2007年9月

污水灌溉后土壤重金属汞和砷积累变化规律及 对番茄的影响^{*}

陈新明^{1,2} 蔡焕杰^{1†} 孙爱华¹ 王 燕

(1 西北农林科技大学水利与建筑工程学院,陕西杨凌 712100)

(2 塔里木大学农业工程学院,新疆阿拉尔 843300)

摘 要 污水灌溉对土壤、作物的影响日益受到人们的关注。通过日光温室内的污水滴灌试验,分析了污水灌溉后重金属 H_g 、As 在土壤中的集聚分布规律和污水灌溉对番茄生长、产量与品质的影响,同时探讨了在番茄果实中的残留状况。结果表明,污水灌溉后重金属 H_g 、As 在不同土层集聚差异较大, H_g 、As 在根区 10~30~cm 土层出现了富集现象,且二者具有很好的相关性,说明土壤受灌溉外源污染影响较大;污水灌溉对番茄的果实产量和品质有一定的影响,与清水处理相比番茄的产量减少7.68%,果实中的可溶性固形物提高了46.2%、 V_C 含量增加76.76%,酸度和可溶性总糖含量基本持平,蛋白质降低了55.84%;番茄果实检测表明,与清水处理相比, H_g 的残留量增加了28%,As 增加了112%,但含量均未超标。

关键词 污水灌溉; 重金属; 积累; 番茄

中图分类号 S275. 4

文献标识码

实践证明. 污水灌溉在地表水开发利用上具有 节水、节肥和消除污染等重要意义, 对缓解农业用 水、促进粮食增产、增加农民收入起到了重要作用。 但是, 污水中含的有毒有害物质, 如一些重金属, 因 其化学行为和生态效应的复杂性, 从而导致土壤、农 作物和地下水的污染, 给农业生态环境和农产品带 来了一定程度的污染[1]。目前我国受镉、砷、铬、铅 等重金属污染的耕地面积近 2000 万 lm², 约占耕地 总面积的 $1/5^{[2]}$ 。 因此, 如何合理利用污水灌溉是 值得研究的课题。近几年来, 国内外学者就重金属 在土壤中的分布形态进行了研究。例如:冯绍元等[3] 对污水灌溉夏玉米的植物生理特性进行研究, 表明 金属 As、Cd 和 Pb 在作物体内的残留含量因部位不 同而有差异: 庞奖励等[4] 对污灌土、正常土壤及在其 上种植的西红柿等进行了研究,结果表明不同元素 的累积强度不同, 西红柿不同生长阶段对土壤中重 金属吸收程度不同; Linehan 等[5] 发现污水灌溉后作 物根际土壤溶液 Cu、Zn 含量远高于非根际土壤;陈 有 等[6] 研究表明,不同重金属在玉米根际间变化 幅度较大。关于蔬菜对不同重金属的吸收差异和机 理及不同土壤类型对重金属吸收性影响国内外也有

研究^[7,8]。总之,污水灌溉不仅能导致土壤肥力降低,还能使农作物产量和品质下降,甚至通过食物链影响人体健康。

作物根区有害金属的动态分布是植物与金属离子共同作用的结果,一是作物根际环境不同,从而导致金属在根区动态分布不同;二是重金属本身属性不同使其对根区环境变化的响应也不同,因此,重金属对作物生长状况、品质的影响和反馈、耦合作用需要研究。通过对番茄采用污水灌溉试验,研究污水灌溉对其生长发育的影响,以及污水中重金属在土壤一番茄系统中的运移、吸收、聚集规律,旨在为科学地确定污水灌溉制度提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验条件

实验在西北农林科技大学农业水土工程教育部 重点实验室进行。土壤为 土, $0\sim60$ cm 土层土壤 平均容重为 1.40 g cm $^{-3}$, 田间最大持水量 23.8%, 体积饱和含水率为 51.7%。土壤有机质含量为

