

湛江徐闻县菠萝地有机氯农药污染特征及健康风险评价

陈洁茹, 陈碧珊, 陈梓欣, 周舒柔, 杨福宁, 李焯俊, 陈家琪

岭南师范学院地理科学学院, 广东 湛江

收稿日期: 2023年3月15日; 录用日期: 2023年4月16日; 发布日期: 2023年4月23日

摘要

我国于1983年禁止有机氯生产和使用, 经过多年的实践, 仍能在土壤中检测出残留成分。为了分析湛江徐闻菠萝地土壤有机氯农药残留及风险状况, 通过采集湛江徐闻县的曲界、前山和锦和镇三个镇共26个表层土壤样品, 采用气相色谱法对土壤中20种有机氯农药进行检测, 分析其含量状况和主要来源, 并对菠萝地有机氯农药进行健康风险评价。结果表明, 所检测的20种有机氯农药平均检出率为73%, 平均值皆小于 $1 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$; 狄氏剂、六氯苯和p,p-滴滴伊等为主要污染物, 残留含量平均值分别为 $0.08 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $0.07 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.033 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, p,p-滴滴涕、o,p-滴滴涕、 γ -氯丹和硫丹II均小于 $0.015 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 其他12种有机氯农药均未检测出; 来源分析表明, 研究区DDTs主要来源于历史污染, HCHs主要来源于大气的干湿沉降; 健康风险评价表明研究区OCPs对人体健康风险较低。本研究揭示徐闻菠萝地土壤有机氯污染现状, 可以为徐闻县土壤污染防治工作提供依据和支持。

关键词

农业土壤, 有机氯农药, 健康风险评价, 湛江徐闻县

Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Pineapple Fields in Xuwen County, Zhanjiang City

Jieru Chen, Bishan Chen, Zixin Chen, Shurou Zhou, Funing Yang, Yejun Li, Jiaqi Chen

School of Geographical Sciences, Lingnan Normal University, Zhanjiang Guangdong

Received: Mar. 15th, 2023; accepted: Apr. 16th, 2023; published: Apr. 23rd, 2023

文章引用: 陈洁茹, 陈碧珊, 陈梓欣, 周舒柔, 杨福宁, 李焯俊, 陈家琪. 湛江徐闻县菠萝地有机氯农药污染特征及健康风险评价[J]. 土壤科学, 2023, 11(2): 79-87. DOI: 10.12677/hjss.2023.112010

Abstract

In 1983, the production and use of organochlorine was banned in China. After years of cultivation, the residual components of organochlorine pesticides were still detected in the soil. In order to analyze the residue and risk of organochlorine pesticides in pineapple fields in Xuwen County, Zhanjiang, we collected 26 surface soil samples from Qujie, Qianshan and Jinhe towns in Xuwen County, Zhanjiang, and detected the organochlorine pesticides in the soil by gas chromatography, so as to analyze the content and main sources of organochlorine pesticides and evaluate the health risk of pineapple fields. The results showed that the average detection rate of 20 organochlorine pesticides was 73%, and the average values were all less than $1 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. Dieldrin, HCB and p,p-DDE are the main pollutants, and the average residual content is $0.08 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, $0.07 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ and $0.033 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectively. p,p-DDD, o,p-DDT, gamma-chlordane and endosulfan II are all less than $0.015 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. The other 12 organochlorine pesticides have not been detected. Source analysis indicates that DDTs in the study area mainly come from historical pollution, and HCHs mainly come from dry and wet deposition in the atmosphere. Health risk assessment shows that OCPs in the study area have a low risk to human health. This study reveals the present situation of soil organochlorine pollution in pineapple fields in Xuwen County, and provides basis and support for its prevention and control.

