿井废水灌溉对小麦的各产量性状均有不同程度的影响。 T_1 和 T_3 处理的穗粒重和千粒重与对照相比显著下降。 T_2 处理的穗粒重和千粒重与对照相比没有显著差异。 T_1 、 T_2 和 T_3 处理的穗粒数、生物产量和籽粒产量与对照相比均显著下降(表 5)。穗粒数、生物产量及籽粒产量大小依次为 $CK > T_2 > T_1 > T_3$, 其中籽粒产量分别比对照下降 15.4%、9.8% 和 17.8%。

2.4 小麦各部位重金属积累情况

对各处理小麦根、茎叶、颖壳和籽粒中的重金属含量进行测定发现, 在 3 个矿井废水灌溉处理中, 重金属元素在植物体积累的规律比较一致, Cr 和 Pb 在茎叶中含量均为最高, Cu 和 Zn 的含量在植物根和籽粒含量较高(表 6)。通过比较各处理不同器官的重金属含量, 在小麦根系中 T_1 、 T_2 和 T_3 处理的 Cr、

表 5 矿井废水灌溉对小麦产量性状的影响

Table 5 Effect of irrigation with mine wastewater on yield traits of winter wheat

处理 Treatment	穗粒重 Grain mass per spike (g)	穗粒数 Spike number	千粒重 1000-grain mass	生物产量 Biomass (g · pot ⁻¹)	籽粒产量 Grain yield (g · pot ⁻¹)
T_1	1.53b	29.53d	47.13c	54.33c	28.25c
T_2	1.89a	36.87b	53.67a	63.45b	30.14b
T_3	1.48b	32.13c	49.72b	50.91d	27.45d
CK	1.94a	39.47a	51.20a	69.52a	33.40a

表 6 矿井废水灌溉小麦各部位重金属含量

Table 6 Heavy metals content in different organs of wheat irrigated with mine wastewater (mg · kg⁻¹)

元素 Element	器官 Organ	T_1	T_2	T_3	CK
Cr	根 Root	4.15a	3.97b	3.48b	2.13c
	茎叶 Stem and leaf	4.32a	4.53a	4.21a	2.01b
	颖壳 Glume	4.26a	3.08b	3.15b	2.19c
	籽粒 Grain	4.15a	2.98c	3.5b	1.9d
Cu	根 Root	11.52a	12.27a	10.38b	8.02c
	茎叶 Stem and leaf	3.22a	2.63b	3.61a	2.11b
	颖壳 Glume	7.45a	7.15a	6.34b	5.68c
	籽粒 Grain	10.57a	10.25a	9.37b	7.88c
Pb	根 Root	2.73a	1.51b	2.75a	1.37b
	茎叶 Stem and leaf	3.53a	2.12b	3.94a	1.35b
	颖壳 Glume	2.32a	1.56b	2.45a	1.38b
	籽粒 Grain	2.65a	1.51b	2.27a	0.53c
Zn	根 Root	226.32a	167.35b	226.35a	126.43c
	茎叶 Stem and leaf	126.33b	119.85b	185.05a	96.05c
	颖壳 Glume	106.15a	93.28b	119.56a	116.91a
	籽粒 Grain	181.65b	200.25a	195.05a	116.35c

同行不同字母表示差异显著($P < 0.05$) Different letters in the same row meant significant difference at 0.05 level.

Cu 和 Zn 含量均显著高于对照。 T_1 和 T_3 处理根系中 Pb 的含量显著高于对照, T_2 处理根系中 Pb 的含量和对照没有显著差别;在小麦茎叶中 T_1 、 T_2 和 T_3 处理 Cr 和 Zn 的含量均显著高于对照。 T_1 和 T_3 处理小麦茎叶中 Cu 和 Pb 的含量显著高于对照, T_2 处理和对照没有显著差别;在小麦颖壳中 T_1 、 T_2 和 T_3 处理 Cr 和 Cu 的含量均显著高于对照, T_1 和 T_3 处理颖壳中 Pb 的含量显著高于对照, T_2 处理和对照没有显著差别。 T_1 和 T_3 处理小麦颖壳中 Zn 的含量与对照没有显著差别, T_2 处理显著低于对照;在 3 个矿井废水灌溉处理的小麦籽粒中 Cr、Pb、Cu 和 Zn 的含量均显著高于对照。可见, 矿井废水灌溉增加了重金属元素在植物体内的积累。

