

点源排放六氯苯在植物中的分布研究

陈静, 王琳玲, 陆晓华, 袁松虎, 刘细祥, 王悦, 赵茜, 梅玲芳

(华中科技大学环境科学研究所, 武汉 430074)

摘要:以武汉某工业区为对象, 分析了排污渠、周围大河和农田植物及根际土壤中六氯苯(HCB)的分布特征及影响因素。结果表明, 采样区内植物和土壤均受到不同程度的 HCB 污染, 植物中 HCB 浓度(以干重计, 下同)为 $4.45 \sim 1\,189.89 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 根际土壤中为 $27.93 \sim 3\,480.71 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。排污渠和大河沿岸植物和根际土壤中 HCB 含量相对较高。排污渠内木本植物对 HCB 富集程度大于草本植物, 富集系数(RCF)分别为 $0.41 \sim 2.55$ 和 $0.01 \sim 1.34$ 。不同农田植物中 HCB 含量差异很大($4.45 \sim 333.1 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$), 而同种植物不同部位对 HCB 的富集也不相同, 例如, 芋头果实、根和茎叶 HCB 含量分别为 318.77 、 281.02 和 $10.94 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。排污渠和农田植物中 HCB 含量与根际土壤中 HCB 含量无相关性, 与脂肪含量显著相关。大河南岸植物和根际土壤中 HCB 含量随着与排放口距离的增加呈现显著降低趋势, 植物根和茎叶中 HCB 含量与根际土壤中的 HCB 显著相关, 但与脂肪含量无相关性。植物中 HCB 分布特征受到污染源强、脂肪含量和 HCB 在植物体内的分配-迁移模式影响。

关键词:植物; 根际土壤; 六氯苯; 分布特征; 影响因素

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)04-1173-06

Distribution of HCB Discharged from a Chemical Plant in Plants

CHEN Jing, WANG Lin-ling, LU Xiao-hua, Yuan Song-hu, LIU Xi-xiang, WANG Yue, ZHAO Qian, MEI Ling-fang

(Environmental Science Research Institution, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The distribution characteristics of hexachlorobenzene (HCB) in plant and rhizosphere soil in contamination conduit, a nearby river and a cropland were studied and the impact factors were also discussed. The results are summarized as follows: the range of the HCB concentration in plant and rhizosphere soil in investigation area were respectively from $4.45 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ to $1\,189.89 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (dw) and from $27.93 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ to $3\,480.71 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (dw). Higher enrichment of HCB in woodplant than herbs due to higher fat concentration in woodplant in the contamination conduit and the rich concentration factor of woodplant and herbs were 0.41 - 2.55 and 0.01 - 1.34 . The range of HCB concentrations in plants in nearby croplands was significantly wide (4.45 - $333.1 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) while HCB concentrations in different parts of plant were various, e.g. HCB concentrations in fruit, root and shoot of taro were $318.77 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, $281.02 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ and $10.94 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. There was a remarkable positive relation between the concentrations of HCB in plant and fat concentration of plant while no relativity between the concentrations of HCB in plant and those in ground soils in the contamination conduit and cropland. The concentration levels of HCB in plant and rhizosphere soil in river were dramatically decreased with increasing distance from contaminated conduit. There was a remarkable positive relation between the concentrations of HCB in plant and those in ground soils but no relation between concentrations of HCB in plant and fat concentration of plant in river. The distribution characteristics of HCB in plants were influenced by contaminated levels, fat concentration and Partition-transfer model.

Key words: plant; rhizosphere soil; hexachlorobenzene (HCB); distribution characteristics; impact factor

六氯苯(hexachlorobenzene, HCB)是斯德哥尔摩国际公约中首批控制的 12 种 POPs 之一, 目前已经被列入环境内分泌干扰物, 其健康危害已越来越引起广泛的重视^[1]。目前全球每年仍有高达 $12\,000 \sim 92\,000 \text{ kg}$ (平均约为 $23\,000 \text{ kg}$) 的 HCB 释放到环境中^[2]。近年来, 国内外环境工作者对植物中的 HCB 等有机氯农药含量、分布特征等开展了大量工作^[3~15]。但是, 对于点源排放污染物在不同植物中的分布研究鲜有报道^[16~20]。