Keywords

Agricultural Soil, Organochlorine Pesticides, Health Risk Assessment, Zhanjiang Xuwen County

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

土壤是有机氯农药(OCPs)残留的主要环境介质之一, OCPs 可以通过挥发、扩散和质流转移至大气、地表水和地下水, 并且可以通过生物富集和食物链对人体健康产生威胁[1]。六六六(HCHs)和滴滴涕(DDTs)是有机氯农药的主要品种, 中国累计使用 HCHs 和 DDTs 就高达 $5 \times 10^6 \text{ t}$ [2]。虽然我国在 1983 年就禁止使用有机氯农药, 但由于有机氯农药具有较强的化学稳定性和迁移性, 可使其残留时间较长, 有数年至二三十年之久, 至今国内外许多地区土壤中仍可检出 OCPs 残留物[3]。从国内外研究来看, 针对菠萝地有机氯农药的相关研究鲜有报道, 梁晓晖等对雷州半岛南部典型农用地土壤-作物的有机氯农药残留特征和健康风险进行研究, 检测出菠萝地土壤有机氯农药残留含量较低, OCPs 通过口、皮肤和呼吸 3 种暴露途径引起的致癌与非致癌风险指数均小于对应的阈值[4]。目前对土壤有机氯农药残留及来源状况的研究主要集中在农田土壤、果蔬土壤等方面。Yun *et al.*对韩国农田(包含稻田、菜地和果园)土壤中过去禁用的 10 种有机氯农药(包括异构体在内的 26 种)的残留水平和分布特征进行了研究, 发现果园中有机氯农药的含量普遍较高, HCHs 和硫丹的高检出率多归因于历史残留[5]; Fosu-Mensah *et al.*对加纳可可农场土壤的有机氯农药残留进行评估, 发现研究区存在有机氯农药残留, 并推测残留来源于农民非法使用农药或历史使用[6]; Momohshaibu *et al.*对尼日利亚扎姆法拉州蔬菜农田土壤的有机氯农药残留进行评估, 发现有有机氯农药残留物可能是来源于历史残留与非法使用的结论, 建议对研究区域内的农药残留进行常规监测[7]。国内学者杨代凤等统计有机氯农药在我国部分地区农业土壤的残留情况, 发现我国大多数地方仍存

在 HCHs 和 DDTs 的残留, 污染程度仍然比较严重[8]; 杨国义等研究广东省典型区域农业土壤的有机氯农药含量及其分布特征, 结果显示 17 种有机氯农药的检出率为 99.8%, 土壤中 HCHs 含量属于中等水平, DDTs 含量属于较低水平[9]; 吴启航等对广州郊区菜地、果园、稻田有机氯农药残留特征进行研究, 认为白云区和番禺区的菜地 20 cm~40 cm 剖面土壤 OCPs 超标, 对土壤环境有一定危害[10]。本研究通过对徐闻菠萝地土壤有机氯农药残留及来源状况进行分析, 并采用健康风险法对土壤有机氯农药的风险状况进行评价, 以期为徐闻县菠萝生产与发展和构建农产品安全体系提供基础数据。

2. 研究区概况

目前有关学者对水果作物土壤有机氯农药的研究甚少, 而土壤质量的好坏直接影响到水果的质量进而影响人体健康。湛江地区是我国热带水果作物种植基地, 其中徐闻菠萝闻名于世, 目前徐闻菠萝产量占中国菠萝总产量的三分之一, 有“菠萝的海”之称。湛江位于广东省的西南部, 是中国大陆的最南端(如图 1(a)所示), 地理位置为 $21^{\circ}14' \sim 21^{\circ}44'N$, $109^{\circ}55' \sim 110^{\circ}44'E$, 总面积约为 $12,471 \text{ km}^2$ 。徐闻县位于湛江市南部, 属于亚热带季风气候, 地势平缓, 多火山台地, 有大规模种植菠萝的自然优势。徐闻菠萝的主要种植区域在徐闻县中东部, 年种植面积约 233 km^2 , 年总产量约 70 万 t, 年菠萝鲜果总产值 15 亿元[11]。

