

珠江三角洲第四纪沉积物Cd元素的分布特征及成因

刘子宁¹, 窦磊^{1,2}, 张伟¹

LIU Zi-ning¹, DOU Lei^{1,2}, ZHANG Wei¹

1. 广东省地质调查院, 广东 广州 510080; 2. 中山大学地球环境与地球资源研究中心, 广东 广州 510275

1. *Guangdong Institute of Geological Survey, Guangzhou 510080, Guangdong, China;*

2. *Center for Earth Environment and Resources, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, Guangdong, China*

摘要:根据珠江三角洲平原区 44 个钻孔揭示的第四系,对晚更新世以来沉积物的地球化学特征进行了系统分析,结合沉积物粒度,探讨了珠江三角洲平原区第四纪沉积物 Cd 的分布特征、高含量来源及迁移富集规律。研究结果表明:①珠江三角洲第四纪沉积物的 Cd 含量地区差异较大,西江、北江冲积区为主要富集区,而潭江和东江冲积区为背景区。②物质来源、沉积物粒度、沉积环境与有机质含量共同影响了珠江三角洲第四纪沉积物 Cd 的含量分布,西江、北江冲积区受控于富 Cd 的泥盆系、石炭系砂页岩,而东江、潭江冲积区主要由贫 Cd 的燕山期花岗岩等限定;沉积物平均粒径(ϕ 值)与 Cd 含量存在显著正相关关系;另外,温暖湿润、海陆交互作用强烈的沉积环境与富含有机质的地区有利于 Cd 的聚积富集。③西江、北江流域相对富 Cd 岩石风化的产物,特别是具高强度 Cd 含量的铅锌多金属矿区,是西江、北江冲积区 Cd 高含量的主要来源。④珠江三角洲第四纪沉积物 Cd 的高含量区分成西江、北江西北部和东南濒海两大片区,究其原因,前者由区域发育的铅锌多金属矿控制,后者则受海陆交互作用沉积环境的影响。

关键词:珠江三角洲;第四系;地球化学;分布特征;Cd 高含量区

中图分类号: S153.62, X14

文献标志码: A

文章编号: 1671-2552(2012)01-0172-09

Liu Z N, Dou L, Zhang W. Distribution and origin of cadmium in the Quaternary sediments of the Pearl River delta plain, Guangdong Province, southern China. *Geological Bulletin of China*, 2012, 31(1):172-180

Abstract: Through a comprehensive analysis of the geochemical characteristics of the Quaternary sediments from 44 cores in the Pearl River delta plain in combination with grain sizes of the sediments, the authors studied the cadmium content of the Quaternary sediments in this area, which included distribution characteristics, source of high values, migration and enrichment. The result shows that: ① cadmium values of the Quaternary sediments in different areas of the Pearl River delta plain are markedly different from each other, the main enrichment areas are Xijiang River and Beijiang River alluvial plains, and Tanjiang River and Dongjiang River alluvial plains constitute the background area; ② the main factors that control the cadmium content of sediments in this area seem to be the source material, sediment grain size, sedimentary environment and organic matter. Xijiang River and Beijiang River alluvial plains are controlled by the Devonian and Carboniferous cadmium-rich sandstone and shale, while the Tanjiang River and Dongjiang River alluvial plains are constrained by the cadmium-poor Yanshanian granites. A distinct positive correlation is found between average particle size (ϕ) and cadmium content. Beside, warm and moist environment, intense land-sea interaction and rich organic matter are beneficial to the accumulation of cadmium-rich sediments; ③ weathering products of Cd-rich rocks, especially the well developed lead-zinc polymetallic ore deposits in the Xijiang River and Beijiang River basin, constitute the main source of cadmium high-value zone; and ④ the cadmium high-value zone of the Quaternary sediments in the Pearl River delta plain can be divided into northwestern and southeastern districts, which are constrained by the lead-zinc polymetallic ore deposits and the sedimentary environment of land-sea interaction respectively.

Key words: Pearl River delta; Quaternary; geochemistry; distribution characteristics; cadmium high-value zone

收稿日期: 2011-01-21; 修订日期: 2011-11-28

资助项目: 中国地质调查局项目《广东省珠江三角洲经济区农业地质与生态地球化学调查》(编号: 1212010511216)

作者简介: 刘子宁(1984-), 男, 本科, 助理工程师, 从事第四纪地质与环境地球化学研究。E-mail: gdlizuning@163.com

珠江三角洲平原区是广东省乃至中国人口最密集、经济最发达的城市群区域,也是生态地质环境的过渡带和敏感带。Cd 是一种具有生物毒性的金属元素,在工农业生产领域中被广泛使用,由此引起了研究者对 Cd 环境生态效应普遍持久的重视^[1-10]。对珠江三角洲平原区 Cd 的研究,不同领域的学者均做了大量细致的工作,研究内容涉及 Cd 的分布特征、存在形式、环境背景值、生态效应(生物毒性)等诸多方面^[6-10]。但由于缺少垂向剖面上的地球化学数据,这些研究都局限于平原区的土壤表层,而对三角洲基底之上的整套沉积物——晚更新世以来沉积物 Cd 的分布特征、高含量来源、迁移富集规律等的研究至今仍较缺乏。

