

海南省瓜菜田土壤中有有机氯农药残留及生态风险分析

吴东明¹, 陈珊珊¹, 邓晓^{1,3}, 武春媛^{2,3*}, 李勤奋^{2,3*}

(1.海南大学环境与植物保护学院, 海南 海口 570100; 2.中国热带农业科学院环境与植物保护研究所, 海南 海口 570100; 3.农业部儋州农业环境科学观测实验站, 海南 儋州 571737)

摘要:采用气相色谱法检测了海南瓜菜田的33个表层土壤样品中18种有机氯(OCPs)农药残留,并对其进行污染源分析和初步生态风险评价。结果表明:(1)土壤中的OCPs检出率为90.9%,最高残留量为 $17.37\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$,平均值为 $2.30\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$;(2)18种OCPs均有检出,六六六(HCHs)、滴滴涕(DDTs)、硫丹类农药的检出率较高,分别为63.6%、57.6%、54.5%;(3)DDTs是主要残留物质,占总OCPs残留量的54.6%,18.2%的土样可能有DDTs新的输入,土壤中HCHs主要来源于过去使用的林丹;(4)与国内其他地区土壤和国家《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)一级标准相比,海南省瓜菜田土壤DDTs和HCHs残留量处于较低水平,生态风险也较低。

关键词:海南省;有机氯农药;土壤残留;生态风险

中图分类号:X820.4

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2014)04-0343-06

doi: 10.13254/j.jare.2014.0099

Residues and Eco-risk Evaluation of Organochlorine Pesticides in Agricultural Soils from Typical Vegetable Produce Areas of Hainan Province, China

WU Dong-ming¹, CHEN Shan-shan¹, DENG Xiao^{1,3}, WU Chun-yuan^{2,3*}, LI Qin-fen^{2,3*}

(1.College of Environment and Plant Protection, Hainan University, Haikou 570100, China; 2.Institute of Environment and Plant Protection, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Haikou 570100, China; 3.Danzhou Scientific Observing and Experimental Station of Agro-Environment, Ministry of Agriculture, Danzhou 571737, China)

Abstract: To determine current levels of organochlorine pesticides (OCPs) and assess their sources, ecological risk in agricultural soils from typical vegetable produce areas of Hainan Province, 33 soil samples were collected and detected by the GC method. The results showed that OCPs were found in 90.9% of the collected soil samples and ranged from Not Detected (ND) to $17.37\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$, with a mean of $2.30\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$. The DDTs, HCHs, endosulfan and endosulfan sulfate were found over 54% in the collected soil samples. Also, the DDTs were the main components, and their contribution to the residues of OCPs was over 54.6%. Analysis of the sources of contamination showed that HCHs in the area were mainly derived from lindane. DDTs, which were suspected to have recent application to 18.2% soil, were derived mainly from technical DDTs or dicofol containing DDT impurities. Comparing with various studies and the 'National Environmental Quality Standard for Soils of China' (GB 15618—1995), OCP pollutions were generally slight in present study, and the ecological risk of HCHs and DDTs residue in agricultural soils of Hainan Province was lower.

Keywords: Hainan Province; organochlorine pesticide; soil residues; eco-risk evaluation

有机氯农药(Organochlorine Pesticides, OCPs)是一类氯代芳香烃衍生物,作为广谱杀虫剂,曾在我国大量使用^[1-3]。1950—1983年,六六六(HCHs)、滴滴涕

(DDTs)在我国的使用总量分别达400万t、50万t,每公顷耕地承受HCHs和DDTs约 $60\text{ kg}^{[4]}$ 。由于具有持久性、生物蓄积性、高毒性,对人类健康和生态安全有较大潜在危害^[3],中国于1983年在农业上开始禁用OCPs,但目前仍保留滴滴涕农药登记(用于农药三氯杀螨醇的生产)、六氯苯的生产(用于农药五氯酚和五氯酚钠的生产)、林丹的使用(含90% γ -HCH)^[4]。OCPs残留期较长,禁用30年后,其在土壤中仍被频繁检出^[5-17],严重影响农产品质量安全^[18]。大部分地区的土

收稿日期:2014-04-18

基金项目:中国热带农业科学院院本级基本科研业务费重大项目培育专项(1630042014003)