本研究在课题组前期工作基础上^[21], 分析了某化工厂点源排放的排污渠和周围河流、农田 12 种植物中 HCB 的污染水平、分布特征和影响因素。本研究将对武汉市 POPs 点源污染状况的研究提供一个

典型实例, 以期为进一步研究 HCB 在植物介质中的分布规律、迁移转化机制、健康风险评价和植物修复技术提供一些基础资料。

1 材料与方法

1.1 试剂和仪器

试剂: HCB 标准物质(CHEM SERVICE); 无水硫酸钠(天津市科密欧化学试剂开发中心, AR); 丙

收稿日期: 2008-04-11; 修订日期: 2008-05-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(40701159); 湖北省自然科学基金重大项目(2006ABD005); 华中科技大学人才引进基金项目(0124261001)

作者简介: 陈静(1975~), 女, 博士研究生, 副教授, 主要研究方向为 POPs 环境行为和水污染控制化学, E-mail: chjing@tsinghua.edu.cn

酮(武汉市亚泰化工试剂有限公司, AR); 正己烷(上海市实验试剂有限公司, AR); 盐酸(武汉市亚泰化工试剂有限公司, AR); 95% 乙醇(上海市振兴化工一厂, AR); 乙醚(上海市马陆制药厂, AR); 石油醚(天津市科密欧化学试剂开发中心, AR); Florisil 吸附剂(上海润捷化学试剂有限公司); 玻璃纤维(国药集团化学试剂有限公司)。

仪器: HP6890 气相色谱仪 (Hewlett-Packard, USA) μ -ECD 检测器; KQ-100DB 型数控超声波清洗器(昆山市超声仪器有限公司); FW1000 高速万能粉碎机(天津华鑫仪器厂); LG10-2.4A 离心机(北京医用离心机厂); Apollo 9000 总有机碳测定仪 (Tekmar-DOHRMANN, USA). KQ-100D 型数控超声波清洗器(昆山市超声仪器有限公司); BF2000 氮气吹干仪(北京八方世纪科技有限公司)。

1.2 样品采集

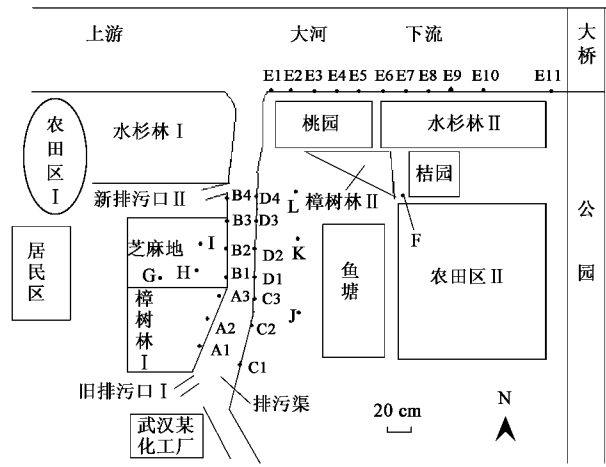
分别于 2007 年 1 月(冬季)和 8 月(夏季)采集植物样品。采样地位于武汉某化工厂附近(见图 1)。化工厂距离排污渠约 2 km。2007 年 1 月采集 5 类(绿狗尾草、金色狗尾草、木槿、无患子、大狗尾草)25 个植物样品, 前 4 类 14 个植物样(A、B、C、D)采自化工厂排污渠附近, 采样点间距 20 m; 11 个大狗尾草样采自大河南岸, E1-E10 采样点间距 20 m, E10 与 E11 采样点间距 70 m。2007 年 8 月于排污渠周围农田中采集 20 个共 7 种植物样(编号 F-L)。2 次采样均采集了植物根系表面 0~5 mm 的根际土壤。样品装入聚乙烯塑料袋内, 室内自然风除杂物, 分离根、茎叶、种籽, 磨碎过 0.25 mm 筛, 贮存于聚乙烯瓶中备用。

