

基于沉积速率确定海洋沉积物的监测频率

洛 昊, 梁 斌, 鲍晨光, 李 冕, 于春艳, 马明辉

(国家海洋环境监测中心, 辽宁 大连 116023)

摘要: 为建立一套海洋沉积物监测频率的设计方法体系, 作者根据中国海洋沉积物趋势性监测的特点和存在的问题, 结合国内外海洋沉积物监测方案的设计理论和经验, 建立了依据沉积速率确定海洋沉积物监测频率的方法和标准; 基于 ^{210}Pb 测年法和 IDW 空间插值法, 绘制了中国监测海域的沉积速率空间分布图, 并设计了不同空间尺度的海洋沉积物监测频率优化方案。结果显示, 中国近岸区域沉积速率高于远海, 河口区域沉积速率高, 海湾沉积速率差异显著。其中, 沉积速率高于 1 cm/a 的海域, 监测频率为每年 1 次, 如黄河口、长江口等河口区域; 沉积速率低于 1 cm/a 的海域, 监测周期为 5 a, 如渤海中部, 黄海、东海远海区域等; 个别沉积速率极低的海域, 监测周期为 10 a, 如南沙海域($\leq 2\text{ cm/1000 a}$)。监测频率高的区域主要集中在近岸沉积速率高的海域, 而近海和远海沉积速率低的区域监测频率可适当降低。

关键词: 海洋环境; 沉积物; 监测频率; 沉积速率; 优化

中图分类号: X832 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2015)10-0052-08

doi: 10.11759/hyhx20140623002

沉积物作为重要的海洋环境介质, 对海洋污染信息具有放大作用, 对海洋污染事件的时间记录具有时序性, 所以沉积物监测对于反映海洋环境健康具有意义重大^[1], 而且沉积物监测能以较小采样样本和较低采样频率反映较大时空尺度内海洋环境污染及气候变化趋势。1984 年 5 月, 随着“全国海洋环境污染监测网”的建立与运行, 中国正式将沉积物监测纳入到海洋环境趋势性监测计划中。此后, 沉积物监测频率也经历了 3 次调整, 2000 年之前监测频率为每 2 年 1 次, 2000~2003 年沉积物监测频率为每年 1 次, 2004~2009 年监测频率为每 2 年 1 次(单数年进行监测), 2010 年以来重新调整为每年 1 次。目前, 中国沉积物监测频率的设计主要依据监测经费和当年监测任务的饱和程度确定, 缺乏合理的设计依据和优化原则, 设计的方法体系尚不完整。作者的研究目的是初步建立一套海洋沉积物监测频率的设计方法体系, 并对中国现行海洋沉积环境监测频率进行优化, 从而实现监测资源合理利用、提高监测效率。

1 研究方法

1.1 设计依据

1.1.1 监测频率与沉积速率有关

沉积物样品测试结果反映的是一定历史时期内的环境特征, 而水质监测反映的是水样采集时的环境特

征; 同时, 沉积物迁移扩散能力相对于海水水质要弱, 对污染物累积放大的作用更明显, 能够稳定地表征一个监测区域内的长期环境变化趋势。因此, 沉积物监测目的是为了反映沉积环境现状与时空变化趋势, 并据此判断海洋环境的健康状况和识别环境风险。

沉积物监测结果所代表的时间跨度主要取决于沉积物采样深度或沉积速率^[2]。目前, 中国的海洋沉积物监测是以测试表层沉积物中环境指标的含量为主, 所以在采样深度不变的情况下, 沉积物监测结果反应的时间跨度主要与海洋沉积物沉积速率有关。

1.1.2 监测方案与沉积速率的关联性分析

目前, 国外主要环境监测机构均以调查区域的沉积速率来制定沉积环境的监测频率。如欧盟、澳洲等地区建议对沉积速率高于 1 cm/a 的区域, 每年开展 1 次沉积物监测; 低于 1 cm/a 的区域, 建议监测周期为 5 a 左右(表 1)。

通过梳理国外海洋环境监测方案发现, 虽然各地区监测机构关于沉积物监测频率的设计存在差异,

收稿日期: 2014-06-23; 修回日期: 2015-01-26

基金项目: 海洋公益性行业科研经费项目资助(201005014, 201305023); 天津市科技兴海项目(KJXH2013-17); 国家海洋局近岸海域生态环境重点实验室资助项目(201510)

作者简介: 洛昊(1983-), 男, 辽宁大连, 助理研究员, 硕士, 主要从事海洋监测评价与保护研究, E-mail: luohao@nmemc.org.cn; 梁斌, 通信作者, E-mail: bliang@nmemc.org.cn