作者简介:吴东明(1991—),男,广东湛江人,在读硕士研究生,研究方向为污染控制。E-mail: 646122410@qq.com

*通信作者:武春媛 E-mail: wuchunyuangz@126.com

李勤奋 E-mail: qinfenli2005@163.com

壤中 OCPs 检出率达 90% 以上^[5-15], 某些地区 HCHs 和 DDTs 残留量甚至高达 $1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上^[3]。因此对土壤有机氯农药污染应高度重视。

海南省位于东经 $108^{\circ}37' \sim 111^{\circ}05'$, 北纬 $3^{\circ}30' \sim 20^{\circ}18'$, 是我国冬季瓜果蔬菜北运的重要生产基地。2010—2011 年, 海南秋冬季瓜菜面积达 17.6 万 hm^2 , 产量 408.0 万 t, 其中 289.8 万 t 销往岛外^[19]。海南省高温、多雨, 农作物病虫害严重, 历史上曾大量使用 OCPs, 至今仍可在海南周边海水中、沉积物、地表水中检出^[20-22], 而有关海南瓜菜田中的 OCPs 鲜有报道。当前在海南高温高湿环境下, 瓜菜田土壤中 OCPs 是否还存在残留, 残留量为多少, 与温带地区残留水平的差异, 是本调查研究关注的重点。

1 材料与方法

1.1 样品采集与处理

根据海南省的瓜菜生产布局、土壤类型, 在各市(县)选择 33 个瓜菜地(含稻-菜轮作)土壤作为采样点。具体位置如图 1 所示。各采样点采用 GPS 定位。采取梅花形多点采样混合法采集表层土壤(0~20 cm), 即每一采样点包含 5 个子采样点(中心点和距中心 4 个方向各 5 m 处的点)。利用四分法留取 1 kg 装入棕色广口玻璃瓶运回, 于 -20°C 下保存。分析前, 将冷冻保存的土样在室温条件下风干, 研磨过 60 目筛。



图 1 采样点位置图

Figure 1 The sampling locations

1.2 试剂

有机氯农药标样: α -HCH、 β -HCH、 γ -HCH、 δ -HCH、p,p'-DDE、p,p'-DDD、p,p'-DDT、o,p'-DDT、甲氧滴滴涕、硫丹 I、硫丹 II、硫丹硫酸盐、七氯、环氧七

氯、艾氏剂、狄氏剂、异狄氏剂、异狄氏剂醛, 共计 18 种农药, 购自北京百灵威科技有限公司。

有机溶剂: 正己烷、二氯甲烷为色谱纯, 购自 DIK-MA 公司。内标物为十氯联苯; 回收率指示物是 4,4'-二氯联苯。

1.3 样品分析

样品处理和分析参照参考文献[23]: 称取 20 g 土壤样品于索氏抽滤筒中, 之后在 250 mL 平底烧瓶中加入 200 mL 二氯甲烷、2 g 活化过的铜片和回收率指示物; 在水浴锅上(温度保持 46°C)连续提取 48 h。冷凝循环水温度设为 10°C , 回流速度控制在 $5 \sim 6 \text{ 次} \cdot \text{h}^{-1}$ 。提取液在旋转蒸发仪上浓缩到 1 mL 后, 加入 10 mL 正己烷, 继续浓缩至 1~2 mL。然后过硅胶/氧化铝(2:1)层析柱(净化柱为 1 cm 内径的进口层析柱, 采用正己烷湿法装柱), 从下至上依次装入 12 cm 硅胶、6 cm 氧化铝、1 cm 无水硫酸钠, 用二氯甲烷: 正己烷(体积比)=3:7 淋洗液淋洗出有机氯农药。之后经正己烷转换溶剂后, 用高纯氮气吹至 0.2 mL, 加入内标物进行分析。

1.4 色谱条件和质量保证

采用 Agilent6890N 气相色谱仪, ECD 检测器, HP-5 型毛细管色谱柱($30 \text{ m} \times 0.32 \text{ mm}$, $0.25 \mu\text{m}$)。载气为高纯氮气。进样口温度为 260°C , 检测器温度为 310°C 。程序升温为: 初始温度 100°C , 保持 1 min, 之后以 $3^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 升温到 290°C 并保持 5 min。无分流进样 $1 \mu\text{L}$, 柱流量 $2.5 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