1.3 样品分析

1.3.1 根际土壤和植物中 HCB 预处理

根基土壤和植物中 HCB 的预处理方法参考文献[21]。称取根际土壤(表层 10 cm 土壤)样品 0.5 g 于 10 mL 可密闭耐压玻璃试管中, 用 6 mL 正己烷混匀, 超声萃取 80 min, 萃取功率 90 W, 温度 35℃, 然后离心(3 000 r·min⁻¹)分离 10 min。取 2 mL 萃取液在从下至上依次填充有玻璃纤维、0.8 g Florisil 吸附剂和 0.6 g 无水硫酸钠的净化柱上净化(净化前, 净化柱用正己烷润洗至饱和), 再用正己烷淋洗净化柱直至洗净, 淋洗液经氮吹仪浓缩至 1 mL, GC-ECD 分析。采用大河上游 100 m 土壤样品加标 HCB 回收, 土壤 HCB($n=9$)的回收率为 83.1%。

称一定量(0.20~0.5 g)样品于 10 mL 可密闭耐压玻璃试管中, 用 6 mL 丙酮:正己烷(1:9, 体积比)



A: 绿狗尾草; B: 金色狗尾草 2; C: 木槿; D: 无患子; E: 大狗尾草
F: 樟树; G: 大狗尾草; H: 芝麻; I: 小麦; J: 绿豆;
K: 绿狗尾草; L: 芋头

图 1 采样区概况及采样点示意

Fig.1 General situation of investigation area and the map of sampling points

混匀, 超声萃取 80 min, 其余步骤与土样处理过程相同。采用大河上游 100 m 空白植物加标 HCB 回收, 植物($n=3$)的回收率为 82.5%。

1.3.2 GC-ECD 分析方法

HCB 测定方法参照 USEPA8121 方法^[22]。气相色谱工作条件: ZB-5 毛细管柱 (30 m×0.32 mm×0.25 μ m); 载气为高纯氮气(纯度 99.999 9%), 流速 1 mL·min⁻¹; 程序升温, 起始温度 160℃, 先以 10℃·min⁻¹升温至 240℃·min⁻¹, 再以 20℃·min⁻¹升温至 260℃·min⁻¹, 保持 2 min; 进样口温度 250℃, 分流比为 10:1, 进样体积 1 μ L; 微电子捕获(μ -ECD)检测器检测, 检测器温度 300℃, 尾吹气为高纯氮气, 流速 30 mL·min⁻¹。采用外标法定量分析。

1.3.3 植物脂肪含量分析

植物脂肪含量测定参考 Simonich 等^[23]的方法。称取 0.2 g 植物样品, 用 6 mL 丙酮和正己烷(1:1, 体积比)在温度 25℃, 超声功率 100 W 条件下超声 1 h, 收集萃取液, 重复该过程 1 次, 合并萃取液, 放入培养皿中, 称重(m_0), 待溶剂挥发后, 重新称重(m_1), 2 次重量差即植物脂肪含量。

2 结果与讨论

2.1 排污渠植物及根际土壤中 HCB 的分布特征

排污渠植物及根际土壤中 HCB 的含量见图 2。排污渠西岸为 2 种草本植物(A、B)、东岸为 2 种木本植物(C、D), 2 类植物均取整株分析。从图 2 可以看出, 植物中均可检出 HCB, 含量为 27.93~607.03

$\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 木本植物中 HCB 的含量比草本植物的高. 除了排污口处, 排污渠东西两岸根际土壤中 HCB 含量比较接近. 分析根际土壤中 HCB 含量与植物中 HCB 的相关性, 发现两者之间不具有相关性. 在排污口附近土壤中 HCB 含量很高 ($3\,480.71\,\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$), 但植株 HCB 含量不高, 这可能与植株自身性质有关. 除了 C2、C3, 其余采样点均为根际土壤中 HCB 含量高于植物中的, 这是因为植物主要通过根部吸收来吸收根际土壤 HCB, 而 C2、C3 采样点上木本植物 HCB 高于根际土壤的, 可能与该植物不仅依靠根部吸收 HCB, 植物叶面吸收大气沉降

的 HCB 也是其富集 HCB 的重要途径. Yang 等^[23] 和 Simonich^[24] 研究表明, 植物叶面对大气沉降的吸收是有机氯杀虫剂和多环芳烃等有机物在植物中富集的重要途径, 并且植物中 HCB 与大气中 HCB 存在植物-大气交换平衡. 研究表明 HCB 挥发性较强^[12, 25~27], 大气中存在显著含量水平的 HCB, 并且大气中的 HCB 与土壤和植物叶面存在土-气交换平衡. 因此本研究区域大气中的 HCB 能够通过大气沉降的方式进入植物叶面, 是植物富集 HCB 的重要途径.