但总体上仍遵循高速沉积区监测频率高、低速区监测频率低的规律。欧盟对其水框架体系内成员国统一规定沉积物监测周期为 6 a, 因为其区内的沉积速率普遍低于 1 cm/a; 欧洲非欧盟地区如北海的沉积速率为 0.05~0.2 cm/a, 其监测周期为 2 a 或 2 a 以上; 美国根据沉积速率和地理位置差异, 也采取了不同

海洋沉积物监测频率, 切萨皮克湾为每年 1 次, 其湾内平均沉积速率为 0.33 cm/a, 航道区 1.7 cm/a; 普吉特海湾底栖生物调查频率为每年 1 次, 而关于沉积物化学成分的监测周期则为 5 a, 其湾内沉积速率变化范围为 0.1~2 cm/a; 缅因湾等低速沉积区的沉积速率仅为 0.08 cm/a, 因此其监测周期设计为 10 a (表 2)。

表 1 国外海洋沉积物监测频率设计要求一览表

Tab.1 Design requirements of foreign marine sediment monitoring frequency

序号	规范	监测频率设计要求
1	联合国环署和地中海行动计划共同起草《沉积物采样和分析方法》 ^[3]	对于趋势性监测, 如果沉积率高(> 1cm/a), 监测初期的监测频率为每年 1 次; 在一些沉积率近似 1cm/a 的沿海地区, 采样周期可以设计为 5 a 或者更长时间
2	澳大利亚《沉积物质量评估手册》 ^[4]	以采集表层沉积物中的生物为监测目标(采集表层 2~10 cm), 且年沉积率低于 1 cm/a, 则很难得到明显的变化差异, 因此每 2~3 年监测 1 次较合理
3	欧盟《水框架沉积物监测讨论稿》 ^[5]	对于河口等高沉积率的区域, 宜每 1~3 a 监测 1 次; 对于近岸海域低沉积速率的区域, 宜每 6 a 监测 1 次(与 WFD 的 6 a 循环监测周期保持一致)
4	《水环境评价导则》 ^[6] (Deborah Chapman)	由于沉积速率较低(0.1 mm/a~1 cm/a), 在监测湖泊时应开展长周期性采样, 每 5 a 1 次即可; 而水库等高沉积速率区域, 采样频率应更频繁
5	《欧洲沉积物监测网》 ^[7]	沉积物监测频率应依据沉积速率确定, 如每年监测 1~2 次或者每 5~10 a 监测 1 次
6	《北极监测和评价计划》 ^[8]	对于沉积物样品, 一般采用一次性调查; 如需重复监测, 采样的间隔时间一般不少于 5 a, 多数情况下是大于 10 a
7	《环境监测和评估项目》 ^[9] (NS&T)	由于水动力和生化过程对沉积速率的影响, 沉积物的监测频率以每 3~5 a 开展 1 次监测即可
8	《区域沉积物监测计划的空间设计》 ^[10]	如果只采表层沉积物(2~10 cm), 且沉积速率低于 1 cm/a, 则以年度为时间单位的监测不适合, 至少 2~3 a 监测 1 次比较合理; ICES 建议 6 a 监测 1 次
9	沉积物监测目的完全记述(OSPER 联合监测评估项目, 1995) ^[11]	沉积物样品收集应考虑沉积速率, 大型河流的河口区域沉积速率高, 应每隔 1~3 a 监测 1 次; 湖泊或沿海区域沉积率非常低, 应每隔 6 a 监测 1 次

表 2 沉积物监测计划与沉积速率对应表

Tab.2 Corresponding relation between sediment monitoring program and sedimentation rate

序号	监测区域	沉积速率	监测频率
1	波罗的海哥特兰岛海域 ^[12]	平均沉积率(0.93 ± 0.67) cm/a, 近期沉积率 0.1 cm/a~0.13 cm/a	MSFD 环境状况评估的监测周期为 6 a ^[16]
2	波罗的海格但斯克湾 ^[13]	沉积速率 0.4~0.7 cm/a	同 1
3	地中海西北部 ^[14]	罗纳河口 0.65 cm/a, 深水区 0.01 cm/a	同 1
4	地中海盆地 ^[15]	平均速率为 0.006 cm/a, 变化范围 0.0025~0.009 cm/a	同 1
5	切萨皮克湾 ^[17-21]	湾内平均速率 0.33 cm/a 或 0.15 cm/a; 海沟深处 0.5 cm/a; 航道区 1.7 cm/a	1994 年后, 每年 8 月末或 9 月监测 1 次
6	美国普吉特海湾 ^[22-24]	平均沉积速率为 0.1~2 cm/a; 东部通道 0.22~2.0 cm/a; 近期沉积速率为 0.12~2.4 cm/a	底栖生物和粒度监测为每年 1 次; 化学要素监测周期为 5a
7	斯洛文尼亚罗维尼海域 ^[25-26]	罗维尼河口 5~9 cm/a	每年监测 2 次
8	缅因湾 ^[27-28]	近岸海域 0.08 cm/a	每 10 年监测 1 次
9	北海 ^[29-30]	沉积速率为 0.05~0.2 cm/a	每 2 年或多年监测 1 次

