

岷江下游(五通桥段)土壤污染特征及生态风险评价

简毅, 杨万勤, 张健, 杜波, 林静, 王奥, 周利强

(四川农业大学林业生态工程重点实验室, 四川雅安 625014)

摘要: 为了解岷江下游(五通桥段)土壤污染特征及其生态风险, 采用野外采样及室内测试方法分析了岷江下游(五通桥段)103个土壤样品中的农药残留量和重金属含量。结果表明, 全部样品中六六六(HCHs)含量符合国家二级标准($500 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), 大部分样品中滴滴涕(DDTs)含量符合国家二级标准, 有机磷农药(OPPs)杀螟硫磷(60.40%)和溴硫磷(55.45%)超标率较高, 重金属Cd的地积累指数高达2.79。有机氯农药(OCPs)禁用20年后在区内的降解程度较高, OPPs在土壤中的大量残留是由于农药的无序使用, 外源输入是导致重金属污染的主要原因。区内农药残留和重金属污染范围广, 复合污染较严重, 存在较大的生态风险。

关键词: 岷江下游; 土壤; 农药残留; 重金属; 复合污染; 生态风险评价

中图分类号: X825 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2009)02-0256-07

Characteristics and Ecological Risk of Soil Pollution in the Lower Reaches (Wutongqiao Section) of Minjiang River

JIAN Yi, YANG Wan-qin, ZHANG Jian, DU Bo, LIN Jing, WANG Ao, ZHOU Li-qiang

(Key Lab of Forestry Ecological Engineering, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, China)

Abstract: Soil pollution characterized by residual pesticides and heavy metal contamination is limiting the agricultural clean production and still threatening the health and survival of human beings, as a consequence of which much attentions have been given to the pollution characteristics and the ecological risks of residual pesticides and heavy metal in soils of different regions worldwide. As yet, little is known about the characteristics of soil pollution and its ecological risk in the lower reaches of Minjiang River which plays an important and irreplaceable role in agricultural production and aquatic environment safety since there is lack of the simultaneous study of soil residual pesticides and heavy metals, which is difficult to make needs of agricultural clean production and environmental protection. The concentrations of residual pesticides and heavy metals in 103 soil samples were therefore analyzed in order to obtain an understanding of the characteristics of soil pollution and ecological risk in the lower reaches (Wutongqiao section) of Minjiang River. Benzene hexachloride (HCHs) concentration in all soil samples was in the range of the 2nd level of National Soil Environment Quality Standard (GB 15618—1995) ($500 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$). Similarly, dichlorodiphenyltrichloroethane (DDTs) concentration in 96% soil samples accorded with the 2nd level of National Soil Environment Quality Standard. Fenitrothion and bromohos were detected in 60.4% and 55.5% of all samples, which were both higher than those of the rest of organophosphorus pesticides (OPPs). The geoaccumulation index of Cd reached 2.79. After OCPs had been forbidden for twenty years, its degradation was still salient in the region. A great deal of OPPs residuals were found in the soil, because of the abuse of OPPs. The sources of heavy metals were still also distinct. The potential ecological risk of pesticide residuals and heavy metals in soil was found in study area.

Keywords: the lower reaches of Minjiang River; soil; residual pesticides; heavy metals; complex pollution; ecological risk assessment

以农药残留和重金属为主要特征的土壤污染正

在制约着农产品的清洁生产^[1-2], 威胁人类身体健康, 因而受到世界各国的广泛关注^[3-4]。国内外已有大量关于农药残留和重金属污染特征及评价的报道^[5-8], 但将土壤中农药残留和重金属同时作为研究对象, 并对它们进行复合污染特征评价的报道相对较少^[9-10]。已有的研究主要针对典型农业土壤或湖泊沉积物中的农药残留和重金属^[11-13], 但关于流域内土壤污染的研究报道较少, 这很难满足我国农产品清洁生产的需要。

收稿日期: 2008-03-05

基金项目: 国家“十一五”重大科技支撑计划课题(2006BAC01A11); 国家自然科学基金(30471378, 30771702); 四川省青年科技基金项目(07JQ0081); 四川省重点科技攻关项目(2007NGY006); 四川农业大学“人才引进”项目

