

# 秋季黄海和东海海域沉降颗粒物及其地球化学组成

倪建宇<sup>1,2,3</sup>, 张 美<sup>2,3</sup>, 刘小涯<sup>2,3</sup>, 林以安<sup>2,3</sup>

(1 国家海洋局海底科学重点实验室, 浙江 杭州 310012; 2 国家海洋局 第二海洋研究所, 浙江 杭州 310012;

3 国家海洋局海洋生态与生物地球化学重点实验室, 浙江 杭州 310012)

关键词: 沉降颗粒物; 地球化学组成; 沉降通量; 黄海和东海

中图分类号: P722 5,6; P736 4<sup>+</sup> 1

文献标识码: A

文章编号: 0253-4193(2006)01-0158-05

## 1 引言

水体中的颗粒物对于海水中物质的迁移有着重要的作用, 已有的研究表明, 海水中溶解态元素和颗粒物之间的相互作用决定了微量元素和常量元素在海洋中的分布<sup>[1]</sup>. 虽然近岸水体只占全球海洋表面的小部分, 但河流搬运的陆源物质最终将通过近岸水体进入外海, 目前普遍认为海岸带在物质迁移过程中起着极为重要的过滤器作用<sup>[2-3]</sup>. 黄海和东海作为具有宽阔陆架的边缘海, 每年大量来自陆地的物质在这里沉积、迁移, 其海域内的沉降颗粒物不仅是陆源入海物质的主要组成部分, 也是人类活动入海污染物的主要载体. 关于黄海和东海海域有机质(POM, POC)的输入输出通量及其与水体生物活动的关系以及悬浮颗粒物的分布和输运先后有多个项目对此进行了详细的研究<sup>[4-6]</sup>, 但有关沉降颗粒物中微量元素的研究不多, 且主要局限于各个主要河流的河口地区<sup>[7]</sup>和冲绳海槽一带<sup>[8-9]</sup>以及东海北部<sup>[10]</sup>, 本文将主要讨论 2000 年秋季黄海和东海海域沉降颗粒物中常量元素和微量元素的分布特征, 并计算其沉降通量.

## 2 样品采集和分析

样品采自 2000 年“东方红 2”号科学考察船秋季航次(10 月 15 日至 11 月 7 日), 采样站位见图 1 和表 1. 采用自行设计的颗粒物捕获器分层收集沉

降颗粒物, 为了能采集足够用于分析的沉降颗粒物, 我们主要采集了该航次 5 个连续站的样品. 采样器在投放前, 收集杯内装满采用 0.45 μm 醋酸纤维滤膜过滤的站位处表层海水, 捕获器回收后, 经挑拣出可见的生物碎片和遗骸后, 把收集的颗粒物离心分离(4 000 r/min), 并用亚沸蒸馏水脱盐后 60 °C 下干燥至恒重定质量, 分析前进一步碾磨混匀后称取约 0.100 g 样品, 经三酸法(HNO<sub>3</sub>+HClO<sub>4</sub>+HF)硝化后采用 ICP-AES (TLASMA STEG-I, 美国 Leeman 公司)在浙江大学分析测试中心分析了钙、

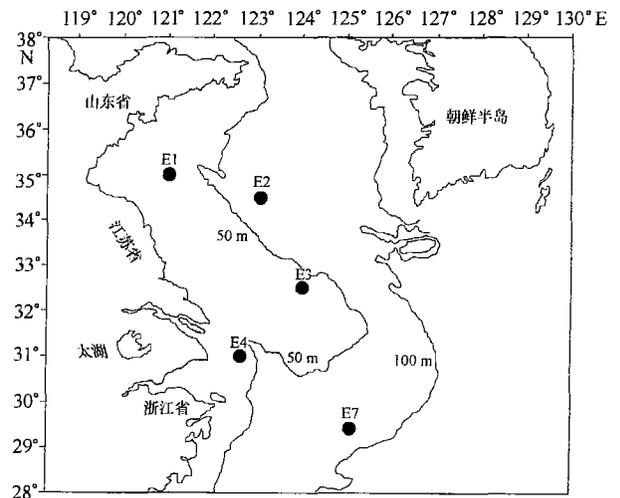


图 1 2000 年秋季(10 月)黄海和东海生态系统动力学航次连续站分布图

收稿日期: 2004-03-19; 修订日期: 2005-06-13

基金项目: 国家重点基础研究发展规划资助项目(G1999043704); 国家自然科学基金青年基金资助项目(40206012).

