

工业区河涌污染与生态危害评价 ——以佛山三水大塱河涌为例

邱鸿荣, 罗建中*, 郑国辉, 陈国贤, 徐 文, 钱 伟

(广东工业大学环境科学与工程学院, 广州 510006)

摘 要:在对工业区大塱河涌水质及底泥重金属进行调查与分析的基础上,评价了底泥重金属潜在生态危害。结果表明,大塱河涌水体 COD、氨氮、总磷、DO 与重金属 Cr 均超过地表水 V 类水体标准,属于劣 V 类水体;底泥重金属 Cu、Zn 与 Cd 平均含量超出土壤环境质量三级标准,且重金属 Cu、Zn、Pb 平均含量超过农用污泥污染物控制标准,该河段疏浚底泥不宜作为肥料直接施用于农田;大塱河涌表层底泥重金属的潜在生态危害程度总体为强,几种重金属潜在生态危害平均程度从大到小为: Cd>Cu>Pb>Zn>Cr。

关键词:大塱河涌;水体;底泥;重金属;潜在生态危害指数

中图分类号:X820.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2011)12-2554-06

Investigation on River Pollution and Potential Ecological Risk Assessment in Industrial Area: Taking Dalangwo River as an Example

QIU Hong-rong, LUO Jian-zhong*, ZHENG Guo-hui, CHEN Guo-xian, XU Wen, QIAN Wei

(Faculty of Environmental Science and Engineering, Guangzhou 510006, China)

Abstract: The water quality and heavy metal in sediment of Dalangwo River in industrial area, Sanshui, Foshan, were investigated and analyzed. Hakanson potential ecological risk index was employed for analysis of the ecological risk of Dalangwo River sediment. It indicated that the content of COD, ammonia nitrogen, TP, DO and Cr in Dalangwo River did not reach class V criterion of surface water environment. The average concentration of Cu, Zn and Cd in sediment did not meet class III criterion for soil evaluation. The sediment dredging out from Dalangwo River could not be directly used in farmland as fertilizer because the average concentration of Cu, Zn and Pb exceed the controlled standards for pollutants in sludge for agricultural use. The results from potential ecological risk index method demonstrated that the potential ecological hazard of heavy metal had strong negatively effect on Dalangwo River sediment. And the average degree of potential ecological harm was established as the following ranking: Cd>Cu>Pb>Zn>Cr.

Keywords: Dalangwo River; water; sediment; heavy metal; potential ecological risk index

河流水质变化一直与社会经济的发展密切相关,近年来,随着现代社会人口剧增及工农业生产的快速发展,人类活动对环境产生了极大的影响,并造成了严重的环境污染。如长江三角洲河流已遭到不同程度的污染^[1],珠江三角洲工业区土壤^[2],深圳江碧工业区周边水域^[3],徐州市北郊工业区河流底泥^[4],甘肃石羊河流域典型工业区土壤^[5]都已受到重金属严重污染。水体、沉

积物等受重金属污染后,对周边的生态系统造成极大威胁,首先影响的是水生生物,并通过食物链逐级富集而危害人体健康^[6-7]。重金属污染已成为区域生态安全的重大威胁之一,并已受到国际社会的广泛关注。

大塱河涌起于四爪带,经过云东海街道辖区、佛山三水工业区西南园最终从凤岗村大塱河电排站汇入西南涌,该河涌水量较小,约为 $26\ 000\ \text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$,平均河宽为 20 m,平均深度为 2 m,流速平缓,枯水期平均流速 $0.5\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,最小流速 $0.2\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,汛期在夏季。大塱河涌沿程有许多水沟注入,支流较少,两岸植被较好。根据功能规划,大塱河涌水体属于 V 类水体。大塱河

收稿日期:2011-04-11

作者简介:邱鸿荣(1985—),男,广东茂名,硕士研究生,主要从事水污染治理与控制研究。E-mail:hongrongqiu@126.com

* 通讯作者:罗建中 E-mail:a6238@163.com

涌近年来受到比较严重的污染,而对大塍涌涌污染研究并未见报道。本文以大塍涌涌为研究对象,在对其污染现状调查与分析的基础上,采用潜在生态危害指数法对其底泥重金属潜在生态危害进行了评价,旨在为制定大塍涌涌污染治理与控制规划提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 仪器与试剂