作者简介: 简毅(1982—), 男, 硕士, 主要研究方向为农业面源污染和污染土壤生态。E-mail: jianyinet@yahoo.com.cn

通讯作者: 杨万勤 E-mail: scyangwq@163.com; ywq918@yahoo.com

岷江下游(五通桥段)是我国主要的农产品生产区,地处岷江、青衣江和大渡河三江汇合处,是岷江流域典型的人口稠密区。外源污染物和长期的工农业生产可能对研究区土壤环境造成了巨大的压力。为保证主要农产品清洁生产和社会的可持续发展,急需对研究区土壤生态环境进行全面调查和评估。因此,研究土壤农药残留和重金属污染特征将为岷江下游工农业生产布局及土壤污染防治提供科学依据。

1 研究区域与研究方法

1.1 自然概况

岷江下游(五通桥段)($103^{\circ}39' \sim 103^{\circ}56' \text{E}$, $29^{\circ}17' \sim 29^{\circ}31' \text{N}$, a.s.l. 331~735 m) 位于四川盆地西部和长江上游,地处川西南平原丘陵结合部,幅员面积 465 km^2 。地势南高北低,岷江由北向南纵贯全境,东西两侧为丘陵、低山区,以台状丘陵为主,少部分低山,中部沿岷江两岸为河流冲积平原。该区属中亚热带湿润气候,气候温和,雨量充沛,四季分明,年平均气温 17.4°C ,最低温度 -2.2°C ,最高温度 37.6°C ;年降水量 1 404.7 mm,相对湿度 80%;无霜期 334.5 d,年日照时数 1 119.7 h。土壤以冲积土、酸性紫色土、钙质紫色土、黄壤和少量的山地黄壤为主^[14]。

1.2 研究方法

1.2.1 样品的采集与贮存

综合考虑地形地貌、土地利用类型、乡镇分布、道路分布等因素,于 2006 年 9 月在研究区选取 103 个样点(图 1)。每个样点在 1 hm^2 范围内随机采集 5~10

个土壤样品(0~20 cm),四分法保留混合样 1 kg。样品风干后,去掉石块和动植物残体,研磨全土,过 100 目筛,于 -18°C 下冷冻保存备用。

1.2.2 样品前处理及分析

本研究检测的主要指标有:已禁用的有机氯类农药(OCPs)六六六(HCHs)、滴滴涕(DDTs),8 种仍在广泛使用的有机磷农药(OPPs)和 7 种常见重金属在土壤中的含量。农药残留检测的前处理及测定方法参照 GB/T 14550—2003 和 GB/T 14552—2003,所用仪器为 Shimadzu GC- ^{14}C 气相色谱仪,农药标准品购自农业部环境保护科研监测所。回收率控制范围为:90%~120%。OCPs 方法检出限为 $0.09 \sim 0.21 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, OPPs 方法检出限为 $0.54 \sim 3.66 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。重金属的前处理及测定参照 GB 15618—1995,火焰原子吸收法测定 Cd、Cu、Zn、Ni、Cr (仪器:TAS-986 型原子吸收分光光度计),氢化物原子吸收法测定 Pb 和 As(仪器:WHG-102A2 型流动注射氢化物发生器),加标回收率 $100\% \pm 10\%$,平行样最大相对偏差 $< 15\%$ 。

2 结果与讨论

2.1 土壤中农药残留和重金属含量

研究表明(表 1),检测的 103 个表层土壤(0~20 cm)样品 ΣHCH 含量都低于国家《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)二级标准($500 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[15];96%的样品 ΣDDT 含量低于国家二级标准。区内土壤 ΣHCH 的平均含量大于 ΣDDT ,但变异系数明显小于 ΣDDT ,说明区内 DDTs 受非自然因素的干扰较 HCHs 强。速灭磷、二嗪农和异稻瘟净均未检出,杀螟硫磷和溴硫磷的检出率高达 50%以上,溴硫磷残留量高达 $1 990.6 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。甲拌磷、水胺硫磷、稻丰散和杀扑磷的检出率分别为 33.7%、9.9%、14.9%、5.0%,有 4.95%的样品中检出了甲基对硫磷,且检出量均小于 $12 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。区内 OPPs 残留量高,且差异较大,这可能与 OPPs 的无序使用和自身的降解特性有关。结合表 2 可见,所有样本中 As、Pb 和 Zn 平均含量略高于四川和全国背景值(表 2)^[16]。Cu、Ni 和 Cr 平均含量低于四川背景值,但高于全国背景值。Cd 平均含量为四川背景值的 10.4 倍,全国背景值的 8.0 倍。