作者简介: 倪建宇(1969—), 男, 江苏省靖江市人, 研究员, 博士, 从事海洋化学和海洋环境地球化学研究. E-mail: jianyuni@sio.zj.edu.cn

铁、镁、钾、钠、钛和磷等常量元素以及锰、铬、镍、铜、钡、锶、钒和钴等微量元素, 采用双样和 EMS-1 近海洋沉积物标样控制分析精度, 钾、钠、钙、锰、铁的分析精度为 2.0%, 其余元素为 3.5%, 分析结果见表 2

### 3 结果和讨论

黄海和东海每年从长江和黄河等入海径流接受大量的泥沙(大于 1.6 Gt/a)<sup>[11]</sup>, 这些泥沙中的大部分将沉积在大陆架, 其余部分将被输送到大陆斜坡、

冲绳海槽。黄海和东海海流系主要由沿岸流和东海流组成, 黄海沿岸流和闽浙沿岸流沿岸由北向南, 西太平洋的暖流——黑潮沿陆架边缘由南向北流经东海, 其分支黄海暖流可深入到南海, 黑潮分支和南海暖流汇合的台湾暖流向北入侵东海直至长江口外。E1 到 E2 站位均处于黄海沿岸流内, 而 E3 站位则处于黄海沿岸流的锋面, E4 站受长江径流和闽浙沿岸流的影响, 而 E7 站则受台湾暖流的控制。

#### 3.1 沉降颗粒物的分布

从表 1 和图 2 可见, 颗粒物在向海方向上其沉

表 1 黄海和东海海域采样站位及沉降通量

站位	位置	水深/m	层次/m	颗粒物量/g	布放时间/h	沉降通量/ $g \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$
E1	35°00' 16" N 121°00' 88" E	38.0	15	1.786	22.5	53.9
			20	0.055	36.0	1.0
E2	34°29' 67" N 123°03' 81" E	75.2	40	0.024		0.5
			55	1.510		28.5
			20	14.436	20.0	490.1
E3	32°30' 22" N 123°59' 88" E	41.9	30	32.883		1116.5
			7	5.414	21.0	175.1
E4	31°00' 01" N 122°37' 96" E	21.3	14	9.158		296.1
			20	0.009	23.0	0.3
E7	29°24' 84" N 125°04' 86" E	81.6	35	0.031		0.9
			50	0.021		0.6
			70	0.400		11.8

降通量呈降低趋势, 而在同一站位, 从表层到底层呈大幅度的增加; 在各个站位中, E3 站位的颗粒物沉降通量最高, 这种空间分布特征主要与黄海和东海海域不同海流的相互作用是分不开的。孙效功等<sup>[12]</sup>根据遥感图像分析发现, 秋季黄海沿岸流由北向南流达长江口外, 来自苏北近岸的高沉降颗粒含量的表层水在黄海沿岸流的携带下向东南迁移, 10月中旬其峰面可达 70 m 等深线, 而此时台湾暖流由南向北流入东海, 最远可达黄海南部, 而 E3 站位正是这些海流交汇之处, 导致黄海沿岸流携带的大量泥沙在此沉降, 因此 E3 站位也是颗粒物沉降通量最大的地方。计算结果表明, E3 站位次表层和近底层的沉降通量分别为 490.1 和 1116.5  $g/(m^2 \cdot d)$ 。对于同一站位, 其近底层的沉降通量要远大于其他层次的沉降通量, 这说明可能受到海底沉积物发生再悬浮而使得大量颗粒再次进入水体发生沉降的影

响<sup>[13]</sup>。

#### 3.2 颗粒物的地球化学组成

黄海和东海海域沉降颗粒物主要来自河流搬运和风力搬运的陆源碎屑、生物活动所形成的生物碎屑以及生物排泄物(如粪团等), 由于不同来源的物质在化学组成上存在着一定的差异, 因此颗粒物的化学组成将是这些物源的综合体现, 以下分别讨论其分布特征。

##### 3.2.1 常量元素

从表 2 可见, 这些元素在空间分布上可分为两类, 一类表现为各站之间变化不大, 这些元素有钠、钛、铁, 它们除了在 E7 站含量较低外, 其余各站的含量变化不大; 另一类则具有明显的空间分布, 如钙和镁表现为由北向南呈增加趋势; 钾的含量则表现为由北向南呈降低的趋势。由于黄海和东海海域主要接受来自长江和黄河所搬运的陆源碎屑物, 它们