1.2 设计标准

由于沉积物监测频率与沉积速率有关,且有国外主要监测机构的设计经验可以借鉴,所以中国海洋沉积物监测频率应依据沉积速率确定。其优势在于:(1)更准确反映沉积环境现状和变化趋势。如果沉积速率低,而监测频率过高,沉积物样本所表征的不是当前的环境状况,是一段历史时期内的累积结果,而且这段历史并不能准确断代。如果沉积速率高,而监测频率过低,则无法全面表征沉积物质量的变化趋势;(2)监测资源合理利用。根据不同沉积环境特征制定监测频率,减少重复监测,使监测资源分配更合理;(3)设计方法简单可行、沉积速率数据易于获得。依据沉积速率设计监测频率方法易于实现。

根据中国近岸海域沉积速率和环境特点,中国海洋沉积物监测频率的设计标准为:

(1) 沉积速率高于 1 cm/a 的海域,监测频率为每年 1 次;(2)沉积速率为 0.1~1 cm/a 的海域,监测频率为 5~6 a 1 次;(3)沉积速率极低的海域(<0.1 cm/a),监测频率为 10 a 1 次。

1.3 沉积速率计算

沉积速率的数据主要来自于中国海洋沉积环境研究的相关文献和历史资料。沉积速率的计算方法有多种,不同计算方法得到的计算结果也不同,如果将这些数据进行统一的空间对比分析,会使统计结果的失真。因此,有必要选择统一的沉积物沉积速率计算方法,使数据具有可比性。

沉积物沉积速率的计算方法根据不同研究需要可分为两大类:(1)地质历史时期的沉积速率,如同位素 ^{14}C 同位素测年^[31-32];(2)现代沉积速率,如河流输沙法^[33-34]、海图对比与 GIS 法、 ^{137}Cs 测年法^[35]和 ^{210}Pb 测年法^[36]等。

选择何种沉积速率计算方法应根据所在海域的沉积环境特点和实际资料确定。 ^{14}C 同位素的半衰期为 5 730 a,可以有效标定两万年以来的沉积物年龄,但多用于河口海岸地质历史时期沉积率估算;河流输沙法不能准确估算河口区域沉积物与外界交换的数量而产生误差,其结果只具有定性参考作用;海图对比与 GIS 法多用于河口三角洲沉积速率的推演,不适合全海域监测, ^{210}Pb 和 ^{137}Cs 半衰期短、易测量、经济,可以有效地标定近百年来现代沉积速率,而且许多实验结果证实同一区域内用 ^{210}Pb 和 ^{137}Cs 同时测定和计算沉积速率,两者结果吻合得很好^[37],但 ^{210}Pb 在中

国应用更早、更广泛,历史资料也丰富^[38-42]。

综上,每种计算方法均存在优点和不足,经综合比较,由于:(1) ^{210}Pb 测年法在 20 世纪 70 年代已经用于海洋沉积物测年,并于 80 年代在中国开始得到广泛应用^[43],拥有大量的数据资料和理论基础,能够保证数据的一致性和可比性;(2) ^{210}Pb 半衰期短,能够更准确地反映近期海洋沉积物沉积速率。因此,选择 ^{210}Pb 测年法作为海洋沉积物沉积速率的统一计算方法。