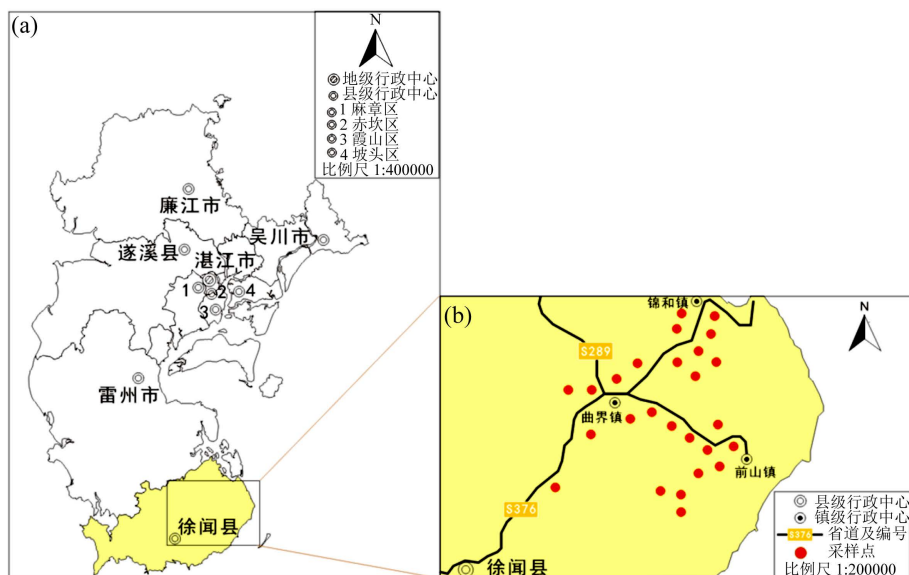


Figure 1. Leizhou Peninsula and distribution of pineapple soil sampling sites in Xuwen County ((a) Geographical location of Xuwen County; (b) sampling point distribution)

图 1. 雷州半岛及徐闻县菠萝地土壤采样点分布((a) 为徐闻县地理位置图, (b) 为样点分布图)

3. 样品采集与测试方法

3.1. 样品采集及处理

2021 年 5 月~7 月, 通过对徐闻县菠萝地进行野外调查, 选取徐闻县菠萝主要集中种植的曲界镇、锦和镇和前山镇三个镇进行样品采集, 共采集 26 个土壤样品, 样点分布如图 1(b)所示。具体的采样方法是利用 GPS 进行精确定位, 在每个试验区内采用随机布点法采集 5 个点位的样品混合作为一个样点的样品。采集时去除表面杂物, 用 PVC 管进行采样, 采集深度为 20 cm, 混合土样装入密封袋并送往实验室。土壤样品经冷冻处理后送往黑龙江省农业科学院农产品质量安全研究所(农业农村部谷物及制品质量监督检验测试中心)测定土壤中含水量及有机氯农药的含量。

3.2. 样品测试

土壤样品测试采用气相色谱法, 主要步骤如下: 称取两份约 10 g 的样品, 一份用于测定干物质含量。土壤样品干物质含量和水分含量的测定按照《HJ613-2011-土壤干物质和水分的测定重量法》执行。首先将具盖容器和盖子于(105 ± 5)°C下烘干 1 h, 稍冷, 盖好盖子并置于干燥器中至少冷却 45 min, 测定带盖容器的质量。用样品勺将 10 g~15 g 土壤试样转移至已称重的具盖容器中, 盖上容器盖测定总质量。然后取下容器盖, 将容器和试样一并放入烘箱中, 在(105 ± 5)°C下烘干至恒重, 同时烘干容器盖。盖上容器盖, 置于干燥器中至少冷却 45 min, 取出后立即测定带盖容器和烘干土壤的总质量, 精确至 0.01 g。

另一份加入适量无水硫酸钠, 研磨均化成流砂状脱水。土壤样品通过索氏提取收集提取液, 将提取液进行脱水、浓缩、净化浓缩定容, 待分析。分别量取适量的有机氯农药标准使用液, 用正己烷稀释, 配制标准系列, 由低浓度到高浓度依次对标准系列溶液进行进样、检测, 记录目标物的保留时间、峰高或峰面积。以标准系列溶液中目标物浓度为横坐标, 以其对应的峰高或峰面积为纵坐标, 建立标准曲线, 最后按照与标准曲线建立相同的仪器分析条件进行试样的测定获得菠萝地 26 个土壤样品中 20 种有机氯农药的含量数据。

3.3. 数据分析

土壤样品经折算样品中的水分后, 计算出土壤中有机氯农药 OCPs 残留状况; 同时采用美国的健康风险评价模型, 对研究区人群产生的潜在风险进行评价[4] [12]。人体摄取污染物质的途径主要是通过口、呼吸摄入和皮肤接触进入人体, 不同暴露途径的健康风险计算方法如下[4]:

(1) 经口摄入量可按儿童 200 mg·d⁻¹、成人 100 mg·d⁻¹ 计算, 因经口摄入的日平均暴露剂量 CDI_{ingest} [mg/(kg·d)], 可按下式计算:

$$CDI_{ingest} = \frac{CS \times IR_{ingest} \times EF \times ED \times CF}{BW \times AT} \quad (1)$$