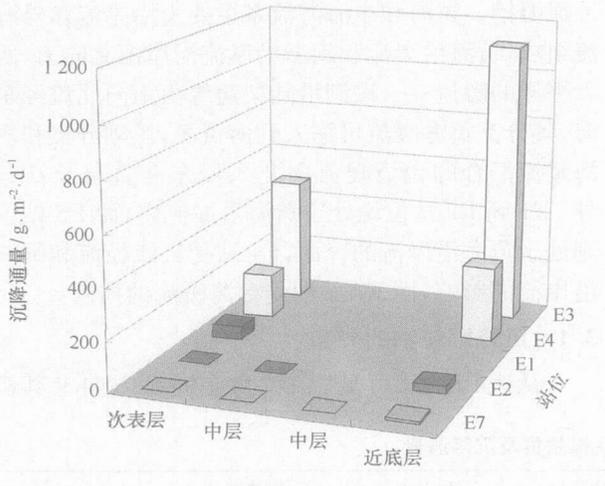


图2 颗粒物沉降通量

的空间分布特征反映了其来源上的差异性<sup>[14-15]</sup>。

表2 沉降颗粒物中常量元素和微量元素分析结果

站点	E1	E2	E3	E4	E7		
水深/m	15	55	20	30	7	14	70
Ca/(%)	2.04	1.83	2.95	2.68	3.00	3.12	2.03
Fe/(%)	4.11	4.63	3.68	3.07	3.83	3.35	1.52
Mg/(%)	1.54	1.81	1.57	1.29	1.60	1.46	2.64
K/(%)	2.29	2.54	2.15	1.24	2.20	2.02	1.29
Na/(%)	1.02	0.80	1.83	1.50	1.57	1.62	0.91
Ti/(%)	0.42	0.41	0.39	0.33	0.41	0.38	0.10
P/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	850	890	818	765	848	735	253
Mn/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	1845	1430	808	645	910	720	275
Cu/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	48.8	64.3	53.0	36.5	50.5	47.0	44.4
Ni/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	40.5	47.3	32.5	28.0	41.3	48.5	15.4
Zn/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	35.3	29.0	24.8	24.0	34.5	25.5	14.4
Ba/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	532.5	435.0	370.0	337.5	397.5	375.0	100.0
Sr/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	146.5	145.3	171.3	152.8	153.0	158.5	206.4
V/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	180.5	215.5	179.8	153.3	195.8	176.8	118.9
Co/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	23.0	25.3	22.8	22.5	27.3	25.5	12.1

### 3.2.2 微量元素

在外海海域,海水中的钡、磷、铜和镍这些元素主要与生物活动有关。从表2可见,钡的含量为100.0~532.5  $\mu\text{g}/\text{g}$ ;磷的含量为253~890  $\mu\text{g}/\text{g}$ ;铜的含量为14.4~35.3  $\mu\text{g}/\text{g}$ ;镍的含量为15.4~48.5  $\mu\text{g}/\text{g}$ 。除了钡从近岸向外海、从表层向底层呈降低趋势的碎屑源的特点外,其余元素均在E7 站位出现低值,而在其他站位之间变化较小。

锰和钒为变价元素,其存在形式主要受氧化还

原环境的控制。在氧化性水体中锰主要以锰的氧化物、氢氧化物壳膜的形式搬运,而钒则主要为铁锰氧化物、黏土类矿物所吸附的形式搬运。铬主要以类质同象的形式存在于氧化物和硅酸盐矿物中,钴主要以黏土吸附和金属有机络合物的形式存在。从表2可见,锰的含量为275~1845  $\mu\text{g}/\text{g}$ ;钒的含量为118.9~215.5  $\mu\text{g}/\text{g}$ ,各站之间变化较小。铬的含量为36.5~64.3  $\mu\text{g}/\text{g}$ ;钴的含量为12.1~27.3  $\mu\text{g}/\text{g}$ 。它们除在E7 站位出现低值外,在其他站位之间变化较小。

表3 方差最大化旋转后的因子得分表

因子	1	2	3
方差贡献(%)	67.7	19.8	7.4
Sr	-0.953	-0.194	
Ba	0.939	0.294	
P	0.883	0.365	0.218
Ti	0.872	0.413	0.253
Cu	0.871	0.302	
Mg	-0.841		-0.499
Fe	0.810	0.566	
Co	0.782	0.419	0.413
Mn	0.781	0.320	-0.481
Ni	0.680	0.592	0.153
Cr	0.118	0.945	-0.270
K	0.511	0.828	
V	0.663	0.730	
Ca			0.983
Na	0.121		0.960

