

doi: 10.3969/j.issn.2095-0780.2011.03.005

流沙湾贝类养殖海域环境质量评价

王增焕, 柯常亮, 王许诺, 李刘冬

(中国水产科学研究院南海水产研究所, 广东 广州 510300)

摘要: 根据2008年5月至2009年2月对流沙湾贝类养殖海域渔业环境综合调查的数据, 对海水环境质量的现状进行了分析讨论, 综合评价了海水有机污染和营养水平, 并对沉积物重金属的累积程度和潜在生态危害进行了评价。结果表明, 调查海域盐度、溶解氧(DO)、化学耗氧量(COD)、无机氮(DIN)和活性磷酸盐(PO_4^{3-})呈季节性变化, 其中盐度和DIN的季节变化与该海域季节性降水有关, 而DO、COD和 PO_4^{3-} 的变化与浮游植物和贝类养殖有关。评价结果显示, 流沙湾海域水质清洁, 海水氮(N)营养盐过剩而磷(P)贫乏, 属于P限制型中等富营养化海域; 调查海域沉积物中砷(As)和铅(Pb)处于无污染状态, 汞(Hg)和镉(Cd)处于轻度污染, 铜(Cu)在部分区域处于中度污染状态; Cu、Pb、As、锌(Zn)和铬(Cr)的潜在生态危害属于轻微, Hg和Cd的潜在生态危害处于中等强度。

关键词: 海洋环境评价; 生态危害; 贝类养殖海域; 流沙湾

中图分类号: X 834

文献标志码: A

文章编号: 2095-0780-(2011)03-0024-07

Marine environmental quality assessment of shellfish culture in Liusha Bay

WANG Zenghuan, KE Changliang, WANG Xunuo, LI Liudong

(South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510300, China)

Abstract: In base of the data of marine environmental quality of shellfish culture in Liusha Bay from May 2008 to February 2009, we comprehensively assessed the organic pollution and eutrophication of seawater, as well as the geo-accumulation and potential ecological risks of the sediments. Results show that the seasonal variation of salt and dissolved inorganic nitrogen in seawater are related with seasonal rainfall, while the dissolved oxygen, chemical oxygen demand and phosphate are related with phytoplankton bloom and shellfish culture. The assessment indicates that the seawater in Liusha Bay is clean with high nitrogen nutrients and low phosphate nutrients. The sediments have not been polluted by arsenic and lead, but slightly polluted by mercury and cadmium, and some moderately polluted by copper. The potential ecological risks of copper, lead, arsenic, zinc and chromium are slight, while those of mercury and cadmium are of medium degree.

Key words: marine environmental assessment; ecological risk; sea area for shellfish culture; Liusha Bay

流沙湾位于雷州半岛西南部, 整个海湾面积约69 km², 属台地溺谷港湾。整个海湾形状呈北西向葫芦形, 腰部有南北向沙嘴将海湾分成内湾与外湾, 内湾为潟湖。流沙湾属热带季风性气候, 日光

充足、气候温暖, 适宜于贝类养殖。其珍珠养殖历史悠久, 养殖面积占整个海湾面积的近20%^[1], 是著名的海水珍珠养殖生产基地和南珠中心, 已被列为贝类现代产业体系重要的研究海湾之一。最近

收稿日期: 2010-10-08; 修回日期: 2010-10-30

资助项目: 农业公益性行业科研专项 (nyhyzx07-047)