式中, CS 表示土壤中污染物浓度, mg·kg⁻¹; IR_{ingest} 表示经口摄入量, mg·d⁻¹; EF 表示暴露频率, d·a⁻¹; ED 表示暴露时间, a; CF 表示转换系数, kg·mg⁻¹; BW 表示平均体重, kg; AT 表示污染物平均暴露时间, d。

(2) 皮肤接触土壤面积可按儿童 2800 cm²、成人 5700 cm² 计算, 因皮肤接触的日平均暴露剂量 CDI_{dermal} [mg/(kg·d)], 可按下式计算:

$$CDI_{dermal} = \frac{CS \times IR_{dermal} \times EF \times ED \times CF}{BW \times AT} \quad (2)$$

$$IR_{dermal} = SA \times AF \times ABS \quad (3)$$

式中, CS 表示土壤中污染物浓度, mg·kg⁻¹; IR_{dermal} 表示皮肤接触进入人体量, mg·d⁻¹; SA 表示可能接触土壤的皮肤面积, cm²·d⁻¹; AF 表示土壤对皮肤的吸附系数, mg·cm⁻²; ABS 表示皮肤吸附系数; EF 表示暴露频率, d·a⁻¹; ED 表示暴露时间, a; CF 表示转换系数, kg·mg⁻¹; BW 表示平均体重, kg; AT 表示污染物平均暴露时间, d。

(3) 呼吸吸入量可按儿童 10.1 m³·d⁻¹、成人 15.7 m³·d⁻¹ 计算, 因呼吸吸入的日平均暴露剂量 CDI_{inhale} [mg/(kg·d)], 可按下式计算:

$$CDI_{inhale} = \frac{CS \times IR_{inhale} \times EF \times ED}{BW \times AT \times PEF} \quad (4)$$

式中, CS 表示土壤中污染物浓度, mg·kg⁻¹; IR_{inhale} 表示呼吸吸入量, m³·d⁻¹; EF 表示暴露频率, d·a⁻¹;

ED 表示暴露时间, a; BW 表示平均体重, kg; AT 表示污染物平均暴露时间, d; PEF 表示土壤的尘扩散因子, $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

(4) 致癌风险评价, 致癌风险指数等于不同暴露途径的日平均暴露剂量 CDI 乘以经口、呼吸和皮肤接触等的致癌斜率因子 SF 之和, 其中 R 是致癌风险指数, 当 $R < 10^{-6}$ 时, 认为风险较小; 当 $R > 10^{-6}$ 时, 认为存在风险[12]。

$$R = \sum \text{CDI} \times \text{SF} \quad (5)$$

(5) 非致癌风险评价, 非致癌风险指数等于不同暴露途径的日平均暴露剂量 CDI 除以经口、呼吸和皮肤接触等的危害剂量 RfD 之和, 其中 HQ 是非致癌风险指数, 当 $\text{HQ} < 1$ 时, 认为风险较小; 当 $\text{HQ} > 1$ 时, 认为存在风险[12]。

$$\text{HQ} = \sum \frac{\text{CDI}}{\text{RfD}} \quad (6)$$

4. 结果与分析

4.1. 徐闻菠萝地土壤有机氯农药总体特征

徐闻菠萝地土壤中 20 种有机氯农药残留状况如表 1 所示, 样品中 20 种有机氯农药检出率为 73%, 含量范围在 ND~0.94 $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间, 平均值为 0.216 $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。其中 HCHs 检出率为 8%, 含量范围为 ND~0.086 $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 只有两个样品检测出 α -666, 其余样品均未检测出 HCHs; DDTs 检出率为 31%, 含量范围为 ND~0.778 $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其中 p,p-滴滴伊的检出率最高, 为 27%, p,p-滴滴涕、o,p-滴滴伊和 o,p-滴滴滴均未检测出。安琼等认为变异系数大反映农药使用的无序性和零散性生产管理模式[13], 在徐闻菠萝地 DDTs 的异构体中, p,p-滴滴滴、o,p-滴滴涕的变异系数分别为 102%、76%, 变异系数较大, 说明其施用范围较分散。HCHs 的平均值和检出率比 DDTs 低, 但 HCHs 变异系数大于 DDTs, 说明 HCHs 的残留量较少, 施用范围较分散。