分析植物 HCB 含量和根系富集系数(RCF)与脂肪含量的关系(图 3), 发现两者之间具有显著相关性(R^2 为 0.85、0.73). 研究表明^[28~34], 植物中的脂溶性有机物主要富集于脂肪组织中. 由于 HCB 具有脂溶性、低溶解性、疏水性的特征, 因而具有向脂肪组织富集的趋势, 通过吸附、络合作用, 脂肪组织对 HCB 有着较高的富集作用. 与草本植物相比, 木本植物脂肪含量相对较高, 因此更易富集 HCB 与脂肪量相关, 木本植物的富集系数(RCF)为 0.41~2.55, 而草本为 0.01~1.34. 有研究表明^[30~33], 根富集系数与根脂肪含量有显著的相关性. 这与本研究结果一致. 排污渠岸边植物 HCB 的分布主要受植物脂肪含量的影响, 而受根际土壤 HCB 污染强度影响较小, 这可能与植物物种有关系. 又有研究表明^[23, 24, 34], 有机物在植物中的富集不是单纯的

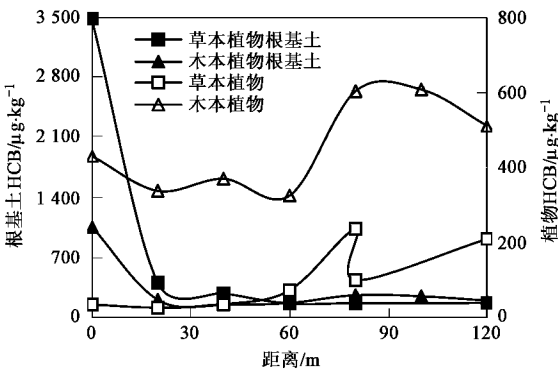


图 2 排污渠植物和根际土壤中 HCB 的含量
(以旧排污口为横坐标零点)

Fig.2 Concentration of HCB in plant and rhizosphere soil in the contaminated conduit

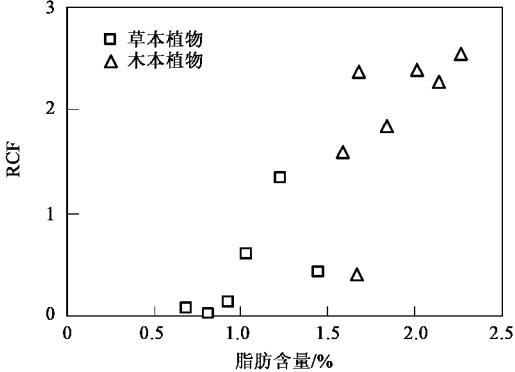
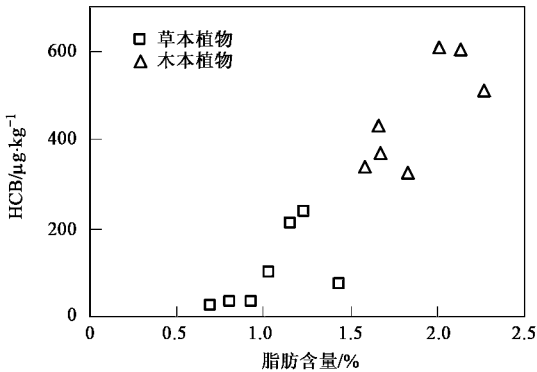


图 3 排污渠 HCB 含量和 RCF 与脂肪含量的关系

Fig.3 Relationship between HCB, RCF and fat in plant in the contaminated conduit

分配、迁移过程, 某些植物根部分泌的特殊物质可促进了植物对有机物的吸收和分解, 因此, 植物中 HCB 的含量不总是与根际土壤含量有显著相关性.