本文在前人工作的基础上,根据珠江三角洲平原区 44 个地点钻探揭示的第四系,对晚更新世以来沉积物的化学成分进行了系统分析,结合沉积物的粒度,探讨了珠江三角洲平原区第四纪沉积物 Cd 的分布特征、高含量来源及其迁移富集规律。旨在丰富对珠江三角洲平原区 Cd 地球化学方面的认识,为珠江三角洲平原区土壤 Cd 污染的防治与修复提供科学依据。

1 地质地貌特征和样品采集分析

珠江三角洲主要是由西江、北江、东江、潭江携带的泥沙在湾内堆积复合而成的。三角洲内有 1/5 的面积为星罗棋布的丘陵、台地,使水道分 8 个口门出海,“四江汇合,八口分流”,构成珠江三角洲的地貌特色(图 1)。珠江三角洲除东南面为南海外,周围主要由花岗岩、花岗片麻岩等形成的低山和丘陵环绕,平原上岛丘众多,出露的基岩多为奥陶纪二长花岗岩和云开群变质岩。

在珠江三角洲布设的 44 口第四系钻孔(图 1),总进尺 1597.90m,共采集沉积物样品 1594 件,另对 22 件样品作了粒度分析。沉积物元素全量分析测定工作由中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究

所进行,粒度分析工作由中国地质调查局海洋地质实验检测中心承担。样品分析测定的精确度和准确度由国家标准参考样和重复样控制,质量完全符合要求。

2 三角洲 Cd 的区域分布特征

2.1 第四纪沉积物 Cd 的含量水平

平均值作为一种具有整体代表性的统计参数,可反映元素在沉积区域内的分布情况。珠江三角洲 1594 件第四纪沉积物样品 Cd 含量的测试数据,经剔除原始数据中超平均值 3 倍左右标准离差后,统计结果见表 1。由表 1 可以看出,珠江三角洲第四纪沉积物 Cd 含量的均值为 240.75ng/g,与长江三角洲、黄淮海平原土壤的 Cd 含量相比较,均超出 1 倍多,显示珠江三角洲第四纪沉积物丰富的 Cd 含量特征,表明珠江三角洲较容易成为 Cd 含量的高背景区。

2.2 珠江三角洲 Cd 的分布特征

数据分析显示(表 1),珠江三角洲 Cd 含量的变异系数较大,达 0.66,显示该地区第四纪沉积物中 Cd 含量起伏较大、区域分布不均的特征。

以《土壤环境质量标准(GB 15618-1995)》为参照,对珠江三角洲第四纪沉积物 Cd 含量进行分级,大于 300ng/g 为高含量区,相应的小于 300ng/g 为背景区^[7]。按照这种划分标准,珠江三角洲 Cd 的高含量区主要分布在西江和北江冲积区。而在东江和潭江冲积区,Cd 的含量相对偏低,均为 Cd 的环境背景区,在东江靠上游的沉积区和潭江南部分布着成片的 Cd 含量少于 200ng/g 的低值区(图 2)。

分析图 2 可以发现,西江、北江冲积区内 Cd 的高含量区主要分成两大片,一是西江、北江河流开始分道,平原区开始接受沉积,靠近物源的西北部沉积区;另一个是西江、北江河网密集,陆上三角洲向海伸延发育,海陆交互作用强烈的东南部濒海沉积区。两片区域均出现大面积的 Cd 高含量区,中间由既远

表 1 珠江三角洲第四纪沉积物与其它地区 Cd 含量的特征

Table 1 Cadmium content characteristics
Quaternary sediments in of the Pearl River delta and in other areas

珠江三角洲第四纪沉积物			长江三角洲平原 ^[11]		黄淮海平原 ^[11]	
样品数	平均值	变异系数	样品数	平均值	样品数	平均值
1523	240.75	0.66	57	115.00	219	113.00