3 讨 论

3.1 矿井废水灌溉对小麦生长发育的影响

污水灌溉曾被认为是缓解农业水资源紧张状况的重要途径, 但如果长期使用未经处理的污水进行灌溉, 污水中重金属等污染物便会在土壤中不断积累, 导致土壤污染^[14-16]。作物的生长发育对土壤环境条件非常敏感, 当土壤受到污染时, 就影响到作物水分代谢、光合作用、呼吸作用、氮素代谢等生理生化过程^[17-19], 从而影响作物的生长发育。在煤矿区, 矿井废水中普遍含有重金属元素, 因此, 研究矿井废水灌溉带来的重金属污染问题, 特别是重金属污染对土壤-作物系统的影响显得尤为重要。在本研究中 3 种类型的矿井废水中 Cr 和 Pb 的含量均超出农灌标准, 如果长期用于灌溉农作物, 必然会对土壤-作物系统造成重金属污染。当土壤受到重金属污染时, 植物的根系首遭其害, 然后再蔓延至地上部分。研究表明, 当植物受到重金属污染时, 根系的活力将显著下降, 尤其是当这些过量的重金属元素发生协同作用时, 对植物生长危害更大^[20]。因此, 根系活力可在矿井水灌溉早期阶段作为判断作物是否受到矿井水影响的一个重要指标。研究表明, 矿井废水灌溉对小麦根系活力起抑制作用, 在矿井水灌溉早期(拔节期) T_1 、 T_2 和 T_3 处理的小麦根系活力已经显著小于对照($P < 0.05$)。光合速率在矿井废水灌溉早期没有受到显著影响, 但随着生育期推进, 开花期时 3 种矿井废水处理小麦的光合速率与对照相比显著下降。矿井废水灌溉对作物生理特性的影响最终影响到其生长状况和产量形成, 到开花期时 3 种矿井废水处理的单茎质量和叶面积与对照相比均显著减少($P < 0.05$)。 T_3 处理还显著降低了小麦的株高。到成熟期

时,3种矿井废水处理的穗粒数、生物产量和籽粒产量与对照相比也均显著下降。对3种矿井废水处理小麦的生理、形态和产量因素进行综合分析表明, T_3 处理对小麦产生的抑制作用最大,其次为 T_1 处理, T_2 处理对小麦的影响最小。 T_3 处理对小麦产生最大抑制作用的主要原因,一是因为 T_3 中各项重金属含量均高于 T_1 和 T_2 处理;二是 T_3 矿井废水呈酸性。研究表明,随着土壤pH值的降低,土壤重金属的有效性增加^[21]。因此,长期用酸性矿井废水进行灌溉,将导致土壤pH值下降,增强重金属对作物的毒性。

3.2 矿井废水灌溉对小麦重金属含量的影响

当土壤受到重金属污染时,重金属元素随着根系的吸收而进入作物体内,从而影响农产品的食品安全。研究表明,在污水灌溉条件下,重金属在作物体内的残留含量因部位不同而有差异^[22]。本研究通过对各处理小麦根、茎叶、颖壳和籽粒中的重金属含量进行测定表明,各重金属在植物体内残留量也因部位不同而有差异。在3种矿井废水灌溉处理中,Cr和Pb在茎叶中含量均为最高,Cu和Zn的含量在植物根和籽粒含量较高。与对照相比,各矿井废水灌溉处理小麦各器官中的Cr、Pb和Cu含量均高于对照。Zn的含量除小麦颖壳外,其他器官也均高于对照。

土壤中重金属元素的迁移、转化以及在植物体内的累积量,除了与土壤中重金属的含量有关外,还与其在土壤中的存在形态有很大关系^[23-25]。土壤中重金属的存在形态受很多因素的影响,pH是其中最重要的因素之一。研究表明,酸性矿井水排到土壤后,随着土壤pH值降低,碳酸盐结合态、残渣态重金属含量下降,可交换态和有效态重金属含量提高,从而增强植物对重金属的吸收^[26-28]。在本研究中3种矿井废水除重金属元素Cr和Pb超出农业灌溉标准外,它们还呈酸性,灌溉导致土壤pH值下降,提高了土壤中Zn、Cu的可交换态和有效态含量,从而增强了植物对Zn和Cu的吸收量。

