

再生水灌溉冬小麦的铅和镉累积分布研究

居 辉, 李 康, 姜 帅, 王贺然

(中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所 农业部农业环境与气候变化重点开放实验室, 北京 100081)

摘 要:再生水灌溉对作物重金属含量的影响,是再生水能否安全利用的重要基础问题。通过冬小麦的盆栽试验,研究了再生水灌溉对土壤和冬小麦植株铅、镉含量的影响。结果表明,再生水灌溉对土壤铅、镉含量没有明显的影响,而混灌和轮灌较再生水纯灌可以降低土壤铅含量,但对土壤镉含量没有明显的减低作用。再生水灌溉处理小麦各器官的镉含量分布是根>叶>茎>籽粒,铅含量分布是叶>根>茎>籽粒,叶片铅含量较其他器官高可能与大气铅污染有关。再生水灌溉后,小麦各器官镉含量较清水对照有一定的提高,但铅、镉含量和对照相比差异不显著。应用再生水灌溉,小麦籽粒中铅、镉含量均符合国家食用安全标准,但镉含量较清水灌溉有升高现象,在生产应用中要有所注意。

关键词:再生水;冬小麦;灌溉;重金属

中图分类号:X171.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2011)01-0078-06

Heavy Metal Pb and Cd Distribution in Winter-wheat with Reclaimed Water Irrigation

JU Hui, LI Kang, JIANG Shuai, WANG He-ran

(Institute of Environment and Sustainable Development on Agriculture, CAAS, Key Laboratory of Agro-Environment & Climate Change, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China)

Abstract: The effect of reclaimed water irrigation on crops metal accumulation is a crucial issue for sewage water safely utilization on agriculture. The research studied heavy metal Pb and Cd content and distribution in soil and winter wheat under reclaimed water irrigation by using pot planting trails. The results showed that there was no significant difference in soil Pb, Cd content with reclaimed water irrigation compared with fresh water control treatment. Meanwhile, mixed and alternative irrigation of reclaimed water and fresh water could little reduce Cd and Pb soil content compare with purely using reclaimed water. Cd content order in different organ of winter wheat was root > leaf > stem > grain, and it had somewhat increase compared with fresh water treatment. The Pb content order in different organ of winter wheat was leaf > root > stem > grain, the higher Pb content in leaves was likely related with air pollution of experiment trail site. Both Pb and Cd content in different organ had no significant difference between reclaimed water irrigation and fresh water treatment. The Pb and Cd content in grains were lower than National Restriction of Pb and Cd content for food consumption, but Cd content was little higher with reclaimed water irrigation than fresh water which should be noticed in field practice.

Keywords: reclaimed water; winter wheat; irrigation; heavy metal

我国水资源十分匮乏,农业用水量占全国总用水量的 70%以上,每年农业生产缺水达 300 亿 m^3 ^[1],开辟新的农用水资源成为必然的一种选择。再生水又名中水,根据应用部门名称略有差异,在污水工程方面称为“再生水”,工厂方面称为“回用水”。再生水一般以水质作为区分的标志,其主要是指城市或生活污水、工厂排水等经处理后达到国家规定的水质标准,

可在一定范围内重复使用的非饮用水。在美国、日本、以色列等国大量利用再生水进行园林和农田灌溉、城市喷泉、设备冷却等应用^[2]。目前我国部分污水厂的再生水水质已经能达到国家农田灌溉水质标准^[3],预计到 2030 年全国再生水资源量至少可替代 204 亿 m^3 清洁水资源,这对缓解中国水资源危机具有重要意义^[4]。

由于污水来源的质量不稳定,再生水中仍然存在少量的污染物^[5],尤其是含有工业排水来源的再生水,重金属污染的风险较大^[6]。多数污染重金属在土壤中不为生物所分解,并可在生物体内积累和转化,如果

收稿日期:2010-05-27

基金项目:北京市排水集团专项,国家科技支撑计划课题(2007BAC03A06)