注: Cd 含量单位为 ng/g

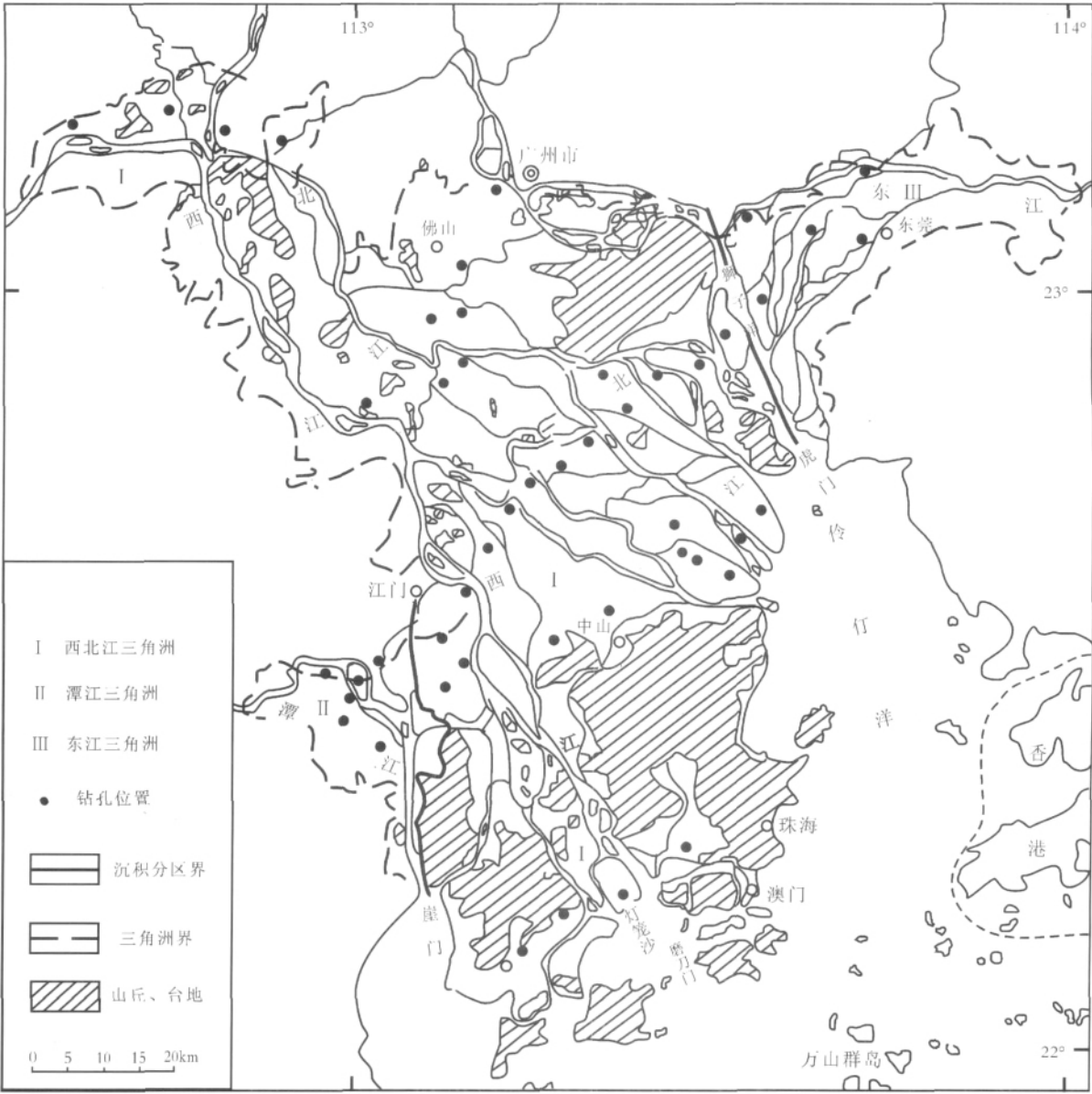


图 1 珠江三角洲地貌与钻孔位置图

Fig. 1 Geomorphology and core position of the Pearl River delta

离物源又受海洋作用微弱的狭长地带所分隔。同时，比较两片高含量区还能发现，西北部靠近物源的沉积区，其 Cd 含量强度更为突出。

3 影响三角洲 Cd 含量的主要因素

3.1 物质来源

珠江三角洲是在 3 次海侵、海退交互作用的过程中发育起来的，整体上具有相同的发展模式，经历了基本一致的演变过程^[12]。但是在三角洲内部，区域

上仍然有显著的差异，表现在沉积物质的来源上可分为西北江沉积区、东江沉积区和潭江沉积区，在地球化学上体现出不同的三角洲沉积区具有不同元素组合的特征。表 2 列出了珠江三角洲不同沉积区第四纪沉积物的元素含量、有机碳含量和 pH 值。

分析表 2 可知，不同沉积区第四纪沉积物的化学组成表现得很不一样。常量化学组分中，西北江的 SiO₂、CaO 含量明显高于其它 2 个沉积区，尤其是 CaO，分别是东江的 4.8 倍、潭江的 2.0 倍。而微量元