ETC-200 抓斗式采样器(广州辛氏实验器材有限公司)、CEM-MARS 微波消解仪(美国 CEM 公司)、Z-2000 系列偏振塞曼原子吸收光谱仪(日本日立公司)、WMX-III-B 型 COD 微波消解仪(韶关市明天环保仪器有限公司)、SP-722 分光光度计(上海博科仪器有限公司)、pH/电导率/TDS/盐度计(上海三信仪表厂)、JPB-607 型便携式溶解氧测定仪(雷兹上海精密科学仪器有限公司)、EDI 超纯水制水系统(广州晶源海水淡化与水处理有限公司)。Pb、Zn、Cu、Cd、Cr 标准溶液(国家标准物质中心)、硝酸(GR)、 H_2O_2 (AR)、氢氟酸(AR)、去离子水。所有器皿使用前均用 20%(V/V) HNO_3 浸泡 24~48 h,再用 EDI 超纯水冲洗 3~4 次。

1.2 样品的采集与处理

1.2.1 样品采集

样品于 2010 年 12 月采自大塍涌涌 7 个采样断面(图 1),底泥样品用抓斗式采样器对表层底泥进行采集,水样用水质采样器采集。采集的底泥样品储存于带封口的聚乙烯袋中,水样装于广口塑料瓶中并编号贴标签,在 2 h 内带回实验室进行预处理分析^[8]。现场测定水样 pH 值、水温、溶解氧,水样经硝酸固定后带回实验室消解处理并过滤后进行重金属含量测定。为了解大塍涌涌对西南涌水体的影响,同时通过连续

3 d 在 W7 双桥断面监测大塍涌涌水体 COD、氨氮与总磷^[8]。

1.2.2 样品前处理

将采集的底泥样品在室温下自然风干,剔除砾石、木屑、塑料、杂草及贝壳等杂物,用玻璃瓶压散,在经过烘箱 105 $^{\circ}C$ 烘干后,用四分法进行缩分^[9],一份保留,一份备用,一份过 100 目尼龙筛用于重金属分析,分装于带封口的聚乙烯袋中,贴上标签在恒温培养箱中 4 $^{\circ}C$ 保存。

1.3 实验方法

1.3.1 底泥消解

准确称取底泥样品 0.100 0 g,置于 Express 消解管中,加入 5 mL 65% HNO_3 、2 mL 30% H_2O_2 和 1 mL 40% HF,小心摇匀,静置 30 min,放入 MARS 微波消解仪内,按表 1 所设定的程序进行消解,消解后的样品为无色澄清溶液^[10]。消解结束且温度降至低于 70 $^{\circ}C$ 后取出消解管,在通风橱里用电热板上中温(150 $^{\circ}C$)赶酸约 3 h。在通风橱内将赶酸后的样品转移至比色管中,用超纯水洗涤消解管 3 次,定容至 50 mL。用同样方法制备样品空白溶液。

表 1 微波消解升温程序

Table 1 Temperature rising procedure of the microwave digestion

步骤	功率/W	功率/%	温度/ $^{\circ}C$	升温时间/min	保持时间/min
1	1 600	100	100	5	5
2	1 600	100	130	5	5
3	1 600	100	160	5	10
4	1 600	100	190	5	30

