

中山市主要灌溉水源底泥重金属污染及潜在生态风险评估

余姝洁¹,李名²,张保见¹,甘慧慧^{3*} (1. 广东省中山市环境保护技术中心,广东中山 528402;2. 广西环科院环保有限公司,广西南宁 530022;3. 浙江大学宁波理工学院,浙江宁波 315100)

摘要 [目的]评估灌溉水源底泥重金属污染水平及其潜在的生态风险。[方法]在广东省中山市主要灌溉水源洪奇沥和横琴海沿线采集6个底泥样品,测定Pb、Cd、Cr、As、Hg 5种重金属的含量水平,分析其分布特征,并采用综合指数法、地累积指数法和潜在生态危害指数法对底泥中重金属污染状况和潜在生态风险进行了评价。[结果]中山市主要灌溉水源底泥存在重金属复合污染情况,样品中Pb、Cd、Cr、As、Hg含量均高于参比值,洪奇沥底泥中,5种重金属富集程度从大到小依次为Hg、Cd、Cr、Pb、As,横琴海底泥中,5种重金属富集程度从大到小依次为Cd、Cr、Hg、As、Pb,5种重金属潜在生态危害从大到小依次为Hg、Cd、Cr、As、Pb,处于轻微生态风险等级。[结论]中山市洪奇沥和横琴海2条主要灌溉水源底泥存在多种重金属复合污染,污染水平处于中度至重度污染,工业园区废水排放是重金属污染的主要原因之一。

关键词 重金属;底泥;污染特征;生态风险;灌溉水源
中图分类号 S181.3 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2016)16-061-03

Heavy Metal Pollution in Sediments of Main Irrigation Water Sources in Zhongshan City and Its Potential Ecological Risk Assessment

YU Shu-jie¹, LI Ming², ZHANG Bao-jian¹, GAN Hui-hui^{3*} (1. Zhongshan Environmental Protection Technology Center, Zhongshan, Guangdong 528402; 2. Guangxi Research Academy of Environmental Sciences Environmental Protection Co. Ltd., Nanning, Guangxi 530022; 3. Ningbo Institute of Technology, Zhejiang University, Ningbo, Zhejiang 315100)

Abstract [Objective] The aim was to discuss heavy metal pollution level in sediments of irrigation water sources and its potential ecological risk. [Method] Collecting 6 sediment samples from Hongqili and Hengqinhai in Zhongshan City in Guangdong Province, Pb, Cd, Cr, As, Hg content was determined and distribution characteristics were analyzed. By using comprehensive index method, land accumulation index method and potential ecological harm index method, the heavy metal pollution status in sediments and potential ecological risk were evaluated. [Result] There was heavy metal compound pollution situation in sediments, the content of Pb, Cd, Cr, As, Hg in the samples was higher than reference value. In sediment of Hongqili, the order of heavy metal enrichment degree was Pb, Cd, Cr, Hg, As, in sediment of Hengqinhai, the order of enrichment degree was Cd > Cr > Hg > As > Pb, the order of potential ecological harm was Hg, Cd, Cr, As, Pb, which was in light ecological risk grade. [Conclusion] There are many kinds of heavy metal pollution in the sediment of 2 main irrigation water sources (Hongqili and Hengqinhai) in Zhongshan. The pollution level is at moderate to severe pollution, wastewater discharge of industrial park is one of the main reasons for heavy metal pollution.

Key words Heavy metal; Sediment; Pollution characteristics; Ecological risk; Irrigation water source

广东省中山市是珠三角重要的工业基地之一。随着工业的迅速发展,中山市形成了一些工业园区,大量重金属工业废水进入水体,引起水体污染^[1-2]。进入水体的重金属污染物大部分由水相进入固相,最终进入水体沉积物并逐步累积。当底泥环境条件发生改变,沉积在底泥中的重金属会成为二次污染源,因此,底泥不仅是污染物,也是再污染的潜在污染源^[3-5]。底泥中重金属的分布可以反映河流的污染状况,目前,重金属污染危害多采用综合指数法(内梅罗污染指数法, P)^[6]、地累积指数法(I_{geo})^[7]、潜在生态危害指数法(RI)^[8]进行评估。笔者以横琴海和洪奇沥河道底泥为研究对象,采用 P 指标对土壤环境进行评价,并采用 I_{geo} 、 RI 指标对土壤重金属污染情况及生态风险进行评估,以期为推动我国重金属污染评估提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况 横琴海和洪奇沥是中山市2条最主要的灌溉水源,均南北贯穿中山市(图1),接纳中山市大部分工业污水和生活污水。随着工业的迅速发展,中山市形成了工业园区,向这2条河流中排污,大量含有重金属的工业废水