为确保整个实验操作过程中的准确性, 在每个样品中都加入回收率指示物, 并且每 11 个样品同时做一个空白、加标空白、基质加标。本次研究中, 方法的回收率为 85.89%~105.69%, 相对标准偏差为 3%~11%, 检出限为 $0.007 \sim 0.066 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

2 结果与分析

2.1 土壤中 OCPs 的残留状况

通过对海南省的 33 个样地 18 种 OCPs 的分析发现, OCPs 的总检出率为 90.9%, 质量分数在 $\text{ND} \sim 17.37 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 之间, 平均值为 $2.30 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 。其中 57.6% 的土壤 OCPs 小于 $1 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 39.4% 的土壤 OCPs 处于 $1 \sim 10 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 之间, 只有 3.0% 的土壤大于 $10 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 总体上土壤中 OCPs 残留水平较低。在 18 种 OCPs 中, HCHs 的检出率最高, 为 63.6%, 质量分数在 $\text{ND} \sim 2.23 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 之间, 平均值 $0.16 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 。DDTs 检出率为 54.6%, 质量分数在 $\text{ND} \sim 3.94 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 平均值为 $1.25 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ (占

OCPs 总质量分数的 54.6%)。DDTs 的残留水平远高于 HCHs, 这与其他地区的研究一致, 可能原因是: (1)历史上海南 DDTs 使用量大于 HCHs; (2)DDTs 的分子量、*K_{ow}* 较大, 溶解度低, 易被土壤胶体或有机质吸附, 妨碍它在土壤中的迁移。而 HCHs 蒸汽压较高, 易挥发到大气中^[23-24]。总体上, 各有机氯农药的变异系数较大(133~574), 呈现出较大的离散性, 反映了该地区在农业生产中管理的零散性和农药使用的无序性。这种现象通常出现在农业欠发达的地区, 而集约化管理的农业发达地区出现这种情况的可能性较小^[5]。

2.2 土壤中各类 OCPs 残留特征

2.2.1 DDTs

DDTs 的 4 种异构体(表 1):p,p'-DDE、p,p'-DDT、o,p'-DDT、p,p'-DDD 的检出率分别是 51.5%、42.4%、33.3%、30.3%。残留量为 p,p'-DDE(0.52 ng·g⁻¹)>p,p'-DDT(0.32 ng·g⁻¹)>p,p'-DDD(0.30 ng·g⁻¹)>o,p'-DDT(0.11 ng·g⁻¹)。p,p'-DDE 的检出率和残留量均是最高, 这与 p,p'-DDE 的理化性质和所处的降解环境有关。研究表明:DDT 在厌氧条件下可被微生物转化为 DDD, 在有氧条件下降解为 DDE, 且自然环境中 DDE 较 DDT、DDD 难以降解^[10]。本研究中, 已检出 DDTs 土壤中有 65% 的土壤中 DDE/DDD 值大于 1, 说明 DDT 在土壤中主要以好氧降解为主, 这与海南的自然条件和翻耕的耕作方式吻合。

表 1 土壤中 DDTs 各异构体的含量及组成

Table 1 Concentrations of DDTs and its metabolites in soil samples

农药代称	含量范围/ ng·g ⁻¹	平均值/ ng·g ⁻¹	残留量占总 OCPs 的比例/%	变异系 数/%	检出率/ %
p,p'-DDE	ND~4.47	0.52	22.6	210	51.5
p,p'-DDD	ND~5.30	0.30	13.0	335	30.3
o,p'-DDT	ND~1.41	0.11	4.8	253	33.3
p,p'-DDT	ND~3.94	0.32	14.1	255	42.4
DDTs	ND~12.38	1.25	54.6	211	57.6

注:ND 表示未检出。下同。

环境中残留的 DDTs 主要来源于历史上曾使用的 DDTs 和近期施用的三氯杀螨醇农药。传统的 DDTs 类农药以 o,p'-DDT 为主, o,p'-DDT/p,p'-DDT 比值为 0.2~0.3。三氯杀螨醇以 o,p'-DDT 为主, o,p'-DDT/p,p'-DDT 比值在 1.3~9.3 之间或更高^[7,16]。研究中通常以 DDT/(DDE+DDD)比值判断是否有新 DDTs 污染源, 以 o,p'-DDT/p,p'-DDT 比值判断土壤中 DDTs 来源^[8,17]。本研究土壤中 DDT/(DDE+DDD)值在 0.14~6.40 之间, 其中 51.5% 土壤的 DDT/(DDE+DDD)