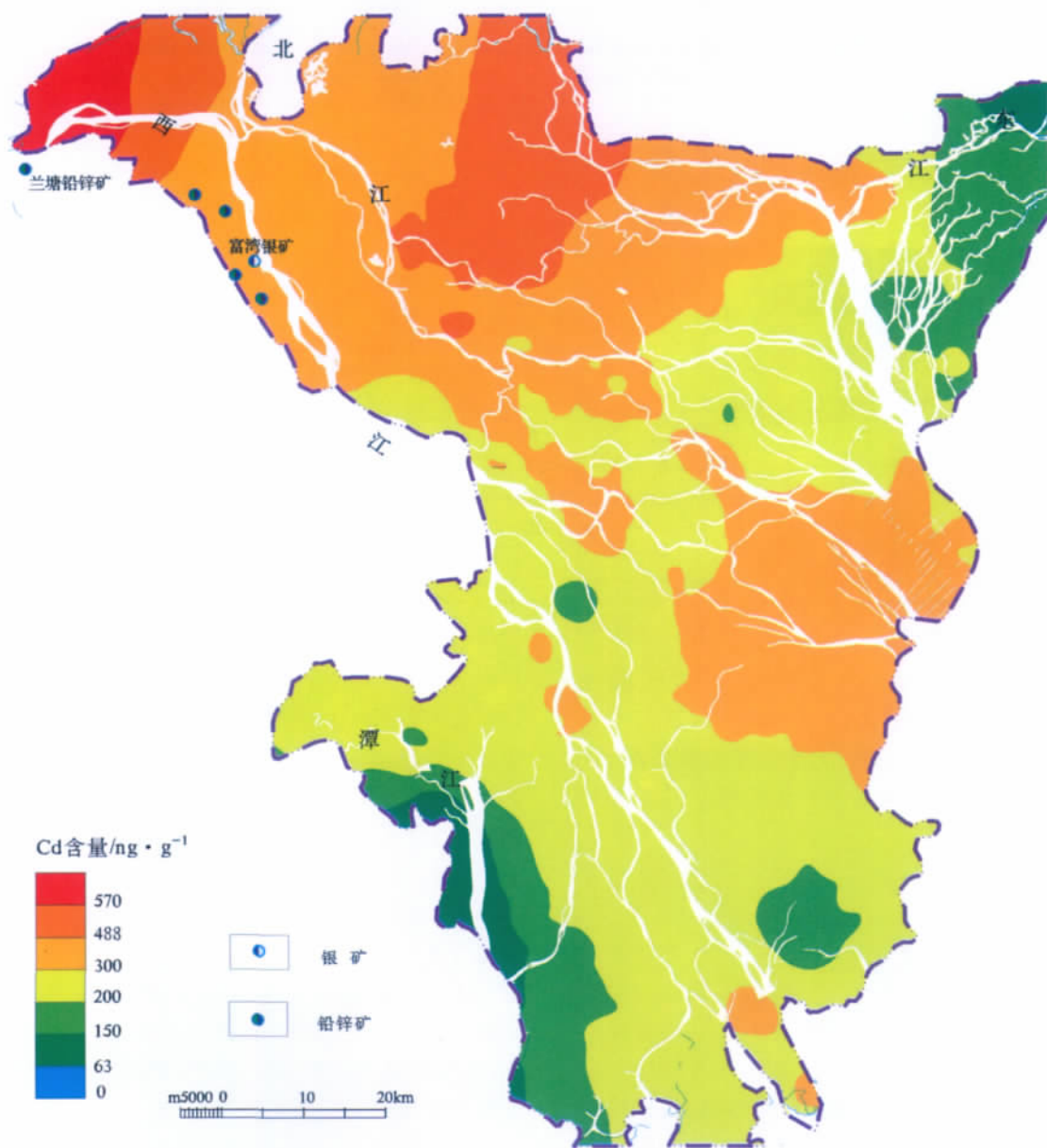


图 2 珠江三角洲第四纪沉积物 Cd 地球化学图

Fig. 2 Cadmium geochemical map of Quaternary sediments in the Pearl River delta

素方面,Cd、Cl 含量在西北江沉积区远高于东江和潭江沉积区,Pb、U、Zn 则在西北江沉积区表现为最低。pH 值方面,西北江与潭江沉积区沉积物呈中性,东江沉积区则为中偏酸性。

沉积物中化学组成的差异受控于各自汇水域表壳岩石地层的化学组成。西北江沉积区物源母岩主要受泥盆系石英砂岩、页岩,石炭系砂岩、泥岩和三叠系砂岩、粉砂岩的制约;潭江沉积区则主要受寒武

系细砂岩、晚侏罗世花岗岩和白垩系砂砾岩的限定;而东江沉积区主要受周围山体燕山期酸性花岗岩和云开群变质岩的影响。

河流水体主要浸蚀搬运表壳岩石的风化残积物。为此,对珠江三角洲汇水流域主要岩石地层区的土壤 Cd 含量^①进行了分析。珠江三角洲主要岩石地层区土壤的 Cd 含量中值列于表 3。由表 3 可以看出,西北江沉积区主要的物源母岩——石炭系、泥盆

表 2 珠江三角洲不同沉积区的化学组成

Table 2 Chemical compositions of different sedimentary areas in the Pearl River delta

	Cd	Cl	Cr	Cu	Mn	Pb	Sb	Th	U	Zn
东江 (156)	201.68	637.15	48.59	24.16	422.10	42.54	0.90	20.69	5.79	90.24
潭江 (193)	195.56	857.14	65.56	23.28	633.07	40.37	0.85	24.70	5.06	91.49
西北江 (1248)	324.93	1299.17	59.97	28.49	557.43	34.83	1.44	16.97	3.96	86.02
	Zr	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	C.org	pH
东江 (156)	292.36	68.97	13.52	4.80	0.26	0.42	2.58	0.70	0.80	6.25
潭江 (193)	234.62	66.55	16.03	5.71	0.64	0.48	2.36	1.04	0.87	7.08
西北江 (1248)	270.86	70.21	12.66	4.79	1.25	0.53	2.17	0.88	0.75	7.33

注: Cd 含量单位为 ng/g, 氧化物、有机碳为%, 其余元素为 $\mu\text{g/g}$; 括号中的数字为样品数

表 3 珠江三角洲主要岩石地层区土壤 Cd 含量中值

Table 3 Cadmium content median of soil in main lithostratigraphy of the Pearl River delta

白垩系	侏罗系	三叠系	石炭系	泥盆系	奥陶系	寒武系	震旦系
86 (41)	111 (31)	158 (41)	283 (41)	292 (31)	110 (31)	89 (31)	133 (31)

