

海洋表层沉积物再悬浮的诱因及其对生源要素循环的影响

The inducements of resuspension of sea surface sediment and their effects on recycle of biogenic elements

王丕波^{1,2}, 宋金明¹, 郭占勇^{1,2}, 李鹏程¹

(1. 中国科学院 海洋研究所, 山东 青岛 266071; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

中图分类号: P59 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2005)10-0077-04

颗粒物在向海底沉降的同时,在自然因素、生物扰动以及人为因素等作用下,海洋表层沉积物会再悬浮,从而引起生源要素在海水和沉积物中的再分配,进而对生物食物网、初级生产力产生影响。特别是在陆架边缘海,由于海水较浅,再悬浮剧烈,对生源要素的垂直转移及其生物地球化学过程影响严重,由于再悬浮的诱因很多,过程复杂,所以定量研究表层沉积物的再悬浮还有很多困难。作者将主要对表层沉积物再悬浮的诱因及其对生源要素循环的影响进行总结归纳,以期促进这方面的研究。

1 表层沉积物再悬浮的形成原因

沉积物再悬浮是一个比较普遍的物理现象,无论在深海区、浅海区还是内陆河均有此类现象发生^[1,2],特别是在河流入海口、潮间带、浅海区等与人类关系比较密切的地区此类现象更为明显。风浪、潮汐等自然现象,蛤类等底栖生物的扰动,人类的挖掘采沙、拖网捕鱼、航船运输等均可导致沉积物的再悬浮。

1.1 动力因素引起的再悬浮

风浪、潮汐、潮流这些永无休止的海水运动存在于每个季节,是海底沉积物再悬浮的重要诱因之一,特别在浅水区更为明显。Booth 结合卫星遥感和同位素技术对美国路易斯安那州的 the Barataria Basin 的研究发现,风速和表层的浑浊度有很好的相关性,风速为 4 m/s 时,就可以导致研究区域 50% 表层沉积物的再悬浮。当风速达到 8 m/s 时,将有 80% 的表层沉积物再悬浮^[3]。潮汐在大陆架和大陆坡上产生的剪切力也足以导致表层泥沙再悬浮,特别是在风浪难以影响的深水处,潮汐的再悬浮作用可能是底层雾状层形成的主要作用。李九发等^[4]通过对长江口盐水楔和最大浑浊带的研究观测,发现长江口泥沙在近底潮流速大于 0.4 m/s 就容易被再悬浮。

这些河道一般在涨潮或落潮后 0.5~1.0 h 近底流速可超过 0.5 m/s,转流后 2~3 h 流速出现最大值,此时水流紊动强,床面普遍发生冲刷,使整个垂线含沙量出现最大值。东海陆架区由于台湾暖流、黄海沿岸流和黄海暖流汇合形成漩涡区,每年 4~5 月开始直至秋季存在上升流,导致沉积物再悬浮加重。在某些站位再悬浮颗粒物在沉降颗粒物中占相当高的比率。在离海底 5 m 的水层,再悬浮颗粒物占总沉降颗粒物的 96%,在离海底 15 m 的水层,再悬浮颗粒物占总沉降颗粒物的 32.9%^[5]。当然无论是风浪、潮汐还是潮流最终都是通过波或者水流的形式与底层床面发生作用,然而波或者水流往往都是同时存在的,要导致表层泥沙再悬浮,就必须满足波、流与底泥的剪切力达到可以搬动沉积颗粒物的程度。剪切力与再悬浮量的关系可总结如下: $R = M(\tau - \tau_{crs}) / \tau_{crs}$ ($\tau > \tau_{crs}$)。R 为沉积物在再悬浮过程中进入水体方向的通量,单位: kg/(m²·s)。τ 为床面的剪切力,单位: N/m²。τ_{crs} 为床面的临界剪切力,单位: N/m²。M 为再悬浮系数,单位: kg/(m²·s)。当 $\tau < \tau_{crs}$ 时,再悬浮时沉积物向水体方向的通量为零。M 的值主要取决于沉积物的组成、密度、厚度、类型等,环境不同 M 的值也就不同^[6]。对于波流共存时的剪切力的计算,国内外均有报道,在此不再详述。

1.2 生物扰动引起的再悬浮

大部分海洋沉积物都含有动物区系,它们在调节

收稿日期: 2004-08-03; 修回日期: 2005-01-20

基金项目: 中国科学院知识创新工程重大项目(KZCX1-SW-01-08)

作者简介: 王丕波(1979),男,山东即墨人,硕士,主要从事海洋化学研究, E-mail: wppapple@tom.com; 李鹏程,通讯作者, E-mail: peli@ms.qdio.ac.cn