值缺失(说明输入土壤的 DDTs 已基本完全降解), 30.3% 土壤的 DDT/(DDE+DDD)值<1, 以上表明 81.8% 土壤中的 DDTs 是历史上输入环境的残留。18.2% 土壤 DDT/(DDE+DDD)值大于 1, 说明近期仍有新 DDTs 污染源输入。在仍有新 DDTs 污染源输入的土壤中, 12.1% 的土壤 o,p'-DDT/p,p'-DDT 值在 0.87~7.51 之间, 说明这些土壤可能存在三氯杀螨醇的使用。6.1% 的土壤 o,p'-DDT/p,p'-DDT 值在 0.01~0.31 之间, 这说明污染可能来自传统 DDTs 类农药的违规使用。

2.2.2 HCHs

由表 2 可知, 土样中 HCHs 的 4 种异构体 γ-HCH、α-HCH、β-HCH、δ-HCH 的检出率分别为 42.4%、33.3%、24.2%、18.2%, 残留量:γ-HCH>β-HCH>δ-HCH=α-HCH。γ-HCH 是主要的残留物质, 占 HCHs 残留量的 56.3%, 文献报道一些地区土壤中 HCH 残留形态以 β-HCH 为主^[6,9,11-12,17]。这可能与当地使用的 HCHs 农药种类有关, 也可能是环境中的物理、化学、生物因素对 HCH 同系物之间的转化产生了较大的影响。环境中的 HCHs 主要来自工业 HCHs 和林丹(γ-HCH>99%)等杀虫剂的使用。工业 HCHs 的组分大约为 α-HCH: 60%~70%; β-HCH: 5%~12%; γ-HCH: 10%~12%; δ-HCH: 6%~10%^[9]。通常 α-HCH/γ-HCH 的比值(*n*)可判断土壤中 HCHs 的来源。*n*<1, HCHs 可能来源于林丹的使用; 4<*n*<7, HCHs 可能源于工业 HCH 的使用; *n*>7, HCHs 可能源自周围地区的大气长距离输送^[24]。本次研究中, 采样点 13、18、31 的 *n* 值缺失(γ-HCH 未检出); 琼中新伟农场 28 号样点 *n*=1.63; 其余的采样点的 *n* 值均小于 1, 占 HCHs 污染土壤的 76.5%, 说明被测土壤中残留 HCHs 主要来自林丹的使用。

表 2 土壤中 HCHs 各异构体的含量及组成

Table 2 Concentrations of HCHs and its isomers in soil samples

农药代称	含量范围/ ng·g ⁻¹	平均值/ ng·g ⁻¹	残留量占总 OCPs 的比例/%	变异系 数/%	检出率/ %
α-HCH	ND~0.18	0.02	0.9	180	33.3
β-HCH	ND~0.26	0.04	1.6	195	24.2
γ-HCH	ND~1.88	0.09	3.7	374	42.4
δ-HCH	ND~0.12	0.02	0.7	230	18.2
HCHs	ND~2.23	0.16	7.1	243	63.6

2.2.3 硫丹类农药

本研究中硫丹(包括硫丹 I、硫丹 II)和硫丹硫酸盐的检出率均较高, 见表 3。土壤中硫丹的残留量在

表 3 土壤中硫丹类农药含量、组成及总 OCPs 残留量

Table 3 Concentrations of endosulfan and endosulfan sulfate in soil samples

农药代称	含量范围/ ng·g ⁻¹	平均值/ ng·g ⁻¹	残留量占总 OCPs 的比例/%	变异系 数/%	检出率/ %
硫丹 I	ND~0.15	0.03	1.4	133	36.4
硫丹 II	ND~0.78	0.10	4.3	192	36.4
硫丹硫酸盐	ND~2.92	0.38	16.5	186	54.5
OCPs	ND~17.37	2.30	1	157	90.9