2.2 大河植物及根际土壤中 HCB 的分布特征

图 4 为大河南岸草本植物根、茎叶(E 系列)和根际土壤中 HCB 含量. 从中可以看出, 随着与排污

口距离的增加, 植物和根际土壤中 HCB 含量均呈现显著降低趋势. 植物根系中 HCB 含量比茎叶中的高. 距离排污渠较近的植物根和根际土壤中 HCB 浓度最高, 分别达到 $1\,189.89\,\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $1\,947.43\,\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 随着与污染源距离的增大, HCB 浓度呈显著下降趋势, 例如, 距离污染源 20 m 处, 植物根部

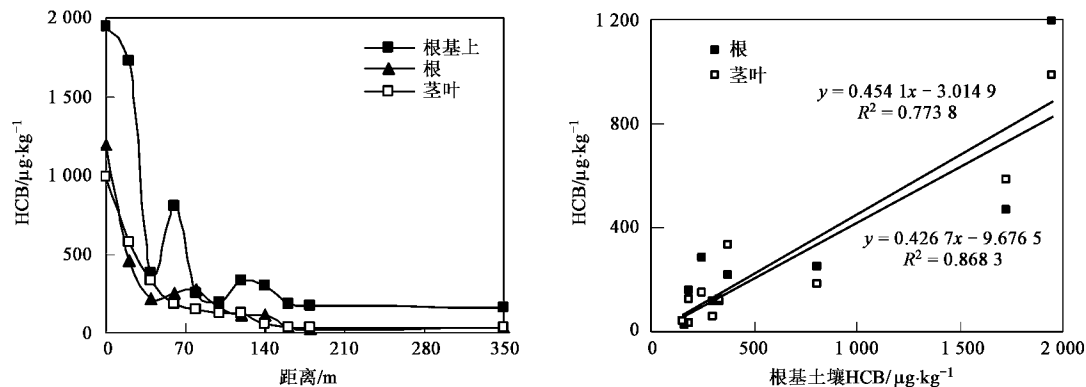


图 4 大河南岸植物和根际土壤中 HCB 的含量

Fig.4 Concentration of HCB in plant and rhizosphere soil beside the river

和根际土壤 HCB 浓度分别为 $464.26\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $1726.71\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，而距离污染源 180 m 处，根部和叶部 HCB 的浓度则为 $22.06\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $167.13\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，分别降低了 98.1% 和 91.5%。说明污染源强对根际土壤和植物中 HCB 含量的分布有显著影响。

植物根和茎叶中 HCB 含量与根际土壤中 HCB 显著相关，但与脂肪含量不相关，RCF 也与脂肪含量无相关性(图 5)。这与排污渠植物中 HCB 的分布特征不同，说明大河南岸植物中 HCB 受根际土壤中 HCB 含量的影响比受植物自身性质影响大。研究表明^[29~33]，植物吸收有机物与土壤污染强度存在一定的关系，根际土壤中有有机物含量越高，促使植物越容易富集。HCB 在大河南岸草本植物中的富集可能不是单纯的分配、迁移过程，植物对 HCB 的吸收和分解导致了 HCB 在植株中的分布与脂肪含量之间无显著相关性。