1.3.2 水样消解

取 100 mL 水样放入 250 mL 锥形瓶中,加入硝酸 5 mL,在电热板上加热消解(不要沸腾)蒸至 10 mL 左

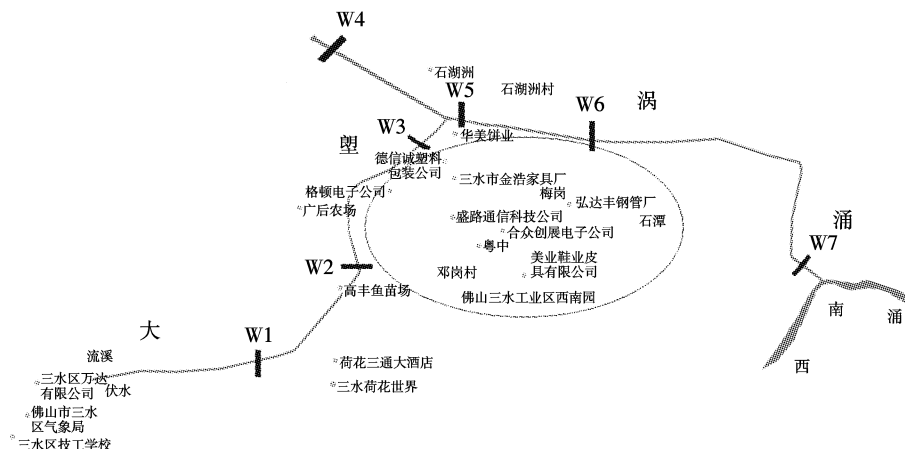


图 1 大塍涌涌底泥采样断面示意图

Figure 1 Sediment sampling sections of Dalangwo River

右,加入 5 mL 硝酸和 2 mL 高氯酸,继续消解,直至 1 mL 左右。如果消解不完全,再加入 5 mL 硝酸和 2 mL 高氯酸并蒸至 1 mL 左右。取下冷却,加水溶解残渣,用水定容至 100 mL。取 0.2%硝酸 100 mL,按上述相同的程序操作,以此为空白样^[8]。

1.4 分析方法

主要测试指标包括重金属 Cu、Zn、Pb、Cr、Cd、pH 值、温度(T)、溶解氧(DO)、COD、氨氮、总磷。重金属采用原子吸收法测定,COD、氨氮、总磷等按照标准方法测定^[8]。

1.5 实验的准确度与精确度

为检验和保证重金属含量测定的可靠性,本实验采用平行样品及基准物质检验样品消解和仪器分析过程的精确度和准确度,确保重金属分析结果的精确度和准确度。

2 结果与讨论

2.1 大塍涌水质连续监测结果

从表 2 可以看出,与地表水质量标准(GB

3838—2002)相比,COD、氨氮、总磷的含量均超出 V 类水体的标准,属于劣 V 类水体,其中氨氮污染最重,超标 0.91 倍。方差分析结果表明采样时间对 COD、氨氮、总磷的影响不显著($P>0.05$),因此在同一天不同采样时间,大塍涌 COD、氨氮与总磷相对比较稳定。

2.2 大塍涌水体重金属污染评价

水体重金属测定结果及地表水环境质量 V 类标准(GB 3838—2002)如表 3 所示。

由表 3 可知,与地表水环境质量标准相比,各样品中 Cr 的含量均超出了 V 类标准,超标 1.07~8.15 倍,污染最大的是 W5 南丰大道断面。W2 干休所断面与 W3 三岔口断面的 pH 值和 DO 值较低,W6X522 桥断面的 DO 值最低,这段河面出现黑臭,主要是受纺织厂废水直排影响。从整条河涌来看,Cr 含量与 DO 值超出 V 类标准,其他各项监测指标均达 V 类标准。大塍涌水体重金属沿程分布比较有规律,各种重金属含量都是先增加再降低,在 W5 南丰大道断面或 W6 X522 桥断面达到峰值。

表 2 大塍涌双桥断面水质连续监测结果

Table 2 Continuous monitoring results of water quality of Shuangqiao section in Dalangwo River