作者简介: 王增焕 (1969-), 男, 硕士, 副研究员, 从事海洋生态环境与水产品质量安全。E-mail: zh-wang@people.com.cn

还发现流沙湾海草场规模大、生物多样性丰富,因而被列为重点调查海草场^[2],海草在海洋生态环境中的作用非常重要,是生物圈中最具生产力的水生生态系统之一。近年来流沙湾的贝类养殖业发展迅速,特别是珍珠贝和扇贝的养殖,对该海域的生态环境产生很大影响。随着海洋生态环境科学的发展,建立了海洋环境质量的综合评价体系及管理、监测体系,提出了许多海洋生态环境质量的评价方法,对海域的生态环境质量进行综合评价^[3-11]。目前针对流沙湾的海洋与渔业生态环境质量的研究很少。为保证流沙湾海域海洋资源的开发利用及其海洋环境的健康持续发展,笔者根据流沙湾海洋贝类养殖海域渔业环境综合调查的资料,分析讨论了该海湾贝类养殖区的海水环境现状,综合评价了海水的有机污染及营养水平,并对沉积物重金属的累积及其潜在生态危害进行评价。

1 材料与方 法

1.1 调查方法

分别于2008年5月(夏季)、8月(秋季)、11月(冬季)和2009年2月(春季)(季节划分参照农历节气,以立春、立夏、立秋和立冬作为每个季节的开始,采样日期分别在相应的季节内)对流沙湾海域进行海洋渔业环境综合调查,调查范围包括湾内的北海湾(S1),湾口的北栋湾(S2)和流沙湾(S3)3个贝类养殖区,每个养殖区各设1个站位(图1)。水样采集点位于水面下0.5 m处,沉积物样品以抓斗式采泥器采集,用塑料勺取顶部0~5 cm作为表层沉积物样品。所有样品保存、制备和前处理均按照《海洋监测规范》^[12](GB 17378.3-2007)的要求操作。

溶解氧(DO)、pH、水温和盐度等项目采用YSI-55型便携式水质监测仪现场测定。

无机氮[DIN,包括氨氮(NH₄⁺-N)、硝酸盐氮(NO₃⁻-N)和亚硝酸盐氮(NO₂⁻-N)、活性磷酸盐(PO₄³⁻)和化学耗氧量(COD)等按照《海洋监测规范》^[12](GB 17378.4-2007),分别采用次溴酸盐氧化法、锌-镉还原法、萘乙二胺分光光度法、磷钼蓝分光光度法和碱性高锰酸钾法测定。

沉积物重金属元素汞(Hg)、砷(As)、铜(Cu)、铅(Pb)、锌(Zn)、镉(Cd)和铬(Cr)等按照《海洋监测规范》^[12](GB 17378.5-2007)

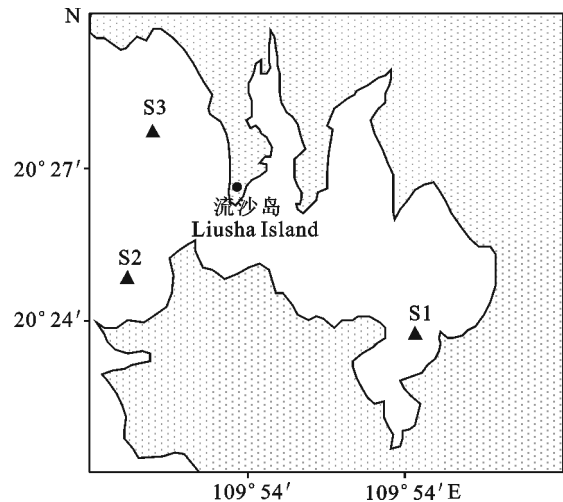


图1 调查海域及采样站位示意图

Fig. 1 Survey sea area and sampling stations

的要求,Hg和As采用氢化物原子荧光法测定,所用仪器为吉天AFS-9130型双道原子荧光光度计;Cu、Pb、Zn、Cd和Cr采用原子吸收分光光度法测定,所用仪器为日立Z-2000塞曼效应原子吸收分光光度计。

1.2 评价方法

根据调查内容,采用有机污染指数(A)^[3]与富营养指数(E和NQI)^[3]评价流沙湾海域水质的还原性有机污染状况与富营养化水平,应用尼梅罗指数法^[4]对海水环境质量进行综合评价。应用地累积指数^[5-6]和潜在生态危害指数^[7-8]对调查海域沉积物重金属的污染累积程度和潜在生态危害性进行评价。