2.3 农田植物及根际土壤中 HCB 的分布特征

由于 2007 年 1 月排污渠附近农田中尚无植物，于 2007 年 8 月取样，分析了排污渠周围农田中 7 种

植物及根际土壤中 HCB 含量。从图 6 可以看出，周围农田(除了桔园)土壤中 HCB 含量接近，均在 $200\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 左右，而不同植物根系中 HCB 含量差异很大，7 种植物根系中 HCB 含量与根际土壤的 HCB 之间无显著相关性($R^2 = 0.1802$)，与脂肪含量显著相关($R^2 = 0.9118$)，说明植株对 HCB 的富集主要与其自身性质有关。例如，樟树和小麦的脂肪含量分别为 0.89% 和 0.54%，其 RCF 分别为 0.27 和 0.23，而绿狗尾草的脂肪含量为 0.14%，RCF 仅为 0.07。7 种植物茎叶和果实(种子)中 HCB 与脂肪含量之间无显著相关性(R^2 为 0.1239、0.1168)，这与 HCB 在这些植物内部的迁移分配模式有关。樟树、芝麻、绿豆根系中 HCB 含量高于茎叶中的，这可能由于这些植物从根际土壤吸收 HCB 后大部分被根部脂肪固定，小部分通过蒸腾作用在植物体内迁移，导致茎叶中 HCB 含量相对较低，因此，尽管这些植物的茎叶中脂肪含量相对较高，但由于根茎对 HCB 输送能力相对较弱而使得茎叶并未表现出对 HCB 更高的富集能力。大狗尾草、小麦、狗尾草和芋

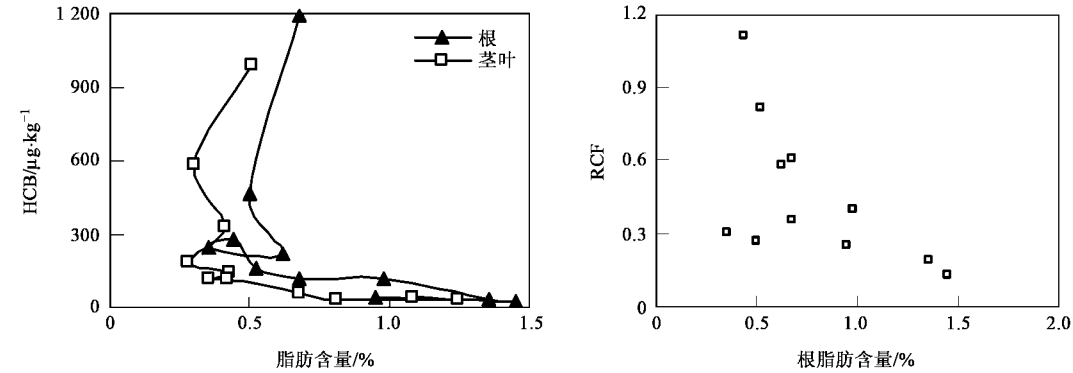


图 5 大河南岸植物脂肪含量与 HCB 含量和 RCF 的关系

Fig.5 Relationship between fat and HCB, RCF in plant beside river

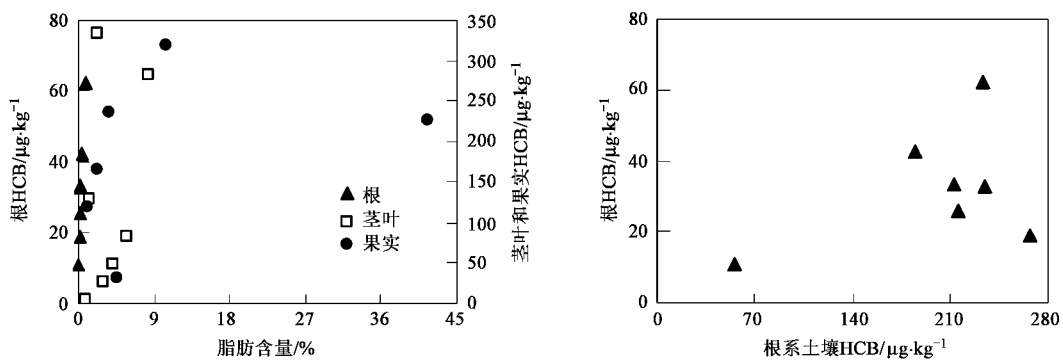


图 6 农田中植物与根际土壤中 HCB 含量

Fig.6 Concentration of HCB in plant and rhizosphere soil in cropland

头茎叶中 HCB 含量高于根系中,一方面可能与植物叶面吸收大气沉降的 HCB 通过有关,另一方面可能与根部迁移输送 HCB 能力相对较强有关。除了狗尾草籽外,其余植物的果实(种籽)均高度富集 HCB,说明富含脂肪的植物果实(种籽)具有高度富集 HCB 等疏水有机物的能力。