采样时间	COD/mg·L ⁻¹				氨氮/mg·L ⁻¹				总磷/mg·L ⁻¹			
	1	2	3	平均值	1	2	3	平均值	1	2	3	平均值
10:00	46	45	45	45.3 a	3.75	3.63	4.09	3.82 a	0.624	0.603	0.808	0.678 a
12:00	42	46	40	42.7 a	3.53	3.43	3.96	3.64 a	0.808	0.630	0.835	0.758 a
14:00	42	45	32	39.7 a	3.41	3.61	4.15	3.72 a	0.760	0.630	0.788	0.726 a
16:00	46	48	45	46.3 a	3.43	3.38	4.12	3.64 a	0.801	0.651	0.781	0.744 a
18:00	45	35	48	42.7 a	3.95	3.93	4.27	4.05 a	0.596	0.753	0.876	0.742 a
20:00	42	41	45	42.7 a	4.00	3.59	4.32	3.97 a	0.617	0.637	0.808	0.687 a
3 d 平均值			43.2				3.81				0.687	
地表水质量标准 V 类			40				2				0.4	

注:a 为方差分析结果用字母标记法表示。

表 3 水样重金属含量及理化因子

Table 3 Contents of heavy metals and physical-chemical characteristics of water

编号	采样点	Cu/mg·L ⁻¹	Zn/mg·L ⁻¹	Pb/mg·L ⁻¹	Cr/mg·L ⁻¹	Cd/mg·L ⁻¹	T/℃	pH	DO/mg·L ⁻¹
W1	皮革厂	0.024	0.207	0.078	0.107	0.003 0	9.8	6.85	2.6
W2	干休所	0.120	0.403	0.018	0.357	0.002 7	16.5	3.86	1.3
W3	三岔口	0.602	0.417	0.020	0.126	0.002 9	15.6	5.44	0.6
W4	Y105 桥	0.038	0.306	0.052	0.244	0.003 1	16.5	7.30	3.0
W5	南丰大道	1.130	1.614	0.048	0.815	0.005 9	16.0	7.10	2.5
W6	X522 桥	1.088	2.694	0.022	0.445	0.003 0	12.1	6.90	0.5
W7	双桥	0.177	1.776	0.012	0.464	0.002 2	10.6	7.33	2.4
平均值		0.454	1.060	0.036	0.365	0.003 2		6.40	1.84
地表水质量标准 V 类		1.0	2.0	0.1	0.1	0.01		6~9	2

2.3 大塍涡涌底泥重金属污染特征

2.3.1 底泥基本形状

大塍涡涌表层底泥样呈黑褐色或黑色絮凝状,有腐臭味,泥质松软,以淤泥质粘性土为主,内含碎石、砂砾、贝壳、田螺、塑料等,底泥成分主要为 SiO_2 ,所占比例达 71.11%,见表 4。

表 4 大塍涡涌底泥氧化物含量/%

Table 4 Contents of oxide in sediment of Dalangwo River/%

Na_2O	MgO	Al_2O_3	K_2O	CaO	TiO	Fe_2O_3	SiO_2	P_2O_5	SO_3
0.19	0.29	9.83	1.45	0.77	0.34	2.17	71.11	0.51	1.07

注:数据由广东省物料实验检测中心测得。

2.3.2 底泥重金属污染状况

由表 5 可知,大塍涡涌底泥几种重金属含量平均值与土壤环境质量标准(GB 15618—1995)相比,Cu、Zn、Cd 的含量均超出三级标准,表明大塍涡涌底泥以 Cu、Zn、Cd 污染为主。与广东土壤背景值相比,大塍涡涌各采样断面的 Cu、Zn、Cd、Cr 含量均远远超出广东土壤背景值,几种重金属平均值与背景值相比,超出 8.52(Cr)~75.14(Cd)倍,根据超出背景值的倍数分析,大塍涡涌底泥重金属含量顺序为 $\text{Cd}(75.14)>\text{Cu}(71.02)>\text{Zn}(34.86)>\text{Cr}(11.81)>\text{Pb}(8.52)$ 。

大塍涡涌表层底泥重金属的数据离散程度较大,变异系数普遍较高,为 70%~188%,高于一般值 40%^[12],也远高于长江、黄河、珠江广州段^[13]及松花江^[12]沉积物变异系数,表明各监测断面的重金属含量的差异性较大。

表 5 大塍涡涌底泥重金属含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Table 5 Contents of heavy metals in sediment of Dalangwo River($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