进入水体造成污染。



图1 研究区域采样点

Fig.1 Sampling site in study area

1.2 样品采集 选取洪奇沥和横琴海为研究区域,按照美国环保局的方法,用抓斗式采泥器进行沉积物的采集和处理^[9]。2条水源沿线布设监测点,其中,洪奇沥设横沥镇附近

作者简介 余姝洁(1985-),女,重庆人,工程师,硕士,从事环境保护技术研究。*通讯作者,讲师,博士,从事环境保护技术研究。

收稿日期 2016-05-09

和沙仔村 2 个监测点,横琴海设埗西一、西海大桥、裕祥村、太平村 4 个监测点。采样深度为 0~20、20~40、>40 cm,测定各采样点底泥中 pH 及铅、镉、汞、铬、砷含量。

1.3 重金属评价方法

1.3.1 综合污染指数(P)。单因子评价难以表达污染物的整体污染水平,因此常采用能够综合评价多种污染因子的内梅罗污染指数法进行评价。计算公式:

$$P = \sqrt{\frac{\bar{X}^2 + X_{\max}^2}{2}}$$

式中, $X = \frac{S^i}{S_n^i}$, S^i 为重金属含量监测值, S_n^i 为环境质量标准值(土壤环境质量标准自然背景值)。污染分级标准见表 1。

表 1 污染分级标准等级

Table 1 Pollution grading standard			
污染等级 Pollution grade	P 范围 P range	程度 Degree	污染水平 Pollution level
I	$P \leq 0.7$	安全	清洁
II	$0.7 < P \leq 1.0$	警戒限	尚清洁
III	$1.0 < P \leq 2.0$	轻污染	轻微
IV	$2.0 < P \leq 3.0$	中污染	明显
V	$P > 3.0$	重污染	严重

1.3.2 地累积指数法(I_{geo})。地累积指数(I_{geo})通常称为 Muller 指数^[7],是判别人为活动对重金属污染影响的重要指数之一,计算公式:

$$I_{geo} = \log_2 \left[\frac{C_n}{1.5B_n} \right]$$

式中, C_n 为某一重金属监测值; B_n 为项目据地地页岩中地球化学元素含量(采用广东省重金属背景含量中位值^[10]),地累积指数与污染程度分级标准见表 2^[11]。采用 Pearson 积差分析法^[12]及 SPAA 22.0 软件分析各重金属之间的相关显著性。

1.3.3 Hakanson 潜在生态危害指数法。为了将不同重金属

的毒性差异及对环境敏感性差异纳入评价范围,使用 RI 计算分析各重金属带来的生态影响,计算公式:

表 2 地累积指数(I_{geo})与污染程度分级

Table 2 Land accumulation index and pollution degree classification		
污染等级 Pollution grade	I_{geo} 范围 I_{geo} range	污染程度 Pollution degree
0	$I_{geo} \leq 0$	无
I	$0 < I_{geo} \leq 1$	轻度
II	$1 < I_{geo} \leq 2$	偏中度
III	$2 < I_{geo} \leq 3$	中度
IV	$3 < I_{geo} \leq 4$	偏重度
V	$4 < I_{geo} \leq 5$	严重
I	$I_{geo} \geq 5$	极重

$$RI = \sum_i^m E_r^i = \sum_i^m T_r^i \frac{C^i}{C_n^i}$$

式中, E_r^i 为某种重金属的潜在生态危害; T_r^i 为某种重金属的毒性系数^[13]; C^i 为某金属监测值; C_n^i 为某金属风险背景值(采用现代工业化前全球沉积物中重金属最高背景值为参照标准^[14])。生态危害分级标准见表 3^[15]。

