

# 污灌对土壤重金属含量的影响及其定量估算

——以河北省洺河和府河灌区为例

孟凡乔<sup>1</sup>, 巩晓颖<sup>1</sup>, 葛建国<sup>2</sup>, 徐远春<sup>2</sup>

(1. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100094; 2. 河北省环境监测中心站, 石家庄 050051)

**摘要:**选择河北省、河污灌区和府河污灌区为研究对象,对污灌水质和土壤环境质量进行了评价。结果表明,府河、洺河两大纯排污河的水质指标中重金属并未超过《农田灌溉水质标准》,经过 20 年的污灌,典型区的土壤中 Cd 超过我国《土壤环境质量标准》的二级标准。以当前 2 条排污河水进行灌溉,将会造成土壤中 As 的积累,应采取措施进行控制。

**关键词:** 污水灌溉; 重金属; 土壤; 定量估算

**中图分类号:** S273.5    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1672-2043(2004)02-0277-04

## Impacts of Irrigation by Wastewater on Quantitative Contents of Heavy Metals in Soils – A case study for Xiaohu Irrigated Area and Fuhe Irrigated Area

MENG Fan-qiao<sup>1</sup>, GONG Xiao-ying<sup>1</sup>, GE Jian-guo<sup>2</sup>, XU Yuan-chun<sup>2</sup>

(1. College of Resources and Environment, China Agricultural University, Beijing 100094; 2. Environmental Monitoring Station of Hebei, Shijiazhuang, 050051)

**Abstract:** The Irrigated areas by Wastewater of Xiaohu River and Fuhe River in Hebei province were chosen to assess both the quality of wastewater and the soil environment. The results indicated that heavy metals in both Xiaohu River and Fuhe River were not higher than that in Water Quality Standard for Farmland Irrigation. After about 20 years of irrigation, the accumulated Cd in the soil was found to be slightly higher than the second grade of National Soil Environmental Quality Standard. In addition, however, using Xiaohu and Fuhe river water for irrigation on land may lead accumulation of As in the studied soil.

**Keywords:** wastewater irrigation; heavy metals; soil; quantitative analysis

我国是一个水资源贫乏的国家,随着人口增加、经济发展和城市化进程的加快,水资源短缺的形势将更为严峻,合理利用污水进行农田灌溉已成为一种趋势。据全国第二次污灌区环境质量状况普查统计(基准年为 1995 年),我国利用污水灌溉的农田面积为 361.84 万  $\text{hm}^2$ , 占我国总灌溉面积的 7.33%, 占地表水灌溉面积的 10%。该面积比 20 世纪 80 年代初第一次污灌普查时的 140 万  $\text{hm}^2$  增加了 1.6 倍。其中,直

接引用工业及城市下水道污水灌溉的土地面积为 51.2 万  $\text{hm}^2$ , 用劣于农灌水质标准的污水进行灌溉的土地面积为 310.7 万  $\text{hm}^2$  [1]。

我国污水灌溉区农业环境质量普查协作组于 1976—1982 年对全国 3 种类型 37 个污水灌区进行的农业环境质量普查表明,我国城市混合污水主要污染物含量为:  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  8.1~19.6  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$  3.0~3.8  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。石化废水平均含  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  33.7  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ; 工矿废水平均含  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  1.6  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$  4.0  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  [2]。如果合理利用,污水可以作为重要的水肥资源,对农业生产会带来很大好处。但由于污水中含有有毒有害物质,长期污水灌溉也会造成环境污染并在土壤和作物中积累。土壤受到重金属污染后,由于其高残留、难降解、危害大的特点,污灌区的

收稿日期: 2003-07-09

基金项目: 河北省科委污灌在农业生态系统中良性运行模式的研究 (01276704)

作者简介: 孟凡乔(1969—),男,山东临沐人,副教授,博士学位。目前在中国农业大学从事农业环境保护、有机食品和生态农业方面的研究工作。E-mail: mengfq@public3.bta.net.cn

土壤-植物系统重金属污染问题更成为人们关注的焦点。

河北省属于我国的缺水省份之一, 1998年全省水资源总量为183.98亿 $m^3$ , 多年人均占有量311 $m^3$ , 相当于全国人均值的1/8。1998年全省低标准灌溉面积403.27万 $hm^2$ , 占全省耕地面积的62%。有近一半的耕地要“靠天吃饭”。当年受旱面积达103万 $hm^2$ , 旱灾成灾面积56.2万 $hm^2$ , 成灾率54.6%。水资源紧缺已成为河北省经济发展的制约因素之一<sup>①</sup>。1998年, 全省污灌土地面积为15.98万 $hm^2$ , 其中纯污灌为5.76万 $hm^2$ , 清污混灌为6.99万 $hm^2$ , 间歇污灌为3.23万 $hm^2$ 。除承德市外, 全省各市均有污灌分布, 沧州市和邯郸市污灌面积较大, 分别为2.65万 $hm^2$ 和2.21万 $hm^2$ ; 按各市污灌面积的大小, 全省排序为: 沧州> 邯郸> 廊坊> 邢台> 唐山> 石家庄> 张家口> 保定> 衡水> 秦皇岛<sup>①</sup>。