^{*} 西北农林科技大学校长基金(05ZR041)、国家自然科学基金项目(50479051)和十一五"863"项目(2006AA100202)共同资助

[†] 通讯作者, 蔡焕杰(1962~), 男, 教授, 主要从事农业节水和水资源高效利用方面的研究

1.2 试验设计

 16.09 g kg^{-1} , 全氮含量 1.15 g kg^{-1} , 全磷含量 1.18 g kg^{-1} , 全钾含量 20.26 g kg^{-1} , 土壤肥力中等。

取试验区 $0\sim60~cm$ 深度的土层样品, 用日本产 CR-21G 型高速冷冻离心机测定 $0\sim705~kPa$ 吸力段土壤水分特征曲线, 得到 $0\sim60~cm$ 土层代表性水分特征曲线为:

$$S(\theta) = 0.0016\theta^{-10.704}$$
 $C(\theta) = 58.3894\theta^{11.704}$ $(R^2 = 0.9805)$ 式中, θ 为土壤含水量 $(\text{cm}^3\text{cm}^{-3})$, $S(\theta)$ 为土壤水分吸力 (Pa) , $C(\theta)$ 为比水容量 (cm^{-1}) 。

试验设计采用污水处理厂处理后的污水(采用车载铁皮桶运载杨凌污水处理厂出口池的水,满足灌溉水质标准)和清水(对照)2个处理,各处理3次重复。各处理试验小区面积1.2 m×3.5 m,为了防止水分在小区间水平方向上的交换,小区间用0.8 m深的塑料膜隔开。试验番茄品种为东圣1号,营养钵育苗,定植时统一标准筛选。番茄行距40 cm,株距33 cm。番茄于2005年8月21日定植,定植后立即按设计处理采用沟灌浇缓苗水、灌水定额

 $600 \text{ m}^3 \text{ hm}^{-2}$,以后各生育期采用滴灌,灌水定额相同,均为 $120 \text{ m}^3 \text{ hm}^{-2}$,毛管布置方式为 1 条毛管 1 行番茄。试验于 2006 年 1 月 18 日结束。各小区田间管理措施除灌水水质不同外,其他相同。

1.3 样品采集与分析测定

土样每个小区采用三点混合法采集,每点以 10~cm深度分层取样,风干研磨后四分法,过 100~em 的尼龙筛,供重金属含量的测定。然后取 2~g~tm 加 7~cm 优纯级硫酸、10~cm 优纯级硝酸、2~cm 优纯级高氯酸用锥形瓶置于电热板上加热分解进行预处理,待测液用原子荧光法测量总 As~cm 含量。取 2~g~tm 样加五氧化二钒 50~cm 的 cm 以 cm

表 1 污水灌溉 前土壤重金属含量

Table 1 Heavy metal contents of soil before sewage irrigation ($mg \ kg^{-1}$)

重金属 Heavy metal	土层 Soil depth						
重並属 Heavy metal	0~ 10 cm	10∼ 20 cm	20~ 30 cm	30~ 40 cm	40~ 50 cm		
Hg	0. 136	0. 067	0 087	0. 047	0. 041		
As	16. 96	17. 18	16 73	16. 05	16. 50		

污水灌溉前取 1000 ml 分析化验其主要成分 (pH, COD 等),满足灌溉水质标准(GB5084-92)要

求后进行灌溉(见表2)。

表 2 灌溉污水主要成分

Table 2 pH and major components of the sewage

灌水时间 Irrigation time (mm- dd)	рН	COD	总氮	总磷	As	Hg
/E/NETIC (IIII du)	pri	$(mg L^{-1})$	Total N (mg L ⁻¹)	Total P (mg L ⁻¹)	$(mg L^{-1})$	(mg L ⁻¹)
08- 21	6.8	93 12	21. 04	1. 21	7. 4	< 1
09- 18	6.5	249. 2	-	2. 09	8 2	< 1
10- 03	6.7	156 3	18. 52	1. 85	8 8	< 1

