# 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]
(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 Hg、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 Hg、As 在不同土层集聚差异较大, Hg、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, Hg 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　A

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 $hm^2$, 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—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~ 60 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
作者简介: 陈新明(1968~ ), 男, 副教授, 西北农林科技大学水建学院工作, 邮编: 712100; 现在是援疆干部在塔里木大学农业工程学院, 邮编: 843300。从事节水灌溉技术和作物灌溉制度研究。E-mail: cxm5503@126.com
收稿日期: 2006-04-24; 收到修改稿日期: 2006-08-05

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~ 60 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~ 705 kPa 吸力段土壤水分特征曲线, 得到0~ 60 cm 土层代表性水分特征曲线为:

$$S(\theta) = 0.0016\theta^{-10.704}$$

$$C(\theta) = 58.3894\theta^{11.704} \qquad (R^2 = 0.9805)$$

式中, θ 为土壤含水量( $cm^3\ cm^{-3}$), $S(\theta)$ 为土壤水分吸力(Pa), $C(\theta)$ 为比水容量( $cm^{-1}$)。

**1.2** 试验设计

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 $m^3\ hm^{-2}$, 以后各生育期采用滴灌, 灌水定额相同, 均为 120 $m^3\ hm^{-2}$, 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 目的尼龙筛, 供重金属含量的测定。然后取 2 g 土样加 7 ml 优纯级硫酸、10 ml 优纯级硝酸、2 ml 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 含量。取 2 g 土样加五氧化二钒 50 mg、硝酸 10~ 20 ml、硫酸 5 ml, 置于电热板上加热至近沸, 保持 60 min, 取下冷却, 滴加高锰酸钾溶液( 20 g $L^{-1}$) 至紫色不退, 临测前, 滴加盐酸羟胺溶液( 200 g $L^{-1}$), 用冷原子吸收分光光度计测量总 Hg 含量。番茄定植前 7 d 测定土壤不同深度重金属 Hg 和 As 的含量, 取3 个重复的平均值作为各层的Hg 和 As 的背景值( 见表 1)。取 0~ 50 cm各层Hg 和As 含量的平均值作为土壤中 Hg 和 As 含量值(试验结束后测试方法和数据处理相同)。

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 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 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) | pH | COD ( mg $L^{-1}$) | 总氮 Total N ( mg $L^{-1}$) | 总磷 Total P ( mg $L^{-1}$) | As ( mg $L^{-1}$) | Hg ( 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 Hg 和 As 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~ 50 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 Heavy metal | 二级土壤 pH 值 pH values for second level of soil | | 三级土壤 pH 值 pH values for third level of soil | |
|---|---|---|---|---|
| | < 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$^{-1}$)

| 重金属 Heavy metal | 试验前值 Content before experiment | 试验后值 Content after experiment |
|---|---|---|
| | pH= 7.5 | pH= 7.5 |
| Hg | 0.076 | 0.082 |
| As | 16.68 | 16.16 |

注: 表中数据为 0~ 50 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%, Hg 降低了 2.8%; (2) 重金属 As、Hg 在番茄根区 10~ 30 cm出现了集聚现象, 其中Hg 在 10~ 20 cm 土层集聚量最大, 20~ 30 cm 处次之。10~ 20 cm As 含量与种植前土壤基值相比增加了 1.4%, 20~ 30 cm 增加了 0.7%, 而 10~ 20 cm Hg 含量与种植前土壤基值相比增加了82.1%, 20~ 30 cm 增加了 26.4%。(3) 根区 30~ 50 cm 土层 As 含量均出现了较种植前减少的现象, 平均减少了 6.0%。而 Hg 含量在 30~ 40 cm 与种植前基本持平, 在 40~ 50 cm 较种植前增加, 增加量达 90%。

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 Hg 与 As 的相关性分析表明, 12 个样品中灌溉前土壤中 Hg 与 As 之间的相关性不明显, 相关系数 $r = 0.314$, 而污水灌溉后 Hg 与 As 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, 积累干物质, 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。