ND~0.93 ng·g⁻¹ 之间,平均值为 0.13 ng·g⁻¹。硫丹硫酸盐的残留水平在 ND~2.92 ng·g⁻¹ 之间,平均值为 0.38 ng·g⁻¹。这表明环境中的硫丹已大量转化为硫丹硫酸盐。在已检出硫丹的土样中大约有 31.5% 的硫丹 I/硫丹 II 的比值大于 2.33,其余 67% 均在 0~1.75 之间,小于 2.33,说明该区域个别地区近期内仍可能存在硫丹污染物质的输入。本研究土样中的硫丹、硫丹硫酸盐残留浓度均比广东^[10](硫丹:8.60 ng·g⁻¹;硫丹硫酸盐:6.49 ng·g⁻¹)、新疆^[11](硫丹:1.18 ng·g⁻¹;硫丹硫酸盐:4.55 ng·g⁻¹)、雷州半岛^[12](硫丹:1.61 ng·g⁻¹;硫丹硫酸盐:1.48 ng·g⁻¹)小,残留水平较低。

2.2.4 其他有机氯农药

除 DDTs、HCHs 和硫丹类农药外,其余 7 种有机氯农药在本研究中均有不同程度检出,占 OCPs 总残留量的 16.1%(表 4)。其中甲氧滴滴涕的检出率最高为 36.4%,残留量为 0.18 ng·g⁻¹;其余 6 种有机氯农药(七氯、环氧七氯、艾氏剂、狄氏剂、异狄氏剂、异狄氏剂醛)只有个别采样点检出,检出率在 3%~18.2%之间,残留量平均值为 ND~0.08 ng·g⁻¹。据报道,我国虽然曾大量使用 DDTs、HCHs,但未曾生产过艾氏剂、狄

表 4 土壤中其他有机氯农药的含量

Table 4 Concentrations of other organochlorinated pesticides in soil samples

农药代称	含量范围/ ng·g ⁻¹	平均值/ ng·g ⁻¹	残留量占总 OCPs 的比例/%	变异系 数/%	检出率/ %
甲氧滴滴涕	ND~1.43	0.18	8.0	199	36.4
七氯	ND~0.83	0.03	1.3	490	15.2
环氧七氯	ND~0.11	0.01	0.4	289	12.1
艾氏剂	ND~0.06	ND	0.1	574	6.1
狄氏剂	ND~0.94	0.06	2.7	290	18.2
异狄氏剂	ND~1.70	0.08	3.5	405	9.1
异狄氏剂醛	ND~0.08	ND	0.1	570	3.0

氏剂、异狄氏剂等有机氯农药^[1~3]。因此可推断,区域内的这些有机氯农药污染可能主要来源于大气输送和干湿沉降,或是流落民间的违禁农药的违规使用。

2.3 OCPs 污染评价与生态风险分析

与国内其他地区土壤中的 DDTs 和 HCHs 残留量比较(表 5),虽海南瓜菜田土壤的 DDTs 和 HCHs 的历史施用量与国内平均水平相当甚至更高,但残留量处于较低水平。与我国国家土壤质量标准(GB 15618—1995)一级标准相比,所有的土壤样品的 DDTs 和 HCHs 残留量均小于 50 ng·g⁻¹,污染水平低,符合无公害农产品基地土壤环境质量标准,这可能与海南的地理位置和自然条件有关。海南处于热带地区,温度高、雨水多、干湿交替频繁,有利于各类微生物对有机氯农药的降解,并且蒸发量大、径流量大有利于土壤中 OCPs 淋溶进入水体^[1]。有研究发现,海南水体的 OCPs 与国内其他地区相比也处于较低水平^[20~22],如刘华峰等^[20]对海南岛东寨港区域水体的

表 5 不同地区土壤中 DDTs、HCHs 的残留量(ng·g⁻¹)Table 5 Comparison of HCHs and DDTs contents in soils from some areas in China(ng·g⁻¹)

土壤来源	采样时间	DDTs	HCHs
海南瓜菜土壤(本研究)	2013 年	ND~12.38(1.25)	ND~2.23(0.16)
雷州半岛农业土壤 ^[12]	2005 年	0.04~52.00(3.83)	ND~65.93(3.43)
广东典型农业土壤 ^[10]	2007 年	ND~157.75(10.18)	ND~104.38(5.90)
天津农业土壤 ^[25]	2006 年	0.07~972.24(56.01)	1.3~1 094.6(45.8)
浙北农业土壤 ^[13]	2005 年	1.50~362.84(44.68)	0.20~20.1(1.73)
吉林中部农业土壤 ^[14]	2007 年	ND~69.35(3.01)	0.47~13.47(2.00)
新疆典型农业土壤 ^[11]	2010 年	0.91~858.47(95.11)	0.37~22.82(5.94)
贵州遵义农业土壤 ^[15]	2008 年	ND~239.7(2.8)	ND~12.7(12.7)
GB 15618—1995 一级标准		≤50	≤50
荷兰标准 DutchList A 值 ^[26]		<10	<2.5