2 结果与讨论

2.1 中国海域沉积速率分布特点

中国海岸线漫长,南北纵跨 3 个温度带,地理差异显著,海洋环境复杂多变,各个区域的沉积速率也不同(图 1)。

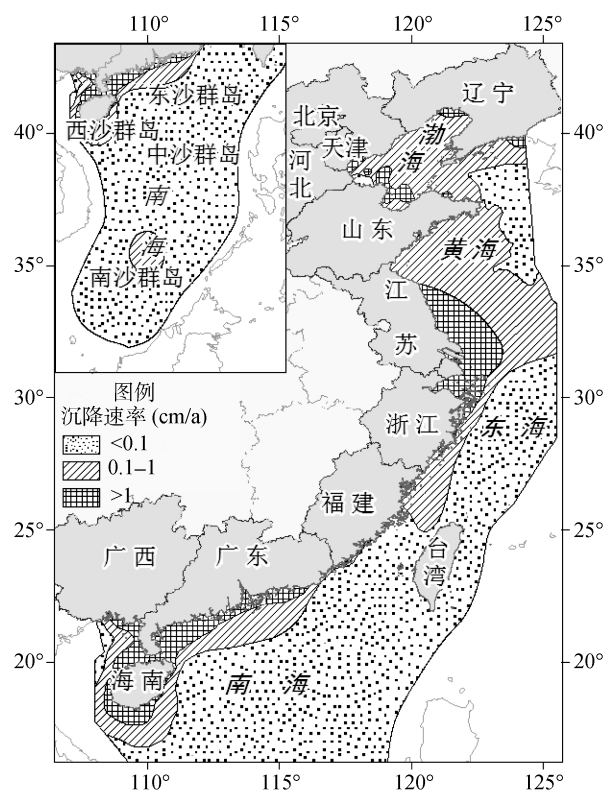


图 1 中国海洋沉积速率分布图

Fig.1 Spatial distribution of marine sedimentation rate in China

2.1.1 河口区域沉积速率高

中国海域的沉积物高速沉积区主要集中在河口区域,如辽河口、海河口、黄河口、长江口、闽江口、九龙江口和珠江口等,上述区域沉积速率均高于 1 cm/a。其中,长江口由于入海泥沙贡献了大部分的泥质区沉积物,因此沉积速率与入海泥沙有着重要关系,

²¹⁰Pb 计年法测定的沉积速率为 4.58~5.47 cm/a。珠江口为淤进型的河口湾，沉积速率高，其沉积速率大小与河流作用成正相关^[44]。辽东湾近岸入海河流众多，该区域的沉积速率总体较高，其中双台子河口沉积速率为 2.4 cm/a，小凌河口为 2.9 cm/a^[45]。

2.1.2 近岸海域沉积速率高于远海

黄、渤海的沉积速率高值区主要分布在物源充足的沿岸海域，而远海泥质区的沉积速率一般小于 0.2 cm/a；南沙海域远离大陆，深度约 2 500 m 沉积速率极低，仅为(1.06~1.51)cm/1000 a^[45-46]。

2.1.3 海湾沉积速率差异显著

水交换能力强的海湾沉积速率低，如海洲湾(0.11~0.64 cm/a)；有多条河流注入、水交换能力弱的水湾沉积速率高，如辽东湾、渤海湾和杭州湾等^[47-48]；同一海湾内沉积速率差异显著，胶州湾中部具有高的沉积速率(> 1 cm/a)，而西、北、东具有较低的沉积速率(>1 cm/a)。再靠近岸边又有较高的沉积速率(>1 cm/a)^[49]。

2.2 优化结果

中国海洋沉积物监测频率优化结果见表 3。沉积

表 3 中国海洋沉积物监测频率优化结果

Tab.3 Optimization results of marine sediment monitoring frequency

序号	区域(海域)	沉积速率 (cm/a)	监测周期(年)	参考文献	序号	区域(海域)	沉积速率(cm/a)	监测周期(年)	参考文献
1	丹东近岸	4.2	1	[50]	28	泉州近岸	2.1~2.62	1	[60-62]
2	大连近岸 (黄海侧)	0.99	1	[50]	29	厦门近岸	2.3~2.62	1	[60-62]
3	大连近岸 (渤海测)	0.6~0.8	5	[51]	30	汕头近岸	0.041	10	[60]
4	营口近岸	0.16~0.54	5	[40, 51]	31	汕尾近岸	1.08~1.42	1	[60]
5	盘锦近岸	2.4	1	[40, 51]	32	广州近岸	>1	1	[60, 63]
6	锦州近岸	2.9	1	[40, 51]	33	防城港近岸	0.02	10	[64-65]
7	葫芦岛近岸	0.75	1	[40, 51]	34	海南周边	0.21~2.9	三亚、海口、东 方等海域 1 a; 博鳌、文昌、海 南东部海域 5 a	[66-67]
8	秦皇岛近岸	0.22	5	[40, 51]	35	三沙市周边	0.01034	10	[67-68]
9	唐山近岸	0.48	5	[51]	36	南沙	0.00106~0.00151	10	[69-70]
10	天津近岸	2.26	1	[51]	37	长江口临近近海	3.36	1	[56-58, 71]
11	沧州近岸	1.17	1	[51]	38	珠江口临近近海	0.5~2.5	1	[63]
12	滨州近岸	2.5	1	[51]	39	黄河口临近近海	1.29~9.59	1	[72]
13	东营近岸	3.27	1	[51]	40	莱州湾	2.94	1	[51, 73]
14	潍坊近岸	0.31~1.72	1	[51]	41	海州湾	0.64	5	[74]
15	烟台近岸	1.24	1	[51]	42	胶州湾	0.64~1.74	1	[53, 55]
16	威海近岸	0.21~0.64	5	[51]	43	杭州湾	1~1.2	1	[59, 75]
17	青岛近岸	0.54~1.2	1	[52-55]	44	厦门湾	2.62	1	[76]
18	日照近岸	<0.2	5	[52-55]	45	湄州湾 峰尾站	1.5	1	[77]
19	连云港近岸	0.64~0.67	5	[39, 47, 55]	46	钦州湾	1.68	1	[64-65]
20	盐城近岸	<0.2	5	[39, 47, 55]	47	大亚湾	0.94~1.42	1	[60]
21	南通近岸	1.85~4.4	1	[39, 47, 55]	48	闽北近海	1.18~1.23	1	[62, 77]
22	上海近岸	1.36~4.6	1	[56-58]	49	渤海中部	0.15~0.41	5	[51, 73]
23	宁波近岸	1.19	1	[59]	50	渤海海峡	0.15~0.72	5	[51, 73]
24	台州近岸	1.02	1	[59]	51	南黄海中部	0.094~0.17	5	[56, 73]
25	温州近岸	0.98	1	[59]	52	黄海北部	0.73	5	[50, 52, 54, 73]
26	宁德近岸	1.18~1.23	1	[60-62]	53	东海远海	< 0.2	5	[71]
27	福州近岸	0.47~2.1	1	[60-62]					