3 结论

(1) 采样区内植物和土壤均受到不同程度 HCB 污染,受污染源强的影响,排污渠和大河沿岸植物和根际土壤中 HCB 含量相对较高。

(2) 排污渠内木本植物对 HCB 富集程度大于草本植物,这与木本植物较高的脂肪含量有关。农田不同植物 HCB 含量却差异很大,并且同种植物不同部位 HCB 的含量差异也很大。

(3) 排污渠和农田植物中 HCB 含量与根际土壤中 HCB 含量无相关性,与植物脂肪含量显著相关,而大河南岸植物和根际土壤中 HCB 含量随着与排放口距离呈现显著降低趋势,植物根和茎叶中 HCB 含量与根际土壤中的显著相关,但与植物脂肪含量无相关性,HCB 在植物中的分布主要受污染源强、脂肪含量和 HCB 分配-迁移模式影响。

参考文献:

[1] Barber J L, Sweetman A J, van Wijk D, *et al.* Hexachlorobenzene in the global environment: Emissions, levels, distribution, trends and processes[J]. *Sci Total Environ*, 2005, **349**(1-3): 1- 44.

[2] Bailey R E. Global hexachlorobenzene emissions[J]. *Chemosphere*, 2001, **43**(2): 167-182.

[3] Nascimento N R D, Nicola S M C, Rezende M O O, *et al.* Pollution by hexachlorobenzene and pentachlorophenol in the coastal plain of São Paulo state, Brazil[J]. *Geoderma*, 2004, **121**(1):221-232.

[4] Borghinia F, Grimaltb J O, Sanchez-Hernandezc J C, *et al.*

Organochlorine compounds in soils and sediments of the mountain Andean Lakes[J]. *Environ Pollut*, 2005, **136**(2):253-266.

[5] Hu J Y, Wan Y, Shao B, *et al.* Occurrence of trace organic contaminants in Bohai Bay and its adjacent Nanpaiwu River, North China[J]. *Mar Chem*, 2005, **95**(1-2): 1-13.

[6] 郁亚娟,郭怀成,王连生,等. 淮河(江苏段)水体有机污染物风险评价[J]. *长江流域资源与环境*, 2005, **14**(6): 740-743.

[7] Kim Y S, Eun H, Katase T, *et al.* Vertical distributions of persistent organic pollutants (POPs) caused from organohlorine pesticides in a sediment core taken from Ariake bay, Japan[J]. *Chemosphere*, 2007, **67**(3):456-463.

[8] Howe T S, Billings S, Stolzberg R J. Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Hexachlorobenzene in Spruce Needles of Eastern Alaska[J]. *Environ Sci Technol*, 2004, **38**(12): 3294-3298.

[9] 丁辉,王胜强,孙津生,等. 海河干流底泥中六氯苯残留及其释放规律[J]. *环境科学*, 2006, **25**(3): 533-537.

[10] 周霞,余刚,张祖麟,等. 北京通惠河水和表层沉积物中氯苯类有机物污染现状[J]. *环境科学*, 2005, **26**(2): 117-120.

[11] Guerzoni S, Rossini P, Sarretta A, *et al.* POPs in the Lagoon of Venice: budgets and pathways[J]. *Chemosphere*, 2007, **67**(9): 1776-1785.

[12] Lammel G, Ghim Y S, Grados A, *et al.* Levels of persistent organic pollutants in air in China and over the Yellow Sea [J]. *Atmo Environ*, 2007, **41**(3):452-464.

[13] 章海波,骆永明,赵其国,等. 香港土壤研究Ⅳ. 土壤中有有机氯化化合物的含量和组成[J]. *土壤学报*, 2006, **43**(2): 220-225.

[14] Covaci A, Gheorghe A, Hulea O, *et al.* Levels and distribution of organochlorine pesticides, polychlorinated biphenyls and polybrominated diphenyl ethers in sediments and biota from the Danube Delta, Romania[J]. *Environ Pollut*, 2006, **140**(1): 136-149.