地累积指数法用于沉积物环境重金属的污染评价,利用重金属元素的实测值和背景值评价重金属的污染程度。计算公式为:

$$I_{geo} = \log_2 [C_i / (k \times B_i)]$$

式中 I_{geo} 为地累积指数, C_i 和 B_i 分别为元素的实测值和背景值。 k 为系数,一般取1.5。

潜在生态危害指数法^[7-8]依据重金属元素的生物毒性及其在环境中的累积污染程度,评价重金属对环境的潜在危害性。计算公式为:

$$RI = \sum E_i, E_i = T_i \times C_{fi} = T_i \times C_i / B_i$$

式中 RI 和 E_i 分别为潜在生态危害指数和生态危害系数, T_i 和 C_{fi} 分别为元素的毒性系数^[8]和富集系数, C_i 和 B_i 同上。其中 T_i 参照HAKANSO^[8]提出的毒性系数值。

根据《海水水质标准》^[13]和《海洋沉积物质量》^[14]的分类,第二类水质适用于养殖水域。文章在评价过程中,以二类海水的水质标准作为评价的标准。计算过程中用到的因子的背景值,参考中国环境背景值中粤西海域沉积物背景值确定^[15](表1)。

1.3 数据统计

数据的统计分析采用 SPSS 软件进行,图形以 Surfer 软件绘制。

2 结果与讨论

2.1 海水环境质量

此次调查海水的温度、盐度、DO、COD、DIN 和 PO_4^{3-} 等各因子的区域差异小,而季节变化大(表2和表3)。

流沙湾周围没有大河注入,海水盐度变化不受

地面径流影响。流沙湾所处雷州半岛属于热带气候,夏、秋季为雨季,降雨量占全年的80%以上。根据广东省海岸带和海涂资源综合调查^[16]的结果,8月降雨量比5月高约3倍。大量淡水的输入,导致8月流沙湾海水盐度比5月低。进入冬、春季节(从11月至翌年2月),降水明显减少,海水盐度持续升高。降水量是影响流沙湾海水盐度变化的主要因素。调查海域水深较浅(约5~6m),海水温度的变化也与季节的转变相关,夏、秋季气温高,水温也高;冬、春季节寒冷,水温低。海水中DO含量受氧气的溶解度控制,与海水的温度、盐度以及生物过程等因素有关。流沙湾海水DO与海水的温度和盐度均呈负相关性^[17]。2008年8月与5月海水温度相近,8月海水盐度明显低于5月,低盐度能增加氧气的溶解度,DO含量升高。同时,8月浮游植物生长旺盛、生物量高^[18],其光合作用向

表1 流沙湾海域沉积物中元素背景值

Tab. 1 Background data of seawater and sediments from Liusha Bay

	汞 Hg	砷 As	铜 Cu	铅 Pb	锌 Zn	镉 Cd	铬 Cr
ρ (海水) / $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ seawater	0.005	1	1	3	5	0.1	0.3
w (沉积物) / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ sediment	0.075	10	5	20	40	0.08	20

表2 流沙湾海域水质调查结果

Tab. 2 Survey data of seawater from Liusha Bay

站点 station	温度/ $^{\circ}\text{C}$ temperature	盐度 salinity	ρ (溶解氧) / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ DO	pH	ρ (化学耗氧量) / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ COD	ρ (无机氮) / $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ DIN	ρ (活性磷酸盐) / $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ PO_4^{3-}
S1 [#]	28.27	31.60	6.15	7.92	1.61	0.34	8.62
S2 [#]	27.10	31.88	6.77	8.09	2.24	0.32	9.60
S3 [#]	28.33	31.90	6.84	8.11	1.86	0.34	9.55

