

浙东固废拆解区污水灌溉对土壤多氯联苯含量的影响研究

黄春雷¹, 宋明义¹, 徐 琼¹, 郑 文¹, 刘清辉²

(1.浙江省地质调查院, 杭州 311203; 2.浙江省地质矿产研究所, 杭州 310007)

摘 要:在对浙东沿海某典型固废拆解区的水-土壤-农作物系统进行系统调查和分析的基础上,重点探讨了污水灌溉对土壤多氯联苯(PCBs)含量的影响程度,并通过建立数学模型,对污灌区土壤 PCBs 含量进行了预测。结果表明,研究区土壤、水体、底泥乃至农作物均检测出相当水平的 PCBs,对当地的生态安全影响较大;经因子分析和对比分析发现,约有 67.3%的土壤 PCBs 污染是由污水灌溉引起,污水灌溉对土壤污染的影响显著;在现有农田灌溉模式不变的情况下,污灌区的土壤 PCBs 含量将呈上升趋势,50 a 后含量将增加 1 倍。

关键词:土壤;污水灌溉;多氯联苯;因子分析;浙东沿海;固废拆解区

中图分类号:X53 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)12-2312-07

Impact of Wastewater Irrigation on Contents of Polychlorinated Biphenyls in Soils of Solid Waste's Dumping and Unpacking Site of Eastern Zhejiang Province, China

HUANG Chun-lei¹, SONG Ming-yi¹, XU Qiong¹, ZHENG Wen¹, LIU Qing-hui²

(1.Zhejiang Institute of Geological Survey, Hangzhou 311203, China; 2.Zhejiang Institute of Geology & Mineral Resources, Hangzhou 310007, China)

Abstract: In this paper, water, soil and crops were investigated and analyzed systematically in a typical solid waste's dumping and unpacking site of eastern Zhejiang Province, China. On the basis of the investigation, impact degree of wastewater irrigation on contents of polychlorinated biphenyls (PCBs) in soils was discussed deeply. The contents of PCBs in the soils of wastewater irrigation area were predicted through a mathematical model built. The results showed that contents of PCBs in the soil, water, sediment and crops were all in a high level, which impaired ecological security. Based on the results of factor analysis and comparative analysis, the impact degree of wastewater irrigation on the PCBs pollution of soil was significant, which contributed PCBs of 67.3% to the soil. If the current irrigation mode was constant, the PCBs contents of soil in the wastewater irrigation area would increase drastically, whose contents would be doubled after fifty years.

Keywords: soil; wastewater irrigation; polychlorinated biphenyls (PCBs); factor analysis; coastal area of eastern Zhejiang Province; solid waste's dumping and unpacking site

当前,使用污水灌溉已经成为我国农田灌溉中存在的一个普遍问题^[1-2]。污水中普遍含有氮、磷、钾、锌、镁等多种养分和丰富有机质,在节省肥料、降低成本、提高土壤肥力方面起到一定作用。然而,污水中同时存在一些有毒有害物质,如重金属和有机污染物^[2-4],而且这些污染物的含量水平往往较高。通过灌溉,这

些污染物极易在土壤环境中累积,并进入食物链,进而影响到人体的健康^[2,5-6]。多项研究表明,污灌区土壤中的重金属和有机污染物含量明显高于背景值甚至超过国家标准,造成了不同程度的土壤污染^[1,7-10]。多种作物出现重金属和有机污染物累积或超标的现象^[1],如银川某污灌区水稻中铅含量超出国家标准 10 倍,已经不能食用,山东小清河流域小麦和蔬菜中各检出有机化合物 34 和 32 种。可见,污水灌溉对生态环境的威胁巨大,有必要对水-土壤-农作物组成的污灌区生态系统^[2,11]进行深入研究。这样一方面能够了解由

收稿日期:2010-05-31

基金项目:浙江省基本农田质量调查试点项目

作者简介:黄春雷(1982—),男,山东临沂人,硕士,工程师,从事农业地质与环境地球化学研究。E-mail:hcl-0083@163.com

于污水灌溉带来的污染物在环境中的累积、迁移和归趋,另一方面能评估污水灌溉对土壤质量、农作物安全的现实和潜在影响,达到既能合理利用水资源又能保障农产品品质,保持农业生态平衡和促进农业可持续发展等目的^[2,5]。