本研究以河北省典型污灌区的农田土壤为对象, 在对灌溉水水质进行评价的基础上, 分析和评价长期污灌后土壤中重金属的含量, 并尝试进行以不同土壤污染水平条件下的灌溉水重金属浓度的定量估算。

## 1 研究材料与方法

### 1.1 研究地区的选择

根据河北省污灌地区的分布, 首先选择以石家庄市污水为主要水源的涿河灌区和以保定城市污水为主要水源的府河灌区为本研究的典型污灌区。据1998年资料<sup>②</sup>, 石家庄市废污水排放量为3.70亿 $m^3$ ; 保定市年排放污水为3.01亿 $m^3$ 。涿河和府河分别属于子牙河水系和大清河水系, 且子牙河水系和大清河水系是河北省废污水量最多的两个水系, 而石家庄市

和保定市的排污量分别居于子牙河水系和大清河水系的首位, 其水质具有一定代表性。在涿河沿岸从上游到下游选择了赵县、新河、栾城3个污灌区; 府河灌区选择了保定污灌区作研究地区。典型污灌区的主要作物为冬小麦、夏玉米, 灌溉水源分别为城市污水和浅层地下水。

### 1.2 污灌区资料收集与调查

2001年10月到2003年5月间, 对河北省石家庄市的栾城县、赵县、新河县以及保定市的清苑县进行了面上和点上的资料调查和样品测定, 包括地表水水量和水质、土壤重金属、作物重金属等。涿河和府河地表水水质资料来自《河北省环境质量报告书》<sup>①②</sup>。

### 1.3 分析方法

典型区土壤重金属测定与分析: 以梅花形布点法采样, 每个灌溉区土壤样品由5个样点组成; 采样深度为0~20cm。样品采集日期为玉米收获后种植小麦前的2001年9月。As的测定采用二乙基二硫代氨基甲酸银分光光度法, Cd和Pb采用原子吸收分光光度-火焰法<sup>③</sup>。

## 2 污灌区污灌水质和土壤质量评价

### 2.1 污灌区污灌水质评价

河北省的废、污水大部分是城市工业废水和生活污水以及雨水的混合物。府河和涿河的水源全部为工矿企业排放的废水和城镇居民生活污水。以我国《农田灌溉水质标准》(GB5084-92)(表中简称“标准”) 对涿河、府河水质状况进行评价, 评价结果见表1, 表中的数据为1990年—2000年污水<sup>②③</sup>监测年平均值中的最高值。

从表1可以看出, 2个污灌区多年(1990年—

表1 涿河和府河水质评价( $mg \cdot L^{-1}$ )

Table 1 Water Quality of Xiaohe River and Fuhe River

污灌区	$NH_4 - N$	氰化物	挥发酚	石油类	COD	BOD	Hg	Pb	Cd	As	$Cr^{6+}$
涿河	32.68	0.025	0.15	4.25	165.5	94.15	0.00002	0.0186	0.0033	0.05	0.016
府河	74.2	0.004	0.06	0.16	214	43.6	0.0003	0.019	0.001	0.09	0.003
标准	30	0.5	1.0	10	300	150	0.001	0.1	0.005	0.1	0.1

2000年) 的灌溉水水质都比较好, 只有 $NH_4 - N$ 超过标准, 适量 $NH_4 - N$ 进入土壤不会造成污染, 还可

以提高土壤的肥力。府河灌溉水的As接近《农田灌溉水质标准》, 如控制不当有可能造成土壤中As的积累, 其他重金属都远低于《农田灌溉水质标准》, 污灌不会造成土壤的重金属积累。

### 2.2 污灌区土壤质量评价

以我国《土壤环境质量标准》(GB15618-1995) 的二级标准(表中称“标准1”)和《绿色食品产地环境

① 河北省水利技术试验推广中心. 河北省废污水排放与利用现状调查研究. 2000. 51-62.

② 河北省环境监测中心站. 河北省环境质量报告书1991—1995. 1996. 51-127.

③ 河北省环境监测中心站. 河北省环境质量报告书1996—2000. 2001. 42-55.

