

污灌区土壤-棉花系统中铊的分布特征

李强¹, 乔捷娟¹, 赵烨^{1*}, 朱宇恩¹, 陈志凡¹, 吉艳琴²

1. 北京师范大学环境学院/水环境模拟国家重点实验室, 北京 100875; 2. 中国疾病预防控制中心辐射防护与核安全研究所, 北京 100088

摘要:通过对位于华北平原北部, 河北省与天津市接壤处的污灌区土壤-棉花 (*Gossypium* spp.) 系统进行实地调查, 分样区采集耕作层土壤样品、土壤剖面样品和棉花全植株样品, 运用 Element2 型高分辨电感耦合等离子体质谱仪测定土壤样品中 Tl 的质量分数和形态, 以及棉花不同组织中 Tl 的质量分数, 结果显示: 在土壤剖面中, Tl 质量分数依次为表土层(0~20 cm)>心土层(20~40 cm)>底土层(40~60 cm), 表明污水灌溉使 Tl 在表土层有所累积; 在表土层中, Tl 的质量分数在 0.257~0.420 mg·kg⁻¹ 之间, 与研究区 Tl 背景值(0.330 mg·kg⁻¹)相比, 个别样点有明显增高的趋势, Tl 的形态特征为残余态>有机结合态>碳酸盐结合态>交换态>水溶态>铁锰结合态, 较高的有机结合态表明长期污灌导致表土层中有机质含量增加, 使得 Tl 易于在表土层累积; 在棉花植株各组织中, Tl 的质量分数在 3.5~78.6 μg·kg⁻¹ 之间, 其分布规律为根系>果壳>茎秆>籽粒>纤维。研究表明, Tl 主要分布于污灌区土壤-棉花系统中的表土层、棉花根系、茎秆和果壳等生态分室中; 棉花植株对 Tl 的平均吸收系数为 2.477, 其中棉花根系对土壤中 Tl 的平均吸收系数达 6.186, 因此, 棉花对重金属的输出作用减缓了土壤中 Tl 的积累速度, 可以有效降低 Tl 对土壤污染的风险。

关键词: 污灌区; 土壤-棉花系统; Tl 分布特征; 修复技术

中图分类号: X131

文献标识码: A

文章编号: 1674-5906 (2009) 02-0502-05

铊(Thallium, Tl)是一种环境中分布广泛的稀有剧毒微量金属元素, 其毒性与重金属元素 Pb、Hg、Cd 相当, 水体中质量浓度为 1.00 mg·L⁻¹ 的 Tl 就会使植物中毒。在未受污染的环境中, 通常大气和地表水体中 Tl 的质量浓度分别低于 1.0 ng·m⁻³ 和 1 μg·L⁻¹, 地壳中 Tl 的质量分数则在 0.10~1.70 mg·kg⁻¹ 之间, 在酸性火成岩和黏土质沉积岩中 Tl 的质量分数较高。土壤中 Tl 的质量分数与成土母质类型密切相关, 全球土壤 Tl 的平均背景值在 0.10~1.00 mg·kg⁻¹ 之间^[1-3]。中国境内土壤中 Tl 的 95% 置信度的质量分数为 0.292~1.172 mg·kg⁻¹, 其中位值为 0.58 mg·kg⁻¹, 略高于世界土壤中 Tl 的平均质量分数。植物体中 Tl 的质量分数通常低于 0.1 mg·kg⁻¹, 也有研究发现在污灌区及施用钾肥的园地中, 植物体中 Tl 的质量分数有增加的趋势, 世界卫生组织 (WHO) 1996 年制定的 Tl 环境健康标准为正常人饮食摄入 Tl 量应低于 5 μg·D⁻¹, 正常人体中的 Tl 含量极低, 一般不足 0.07 mg·kg⁻¹, Tl 的成人致死量仅为 6.0~40 mg·kg⁻¹, 因此, Tl 作为生命非必需元素, 通常在自然环境中以低浓度存在^[1, 3-4]。自 20 世纪 80 年代以来, Tl 作为现代电子、航天、化工、制药、花炮等工业生产中的重要催化剂、辐射屏蔽材料和超导材料已被广泛应用, 另外矿山开发、冶金、化石燃料燃烧等已经向环境中排放了各种含有 Tl 及其盐类的微粒, 当今全球工业中 Tl 的生产量维持在 10~15