从超标样品的组成来看(图 2),研究区有超过 4/5 的土壤存在不同程度的污染,约 1/3 的土壤同时受到农药残留和重金属的污染。

2.2 农药残留、重金属来源分析

本研究表明(表 2), p,p' -DDD 平均检出量(8.0



图 1 岷江下游采样点分布

Figure 1 The sampling plots in the lower reaches of Minjing River

$\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)和检出率(55.4%)都较低。由于 DDT 在好氧条件下降解成 DDE,厌氧条件下降解成 DDD,说明区内 DDTs 的降解主要是好氧降解^[17-18]。 α -HCH 和 β -HCH 平均含量分别为 $6.7\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $102.4\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。 α -HCH 与 γ -HCH 的比值能反映 HCHs 的降解程度。本研究所有样本中 α -HCH/ γ -HCH 的平均值为 4.5,表明 HCHs 被禁用 20 多年来,在研究区内降解程度较高^[19]。OPP 在环境中较容易降解^[20],但本研究中 OPP 的检出率和检出量较大,说明区内 OPP 残留主要来源于农药的过量、无序和不规范使用。

自然条件下,土壤重金属主要来源于母岩和残落的生物物质,因此元素分布规律较为稳定,但由于强烈的人为干扰,土壤中重金属含量会有所改变^[21]。研究区土壤中 Cu、Ni 和 Cr 的平均含量与四川土壤重金属含量背景值基本持平,说明区内这几种重金属主要来源于成土母质。Pb 含量较高的样点主要分布在交通繁忙地段,说明土壤中 Pb 的积累可能来源于汽车尾气^[22]。Cd 的平均含量超出四川背景值 10.4 倍,Cd 和 Zn 检出量较大的样点主要分布在岷江两岸,说明该区土壤中积累的 Cd 和 Zn 可能来自岷江。As 检出

表 1 土壤农药、重金属残留量统计特征值
Table 1 The statistical feature of residual pesticides and heavy metals in soils

种类 Pesticides and heavy metals	分布类型 Types	平均值 Mean/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	最小值 Min/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	最大值 Max/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	标准差 S.D.	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis	变异系数 C.V/%	检出率 Detection rate/%
α -HCH	lgN	6.7	n.d ²⁾	38.6	4.4	-0.2	3.0	65.6	96.4
β -HCH	lgN	102.4	n.d	268.7	25.4	-0.1	1.6	24.8	99.1
γ -HCH	正态	20.2	n.d	101.3	72.8	0.6	2.2	360.2	99.1
δ -HCH	lgN	11.3	n.d	71.5	13.1	-0.9	2.6	115.6	85.7
p,p' -DDE	lgN	32.4	n.d	461.6	73.6	-0.3	2.3	227.1	81.3
p,p' -DDD ¹⁾	lgN	8.0	n.d	86.4	14.9	0.3	1.6	186.9	55.4
p,p' -DDT	lgN	61.6	n.d	940.5	290.5	-0.4	3.3	471.6	90.2
Σ HCH	正态	132.9	4.4	394.1	91.3	0.7	2.6	69.0	100.0
Σ DDT	lgN	113.3	n.d	940.7	297.5	-0.5	3.4	262.7	97.0
甲拌磷	lgN	28.8	n.d	232.5	25.1	0.7	1.6	87.1	33.7
甲基对硫磷	偏态	0.5	n.d	11.2	0.7	4.0	17.9	141.3	4.9
杀螟硫磷	lgN	126.1	n.d	2 363.2	109.1	0.2	1.9	86.5	60.4
溴硫磷	lgN	271.1	n.d	1 990.6	114.4	0.3	1.4	42.2	55.5
水胺硫磷	偏态	4.5	n.d	256.4	6.5	9.2	88.8	144.2	9.9
稻丰散	偏态	69.6	n.d	2 577.3	135.2	7.2	59.4	194.2	14.9
杀扑磷	偏态	10.8	n.d	486.9	18.8	6.5	44.9	173.7	5.0
Pb	lgN	31 600.0	12 400.0	89 900.0	15.2	0.5	3.0	43.8	100.0
Cd	lgN	840.0	430.0	1 930.0	0.3	0.3	3.2	29.0	100.0
Cu	lgN	27 440.0	15 550.0	89 530.0	13.1	1.4	6.9	42.9	100.0
Zn	lgN	108 760.0	46 790.0	245 000.0	32.2	-0.9	5.3	28.7	100.0
Ni	正态	32 260.0	18 290.0	52 680.0	7.1	0.4	3.7	21.9	100.0
Cr	正态	71 830.0	30 250.0	115 530.0	19.0	0.4	5.1	26.3	100.0
As	lgN	11 650.0	5 040.0	25 400.0	3.9	-0.1	3.0	32.6	100.0

注:(1) p,p' -DDD 为 p,p' -DDD 和 o,p' -DDD 含量之和。
 p,p' -DDD is the sum of p,p' -DDD and o,p' -DDD.
(2)n.d.为未检出,计算统计量时未检出者取最小检出限的一半,偏度和峰度为修正后的偏度和峰度。下同。
n.d. represents not detectable, it was statistically analyzed as half of LOD (limits of detection) value, skewness and kurtosis were changed by lgN.
The same as below.