表 2 洺河和府河灌区土壤重金属质量评价(mg · kg<sup>-1</sup>)

Table 2 Assessment on soil quality of farmlands irrigated by Xiaoho and Fuhe River

污灌区	As	Hg	Cr	Pb	Cd
新河	10.67	0.045	68.34	48.90	4.251
赵县	7.32	0.065	59.05	46.09	4.316
栾城	8.04	0.073	49.81	43.91	3.888
清苑	9.45	0.091	52.40	41.79	3.393
标准 1	25	1.0	250	350	0.6
标准 2	20	0.35	120	50	0.4

质量标准》(NY/T391-2000,表中称“标准 2”) 对污灌区的土壤进行评价,结果见表 2。

由上表可以看出,污灌对土壤环境质量产生的影响并不显著。4 个污灌区的土壤中 Cd 含量均超出了《土壤环境质量标准》(GB15618-1995)的二级标准和《绿色食品产地环境质量标准》,这与当地土壤的 Cd 背景值较高有关系。除 Cd 以外,4 个污灌区的其他土壤重金属含量并未超出 2 项评价标准,但 Pb 的含量已接近绿色食品产地环境质量标准值,说明污灌并未造成土壤重金属污染。

### 3 以栾城和保定污灌区为例进行重金属积累趋势的定量估测

#### 3.1 土壤重金属残留量计算公式

计算 n 年内某重金属在土壤中的残留量公式为:

$$Q_n = K_n \{ K_{n-1} [\dots K_2 (K_1 (Q_0 + Q_1) + Q_2 + \dots + Q_{n-1}) + Q_n] \}^{[4,5]}$$

将上式展开则有:

$$Q_n = Q_0 K_1 K_2 \dots K_n + Q_1 K_1 K_2 \dots K_n + Q_2 K_2 K_3 \dots K_n + \dots + Q_n K_n$$

当  $K_1 = K_2 = \dots = K_n$ ,  $Q_1 = Q_2 = \dots = Q_n$  时,

则有:

$$Q_n = Q_0 K^n + Q K^n + Q K^{n-1} + Q K^{n-2} + Q K^{n-3} + \dots + Q K$$

即  $Q_n$  的计算公式如下:

$$Q_n = Q_0 K^n + Q K(1 - K^n) / (1 - K)$$

式中:  $Q = C Q_w / M$

$Q_n$ ——土壤中某重金属在 n 年后的浓度/mg · kg<sup>-1</sup>;

$Q_0$ ——土壤中某重金属的起始浓度/mg · kg<sup>-1</sup>;

$Q$ ——每年外界重金属进入土壤量折合成土壤浓度/mg · kg<sup>-1</sup>;

$K$ ——土壤中重金属的年残留率,本研究中镉采用 90%,汞采用 94%,砷采用 98.5%,铅采用 98.5%,铬采用 99.5%<sup>[3]</sup>;

$C$ ——灌溉水中重金属的浓度/mg · L<sup>-1</sup>;

$Q_w$ ——每年每 667 m<sup>2</sup> 耕地的平均灌溉水量/L;

$M$ ——每 667 m<sup>2</sup> 耕地土壤 20 cm 深度土壤重量/kg。

将所得公式进行进一步分析:

令  $Q_n = Q_0$ (即令土壤中 n 年后的重金属含量与计算起始年限的含量相同)可得:

$$Q = Q_0(1 - K) / K$$

则可以得出以下结论:

当  $Q \leq \frac{Q_0(1-K)}{K}$  时,  $Q_n \leq Q_0$ , 即重金属在土壤中不发生积累;

当  $Q > \frac{Q_0(1-K)}{K}$  时,  $Q_n > Q_0$ , 即重金属在土壤中会发生积累。以上公式可以用于衡量一定灌溉水质条件下,重金属是否会在土壤中发生积累。

#### 3.2 若干年后土壤耕层重金属含量的定量估算

本研究中,把污水灌溉作为土壤重金属的唯一输入项,不区分各个具体输出项(如重金属随作物带出土壤、重金属在土壤中向下层迁移等)与土壤中重金属含量的数学关系,仅用年残留率  $K$  来计算土壤中重金属的残留与降解。这种估算不考虑各输入输出项相互之间动态平衡的数学关系,适用于估算在较长时间后土壤中重金属的含量。本文仅对污灌区土壤 0 ~ 20 cm 土层中重金属的积累趋势进行分析。

污灌水的重金属浓度来源于河北省环境质量报告书(1990—2000)中府河、洺河监测数据的均值,并取历年资料中的最大值进行估算,即估算土壤重金属达到某标准的最少灌溉年限。其他数据来自本课题中