本文以浙东沿海某典型固废拆解区的水-土壤-农作物系统为研究对象,进行系统采样调查,了解了该地持久性有机污染物多氯联苯(PCBs)在不同介质中的含量和分布,基于因子分析,探讨了污水灌溉对土壤 PCBs 含量的影响程度,并通过建立数学模型,预测了污水灌溉对土壤 PCBs 含量的长远影响,为科学指导该地区土壤污染治理提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于浙江省东部水网平原区,面积约 42 km²。区内河道纵横,水网密布,金清水系纵贯全境。主要土壤类型为水稻土,农业种植以水稻为主,蔬菜、水果、花卉苗木等多元化发展。该地区是我国最大的电子电器废弃物拆解基地,据统计,目前研究区所在地市每年进口固废总量超过 200 万 t,有十余万人从事废旧金属物资的运输、拆解、再生和销售,年产值超过 180 亿元。

近年来,由于拆解业废弃物的污染,使得研究区农村生态环境承受的污染负荷急剧增加,导致农村环境质量下降,特别是耕地质量下降,湖库、河网水质严重恶化。利用污水灌溉农田也成为普遍现象。

1.2 样品采集

1.2.1 土壤样品采集

在研究区按网格化均匀布样(4点·km⁻²),共布设采样点 150 个。每个采样点由在同一田块中的 3~4 个采点组成,采集 0~20 cm 耕层土壤,同时采用便携式 GPS 定位,并记录采点周围环境特征。

除此之外,本研究还选择典型污染区测制了土壤垂向剖面,采集了不同深度(0~120 cm)的土壤样品。

1.2.2 水样采集

以控制研究区灌溉水源为目的,采集灌溉水样 11 件。在平水期,连续 3 d 晴天、水质稳定的条件下,进行瞬时法采样,尽量做到“轻扰动”水体。用 250 mL 棕色聚乙烯塑料瓶取样,取样前用待取水样洗涤塑料瓶和塞子 3~5 次,然后把取样瓶沉入水中 30 cm 深处进行取样。避光保存,并及时送交实验室分析。

1.2.3 农作物样品采集

农作物样按均匀性和重点性相结合原则布设。在作物成熟季节,按“S”形路线采集稻谷和蔬菜样品。稻米晒干或烘至干燥后机械脱壳,及时送检;蔬菜样品采用保鲜措施,快速送往实验室分析测试。共采集各类作物 36 件,其中,稻谷 25 件,蔬菜 5 件,水稻根、茎、叶各 2 件。

1.3 样品测试

分析了土壤和农作物中 PCB 15、28、52、77、81、101、105、114、118、123、126、138、153、156、157、167、169、180、189 共 19 种单体的含量,测试了水体中 PCB 15、28、52、101、118、138、153、180 共 8 种指示性 PCBs 单体的含量。分析测试引用 EPA 方法 EPA8080 及 8082A,仪器采用的是瓦里安 Varian Saturn 2100T 型号的离子阱 GC/MS,测定的质量范围 45~650 u,质量准确度为 0.1 u。测定时,先用全扫方式结合美国 NIST 有机化合物谱库检索,对所检测的 PCBs 单体一一进行定性,做到 PCBs 定性定位准确之后,采用选择离子监测(SIM)方式进行定量测定。SIM 方式是以最大的采集效率,有选择性地检测 PCBs 碎片中特有的一个或几个质量离子,消除了土壤、水、农作物等环境样品中的基质干扰,从而降低背景信噪,大幅度提高 PCBs 的灵敏度,PCBs 的检测限都在 0.5 μg·kg⁻¹ 以下。同时,采用空白分析、平行样测定、加标回收等方式进行质量控制。结果表明,空白分析结果均小于检测限,平行样测定合格率为 100%,加标回收率在 70.2%~111.2%,合格率为 100%。

2 结果与分析

2.1 表层土壤 PCBs 含量特点

从表 1 可以看出,研究区表层土壤中 19 种 PCBs 的总量变化范围是 0.55~412.54 ng·g⁻¹,平均值为 28.58 ng·g⁻¹。一些研究资料显示,我国西藏地区未受到 PCBs 直接污染的土壤中检测出的 PCBs 含量为 0.625~3.501 ng·g⁻¹^[12],苏南某市的 PCBs 含量为 0.554~1.637 ng·g⁻¹^[13],瑞典南部的含量为 2.3~332 ng·g⁻¹^[13],美国加州的含量为 4.6~8.2 ng·g⁻¹^[13]。可见,研究区表层土壤中 PCBs 含量水平显著高于其他国家和国内其他地区。浙江省农产品产地土壤环境质量安全标准(DB33/T 558—2005)规定的 PCBs 的限制值为 0.05 mg·kg⁻¹,参照这一标准,大约有 12.7%的供试样本超标。考虑到本次研究 PCBs 总量是仅以 19 种单体定量的,因此,研究区实际的 PCBs 污染水平还要更严重些。