### 3.3 各元素之间的统计分析

为了揭示各元素之间的相互关系,我们采用主成分分析法对其进行了因子分析,经方差最大化旋转后各因子的得分结果见表3。从表3可见,三个因子共解释了所有变量94.9%的变化。因子1由锶、钡、磷、钛、铜、镁、铁、钴、锰和镍组成。由于沉积物和颗粒物中的钛主要来自岩石碎屑,且不受生物活动的影响,因此常被用来作为陆源碎屑的量化标志<sup>[16]</sup>,上述元素和钛构成因子1,说明这些元素可能主要来自陆源碎屑,且该因子与锶和镁等主要以碳酸盐形式存在的元素呈负相关关系,而与铁和锰等主要以氧化物、氢氧化物形式存在的元素呈正相关关系,这表明研究区域内的颗粒物中微量元素主要以非碳酸盐的形式存在。因子2由铬、钾和钒组成;

因子 3 由钠和钙组成. 赵一阳等<sup>[14-15]</sup>的研究表明, 长江沉积物以富含钛、铁、锰、铅、钴、镍、钒和铬为特点, 而黄河沉积物以高钙、钠和锶为特征, 因此, 研究区域内颗粒物的地球化学组成可能更多地受来自长江所搬运的沉积物的影响.

### 3.4 各金属元素的相对富集

为了讨论各金属元素的相对富集, 我们定义了相对富集系数(EF), 即沉降颗粒物中某元素与钛的含量比 $[(M/Ti)_p]$ 与土壤中该元素与钛的含量比 $[(M/Ti)_{soil}]$ 之比. 研究表明, 海水中颗粒物在沉降时将吸附一定量的溶解态铝, 使采用铝作为陆源碎屑的量化指标时将产生一定的偏差<sup>[16]</sup>, 因此我们采用钛作为量化指标:

$$EF = (M/Ti)_{sp} / (M/Ti)_{soil}. \quad (1)$$

由于我国近海中的沉降颗粒物主要来自黄河、长江、珠江等大中型河流, 而这些河流所搬运的沉积物的组成主要与这些河流流域内的岩石类型有关<sup>[7]</sup>, 因此我们相对于我国土壤背景值<sup>[17]</sup>来讨论颗粒物中各元素的相对富集. 根据式(1)计算的富集系数见表 4, 通常认为富集系数的值为 0.5~1.5, 金属元素与背景值相当, 而它的值大于 1.5 则认为金属元素相对富集, 小于 0.5 则相对亏损<sup>[7]</sup>.

从表 4 可见, E7 站除钡以外的其他元素在近底层的颗粒物中明显富集. 钡主要在 E1 和 E2 站富集, 钴和钒则在所有的站位富集, 这些元素的地壳丰度值相对都较低<sup>[18]</sup>, 因此推测这些元素主要受人类活动的影响. 钡、铬、铅、铁、镍和锶在大部分站位表现为相对亏损或弱富集的特点.

表 4 沉降颗粒物中微量元素的富集系数(EF)

站位	E1	E2	E3	E4	E7		
水深/m	15	55	20	30	7	14	70
Fe	1.27	1.46	1.23	1.20	1.20	1.15	1.95
Mn	2.89	2.27	1.36	1.27	1.44	1.25	1.78
Cr	0.73	0.97	0.85	0.69	0.76	0.78	2.75
Ni	1.37	1.62	1.19	1.19	1.42	1.82	2.16
Cu	1.42	1.18	1.08	1.22	1.41	1.14	2.40
Ba	1.04	0.86	0.78	0.82	0.78	0.81	0.81
Sr	0.80	0.80	1.01	1.05	0.85	0.96	4.67
V	2.00	2.42	2.14	2.13	2.19	2.16	5.45
Co	1.65	1.84	1.76	2.03	1.98	2.03	3.61

## 4 结论

本文的研究表明, 秋季黄海和东海海域的沉降颗粒物含量主要受海区内不同水团的混合作用以及海底表层沉积物再悬浮作用的控制, 其沉降颗粒物的含量以及沉降通量均表现为在水团混合最强烈的 E3 站位出现高值.

与我国土壤的化学成分相比, 黄海和东海海域沉降颗粒物中的钡、铬、铜、铁、镍和锶在大部分站位表现为相对亏损或弱富集而锰、钴和钒等则相对富集的特征.