作者简介:居 辉(1970—),博士,研究员,从事农业节水及气候变化影响研究。E-mail:juhui@caj.ac.org.cn

应用于农业灌溉,可导致农作物减产乃至绝收^[7]。根据我国以往的污灌作物重金属含量研究发现,果蔬类累积量高于粮食作物,蔬菜中根茎类>瓜果类>豆类>叶菜类^[8],不同作物对不同重金属吸收能力不同,水稻对铅的吸收能力强于小麦,但对镉的吸收能力则弱于小麦^[9]。作物种植土壤的 pH 值、腐殖质含量对重金属毒性大小影响很大,碱性土壤以及腐殖质含量高的土壤重金属的毒害作用较小^[10-11]。

目前北京市污水处理水平不断提高,纯净度和产量明显提升,再生水已安全利用到了草地和景观植被的灌溉中,但考虑食品安全性的问题,粮食作物的大面积灌溉应用尚少^[12-13]。铅和镉是再生水中主要的重金属污染物,极易造成土壤和地下水污染,且通过土壤累积对植物养分吸收和品质产生不利影响,并通过食物链影响人体健康,是农业生产中严格控制的重金属元素^[14]。冬小麦是华北地区主要的粮食作物,也是主要的灌溉耗水作物,由于目前各污水处理厂的处理效果和利用能力不尽相同,根据区域再生水生产状况,对灌溉小麦铅、镉含量安全性进行研究,对减少次生污染和实现再生水安全回用都具有实际指导意义。

1 材料与方法

试验于 2004 年 10 月—2006 年 6 月在位于北京市海淀区的中国农业科学院东门实验站进行。试验用盆钵为聚乙烯塑料桶,口径 40 cm、高 30 cm,供试土壤为褐土,基本状况见表 1。土壤经 1 cm 孔径过筛,

每盆装土 12 kg,施鸡粪 40 g,复合肥 20 g(全 N 20%, P₂O₅ 10%,K₂O 20%),草碳 0.8 kg,混匀后装盆。冬小麦品种为中麦 9508,出苗后每盆定苗 7 株。

试验设 7 个处理,分别为对照清水灌溉(F)、三级再生水^①纯灌(T)、二级再生水^②纯灌(S)、三级再生水和清水混灌(各取 50%混合,TFM)、二级再生水和清水混灌(各取 50%混合,SFM)、三级再生水和清水轮灌(TFR)、二级再生水和清水轮灌(SFR),每个处理设 9 个重复。对照清水为自来水,二级再生水和三级再生水取自北京市东郊的污水处理厂,其中二级再生水为二沉池出水,三级再生水为二级再生水砂滤后出水,水质基本状况如表 2。用称重法控制浇水量,使各处理含水量保持土壤田间最大持水量的 70%。

植物样品用蒸馏水冲洗干净,于 60~80 ℃烘至恒重,粉碎过 0.40 mm 孔径筛,采用 HNO₃-H₂O₂-HClO₄ 消解;土壤样品充分混合后自然风干,粉碎过 0.15 mm 孔径筛,采用王水-HClO₄ 进行高温平板消煮,等离子体质谱仪分析 Pb、Cd 元素含量。试验数据经 SAS 统计软件分析,采用单因素方差分析方法,数据做 LSD 测验,选用 5%的统计显著水平。

2 结果与分析

2.1 对土壤中铅、镉含量的影响

铅是小麦生长的积累性危害污染物,铅一旦污染土壤,很难通过降解等方式去除。从表 3 可见,各处理平均的土壤 Pb 含量为 19.75 mg·kg⁻¹,二级再生水处

表 1 盆栽土壤的基本状况
Table 1 The soil basic quality for pot planting

有机质 Organic matter/ mg·g ⁻¹	碱解 N Available N/ mg·kg ⁻¹	速效 K Available K/ mg·kg ⁻¹	速效 P Available P/ mg·kg ⁻¹	田间持水量 Water holding capacity/%	土壤容重 Soil bulk density/g·cm ⁻³
32.8	79.8	115.4	91.1	26.35	1.32

表 2 试验灌溉用水水质基本状况(mg·L⁻¹)
Table 2 The background quality of irrigation water used in the experiment(mg·L⁻¹)

化学成分	BOD ₅	COD	SS	pH	Cl ⁻	铅 Pb	镉 Cd
对照清水(F) Fresh water	—	2	4	6.0~8.5	100	—	—
三级再生水(T) Tertiary effluent	5.85	23.8	5.55	7.5~8.4	143	—	—
二级再生水(S) Secondary effluent	9.25	38.1	12.2	7.8~8.2	133	0.31	0.01
农田灌溉水质标准 Water quality standards for farmland irrigation	<150	<300	<200	5.5~8.5	<250	<0.1	<0.005