速率高于 1cm/a 的海域, 监测频率为每年 1 次, 如黄河口、长江口等河口海域; 沉积速率低于 1 cm/a 的海域, 监测周期为 5 a, 如渤海中部, 黄海、东海远海等区域; 个别沉积速率极低的海域, 监测周期为 10 a, 如南沙海域(2 cm/1 000a)。监测频率高的区域主要集中在近岸沉积速率高的海域, 近海和远海区域监测频率可适当降低。

3 结论

作者基于国内外海洋沉积物监测方案的设计理论和经验, 初步建立了依据沉积速率确定海洋沉积物监测频率的方法和标准, 并对中国海洋沉积物监测频率进行了初步优化。研究结果显示, 中国近岸区域沉积速率高于远海, 河口区域沉积速率高, 海湾沉积速率差异显著。其中, 沉积速率高于 1 cm/a 的海域, 监测频率为每年 1 次, 如黄河口、长江口等河口区域; 沉积速率低于 1cm/a 的海域, 监测周期为 5 a, 如渤海中部, 黄海、东海远海区域等; 个别沉积速率极低的海域, 监测周期为 10 a, 如南沙海域(2 cm/1000 a)。监测频率高的区域主要集中在近岸沉积速率高的海域, 而近海和远海沉积速率低的区域监测频率可适当降低。

作者的研究成果仅是一个针对中国海洋沉积物监测频率设计的初步优化方案, 尚需进一步优化和完善。目前的设计依据只有沉积速率单一要素, 优化结果还不够精确。因此, 在以后的研究中需要引入更多的筛选因子, 如风暴潮频发、台风登陆、小河道人为污染输入、洪水输入的河口等易受突发事件影响海域, 应充分考虑这些常规和突变因素的影响; 有些海域虽然沉积速率较高, 但其粒径较粗, 所吸附的元素较少, 沉积物中元素的变化幅度也较少, 其监测频率如果设计为每年 1 次也不合理。所以加入常规和突发环境因素以及沉积物粒度和有机碳含量等作为判断依据, 能够让监测频率设计更合理、监测结果更精确。

参考文献:

- [1] 马德毅. 海洋沉积物的污染指示作用和监测方法[J]. 海洋通报, 1993, 12(5): 89-97.
- [2] Larsen B, Jensen A. Evaluation of the sensitivity of sediment stations in pollution monitoring[J]. Marine Pollution Bulletin, 1989, 20(11): 556-560.
- [3] UNEP/MAP. Methods for Sediment Sampling and Analysis[R]. Athens: UNEP, 2006: 1-22.
- [4] Anthony A C, Anthony C R, Stuart L S, et al. Handbook for sediment quality assessment [M]. Australia: Centre for Environmental Contaminants Research, 2005.
- [5] Maria B. Discussion document on sediment monitoring guidance for the EU WFD [R]. Utrecht: AMPS, 2004: 5-6.
- [6] Chapman D V. Water quality assessments - a guide to use of Biota, sediments and water in environmental monitoring-second edition[M]. London: Spon Press, 1996.
- [7] Owens P, Collins A. European Sediment Research Network[M]. Bedfordshire: SedNet, 2003: 4-26.
- [8] 王菊英, 韩庚辰, 张志锋. 国际海洋环境监测与评价最新进展[M]. 北京: 海洋出版社, 2010.
- [9] Hunsaker C T. Environmental monitoring and assessment program ecological indicators[M]. US: Bibliogov, 2012.
- [10] ICES Advisory Committee. Spatial design of a regional monitoring programme for contaminants in sediments [R]. Copenhagen: ICES Headquarters, 2012: 35-40.
- [11] OSPAR Commission. JAMP Guidelines for Monitoring Contaminants in Sediments[R]. London: OSPAR Secretariat, 2000: 1-12.
- [12] Hille S, Leipe T, Seifert T. Spatial variability of recent sedimentation rates in the Eastern Gotland Basin (Baltic Sea)[J]. Oceanologia, 2006, 48 (2): 297-317.
- [13] Kunzendorf H, Emeis K C, Christiansen C. Sedimentation in the Central Baltic Sea as viewed by nondestructive Pb-210 dating[J]. Geografisk Tidsskrift, 1998, 98: 1-9.
- [14] Miralles J, Radakovitch O, Aloisi J C. ²¹⁰Pb sedimentation rates from the Northwestern Mediterranean margin [J]. Marine Geology, 2005, 216(3): 155-167.
- [15] Cita M B, Ryan W B F, Kidd R B. Sedimentation rates in Neogene deep-sea sediments from the Mediterranean and geodynamic implications of their changes [M]. Washington, D.C: U.S. Govt. Printing Office, 1978: 991-1002.
- [16] ICES. Spatial design of a regional monitoring programme for contaminants in sediments [R]. London: OSPAR Commission, 2013: 1-6.

- [17] Schubel J R, Pritchard D W. Responses of upper Chesapeake Bay to variations in discharge of the Susquehanna River[J]. *Estuaries*, 1986, 9(4): 236-249.
- [18] Gross M G, Karweit M, Cronin W B, et al. Suspended sediment discharge of the Susquehanna River to northern Chesapeake Bay, 1966 to 1976[J]. *Estuaries*, 1978, 1(2): 106-110.
- [19] Donoghue J F. Trends in Chesapeake Bay sedimentation rates during the late Holocene[J]. *Quaternary Research*, 1990, 34(1): 33-46.
- [20] Ranasinghe J A, Scott L C, Kelley F S. Chesapeake Bay water quality monitoring program long-term benthic monitoring and assessment component[R]. Maryland: Department of Natural Resources Assessment Services, 1998: 5-10.
- [21] Robert E M, Robert M S, Michael S H. Chesapeake Bay Monitoring[M]. Maryland: Maryland Office of Environmental Programs, 1987.
- [22] Schell W R, Nevissi A. Heavy metals from waste disposal in central puget sound[J]. *Environmental Science and Technology*, 1977, 12(5): 86-88.
- [23] Crecelius E A, Bothner M H, Carpenter R. Geochemistries of arsenic, antimony, mercury, and related elements in sediments of Puget Sound[J]. *Environmental Science and Technology*, 1975, 9(4): 325-333.
- [24] Carpenter R, Peterson M L, Bennett J T. ^{210}Pb -derived sediment and mixing rates for the greater puget sound region[J]. *Marine Geology*, 1985, 64: 291-312.
- [25] UNEP. Monitoring Programme of the Eastern Adriatic Coastal Area (Report for 1983-1991)[R]. MAP Technical Reports Series No. 86, Athens: UNEP, 1994: 5-31.
- [26] Pinardi N. The physical, sedimentary and ecological structure and variability of shelf areas in the mediterranean sea[J]. *The Sea*, 14(32): 1243-1271.
- [27] Heather C. Marine monitoring programs in the gulf of maine[R]. Maine: Office and the Gulf of Maine Council, 2001: 44-72.
- [28] Michael L C. Cycling of linear alkyl benzenes (labs) in the gulf of maine[M]. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 1995: 162-169.
- [29] OSPAR Commission. JAMP Guidelines for Monitoring Contaminants in Sediments[R]. London: OSPAR Secretariat, 2002: 7-10.
- [30] Trannum H C, Brakstad F, Neff J. Sediment characterization and parameter estimation[R]. Tromsø: ERMS, 2006: 6-22.
- [31] Gehrels W R, Belknap D F. Neotectonic history of eastern marine evaluated from historic sea-level data and ^{14}C dates on salt-marsh peats [J]. *Geology*, 1993, 21: 615-618.
- [32] Goodfriend G A, Stanley D J. Reworking and discontinuities in Holocene sedimentation in the Nile Delta: documentation from amino acid racemization and stable isotopes in mollusk shells [J]. *Marine Geology*, 1996, 129: 271-283.
- [33] 李从先. 三角洲沉积率及其地质意义[J]. *海洋科学*, 1981, 5(3): 30-33.
- [34] 陈吉余, 虞志英, 恽才兴. 长江三角洲的地貌发育: 长江河口动力过程和地貌演变[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1988: 1-18.
- [35] 夏小明, 谢钦春, 李炎, 等. 港湾淤泥质潮滩的周期变化[J]. *海洋学报*, 1997, 19(4): 99-108.
- [36] 陈巧云, 徐胜利. 海洋现代沉积速率 ^{210}Pb - ^{210}Bi 法的射线测定研究[J]. *海洋环境科学*, 1996, 15(4): 38-42.
- [37] 潘少明, 朱大奎, 李炎, 等. 河口港湾沉积物中的 ^{137}Cs 剖面及其沉积学意义[J]. *沉积学报*, 1997, 15(4): 67-70.
- [38] 刘国贤, 杨松林, 周义华. 用 ^{210}Pb 法测定长江口区的沉积速率[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1984, 4(4): 113-114.
- [39] 肖玉仲, 刘国贤, 杜瑞芝, 等. 江苏灌江口现代沉积速率的研究[J]. *海洋学报*, 1997, 19(5): 91-96.
- [40] 宋云香, 战秀文, 王玉广, 等. 辽东湾北部河口区现代沉积特征[J]. *海洋学报*, 1997, 19(5): 145-149.
- [41] 成国栋, 钱江初, Nittroure C A. 长江河口最大浑浊带研究[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1985, 4(1/2): 143-158.
- [42] 沈焕庭, 贺松林, 潘定安, 李九发. 长江口水下三角洲沉积构造、构造特征及沉积作用机制[J]. *地理学报*,