表 1 土壤多氯联苯(PCBs)特征参数统计
Table 1 Descriptive statistics of soil PCBs congeners

项目	样本数	平均值	标准差	变异系数	最大值	最小值	检出率/%
PCB15	150	1.20	0.08	0.07	21.53	—	42.0
PCB28	150	8.56	2.99	0.35	78.24	—	99.3
PCB52	150	2.29	0.04	0.02	46.43	—	60.7
PCB101	150	3.46	0.09	0.03	59.32	—	67.3
PCB81	150	—	—		—	—	0
PCB77	150	0.57	0.10	0.18	14.94	—	20.0
PCB123	150	0.27	0.10	0.37	7.72	—	4.7
PCB118	150	4.14	0.28	0.07	55.09	—	67.3
PCB114	150	0.26	0.07	0.27	1.00	—	1.3
PCB153	150	2.89	0.07	0.02	44.97	—	61.3
PCB105	150	2.11	0.12	0.06	32.70	—	49.3
PCB138	150	2.74	0.06	0.02	37.05	—	58.0
PCB126	150	—	—		—	—	0
PCB167	150	0.31	0.14	0.45	14.03	—	2.7
PCB156	150	0.35	0.04	0.11	11.32	—	9.3
PCB157	150	0.27	0.07	0.26	0.75	—	3.3
PCB180	150	1.29	0.04	0.03	35.02	—	30.0
PCB169	150	—	—		—	—	0
PCB189	150	—	—		—	—	0
PCB 总量	150	28.58	3.64	0.13	412.54	0.55	100

注:PCBs 含量单位为 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$,“—”表示低于检出限。

研究区表层土壤中检出了 PCB 15、28、52、77、101、105、114、118、123、138、153、156、157、167、180、189 共 16 种单体(表 1),其中,PCB 28、52、101、118、153、138 六种单体的检出率超过 50%。这几种单体均是生物累积性较高的单体,PCB118 还是毒性较高的类二噁英 PCBs,所以研究区土壤中 PCBs 对生态环境

乃至人体健康的潜在危害性是较大的。

2.2 深层土壤 PCBs 含量特点

由于难溶性、难降解性等自身特性和土壤腐殖质的吸附作用等因素的影响,PCBs 主要吸附在富含有机质的表土层,向深部土壤迁移一般较难,而且高氯取代的同类物(单体)向土壤深部迁移愈加困难。如图 1