① 三级再生水 二级处理或生物处理以后进行的废水深度处理,进一步去除废水中的氮、磷等营养物和去除有机物和悬浮固体,处理后的出水水质满足废水回用或某些特殊受纳水体的要求。
② 二级再生水 指废水经过二级处理后排放的水。它比处理前的进水大幅度去除了废水中呈胶体和溶解状态的有机污染物。其有机物的去除率可达 90%以上,出水中的 BOD₅ 和悬浮固体含量均在 30 mg·L⁻¹ 以下。

理 Pb 的含量最高,为 $22.52 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,二级再生水混灌处理较低,为 $17.80 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,和清水对照相比,处理间差异不显著。根据《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)的规定,如果土壤铅含量 $\leq 35 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,属于一级土壤铅标准,可适用于国家自然保护区、集中式生活饮用水源地、茶园等;如果土壤铅含量 $\leq 250 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,为二级土壤铅标准,土壤可适用于一般农田、蔬菜地、茶园果园等,土壤质量基本上对植物和环境不造成危害和污染。本试验测定的土壤铅含量低于国家限定的一级标准,说明使用再生水灌溉对土壤没有造成铅污染和危害。采用二级再生水、三级再生水纯灌、混灌以及轮灌,各处理和对照相比,没有显著差异,因此应用再生水灌溉对土壤铅含量基本没有影响。

二级再生水采用轮灌和混灌方式,土壤铅含量较二级再生水纯灌有所减小,混灌较纯灌降低 20.9%,轮灌较纯灌降低 13.8%,且纯灌和混灌间统计差异显著;三级再生水混灌较其纯灌土壤铅含量降低 0.5%,轮灌较纯灌降低 3.8%,处理间差异不显著。以上结果说明,再生水采用混灌和轮灌方式,比单纯使用再生水灌溉在降低土壤铅含量上有一定的作用。

镉是一种有害的重金属元素,镉进入土壤后由于农作物的吸收作用,使植株镉含量提高。从本研究结

果来看(表 3),各处理间土壤镉平均含量为 $0.147 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,变化范围为 $0.130 \sim 0.162 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。根据《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)的规定,如果土壤质量镉含量 $\leq 0.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,则达到镉含量的二级土壤标准,可适用于一般农田、蔬菜地、茶园果园、牧场等,土壤质量基本上对植物和环境不造成镉危害和污染。本试验测定结果低于土壤环境质量镉限定的二级标准,说明使用再生水灌溉对土壤没有造成镉污染,作物可安全生长。采用各种方式的再生水灌溉,各处理和对照相比,土壤镉没有显著差异,说明再生水混灌、轮灌和纯灌对土壤镉含量基本没有影响,且混灌和轮灌对降低土壤镉含量作用不显著。

2.2 冬小麦各器官铅含量分布

铅主要影响植物的光合作用,是一种对作物有积累性危害的污染物。从冬小麦各器官铅累积量来看(表 4),基本顺序是叶>根>茎>籽粒,叶积累量平均 $5.94 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,籽粒为 $0.31 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

从水质分析,清水、二级再生水、三级再生水处理,叶片和籽粒中的铅含量各处理间差异不显著,说明再生水灌溉对籽粒和叶片铅含量没有明显的影响;对于根、茎器官,二级再生水处理茎中的铅含量显著高于清水对照,根的铅含量和对照没有差异,三级再生水处理茎含量和清水没有差异,但根含量显著低于

表 3 再生水灌溉对盆栽土壤铅、镉含量的影响

Table 3 Contents of heavy metal Pb, Cd in potted soil with reclaimed water irrigation

重金属 Heavy metal	项目 Item	处理 Treatment						
		F	S	T	SFM	TFM	SFR	TFR
Pb	均值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	19.49 ^{ab}	22.52 ^a	19.96 ^{ab}	17.80 ^b	19.86 ^{ab}	19.42 ^{ab}	19.20 ^{ab}
	标准差/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	0.36	4.26	0.18	3.55	0.14	0.52	0.49
Cd	均值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	0.143 ^a	0.141 ^a	0.152 ^a	0.130 ^a	0.152 ^a	0.152 ^a	0.162 ^a
	标准差/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	0.012	0.002	0.011	0.027	0.007	0.005	0.037