kt·a⁻¹ 之间^[1]。环境中的 Tl 可以通过食物链、饮水、呼吸和皮肤接触等多种途径进入人体, Tl 污染产生的人群健康危害问题已引起了人们的高度重视。已有调查研究表明德国、捷克、波兰表土层中 Tl 的质量分数在 0.5 mg·kg⁻¹, 日本未污染的表土层中 Tl 质量分数为 0.33 mg·kg⁻¹, 我国贵州西南部矿区土壤表土层中 Tl 质量分数则高达 124 mg·kg⁻¹, 而且 Tl 在农作物中的质量分数序列为绿色卷心菜 (green cabbage)>红萝卜 (carrot)>大白菜 (Chinese cabbage)>水稻 (rice)>玉米 (corn)^[1, 3, 5-7]。Tl 在现代工业、高新技术和医疗领域已得到广泛的应用, 但有关城郊污灌区土壤-棉花系统中 Tl 含量特征还尚未见报道。本文在进行区域环境调查与采样分析的基础上, 运用 Element2 型高分辨电感耦合等离子体质谱仪 (High Resolution Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer, IR-ICP-MS, 美国 Finnigan 公司生产) 测定了京津冀接壤区域污灌区土壤中 Tl 的质量分数及其形态, 以及棉花 (*Gossypium* spp.) 不同组织中 Tl 的质量分数, 分析了污灌区土壤-棉花系统中 Tl 的分布特征。

1 材料和方法

1.1 研究区域

研究区位于华北平原北部, 河北天津的接壤处, 主要分布在霸州市和文安县境内 (图 1), 区域内地形平坦且地表为厚层的粉沙质沉积物, 其上

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (2007CB407302); 教育部博士点基金项目资助 (20050027022)

作者简介: 李强 (1977 年生), 男, 助理研究员, 博士研究生, 主要从事土地科学及土壤环境研究。E-mail: eq1977@163.com

*通讯作者: 赵烨 (1963 年生), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为土地资源与土壤环境。E-mail: zhaoye@bnu.edu.cn