每个小区选定 5 株长势均匀的番茄, 6~ 7 d 观测一次株高、茎粗, 节间长, 获得番茄的基本生长资料, 在开花、结果时作详细记录; 番茄每个生育期内至少取一次根, 测量根系体积, 根系密集层, 并计算根冠比; 进入果实成熟期后, 每隔 3 d 采摘成熟的果实称重, 按照单株产量测产; 每个小区取 5 株等数量具有代表性的果实, 采用四分法进行品质实验, 测量

番茄的可溶性固形物、 V_C 、总酸度和可溶性总糖含量等。叶面积指数采用 LP—80型 PAR/LAI 冠层分析仪测定; 采用英国 PP system 公司生产的 CIRAS—1便携式光合测定仪测定净光合速率(Pn)、蒸腾速率(Tr)、气孔导度(Gs)以及光、温等环境因子; 用考马斯亮蓝 G—250法测定可溶性蛋白质含量; 用蒽酮比色法测定可溶性糖类含量: 用阿贝尔折射仪测量可

溶性固形物, 用钼蓝比色法测量 V_c 含量, 用碱式滴定法测量总酸度 $^{[9]}$ 。番茄果实中重金属 H_g 和 A_s 的残留量测定方法与土壤中的测定方法相同, 测量前将采样的果实用匀浆机打成匀浆, 储于塑料袋中保存备用。

1.4 数据处理

实验数据采用 Excel 2000、数率统计方法和国产 DPS 统计软件处理。

2 结果与分析

2.1 根区重金属的集聚分布规律

2. 1. 1 重金属的集聚分布规律 为了保障农业生产、维护人体健康和植物正常生长国家制定了不同 pH 值标准的重金属含量临界值。表 3 和表 4 列出了土壤重金属Hg 和 As 环境质量标准和试验结束后土壤重金属Hg 和 As 实测值。可以看出,试验前后污水处理试验区土壤 pH 没有变化, $0\sim50~{\rm cm}$ 深度的Hg、As 平均含量均未超过土壤环境质量的二级标准。进一步分析表明,试验结束后土壤重金属 Hg 含量增加了 7.9%,而 As 含量却降低了 3.1%。

表 3 土壤环境质量标准[10]

Table 3 Soil environmental quality standard(mg kg⁻¹)

重金属	二级	土壤 pH 值	三级土壤 pH 值		
Heavy	pH values for	second level of soil	pH values for t	hird level of soil	
metal	< 6 5	6.5~ 7.5	> 7.5	> 6 5	
Hg	≤ 0 3	≤ 0. 5	≤ 1	≤1.5	
As	€30	≤25	€30	€40	

表4 污水灌溉前后土壤 Hg、As 的含量

Table 4 Heavy metal contents of soil before and after sewage irrigation (mg kg⁻¹)

	试验前值	试验后值		
重金属	Content before experiment	Content after experiment		
Heavy metal	pH= 7.5	pH= 7.5		
Hg	0 076	0. 082		
As	16 68	16. 16		

注: 表中数据为 $0\sim50~\mathrm{cm}$ 土层的平均值 Note: The numbers in table are average values of soil depth down to 50 cm

图1为污水灌溉后番茄生育期重金属 As、Hg 在番茄根区的集聚分布曲线。从图可以看, 根区 As、Hg 在各个土层上的基值有较大的差异, 无明显的规律, 但是在生育期结束后 As、Hg 的集聚分布有一致的趋势。(1)污水滴灌降低了根区 0~ 10 cm 土层的重金属 As、Hg 含量, 其中重金属 As 降低了 29.4%、