注:表中数据经 SAS 统计软件分析,做 LSD 检验,有相同的小写字母表示差异未达到 5%显著水平。

表 4 冬小麦各器官中铅的累积分布

Table 4 Accumulation of plumbum in winter wheat organs

处理 Treatments	各器官 Pb 含量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Pb content in different organ			
	根	茎	叶	籽粒
清水(F)	$3.15 \pm 0.17^{\text{ab}}$	$0.51 \pm 0.03^{\text{cd}}$	$5.72 \pm 0.11^{\text{b}}$	$0.34 \pm 0.09^{\text{a}}$
二级再生水(S)	$3.32 \pm 0.07^{\text{a}}$	$0.69 \pm 0.03^{\text{a}}$	$5.22 \pm 0.13^{\text{b}}$	$0.36 \pm 0.07^{\text{a}}$
三级再生水(T)	$2.95 \pm 0.04^{\text{c}}$	$0.47 \pm 0.04^{\text{d}}$	$5.85 \pm 0.12^{\text{b}}$	$0.37 \pm 0.07^{\text{a}}$
二清混(SFM)	$2.50 \pm 0.08^{\text{d}}$	$0.55 \pm 0.02^{\text{bc}}$	$5.50 \pm 0.17^{\text{b}}$	$0.30 \pm 0.15^{\text{a}}$
三清混(TFM)	$3.06 \pm 0.12^{\text{bc}}$	$0.54 \pm 0.06^{\text{bc}}$	$5.47 \pm 0.16^{\text{b}}$	$0.31 \pm 0.02^{\text{a}}$
二清轮(SFR)	$2.58 \pm 0.06^{\text{d}}$	$0.45 \pm 0.01^{\text{d}}$	$6.85 \pm 0.08^{\text{a}}$	$0.30 \pm 0.04^{\text{a}}$
三清轮(TFR)	$2.65 \pm 0.09^{\text{d}}$	$0.61 \pm 0.07^{\text{b}}$	$6.94 \pm 1.45^{\text{a}}$	$0.30 \pm 0.02^{\text{a}}$

注:表中数据由平均值±标准差表示,3 次重复,经 SAS 统计分析,做 LSD 测验,字母相同代表在 5%显著水平下无差异。

清水。综合来看,再生水灌溉没有导致铅在冬小麦籽粒内的显著累积,其籽粒铅含量符合我国食品卫生规定的铅含量不超过 $0.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的标准 (GB 14935—1994), 说明再生水短期灌溉是安全的。需要注意的是,二级再生水使茎中的铅含量高于清水对照,如果应用其茎秆饲喂动物就需要有所注意。

从灌溉方式来看,虽然各处理间籽粒铅含量没有显著差异,但轮灌和混灌处理的籽粒铅含量还是低于纯灌处理,两者较纯灌降低了 17%~18%,但混灌和轮灌没有明显降低茎、叶中的铅含量。综合比较,和纯再生水灌溉相比,混灌和轮灌对降低小麦籽粒铅含量有一定的作用,但对茎和叶的降低效果并不明显。

2.3 冬小麦各器官镉含量分布

镉不仅会影响植物的产量,而且人和动物也会因食用镉污染的食品对健康造成危害。从冬小麦各器官镉累积量来看,基本是根>叶>茎>籽粒,根累积量平均 $0.345 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,籽粒为 $0.056 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

从水质来看,采用二级再生水和三级再生水纯灌处理,籽粒中的镉含量分别为 $0.07 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.08 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,较清水对照分别增加 84%和 113%,且差异显著(表 5)。再生水灌溉的各处理籽粒镉含量变化范围 $0.047 \sim 0.081 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,虽然低于我国食品卫生安全标准规定的 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 含量标准 (GB 15201—1994),但再生水灌溉还是使冬小麦籽粒的镉含量有所提高。其他处理根、茎、叶器官的镉含量基本上是再生水处理高于清水,且根、茎镉积累和清水对照相比差异显著。本研究中二级再生水本底镉含量高于农田灌溉水质标准,说明再生水灌溉在重金属镉的累积方面还是存在一定的应用风险。