表3 流沙湾海域水质的季节变化

Tab. 3 Seasonal variation of seawater from Liusha Bay

季节 season	温度/ $^{\circ}\text{C}$ temperature	盐度 salinity	ρ (溶解氧) / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ DO	pH	ρ (化学耗氧量) / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ COD	ρ (无机氮) / $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ DIN	ρ (活性磷酸盐) / $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ PO_4^{3-}
2008.05	30.65	32.81	5.53	8.05	0.71	0.23	5.11
2008.08	31.99	30.54	7.48	8.14	2.08	0.47	9.83
2008.11	27.24	31.35	6.49	8.09	3.08	0.47	16.8
2009.02	21.71	32.48	6.86	7.89	1.75	0.17	5.45

海水中释放的氧气量增加,使海水的 DO 含量出现最高值。由于光合作用吸收水中的二氧化碳 (CO_2),海水的 pH 出现最高值 (8.14)。

此次调查的统计结果显示,流沙湾海水 DIN 含量与海水盐度呈显著负相关性,即随盐度降低,海水中 DIN 含量升高。流沙湾周围无大河注入,降水是该海域主要的淡水输入源。夏、秋季节(雨季)降雨量大,研究结果证明降雨中的氮(N)是土壤中 N 的重要来源^[19],有 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 等随雷雨输入到海水中,增加海水中 DIN 的含量,成为该海域水质中 DIN 的重要来源。另外,夏、秋季节也是贝类养殖的主要季节,贝类排泄物也是养殖区 DIN 污染的重要因素^[20]。而调查海域的贝类养殖为开放式,没有投喂饵料,海水中 DIN 不受残余饵料的分解和矿化的影响。雨季结束后进入冬、春季节,降雨量减少, DIN 主要来源于潮汐作用等物理过程及与外海水的交换^[1]。海水中 DIN 被浮游植物利用, DIN 含量下降。从表 3 的数据可见,在 DIN 含量较高的夏、秋季节, PO_4^{3-} 、COD 和 pH 的含量也高于冬、春

季。此次调查结果的相关性分析表明,流沙湾海水 PO_4^{3-} 含量与 COD 呈显著正相关性。夏、秋季节浮游植物生长旺盛,是贝类养殖的主要季节。包括贝类的排泄物等在内的还原性有机物质增加,相应 COD 含量高。贝类的排泄物分解和浮游植物的代谢更新加速磷(P)的转化, PO_4^{3-} 的含量升高。

该海域水质除 DIN 超标外,其他因子质量状况较好(表 4)。调查期间 DO 和 PO_4^{3-} 的质量指数均小于 1, COD 和 pH 的超标率均为 8.3%,其中 2008 年 11 月 S2[#]站 COD 含量超标,2009 年 2 月 S1[#]站 pH 低于标准值(7.8),质量指数分别为 1.53 和 1.49。DIN 的超标率为 58.3%。其中 2008 年 8 月和 11 月 DIN 的测定结果均超过养殖用水标准值,质量指数最大值为 1.73。2008 年 5 月和 2009 年 2 月 DIN 的测定结果大都符合养殖水质标准要求。贝类排泄物是养殖区污染的重要因子之一,特别是在贝类生长的旺季,可能导致养殖海域水体的富营养化^[20-21]。8 月和 11 月 DIN 含量超标,可能与贝类的养殖有关。

表 4 流沙湾海水有机污染的质量指数

Tab. 4 Quality indices of organic pollution of seawater from Liusha Bay

站位 station	溶解氧 DO	pH	化学耗氧量 COD	无机氮 DIN	活性磷酸盐 PO_4^{3-}
S1 [#]	0.59	0.66	0.54	1.13	0.29
S2 [#]	0.40	0.17	0.75	1.07	0.32
S3 [#]	0.34	0.11	0.62	1.13	0.32