Table 1. Concentrations and compositions of 20 kinds of OCPs in soil of Xuwen pineapple field

表 1. 徐闻县菠萝地土壤 20 种有机氯农药含量特征

农药名称	含量范围/ ($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	平均值/ ($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	变异系数 CV/%	检出率/%
α -666	ND~0.086	0.005	72	8
β -666	/	/	/	/
γ -666	/	/	/	/
δ -666	/	/	/	/
HCHs	ND~0.086	0.005	72	8
p,p-滴滴伊	ND~0.460	0.033	54	27
p,p-滴滴滴	ND~0.162	0.006	102	4
o,p-滴滴涕	ND~0.156	0.008	76	8
p,p-滴滴涕	/	/	/	/
o,p-滴滴伊	/	/	/	/
o,p-滴滴滴	/	/	/	/
DDTs	ND~0.778	0.047	62	31

Continued

六氯苯	ND~0.240	0.070	17	73
γ -氯丹	ND~0.073	0.010	45	15
狄氏剂	ND~0.895	0.080	56	12
硫丹 II	ND~0.092	0.004	87	4
灭蚁灵	/	/	/	/
环氧七氯	/	/	/	/
α -氯丹	/	/	/	/
硫丹 I	/	/	/	/
异狄氏剂	/	/	/	/
艾氏剂	/	/	/	/
OCPs	ND~0.940	0.216	26	73

注: ND 表示未检测出; HCHs 为 α -666 + β -666 + γ -666 + δ -666; DDTs 为 p,p-滴滴伊 + p,p-滴滴滴 + o,p-滴滴涕 + p,p-滴滴涕 + o,p-滴滴伊 + o,p-滴滴滴; OCPs 为所有检测到的有机氯农药的含量之和。

4.2. 徐闻菠萝地土壤有机氯农药的组成特征及来源分析

4.2.1. DDTs 的组成特征及来源分析

根据 p,p-DDT 的特殊性质,它在有氧环境下会分解为 p,p-DDE,而在缺氧环境中则会分解为 p,p-DDD [14]。基于 p,p-DDT 的上述特性,则可用 p,p-DDE/p,p-DDT 来判断菠萝地土壤中的 p,p-DDE 来源,若该值较低,则表明有新的 DDTs 输入,反之则为历史污染[15]。根据实验数据可得,26 个样品中均无 p,p-DDT 检出,说明所有样地中无新的 DDTs 输入,样地中残留的 DDTs 主要为历史污染。总的来说,DDTs 的含量范围、平均值和检出率较高,表明 DDTs 在菠萝种植中相对 HCHs 使用较高,其来源主要为历史污染。

4.2.2. HCHs 的组成特征及来源分析

徐闻菠萝地土壤中所检测的 HCHs 四种异构体中只检测出 α -666,且仅出现在样地 BLDH-01 和 HXNCSSD-01 样品中,含量为 $0.046\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.086\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。由于 HCHs 的含量在样地中分布不具普遍性,由此可以排除存在农业历史污染和工业污染的可能性。而出现 HCHs 的样地主要原因是这两个样地均为徐闻菠萝大面积种植基地,同时具有典型性[16]。徐闻曲界镇菠萝种植历史悠久,最早开始于 1926 年,从华侨倪国良在曲界镇愚公楼村种下第一棵菠萝起,至今已有将近百年的菠萝种植历史[11]。菠萝的海作为大型菠萝种植地,具有一定的旅游观赏功能[17],部分种植户为了保持菠萝地的美观性常使用杀虫剂、除草剂以除去菠萝地中的害虫和杂草,致使杀虫剂和除草剂成分残留在土壤中,因此可以判断这两个样地土壤有机氯农药主要是由于人类活动带来的影响。