从灌溉方式来看,采用混灌和轮灌处理,籽粒镉含量低于纯灌处理,二级再生水混灌和轮灌分别较纯

灌降低 24%和 33%,三级再生水的则分别降低 40%和 35%,且差异显著,说明轮灌和混灌比单独利用再生水纯灌对降低籽粒镉含量作用明显。再者,混灌和轮灌也降低根、茎、叶中的镉含量,混灌效果和纯灌相比差异显著,其中对茎中镉含量和纯灌相比大约降低了 29%。综合而言,混灌和轮灌较纯灌可以降低小麦器官中镉含量,且混合灌溉效果更好。

3 讨论

本研究结果中,三级再生水本底未检测出镉超标,但灌溉小麦中重金属镉的含量较二级再生水还高,而且同步进行的大田试验结果也一致,这可能和土壤环境、再生水来源、取水时间等有关^[15]。以往的研究也发现,在污水原液和表层土壤中镉的含量均未检出,但小麦体内各部位均检出了重金属镉,分析认为小麦在吸收土壤溶液的过程中,对重金属镉具有较强富集作用^[16-17]。另外,北京东郊污水厂主要接纳旧城区和东郊工业区的排水,其中化工污水较多,重金属一般要明显偏高,且三级再生水在二级再生水基础上并没有重金属再清除的处理。本试验过程中,再生水本底生化成分采用了月平均值,因此可能掩盖了部分时段三级再生水超标现象(我国的农田灌溉水质标准规定总镉含量低于 $0.005 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,GB 5084—1992);再者,二级再生水和三级再生水是同时取水灌溉,本底污水批次不同,因此并不排除某批次污水本底镉含量偏高的结果。建议在今后类似试验研究中,应考虑每次加测水样本底,以便追踪差异原因。

一般而言,植株重金属的器官累计分布是根>茎>叶>籽粒^[18-19]。本研究小麦各器官铅含量比较,叶的含量最高,这可能与试验地点有关。本试验地点处于北京交通拥挤的三环路附近,试验点和道路之间没

表 5 冬小麦各器官中镉的累积分布

Table 5 Accumulation of cadmium in winter wheat organs

处理 Treatments	各器官 Cd 含量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Cd content in different organ			
	根	茎	叶	籽粒
清水(F)	0.204 ± 0.003^f	0.075 ± 0.007^e	0.170 ± 0.003^b	0.038 ± 0.012^c
二级再生水(S)	0.407 ± 0.013^b	0.156 ± 0.002^b	0.218 ± 0.004^b	0.070 ± 0.011^a
三级再生水(T)	0.423 ± 0.005^a	0.184 ± 0.003^a	0.319 ± 0.007^a	0.081 ± 0.002^a
二清混(SFM)	0.313 ± 0.011^c	0.130 ± 0.003^c	0.198 ± 0.004^b	0.053 ± 0.008^b
三清混(TFM)	0.332 ± 0.005^d	0.112 ± 0.005^d	0.182 ± 0.004^b	0.049 ± 0.010^{bc}
二清轮(SFR)	0.372 ± 0.012^c	0.113 ± 0.001^d	0.203 ± 0.005^a	0.047 ± 0.003^{bc}
三清轮(TFR)	0.362 ± 0.003^c	0.131 ± 0.006^c	0.309 ± 0.082^a	0.053 ± 0.005^b

注:表中数据由平均值±标准差表示,3次重复,经 SAS 统计分析,做 LSD 测验,字母相同代表在 5%显著水平下无差异。

有建筑物间隔,已有研究证实,北京二环和四环道路两侧的植株叶片约有 2/3 铅、镉含量高于清洁地区的含量,其中叶片铅的升高更加明显^[20]。本试验中叶片铅含量明显升高是否与此有关,需要进一步的试验证实。

4 结论

研究应用的二级再生水纯灌、三级再生水纯灌、再生水和清水的混合灌溉和轮流灌溉,土壤重金属铅和镉的累计含量和清水对照间差异不明显,灌溉对土壤铅、镉含量基本没有影响;再生水灌溉对小麦籽粒铅含量没有明显影响,且籽粒铅含量符合我国食品卫生规定的铅含量标准(GB 14935—1994),利用再生水灌溉的小麦,籽粒铅含量不存在食用安全问题;再生水灌溉明显提高了小麦籽粒镉含量,虽然镉含量依然低于我国食品卫生安全标准,但提示再生水灌溉小麦在重金属镉的累积方面存在一定的应用风险。