注: Cd 的含量单位为 ng/g, 括号内的数字为样品数

系的表层土壤 Cd 含量均可达 280ng/g 以上, 相比于东江和潭江沉积区主要物源母岩寒武系、白垩系 90ng/g 左右的含量水平, Cd 含量相对偏高, 这为西北江沉积物高背景的 Cd 含量提供了必要的物源贡献。

3.2 沉积物粒度

沉积物中元素的含量与粒径组成关系密切, 不同粒级的沉积物由于矿物组成、结构和表面特征不同, 元素在其中的含量各异^[13-14]。珠江三角洲沉积物主要为细砂、粉砂质淤泥, 在分析的 22 件粒度样品中, 平均粒径 $-0.14\sim 6.89\phi$, 按照温德华对碎屑物粒级的划分^[15], 粒级由粗砂级横跨至粉砂级, 又以粉砂级为主, 基本囊括了珠江三角洲第四纪沉积物绝大部分的粒级组成, 能代表珠江三角洲的沉积物质。对 22 件样品 Cd 含量的测定结果见表 4。

从表 4 中可以看到这样一个明显的趋势, 沉积物中 Cd 含量基本遵循“元素粒度控制律”^[13]的第一种模式: 细粒级沉积物中元素(Cd)的含量明显高于粗粒级沉积物。对沉积物的平均粒径(ϕ 值)与相应的 Cd 含量进行相关分析, 发现相关系数为 0.646, 相关临界值 $\alpha_{0.05}=0.423$, 表明沉积物的 Cd 含量与平均粒径(ϕ 值)存在显著的正相关关系, 即珠江三角洲第四纪沉积物平均粒径越小(ϕ 值越大)Cd 含量值越高。

3.3 沉积环境

元素的聚积和分散要受到沉积环境的控制。在珠江三角洲第四纪地质时期, 气候经历了冷暖交替的历程。海平面的波动、沉积环境的变迁无疑将对沉积物中 Cd 的含量造成影响, 从而在元素的垂向分布上表现出来。沉积物中 B、Ba、Sr 的含量对珠江三角洲第四纪沉积相具有指示意义^[12,16]。珠江三角洲第四纪海相沉积物中 B 的含量大于 100 $\mu\text{g/g}$ 、Ba 的含量大于 400 $\mu\text{g/g}$ 、Sr 的含量大于 100 $\mu\text{g/g}$, 陆相沉积物中 B<50 $\mu\text{g/g}$ 、Ba<300 $\mu\text{g/g}$ 、Sr<50 $\mu\text{g/g}$ 。以此为标准, 利用微量元素所反映的沉积相, 讨论晚更新世以来珠江三角洲不同沉积环境对 Cd 含量的影响。

图 3 是珠三角钻孔 V06(中山东凤)元素分布图, 显示该剖面 51.50m 厚的第四纪沉积物 Cd 与 B、Ba、Sr 等指相元素及有机碳的垂向分布。指相元素的含量曲线分布特征清晰地显示, 该剖面可分为 6 段, 对应着三角洲 3 次海侵和 3 次海退, 包含 3 段元素富集和 3 段元素分散的层段。由图 3 可见, 三角洲 3 次海退分别对应 V06 钻孔剖面的 51.50~39.80m、16.80~10.70m 和 3.80~2.00m 段。三角洲海退时期, 气候干燥寒冷, 沉积物在陆相环境下堆积形成, 主要为陆相的黄色粗砂、中粗砂, 微量元素 B<40 $\mu\text{g/g}$ 、Ba<300 $\mu\text{g/g}$ 、Sr<45 $\mu\text{g/g}$, 均指示以河流作用为主导的陆相环境, Cd 含量水平低于 200ng/g,