 $H_{\rm g}$ 降低了 2.8%; (2) 重金属 $A_{\rm s}$, $H_{\rm g}$ 在番茄根区 $10\sim30$ cm出现了集聚现象, 其中 $H_{\rm g}$ 在 $10\sim20$ cm 土层集聚量最大, $20\sim30$ cm 处次之。 $10\sim20$ cm $A_{\rm s}$ 含量与种植前土壤基值相比增加了 1.4%, $20\sim30$ cm 增加了 0.7%, 而 $10\sim20$ cm $H_{\rm g}$ 含量与种植前土壤基值相比增加了 26.4%。 (3) 根区 $30\sim50$ cm 土层 $40\sim30$ cm 增加了 $40\sim30$ cm 与种植前基本持平, 在 $40\sim50$ cm 较种植前增加, 增加量达 $40\sim30$

重金属 As、Hg 在番茄根 区不同土层的集聚分 布规律和膜下滴灌土壤水分运动规律和土壤湿润体 的形状有关, 滴头的湿润体为直径 30~40 cm 的半 椭球状。通常土壤中的离子和金属是随水分的运动 而运动, 灌水过程中, 在水的重力作用下土壤 0~ 10 cm土层的重金属 As、Hg 随着水分向下运动, 并慢慢集聚在 10~ 30 cm 的湿润体的边缘, 因此, 在 番茄根区 10~30 cm 出现了集聚现象。另一方面重 金属 As、Hg 在番茄根区不同土层的集聚分布规律 和番茄根系分布及根系对不同金属的选择性吸收有 关。由于不同作物的根系吸收和分泌物不同,使得 根区土壤物理和化学性质发生变化[11],并引起重金 属形态发生变化。同时,不同作物对不同金属的吸 收具有选择性[12,13]。番茄的根系层主要分布在 20~ 50 cm, 30~ 50 cm 土层 As 含量减少了, 说明被 番茄根系吸收了, 残留在番茄植株体内和果实内, 而 Hg 并没有被番茄吸收,集聚在土壤中。以上分析表 明,污水灌溉重金属As、Hg在番茄根区不同深度的 集聚强度不同, Hg 的集聚强度大于 As, 也说明了试 验结束后为什么土壤 0~60 cm 深度的重金属 As 含 量减少了, 而 Hg 含量增加了。

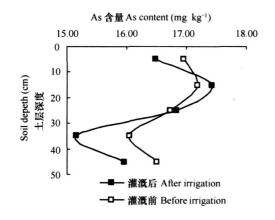
2.1.2 重金属集聚相关性分析 土壤中重金属含量与土壤母质和成土过程有关。试验小区土壤底质相同,土壤污染源主要是灌溉污水,因此,重金属在不同土层中的含量变化趋势应当相同或相近。对污水灌溉试验前后土壤中重金属 H_g 与 A_s 的相关性分析表明,12 个样品中灌溉前土壤中 H_g 与 A_s 之间的相关性不明显,相关系数 r=0.314,而污水灌溉后 H_g 与 A_s 之间具有较高的相关性,r=0.982。这一结果和图 1 土壤不同深度的集聚分布趋势是基本一致的。

2.2 污水灌溉对番茄的影响

2.2.1 对番茄生态的影响 植物通过光合作用合成碳水化合物,积累于物质,积累量的大小直接反

映在株高、茎粗、叶片数和叶面积的变化上。表 5 为 污水灌溉对番茄生长状态影响检测结果(3 个重复 的平均值)。可看出,污水处理番茄的第 1 花序节位 有所降低,较清水处理降低了 7.12%;而且第 1 花序和第 2 花序坐果率也分别低于清水处理的 11.84%和 2.94%。同时可以看出,污水处理番茄的平均株

高较清水处理的要明显高 5.12%~8.00%。而茎粗变化和株高正好相反,污水处理的平均茎粗一直低于清水的 4.10%~7.50%。果实生长速率观测表明,污水灌溉对果实生长有一定抑制作用,污水处理虽然先长出果实,但是生长缓慢,而清水灌溉果实生长速率较快。