表 3 Hakanson 生态危害分级标准

Table 3 Hakanson ecological harm grading standard			
序号 Serial No.	E_r^i 范围 E_r^i range	RI 范围 RI range	生态危害程度 Ecological harm degree
1	$E_r^i \leq 40$	$RI \leq 150$	轻度
2	$40 < E_r^i \leq 80$	$150 < RI \leq 300$	中度
3	$80 < E_r^i \leq 160$	$300 < RI \leq 600$	强度
4	$160 < E_r^i \leq 320$	$600 < RI \leq 1\ 200$	偏强度
5	$E_r^i > 320$	$RI > 1\ 200$	重强度

2 结果与分析

2.1 重金属污染现状 由表 4 可知,洪奇沥沙仔村和横琴海裕祥村监测点的底泥为轻度污染,洪奇沥横沥镇附近监测点底泥为中污染,横琴海剩余 3 个监测点的底泥均为重污染,其中横琴海太平村监测点底泥的污染最严重。

表 4 中山市主要灌溉水源底泥重金属监测结果及内梅罗指数

Table 4 The monitoring results of heavy metals in sediments of the main irrigation water sources in Zhongshan City and Nemerow index

灌溉河流 Irrigation rivers	监测点 Monitoring site	pH	Pb		Cr		Cd		As		Hg		P
			含量//mg/kg	X_i	含量//mg/kg	X_i	含量//mg/kg	X_i	含量//mg/kg	X_i	含量//mg/kg	X_i	
			Content		Content		Content		Content		Content		
洪奇沥	横沥镇附近	6.60	60.200	1.72	90.600	1.01	0.897	4.49	2.800	0.19	0.322	2.15	2.01
Hongqili	沙仔村	7.02	54.700	1.56	86.600	0.96	0.496	2.48	2.240	0.15	0.292	1.95	1.78
横琴海	埗西一	7.15	58.500	1.67	347.000	3.86	1.000	5.00	20.900	1.39	0.160	1.07	3.98
Hengqinhai	西海大桥	7.10	87.000	2.49	789.700	8.77	1.620	8.10	26.700	1.78	0.330	2.20	7.03
	裕祥村	7.03	19.200	0.55	144.400	1.60	0.200	1.00	25.400	1.69	0.340	2.27	1.89
	太平村	7.16	69.300	1.98	1 012.000	11.24	1.000	5.00	19.700	1.31	0.300	2.00	8.51

2 条灌溉水源底泥的重金属污染特性不同,横琴海底泥以 Cr 为主要污染物,5 种重金属均存在高于标准值的情况,其污染程度及广泛性由高到低为 Cr、Cd、Pb、Hg、As;洪奇沥底泥以 Cd 污染为主,5 种重金属中,除 As 未超出标准值外,其余 4 种重金属均存在高于标准值的情况,其污染程度及广泛性由高到低次为 Cd、Pb、Hg、Cr、As。因此,中山市主要灌溉水源底泥存在重金属复合污染情况,其特性见表 5。

表 5 中山市主要灌溉水源底泥重金属污染特性

Table 5 Pollution features of heavy metals in sediments of main irrigation water sources in Zhongshan City			
灌溉河流 Irrigation rivers	污染类型 Pollution types	酸碱度 pH value	污染程度 Pollution degree
洪奇沥 Hongqili	无机污染,主要污染物为 Cd,有 Pb、Hg、As 超标	弱碱性	中度污染
横琴海 Hengqinhai	无机污染,主要污染物为 Cr,有 Cd、Pb、Hg、As 超标	弱碱性	重度污染

2.2 重金属富集程度 由表 6 可知,所有监测底泥中 Pb 的 I_{geo} 为 0~2,属于轻度偏中度污染;洪奇沥底泥中 Cr 的 I_{geo} 为 0~1,属于轻度污染,而横琴海底泥中 Cr 的 I_{geo} 为 1~5,属于中度至严重污染;洪奇沥底泥中 Cd 的 I_{geo} 为 0~1,属于轻度污染,横琴海底泥中 Cd 的 I_{geo} 为 2~6,属于中度至极重污染;所有监测底泥中 As 的 I_{geo} 为 0~2,属于轻度偏中度污染;洪奇沥底泥中 Hg 的 I_{geo} 为 0~1,属于轻度污染,横琴海中 Hg 的