编号	采样点	Cu	Zn	Pb	Cd	Cr
W1	皮革厂	232.65	415.00	1 884.60	2.91	209.05
W2	干休所	851.00	1 368.75	535.90	8.72	762.40
W3	三岔口	119.50	532.50	18.45	1.61	114.70
W4	Y105 桥	52.95	615.00	7.05	1.29	82.30
W5	南丰大道	2 168.95	1 186.25	50.80	1.61	463.80
W6	X522 桥	1 776.95	3 743.75	86.95	4.20	522.45
W7	双桥	444.20	1 125.00	7.05	0.97	163.85
	河流均值	806.60	1 283.75	370.11	3.05	331.22
	$C_v/\%$	105	89	188	90	77
	土壤环境质量标准 (三级)	400	500	500	1.0	400
	广东省土壤背景值 ^[11]	11.2	35.8	28.9	0.04	34.8
	农用污泥中污染物 控制标准($\text{pH}<6.5$)	250	500	300	5	600

大。这除了受地球化学背景值的影响外,还主要受到人为污染的影响。大塍涡涌沿岸人烟稠密,工厂密布,工业及生活废水的污染使局部河段某些重金属元素的含量异常偏高,引起整个河段变异系数显著增大。例如,皮革厂采样点的 Pb,干休所的 Zn、Cd 和 Cr,南丰大道与 X522 桥的 Cu 和 Zn,均比其他点位含量高,使整个河段的变异系数提高到 70% 以上。这可能与上游的皮革厂、炼油厂、纺织厂、电子厂及中游的五金制造厂、家具厂、机械厂、塑料厂等的工业污染密切相关。

考虑到广东土壤多数为酸性土壤^[14],采用农用污泥中污染物控制标准(GB 4284—1984)酸性土($\text{pH}<6.5$)最高允许含量进行评价。与农用污泥中污染物控制标准相比,大塍涡涌底泥中重金属 Cu、Zn、Pb 含量的平均值均超标,因此该河段疏浚出的底泥不宜作为肥料直接施用于农田,必须经过对底泥重金属进行预处理方可使用。同时要注意,广东土壤一般是呈酸性的红壤或砖红壤^[15],且地下水位较高,底泥农用时要避免重金属对地下水造成二次污染。

2.3.3 底泥重金属沿程分布特征

由表 5 可知,大塍涡涌底泥中重金属 Cu、Zn、Cr、Cd 的浓度分布从上游到下游总体呈“M”型波状分布趋势,Pb 的浓度分布是沿程降低。底泥中各种重金属出现峰值的断面基本不同,Cu 最大值出现在南丰大道断面,Zn 最大值出现在 X522 桥断面,Pb 最大值出现在上游的皮革厂断面,Cr 与 Cd 最大值出现在干休所断面。

2.4 大塍涡涌底泥重金属潜在生态危害评价

国内外评价沉积物中重金属污染的方法很多,包括地累积指数法、潜在生态危害指数法、沉积物富集系数法等^[16]。本文采用比较常用的潜在生态危害指数法对底泥重金属污染进行评价。

潜在生态危害指数法由瑞典学者 Hakanson^[17]提出,它从各种重金属的毒性水平和生物对其污染的敏感程度来评价重金属的污染程度。该方法对应指标包括:单一重金属污染系数 C_f^i ,不同金属生物毒性相应因子 T_r^i ,单一重金属潜在生态危害因子 E^i ,多金属潜在生态危害系数(RI),计算公式如下:

$$C_f^i = \frac{C^i}{C_n^i}; E^i = T_r^i \times C_f^i; RI = \sum E^i$$

式中: C^i 为表层底泥的实测值; C_n^i 为底泥背景参考值。

本评价选择全球工业化以前的底泥中重金属的最高背景值作为参照值^[18],毒性响应系数反映了重金

属的毒性水平和生物及环境对重金属的敏感程度,一般来说,该系数越大,对生物的毒性也越大。各重金属的生物毒性因子、背景值和评价标准^[9]分别见表 6 和表 7,评价结果见表 8。