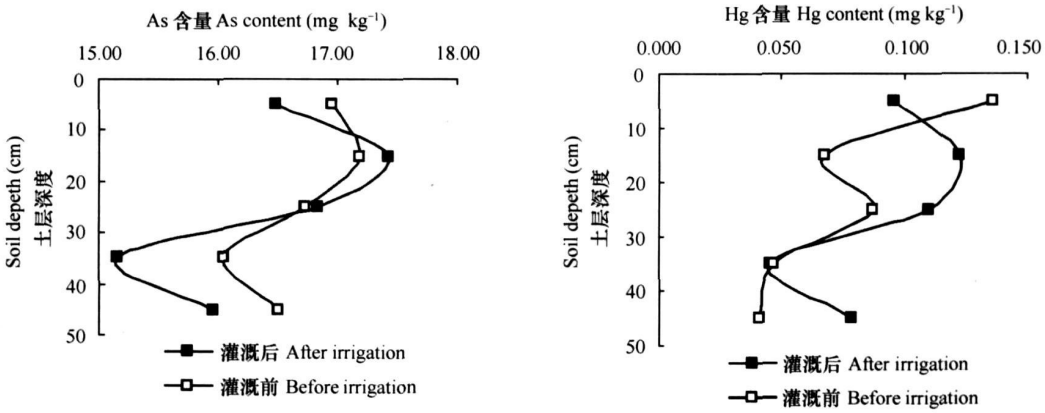


图 1 番茄根区不同深度重金属聚积分布曲线

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

表 5 番茄生长状态

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

| 处理 Treatment | 第 1 花序节位 Node position of first anthotaxy (cm) | 第 1 花序坐果率 Fruit set percentage of first anthotaxy (%) | 9 月 20 日 Sep 20 | | | 11 月 29 日 Nov. 29 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 径粗 Stem diameter (mm) | 株高 Plant height (mm) | 叶面积指数 LAI | 径粗 Stem diameter (mm) | 株高 Plant height (mm) | 叶面积指数 LAI |
| 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 differenct 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。

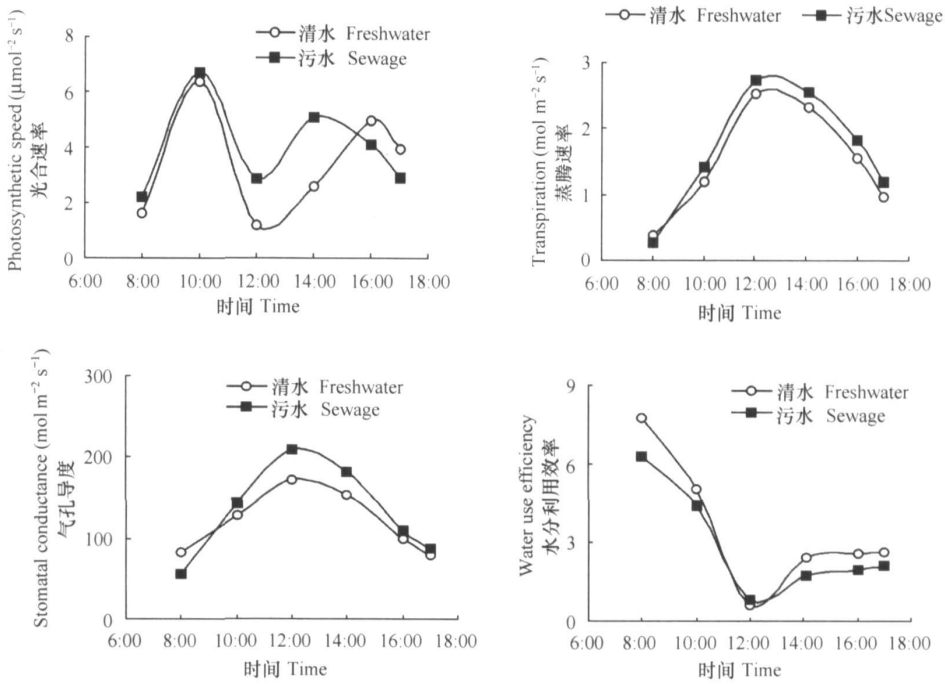


图 2　不同灌溉水番茄的光合速率、蒸腾速率、气孔导度和水分利用率的日变化

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%, Vc 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 Vc 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 Treatment | 产量 Yield ($kg\ m^{-2}$) | 可溶性固形物 Soluble solid (%) | 可溶性总糖 Total soluble sugar (%) | 维生素 Vc Vitamin C ($mg\ g^{-1}$) | 总酸度 Total acidity (%) | 可溶性蛋白质 Soluble protein ($mg\ g^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 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 differenct at $p < 0.01$

## 2.3　重金属在果实中的残留

表 7 为污水灌溉后番茄果实中重金属残留积累量, 可以看出 Hg 的积累仅为 0.001 $mg\ kg^{-1}$, 而 As 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, Hg 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 (mg kg$^{-1}$) | As (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 differenct 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 Annual 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 corn (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 Environmental 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 J F. ed. Experimental 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 irrigation 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 manganese content in rhizosphere and nonrhizosphere 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 Aihua[1]　Wang Yan[1]

*(1 Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling, Shaanxi　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