I_{geo} 为 1~3,属于轻度至中度污染。综上所述,洪奇沥底泥中重金属富集程度最高的是 Pb,5 种重金属富集程度从大到小依次为 Pb、Cd、Cr、Hg、As,横琴海底泥中富集程度最高的是 Cd,5 种重金属富集程度从大到小依次为 Cd、Cr、Hg、As、Pb。

采用 Pearson 积差分析法统计了 5 种重金属的相关性。由表 7 可知,Cd 与 Pb 在 0.05 水平显著相关,可能具有相同的工业来源。

表 6 中山市主要纳污河流底泥重金属元素地累积指数及污染等级

Table 6 Land accumulation index and pollution level of heavy metals in sediments of main polluted rivers in Zhongshan City											
灌溉河流 Irrigation rivers	监测点 Monitoring site	Pb		Cr		Cd		As		Hg	
		I_{geo}	R	I_{geo}	R	I_{geo}	R	I_{geo}	R	I_{geo}	R
洪奇沥	横沥镇附近	0.680	1	0.010	1	0.260	1	-0.301	0	0.100	1
Hongqili	沙仔村	0.540	1	-0.060	0	-0.600	0	-3.330	0	-0.050	0
横琴海	埗西一	0.540	1	2.510	3	4.410	5	0.750	0	1.020	1
Hengqinhai	西海大桥	1.120	2	3.700	4	5.100	6	1.110	2	2.070	3
	裕祥村	-1.060	0	1.250	2	2.090	3	1.030	2	2.110	3
	太平村	0.790	1	4.060	5	4.410	5	0.660	1	1.930	2

表 7 中山市主要灌溉水源底泥重金属元素相关性

Table 7 Correlation among heavy metals in sediments of main irrigation water sources in Zhongshan City					
重金属 Heavy metals	Pb	Cr	Cd	As	Hg
Pb	1.000				
Cr	0.642	1.000			
Cd	0.931 *	0.668	1.000		
As	0.005	0.557	0.285	1.000	
Hg	-0.090	0.040	-0.117	-0.052	1.000

注: * 表示在 0.05 水平显著相关
Note: * stands for significant correlation at 0.05 level.

2.3 Hakanson 潜在生态危险风险 由表 8 可知,除 Hg 和横琴海西海大桥的 Cd 外,其余 4 种重金属的 E_r^i 均低于 40,处于轻微风险等级;所有监测底泥中 Hg 含量虽然不高(表 4),但其 E_r^i 为 25.60~54.40,处于中级生态风险等级;所有监测底泥中 RI 为 68.92~142.96,处于轻度生态风险等级。总体来说,洪奇沥和横琴海底泥均处于轻微生态风险等级, E_r^i 相对较小。

3 结论与讨论

(1)中山市 2 条主要灌溉水源底泥存在多种重金属复合

表 8 中山市主要灌溉水源底泥重金属生态风险指数

Table 8 Ecological risk index of heavy metals in sediments in main irrigation water sources in Zhongshan City							
灌溉河流 Irrigation rivers	监测点 Monitoring site	E_r^i					RI
		Pb	Cr	Cd	As	Hg	
洪奇沥 Hongqili	横沥镇附近	4.3	2.01	26.91	1.87	51.52	86.61
	沙仔村	3.91	1.92	14.88	1.49	46.72	68.92
横琴海 Hengqinhai	埗西一	4.18	7.71	30.00	13.93	25.60	81.42
	西海大桥	6.21	17.55	48.60	17.80	52.80	142.96
	裕祥村	1.37	3.21	6.00	16.93	54.40	81.91
	太平村	4.95	22.49	30.00	13.13	48.00	118.57

污染,污染水平处于中度至重度污染,其中,横琴海底泥以 Cr 为主要污染物,其污染程度及广泛性由高到低为依次为 Cr、Cd、Pb、Hg、As;洪奇沥底泥以 Cd 污染为主,其污染程度及广泛性由高到低为 Cd、Pb、Hg、Cr、As。从监测点位看,高平工业园区和龙山工业园区附近污染程度最高,工业园区废水排放是其重金属污染的主要原因之一。