收稿日期: 2009-02-22

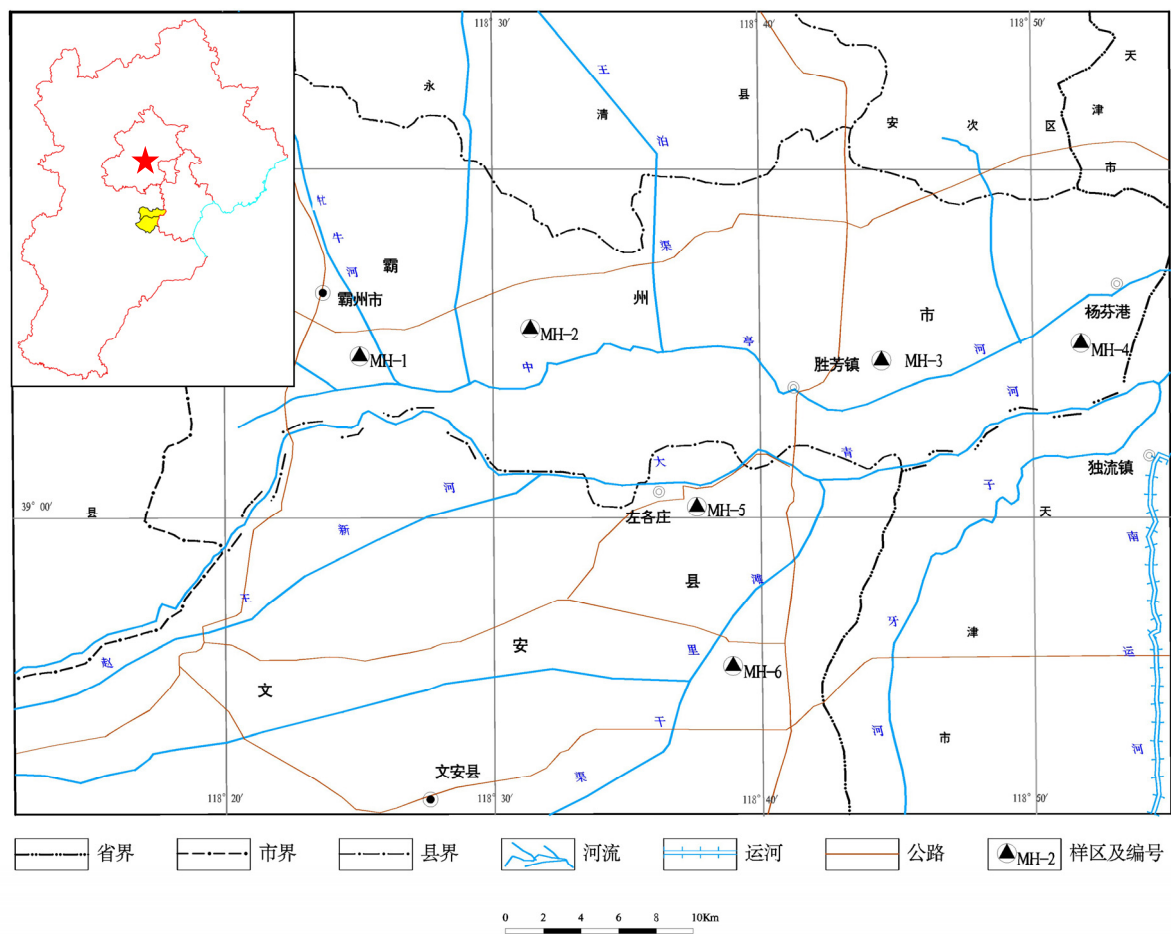


图1 研究区域位置及样点分布

Fig. 1 Distribution map of Sampling sites and study area location

发育了组成与性状相对均匀的沙质及沙壤质潮土（中国土壤系统分类中的淡色潮湿锥形土），属于京津冀地区重要的棉花、蔬菜、冬小麦-夏玉米生产基地，其农田灌溉用水多为大清河、中亭河的混合污水和部分地下水，土壤耕作层中有重金属元素的积累现象^[8-9]。

1.2 样品采集与分析

2007年秋季进行野外土壤环境调查与采样，选取6个面积为334 m²的田间样区，样区分布见图1，每个样区采集5个土壤样品、1份含12株棉花的作物样品，以及一个土壤剖面样品。按照土壤环境监测技术规范 and 土壤农业化学分析方法进行样品处理^[10-11]，运用电位法测定土壤样品的pH值在7.6~8.8之间，运用高温外热重铬酸钾氧化-容量法测定土壤样品中有机质的质量分数在6.85~32.14 g·kg⁻¹之间，运用气量法测定土壤样品中CaCO₃的质量分数在0.76~60.24 g·kg⁻¹之间，运用透光式土壤粒度分析仪测定土壤样品的质地，即黏粒（<0.002 mm）质量分数在118.5~131.8 g·kg⁻¹之间，沙粒（0.02~2 mm）质量分数在619.6~675.3 g·kg⁻¹