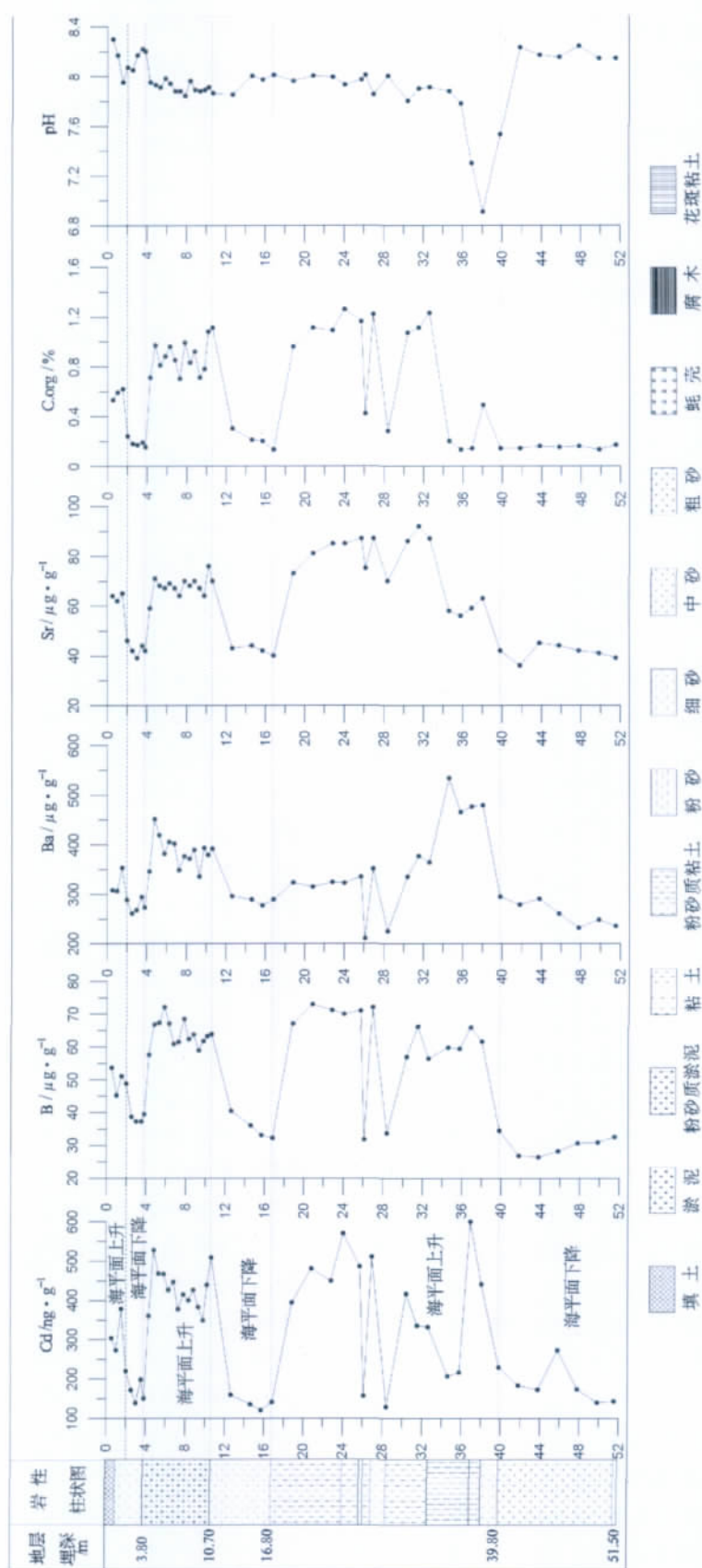


图 3 珠江三角洲 V06 孔元素分布图
Fig. 3 Element distribution of core V06 in the Pearl River delta

表 4 珠江三角洲沉积物粒径与 Cd 含量的关系

Table 4 Relationship between grain size and cadmium content of sediments in the Pearl River delta

样号	平均粒径/ ϕ	Cd 含量/ $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$
L01	-0.14	136.70
L02	0.47	142.70
L03	1.79	32.00
L04	1.93	106.20
L05	2.23	70.50
L06	2.92	143.30
L07	3.12	61.40
L08	3.58	31.40
L09	4.16	141.50
L10	4.19	235.40
L11	4.56	107.10
L12	4.67	183.80
L13	4.94	252.07
L14	5.26	275.50
L15	5.73	537.70
L16	5.98	256.56
L17	6.29	37.63
L18	6.42	266.00
L19	6.49	322.30
L20	6.55	545.83
L21	6.70	388.81
L22	6.89	518.65

属于含量低值、分散阶段。3 次海侵阶段分别对应剖面的 39.80~16.80m、10.70~3.80m、2.00~0m 段。三角洲海侵时期,气候温暖湿润,B、Ba、Sr 指示的沉积环境为海陆交互相,总体偏于海相,沉积物在海陆交互作用的环境下堆积形成,主要为深灰色的粉砂、淤泥质粉砂。对应深度的 Cd 含量偏高,均达 300ng/g 以上,属于含量峰值、富集阶段。表明在珠江三角洲形成的过程中,温暖湿润、海陆交互作用强烈的沉积环境有利于 Cd 的聚积富集。

3.4 有机质

生物体对环境中的 Cd 具有浓集、积累和放大的功能^[1,17-18]。珠江三角洲沉积物有机碳与 Cd 含量相关分析显示,它们之间的相关系数为 0.309,高于相关临界值 $\alpha_{0.01}=0.081$,存在显著正相关关系。图 3

中有机碳与 Cd 的含量垂向分布图也清晰地显示出这种关系,它们含量的曲折振荡变化,有着良好的对应关系,Cd 高含量的层段有机碳含量基本大于 0.5%,Cd 的低含量层有机碳含量降低至 0.2%附近。二者在相同层段里同时表现为相对富集或分散,表明珠江三角洲第四纪沉积物中有机碳含量升高,吸附的 Cd 也越多。

4 三角洲 Cd 高值区的成因分析

以上分析表明,珠江三角洲第四纪沉积物的 Cd 含量主要受控于物质来源、沉积物粒度、沉积环境和沉积物中有机质的含量,其高值区的形成也由这些因素限定。Cd 在地壳中具有高度的分散性,故很难形成独立的矿物。Cd 属于亲 S 的元素,在硫化物中主要进入 Zn 的硫化物内;在热液作用中,Cd 除与 Zn 有着紧密的联系外,也存在于 Pb、Cu 等某些矿物中^[19]。对珠江三角洲第四纪沉积物元素含量进行相关性分析,Cd 与 Cu、Pb、Zn 存在很好的相关性 ($\text{Cu}=0.226$ 、 $\text{Pb}=0.264$ 、 $\text{Zn}=0.294$,相关临界值 $\alpha_{0.01}=0.081$)。广东省典型的铅锌多金属矿区多分布于北江、西江汇水流域,北江上游 5 个矿区 Cd 平均含量可达 454.04 $\mu\text{g/g}$,最低也有 229.86 $\mu\text{g/g}$ (表 5)。西江流域铅锌多金属矿区主要出现于高要-高明的三洲盆地内,现有的各种低温矿床闪锌矿的含 Cd 研究资料表明,富含于银矿床中的闪锌矿内 Cd 的含量最高^[19],区内超大型的富湾银矿床对西江流域铅锌多金属矿区具高强度含量的 Cd 给出了很好的指示意义。