林丹作为工业六六六的替代品,在农业上使用广泛,其主要成分为 γ -666 [18] [19],在土壤中, γ -666 的降解速率比 α -666 更快,且在特定条件下 γ -666 会转变为 α -666。基于此,HCHs 的四种异构体的比值可作为判断 HCHs 来源的依据。若 α -666/ γ -666 的比值位于 4~7 之间,则说明该地的 HCHs 主要源于历史污染,若该比值小于 3,则表明该地区近期有新林丹输入[19]。同时,也可根据 β -666/(α -666 + γ -666) 的值来确定样地土壤是否存在 HCHs 的历史污染,若该值大于 0.5,则说明该地的 HCHs 污染主要是历史污染,反之则说明污染为近期农药使用或大气的干湿沉降。在样品的检测中,由于 HCHs 四种异构体中只有 α -666 一种被检出,其余均未被检出,则说明 α -666/ γ -666 的比值无实际意义, β -666/(α -666 + γ -666) 的比值为零,即说明该样地没有新污染物输入,也不存在历史污染,意味着样地中的 HCHs 污染可能源于大

气的干湿沉降。

5. 讨论

5.1. 徐闻菠萝地土壤有机氯农药与国内外其它地区对比分析

国内外不同地区农用地有机氯农药含量如表 2 所示, 研究区土壤中 HCHs 含量与南京、香港、广州、黄淮海地区、德国中部等地农业区土壤处于同一水平, 其含量远低于天津农业区; 研究区土壤中 DDTs 含量与浙北、罗马尼亚等地的土壤处于同一水平, 低于南京、北京、天津、广州、美国南部、德国中部等地农业区土壤。

不同地区有机氯农药在土壤中的残留水平存在一定差异, 推测与有机氯的使用量、气候、土壤条件以及耕作条件等因素的综合影响有关。调查发现, 北京、广州等地的经济发展水平高于研究区, 农业不是主导产业; 而香港具有严格的农药进出口登记和管理制度[21], 并且农用地少, 以有机农业为主, 这些因素可能是其有机氯农药污染程度比徐闻低的原因。而湛江市农业正处于加快基本实现农业现代化的关键阶段[29], 进一步加剧了当地农药的使用及其污染, 因而出现高于浙北农田等地区有机氯含量的特点。天津、美国南部等地有机氯残留量远大于徐闻菠萝地, 主要是因为天津和美国南部等地所处农业带的农业作业时间长, 作物种植类型多样, 可耕作面积大, 会出现有机氯残留含量高的特点[22] [26]。南京农田土壤中 DDTs 和 HCHs 的残留量均高于徐闻菠萝地, 这可能是因为南京有机氯的使用量大和禁用期短, 多为零散性的生产管理模式, 因此有机氯残留量高[13]。

Table 2. Comparison of organochlorine pesticide contents in different agricultural land at home and abroad
表 2. 国内外不同农用地有机氯农药含量对比

土壤来源	HCHs/ng·g ⁻¹	DDTs/ng·g ⁻¹	文献来源
徐闻菠萝地	ND~68 (5.00)	ND~778 (47.00)	本研究
南京农业土壤	2.7~130.6 (13.6)	6.3~1050.7 (64.1)	[13]
北京农业土壤	0.64~32.32 (1.47)	1.42~5910.80 (77.18)	[20]
香港农业土壤	2.5~11 (6.19)	ND~5.7 (0.52)	[21]
天津农区土壤	1.3~1094.6 (45.8)	0.071~972.249 (56.01)	[22]
广州菜地土壤	0.19~42.3 (4.39)	3.58~831 (81.4)	[23]
黄淮海地区农田	0.54~13.94 (4.01)	ND~126.37 (11.16)	[24]
浙北农田	0.20~20.1 (1.73)	1.50~362.84 (44.68)	[25]
美国南部农业土壤		0.01~1490 (211)	[26]
罗马尼亚农业土壤	1.9~1.7	35.5~42.9	[27]
德国中部农业土壤	7.52	72.01	[28]

注: 括号内数据为平均值。

5.2. 徐闻菠萝地土壤有机氯农药风险评价

参照《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB15618-2018), 徐闻菠萝地土壤中的 HCHs、DDTs 的平均值分别为 0.005 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、0.047 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 均低于农用地土壤污染风险筛选值(100 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$), 说明土壤残留含量低, 符合无公害农场品土壤环境质量标准, 污染风险低。