之间，按照国际质地标准，研究区土壤质地为沙质壤土质地。

对6个田间样区采集的棉花样品，每个样区随机抽取6个棉花植株用手工分解并在80 °C烘箱中烘烤至恒重，测定棉花纤维、籽粒、果壳、茎秆和根系的平均质量比重分别为17.5%、10.6%、12.8%、52.6%和6.5%。

将所有土壤样品经室内自然风干，磨细过 100 目筛备用。精确称取 0.100 0 g 的 100 目土壤样品，采用美国国家环保局推荐的 USEPA-3050B 方法，消煮土壤样品^[12]。精确称取 0.200 0 g 的棉花样品置于聚四氟乙烯坩埚中，加入 3 mL 优级纯 HNO₃ 和 1 mL 优级纯 HClO₄ 密封，放置于 150 °C 的烘箱内消煮 4 h，加入 1 mL 优级纯 HNO₃ 并用超纯去离子水定容至 10 mL。土壤中不同形态重金属逐级连续提取，采用能够较好适应旱地钙质土壤的 Tessier 法，即精确称取 2.000 g 的 100 目土壤样品放置 50 mL 离心管中；分别以 20 mL 蒸馏水、1 mol·L⁻¹ 的 MgCl 溶液、1 mol·L⁻¹ 的 NaAc 溶液、0.1 mol·L⁻¹ NH₂OH·HCl(盐酸羟胺)的 HOAC (25%) 溶液、30%

的 H₂O₂ 和 5 mL 浓度为 0.1 mol·L⁻¹ 的 HNO₃ 溶液提取水溶态、交换态、碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态、有机结合态和残余态的重金属质量分数,并在流程中逐步配置相应的空白样品。在中国疾病预防控制中心的万级洁净实验室中将上述土壤样品待测液稀释 100 倍、棉花样品待测液稀释 10 倍,然后用 Element2 型高分辨电感耦合等离子体质谱仪(High Resolution Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer, IR-ICP-MS, 美国 Finnigan 公司)测量样品中 Tl 的质量分数,其测量条件是钢内标法测量,样品为 2% (V/V) HNO₃ 介质,标准溶液为美国 SPEX 标准;实验用水由 Milli-Q 超纯水制备系统制备,其电导率为 18.2 MΩ cm,该仪器对 Tl 的检出限为 1.24×10⁻¹²。

2 结果与讨论

试验结果如表1和表2所示。研究区6个土壤剖面各土层中Tl的平均质量分数依次为:表土层(0~20 cm)为0.328~0.364 mg·kg⁻¹;心土层(20~40 cm)为0.270~0.275 mg·kg⁻¹;底土层(40~60 cm)为0.216~0.268 mg·kg⁻¹。这表明人类污灌活动已向土壤表土层排入了一定量的Tl,并且表1结果显示,在表土层中Tl的形态特征为残余态>有机结合态>碳酸盐结合态>交换态≥水溶态>铁锰结合态,其中,黄土质旱地表土层中铁锰结合态Tl极少,有机结合态Tl的质量分数比重较大。这些均表明近20多年来进行污水灌溉已对农田土壤产生了重要影响。

表2显示,研究区表土层中Tl的质量分数在0.257~0.420 mg·kg⁻¹之间,与研究区土壤中Tl背景值(0.330 mg·kg⁻¹)相当^[13],个别样点表土层中Tl质量分数有明显增高的趋势,但总体上研究区污灌土壤中Tl的质量分数都低于中国土壤中铊的中位值(0.58 mg·kg⁻¹);但与世界土壤中铊的中位值(0.20 mg·kg⁻¹)相比较,土壤中Tl含量明显偏高,而加拿大土壤中Tl质量分数标准值1 mg·kg⁻¹,可见,研究区土壤中Tl含量水平尚处于安全状态。此外,研究区土壤中铊的分布具有不均一性,其质量分数主要与土壤有机质含量、质地、pH值、Eh值和人类活动等因素有关。