水层-沉积物界面物质通量的作用日益受到重视。生物扰动造成的再悬浮可以分为直接生物再悬浮和间接生物再悬浮。间接生物再悬浮主要是指底栖生物通过建造土墩、洞穴等改造海底微地貌活动,从而使沉积物变得疏松,更易再悬浮。底栖生物还可以通过分泌粘液来增加沉积物的粘度,从而加大再悬浮的难度,硅藻膜也有此方面作用。此外底栖生物可以通过改变沉积物的空隙度、水溶性、渗透性等物理参数来影响再悬浮的程度^[7]。直接生物再悬浮即通过生物的直接运输, Bender 和 Davis 对 Narragansett Bay 的 *Yoldia limatula* 的直接生物再悬浮进行专门研究,认为它的壳长和引起的悬浮量成正相关关系, 14 mm 壳长的 *Y. limatula* 每年的悬浮量可达 440 g 沉积物(干质量)。考虑到此海区 *Y. limatula* 的数量, *Y. limatula* 引起的总悬浮沉淀物量可达到 15.8~24.6 kg/(m²·a)^[8]。

1.3 人类活动引起的再悬浮

随着人类活动的日益扩展,人类对海洋的影响也逐渐加大。人类挖掘采沙、拖网捕鱼、航船运输、铺设海底电缆、管道等活动都可以引起海底沉积物的再悬浮^[9]。Warnkena 等^[10]对 Galveston Bay 的拖网捕虾对海底沉积物的影响作过专门研究,当表层 1 cm 的沉积物受到扰动时, NH₄⁺、Mn、Cd 的通量明显升高, Ni、Cu、Pd 没有明显变化。当扰动控制在 1 mm 时仅 Cd 的通量明显变化。这是因为底层沉积物处于中性或者还原性环境中,在这种环境中金属元素可以和硫化物稳定地结合,但当拖网捕虾或挖掘采沙时,破坏了底泥的还原性环境,促使金属元素进入水体,提高了金属元素的生物利用率。据 Warnkena 估计假若每天有 100 只船在此研究区域捕虾可导致 2% 的海底受到影响,因此拖网捕虾对海底沉积物的再悬浮作用不可低估。

2 表层沉积物再悬浮对生源要素循环的影响

生源要素是海洋中基础生物生存繁殖的能量来源,同时生源要素又具有复杂多变的化学地质作用。如果环境中缺乏这些无机营养盐,初级生产力就要受到限制,过高则会产生富营养化,导致赤潮的发生。从而对整个生态环境产生影响。在浅海区、潮间带、入河口等边缘海区由于深度相对浅,再悬浮的影响相对较大,这也是边缘海研究比较复杂的一个重要原因。

2.1 对 N、P、Si、C 等元素循环的影响

再悬浮对上覆水源要素的影响程度主要通过

现场观测和实验室模拟来研究,再悬浮中由于再矿化率增高,间隙水与上覆水混合,大部分生源要素的浓度一般都会得到提高,表 1 中 Tengberg^[11]通过对表层沉积物再悬浮的研究证明:再悬浮过程中 P 的通量降低, NO₂-N, NO₃-N 形式的氮通量升高, NH₄⁺-N 形式的氮通量无明显变化, C 通量降低。P 通量的降低可能是因为颗粒物对 P 的吸附作用引起的; NO₂-N, NO₃-N 形式的氮通量升高可能是因为氮由还原性的底泥进入氧化性相对较高的水体,硝化速率大于反硝化速率; NH₄⁺-N 形式的氮通量无明显变化,这说明此海区再悬浮作用对 NH₄⁺-N 形式的氮无明显影响。对于 P 和 C 的变化,钱常萍^[12]和 Komada^[13]通过模拟实验却得出与 Tengberg 相反的结论。其实在再悬浮过程中磷的释放和吸收作用是同时存在的,何种作用为主,取决于上覆水中磷酸盐的浓度及扰动强度等因素的综合作用,扰动强度越大,上覆水中的磷酸盐浓度越低越有利于磷酸盐的释放,反之则吸附作用是主要的^[14]。再悬浮过程中由于大量颗粒物再悬浮,细菌的分解能力加强,一般都会出现 C 通量的增加,这已经由许多实验证明,但 Tengberg 得出再悬浮过程中 C 通量降低,这可能是由于研究区域的营养化程度不同, Tengberg 研究的区域属于贫营养化区,可供细菌分解的耐蚀颗粒物在再悬浮过程被稀释,导致再矿化率的降低。由此可见,对于磷酸盐,在再悬浮过程中若海水中磷酸盐浓度相对较低且扰动较强,则磷酸盐会出现释放,反之会出现吸附。对于 NO₂-N, NO₃-N 形式的氮,由于从还原性相对强的沉积物中进入氧化性相对强的水体中一般都会引起水体浓度的增加。C 通量的变化受到所在海区营养化程度的影响,在富营养海区再悬浮过程中 C 通量会增加,然而在贫营养海区则会出现 C 通量的降低。