再生水农业安全回用的重要标准是食用安全和环境安全,从本结果来看,再生水灌溉小麦籽粒中铅和镉含量均符合我国食品限量卫生标准,土壤的含量也没有明显升高,所以短期的再生水灌溉对食用和环境还是安全的。但是,再生水灌溉小麦的镉含量还是较清水有所偏高,因此在考虑再生水生产工艺时,应加大镉清除的工艺指标要求。另外,研究结果还表明,混灌和轮灌可以降低小麦器官中铅和镉的含量,所以合理的灌溉方式也是再生水农业安全利用的方法之一。

参考文献:

- [1] 师荣光,王德荣,赵玉杰,等.城市再生水用于农田灌溉的水质控制指标[J].中国给水排水,2006,22(18):100-104.
SHI Rong-guang, WANG De-rong, ZHAO Yu-jie, et al. Water quality control indexes of reclaimed municipal waste water for farm land irrigation[J]. *China Water & Wastewater*, 2006, 22(18): 100-104.
- [2] 周 军,杜 炜,张静慧,等.北京市再生水行业的现状与发展[J].中国建设信息(水工业市场),2009(9):12-14.
ZHOU Jun, DU Wei, ZHANG Jing-hui, et al. Current status and development of Beijing reclaimed water industry[J]. *Information of China Construction(Water-Industry Market)*, 2009(9):12-14.
- [3] 王殿芳,谷庆宝,韩 梅,等.北京地区城市污水处理现状及污水排放对区域水环境的影响[J].北京石油化工学院学报,2003,11(3):55-60.
WANG Dian-fang, GU Qing-bao, HAN Mei, et al. Status of urban waste water treatment in Beijing area and impacts of sewage discharge on regional water environment[J]. *Journal of Beijing Institute of Petro-*
- Chemical Technology*, 2003, 11(3): 55-60.
- [4] 齐学斌,李 平,樊向阳,等.再生水灌溉方式对重金属在土壤中残留累积的影响[J].中国生态农业学报,2008,16(4):839-842.
QI Xue-bin, LI Ping, FAN Xiang-yang, et al. Soil heavy metal residue under different treated waste-water irrigation technique and management[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, 16(4):839-842.
- [5] 巫常林,黄冠华,刘洪禄,等.再生水短期灌溉对土壤-作物中重金属分布影响的试验研究[J].农业工程学报,2006,22(7):91-96.
WU Chang-lin, HUANG Guan-hua, LIU Hong-lu, et al. Experimental investigation on heavy metal distribution in soil-crop system with irrigation of treated sewage effluent[J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(7): 91-96.
- [6] 袁永坤,江 怀,朱宏进.污水处理厂出水的农业再利用研究[J].节水灌溉,2003(5):26-29.
YUAN Yong-kun, JIANG Huan, ZHU Hong-jin. Studies on sewage water from waste-water treatment factory for agriculture irrigation[J]. *Water Saving Irrigation*, 2003(5): 26-29.
- [7] 黄春国,王 鑫.我国农田污灌发展现状及其对作物的影响研究进展[J].安徽农业科学,2009,37(22):10692-10693.
HUANG Chun-guo, WANG Xin. China's farm land sewage irrigation development and its impact on crop research[J]. *Journal of Anhui Agri Sci*, 2009, 37(22):10692-10693.
- [8] 陈牧霞,地里拜尔·苏力坦,王吉德.污水灌溉重金属污染研究进展[J].干旱地区农业研究,2006,24(3):200-204.
CHEN Mu-xia, Dilibar SULTAN, WANG Ji-de. Research progress on heavy metal pollution in sewage irrigation[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2006, 24(3): 200-204.
- [9] 黄俊友,胡晓东,俞青荣.污水灌溉条件下作物对土壤重金属吸收特征比较[J].节水灌溉,2005(5):5-7.
HUANG Jun-you, HU Xiao-dong, YU Qing-rong. Comparison of plants absorption characteristic for heavy metals under sewage irrigation[J]. *Water Saving Irrigation*, 2005(5): 5-7.
- [10] 张超品,刘洪禄,吴文勇,等.再生(污)水灌溉利用研究[J].北京水利,2004(4):17-19.
ZHANG Chao-pin, LIU Hong-lu, WU Wen-yong, et al. Studies on the sewage water irrigation[J]. *Beijing Water*, 2004(4): 17-19.
- [11] 姚建武,王艳红,李盟军,等.施肥对铅镉污染土壤上芥菜铅镉含量及生理的影响[J].中国生态农业学报,2010,18(3):659-662.
YAO Jian-wu, WANG Yan-hong, LI Meng-jun, et al. Effect of fertilization on Pb and Cd content, and on physiological property of mustard growing in soil polluted by Pb and Cd[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(3):659-662.
- [12] 冯绍元,齐志明,黄冠华,等.清、污水灌溉对冬小麦生长发育影响的田间试验研究[J].灌溉排水学报,2003,22(3):11-14.
FENG Shao-yuan, QI Zhi-ming, HUANG Guan-hua, et al. Effects of fresh water and sewage irrigation on growth of winter wheat[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2003, 22(3): 11-14.
- [13] 齐志明,冯绍元,黄冠华,等.清、污水灌溉对夏玉米生长影响的田间试验研究[J].灌溉排水学报,2003,22(2):36-39.
QI Zhi-ming, FENG Shao-yuan, HUANG Guan-hua, et al. Experimental study on effects of irrigation water quality on plant growth of