由于土壤中的Tl有2种氧化状态,即Tl⁺和Tl³⁺,且Tl⁺离子半径与K⁺离子半径接近(Tl⁺=0.147 nm, K⁺=0.133 nm),Tl⁺可以通过类质同像置换长石、水

表 2 采样区土壤样品及棉花不同组织中 Tl 质量分数
Table 2 Thallium contents of soil sample and cotton's different structure in each section of sampling

田间样区编号	土壤样品	Tl 质量分数 /(mg·kg ⁻¹)	棉花样品	Tl 质量分数 /(μg·kg ⁻¹)
MH-1	S1	0.293	纤维	5.2
	S2	0.308	籽粒	5.2
	S3	0.301	果壳	30.1
	S4	0.279	茎秆	27.4
	S5	0.317	根系	77.5
MH-2	S6	0.343	纤维	5.3
	S7	0.411	籽粒	8.4
	S8	0.278	果壳	31.8
	S9	0.275	茎秆	23.3
	S10	0.315	根系	78.6
MH-3	S11	0.357	纤维	5.0
	S12	0.405	籽粒	3.9
	S13	0.366	果壳	30.1
	S14	0.420	茎秆	32.3
	S15	0.347	根系	76.5
MH-4	S16	0.320	纤维	5.0
	S17	0.257	籽粒	5.4
	S18	0.260	果壳	31.6
	S19	0.388	茎秆	27.9
	S20	0.314	根系	66.2
MH-5	S21	0.265	纤维	3.5
	S22	0.294	籽粒	4.0
	S23	0.266	果壳	31.0
	S24	0.264	茎秆	16.6
	S25	0.293	根系	61.2
MH-6	S26	0.318	纤维	7.4
	S27	0.343	籽粒	5.3
	S28	0.342	果壳	30.3
	S29	0.364	茎秆	25.6
	S30	0.270	根系	77.3

云母等黏土矿物晶层中的K⁺离子;由于Tl⁺离子比K⁺离子具有更强的电负性和更高的水合能,故土壤中的Tl易被土壤黏土矿物和腐殖质选择性的保持并固定于土壤有机-无机胶体之中^[2]。研究区土壤的成土母质为黄土状的河流沉积物,其黏土矿物以水云母和蛭石等2:1型矿物为主^[14],且因污水灌溉而富含有机质,亦有研究表明长期污灌也使研究区表土层中有机质含量由20世纪80年代8.8 g·kg⁻¹(平均值)提高到6.85~32.14 g·kg⁻¹之间^[15],因此,研究区域内的土壤对进入其中的Tl⁺具有较强的吸附能力,并使

表 1 研究区表土层中 Tl 的形态分析结果
Table 1 The chemical speciation analysis of Thallium in study area

	分形态					
	水溶态	交换态	碳酸盐结合态	铁锰氧化物结合态	有机结合态	残余态
w(Tl)/(μg·kg ⁻¹)	0.21	0.21	1.99	0.00	30.70	287.45

其保持于表土层。

棉花植株各组织中 Tl 的质量分数在 $3.5\sim78.6\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 其中棉花纤维中 Tl 的质量分数在 $3.5\sim7.4\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 平均为 $5.2\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$; 棉花籽粒中 Tl 的质量分数在 $3.9\sim8.4\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 平均为 $5.4\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$; 棉花果壳中 Tl 的质量分数在 $30.1\sim31.8\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 平均为 $30.8\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$; 棉花茎秆中 Tl 的质量分数在 $16.6\sim32.3\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 平均为 $25.5\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$; 棉花根系中 Tl 的质量分数在 $61.2\sim78.6\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 平均为 $72.9\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 棉花植株中 Tl 的质量分数具有显著的分布规律, 即根系>果壳>茎秆>籽粒>纤维。Kabata- Pendias 等 2007 年综合研究了植物体中 Tl 的平均质量分数约为 $50\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 其中蔬菜体中 Tl 的质量分数在 $20\sim130\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 苜蓿体中 Tl 的质量分数在 $8\sim10\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 牧草体中 Tl 的质量分数在 $20\sim25\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 谷物籽粒中 Tl 的质量分数为 $0.2\sim1.1\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 但在某些蘑菇体中 Tl 的质量分数可高达 $5\ 500\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$; 对于乔木、灌木和草本植物, 有研究表明乔木体中 Tl 的质量分数最高, 可达 $140\sim435\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 灌木体中 Tl 的质量分数在 $125\sim183\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 野生草本植物体中 Tl 的质量分数最低, 仅在 $28.7\sim43.6\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间^[1, 4]。由此可见, 植株为灌木状的棉花, 其根系和茎秆具有较强吸附和萃取土壤中 Tl 的能力。