(2)洪奇沥灌溉水源底泥中重金属富集程度从大到小依次为 Pb、Cd、Cr、Hg、As;横琴海水源底泥中重金属富集程度从大到小依次为 Cd、Cr、Hg、As、Pb。其中,Cd 属于重度污染,Hg 属于中度偏轻污染,As 属于轻度污染。据相关性分析,Cd 与 Pb 在 0.05 水平呈相关性显著,这说明可能有相同来源,这与工业园区特点相符。

(3)中山市主要灌溉水源底泥中 Cd、Pb、Hg、Cr、As 5 种重金属潜在生态危害从大到小依次为 Hg、Cd、Cr、As、Pb,Cd

的富集程度虽然高于 Hg,但是由于 Cd 生物毒性小于 Hg,其潜在生态危害小于 Hg;监测底泥中 RI 为 68.92~142.96,处于轻度生态风险等级。这可能是由于排入河流的废水都经过处理,工业园区规划较为合理,最终受到的影响较小。

参考文献

[1] 陈静生. 沉积物重金属污染研究中的若干问题[J]. 环境科学进展, 1983,4(8):1-12.
[2] 朱栩,向黎黎,曾正强,等. 都江堰(内江)水系河床底泥重金属污染调查与评价[J]. 四川环境,2008,27(5):53-56.
[3] KUMAR R N,SOLANKI R,KUMAR J I N. Seasonal variation in heavy metalcontamination in water and sediments of river Sabarmati and Khari-cutcanal at Ahmedabad,Gujarat[J]. Environmental monitoring and assessment, 2013,185(1):359-368.
[4] VINODHINI R,NARAYANAN M. Bioaccumulation of heavy metals in organsof fresh water fish *Cyprinus carpio* (Common carp) [J]. International Journal of environmental science and technology,2008,5(2):179-182.

类圆形,顶端平坦,4~33个细胞组成,排成2~3层。非腺毛有2种:一种为厚壁非腺毛,平直或稍弯曲,单细胞,似角状,有的可见螺纹;另一种为薄壁非腺毛,单细胞,甚长,弯曲或皱缩。花粉粒呈类球形,外壁表面光滑,萌发孔3个,并具清晰的颗粒刺状粉刺。

表2 华金6号花蕾的显微特征
Table 2 Microscopic characteristics of Huajin 6 flower buds

品种 Varieties	腺毛 Glandular hairs			非腺毛 Nonglandular hairs		花粉粒直径 Pollen grain diameter μm
	腺头面积 Glandular head area//μm ²	腺柄面积 Adenophore area//μm ²	分布密度 Distribution density 个/视野	长度 Length μm	分布密度 Distribution density 个/视野	
华金6号 Huajin 6	2 760.96	3 222.00	28.50	333.14	79.75	64.26
华金2号 Huajin 2	2 727.31	7 430.49	16.00	380.27	60.00	56.55

2 药材产量与品质

2.1 药材产量 华金6号花蕾快速膨大期较一般品种晚4~5 d,花蕾充分发育后花冠持续15~20 d不开放,仅上部稍有裂口,为含苞未放的棒状,可一次性采收完毕同一茬所有花蕾,从而方便采收,有利于减少人工投入。而传统品种金银花花期持续时间短,仅5~7 d,如不及时采收,就会导致花蕾开放而后脱落,丰产不丰收。华金6号徒长枝少,2 a以上植株上基本均是结花枝,且花蕾肥粗,花针长大。头茬花千蕾重27.4 g,是华金2号(16.7 g)的1.64倍。两年生植株干花产量可达1 500 kg/hm²,比对照华金2号品种增产30%以上。由于华金6号花冠不开放,避免了因不能药用而造成的浪费,品种优势明显,经济效益极高。

2.2 药材品质 绿原酸和木犀草苷是目前《中国药典》评价金银花药材质量优劣的指标性成分,也是金银花的主要有效成分。2015年6月经山东省分析测试中心测定,华金6号金银花绿原酸平均含量为3.05%,木犀草苷含量为0.14%,分别比2015版《中国药典》规定的含量指标(绿原酸1.5%,木犀草苷0.05%)提高了103%、180%。