[15] 郑晓燕,张玲金,谢文明. 废旧电容器存放点多氯联苯的污染特征[J]. *环境化学*, 2007, **26**(2): 249-254.

[16] Waliszewski S M, Carvajal O, Infanzon R M, *et al.* Levels of organochlorine pesticides in soils and rye plant tissues in a field study [J]. *J Agric Food Chem*, 2004, **52**(23): 7045-7050.

[17] 周霞,余刚,黄俊,等. 北京东南郊化工区土壤和植物中氯苯类

- 有机物的残留及分布特征[J]. 环境科学, 2007, **28**(2): 249-254.
- [18] 张建英, 赵伟, 潘骏, 等. 氯代苯在叶菜和根菜类蔬菜中的分布与富集[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2005, **31**(2): 180-184.
- [19] 魏中青, 刘丛强, 梁小兵, 等. 贵州红枫湖地区水稻土多氯联苯和有机氯农药的残留[J]. 环境科学, 2007, **28**(2): 255-260.
- [20] 王大娟, 贾晓珊, 王红. 蔬菜中多氯代有机污染物的含量特征研究[J]. 食品科学, 2007, **28**(10): 442-444.
- [21] 王琳玲, 王力, 陆晓华. 点源排放六氯苯在多环境介质中的分布研究[J]. 环境科学与技术, 2007, **30**(2): 5-8.
- [22] USEPA8121, Chlorinated hydrocarbons by gas chromatography: Capillary Column Technique[S].
- [23] Yang X L, Jiang X, Yu G F, *et al.* Leaf-air transfer of organochlorine pesticides from three selected vegetables[J]. Environ Pollut, 2007, **148**(2): 555-561.
- [24] Simonich S L, Hites R A. Vegetation-atmosphere partitioning of polycyclic aromatic hydrocarbons[J]. Environ Sci Technol, 1994, **28**(5): 939-943.
- [25] Dickhut R E, Cincinelli A, Cochran M, *et al.* Atmospheric Concentrations and Air-Water Flux of Organochlorine Pesticides along the Western Antarctic Peninsula[J]. Environ Sci Technol, 2005, **39**(2): 465-470.
- [26] Van Drooge B L, Grimat J O. Atmospheric Semivolatile Organochlorine Compounds in European High-Mountain Areas(Central Pyrenees and High Tatras) [J]. Environ Sci Technol, 2004, **38**(13): 3525-3532.
- [27] Wong H L, Giesy J P, Lam P K S. Atmospheric Deposition and Fluxes of Organochlorine Pesticides and Coplanar Polychlorinated Biphenyls in Aquatic Environments of Hong Kong, China [J]. Environ Sci Technol, 2004, **38**(24): 6513-6521.
- [28] Li L, Sheng G Y, Chiou C T, *et al.* Relation of Organic Contaminant Equilibrium Sorption and Kinetic Uptake in Plants [J]. Environ Sci Technol, 2006, **39**(13): 4864-4870.
- [29] Chiou C T, Sheng G Y, Manes M. A partition-limited model for the plant Uptake of organic contaminants from soil and water [J]. Environ Sci Technol, 2001, **35**(7): 1437-1444.
- [30] Zhu L Z, Gao Y Z. Prediction of phenanthrene uptake by plants with a partition-limited model[J]. Environ Pollution, 2004, **131**(3): 505-508.
- [31] Gao Y Z, Zhu L Z, Ling W T. Application of the partition-limited model for plant uptake of organic chemicals from soil and water[J]. Sci Total Environ, 2005, **336**(1-3): 171-182.
- [32] Yang Z Y, Zhu L Z. Performance of the partition-limited model on predicting ryegrass uptake of polycyclic aromatic hydrocarbons[J]. Chemosphere, 2007, **67**(2): 402-409.
- [33] Gao Y Z, Zhu L Z. Plant uptake, accumulation and translocation of phenanthrene and pyrene in soils[J]. Chemosphere, 2004, **55**(9): 1169-1178.
- [34] Petersen L S, Larsen E H. Uptake of trace elements and PAHs by fruit and vegetables from contaminated soils [J]. Environ Sci Technol, 2002, **36**(14): 3057-3063.