表 6 重金属的生物毒性因子与背景值

Table 6 Creature toxic factor and background value of heavy metals

元素	Cu	Zn	Pb	Cd	Cr
背景值 $C_b/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	30	80	25	0.50	60
生物毒性因子 T_i	5	1	5	30	2

表 7 评价指标与潜在生态危害程度的关系

Table 7 The relation between evaluation indices and potential ecological risk

评价指标	指标范围	潜在生态危害程度
E_i 或 RI	$E_i<40$ 或 $RI<150$	轻微
	$40\leq E_i<80$ 或 $150\leq RI<300$	中等
	$80\leq E_i<160$ 或 $300\leq RI<600$	强
	$160\leq E_i<320$ 或 $RI\geq 600$	很强
	$E_i\geq 320$	极强

表 8 大塍涌底泥中重金属的潜在生态危害指数及评价结果
Table 8 Results of assessment and potential ecological risk index of heavy metal in sediment of Dalangwo River

采样断面	E_i					RI
	Cu	Zn	Pb	Cd	Cr	
W1	38.78	5.19	376.92	174.42	6.97	602.27
W2	141.83	17.11	107.18	523.26	25.41	814.79
W3	19.92	6.66	3.69	96.90	3.82	130.99
W4	8.83	7.69	1.41	77.52	2.74	98.19
W5	361.49	14.83	10.16	96.90	15.46	498.84
W6	296.16	46.80	17.39	251.94	17.42	629.70
W7	74.03	14.06	1.41	58.14	5.46	153.11
平均值	134.43	16.05	74.02	182.72	11.04	418.27

由表 8 评价结果可知,大塍涌表层底泥重金属潜在生态危害有以下特征。

(1)以单一重金属的潜在生态危害系数 E_i 进行评价: Cd 在各个采样断面的潜在生态危害程度为中等到极强, E_i 在 58.14~523.26 之间, 其中潜在生态系数最高的采样断面 W2 干休所达到极强的潜在生态危害程度, 在 7 个采样断面中, Cd 的潜在生态危害级别有 1 个极强、2 个很强、2 个强、2 个中等, 是重要的危害因子; Cu 的 E_i 在 8.83~361.49 之间, 其中 Cu 在采样断面 W5 南丰大道的生态危害系数 E_i 最大, 为 361.49, 达到

极强的潜在生态危害程度; Pb 在 W1 皮革厂 E_i 最大, 达到极强的生态危害, W2 干休所的潜在生态危害程度为强, 其他都是轻度潜在生态危害; Zn 只有 W6X522 桥的生态危害为中等, 其他生态危害系数 E_i 均小于 40, 潜在生态危害程度为轻微; Cr 在各个断面都是轻度潜在生态危害, 整条河涌 Cr 的生态危害最低。

(2)以大塍涌表层底泥各重金属元素的 E_i 平均值进行评价: Cd 的生态危害系数平均为 182.72, 在 160~320 之间, 属于很强生态危害型; Cu 生态危害系数平均为 134.43, 在 80~160 之间, 属于强生态危害型; Pb 生态危害系数平均为 74.02, 在 40~80 之间, 属于中等生态危害型, Zn 与 Cr 的平均值都 <40, 属于轻微生态危害型。因此, 大塍涌底泥重金属潜在生态危害平均程度从大到小为: Cd>Cu>Pb>Zn>Cr。

(3)以多金属潜在生态危害系数 RI 对各个采样断面进行评价: RI 的变化范围为 98.19~814.79。W4Y105 桥和 W3 三岔口断面的潜在生态危害程度为轻微, 而 W4Y105 桥的生态危害最低; W7 双桥断面为中等的生态危害, W5 南丰大道断面为强的生态危害; W1 皮革厂、W2 干休所与 W6X522 桥断面均是很强的潜在生态危害, 其中 W2 干休所的 RI 为 814.79, 是很强生态危害程度临界值的 1.36 倍, 生态危害最高, 而整条大塍涌表层底泥重金属的潜在生态危害总体为强。