3 栽培技术要点

华金6号植株根系发达,对土壤、气候等要求不严格,但在肥沃深厚的沙壤土中生长最好。种植时宜选择海拔200~500 m、背风向阳的山坡。栽培密度以株、行距1.0~1.5 m挖穴,穴径50 cm左右,深30~50 cm。为提高土地利用,可

与华金2号花蕾显微特征相比(表2),华金6号花蕾密被腺毛与非腺毛,且腺毛腺头较大而柄短,分布密度明显较大,非腺毛短而密集,花粉粒较大。花蕾中的挥发性物质多分布在腺毛中,由于华金6号腺毛密度高且腺头面积大,提示其花蕾中的挥发油类物质含量可能较高。

适当增加密度,利于提高前期产量,待进入丰产期后隔株或隔行间伐至正常密度。种植过程中,应定期松土除草,每年春冬季进行追肥,以有机肥料为主,配合使用无机肥料。初冬或早春进行冬剪,每茬花采收后进行夏剪,并适时采收,干燥储存。

4 结语

金银花新品种华金6号与传统品种相比,大白期花蕾可持续15~20 d,且花蕾集中,整齐度高,显著提高了金银花的采摘效率。传统品种金银花采摘时间比较集中,一旦采收不及时就会开放而不符合药用要求,造成很大的损失。华金6号经过辅助整形,植株直立,花蕾集中于枝端且在大白期可持续15~20 d,每茬花可一次采收完毕,采摘简单,大幅度降低了人工用量,提高了种植效益。且华金6号中绿原酸、木犀草苷含量分别比2015版《中国药典》规定的含量提高了103%、180%。因此,华金6号有广阔的开发利用前景。

参考文献

[1] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典[S]. 北京:中国医药科技出版社,2015:221.

[2] 张燕,王文全,郭兰萍,等. 不同采收期金银花的产量和质量研究[J]. 中草药,2013,34(18):2611-2614.

[3] 杨欣欣,包永睿,王帅,等. 不同采收期金银花药材质量评价研究[J]. 时珍国医国药,2015,24(6):1466-1468.

[4] 田璐,蒲晓芳,刘谦,等. 不同叶面营养对忍冬花期的影响[J]. 山东科学,2015,28(3):1-5.

(上接第63页)

[5] ZHANG L, WANG W X. Size dependence of the potential for metal bio-magnification in early life stages of marine fish[J]. Environmental toxicology and chemistry, 2007, 26(4): 787-794.

[6] NEMEROW N L. Accelerated waste water oxidation pond pilot plant studies [J]. Air and water pollution, 1963, 7(2/3/4): 395-397.

[7] MÜLLER G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River [J]. Geo journal, 1969, 2(3): 108-118.

[8] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control: Asedimentological approach[J]. Water research, 1980, 14(1): 975-1001.

[9] US EPA (U. S. Environmental Protection Agency). Methods for measuring the toxicity and bioaccumulation of sediment-associated contaminants with freshwater invertebrates (EPA-600-R-99-064) [M]. 2nd ed. Duluth, Washington, DC: Office of Research and Development, MN and Office of Science and Technology, 2000: 1-192.

[10] 张俊坚, 张会化, 刘鉴明, 等. 广东省区域地质背景下土壤表层重金属元素空间分布特征及其影响因子分析[J]. 生态环境学报, 2011, 20(4): 646-651.

[11] 韩倩, 张丽娟, 胡国成, 等. 中山高平工业园区周边水体沉积物中重金属污染特征及生态风险评价[J]. 农业环境科学学报, 20015, 34(8): 1563-1568.

[12] PEARSON K. Contributions to the mathematical theory of evolution [J]. Proceedings of the royal society, 1893, 54: 329-333.

[13] 徐争启, 倪师军, 庾先国, 等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. 环境科学与技术, 2008, 31(2): 112-115.

[14] 窦磊, 杜海燕, 游远航, 等. 珠江三角洲经济区生态地球化学评价[J]. 现代地质, 2014, 28(5): 915-927.

[15] 刘子宁, 朱鑫, 窦磊, 等. 珠江三角洲典型肝癌发病区土壤重金属富集特征分析及生态风险测度[J]. 土壤通报, 2011, 42(2): 471-476.