注:(1)表中括号内为平均值;(2)以上采样地区的土壤类型均为含多种作物的农业土壤。

OCPs 研究发现,该区域地表水的 OCPs 残留量为 $2.53\sim 241.97\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$,处于国内中低水平。

对于土壤中 OCPs 的生态风险研究,目前尚未统一标准。对比基于人体健康风险和生态风险评价基础上得到的荷兰标准^[26](即 DutchList A 值:HCHs $<10\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$,DDTs $<2.5\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$),本研究中所有土样的 HCHs 残留量均满足 DutchList A 值。有 15%的土壤 DDTs 残留量在 $3.21\sim 12.38\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 之间,大于 DutchList A 值。

对比 Urzelai 等^[27]以污染物对土壤无脊椎动物的毒性影响为基准,在标准土壤条件下(4%有机质,28%粘土)计算出引起土壤中 50%物种的风险浓度(α -HCH $100\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 、 β -HCH $40\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 、 γ -HCH $10\,000\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$)和 Jongbloed 等^[28]计算出的土壤 DDTs 最大允许浓度(鸟类 $11\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 、哺乳动物 $190\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 、土壤生物 $10\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$,所有样品的 HCHs 均小于 Urzelai 浓度。除 33 号采样点外,其他土壤 DDTs 均小于 $10\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 。

综上,海南省瓜菜田土壤中的 DDTs、HCHs 生态风险水平总体上较低,可能有个别地区存在一定的生态风险。

3 结论

(1)被调查土样中,有机氯农药检出率为 90.9%,OCPs 残留总量在 $\text{ND}\sim 17.37\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 之间,平均值为 $2.30\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 。18 种有机氯农药均有不同检出。其中 HCHs、DDTs、硫丹类农药的检出率最高,分别为 63.6%、57.6%、54.5%。DDTs 残留量最高,占总 OCPs 残留量的 54.6%。

(2)通过对 DDTs 和 HCHs 各异构体的成分分析发现,DDTs 残留以 p,p'-DDE 为主,且仍有 18.2%的土壤可能存在三氯杀螨醇或 DDTs 禁用药等新 DDTs 污染源的输入;土壤中的 HCHs 以 γ -HCH 为主,占 HCHs 残留量的 56.3%,通过土壤中的 α -HCH/ γ -HCH 比值分析发现,海南瓜菜田土壤中 HCHs 残留主要来自林丹的使用。

(3)OCPs 污染评价和生态风险分析发现,海南省瓜菜田土壤 DDTs 和 HCHs 残留量在全国处于较低水平,并且远低于我国国家土壤质量标准(GB 15618—1995)一级标准,也符合无公害农产品基地土壤环境质量标准,初步表明海南瓜菜田土壤中的 DDTs 和 HCHs 生态风险较低。

参考文献:

[1] 林建新. 我国土壤中残留有机氯农药的研究[J]. 价值工程, 2010, 27:

225.

LIN Jian-xin. Research on China organochlorine pesticide residues in soil[J]. *Value Engineering*, 2010, 27: 225. (in Chinese)

[2] 余刚, 黄俊, 张彭义. 持久性有机污染物: 倍受关注的全球性环境问题[J]. 环境保护, 2001, 19(4): 37-40.

YU Gang, HUANG Jun, ZHANG Peng-yi. Persistent organic pollutants: one of the important global environmental problems[J]. *Environmental Protection*, 2001, 19(4): 37-40. (in Chinese)

[3] 王佩华, 赵大伟, 聂春红, 等. 持久性有机污染物的污染现状与控制对策[J]. 应用化工, 2010, 39(11): 1761-1765.