表 2 重金属背景值($\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)
Table 2 The background of heavy metals($\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)

重金属种类 Heavy metals	Cd	As	Cu	Ni	Pb	Zn	Cr
四川背景值 Background of Sichuan	75.0	9 300.0	29 700.0	32 600.0	28 900.0	82 100.0	79 000.0
全国背景值 Background of China	97.0	11 200.0	22 600.0	26 900.0	26 000.0	74 200.0	61 000.0

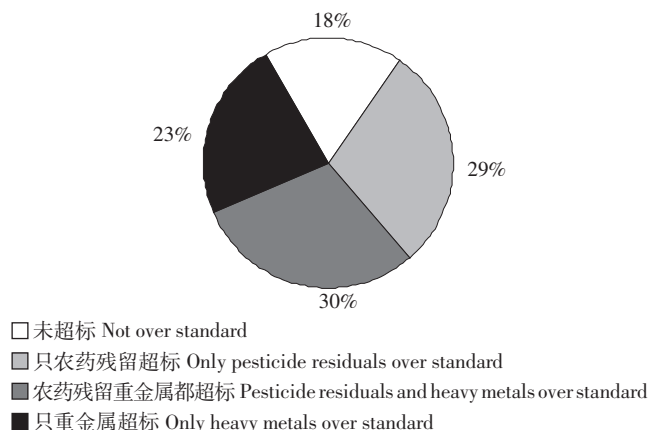


Figure 2 The structure of over standard soil samples

量较大的样点主要分布在农业区,这说明土壤中 As 的积累可能来源于农药和肥料^[23]。

本研究应用 SPSS 13.0 软件将土壤中农药残留和重金属含量进行相关性分析的结果表明,OCPs 中 α -HCH、 β -HCH 和 γ -HCH 相关极显著(表 3),这是因为三者互为异构体,并且工业级 HCHs 本身就是混合物^[24];农业生产中 OPPs 的混合使用可能是导致甲拌磷和溴硫磷(0.860**)相关极显著(表 4)的原因;区内土壤重金属主要来源于成土母质,并且污染特征和生态学过程独特^[25],因此其相互关系相关极显著(表 5)。农药和重金属在土壤中的耦合能影响其环境行为。由表 6 可见,区内个别 OCPs、OPP 和重金属三者相关显著,主要有: β -HCH-甲拌磷-Pb, β -HCH-甲拌磷-Cd 和 β -HCH-溴硫磷-Cd。由此可见, β -HCH 是区内农药和重金属复合污染的主要的耦合因子。

元素聚类树状图可以形象反映元素间的距离(相似性和亲疏关系),能有效地揭示元素间的联系^[25]。应用 SPSS 13.0 软件对土壤中重金属进行聚类分析,结

表 4 土壤 OPPs 残留相关系数矩阵

Table 4 Correlation coefficient matrix of OPPs in soils

	甲拌磷	甲基对硫磷	杀螟硫磷	溴硫磷	水胺硫磷	稻丰散	杀扑磷
甲拌磷	1						
甲基对硫磷	0.400**	1					
杀螟硫磷	-0.054	-0.026	1				
溴硫磷	0.860**	0.269*	-0.046	1			
水胺硫磷	-0.033	-0.040	0.164	-0.004	1		
稻丰散	-0.128	-0.055	0.269*	-0.117	-0.011	1	
杀扑磷	-0.114	-0.048	0.009	-0.113	-0.027	-0.038	1

表 5 土壤重金属相关系数矩阵

Table 5 Correlation coefficient matrix of heavy metals in soils

	Pb	Cd	Cu	Zn	Ni	Cr	As
Pb	1						
Cd	0.617**	1					
Cu	0.264*	0.205	1				
Zn	0.598**	0.699**	0.254*	1			
Ni	0.255*	0.361**	0.488**	0.292**	1		
Cr	0.380**	0.477**	0.389**	0.397**	0.490**	1	
As	0.045	-0.066	0.208*	0.004	0.049	0.092	1