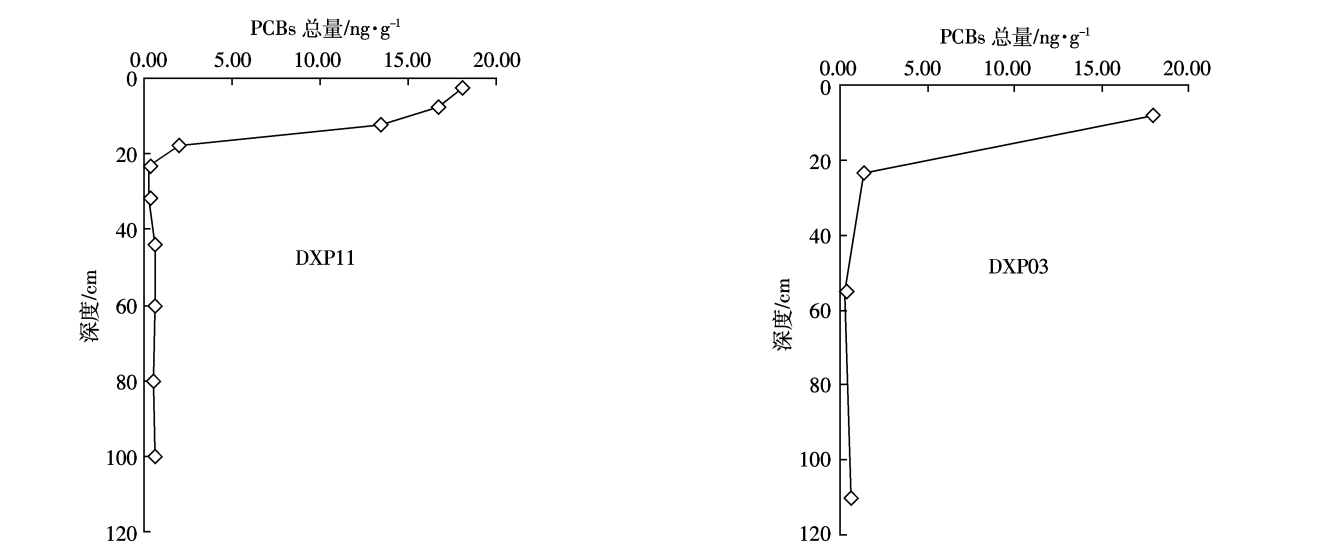


图 1 典型土壤剖面中 PCBs 垂向变化规律
Figure 1 Vertical variation patterns of PCBs in typical soil profile

所示,在调查区典型水稻田土壤中,随着深度的增加,多氯联苯含量急剧下降,深度 23 cm 以下含量趋于稳定,这与储少岗等的研究结论一致^[14-15]。

2.3 水体中 PCBs 含量特点

浙江省地质调查院分别在 2004 年和 2008 年两次对调查区河水中取样分析,通过两次数据比较,2004 年 8 件样品中多氯联苯(PCBs)只有一件检出,而 2008 年 11 件样品中检出率高达 54.55%(6 件),说明水体中 PCBs 浓度增加趋势明显。与国内其他地区水样中 PCBs 含量比较,调查区河水中 PCBs 浓度高出 10~20 倍,也高于相关标准(表 2)^[16]。由于本次调查(2008 年)数据是由 PCB 15、28、52、101、118、138、153 和 180 共 8 种指示性 PCBs 单体定量的,而所参考的限制标准一般是由更多的 PCBs 单体来定量的,这些样品实际的污染程度可能要比现在评估的情况更为严重。

表 2 不同地区水样中 PCBs 浓度的比较

Table 2 Contents of PCBs in waters in different areas

采样区或颁布单位	PCBs/ng·L ⁻¹	定量 PCBs 种类	备注
武汉东湖	2.7	Aroclor1242,1254	文献[16]
珠江广州段	0.70~3.96	Aroclor 1242,1254	文献[16]
研究区污染河道	560.0	9 种 PCBs 单体	文献[16]
研究区污染河道	44.1	8 种 PCBs 单体	本研究资料
中国环保局	20	Aroclor 1016,1242,1254,1221	文献[16]
美国环保局	14	1232,1248,126	文献[16]

2.4 底泥中 PCBs 含量特点

河道底泥被认为是 PCBs 的主要容纳库之一^[16-17]。一般认为,由于 PCBs 是一种疏水性化合物,通过大气沉降、工厂排污和雨水冲刷等途径进入水体的 PCBs,大部分都附着在悬浮颗粒物上,并最终依照颗粒大小以一定的速度沉积到底泥中去,因此底泥中的 PCBs 含量一般要较水体中含量高数十乃至数百倍。本研究证实了这一观点:所采集的两件底泥样品含量分别达到 492 ng·g⁻¹ 和 104 ng·g⁻¹,均远高于水体含量水平,也高于研究区土壤平均含量。

早期的研究资料显示^[12,14],与土壤类似,PCBs 在底泥中垂向迁移困难,易于表层富集。向下至 50 cm 处含量仅是表层的 6.0%,而至 100 cm 仅为表层的 4.1%。

2.5 农作物中 PCBs 含量特点

对农作物中多氯联苯(PCBs)的检出情况做了统计,发现农作物已受到不同程度的污染,主要特征如下:

(1)危害性高的单体检出率较高。测试的 19 种单体中检出了 PCB 15、28、52、101、118、126、138、153、156、157、169、180、189 共 13 种,其中生物累积性和毒害性较高的 PCB101、180、189 等单体检出率较高。

(2)蔬菜中 PCBs 检出率高达 80%,茄果、叶菜类均有检出。其中,大白菜含量最高,为 8.87 ng·g⁻¹;油菜次之,为 4.01 ng·g⁻¹;茄子最低,为 1.72 ng·g⁻¹。

(3)水稻籽实检出率为 20%,PCBs 含量区间为 0.52~21.49 ng·g⁻¹。值得一提的是,水稻根、叶部 PCBs 都有检出,而茎部未检出,由此推测农作物中 PCBs 部分来自土壤,部分来自大气沉降。