计算流沙湾海域水质的尼梅罗指数为 0.87,表明该海域水质良好。采用有机污染指数(A)评价流沙湾海水有机污染程度,其结果为 $A=0.72$,显示调查海域水质处于清洁状态。2 种方法的评价结果一致。该海域有机物的主要来源为养殖贝类的排泄物,导致在养殖的主要季节 COD 超标。流沙湾所处地理位置及其周边经济发展状况,使其受人为污染的影响较小,水质状况良好。

根据 PO_4^{3-} 含量,流沙湾海水营养水平属于贫营养型;根据 DIN 含量则处于富营养状态。采用综合方法计算其营养指数的 E 和 NQI 分别为 1.29 和 2.04,指示该海水营养水平分别处于富营养和中等营养水平。采用 PO_4^{3-} 或者 DIN 含量均不能全

面表述海水的营养组成;综合方法的 E 和 NQ 值,包含了 DIN 和 PO_4^{3-} 的含量,相对全面。但是流沙湾海域水质 N/P 在 24.5 ~ 64.5 之间,平均 35.6,远远高于浮游植物生长所需的正常值(Redfield 值, $\text{N/P}=16/1$),属于 P 限制型。由于海水受到营养盐的限制,必然有一部分 N 或 P 相对过剩^[22]。综合评价模式的 E 和 NQI 均将过剩的营养盐计算为营养水平,但实际上过剩的营养盐没有被浮游植物利用,只是处于一种潜在可利用性。流沙湾周围没有大河注入,降水不能增加 P 的输入。没有外源 P 输入,过量的 DIN 不能被浮游植物利用,不能为真正的富营养化做出贡献,只是有潜在的富营养的可能。根据营养盐限制海域富营养分级指

标^[22], 流沙湾海水营养水平的确切描述是 P 限制潜在中等富营养。

2.2 沉积物质量

流沙湾海域沉积物重金属 Hg、As、Cu、Pb、Zn、Cd 和 Cr 质量分数的变化范围分别为 0.038 ~ 0.186 mg·kg⁻¹、6.24 ~ 14.1 mg·kg⁻¹、2.80 ~ 29.2 mg·kg⁻¹、9.01 ~ 34.8 mg·kg⁻¹、8.01 ~ 148 mg·kg⁻¹、0.11 ~ 0.43 mg·kg⁻¹ 和 1.74 ~ 58.8 mg·kg⁻¹, 其平均值分别为 0.14 mg·kg⁻¹、10.1 mg·kg⁻¹、16.8 mg·kg⁻¹、24.2 mg·kg⁻¹、72.2 mg·kg⁻¹、0.19 mg·kg⁻¹ 和 23.4 mg·kg⁻¹。调查期间流沙湾海域沉积物中重金属元素质量分数低于海洋沉积物质量一类标准限量值, 表明该海洋沉积物质量较好。

利用地累积指数法评价该海域沉积物重金属污染程度, 根据 I_{geo} 计算结果, 流沙湾海域沉积物中的 As 和 Pb 处于无污染; Hg 和 Cd 处于轻度污染; Zn 在 S3[#]站处于无污染; 在 S2[#]和 S1[#]站处于轻度污染; Cr 在 S2[#]和 S3[#]站处于无污染; 在 S1[#]站处于轻度污染; Cu 在 S3[#]站处于轻度污染; 在 S2[#]和 S3[#]站处于中等污染 (表 5)。

沉积物中重金属元素含量高, 对环境的潜在危害性大。利用潜在生态危害指数法对流沙湾海域沉积物中重金属的生态危害进行评价 (表 6)。流沙湾海域沉积物重金属潜在中等生态危害。其中 Hg 和 Cd 的潜在危害性较高, 属于中等和部分区域潜在强的生态危害, As、Cu、Pb、Zn 和 Cr 属于轻微