- summer corn[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2003, 22(2): 36–39.
- [14] 杨华锋, 冯绍元. 北京市近郊区污水灌溉农田发展过程探讨 [J]. 中国农村水利水电, 2005, 8: 10–12.
- YANG Hua-feng, FENG Shao-yuan. Discussion on sewage irrigation development process in the suburbs of Beijing City[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2005, 8: 10–12.
- [15] 袁 伟, 郭宗楼, 袁 华. 污水灌溉的研究现状及利用前景分析[J]. 中国农村水利水电, 2005(6): 19–21.
- YUAN-Wei, GUO Zong-lou, YUAN Hua. Current status of sewage irrigation and utilization prospects[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2005(6): 19–21.
- [16] 冯绍元, 邵洪波, 黄冠华. 重金属在小麦作物体中残留特征的田间试验研究[J]. 农业工程学报, 2002, 18(4): 113–115.
- FENG Shao-yuan, SHAO Hong-bo, HUANG Guan-hua. Field experimental study on the residue of heavy metal in wheat crop[J]. *Transactions of the CSAE*, 2002, 18(4): 113–115.
- [17] 肖 昕, 冯启言, 刘忠伟, 等. 重金属 Cu、Pb、Zn、Cd 在小麦中的富集特征[J]. 能源环境保护, 2004, 18(3): 28–31.
- XIAO Xin, FENG Qi-yan, LIU Zhong-wei, et al. Enrichment characteristics of heavy metals (Cu, Pb, Zn, Cd) in wheat[J]. *Energy Environmental Protection*, 2004, 18(3): 28–31.
- [18] 邵 云, 姜丽娜, 李向力, 等. 五种重金属在小麦植株不同器官中的分布特征[J]. 生态环境, 2005, 14(2): 204–207.
- SHAO Yun, JING Li-na, LI Xiang-li, et al. Distribution of five heavy metals in different organs of wheat[J]. *Ecology and Environment*, 2005, 14(2): 204–207.
- [19] 于文超, 张 双, 魏 欣, 等. 小麦植株对重金属铅富集特征的研究[J]. 环境科技, 2009, 22(增 2): 21–30.
- YU Wen-chao, ZHANG Shuang, WEI Xin, et al. Enrichment characteristics of heavy metal Pb in wheat[J]. *Environmental Science and Technology*, 2009, 22(Suppl 2): 21–30.
- [20] 王崇臣, 黄忠臣. 北京市区植物叶片铅镉污染现状 [J]. 北京建筑工程学院学报, 2008, 24(3): 23–29.
- WANG Chong-chen, HUANG Zhong-chen. Investigation of lead and cadmium content in leaves of plants in Beijing urban area[J]. *Journal of Beijing University of Civil Engineering and Architecture*, 2008, 24(3): 23–29.