表 6 土壤 OCPs-OPP-重金属相关系数矩阵

Table 6 Correlation coefficient matrix of OCPs-OPP-heavy metals in soils

	β -HCH	甲拌磷	溴硫磷	Pb	Cd
β -HCH	1				
甲拌磷	-0.217*	1			
溴硫磷	-0.231*	0.860**	1		
Pb	0.049	0.245*	0.152	1	
Cd	0.005	0.246*	0.227*	0.617**	1

果表明(图 3),当距离(D)小于 2 时,可将重金属分为以下 4 组: Cd、As、Cu、Ni、Pb、Zn 和 Cr。Cd 和 As 关系

表 3 土壤 OCPs 残留相关系数矩阵

Table 3 Correlation coefficient matrix of OCPs in soils

	α -HCH	β -HCH	γ -HCH	δ -HCH	p,p' -DDE	p,p' -DDD	p,p' -DDT
α -HCH	1						
β -HCH	0.173	1					
γ -HCH	0.478**	0.413**	1				
δ -HCH	0.314**	0.042	0.156	1			
p,p' -DDE	0.032	-0.189	-0.082	-0.040	1		
p,p' -DDD	-0.122	-0.161	-0.252*	0.332**	0.154	1	
p,p' -DDT	0.348**	-0.073	0.041	0.240*	-0.017	0.133	1

注:**表示相关极显著($P \leq 0.01$),*表示相关显著($P \leq 0.05$)。下同。

** Correlation is significant at the 0.01 level,* correlation is significant at the 0.05 level.The same as below.

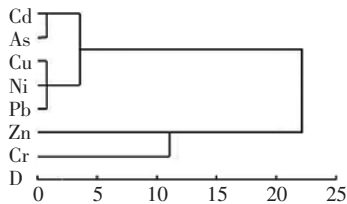


图 3 重金属聚类分析谱图

Figure 3 Cluster analysis of heavy metals

密切,说明区内存在 As–Cd 复合污染。Cu、Ni 和 Pb 的平均含量接近四川背景值,并且都为亲硫元素^[26],说明土壤中的 Cu、Ni 和 Pb 来源于成土母质。Zn 也是亲硫元素,但和 Cu、Ni、Pb 关系不密切,说明 Zn 受人为干扰强烈。当距离(D)小于 5 时,Cd、As 和 Cu、Ni、Pb 有一定关系,说明 Cd 和 As 在区内的积累还与成土母质有关。

2.3 土壤污染评价

表 7 列出了我国不同地区土壤中 HCHs 和 DDTs 的残留量,以此为基础对五通桥区土壤中农药残留污染进行了评价。研究区土壤中 HCHs 和 DDTs 残留量均高于我国其他地区,说明该区域有机氯农药残留量较大,但 HCHs 和 DDTs 的平均含量均符合国家土壤质量二级标准($500\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$),不会对农业生产和人类居住造成不良影响。

表 7 中国不同地区土壤中农药残留量比较($\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Tabl 7 Residual pesticide concentration in soils in different areas of China($\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)

研究区域 Different areas	HCHs Benzene hexachloride	DDTs Dichlorodiphenyl trichoroethane	资料来源 References
参比的标准	500(国家二级)	500(国家二级)	[15]
天津地区	45.80	56.01	[27–28]
河北省官厅水库	0.50	4.42	[5]
黄淮海地区农业土壤	4.01	11.16	[29]
南京地区农业土壤	13.60	64.10	[30]
北京市农田土壤	1.47	77.18	[31]
昆明地区土壤	1.05	20.89	[32]
四川茶园土壤	n.d~57	n.d~11	[33]
贵州水稻土	–	4.7~42.6	[34]
本研究	132.98	113.27	

刘维屏指出,OPP 在土壤中的残留量除甲基对硫磷外($\leq 12\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$),其余均不得被检出^[2]。由表 8 可见,研究区土壤中个别 OPPs 残留量超标较严重;同时因为 OPPs 在环境中容易分解,并且仍在广泛使

表 8 土壤中 OPPs 的检出量和检出率

Table 8 The mean and detection rate of OPPs in soil

农药种类 Pesticides	标准/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ standard	平均值/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ Mean	检出率/% Detection rate
甲拌磷	n.d	28.8	33.6
甲基对硫磷	≤ 12	0.5	4.9
杀螟硫磷	n.d	126.1	60.4
溴硫磷	n.d	271.1	55.4
水胺硫磷	n.d	4.5	9.9
稻丰散	n.d	69.6	14.8