生态危害。

对比地累积指数法和潜在生态危害指数法, 前者评价结果中 Cu 处于中等污染。而在潜在危害指数评价的结果中, Cu 为潜在轻微生态危害。同样, Hg 和 Cd 处于轻度污染, 却为潜在较高生态危害。不同的评价方法得出的结果往往有所差异^[23], 地累积指数法仅考虑沉积物中重金属元素的实际含量, 参照元素的背景值, 是人为污染在环境中的累积, 直观反映了外源重金属在沉积物中的累积程度^[24]。潜在生态危害指数法对重金属的生物毒性进行加权计算, 包含了重金属的浓度效应、协同效应、毒性效应和敏感性等 4 方面的内容, 将重金属的生态效应、环境效应与毒理学联系在一起^[7,25], 对重金属的潜在危害性进行评价, 反映对未来可能的危害。重金属生物毒性的鉴别在沉积物污染评价中占有重要地位^[26]。地累积指数评价和生态风险评估法包含了重金属在土壤中的地球化学行为及环境毒性差异等因素, 两者结合应用, 既反映重金属的污染累积状况, 又反映重金属的潜在危害性, 能较合理地土壤重金属污染状况进行系统评价^[27]。综合 2 种评价方法的结果, 流沙湾沉积物中 Cu 处于中等污染, 指 Cu 在沉积物中的富集程度。由于 Cu 的生物毒性低^[28], 因此, 其潜在的生态危害轻。同样 Hg 和 Cd 在沉积物中的积累程度低, 污染轻微。但 Hg 和 Cd 的毒性极强^[28], 轻微的对环境的危害程度却比较严重。

表 5 流沙湾海域沉积物重金属元素的地累积指数值

Tab. 5 Geo-accumulation indices of heavy metals in sediments from Liusha Bay

站位 station	汞 Hg	砷 As	铜 Cu	铅 Pb	锌 Zn	镉 Cd	铬 Cr
S1 [#]	0.51	-0.65	1.65	-0.23	0.45	0.58	0.21
S2 [#]	0.32	-0.65	1.21	-0.14	0.62	0.87	-0.38
S3 [#]	0.21	-0.43	0.34	-0.60	-0.51	0.42	-1.26

表 6 流沙湾海域沉积物重金属元素的潜在生态危害系数

Tab. 6 Potential ecological risk indices of heavy metals in sediments from Liusha Bay

站位 station	汞 Hg	砷 As	铜 Cu	铅 Pb	锌 Zn	镉 Cd	铬 Cr	潜在生态危害指数 RI
S1 [#]	85.3	9.56	23.6	6.40	2.05	67.5	3.46	198
S2 [#]	74.7	9.54	17.4	6.80	2.31	82.5	2.31	196
S3 [#]	69.3	11.1	9.50	4.95	1.06	60.0	1.25	157

3 结论

流沙湾海水各调查因子呈季节性变化, 降水是影响盐度和 DIN 变化的主要因素, 同时也是 DIN 的重要来源。该海域水质清洁, 有机污染程度低, 属于 P 限制型潜在中等富营养化海域。沉积物的重金属污染程度较低。但是, 沉积物中 Hg 和 Cd 等毒性较强的重金属元素的潜在危害较高, 对该海域的生态环境以及养殖贝类的产品质量形成潜在的危害性。沉积物中 As、Cu、Pb、Cr 和 Zn 的潜在生态危害性轻微。

参考文献:

- [1] 潘胜强. 流沙湾营养盐时空分布及限制研究 [D]. 湛江: 广东海洋大学, 2009.
PAN Shengqiang. Spatio-temporal distribution and limits of nutrients in Liusha Bay [D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2009. (in Chinese)
- [2] 黄小平, 黄良民, 李颖虹, 等. 华南沿海主要海草床及其生境威胁 [J]. 科学通报, 2006, 51 (S3): 114 - 119.
HUANG Xiaoping, HUANG Liangmin, LI Yinghong, et al. The main sea grass bed and its ecological environmental threat in the coast of the South China Sea [J]. Sci Bull, 2006, 51 (S3): 114 - 119. (in Chinese)
- [3] 贾晓平, 杜飞雁, 林钦, 等. 海洋渔场生态环境质量状况综合评价方法探讨 [J]. 中国水产科学, 2003, 10 (2): 160 - 164.
JIA Xiaoping, DU Feiyan, LIN Qin, et al. A study on comprehensive assessment method of ecological environment quality of marine fishing ground [J]. J Fish Sci China, 2003, 10 (2): 160 - 164. (in Chinese)
- [4] 唐永奎. 环境质量及其评价和预测 [M]. 北京: 科学出版社, 1980.
TANG Yongkui. The assessment and forecast of environment quality [M]. Beijing: Science Press, 1980. (in Chinese)
- [5] 唐阵武, 程家丽, 岳勇, 等. 武汉典型湖泊沉积物中重金属累积特征及其环境风险 [J]. 湖泊科学, 2009, 21 (1): 61 - 68.
TANG Zhenwu, CHENG Jiali, YUE Yong, et al. Accumulations and risks of heavy metals in the sediments from 8 typical lakes in Wuhan, China [J]. J Lake Sci, 2009, 21 (1): 61 - 68. (in Chinese)
- [6] MULLER G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River [J]. Geochem J, 1969, 2 (3): 108 - 118.
- [7] 许振成, 杨晓云, 温勇, 等. 北江中上游底泥重金属污染及其潜在生态危害评价 [J]. 环境科学, 2009, 30 (11): 3262 - 3268.
- XU Zhencheng, YANG Xiaoyun, WEN Yong, et al. Evaluation of the heavy metals contamination and its potential ecological risk of the sediments in Beijiang River's upper and middle reaches [J]. Environ Sci, 2009, 30 (11): 3262 - 3268. (in Chinese)
- [8] HAKANSON L. An ecology risk index for aquatic pollution control: a sedimentological approach [J]. Water Res, 1980, 14 (8): 975 - 1001.
- [9] LEVENT T A, YILMAZ F, DEMIRAK A, et al. Sources and distribution of trace metals in the Saricay Stream basin of southwestern Turkey [J]. Environ Monit Assess, 2007, 125 (1): 47 - 57.
- [10] LONG E R, INGERSOLL C G, MACDONALD D D. Calculation and uses of mean sediment quality guideline quotients: a critical review [J]. Environ Sci Technol, 2006, 40 (6): 1726 - 1736.
- [11] PEKEY H, KARAKAS D, AYBERK S, et al. Ecological risk assessment using trace elements from surface sediments of Izmit Bay (Northeastern Marmara Sea) Turkey [J]. Mar Pollut Bull, 2004, 48 (9): 946 - 953.
- [12] 国家质量监督检验检疫总局. GB 17378-2007, 海洋监测规范 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB 17378 - 2007, The specification of marine monitoring [S]. Beijing: China Standards Publishing House, 2008. (in Chinese)
- [13] 国家质量技术监督局. GB 3097-1997, 海水水质标准 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1997.
State Bureau of Quality and Technical Supervision. GB 3097 - 1997, Marine water quality standard [S]. Beijing: China Standards Publishing House, 1997. (in Chinese)
- [14] 国家质量监督检验检疫总局. GB 18668-2002, 海洋沉积物质量 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB 18668-2002, Marine sediment quality [S]. Beijing: China Standards Publishing House, 2002. (in Chinese)
- [15] 李建, 郑春江. 环境背景值数据手册 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1988: 402 - 403.
LI Jian, ZHENG Chunjiang. The handbook of the environment background data [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1988: 402 - 403. (in Chinese)
- [16] 广东省海岸带和海涂资源综合调查大队, 广东省海岸带和海涂资源综合调查领导小组办公室. 广东省海岸带和海涂资源综合调查报告 [R]. 北京: 海洋出版社, 1988: 14 - 25.
Guangdong Comprehensive Survey Group of Coastal Zone and Coastal Resources, Guangdong Comprehensive Survey Leading Group Office of Coastal Zone and Coastal Resources. The reports of Guangdong coastal zone and coastal resources comprehensive survey [R]. Beijing: China Ocean Press, 1988: 14 - 25. (in Chinese)