从以上分析可知, 大塍涌底泥 Cd 与 Cu 的潜在生态危害比较强, 因此要对 Cd 与 Cu 的污染引起重视, 防止其对上覆水体造成二次污染。

3 结论

(1)大塍涌水体 COD、氨氮、总磷、DO 与重金属 Cr 含量均超过地表水 V 类水体标准, 属于劣 V 类水体, 其中氨氮超标 0.91 倍, 总磷超标 0.72 倍, 因此要对氮磷污染引起重视, 防止水体富营养化。

(2)大塍涌底泥重金属 Cu、Zn、Cd 的含量超过土壤环境质量三级标准, 且 Cu、Zn、Pb 含量的平均值超过农用污泥中污染物控制标准, 因此该河段疏浚出的底泥不宜作为肥料直接施用于农田, 必须经过对底泥重金属进行处理才能使用。

(3)利用 Hakanson 潜在生态危害指数法对大塍涌底泥中重金属的潜在生态危害进行评价的结果表明, 大塍涌表层底泥重金属潜在生态危害程度总体为强, 几种重金属潜在生态危害平均程度从大到小为: Cd>Cu>Pb>Zn>Cr。

参考文献:

- [1] 钱嫦萍, 陈振楼, 刘杰. 长江三角洲河流污染现状及变化趋势[J]. 环境科学研究, 2002, 15(6):24-27.
QIAN Chang-ping, CHEN Zhen-lou, LIU Jie. The status quo and diversification trend of river pollution in the Yangtze River Delta[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2002, 15(6):24-27.
- [2] 颜文, 池继松, 古森昌, 等. 珠江三角洲工业区土壤(沉积物)重金属污染特征及防治对策:以石龙和容桂工业区为例[J]. 土壤与环境, 2000, 9(3):177-182.
YAN Wen, CHI Ji-song, GU Sen-chang, et al. Characteristics and prevention countermeasures of heavy metal pollution of soils (sediments) in industrial areas of the Pearl River Delta: Two case studies of Shilong and Ronggui industrial areas[J]. *Soil and Environmental Sciences*, 2000, 9(3):177-182.
- [3] 贾振邦, 赵智杰, 杨小毛, 等. 深圳江碧工业区对周边水域的影响[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2001, 37(6):746-754.
JIA Zhen-bang, ZHAO Zhi-jie, YANG Xiao-mao, et al. Environmental impact of Jiangbi industry park in Shenzhen to water area of Dongbao River and Pearl River mouth[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2001, 37(6):746-754.
- [4] 王晓, 韩宝平, 张显龙, 等. 徐州市北郊工业区河流底泥重金属污染特征[J]. 污染防治技术, 2003, 16(4):54-57.
WANG Xiao, HAN Bao-ping, ZHANG Xian-long, et al. Study on contamination feature of heavy metals in bottom sediments of river in northern industrial district of Xuzhou city[J]. *Pollution Control Technology*, 2003, 16(4):54-57.
- [5] 蒲瑞丰, 康尔泗, 王轲, 等. 石羊河流域典型工业区土壤重金属污染状况研究[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(9):129-133.
PU Rui-feng, KANG Er-si, WANG Ke, et al. Pollution status of heavy metals in soils of typical industrial districts in Shiyang River basin [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2008, 22(9):129-133.
- [6] Madoni P. The acute toxicity of nickel to freshwater ciliates[J]. *Environmental Pollution*, 2000, 109(1):53-59.
- [7] Kowk Lim Lam, Po Wai Ko, Judy Ka-Yee Wong, et al. Metal toxicity and metallothionein gene expression studies in common carp and tilapia [J]. *Marine Environmental Research*, 1998, 46(1-5):563-566.
- [8] 国家环境保护总局水和废水监测分析方法委员会. 水和废水监测分析方法[M]. 第四版增补版. 北京: 中国环境科学出版社, 2010: 325-435.
State Environmental Protection Administration of Water and Wastewater Monitoring Method Committee. Analysis method of water and waste water[M]. enlarged edition of fourth edition. Beijing: China Environmental Science Press, 2010:325-435.
- [9] 奚旦立, 孙裕生, 刘秀英. 环境监测[M]. 第三版. 北京: 高等教育出版社, 2004:278.