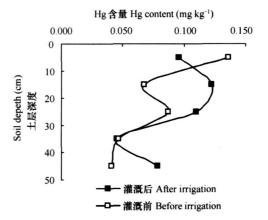


图 1 番茄根区不同深度重金属聚积分布曲线

Fig 1 Accumulation distribution curves of heavy metals in different depth lavers of tomato rhizosphere

表 5 番茄生长状态

Table 5 Differences in tomato development between freshwater irrigation and sewage irrigation

	第1花序节位	第1花序坐果率	9	月 20 日 Sep	20	11	月 29 日 Nov.	29
处理	Node position	Fruit set percentage of	径粗	株高	叶面积指数	径粗	株高	叶面积指数
Treatment	of first anthotaxy	first anthotaxy	Stem diameter	Plant height	ドロロイスプロダX LAT	Stem diameter	Plant height	山田松油数 LAI
	(m)	(%)	(mm)	(mm)	1211	(mm)	(mm)	
清水 Freshwater	6 74 a	84. 21 A	8. 58 a	500 A	0. 61 a	9.86 a	932 a	0 85 a
污水 Sewage	6 26 b	72. 37 B	8.02 a	540 B	0. 67 a	9.46 a	983 b	0 82 a

注: 每列数字后不同小写字母表示 p < 0.05 显著性差异, 相同字母表示无差异, 大写字母表示 p < 0.01 显著性差异 Note: Numbers in each column followed by different lowercase letters are significantly different between treatments at p < 0.05, and by different uppercase lettercase significantly different at p < 0.01

2.2.2 对番茄蒸腾作用的影响 土壤水分的多少影响着作物光合速率的变化^[14],水分亏缺会使光合速率下降,水分过多又会使根系通气不良,从而影响植株正常的生长发育,间接的影响了植株的光合作用,同时也影响了蒸腾速率、气孔导度和作物的水分利用效率。图 2 为不同处理番茄果实膨大期 10月10日测得的不同处理光合速率(Pn)、蒸腾作用(Tr)、气孔导度(Gs)及水分利用效率(Pn/Tr)日变化状况,可看出番茄叶片光合速率日变化呈近似双峰曲线。污水处理番茄在下午 14:00左右出现第二波峰,而清水处理的第二波峰出现在下午 16:00左右。15:00以前污水处理的光合速率大于清水处理的,之后刚好相反;番茄叶片的蒸腾速率和气孔导度日

变化规律相似。自早上 8:00 开始, 随着光照的增强, 气孔受到光的刺激后慢慢张开, 并逐渐增大, 到中午 12:00 时达到最大值, 植株的蒸腾随着气孔的张开和光照的增强而增加。此后, 为维持体内的水分平衡, 迫使气孔慢慢减小, 蒸腾也慢慢减小, 形成单峰曲线。可以看出污水处理的蒸腾速率与气孔导度均大于清水处理。植物叶片瞬时水分利用效率作为植物生理活动过程中消耗水分形成有机质的基本效率, 它除受物种基因外, 还受制于叶片截获的光能、光合酶的活性和再生能力等。水分利用效率早晚表现为污水处理大于清水处理的, 10:00 至 13:00 左右二者差异不明显。以上分析表明, 污水处理植株生长旺盛, 气孔导度大, 碳同化能力高, 光和作用

强,水分散失快,蒸腾作用强烈,水分利用效率相对

要低一些,这与Gzyl^[15]的研究结果一致。

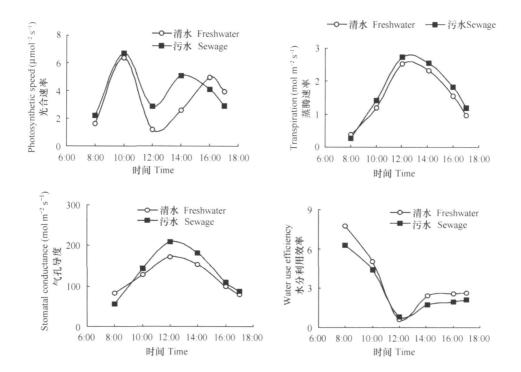


图 2 不同灌溉水番茄的光合速率、蒸腾速率、气孔导度和水分利用率的日变化

Fig. 2 Daily variation of photosynthetic rate, transpiration rate, stomatal conductance and water use efficiency of tomato under freshwater and sewage irrigation