用,表明区域内 OPPs 残留对农产品安全生产和人体健康存在潜在威胁。

地积累指数常用来评价沉积物中重金属污染程度,其值越大表明污染程度越高^[35–36]。由表 9 可见,7 种重金属中只有 Cd 的地积累指数大于 2,其余全小于 0。这说明区内土壤污染范围较广,复合污染问题较严重。以我国 1995 年颁布的《土壤环境质量标准》(GB 15618 —1995)二级指标作为各项污染物的评价标准值^[37],按照农业部《农田土壤环境监测技术规范》对检测结果进行评价^[38]。由表 10 可见,区内存在中等程度的重金属污染,单因素污染除 Cd 为中污染外,其余都为安全。区内 Cd 污染严重,已对人体健康构成威胁。

表 9 重金属背景值及地积累指数

Table 9 The background and index of geoaccumulation for heavy metals

重金属种类 Heavy metals	Cd	As	Cu	Ni	Pb	Zn	Cr
地积累指数(四川背景)							
Index geoaccumulation	2.79	–0.26	–0.70	–0.60	–0.50	–0.26	–0.72
(Sichuan)							
地积累指数(全国背景)							
Index geoaccumulation	2.42	–0.53	–0.30	–0.33	–0.35	–0.12	–0.35
(China)							

表 10 土壤重金属污染指数

Table 10 The soil pollution index of heavy metals in the soil

重金属 Heavy metals	Pb	Cd	Cu	Zn	Ni	Cr	综合指数 Colligation pollution index
污染指数 Pollution index	0.107	2.73	0.286	0.432	0.653	0.362	2.007
污染程度 Pollution grade	安全 Safety	中污染 Midpoint pollution	安全 Safety	安全 Safety	安全 Safety	安全 Safety	中污染 Midpoint pollution

3 结论

(1) 本研究表明, 96% 以上的土壤样品中 OCPs 含量符合国家土壤质量二级标准 ($500 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$); 有 7 种 OPPs 被检出, 其中杀螟硫磷 (60.40%) 和溴硫磷 (55.45%) 检出率较高; 土壤中 Cd 的地积累指数较高。

(2) OCPs 被禁用 20 a 以来在区内的降解程度较高, 土壤中大量残留的 OPPs 来源于农药的无序使用。农药复合污染特征与本身化学性质和使用方式有关, 重金属则主要与成土母质、外源输入等有关。

(3) 区内 OCPs 残留对农业生产影响不大, 但 p, p' -DDT、 p, p' -DDE 和 γ -HCH 环境效应较明显; 农药使用的规范化能有效控制 OPPs 污染, 重金属污染达到中等程度。区内土壤污染范围广, 存在一定程度的复合污染, 污染生态风险较大。

参考文献:

- [1] 周启星, 孔繁翔, 朱琳. 生态毒理学[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
ZHOU Qi-xing, KONG Fan-xiang, ZHU Lin. Ecotoxicology: principles and methods[M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [2] 刘维屏. 农药环境化学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
LIU Wei-ping. Pesticide environmental chemistry[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006.
- [3] Francisco S B, Sundaram B, Ivan R K. Ecological relative risk (EcoRR): another approach for risk assessment of pesticides in agriculture[J]. *Ecosystems and Environment*, 2002, 91: 37–57.
- [4] Goncalves C, Alpandurada M F. Assessment of pesticide contamination in soil samples from an intensive horticulture area, using ultrasonic extraction and gas chromatography mass spectrometry[J]. *Talanta*, 2005, 65: 1179–1189.
- [5] 张红, 王铁宇, 吕永龙, 等. 官厅水库周边土壤中有机氯农药残留的统计分布特征[J]. 环境科学学报, 2004, 24(3): 550–554.
ZHANG Hong, WANG Tie-yu, LY Yong-long, et al. Distribution of organochlorine pesticide residues in soils in Guanting Reservoir[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2004, 24(3): 550–554.
- [6] 王铁宇, 罗维, 吕永龙, 等. 官厅水库周边土壤重金属空间变异特征及风险分析[J]. 环境科学, 2007, 28(2): 225–231.
WANG Tie-yu, LUO Wei, LY Yong-long, et al. Spatial variation and eco-environmental risk of heavy metals in soil surrounding Guanting Reservoir[J]. *Environmental Science*, 2007, 28(2): 225–231.
- [7] Jong H K, Alistair S. Distribution of organochlorine pesticides in soils from South Korea[J]. *Chemosphere*, 2001(43): 137–140.
- [8] Pichtel J, Kuroiwa K, Sawyerr H T. Distribution of Pb, Cd and Ba in soils and plants of two contaminated sites[J]. *Environmental Pollution*, 2000, 110: 171–178.
- [9] Yang R, Yao T, Xu B, et al. Accumulation features of organochlorine pesticides and heavy metals in fish from high mountain lakes and Lhasa River in the Tibetan Plateau[J]. *Environment International*, 2007(33): 151–156.
- [10] Fernández M D, Cagigal E, Vega M M, et al. Ecological risk assessment of contaminated soils through direct toxicity assessment[J]. *Ecotoxicology and Environment Safety*, 2005, 62: 174–184.
- [11] Andrew C, Simon H. Pesticide persistence and bound residues in soil—regulatory significance[J]. *Environmental Pollution*, 2005, 133: 5–9.
- [12] Monday O M, Thompson M L. Plant-available zinc and lead in mine spoils and soils at the mines of Spain, Iowa[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2004, 33(2): 553–556.
- [13] Oliveira C A, Voltaire Y, Sanchez A, et al. Bioaccumulation and the effects of organochlorine pesticides, PAH and heavy metals in the Eel (*Anguilla anguilla*) at the Camargue Nature Reserve, France[J]. *Aquatic Toxicology*, 2005, 74: 53–69.
- [14] 四川省农牧厅, 四川省土壤普查办公室. 四川土壤[M]. 成都: 四川科技出版社, 1995.
Sichuan Agricultural and Animal Husbandry Department, Soil Investigation Office. Sichuan soil[M]. Chengdu: Sichuan Science & Technology Press, 1995.
- [15] 国家环保总局科技标准司. 土壤环境质量标准 (GB 15618—1995) [S]. 北京: 中国标准出版社, 1995.
Science & Technology Department of State Environmental Protection Administration. Environmental quality standard for soils (GB 15618—1995) [S]. Beijing: China Standard Press, 1995.
- [16] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
Environmental Monitoring of China. Soil element background in China [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990.
- [17] 胡雄星, 韩中豪, 周亚康, 等. 黄浦江表层沉积物中有机氯农药的分布特征及风险评价[J]. 环境科学, 2005, 26(3): 44–48.
HU Xiong-xing, HAN Zhong-hao, ZHOU Ya-kang, et al. Distribution of organochlorine pesticides in surface sediments from Huangpu River and its risk evaluation[J]. *Environmental Science*, 2005, 26(3): 44–48.
- [18] Kishimha M A, Henry L, Mwevura H, et al. The status of pesticide pollution in Tanzania[J]. *Talanta*, 2004(64): 48–53.
- [19] Wiberg K, Harner T, Wideman J L, et al. Chiral analysis of organochlorine pesticides in Alabama soils[J]. *Chemosphere*, 2001(45): 843–848.
- [20] Singh N, Megharaj M, Kookana S R, et al. Atrazine and simazine degradation in Pennisetum rhizosphere[J]. *Chemosphere*, 2004(56): 257–263.
- [21] 杨秀虹, 李适宇. 地统计学方法在环境污染研究中的应用 [J]. 中山大学学报 (自然科学版), 2005, 44(3): 97–101.
YANG Xiu-hong, LI Shi-yu. Geostatistical methods for research on environmental pollution[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2005, 44(3): 97–101.
- [22] 戴纪翠, 宋金明, 李学刚, 等. 人类活动影响下的胶州湾近百年环境演变的沉积记录[J]. 地质学报, 2006, 80(11): 1770–1778.
DAI Ji-cui, SONG Jin-ming, LI Xue-gang, et al. Human impacts on environmental changes in the last one hundred years of the Jiaozhou Bay[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80(11): 1770–1778.
- [23] Garcia M S, Jimenez G, Padro A. Arsenic speciation in contaminated