2.2 对微生物食物网的影响

海洋微生物作为海洋食物链的下层,对整个海洋生物链具有重要影响。再悬浮对微生物食物网的影响主要通过再悬浮过程中的再矿化及可溶性的营养物质和有机颗粒物与水体的混合作用,转变为藻类和细菌更易利用的营养形式,以及悬浮颗粒的表面积更利于细菌吸附。Garsteckl 曾对沉积物再悬浮对微生物食物网带来影响作过专门研究,发现在再悬浮过程中微型浮游生物、微型自养生物、根足虫、和异养浮游生物的丰度会有明显提高,并与悬浮物的浓度呈正相关。海底硅藻和纤足虫与悬浮物也有类似关系^[15]。

表 1 再悬浮对生源要素的影响

采样地点	泥质	PO ₄	NH ₄	NO ₃ -NO ₂	Si(OH) ₄	TC
		(μmol/L)	(μmol/L)	(μmol/L)	(μmol/L)	(μmol/L)
Mavhol- msbadan	软泥	- 47 ± 11	56 ± 60	323 ± 14	1.8	- 8 ± 5
	软泥	- 94 ± 45	72 ± 195	1 153	4.02	- 9 ± 1
Hudson River- 1	沙 88%	-	-	-	-	13
	泥 10%					
	粘土 0.7%					
Hudson River- 2	沙 50%	-	-	-	-	26
	泥 46%					
	粘土 3.6%					
Lower New York Bay	沙 83%	-	-	-	-	59
	泥 16%					
	粘土 0.5%					
崇明东滩低潮滩	粉沙	0.6	-	12.1	-	-

注：“-”表示再悬浮后相对再悬浮前生源要素的浓度降低

2.3 再悬浮引起的二次污染

海洋的自净机理主要通过稀释作用和固相吸附作用,当污染物随河水流入大海时,海底沉积物将成为污染物的一个重要的源和汇,由于污染物自身的结构特性和赋存条件的特殊性,他们的存在周期可能达到十几年或几十年,使得海底泥成为潜在的污染物,即使在外在污染物消失了一段很长时间,也会因生物地球化学条件(氧化还原条件的变化、再悬浮、生物扰动等)的变化引起二次污染。

李剑超等^[16]对南京玄武湖等污染较重河流底泥再悬浮对水质的影响途径作过报告,在冲刷悬浮的短时间作用下,对水质影响的作用顺序为间隙水的混合大于底部静态底泥的释放,而底部静态底泥的释放远大于悬浮颗粒的污染物释放,所以,在底泥冲刷悬浮的过程中,底泥间隙水的混合作用是影响水质的主要因素。然而 Martinol 通过对 Mersey Estuary, UK(一个潮汐引起再悬浮现象明显的地区)的研究发现在此区域悬浮颗粒物的释放占主导作用。他通过对 Co, Ni, Pb, Zn 的轴向分布发现,这些金属离子在迁移过程中另有来源。分析认为可能的来源有:间隙水与上覆水的混合和悬浮颗粒物向上覆水的释放。间隙水要起到显著作用必须满足沉积物达到缺氧使早期成岩成为可能,但是此河口由于潮汐现象比较明显且剧烈,导致河底持续性的再悬浮和连续充氧,使早期成岩不能发生,因此间隙水对上覆水金

属离子的增加贡献不大^[17]。因此,在潮汐、波浪活动剧烈频繁,再悬浮持续发生的河段,悬浮颗粒物上的解吸附作用对离子的增加起主导作用。而对于相对平静的河段,间隙水的混合作用是影响水质的主要因素。

根据金属元素的地球化学行为,可将金属元素大略分为两类:一类是金属阴离子化合物(Si, P, N, S, Mo, V, U),它们在间隙水和底层水中有相似的浓度,在再悬浮过程中没有明显的浓度变化。另一类是金属阳离子化合物(Co, Mn, Ni, Zn, Cu, Cd, Pd, Fe),它们在间隙水中的浓度明显高于上覆水,如果物理化学环境保持不变,在再悬浮过程中离子浓度明显增高,再悬浮后出现对悬浮颗粒物明显的吸附作用,吸附的强度除与金属离子本身有关外,还取决于悬浮颗粒物的类型。例如: Mn 的氧化颗粒物对大部分重金属的吸附能力大于沉淀物的吸附能力。然而在还原环境下和有强络合剂条件下,这些金属离子对悬浮颗粒物的竞争吸附作用将会减弱。Saulnier^[18]通过研究发现氧化性的沉积物再悬浮不会引起 Fe, Mn, As 在水体的明显增加。而当再悬浮将缺氧性的沉积物带入到氧化性水体时, Fe, Mn, As 离子在水体中的浓度会明显增加。