因子分析表明, 沉降颗粒物的地球化学组成呈现出以陆源碎屑来源为主的特征, 受长江搬运的沉积物的影响明显, 而碳酸盐等自生组分则不是其主要构成.

笔者感谢“东方红 2”号所有船员和全体考察队员在样品采集期间所给予的帮助和支持!

## 参考文献:

- [1] BRULAND K W. Trace elements in seawater[A]. RILEY J P, CHESTER R. Chemical Oceanography: Vol. 8[M]. London: Academic Press, 1983. 157—220.
- [2] STATHAM P J, LECLERCQ S, HART V, et al. Dissolved and particulate trace metal fluxes through the central English Channel, and the influence of coastal gyres[J]. Cont Shelf Res, 1999, 19: 2 019—2 040.
- [3] ZWOLSMAN J J G, van ECK G T M. Geochemistry of major elements and trace metals in suspended matter of the Scheldt estuary, southwest Netherlands[J]. Mar Chem, 1999, 66: 91—111.
- [4] ISEKI K, OKAMURA K, KIYOMOTO Y. Seasonality and composition of downward particulate fluxes at the continental shelf and Okinawa Trough in the East China Sea[J]. Deep-Sea Res(II), 2003, 50: 457—473.
- [5] 庞重光, 白虹, 杨作升, 等. 东海泥质和砂质沉积区悬浮物垂向分布的季节变化特征[J]. 海洋科学, 2001, 25(8): 34—37.
- [6] 郭志刚, 杨作升, 张东奇, 等. 冬、夏季东海北部悬浮体分布及海流对悬浮体运输的阻隔作用[J]. 海洋学报, 2002, 24(5): 71—80.
- [7] ZHANG J, LIU C L. Riverine composition and estuarine geochemistry of particulate metals in China weathering features, anthropogenic impact and chemical fluxes[J]. Estuarine Coastal and Shelf Science, 2002, 54: 1 051—1 070.
- [8] KATAYAMAA H, WATANABE Y. The Huanghe and Changjiang contribution to seasonal variability in terrigenous particulate load to the Okinawa Trough[J]. Deep-Sea Res(II), 2003, 50: 475—485.

- [9] HUNG J J, LIN C S, HUNG G W, et al. Lateral transport of lithogenic particles from the continental margin of the southern East China Sea[J]. *Estuarine Coastal & Shelf Sciences*, 1999, 49: 483—499.
- [10] 詹滨秋, 黄华瑞, 庞学忠, 等. 颗粒物质和微量金属在东北部的沉积通量[J]. *海洋与湖沼*, 1993, 24(1): 51—58.
- [11] MILLIAN J D, MEADER H. Worldwide delivery of river sediment to the oceans[J]. *J Geology*, 1983, 91: 1—21.
- [12] 孙效功, 方明, 黄伟. 黄、东海陆架区沉降体运输的时空变化规律[J]. *海洋与湖沼*, 2000, 31(6): 581—587.
- [13] HOSHIKA A, TANIMOTO A T, MISHIMAA Y, et al. Variation of turbidity and particle transport in the bottom layer of the East China Sea[J]. *Deep-Sea Res (II)*, 2003, 50: 443—455.
- [14] 赵一阳, 鄢明才. 黄河、长江、中国浅海沉积物化学元素丰度比较[J]. *科学通报*, 1992, 37(13): 1 202—1 204.
- [15] 赵一阳, 鄢明才. 中国浅海沉积物地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1994. 203.
- [16] MURRAY R W, LEINEN M. Scavenged excess aluminum and its relationship to bulk titanium in biogenic sediment from the central equatorial Pacific Ocean[J]. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 1996, 60(20): 3 869—3 878.
- [17] 魏复盛, 陈静生, 吴燕玉, 等. 中国土壤环境背景值研究[J]. *环境科学*, 1991, 12(4): 12—19.
- [18] TAYLOR S R, MCLENNAN S M. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*[M]. Malden, MA: Blackwell, 1985, 312.

## Sinking particles and their geochemical compositions in the Huanghai and East China Seas in autumn

NI Jian-yu<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Mei<sup>2,3</sup>, LIU Xiaoya<sup>2,3</sup>, LI Yifan<sup>2,3</sup>

(1. Key Laboratory of Submarine Geosciences of State Oceanic Administration, Hangzhou 310012, China; 2. Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Hangzhou 310012, China; 3. Laboratory of Marine Ecosystem and Biogeochemistry of State Oceanic Administration, Hangzhou 310012, China)

**Key words:** sinking particles; composition; sediment flux; Huanghai and East China Seas