3 讨论

3.1 污水灌溉对土壤 PCBs 污染的影响程度分析

将研究区 150 个土壤采样点的 19 种 PCBs 单体分析测试数据导入 SPSS13.0 软件,经因子分析,得到 2 个主因子,主因子的特征值及方差贡献率列于表 3。从中可以看出,对研究区 PCBs 含量贡献最大的主要因子有 2 个,也就是说有 2 种主要污染途径或成因。两主因子对调查区 PCBs 污染的方差贡献率分别为 61.8%、33.3%,累积贡献率达 95%以上,其他因子的方差贡献率可以忽略。

表 3 特征值和方差贡献率

Table 3 Results of factor analysis

主因子	特征值	方差贡献率/%	累积方差贡献率/%
F1	92.7	61.8	61.8
F2	49.9	33.3	95.1

利用方差极大法旋转求得各采样点的最终因子载荷,并分别将进入 F1 和 F2 主因子的采样点(载荷数大于 0.7)标示出,绘成 PCBs 污染方式解析图(图 2)。结合图 2 和实际调查发现,试点区土壤中多氯联苯主要有 3 个来源:一是面源污染,此类采样点位较多,占到 67.3%,污染受 F1 主因子控制,其特点是:各采样点 PCBs 单体检出数量不一致,从 1 种到 10 种不等,整体检出率不高(图 3);土壤多氯联苯含量普遍不高,平均值为 11.7 ng·g⁻¹。结合野外调查发现,用汇集了众多拆解点排出的 PCBs 污染河水进行灌溉是造成此类污染的原因,PCBs 发生过较长距离迁移。二是点源污染,此类采样点位占到 29.3%,受 F2 主因子控制。由于拆解点废旧变压器、电容器等长期堆放、泄露、拆解、焚烧、排污等,直接污染了拆解点旁边的土壤^[18],此类污染特点是 PCBs 单体检出数量较为一