根据调查分析获得的棉花各组织灰分的平均含量值和表 2 数据, 运用 Fortescue 1980 年和别乌斯 1982 年定义的生物吸收系数, 即某元素在有机体 (通常是植物) 灰分中的含量与该元素在生长这种植物的土壤中的含量比例^[16-17], 可以计算得出棉花各组织对土壤中 Tl 的生物吸收系数分别为: $A_{\text{纤维-Tl}}=0.935$, $A_{\text{籽粒-Tl}}=0.368$, $A_{\text{果壳-Tl}}=1.176$, $A_{\text{茎秆-Tl}}=1.450$, $A_{\text{根系-Tl}}=6.186$ 。这表明生物非必需元素 Tl 被棉花吸收之后主要集中于棉花根系之中, 按照棉花纤维、籽粒、果壳、茎秆和根系的平均质量比重进行加权平均, 得出棉花植株对土壤中 Tl 的平均吸收系数为 2.477。按照别乌斯 1982 年划分的生物吸收序列, 土壤中 Tl 属于棉花中等摄取元素或棉花强烈聚积元素。Angelova 等 2004 年比较分析了土壤重金属污染区棉花组织中 Pb 和 Cd 的质量分数, 即棉花各组织中 Pb 平均质量分数分别为: 根系中 $3.9\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、茎秆中 $1.0\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、籽粒中 $1.1\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、纤维中 $5.8\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 棉花各组织中 Cd 平均质量分数分别为: 根系中 $0.155\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、茎秆中 $0.05\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、籽粒中 $0.10\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、纤维中 $0.154\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 其研究结果证实土壤中的生物非必需元素 Pb 和 Cd 被棉花吸收之后主要集中于棉花根系之中^[18], 对于棉花纤维中重金属存在较高含量, 其

主要原因可能是棉花纤维可以从空气及降尘中直接吸附重金属元素, 这还需要进一步的观测与实验分析加以证实。笔者的相关研究也表明棉花对土壤中 Cu、Ag 和 Au 具有一定吸收富集能力^[19]。

3 结论

华北平原北部的污灌-淡色潮湿雏形土表土层中 Tl 含量 ($0.257\sim0.420\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 与研究区土壤中 Tl 背景值 ($0.33\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 相当, 个别样点土壤表土层中 Tl 含量有增高的趋势; 土壤剖面各土层中 Tl 含量分布特征为: 表土层>心土层 $\geq$ 底土层, 这表明以污灌为主的人类活动已经向土壤表土层排入了一定的 Tl, 且进入土壤中的 Tl 多被表土层中的有机-无机胶体所吸附。