Cd 以矿物颗粒的形式滚动跳跃,从而形成水系沉积物^[20]。在西江流域共采集了 5 件底泥沉积物样品,在暂未发现有铅锌矿开采历史的上游区域采集的 3 个底泥沉积物样品,Cd 含量均低于 1000ng/g,在下游肇庆塘坑铅锌矿和三洲盆地铅锌多金属矿区附近采集的底泥样品,Cd 含量均达 1900ng/g 以上。北江流域的底泥沉积物也显示出同样的测试结果,受仁化凡口铅锌矿等矿区的影响,下游 5 件底泥样品 Cd 含量均达到 1900ng/g 水平,高值可达 8136 ng/g。在东江、潭江流域,铅锌矿开采少见,9 个底泥沉积物样品的 Cd 含量均低于 414ng/g^①。底泥沉积物是否受到铅锌矿区的影响,其 Cd 含量差距巨大,表明珠江三角洲 Cd 的高含量主要来源为西江、北江流域含 Cd 的铅锌矿物。由此笔者认为,西江、北

表 5 北江流域典型铅锌多金属矿区 Cd 含量均值²⁾

Table 5 Cd content of typical lead-zinc polymetallic ore districts in Beijiang River basin

矿区名称	仁化凡口	乐昌杨柳塘	连南大麦山	曲江大宝山	连平大尖山
含量/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	353.12	341.30	229.86	406.46	454.04

江流域相对富 Cd 的岩石风化的产物,特别是具高强度 Cd 含量的铅锌多金属矿区,是西江、北江冲积区 Cd 高含量的主要来源。

那么,珠江三角洲第四纪沉积物 Cd 含量的高值区在西江、北江冲积区分成两大片区,并集中于西江、北江河流开始分道,平原区开始接受沉积,靠近物源的三角洲起始区域和三角洲物质入海前缘地带(海陆交互作用最为强烈的滨海区域)(图 2),又是什么原因呢?初步分析表明,这可能与 Cd 在表生环境中的地球化学性质和沉积介质的物理化学性质有关。

晚更新世以来,珠江三角洲在西江、北江冲积区西北部的沉积物主要为洪泛平原堆积^[21],在该沉积区揭露第四系的钻孔剖面显示,沉积物粒级偏粗,以粗砂、粗中砂为主。碎屑物搬运距离短、堆积靠近物源区为该地区第四纪沉积的一个显著特征。在地表风化条件下,Cd 含量表现稳定,且氧化慢、不易活动,主要以矿物颗粒的形式滚动跃移。这部分 Cd 搬运迁移的能力较差,在物源区附近,当河流水道开始分散、水动力减弱时便会固定沉积。西江、北江携带高含量 Cd 的碎屑物在三角洲靠陆后缘的地带堆积,形成近源的连续性好、含量水平高的 Cd 高值区。

珠江三角洲东南濒海沉积区,河流入海前缘的沉积物晚更新世中期以来均为河口湾泥质沉积^[21],在该沉积区域的中山民众、番禺万顷沙地区,揭露第四系的钻孔剖面显示,沉积物粒级偏细,以粉砂、粉砂质淤泥为主。沉积物受大陆水体与海洋水体相互作用的控制,富含有机质和泥质是该地区第四纪沉积的一个显著特征。在表生作用条件下,含 Cd 岩石矿物的风化是一个生物土壤化学过程,在该过程中 Cd 主要以 Cd^{2+} 的可溶性化合物进入表生环境,进而形成某些络合离子,如 CdOH 、 CdHCO_2^+ 、 $\text{Cd}(\text{OH})_3^-$ 、 $\text{Cd}(\text{OH})_4^{2-}$ 、 CdSO_4 等^[17],且由于 Cd 具有较大的离子半径和较低的能量系数,可在水

溶液中进行搬运,能长期停留在水溶液中^[19]。但是,由于 Cd 具有极强的主极化能力,易被粘土矿物或土壤中的胶体溶液强烈吸附,尤其当环境为碱性或偏碱性条件时将形成碳酸盐和氢氧化物的沉淀,Cd 的这一地球化学性质使它不易迁移入海。在三角洲东南沉积区河流入海前缘,沉积介质的物理化学性质如粒度、有机质、酸碱度发生很大转变,沉积物颗粒变细、有机质增多、pH 值由中偏酸性转变为中偏碱性,Cd 主要以粘土矿物和氧化物结合态、残留态的形式进入土壤^[22-23],致使珠江三角洲第四纪沉积物在海陆交互作用强烈的东南濒海沉积区,形成 Cd 含量高值区。