XI Dan-li, SUN Yu-sheng, LIU Xiu-ying. Environmental monitoring [M]. third edition. Beijing: Higher Education Press, 2004:278.
- [10] 张晓静, 朱凤鹏, 胡清源, 等. ICP-MS 同时测定土壤中 Cr、Ni、Cu、As、Tl 和 Pb[J]. 中国烟草学报, 2009, 15(6):18-22.
ZHANG Xiao-jing, ZHU Feng-peng, HU Qing-yuan, et al. Simultaneous determination of Cr, Ni, Cu, As, Tl and Pb in soil by inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. *Acta Tabacaria Sinica*, 2009, 15(6):18-22.
- [11] 全国生态现状调查与评估(中南卷)[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2006:487.
National survey and assessment of ecological status (volume of Central south China)[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2006:487.
- [12] 林春野, 何孟常, 李艳霞, 等. 松花江沉积物金属元素含量、污染及地球化学特征[J]. 环境科学, 2008, 29(8):2123-2130.
LIN Chun-ye, HE Meng-chang, LI Yan-xia, et al. Contents, contamination and geochemical characteristics of metals in the sediment from Songhua River[J]. *Environmental Science*, 2008, 29(8):2123-2130.
- [13] 王立军, 张朝生. 珠江广州江段水体沉积物和悬浮物中 27 种元素的含量与形态分布特征[J]. 应用基础与工程科学学报, 1999, 7(1):12-20.
WANG Li-jun, ZHANG Chao-sheng. Concentration and speciation of 27 elements in sediments and suspended matter from Guangzhou section of the Pearl River[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 1999, 7(1):12-20.
- [14] 温志良, 邓伟斌, 田新会. 东莞生态园南畲朗河道底泥资源化利用途径研究[J]. 东莞理工学院学报, 2008, 15(3):94-98.
WEN Zhi-liang, DENG Wei-bin, TIAN Xin-hui. Study on the approach of reutilizing Nan Yulang River sediment in Dongguan ecological garden[J]. *Journal of Dongguan University of Technology*, 2008, 15(3):94-98.
- [15] 许炼烽, 刘腾辉. 广东土壤环境背景值和临界含量的地带性分异[J]. 华南农业大学学报, 1996, 17(4):58-62.
XU Lian-feng, LIU Teng-hui. The zonal differentiation of soil environmental background values and critical contents in Guangdong[J]. *South China Agr Univ*, 1996, 17(4):58-62.
- [16] 丁喜桂, 叶思源, 高宗军. 近海沉积物重金属污染评价方法[J]. 海洋地质动态, 2005, 21(8):31-36.
DING Xi-gui, YE Si-yuan, GAO Zong-jun. Methods of heavy metal pollution evaluation for off-shore sediments[J]. *Marine Geology Letters*, 2005, 21(8):31-36.
- [17] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control—A sediment ecological approach[J]. *Water Research*, 1980, 14:975-1000.
- [18] 陈建军, 胡祖武, 刘振乾. 广州市石井河沉积物重金属污染及潜在生态风险评价[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(7):3202-3204.
CHEN Jian-jun, HU Zhu-wu, LIU Zhen-qian. Heavy metal contamination and potential ecological risk assessment in the sediment of Shijing River in Guangzhou[J]. *Journal of Anhui Agri Sci*, 2009, 37(7):3202-3204.
- [19] 张敏, 张思冲, 叶华香, 等. 大庆市北二十里泡湿地沉积物重金属污染及潜在生态危害评价[J]. 黑龙江水专学报, 2007, 34(4):111-115.
ZHANG Min, ZHANG Si-chong, YE Hua-xiang, et al. Pollution and the potential ecological risk assessment of heavy metals in sediment of Beiershilipao wetland in Daqing[J]. *Journal of Heilongjiang Hydraulic Engineering College*, 2007, 34(4):111-115.