- 1992, 5 : 472-479.
- [43] 范德江, 杨作升, 郭志刚. 中国陆架 ^{210}Pb 测年应用现状与思考[J]. 地球科学进展, 2000, 15(3) : 297-302.
- [44] 陈耀泰. 珠江口现代沉积速率与沉积环境[J]. 中山大学学报, 1992.31(2): 101-107.
- [45] 李凤业, 史玉兰, 申顺喜, 等. 同位素记录南黄海现代沉积环境[J]. 海洋与湖沼, 1996, 27(6) : 584-589.
- [46] 李凤业, 史玉兰. 渤海现代沉积的研究[J]. 海洋科学, 1995, 19(2) : 47-50.
- [47] 张存勇, 冯秀丽. 海州湾南部近岸现代沉积速率及其沉积通量[J]. 海洋科学进展, 2008, 26 (4): 478-485.
- [48] 冯应俊, 李炎. 杭州湾近期环境演变与沉积速率[J]. 海洋学研究, 1993, 11(2): 13-23.
- [49] 张丽洁, 王贵, 姚德, 等. 胶州湾李村河口沉积物重金属污染特征研究[J]. 山东理工大学学报(自然科学版), 2003, 17 (1) : 8-14.
- [50] 宋云香, 张凤林. 长山群岛海区现代沉积特征[J]. 海洋环境科学, 1998, 17(2): 35-39.
- [51] 董太禄. 渤海现代沉积作用与模式的研究[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1996, 16(4): 43-53.
- [52] 齐君, 李凤业, 宋金明, 等. 北黄海沉积速率及其沉积通量[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2004, 24(2): 9-14.
- [53] 刘广山, 李冬梅, 易勇, 等. 胶州湾沉积物的放射性核素含量分布与沉积速率[J]. 地球学报, 2008, 29(6): 769-777.
- [54] 赵一阳, Mast D J. 南黄海沉积速率和沉积通量的初步研究[J]. 海洋与湖沼, 1991, 22(1): 38-43.
- [55] 李凤业, 宋金明, 李学刚, 等. 胶州湾现代沉积速率和沉积通量研究[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2003, 23(4): 29-33.
- [56] 时钟. 长江口北槽细颗粒悬沙絮凝体的沉降速率的近似估算[J]. 海洋通报, 2004, 23(5): 51-58.
- [57] 庞仁松, 潘少明, 王安东. 长江口泥质区 18#柱样的现代沉积速率及其环境指示意义[J]. 海洋通报, 2011, 30(3): 294-301.
- [58] 张瑞, 潘少明, 汪亚平, 等. 长江河口水下三角洲 ^{210}Pb 分布特征及其沉积速率[J]. 沉积学报, 2009, 27(4): 704-713.
- [59] 张志忠, 李双林, 董岩翔, 等. 浙江近岸海域沉积物沉积速率及地球化学[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2005, 25(3): 15-24.
- [60] 黄乃明, 宋海青. 大亚湾海底泥中 γ 放射性核素比活度随深度的变化及底泥沉积速率[J]. 辐射防护通讯, 1999, 19(2): 9-12.
- [61] 程汉良, 曾文义, 施文远, 等. 海堤建成前后厦门港湾沉积速率的变化及其在海洋工程中的意义[J]. 台湾海峡, 1985, (1)1: 6.
- [62] 许志峰. 台湾海峡西部海域第四纪晚期沉积速率的变化[J]. 台湾海峡, 1996, 15(3): 223-228.
- [63] 李凤业, 袁巍. 南海, 南黄海, 渤海 ^{210}Pb 垂直分布模式[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1991, 11(3): 35-43.
- [64] 陈刚, 李从先. 广西防城港冰后期沉积层序和沉积作用[J]. 海洋学报(中文版), 1988, 10(2): 199-203.
- [65] 李贞, 李珍, 张卫国, 等. 广西钦州湾海岸带孢粉组合和沉积环境演变[J]. 第四纪研究, 2010, 30(3): 598-608.
- [66] 许冬, 龙江平, 钱江初, 等. 海南岛近海海域 7 个沉积岩芯的现代沉积速率及其分布特征[J]. 海洋学研究, 2008, 26(3): 9-17.
- [67] 全亚荣, 梁致荣, 刘弈药, 等. 海口、新海湾法沉积速率的测定[J]. 中山大学学报, 1995, 34: 190-194.
- [68] 赵宏樵, 韩喜彬, 陈荣华, 等. 南海北部 191 柱状沉积物主元素特征及其古环境意义[J]. 海洋学报, 2009, 30(6): 85-93.
- [69] 刘韶, 秦佩玲. 南沙海区沉积物沉积速率的测定和沉积环境探讨[J]. 热带海洋, 1991, 10(3): 81-85.
- [70] 赵焕庭, 温孝胜, 王丽荣. 南沙群岛永暑礁环礁潟湖的沉积速率与气候变化[J]. 热带地理, 2000, 20(4): 247-249.
- [71] 陈毓蔚, 赵一阳, 刘菊英, 等. 东海沉积物中 ^{226}Ra 的分布特征及近岸区沉积速率的测定[J]. 海洋与湖沼, 1982, 13(4): 380-387.
- [72] 康兴伦, 王品爱, 袁毅, 等. 黄河口海域沉积速率的研究[J]. 海洋科学, 1988, 12(5): 25-30.
- [73] 胡邦琦, 李国刚, 李军, 等. 黄海, 渤海铅-210 沉积速率的分布特征及其影响因素[J]. 海洋学报, 2012, 33(6): 125-133.
- [74] 李海清, 殷勇, 施杨, 等. 江苏如东潮滩微地貌及现代沉积速率[J]. 古地理学报, 2011, 13(2): 150-160.
- [75] 刘治帅, 杨珩, 陈坚, 等. 厦门湾及邻近海域沉积物分布特征和沉积速率[J]. 海洋科学, 2012, 36(6): 1-8.