此外,土壤中微生物对土壤pH值和重金属含量也非常敏感,土壤微生物几乎参与了土壤生态系统一切生物和生物化学过程,具有维持和调控土壤生态系统、物质循环过程,缓冲和净化土壤污染等功能^[2]。当这些呈酸性和高重金属含量矿井废水用于农业灌溉时,将会影响到土壤的微生物群落构成^[29-30],并最终影响到土壤的生态功能和农田水分、养分循环过程,降低农田生产力。今后,将针对矿井水灌溉对农田土壤微生物学特性如土壤酶活性、

微生物生物量和种群分布特征展开研究,以期为矿井废水灌溉污染土壤的质量评价、作物安全生产和生物修复提供科学依据。

本研究表明,矿井水不适合长期用于农业灌溉,为了保证矿井水灌溉区域的生态和食品安全,还需要对矿井废水净化处理和安全灌溉技术作进一步研究。

参考文献

- [1] Shao X-H (邵孝侯), Liao L-X (廖林仙), Li H-L (李洪良). Pot experiment of treated domestic wastewater re-use for irrigation of Chinese cabbage. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2008, 24(1): 89-93 (in Chinese)
- [2] Zhang Y (张彦), Zhang H-W (张惠文), Su Z-C (苏振成), et al. Effect of sewage irrigation on the distribution of heavy metal, enzyme activities and microbial population in the soil. *Journal of Safety and Environment* (安全与环境学报), 2006, 6(6): 44-50 (in Chinese)
- [3] Chen X-M (陈新明), Cai H-J (蔡焕杰), Sun A-H (孙爱华), et al. Effect of sewage irrigation on tomato growth and accumulation of Hg and As in soil. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2007, 44(5): 831-837 (in Chinese)
- [4] Yang J (杨军), Zheng Y-M (郑袁明), Chen T-B (陈同斌), et al. Accumulation and temporal variation of heavy metals in the soils from the Liangfeng Irrigated Area, Beijing City. *Acta Scientiae Circumstantiae* (环境科学学报), 2005, 25(9): 1175-1180 (in Chinese)
- [5] Emongor VE, Ramolemana GM. Treated sewage effluent (water) potential to be used for horticultural production in Botswana. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2004, 29: 1101-1108
- [6] Zai S-M (宰松梅), Pang H-B (庞鸿宾), Wang Z-H (王朝辉). Discuss on safe and high-efficient utilization of sewage resources in China. *Journal of Irrigation and Drainage* (灌溉排水学报), 2006, 25(5): 21-25 (in Chinese)
- [7] Peng Z-G (彭致功), Yang P-L (杨培岭), Ren S-M (任树梅). Effects of different soil water treatments with reclaimed water irrigation on quality and physiological and biochemical characteristics of lawn. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2006, 22(4): 48-52 (in Chinese)
- [8] Fu M-C (付梅臣), Hu Z-Q (胡振琪), Liu S (刘爽). Farmland restoration and pollution prevention in the overlapped areas of crop and mineral production. *Metal Mine* (金属矿山), 2008(9): 119-122 (in Chinese)
- [9] Cui L-P (崔龙鹏), Bai J-F (白建峰), Shi Y-H (史永红), et al. Heavy metals in soil contaminated by coalmining activity. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学