Tl 作为一种稀有剧毒微量的金属元素, 由于其环境地球化学特性与植物营养元素 K 相近, 常被植物吸收和富集, 棉花植株对土壤中 Tl 的平均吸收系数为 2.477, 其中棉花根系对土壤中 Tl 的平均吸收系数可达 6.186, 即进入棉花植株体中的 Tl 主要集中在根系、茎秆和果壳等类木质部分, 而棉花籽粒和纤维中较少。本研究还发现, 在华北平原北部地区, 棉花作为农民广泛种植的非食源性经济作物, 除棉花纤维作为生活用品和工业原料外, 棉花植株 (包括茎秆、根系和果壳) 大都作为制作刨花板的原料, 因此, 除棉花叶片在收获时脱落外, 其余各部分组织都转移离开土壤, 并且棉花的根系、茎秆、果壳对土壤中 Tl 具有较强的吸附能力, 使得种植棉花对于降低土壤中有毒重金属元素 Tl 的污染风险, 具有显著经济效益、环境效益和社会效益。

致谢: 中国科学院生态环境研究中心主任、973 项目首席科学家曲久辉研究员, 国土资源部总规划师胡存智教授, 国土资源部土地整理中心副主任郎文聚教授给予了细心的指导, 作者在此一并致谢。

参考文献:

- [1] KABATA-PENDIAS A, MUKHERJEE A B. Trace Elements from Soil to Human[M]. Berlin: Springer, 2007: 345-350.
- [2] JOHN PETER A L, VIRARAGHAVAN T. Thallium: a review of public health and environmental concerns[J]. Environment International, 2005, (31): 493-501.
- [3] JOHN PETER A L, VIRARAGHAVAN T. Removal of thallium from aqueous solutions by modified *Aspergillus niger* biomass[J]. Biore-source Technology, 2008, (99): 618-625.
- [4] XIAO T F, GUHA A J, BOYLE D, et al. Environmental concerns related to high thallium levels in soils and thallium uptake plants in southwest Guizhou, China[J]. The Science of the Total Environment, 2004, (318): 223-244.
- [5] WIERZBICKA M, SZAREK-LUKASZEWSKA G, GRODZINSKA K. Highly toxic thallium in plants from the vicinity of Olkusz (Poland)[J]. Ecotoxicol Environ Safety, 2004, (59): 84-88.

- [6] KAZANTZIS G. Thallium in the environment and health effects[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2000, (22): 275-280.
- [7] JACOBSON A R, KLITZKE S, MCBRIDE M B, et al. The desorption of silver and thallium from soils in the presence of a chelating resin with thiol functional groups[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2005, (160): 41-54.
- [8] JINZHONG GONG, SHUJUAN SHI, SICHAO JIN. Environmental pollution status assessment of water and soil in Langfang City[J]. *Chinese Journal Geochemistry*, 2006, 25(8): 92-93.
- [9] 王祖伟, 李宗梅, 王景刚, 等. 天津污灌区土壤重金属含量与理化性质对小麦吸收重金属的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2007, 26(4): 1406-1410.
- WANG Zuwei, LI Zongmei, WANG Jinggang, et al. Absorption to heavy metals by wheat and influencing features in sewage-irrigated soil in Tianjin[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(4): 1406-1410.
- [10] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 1-11.
- LU Rukun. *Soil and Agro-Chemistry Analysis Method*[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000: 1-11.
- [11] 国家环境保护总局科技标准司. 中国环境保护标准汇编(2004-2006年)[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2006: 599-632.
- Bureau of Science and Technology Standard, State Environmental Protection Administration of China. *China Environmental Protection Standard Assembly (2004-2006)*[M]. Beijing: Chinese Environmental Science Press, 2006: 599-632.
- [12] 李非里, 刘丛强, 宋照亮. 土壤中重金属形态的化学分析综述[J]. *中国环境监测*, 2005, 21(4): 21-26.
- LI Feili, LIU Congqiang, SONG Zhaoliang. A review of fractionation of heavy metals in soils[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2005, 21(4): 21-26.
- [13] 国家环境保护总局. 中华人民共和国土壤环境背景值图集[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1994: 110.
- State Environmental Protection Administration of China. *Background Value of Soil Environment in People's Republic of China*[M]. Beijing: Chinese Environmental Science Press, 1994: 110.
- [14] 李天杰, 赵烨, 张科利, 等. 土壤地理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004: 29-36.
- LI Tianjie, ZHAO Ye, ZHANG Keli, et al. *Soil Geography*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2004: 29-36.
- [15] 刘克桐. 河北省主要农田土壤肥力变化趋势[J]. *河北农业科学*, 2005, 9(3): 29-35.
- LIU Ketong. Trend of soil fertility in the main farmland of Hebei Province[J]. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 2005, 9(3): 29-35.
- [16] FORTESEUE A C. *Environmental Geochemistry*[M]. New York: Springer-Verlag, 1980: 79-172.
- [17] 别乌斯(Бейс, А. А). 环境地球化学[M]. 朱颜明, 译. 北京: 科学出版社, 1982: 12-56.
- BEYC A A (Ed.). *Environment Geochemistry*[M]. ZHU Yanming, Version. Beijing: Science Press, 1982: 12-56.
- [18] ANGELOVA V, IVANOVA R, DELIBALTOVA V. Bio-accumulation and distribution of heavy metals in fibre crops (flax, cotton and hemp)[J]. *Industrial Crops and Products*, 2004, (19): 197-205.
- [19] 赵烨, 李强, 陈志凡, 等. 通过种植陆地棉修复土壤中重金属污染的实验研究[J]. *北京师范大学学报: 自然科学版*, 2008, 44(5): 545-549.
- ZHAO Ye, LI Qiang, CHEN Zhifan, et al. Phytoextraction of heavy metals in arable soils using gossypium hirsutum L[J]. *Journal of Beijing Normal University: Natural Science*, 2008, 44(5): 545-549.