- [76] 陈绍勇, 李文权, 施文远, 等. 湄州湾沉积物的混合速率和沉积速率的研究[J]. 海洋学报, 1988, 10(5): 566-574.
- [77] 赵绍华, 许江, 房旭东, 等. 闽北近海柱状沉积物粒度特征及沉积速率研究[J]. 台湾海峡, 2012, 31(2): 277-285.

Optimization design for marine sediment monitoring frequency based on sedimentation rate

LUO Hao, LIANG Bin, BAO Chen-guang, LI Mian, YU Chun-yan, MA Ming-hui
(National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian 116023, China)

Received: Jun., 23, 2014

Key words: Marine environment; sediment; monitoring frequency; sedimentation rate; optimize

Abstract: According to the characteristics and the main problems of marine sediment monitoring in China, using the theory and experience of foreign and domestic marine sediment monitoring, the optimal design method and standard of marine sediment monitoring frequency were primarily established by sedimentation rate. Based on ²¹⁰Pb radioactive dating and IDW interpolation, this paper put forward sedimentation rate distribution of Chinese marine monitoring areas, and the optimization scheme of marine sediment monitoring frequency in different spatial scale. The results shows the deposition rate of offshore areas is higher than the open seas, and the deposition rate in Estuary is higher, it show significant differences in gulf. Monitoring frequency should be one time a year where deposition rate is higher than 1 cm/a, such as Yellow river estuary and Yangzi river estuary, and monitoring frequency should be one time per five year where deposition rate is lower than 1 cm/a, such as center of Bohai sea. Monitoring frequency should be one time per ten year where deposition rate is much lower than 1 cm/1000 a, such as the Nansha sea area (≤ 2 cm/1000 a). High frequency monitoring is mainly concentrated in the offshore area where there is a high sedimentation rate, and monitoring frequency can be appropriately reduced in open seas.

(本文编辑: 谭雪静)