2.2.3 对番茄产量和品质的影响 表 6 为番茄产量和果实的品质分析结果。结果表明,污水处理平均单株产量为 636 g, 较清水处理少 53 g, 减产了7.58%,这是因为污水灌溉早期花序坐果不良,植株的过旺生长,透光通气条件变差,从而造成了产量的降低,但显著性分析表明 p < 0.05 时,二者产量无差异。果实品质分析表明,污水处理番茄的可溶性糖含量与总酸度含量与清水相差不大,这说明在这种土质

条件下污水对番茄的糖分积累和酸度合成没有什么不利影响。但是污水处理可溶性固形物较清水的提高了 46.2%, Ve 含量提高了 76.76%, p < 0.01 时二者差异性显著,说明污水灌溉可以在一定程度上提高番茄的可溶性固形物和 Ve 含量,这一点与夏伟立等 [16] 的研究结果相吻合,但在蛋白的合成上反而比较清水处理降低了 55.8%,污水处理对番茄蛋白的合成贡献不大,并有抑制作用。

表 6 番茄产量和果实品质分析

Table 6 Tomato yield and fruit quality analysis

处理	产量	可溶性固形物	可溶性总糖	维生素 Vc	总酸度	可溶性蛋白质
大生 Treatment	Yield	Soluble solid	Total soluble sugar	Vitamin C	Total acidity	Soluble protein
i reatment	$(kg m^{-2})$	(%)	(%)	$(mg g^{-1})$	(%)	$(mg g^{-1})$
清水 Freshwater	5. 09 a	2. 563 a	0.458 a	0 33 A	0. 147 a	1. 096 A
污水 Sewage	4. 58 a	3. 747 b	0.422 a	0 58 B	0. 139 a	0.484 B

注: 每列数字后不同小写字母表示p < 0.05 显著性差异, 相同字母表示无差异, 大写字母表示 p < 0.01 显著性差异Note: Numbers in each column followed by different lowercase letters are significantly different between treatments at p < 0.05, and by different uppercase lettercase significantly different at p < 0.01

2.3 重金属在果实中的残留

 的累积则为 0.023 mg kg^{-1} , 但均无超标现象, 满足食品安全国家标准 17,18 。 与清水处理相比, H_g 的积累量增加了 28%, p < 0.01 时, 无差异, p < 0.05

时, 呈显著性差异; 而 As 积累量增加了 112%, p < 0.01 时, 呈显著性差异。这说明污水灌溉番茄对重金属 As 的吸收高于 Hg, 这与前文分析结果是一致的, 也与薛艳等^[8] 研究结果相一致。

表 7 番茄果实中重金属残留量

Table 7 The contents of heavy metals in tomato fruit

处理 Treatment	Hg	As		
文達 Heatment	(mg kg ⁻¹)	(mg kg ⁻¹)		
清水 Freshwater	0.000 8 aA	0. 010 8 A		
污水 Sewage	0.001 0 bA	0. 023 0 B		

注: 每列数字后不同小写字母表示 p < 0.05 显著性差异, 相同字母表示无差异, 大写字母表示 p < 0.01 显著性差异 Note: Numbers in each column followed by different lowercase letters are significantly different between treatments at p < 0.05, and by different uppercase lettercase significantly different at p < 0.01