3 研究展望

随着海洋研究的日渐深入,影响海洋生物地球化学的任何过程都会引起全球的巨大兴趣。海洋表层

沉积物的再悬浮,不断引起生源要素在沉积物和上层水体的再分配,从而影响周围的生物食物网及其生态系统。特别是陆架边缘海,由于海水相对较浅,再悬浮剧烈,导致大量已经沉降到底层的颗粒物重新悬浮参与颗粒物垂直转移过程,但因为无法定量给出再悬浮颗粒物的比例,边缘海的颗粒物垂直转移过程研究很少。然而陆架边缘海恰恰是与人类生活联系紧密的地区,有很多报道认为陆架边缘海在固碳作汇方面有重要作用。因此如何确定边缘海沉积物再悬浮的比例必将引起研究者的关注,成为海洋科学热门的研究领域之一。

参考文献:

- [1] Thomsen L, Graf G, Martens V, *et al.* An instrument for sampling water from the benthic boundary layer[J]. **Cont Shelf Res**, 1994, 14: 871– 882.
- [2] Vangriesheim A, Khripounoff A. Near-bottom particle concentration and flux: temporal variations observed with sediment traps and nephelometer on the Meriadzek Terrace, Bay of Biscay[J]. **Prog Oceanogr**, 1990, 24: 103– 116.
- [3] Booth J G, Miller R L, McKee B A, *et al.* Wind induced bottom sediment resuspension in a microtidal coastal environment[J]. **Cont Shelf Res**, 2000, 20: 785– 806.
- [4] 李九发,何青,徐海根.长江河口浮泥形成机理及变化过程[J]. **海洋与湖沼**, 2001, 32(3): 302– 310.
- [5] 宋金明.中国近海沉积物海水界面化学[M].北京:海洋出版社,1997,200– 202.
- [6] Ribbe J, Holloway P E. A Model of suspended sediment transport by internal tides[J]. **Cont Shelf Res**, 2001, 21: 395– 422.
- [7] Graf G, Rosenberg R. Bioresuspension and biodeposition: a review [J]. **J Marine Syst**, 1997, 11: 269– 278.
- [8] Bender K, Davis W R. The effect of feeding by yoldia limatula on bioturbation[J]. **Ophelia**, 1984, 23: 91– 100.
- [9] Chong E C, Chou L M. Effects of reclamation on benthic communities in an estuary (Sungei Ponggol) in Singapore [A]. Chou L M, Wilkinson C R. Third Asian Science and Technology Week Conference Proceedings, Department of Zoology [C]. NUS and NSTB, Singapore, 1992. 205– 211.
- [10] Warnken W K, Gill A G, Dellapenna M T, *et al.* The effect of shrimp trawling on sediment oxygen consumption and the fluxes of trace metals and nutrients from estuarine sediments [J]. **Estuar Coastal Shelf Sci**, 2003, 57: 25– 42.
- [11] Tengberg, A, Almroth E, Hall P. Resuspension and its effects on organic carbon recycling and nutrient exchange in coastal sediments: *in situ* measurements using new experimental technology [J]. **J Exp Mar Biol Ecol**, 2003, 119– 142.
- [12] 钱常萍,陈振楼,胡玲珍,等.崇明东滩沉积物再悬浮对沉积物水界面氮、磷交换行为的影响[J]. **环境科学**, 2003, 24(5): 114– 119.
- [13] Komada T, Reimer C E. Resuspension-induced partitioning of organic carbon between solid and solution phases from a river-ocean transition [J]. **Mar Chem**, 2001, 76: 155– 174.
- [14] 张路,范成新,秦伯强,等.模拟扰动条件下太湖表层沉积物磷行为的研究[J]. **湖泊科学**, 2001, 13(1): 35– 42.
- [15] Garsteckl T, Wickham S A, Arndt H. Effects of experimental sediment resuspension on a coastal planktonic microbial food web [J]. **Estuar Coastal Shelf Sci**, 2002, 55: 751– 762.
- [16] 李剑超,褚君达,丰华丽.河流底泥冲刷悬浮对水质影响途径的实验研究[J]. **长江流域资源与环境**, 2002, 2: 137– 140.
- [17] Martinol M, Turner A, Nimmo M, *et al.* Resuspension, reactivity and recycling of trace metals in the Mersey Estuary, UK [J]. **Mar Chem**, 2002, 77: 171– 186.
- [18] Saulnier I, Mucci A. Trace metal remobilization following the resuspension of estuarine sediments: Saguenay Fjord, Canada [J]. **Appl Geochem**, 2000, 15: 203– 222.

(本文编辑:张培新)