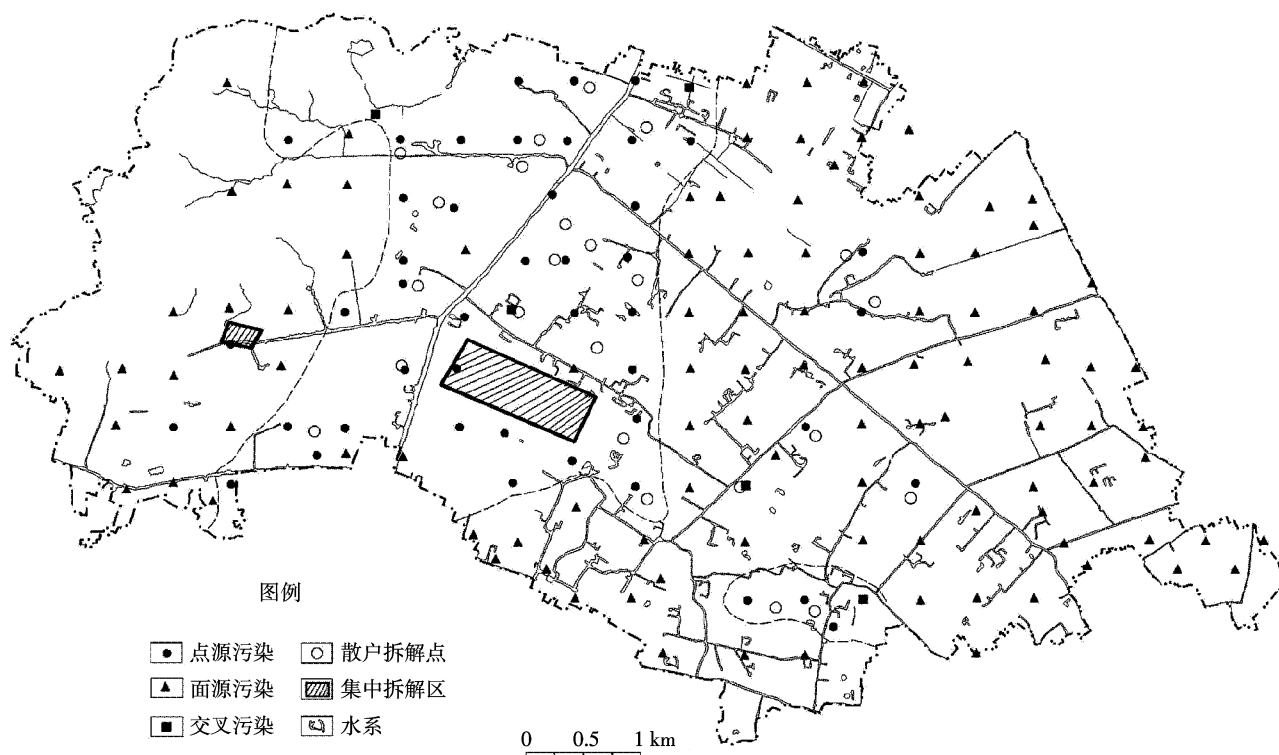


图2 土壤 PCBs 污染方式解析图

Figure 2 Pollution modes of soil PCBs

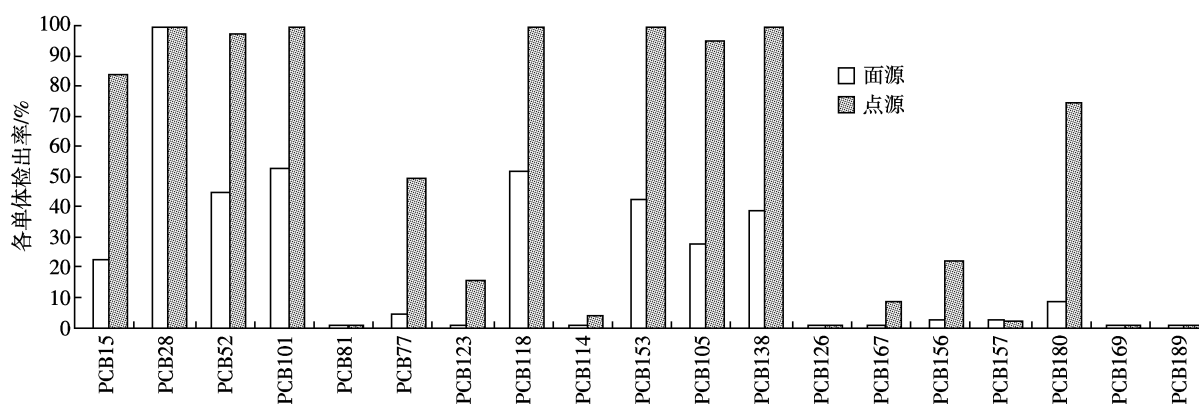


图3 不同污染途径中 PCBs 各单体检出情况

Figure 3 The detection of soil PCBs congeners of different pollution modes

致,每个采样点检出 6 到 13 种,检出单体类型较为集中(图 3),土壤多氯联苯含量较高,平均含量达 $63.4 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$,并未发生长距离迁移。三是交叉污染,此类采样点位较少,位于点源污染和面源污染的交叉地带,污染受 F1 和 F2 两个主因子控制(载荷数均在 0.6 和 0.7 之间),即带有点源污染的性质,又带有面源污染的性质。PCBs 总量平均值为 $32.2 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$,处于点源污染和面源污染的土壤含量的中间水平。

综上所述,约有 67.3% 的土壤 PCBs 污染是由污

水灌溉引起,污水灌溉是研究区土壤 PCBs 污染的主要方式。

3.2 污灌区土壤 PCBs 含量水平预测

为研究若干年后污水灌溉对土壤 PCBs 含量水平乃至对土地质量的影响,建立数学模型,对若干年后土壤 PCBs 含量水平进行估算。

模型建立前提约定:

(1)本次模型只考虑污水灌溉和 PCBs 在土壤中的残留,不考虑大气沉降及其他因素的影响。

(2)假定现有农田灌溉模式(灌溉方式和灌溉量等)不变。

据文献资料^[2,19],PCBs 含量水平可用以下模型进行预测:

$$C_n = C_0 K^n + P Q K (1 - K^n) / W (1 - K)$$

式中: n 为年份; C_n 为土壤中 PCBs 在 n 年后的含量, $\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$; C_0 为土壤中 PCBs 的起始浓度, $\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$; K 为土壤中 PCBs 的年残留率,按 99% 计算; P 为灌溉水中 PCBs 的浓度, $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$; Q 为每 667 m^2 耕地的平均年灌溉水量, L, 按 359 500 L 计(据研究区所在地水利局 2008 年度水资源公报资料); W 为每 667 m^2 耕地 20 cm 深度的土壤质量, kg, 计 136 068 kg (土壤容重为 $1.02 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$)。