3 结论与讨论

污水作为一个重要的水资源,对于缓解水资源 短缺具有重要意义。本试验结果表明: 1) 污水灌溉 后重金属Hg、As 在不同土层集聚差异较大,Hg、As 在根区 10~30 cm 出现了富集现象, 且二者具有很 好的相关性。重金属 As、Hg 在番茄根区不同深度 的集聚强度不同, Hg 的集聚强度大于 As; 2) 污水处 理番茄的平均株高较清水处理的要明显高 5.12%~ 8.0%。而茎粗变化平均低于清水的 4.10%~7.5%。且污水灌溉对果实生长有一定抑 制作用; 3) 污水处理番茄的植株生长旺盛, 气孔导度 大, 光和作用强, 水分散失快, 蒸腾作用强烈, 水分利 用效率要低于清水处理的; 4) 污水灌溉番茄的产量 较清水处理下降了 7.58%。果实中的可溶性固形 物提高了 46.2%、V c含量增加 76.76%,蛋白质降低 了55.84%;5)污水灌溉番茄果实中重金属含量符合 食品卫生标准, 但果实中 Hg 的残留量增加了 28%, As 增加了112%。

目前,我国污水灌溉存在的首要问题是水质超标,普遍缺少预处理措施,导致了在污水灌溉面积发展上存在着严重的盲目性,农户通常采取拿来就灌的方式灌溉使农作物品质变差、产量降低,且易造成地下水污染。因此,合理制定灌溉制度,利用污水进行灌溉,不论从节水方面还是应用推广方面,都具有较大的现实意义。

本试验主要涉及 Hg、As 两种元素,有关土壤中各种重金属积累的相关性分析和重金属在作物生育期的形态变化正在进一步研究。

参考文献

- [1] 国家环境监测总站. 中国环境年鉴 2000. 北京: 中国环境年鉴 社,2000. Environment Monitoring Station of China. Environment Arr nual of China in 2000 (In Chinese). Beijing: Environment Annual Company of China, 2000
- [2] 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. 农业工程学报, 2002, 18(4): 113~115. Feng S Y, Shao H B, Huang G H. Field experimental study on the residue of heavy metal in wheat crop(In Chinese). Transactions of Chinese Society of Agricultural Engineering, 2002, 18(4): 113~115
- [3] 冯绍元, 齐志明. 重金属在夏玉米作物体中残留特征的田间 试验研究. 灌溉排水学报, 2003, 22(6): 9~13. Feng S Y, Qi Z M. Field experimental study on the residue of heavy metal in summer com (In Chinese). Journal of Irrigation and Drainage, 2003, 22(6): 9~13
- [4] 庞奖励 黄春长, 孙根年. 西安污灌区土壤重 金属含量 及对西 红柿影响研究. 土壤 与环境, 2001, 10(2): 94~97. Pang J L, Huang C C, Sun G N. Heavy metal content of sewage irrigated soil in Xi an and it's influence to tomato(In Chinese). Soil and Envirorr mental Sciences, 2001, 10(2): 94~97
- [5] Linehan D J, Sinclaair A H, Mitchell D R. Mobilization of Cu, Mn and Zn in the soil solution of barley rhizosphere. Plant and Soil, 1986, 86(2):147~ 149
- [6] 陈有 ,黄艺,曹军,等. 玉米根际土壤中不同种金属形态变化. 土壤学报, 2003, 40(3): 367~ 372. Chen Y J, Huang Y, Cao J, et al. Changes in fractions of heavy metals in maize rhizosphere soil (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2003, 40(3): 367~ 372
- [7] Zhou D M, Chen H M, Hao X Z, et al. Fractionation of heavy metals as affected by soil types and metal load quantity. Pedosphere, 2002, 12(4): 309~ 332
- [8] 薛艳, 沈振国, 周东美. 蔬菜对土壤重金属吸收的差异与机理. 土壤, 2005, 37(1): 32~36. Xue Y, Shen Z G, Zhou D M. Difference in heavy metal uptake between various vegetables and its mechanism (In Chinese). Soils, 2005, 37(1): 32~36
- [9] 高俊凤主编. 植物生理学实验技术. 西安: 世界图书出版公司, 2000. Gao JF. ed. Experiment al Technique of Plant Physiology (In Chinese). Xi an: Word Book Press, 2000
- [10] 夏家淇主编. 土壤环境质量标准详解. 北京: 中国环境科学出版社, 1996. Xia J Q. ed. Expain of Environmental Quality Standard for Soils(In Chinese). Beijing: China Environmental Science Press, 1996.
- [11] Qian Y L, Mecham B. Long term effects of recycled wastewater irrigar tion on soil chemical properties on golf course fairways. Agronomy Journal, 2005, 5(3): 717~721
- [12] Ma Lena Q, Fang T, Willie G H. Conentrations distributions of eleven metals in Florida soils. Journal of Environmental Quality, 1997, 26(4): 769~775
- [13] Shuman L M, Wang J. Effect of rice variety on zinc, iron, and marr gamese content in rhizosphere and non rhizosphere soil fractions. Communications in Soil Plant Analysis, 1997, 28(1/2):23~36
- [14] Luo Y M, Christie P. Alkaline sewage sludge soils affect the chemical