- 报), 2004, **41**(6): 898–904 (in Chinese)
- [10] Hu Z-Q (胡振琪), Qi J-Z (戚家忠), Si J-T (司继涛). Contamination and assessment of heavy metals in fly ash reclaimed soil. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2003, **19**(3): 214–218 (in Chinese)
- [11] Dong J-H (董霁红), Yu M (于敏), Cheng W (程伟), et al. Safety of heavy metals pollution for wheat planted in reclaimed mining soil. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2010, **26**(12): 280–286 (in Chinese)
- [12] Lei M (雷鸣), Zeng M (曾敏), Zheng Y-M (郑袁明), et al. Heavy metals pollution and potential ecological risk in paddy soils around mine areas and smelting areas in Hunan Province. *Acta Scientiae Circumstantiae* (环境科学学报), 2008, **28**(6): 1212–1220 (in Chinese)
- [13] Hu W-R (胡文容). Coal Mine Water and Wastewater Treatment Technology. Beijing: Coal Industry Press, 1999 (in Chinese)
- [14] Aleem A, Isar J, Malik A. Impact of long-term application of industrial wastewater on the emergence of resistance traits in *Azotobacter chroococcum* isolated from rhizospheric soil. *Bioresource Technology*, 2003, **86**: 7–13
- [15] Yang J (杨军), Chen T-B (陈同斌), Zheng Y-M (郑袁明), et al. Dynamic of heavy metals in wheat grains collected from the Liangfeng Irrigated Area, Beijing and a discussion of availability and human risks. *Acta Scientiae Circumstantiae* (环境科学学报), 2005, **25**(12): 1661–1668 (in Chinese)
- [16] Cameron KC, Di J, McLaren RG. Is soil an appropriate dumping ground for our wastes? *Australian Journal of Soil Research*, 1997, **35**: 995–1035
- [17] Sun G-W (孙光闻), Chen R-Y (陈日远), Liu H-C (刘厚诚), et al. Advances on investigation of effect of cadmium on photosynthesis and nitrogen metabolism of plant. *Chinese Agricultural Science Bulletin* (中国农学通报), 2005, **21**(9): 234–237 (in Chinese)
- [18] Ding X-Y (丁小余), Shi G-X (施国新), Chang F-C (常福辰), et al. Studie on the poisoning symptoms and the morphological changes of the leaves blade of *B. Schreberi* induced by the stress of the pollution of Cd²⁺. *Acta Botanica Boreali-Occidentalis Sinica* (西北植物学报), 1998, **18**(3): 417–422 (in Chinese)
- [19] Gallego SM, Benavides MP, Tomaro ML. Effect of heavy metal ion excess on sunflower leaves: Evidence for involvement of oxidative stress. *Plant Science*, 1996, **121**: 151–159
- [20] Chen S-H (陈素华), Sun T-H (孙铁珩), Zhou Q-X (周启星). Effects of combined pollution of heavy metals on root vitality of wheat seeds. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2003, **14**(4): 577–580 (in Chinese)
- [21] Lombi E, Hamon RE, McGrath SP, et al. Lability of Cd, Cu and Zn in polluted soils treated with lime, berlingite and red mud and identification of a non-labile colloidal fraction of metals using isotopic techniques. *Environmental Science and Technology*, 2003, **37**: 979–984
- [22] Feng S-Y (冯绍元), Shao H-B (邵洪波), Huang G-H (黄冠华). Field experimental study on the residue of heavy metal in wheat crop. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2002, **18**(4): 113–115 (in Chinese)
- [23] Guo Z-H (郭朝晖), Huang C-Y (黄昌勇), Liao B-H (廖柏寒). Effects of simulated acid rains on Cd, Cu and Zn release and their form transformation in polluted soils. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2003, **14**(9): 1547–1550 (in Chinese)
- [24] Chen J (陈俊), Fan W-H (范文宏), Sun R-M (孙如梦), et al. Bioavailability and species distribution of heavy metals in sewage-irrigated soil from Xinhe. *Acta Scientiae Circumstantiae* (环境科学学报), 2007, **27**(5): 831–837 (in Chinese)
- [25] Ahumada I, Mendoza J, Navarrete E, et al. Sequential extraction of heavy metals in soils irrigated with wastewater. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1999, **30**: 1507–1519
- [26] Chen A, Lin C, Lu W, et al. Well water contaminated by acidic mine water from the Dabaoshan Mine, South China: Chemistry and toxicity. *Chemosphere*, 2007, **70**: 248–255
- [27] Chen A, Lin C, Lu W, et al. Chemical dynamics of acidity and heavy metals in a mine water-polluted soil during decontamination using clean water. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, **175**: 638–645
- [28] Boulaab A, Schwartz C, Bitton G, et al. Heavy metal contamination from mining sites in South Morocco. 2. Assessment of metal accumulation and toxicity in plants. *Chemosphere*, 2006, **63**: 811–817
- [29] Muhammad A, Xu JM, Li ZJ, et al. Effects of lead and cadmium nitrate on biomass and substrate utilization pattern of soil microbial communities. *Chemosphere*, 2005, **60**: 508–514
- [30] Teng Y (滕应), Luo Y-M (骆永明), Li Z-G (李振高). Microbial diversity in polluted soils: An overview. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2006, **43**(6): 1018–1026 (in Chinese)

作者简介 马守臣,男,1972年生,博士,副教授。主要从事环境生态研究。E-mail: mashouchen@126.com

责任编辑 肖红