按照上文确定的污水灌溉区,挑选出相应土壤 PCBs 数据,用上述模型,计算了污水灌溉区 0~50 a 土壤 PCBs 含量情况(注:此处 PCBs 含量是以土壤、水中均进行测试的 PCB 28、52、101、118、153、138、180 共 7 种指示性单体的总和定量的),见表 4。从中可以看出,随着时间的推移,污灌区土壤的 PCBs 含量呈直线上升趋势,含量平均值从当前的 $11.8 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 增加到 50 a 后 $16.8 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$,最小含量也从当前 $2.17 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 增加到 50 a 后 $11.0 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$,50 a 后的含量约为当前的 2 倍。

表 4 污水灌溉区土壤 PCBs 含量变化预测($\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$)

Table 4 Predicted contents of PCBs in soils in wastewater irrigation area($\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$)

PCBs	0 a	10 a	20 a	30 a	40 a	50 a
平均值	11.8	13.0	14.1	15.1	16.0	16.8
最大值	75.6	70.7	66.3	62.3	58.7	55.4
最小值	2.17	4.31	6.23	7.98	9.56	11.0
含量倍数	1.00	1.24	1.45	1.64	1.82	1.98

4 结论

研究区土壤、水体、底泥乃至农作物均检测出相当水平的 PCBs,对研究区的生态环境及人体健康的现实和潜在影响较大。

经因子分析和对比分析发现,污水灌溉对土壤污染的影响显著,约有 67.3% 的土壤 PCBs 污染是由污水灌溉引起。尽管与点源污染相比,此类污染目前各采样点 PCBs 单体整体检出率及含量并不高,但通过对土壤 PCBs 含量水平预测发现,在现有农田灌溉模式保持不变的情况下,污灌区的土壤 PCBs 含量将呈逐渐上升趋势,预测 50 a 后其含量将增加 1 倍。

可见,污水灌溉对于研究区土地质量的潜在危害较大。因此,整治土壤污染、合理开发利用土地资源,应以减少乃至杜绝污水灌溉为前提条件。

参考文献:

- [1] 刘小楠,尚鹤,姚斌.我国污水灌溉现状及典型区域分析[J].中国农村水利水电,2009(6):7-11.
LIU Xiao-nan, SHANG He, YAO Bin. Study of the present situation of irrigation by wastewater and typical waste areas in China[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2009(6):7-11.
- [2] 孙立波,郭观林,周启星,等.某污灌区重金属与两种持久性有机污染物污染趋势评价[J].生态学杂志,2006,25(1):29-33.
SUN Li-bo, GUO Guan-lin, ZHOU Qi-xing, et al. Assessment of heavy metals and POPs contamination in a sewage irrigation area[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(1):29-33.
- [3] 宋玉芳,周启星,宋雪英,等.石油污染土壤污染物的残留与生态毒理[J].生态学杂志,2004,23(5):61-66.
SONG Yu-fang, ZHOU Qi-xing, SONG Xue-ying, et al. Pollutants residue in soil and the eco-toxicity after irrigation with petroleum wastewater[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2004, 23(5):61-66.
- [4] Yu Y, Zhou Q X. Effect of methamidophos oil sorption-desorption behavior of copper in soils[J]. *Bull Environ Contam, Toxicol*, 2003, 71:979-987.
- [5] 王贵玲,蒯文静.污水灌溉对土壤的污染及其整治[J].农业环境科学学报,2003,22(2):163-166.
WANG Gui-ling, LIN Wen-jing. Contamination of soil from sewage irrigation and its remediation[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003, 22(2):163-166.
- [6] 王新,梁仁禄.土壤-水稻系统重金属复合污染的生态效应[J].生态学杂志,2000,19(4):38-42.
WANG Xin, LIANG Ren-lu. Interaction and ecological effect of combined pollution for heavy metals on soil-rice paddy system[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2000, 19(4):38-42.
- [7] 周秀艳,李培军,孙洪雨.辽宁典型工矿区与污灌区土壤重金属污染状况及原因[J].土壤,2006,38(2):192-195.
ZHOU Xiu-yan, LI Pei-jun, SUN Hong-yu. Status and causes of heavy metal pollution of the soils in typical industrial and mining areas and wastewater irrigation zones in Liaoning[J]. *Soils*, 2006, 38(2):192-195.
- [8] 王喜龙,徐福留,李本纲,等.天津污灌区苯并(a)芘、荧蒽和非生态毒性的风险表征[J].城市环境与城市生态,2002,15(4):10-12.
WANG Xi-long, XU Fu-liu, LI Ben-gang, et al. Risk assessment of eotoxicity of benzo(a) pyrene, fluorethene and phenanthrene in Tianjin wastewater irrigated area[J]. *Urban Environment & Urban Ecology*, 2002, 15(4):10-12.
- [9] 陈静,王学军,陶澍,等.天津污灌区耕作土壤中多环芳烃的纵向分布[J].城市环境与城市生态,2003,16(6):272-274.
CHEN Jing, WANG Xue-jun, TAO Shu, et al. Vertical distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in wastewater irrigated soil in Tianjin area[J]. *Urban Environment & Urban Ecology*, 2003, 16(6):272-274.
- [10] 陈晓东,常文越,冯晓斌,等.沈抚灌区土壤生态恢复途径初步研究