- speciation and bioavailability of Cu and Zn in the rhizosphere soil solution. Soil Science and Plant Nutrition, 1997, 43:1041~ 1046
- [15] Gzyl J. Lead and cadmium contamination of soil and vegetables in the apper silesia region of poland. Science of the Total Enbironment, 1990, 96(1/2): 199
- [16] 夏伟立, 罗安程, 周焱, 等. 污水处理后灌溉对蔬菜产量品质和养分吸收的影响. 科技通报, 2005, 21(1): 79~83. Xia W L, Luo A C, Zhong Y, et al. Yield, nutrient status and quality of leafy vegetables grown in soils irrigated with municipal sewage(In Chinese). Bulletin of Science and Technlogy, 2005, 21(1): 79~83
- [17] 中华人民共和国卫生部. GB4810 1994, 食品中砷限量卫生标准. 北京: 中国标准出版社, 1994. Ministry of Health of the People's Republic of China. GB4810 1994 Health Standard for Limit to Arsenic Capacity in the Food (In Chinese). Beijing: Standars Press of China, 1994
- [18] 中华人民共和国卫生部. GB2762-1994, 食品中汞限量卫生标准. 北京: 中国标准出版社, 1994. Ministry of Health of the People's Republic of China. GB2762-1994 Health Standard for Limit to Mercury Capacity in the Food (In Chinese). Beijing: Standars Press of China, 1994

EFFECTS OF SEWAGE IRRIGATION ON TOMATO GROWTH AND ACCUMULATION OF Hg AND As IN SOIL

Chen Xinming^{1, 2} Cai Huanjie^{1†} Sun Aihua¹ Wang Yan¹
(1 Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling, Shaansi 712100, China)

(2 Tarim University, Alar, Xinjiang 843300, China)

Abstract Sewage irrigation has been paid more attention due to its adverse effects on soil and crops. An experiment was carried out in a greenhouse equipped with a drip irrigation system to investigate the distribution patterns of heavy metals (Hg and As) and tomato development, yield and fruit quality under sewage irrigation. Results showed that significant spatial variation of heavy metal contents was observed in soil profiles. Hg and As were enriched in the 10~ 30 cm layer, showing close correlation between them, which indicated that the soil environment was seriously affected by external pollutants. Generally, sewage irrigation influenced growth of tomato fruits and its quality, as shown by a lower growth rate, 7.68% lower yield, 46.2% higher soluble solid content, 76.76% higher Vc content, 55.84% lower protein content and similar contents of the acidity and total soluble sugar than with freshwater irrigation. Sewage irrigation also increased Hg content by 28% and As by 112%, but not above the food safety criteria.

Key words Sewage irrigation; Heavy metal; Accumulation; Tomato