WANG Pei-hua, ZHAO Da-wei, NIE Chun-hong, et al. Current state of pollutions and control countermeasure about persistent organic pollutants[J]. *Applied Chemical Industry*, 2010, 39(11): 1761-1765. (in Chinese)

[4] 李国学, 孙英. 高温堆肥对六六六(HCH)和滴滴涕(DDT)的降解作用研究[J]. 农业环境保护, 2000, 19(3): 141-144.

LI Guo-xue, SUN Ying. Degradation of organochlorine insecticides HCH and DDT during thermophilic composting process[J]. *Agro-environmental Protection*, 2000, 19(3): 141-144. (in Chinese)

[5] 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.

AN Qiong, DONG Yuan-hua, WANG Hui, et al. Residues and distribution character of organochlorine pesticides in soils in Nanjing area[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, 25(4): 470-474. (in Chinese)

[6] 张天彬, 饶勇, 万洪富, 等. 东莞市土壤中有机氯农药的含量及其组成[J]. 中国环境科学, 2005, 25(增刊): 89-93.

ZHANG Tian-bin, RAO Yong, WAN Hong-fu, et al. Content and compositions of organochlorinated pesticides in soil of Dongguan City[J]. *China Environmental Science*, 2005, 25(Suppl): 89-93. (in Chinese)

[7] 赵龙, 侯红, 郭平毅, 等. 海河干流及河口地区土壤中有机氯农药的分布特征[J]. 环境科学, 2009, 30(2): 543-550.

ZHAO Long, HOU Hong, GUO Ping-yi, et al. Distribution of organochlorine pesticides in soils in Haihe river and Haihe estuary area[J]. *China Environmental Science*, 2009, 30(2): 543-550. (in Chinese)

[8] Qiu X H, Zhu T, Yao B, et al. Contribution of dicofol to the current DDT pollution in China[J]. *Environ Sci Technol*, 2005, 39(12): 4385-4390.

[9] 岳强, 管玉峰, 涂秀云, 等. 广东北江上游流域农田土壤有机氯农药残留及其分布特征[J]. 生态环境学报, 2012, 21(12): 321-326.

YUE Qiang, GUAN Yu-feng, TU Xiu-yun, et al. Residual and distribution of organochlorine pesticides in agricultural soils from the upper watershed of Beijiang river in Guangdong province, China[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, 21(12): 321-326. (in Chinese)

[10] 杨国义, 万开, 张天彬, 等. 广东省典型区域农业土壤中有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.

YANG Guo-yi, WAN Kai, ZHANG Tian-bin, et al. Residues and distribution characteristics of organochlorine pesticides in agricultural soils from typical areas of Guangdong province[J]. *Journal of Agro-environment Science*, 2007, 26(5): 1619-1623. (in Chinese)

[11] 冉聃, 鲁建江, 姚晓瑞, 等. 新疆典型农业地区土壤中有机氯农药(OCPs)分布特征及风险评价[J]. 农业工程学报, 2012, 28(3): 225-