表 3 保定灌区土壤重金属估算结果

Table 3 Quantification of soil heavy metals accumulated in Baoding Area

项目	灌溉定额 /L · hm <sup>-2</sup>	灌溉水质 /mg · L <sup>-1</sup>	$Q_0$ /mg · L <sup>-1</sup>	$Q$ /mg · L <sup>-1</sup>	$K$	$Q_0(1 - K) / K$	是否积累
Hg	4 115 250	0.002 9	0.091	0.004 1	94%	0.005 8	
As		0.09	9.45	0.125 9	99.5%	0.047 5	积累
Pb		0.054	41.785	0.075 5	98.5%	0.636 3	
Cr		0.196	47.889	0.274 2	98.5%	0.729 3	
Cd		0.001	3.393	0.001 4	90%	0.377	

\* 土壤容重为 1.47 g · cm<sup>-3</sup>,每 667 m<sup>2</sup> 土层质量 196 098 kg。

表4 栾城灌区土壤重金属估算结果

Table 4 Quantification of soil heavy metals accumulated in Luancheng Area

项目	灌溉定额 /L · hm <sup>-2</sup>	灌溉水质 /mg · L <sup>-1</sup>	$Q_0$ /mg · L <sup>-1</sup>	$Q$ /mg · L <sup>-1</sup>	$K$	$Q_0(1 - K) / K$	是否积累
Hg	4 122 900	0.000 82	0.073	0.001 3	94%	0.004 6	
As		0.281	8.037	0.438 6	99.5%	0.040 4	积累
Pb		0.059	43.909	0.092 1	98.5%	0.668 7	
Cr		0.056	46.385	0.087 4	98.5%	0.706 3	
Cd		0.003 3	3.888	0.005 2	90%	0.432	

\* \* 土壤容重 1.32 g · cm<sup>-3</sup>, 每 667 m<sup>2</sup> 土层质量 176 088 kg。

表5 典型污灌区  $n$  年后土壤 As 含量(mg · kg<sup>-1</sup>)Table 5 Soil heavy metals after  $n$  years of irrigation in typical wastewater irrigated region

项目	$Q_0$	$Q$	$Q_{10}$	$Q_{20}$	$Q_{35}$	$Q_{50}$	$Q_{100}$	$Q_{230}$	标准 1	标准 2
保定	9.45	0.1259	10.219	10.95	11.961	12.937	15.602	20.128	25	20
栾城	8.037	0.4386	11.911	15.598	20.788	25.604	41.045		25	20

对典型区土壤采样测定部分的测定结果。

从以上分析可以看出,在保定灌区和栾城灌区,以当前府河和洺河水体进行农田灌溉,只有 As 在土壤中会发生积累。若干年后 As 在土壤中的估算浓度见表 5。

由上表可知,以目前 2 条河流的污灌水进行灌溉,进行估算可得到如下结果:保定灌区由于污灌水中 As 的含量较低,污灌持续 230 a 后,土壤中 As 的含量会超过绿色食品产地环境质量标准;栾城灌区污灌在持续 35 a 左右,土壤中 As 的含量将超过绿色食品产地环境质量标准;持续 50 a 左右,土壤中 As 的含量将超过国家土壤环境质量二级标准。

#### 4 结论与讨论

经过近 20 年的污灌后,4 个典型灌区的土壤 Cd 均超过《土壤环境质量标准》的二级标准,即土壤失去了作为农田的利用价值;洺河和府河灌溉水中的重金属含量并未严重超标,只要合理进行污灌并适当控制污染物入河的排放量,可以保证在一定时期内不会对

土壤造成严重的重金属积累。

在保定和栾城两个灌区,如果持续目前的污灌模式,As 会在土壤中产生积累。保定灌区在污灌持续 230 a 左右,土壤中 As 的含量会超过绿色食品产地环境质量标准。栾城灌区污灌持续 30 a 左右,土壤中 As 的含量将超过绿色食品产地环境质量标准;持续 50 a 左右,土壤中 As 的含量将超过国家土壤环境质量二级标准。

#### 参考文献:

- [1] 中国农业生态环境网. 全国基本农田保护区农业环境重点污染区登记.
- [2] 李森照,等. 中国污水灌溉与环境质量控制[M]. 北京:气象出版社,1995. 7-10.
- [3] 中国标准出版社第二编辑室. 水质分析方法国家标准汇编[M]. 北京:中国标准出版社,1999.
- [4] 夏家淇. 土壤环境质量标准详解[M]. 北京:中国环境科出版社,1996. 70-75.
- [5] 夏增禄. 土壤环境容量及其应用[M]. 北京:气象出版社,1998. 176-184.