对所检测出的 OCPs 进行不同暴露途径的致癌与非致癌风险评价, 并以累加方式计算得出研究区儿

童和成人在 3 种暴露途径下 OCPs 的致癌风险指数 CR 和非致癌风险指数 NR, 评价结果见表 3, 其中儿童致癌和非致癌总风险平均值分别为 1.25×10^{-8} 和 3.47×10^{-5} , 成人致癌和非致癌总风险平均值分别为 9.67×10^{-9} 和 2.68×10^{-5} 。根据美国环境保护署 EPA [4] 推荐的可接受致癌风险水平为 1.0×10^{-6} , 可以看出徐闻菠萝地土壤污染物致癌风险指数较低, 非致癌风险值也均低于目标风险值 1, 表明非致癌风险较小, 研究区内 OCPs 对人体健康风险较低, 可见土壤中 OCPs 对研究区人群不会造成明显健康风险。

Table 3. Human health risks of OCPs in soil

表 3. 土壤中 OCPs 的人体健康风险

OCPs	儿童				成人			
	致癌风险 CR		非致癌风险 NR		致癌风险 CR		非致癌风险 NR	
	最大值	平均值	最大值	平均值	最大值	平均值	最大值	平均值
α -666	4.75×10^{-9}	2.81×10^{-10}	2.2×10^{-7}	1.3×10^{-8}	3.66×10^{-9}	2.16×10^{-10}	1.69×10^{-7}	1×10^{-8}
六氯苯	3.37×10^{-9}	9.77×10^{-10}	6.15×10^{-6}	1.78×10^{-6}	2.6×10^{-9}	7.54×10^{-10}	4.74×10^{-6}	1.37×10^{-6}
狄氏剂	1.26×10^{-7}	1.13×10^{-8}	3.67×10^{-4}	3.29×10^{-5}	9.7×10^{-8}	8.7×10^{-9}	2.83×10^{-4}	2.54×10^{-5}
总风险	1.26×10^{-7}	1.25×10^{-8}	3.68×10^{-4}	3.47×10^{-5}	9.75×10^{-8}	9.67×10^{-9}	2.84×10^{-4}	2.68×10^{-5}

6. 结论

本研究通过研究发现徐闻菠萝地土壤所检测的 20 种有机氯农药检出率为 73%, 其中六氯苯和 DDTs 为主要污染物。根据来源分析, DDTs 主要来源于历史残留, HCHs 污染可能源于大气的干湿沉降, 表明除了历史残留, 还需注意大气干湿沉降等的影响。研究区土壤有机氯含量处于较低水平, 其中 HCHs 和 DDTs 均低于国家土壤环境质量标准。研究区土壤污染物致癌风险值和非致癌风险值均低于可接受风险值, 表明研究区内 OCPs 对人体健康风险较低, 该研究结果可以为未来徐闻县菠萝地土壤污染防治工作提供基础数据支持。

参考文献

- [1] 史双昕, 周丽, 邵丁丁, 等. 北京地区土壤中有机氯农药类 POPs 残留状况研究[J]. 环境科学研究, 2007, 20(1): 24-29.
- [2] 于新民, 陆继龙, 郝立波, 等. 吉林省中部土壤有机氯农药的含量及组成[J]. 地质通报, 2007, 26(11): 1476-1479.
- [3] 阚可聪, 谷孝鸿, 李红敏, 等. 固城湖及出入湖河道表层水体、沉积物和鱼体中有机氯农药分布及风险评估[J]. 环境科学, 2020, 41(3): 336-346.
- [4] 梁晓晖, 解启来, 郑芊, 等. 雷州半岛南部典型农用地土壤-作物的有机氯农药残留特征和健康风险评估[J]. 环境科学, 2022, 43(1): 500-509.
- [5] Yun, S.M., Yoon, J.K., Kim, J.I., et al. (2022) Evaluation of Residual Level and Distribution Characteristics of Organochlorine Pesticides in Agricultural Soils in South Korea. *Environmental Science and Pollution Research International*, 29, 46003-46017. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-18858-z>
- [6] Fosu-Mensah, B.Y., Okoffo, E.D., Darko, G., et al. (2016) Assessment of Organochlorine Pesticide Residues in Soils and Drinking Water Sources from Cocoa Farms in Ghana. *SpringerPlus*, 5, 1-13. <https://doi.org/10.1186/s40064-016-2352-9>
- [7] Momohshaibu, Salihu, S.O. and Iyya, Z. (2022) Assessment of Physicochemical Parameters and Organochlorine Pesticide Residues in Selected Vegetable Farmlands Soil in Zamfara State, Nigeria. *Science Progress and Research (SPR)*, 2, 559-566. <https://doi.org/10.52152/spr/2022.171>
- [8] 杨代凤, 刘腾飞, 谢修庆, 等. 我国农业土壤中持久性有机氯类农药污染现状分析[J]. 环境与可持续发展, 2017, 42(4): 40-43.