Distributions of Thallium in soil-cotton system in sewage irrigation area

Li Qiang¹, Qiao Jiejuan¹, Zhao Ye^{1*}, Zhu Yu'en¹, Chen Zhifan¹, Ji Yanqin²

1. State Key Laboratory of Water Environment Simulation/School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. National Institute for Radiological Protection, Chinese Center for Disease Control and Prevention, Beijing 100088, China

Abstract: By means of investigating the soil-cotton system of sewage irrigation area in contiguous area of Hebei and Tianjin, located in north part of North China Plain, the plow layer soil sample, the soil profile sample and the whole plant of cotton sample in difference type area are collected, and the contents and chemical speciation of Thallium (Tl) in soil sample and the contents of Tl in all cotton tissues are tested using Element2 High Resolution Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer. The research results show: the tissues of Tl order is epipedon (0~20 cm) > the middle level (20~40 cm) > the subsoil level (40~60 cm) in the soil profile sample of type area, it is indicated that Tl has accumulated in the surface soil level by sewage irrigation; in epipedon, the contents of Tl is between 0.257 and 0.420 mg·kg⁻¹, compared with the Tl background value of research area, the contents of Tl of individual sampling has the obvious increasing tendency, the chemical speciation characteristic of Tl is residual fraction > bound organic matter > bond to carbonates > exchangeable speciation ≥ water soluble > bond to Fe-Mn oxides, more bound organic matter indicates that the organic content has increased in the epipedon due to the long-term sewage irrigation, which resulted in the Tl accumulating in the epipedon; in each tissues of cotton plant, the contents of Tl is between 3.5 and 78.6 μg·kg⁻¹, the distribution rule is root > hull of cotton > caudexes > seed > cotton fiber. The research indicated: Tl is mostly distributing in different ecological compartment of soil-cotton system in sewage irrigation area, such as epipedon, roots, caudexes and hulls of cotton; the average absorption coefficient of Thallium of cotton plant and roots of cotton is 2.447 and 6.186 respectively. therefore, the function of heavy metal output of cotton slowed down accumulation speed of Tl in soil, cotton planting is effectual to prevent soil contaminated of Tl, and decreased the risk of heavy metal pollution.

Key words: sewage irrigation area; soil-cotton system; distribution feature of Thallium; remediation technology