5 结 论

(1)珠江三角洲第四纪沉积物的 Cd 含量地区差异较大,西江、北江冲积区为主要富集区,潭江和东江冲积区为背景区。

(2)物质来源、沉积物粒度、沉积环境与有机质含量共同影响了珠江三角洲第四纪沉积物 Cd 的含量分布,西江、北江冲积区受控于富 Cd 的泥盆系、石炭系砂页岩,而东江、潭江沉积区主要由贫 Cd 的燕山期花岗岩限定;沉积物平均粒径(φ 值)与 Cd 含量存在显著的正相关关系;另外,温暖湿润、海陆交互作用强烈的沉积环境与富含有机质的地区有利于 Cd 的聚积富集。

(3)西江、北江流域相对富 Cd 的岩石风化的产物,特别是具高强度 Cd 含量的铅锌多金属矿区,是西江、北江冲积区 Cd 高含量的主要来源。

(4)珠江三角洲第四纪沉积物 Cd 的高含量区分成西江、北江西北部和东南濒海两大片区,究其原因,前者由区域发育的铅锌多金属矿控制,后者则受海陆交互作用的沉积环境的影响。

致谢:在工作过程中得到广东省地质局赖启宏、中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所周国华教授级高级工程师的悉心指导,广东省地质调查

院《广东省珠江三角洲经济区农业地质与生态地球化学调查》项目组提供了大力协助,在此一并致以衷心的感谢。

参考文献

- [1]朱梅年,危克周.Cd 的环境生物地球化学与健康[J].地质地球化学,1981,10:22-26.
- [2]陈涛.Cd 污染及其防治[J].土壤通报,1981,1:13-46.
- [3]宗良纲,徐晓炎.土壤中 Cd 的吸附解吸研究进展[J].生态环境,2003,12(3):331-335.
- [4]成杭新,杨忠芳,奚小环,等.长江流域沿江 Cd 异常源追踪与定量评估的研究框架[J].地学前缘,2005,12(1):261-272.
- [5]成杭新,杨忠芳,奚小环,等.长江流域沿江 Cd 异常示踪与追源的战略与战术[J].第四纪研究,2005,25(3):285-291.
- [6]马瑾,潘根兴,万洪富,等.珠江三角洲典型区域土壤重金属污染探查研究[J].土壤通报,2004,35(5):636-638.
- [7]赖启宏,杜海燕,方敬文,等.珠江三角洲冲积平原土壤 Cd 高含量区形成原因[J].农业环境科学学报,2005,24(4):746-750.
- [8]张菲娜,赖启宏,林杰藩.珠江三角洲地区土壤 Cd 元素生态效应评价[J].现代农业科学,2009,16(6):77-78.
- [9]刘激,欧阳秀珍,周英,等.珠江口底泥元素含量分布特征及其地球化学意义[J].热带海洋学报,2010,29(1):116-125.
- [10]陈玉娟,温琰茂,柴世伟.珠江三角洲农业土壤重金属含量特征研究[J].环境科学研究,2005,18(3):75-87.
- [11]迟清华,鄢明才.应用地球化学元素丰度数据手册[M].北京:地质出版社,2007.
- [12]黄镇国,李平日,张仲英,等.珠江三角洲形成发育演变[M].广州:科学普及出版社广州分社,1982.
- [13]丁喜桂,叶思源,高宗军.粒度分析理论进展及其应用[J].世界地质,2005,24(2):203-207.
- [14]赵一阳.中国海大陆架沉积物地球化学的若干模式[J].地质科学,1983,4:307-314.
- [15]曹伯勋.地貌学及第四纪地质学[M].武汉:中国地质大学出版社,1995:7-12.
- [16]蓝先洪,马道修,徐明广,等.珠江三角洲若干地球化学标志及指相意义[J].海洋地质与第四纪地质,1987,7(1):39-49.
- [17]马振东,张德存,闭向阳,等.武汉沿长江、汉江 Cd 高值带成因初探[J].地质通报,2005,24(8):740-743.
- [18]高山,陈建斌,王果.淹水条件下有机物料对潮土外源 Cd 形态及化学性质的影响[J].植物营养与肥料学报,2003,9(1):102-105.
- [19]刘英俊,曹励明,李兆麟,等.元素地球化学[M].北京:科学出版社,1984:372-377.
- [20]杨忠芳,成杭新,奚小环,等.区域生态地球化学评价思路及建议[J].地质通报,2005,24(8):688-693.
- [21]龙云作,霍春兰,司桂贤,等.对珠江三角洲沉积特征和沉积模式的一些认识[J].海洋地质与第四纪地质,1985,5(4):49-57.
- [22]杨忠芳,陈岳龙,钱鍾,等.土壤 pH 值对 Cd 存在形态影响的模拟实验研究[J].地学前缘,2005,12(1):252-260.
- [23]廖敏,黄昌勇,谢正苗.pH 值对 Cd 在土水系统中的迁移和形态影响[J].环境科学学报,1999,19(1):81-86.
- ① 周国华.珠江水系生态地球化学评价.中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所,2009.
- ② 肖光铭.《广东省资源潜力评价》项目报告.广东省地质调查院,2010.