229.
RAN Dan, LU Jian-jiang, YAO Xiao-rui, et al. Distribution and risk assessment of organochlorine pesticides (OCPs) in soils of typical agricultural regions in Xinjiang[J]. *Transactions of The CSAE*, 2012, 28(3): 225–229.(in Chinese)
- [12] 关 卉, 杨国义, 李丕学, 等. 雷州半岛典型区域土壤有机氯农药污染探查研究[J]. 生态环境, 2006, 15(2): 323–326.
GUAN Hui, YANG Guo-yi, LI Pi-xue, et al. Investigation on organochlorine pesticides pollution in soil of typical area in Leizhou peninsula[J]. *Ecology and Environment*, 2006, 15(2): 323–326.(in Chinese)
- [13] 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.
QIU Li-min, ZHANG Jian-ying, LUO Yong-ming. Residues of HCH and DDT in agricultural soils of north Zhejiang and its risk evaluation [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(6): 1161–1165.(in Chinese)
- [14] 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.
YU Xin-min, LU Ji-long, HAO Li-bo, et al. Content and composition of organochlorinated pesticides in soils of central Jilin, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 2007, 26(11): 1476–1479.(in Chinese)
- [15] 刘汉林, 张明时, 叶 锋, 等. 贵州遵义地区土壤中有机氯农药残留调查[J]. 环境监测管理与技术, 2009, 21(3): 28–32.
LIU Han-lin, ZHANG Ming-shi, YE Feng, et al. Investigation on organochloride pesticides residues in soils in Zunyi area of Guizhou[J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2009, 21(3): 28–32.(in Chinese)
- [16] 安太成, 陈嘉鑫, 傅家漠, 等. 珠三角地区 POPs 农药的污染现状及控制对策[J]. 生态环境, 2005, 14(6): 981–986.
AN Tai-cheng, CHEN Jia-xin, FU Jia-mo, et al. The pollution situation and control strategy of persistent organic pollutants in the Pearl River delta[J]. *China Ecology and Environment*, 2005, 14(6): 981–986.(in Chinese)
- [17] 毛潇萱, 丁中原, 马子龙, 等. 兰州周边地区土壤典型有机氯农药残留及生态风险[J]. 环境化学, 2013, 32(3): 466–474.
MAO Xiao-xuan, DING Zhong-yuan, MA Zi-long, et al. Typical organochlorine pesticides residues in topsoil and ecological risk of Lanzhou surrounding areas, China[J]. *Environmental Chemistry*, 2013, 32(3): 466–474.(in Chinese)
- [18] 夏运生, 何江华, 万洪富. 广东省农产品污染状况分析[J]. 生态环境, 2004, 13(1): 109–111.
XIA Yun-sheng, HE Jiang-hua, WAN Hong-fu. Analysis of the status of farm produce pollution in Guangdong province[J]. *Ecology and Environment*, 2004, 13(1): 109–111.(in Chinese)
- [19] 肖日新, 陈贻诵, 周 曼, 等. 海南安全蔬菜生产现状及发展对策[J]. 长江蔬菜, 2009, 23: 1–3.
XIAO Ri-xin, CHEN Yi-song, ZHOU Man, et al. Production status and development countermeasure of safe vegetable in Hainan[J]. *Journal of Changjiang Vegetables*, 2009, 23: 1–3.(in Chinese)
- [20] 刘华峰, 祁士华, 李 敏, 等. 海南岛东寨港区域水体中有机氯农药组成与时空分布[J]. 环境科学研究, 2007, 20(4): 70–74.
LIU Hua-feng, QI Shi-hua, LI Min, et al. Composition and distribution of organochlorine pesticides in water from Dongzhai Harbor, Hainan Island[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2007, 20(4): 70–74.(in Chinese)
- [21] 王 珺, 祁士华, 穆 倩, 等. 小海湾水体有机氯农药的浓度水平和特征[J]. 环境科学与技术, 2007, 30(8): 33–46.
WANG Jun, QI Shi-hua, MU Qian, et al. Concentration and distribution of organochlorine pesticides residues in a bay of Hainan Province [J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, 30(8): 33–46.(in Chinese)
- [22] 任 磊, 毕宇强, 苏 燕, 等. 五指山地区水和沉积物中 HCHs、DDTs 和 PCBs 分布特征及生态风险[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(5): 1707–1713.
REN Lei, BI Yu-qiang, SU Yan, et al. Distribution and risk assessment of DDTs, HCHs and PCBs in waters and surface sediments of Wuzhishan[J]. *Area Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(5): 1707–1713.(in Chinese)
- [23] Meijer S N, Halsall C J, Harner T, et al. Organochlorine pesticide residues in archived UK soil[J]. *Environmental Science & Technology*, 2001, 35(10): 1989–1995.
- [24] Walker K, Vallero D A, Lewis R G, et al. Factors influencing the distribution of lindane and other hexachloro- cyclohexanes in the environment[J]. *Environmental Science & Technology*, 1999, 33(24): 4373–4378.
- [25] Wang X J, Piao X Y, Chen J, et al. Organochlorine pesticides in soil profiles from Tianjin, China[J]. *Chemosphere*, 2006, 60(9): 1514–1520.
- [26] Netherlands Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment. Intervention values and target values: soil quality standards[S]. Netherlands, 2001.
- [27] Urzelai A, Vega M, Angulo E. Deriving ecological risk-based soil quality values in the Basque country[J]. *The Science of Total Environment*, 2000, 247: 279–284.
- [28] Jongbloed R H, Traas T P, Luttik R. A probabilistic model for deriving soil quality criteria based on secondary poisoning of top predators II. Calculations for dichlorodiphenyltrichloroethane (DDT) and cadmium [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 1996, 34: 279–306.