- [J]. 环境保护科学, 2002, 28:33-35.
- CHEN Xiao-dong, CHANG Wen-yue, FENG Xiao-bin, et al. Primary study on the approach of farm land ecological resume in Shen-Fu irrigation area[J]. *Environmental Protection Science*, 2002, 28:33-35.
- [11] 周启星, 孙铁珩. 土壤植物系统污染生态学研究 with 展望[J]. 应用生态学报, 2004, 15(10):1698-1702.
- ZHOU Qi-xing, SUN Tie-heng. Progress in pollution ecology of soil-plant systems and its expectation[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(10):1698-1702.
- [12] 储少岗, 杨 春, 徐晓白. 典型污染地区底泥和土壤中残留多氯联苯(PCBs)的情况调查[J]. 中国环境科学, 1995, 15(3):199-203.
- CHU Shao-gang, YANG Chun, XU Xiao-bai. Polychlorinated biphenyl congener residues in sediment and from pollution area[J]. *China Environmental Science*, 1995, 15(3):199-203.
- [13] 安 琼, 董元华, 王 辉, 等. 长江三角洲典型地区农田土壤中多氯联苯残留状况[J]. 环境科学, 2006, 27(3):528-532.
- AN Qiong, DONG Yuan-hua, WANG Hui, et al. Residues of PCBs in agricultural fields in the Yangtze Delta, China[J]. *Environmental Science*, 2006, 27(3):528-532.
- [14] 储少岗, 徐晓白, 童逸平. 多氯联苯在典型污染地区环境中的分布及其环境行为[J]. 环境科学学报, 1995, 15(4):422-432.
- CHU Shao-gang, XU Xiao-bai, TONG Yi-ping. Transport and distribution of polychlorinated biphenyls in a polluted area[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1995, 15(4):422-432.
- [15] 毕新慧, 储少岗, 徐晓白. 多氯联苯在水稻田中的迁移行为[J]. 环境科学学报, 2001, 21(4):454-458.
- BI Xin-hui, CHU Shao-gang, XU Xiao-bai. Transport of PCBs in contaminated paddy fields[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2001, 21(4):454-458.
- [16] 赵高峰. 电子垃圾中多氯联苯的环境转移和潜在的健康风险[D]. 武汉:中国科学院研究生院(水生生物研究所), 2006.
- ZHAO Gao-feng. Studies on environmental transfer and potential health risk of polychlorinated biphenyls from electrical and electronic waste[D]. Wuhan: Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, 2006.
- [17] 毕新慧, 徐晓白. 多氯联苯的环境行为 [J]. 化学进展, 2000, 12(2):152-160.
- BI Xin-hui, XU Xiao-bai. Behaviors of PCBs in environment [J]. *Progress in Chemistry*, 2000, 12(2):152-160.
- [18] 滕 应, 郑茂坤, 骆永明, 等. 长江三角洲典型地区农田土壤多氯联苯空间分布特征[J]. 环境科学, 2008, 29(12):3478-3482.
- TENG Ying, ZHENG Mao-kun, LUO Yong-ming, et al. Spatial distribution of soil PCBs congeners in typical area of Yangtze River Delta region[J]. *Environmental Science*, 2008, 29(12):3478-3482.
- [19] 孟凡乔, 巩晓颖, 葛建国, 等. 污灌对土壤重金属含量的影响及其定量估算[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(2):277-280.
- MENG Fan-qiao, GONG Xiao-ying, GE Jian-guo, et al. Impacts of irrigation by wastewater on quantitative contents of heavy metals in soils: A case study for Xiaohe irrigated area and Fuhe irrigated area[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, 23(2):277-280.