- [9] 杨国义, 万开, 张天彬, 等. 广东省典型区域农业土壤中有机氯农药含量及其分布特征[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(5): 1619-1623.
- [10] 吴启航, 邓红梅. 广州郊区菜地、果园、稻田有机氯农药残留特征初步研究[J]. 环境与健康杂志, 2009, 26(11): 981-984.
- [11] 曾权, 邓斌. “中国菠萝第一镇”徐闻县曲界镇[J]. 源流, 2021(12): 12-13.
- [12] 吴以中, 唐小亮, 葛滢, 等. RBCA 和 Csoil 模型在挥发性有机物污染场地健康风险评估中的应用比较[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(12): 2458-2466.
- [13] 安琼, 董元华, 王辉, 等. 南京地区土壤中有机氯农药残留及其分布特征[J]. 环境科学学报, 2005, 25(4): 470-474.
- [14] 贺珊珊, 曹菱, 王焰新, 等. 江汉平原中部表层土壤中有机氯农药分布及来源[J]. 环境科学与技术, 2013, 36(2): 75-79.
- [15] 彭诗云, 彭平安, 孔德明, 等. 湛江湾沉积物中六六六(HCHs)、滴滴涕(DDTs)有机氯农药的分布特征与风险评估[J]. 环境科学, 2019, 40(4): 1734-1742.
- [16] 严程明, 张江周, 石伟琦, 等. 徐闻县菠萝种植现状与生长因素分析[J]. 热带农业科学, 2013, 33(9): 16-21.
- [17] 何敏祺. 有一片海叫“菠萝的海”[J]. 上海集邮, 2021(5): 13-14.
- [18] 窦磊, 杨国义. 珠江三角洲地区土壤有机氯农药分布特征及风险评估[J]. 环境科学, 2015, 36(8): 2954-2955.
- [19] 肖鹏飞. 山东省土壤有机氯农药污染的研究进展[J]. 科技创新导报, 2017, 14(20): 136-138.
- [20] 张红艳, 高如泰, 江树人, 等. 北京市农田土壤中有机氯农药残留的空间分析[J]. 中国农业科学, 2006, 39(7): 1403-1410.
- [21] 章海波, 骆永明, 赵其国, 等. 香港土壤研究-土壤中有有机氯化物的含量和组成[J]. 土壤学报, 2006, 43(2): 220-225.
- [22] Wang, X.J., Piao, X.Y., Chen, J., *et al.* (2006) Organochlorine Pesticides in Soil Profiles from Tianjin China. *Chmosphere*, **60**, 1514-1520. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2005.12.052>
- [23] Chen, L.G., Ran, Y., Xing, B.S., *et al.* (2005) Contents and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Organochlorine Pesticides in Vegetable Soils of Guangzhou, China. *Chmosphere*, **60**, 879-890. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2005.01.011>
- [24] 赵炳梓, 张佳宝, 周凌云, 等. 黄淮海地区典型农业土壤中六六六(HCH)和滴滴涕(DDT)的残留研究 I. 表层残留量及其异构体组成[J]. 土壤学报, 2005, 42(5): 761-767.
- [25] 邱黎敏, 张建英, 骆永明. 浙北农田土壤中 HCH 和 DDT 的残留及其风险[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(6): 1161-1165.
- [26] Bidleman, T.F. and Leonel, A.D. (2004) Soil-Air Exchange of Organochlorine Pesticides in the Southern United States. *Environmental Pollution*, **128**, 49-57. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2003.08.034>
- [27] Adrian, C., Camen, H. and Paul, S. (2001) Selected Persistent Organochlorine Pollutants in Romania. *The Science of the Total Environment*, **280**, 143-152. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(01\)00820-8](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(01)00820-8)
- [28] Manz, M., Wenzel, K.D. and Dietze, U. (2001) Persistent Organic Pollutants in Agricultural Soils of Central Germany. *The Science of the Total Environment*, **277**, 187-198. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(00\)00877-9](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(00)00877-9)
- [29] 邵东晨. 湛江现代农业发展评价研究[D]: [硕士学位论文]. 湛江: 广东海洋大学, 2020.