- soils[J]. *Talanta*, 2002(58):97-109.
- [24] Pereira C R, Arbertain M C, Garrido B R, et al. Behaviour of α -, β -, γ -, and δ -hexachlorocyclohexane in the soil-plant system of a contaminated site[J]. *Environmental Pollution*, 2006(144):210-217.
- [25] 陈怀满. 土壤中化学物质的行为与环境质量[M]. 北京:科学出版社, 2002.
- CHEN Huai-man. Behavior of soil chemicals and environmental quality[M]. Beijing: Science Press, 2002.
- [26] 乔胜英, 李望成, 何方, 等. 漳州市城市土壤重金属含量特征及控制因素[J]. 地球化学, 2005, 34(6):635-642.
- QIAO Sheng-ying, LI Wang-cheng, HE Fang, et al. Characteristics and controlling factors of heavy metal contents in urban soils in Zhangzhou City, Fujian Province[J]. *Geochimica*, 2005, 34(6):635-642.
- [27] 龚钟明, 曹军, 李本纲, 等. 天津地区土壤中六六六(HCH)的残留及分布特征[J]. 中国环境科学, 2003, 23(3):311-314.
- GONG Zhong-ming, CAO Jun, LI Ben-gang, et al. Residues and distribution characters of HCH in soils of Tianjin Area[J]. *China Environmental Science*, 2003, 23(3):311-314.
- [28] 龚钟明, 王学军, 李本纲, 等. 天津地区土壤中 DDT 的残留分布研究[J]. 环境科学学报, 2003, 23(4):447-451.
- GONG Zhong-ming, WANG Xue-jun, LI Ben-gang, et al. The residual distribution of DDT and its metabolites in soil from Tianjin Region, China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2003, 23(4):447-451.
- [29] 赵炳梓, 张佳宝, 朱安宁, 等. 黄淮海地区典型农业土壤中六六六(HCH)和滴滴涕(DDT)的残留量研究[J]. 土壤学报, 2005, 42(6):916-922.
- ZHAO Bing-zi, ZHANG Jia-bao, ZHU An-ning, et al. Residues of HCH and DDT in typical agricultural soils of Huang-Huai-Hai Plain, China II. Spatial variability and vertical distribution of HCH and DDT[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(6):916-922.
- [30] 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.
- [31] 张红艳, 高如泰, 江树人, 等. 北京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.
- ZHANG Hong-yan, GAO Ru-tai, JIANG Shu-ren, et al. Spatial variability of organochlorine pesticides (DDTs and HCHs) in surface soils of farmland in Beijing, China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(7):1403-1410.
- [32] 陈建军, 张乃明, 秦丽, 等. 昆明地区土壤重金属与农药残留分析[J]. 农村生态环境, 2004, 20(4):37-40.
- CHEN Jian-jun, ZHANG Nai-ming, QIN Li, et al. Heavy metal pollution and pesticide residues in soils of Kunming Area[J]. *Rural EcoEnvironment*, 2004, 20(4):37-40.
- [33] 谭和平, 陈能武, 黄苹, 等. 四川茶园土壤中农药残留现状分析[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(增刊):58-60.
- TAN He-ping, CHEN Neng-wu, HUANG Ping, et al. Study on the residues of pesticides in the soil of tea garden in Sichuan[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(supplement):58-60.
- [34] 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.
- WEI Zhong-qing, LIU Cong-qiang, LIANG Xiao-bing, et al. Residue of PCBs and OCPs in the paddy soil from Hongfeng Reservoir Area. Guizhou, China[J]. *Environmental Science*, 2007, 28(2):255-260.
- [35] 许中坚, 吴灿辉, 刘芳, 等. 典型铅锌冶炼厂周边土壤重金属复合污染特征研究[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2007, 22(1):111-114.
- XU Zhong-jian, WU Can-hui, LIU Fang, et al. Study on combined pollution character of heavy metals in soils around a typical Lead-Zinc Smeltery [J]. *Journal of Hunan University of Science & Technology (Natural Science Edition)*, 2007, 22(1):111-114.
- [36] Muller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. *Geojournal*, 1969, 2(3):108.
- [37] 李其林, 黄昀, 骆东奇. 重庆市蔬菜基地土壤中重金属含量及污染特征[J]. 土壤与环境, 2000, 9(4):270-273.
- LI Qi-lin, HUANG Jun, LUO Dong-qi. Contents of heavy metals in soils of the vegetable bases of Chongqing[J]. *Soil and Environmental Sciences*, 2000, 9(4):270-273.
- [38] 国家农业部. 农田土壤环境质量管理技术规范 (NY/T 18407. 1—2001)[S]. 北京:中国标准出版社, 2001.
- Agricultural Department of China. Procedural regulations regarding the environment quality monitoring of soil (NY/T 18407. 1—2001)[S]. Beijing: China Standard Press, 2001.