- [17] 谢群, 张瑜斌, 孙省利, 等. 流沙湾溶解氧的分布特征及其相关因素的探讨 [J]. 环境科学与技术, 2009, 32 (9): 39-44.
XIE Qun, ZHANG Yubin, SUN Shengli, et al. Distribution characteristics of dissolved oxygen and correlating factors analysis in Liusha Bay [J]. Environ Sci Technol, 2009, 32 (9): 39-44. (in Chinese)
- [18] 王彦, 申玉春, 吴灶和, 等. 流沙湾浮游生物与叶绿素含量的初步研究 [C] //2008年中国水产学会学术年会论文摘要集. 昆明: 中国水产学会, 2008: 285.
WANG Yan, SHEN Yuchun, WU Zaohe, et al. The preliminary study of plankton and chlorophyll contents in Liusha Bay [C] // Abstract Book of 2008 Annual Conference of China Society of Fisheries. Kunming: China Society of Fisheries, 2008: 285. (in Chinese)
- [19] 宇万太, 马强, 张璐, 等. 下辽河平原降水中氮素的动态变化 [J]. 生态学杂志, 2008, 27 (1): 33-37.
YU Wantai, MA Qiang, ZHANG Lu, et al. Dynamic changes of nitrogen in precipitation in lower reach of Liaohe River plain [J]. Chinese J Ecol, 2008, 27 (1): 33-37. (in Chinese)
- [20] MESNAGE V, OGIER S, BALLY G, et al. Nutrient dynamics at the sediment-water interface in a Mediterranean lagoon (Thau, France): influence of biodeposition by shellfish farming activities [J]. Mar Environ Res, 2007, 63 (3): 257-277.
- [21] FERREIRA J G., SEQUEIRA A, HAWKINS A J S, et al. Analysis of coastal and offshore aquaculture: application of the FARM model to multiple systems and shellfish species [J]. Aquaculture, 2009, 289 (1/2): 32-41.
- [22] 郭卫东, 章小明, 杨逸萍, 等. 中国近岸海域潜在性富营养化程度的评价 [J]. 台湾海峡, 1998, 17 (1): 64-70.
GUO Weidong, ZHANG Xiaoming, YANG Yiping, et al. Potential eutrophication assessment for Chinese coastal waters [J]. J Oceanogr Taiwan Strait, 1998, 17 (1): 64-70. (in Chinese)
- [23] LEOTSINIDIS M, SAZAKLI E. Evaluating contamination of dredges and disposal criteria in Greek coastal areas [J]. Chemosphere, 2008, 72 (5): 811-818.
- [24] 柴世伟, 温琰茂, 张亚雷, 等. 地积累指数法在土壤重金属污染评价中的应用 [J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2006, 34 (12): 1657-1661.
CHAI Shiwei, WEN Yanmao, ZHANG Yalei, et al. Application of index of geoaccumulation (I_{geo}) to pollution evaluation of heavy metals in soil [J]. J Tongji Univ: Natural Science, 2006, 34 (12): 1657-1661. (in Chinese)
- [25] 张丽旭, 蒋晓山, 赵敏, 等. 长江口洋山海域表层沉积物重金属的富积及其潜在生态风险评价 [J]. 长江流域资源与环境, 2007, 16 (3): 352-356.
ZHANG Lixu, JIANG Xiaoshan, ZHAO Min, et al. Accumulation of heavy metals in surface sediments from the sea region of Yangshan in the Yangtze estuary with assessment of their potential ecological risk [J]. Resources Environ Yangtze Basin, 2007, 16 (3): 352-356. (in Chinese)
- [26] DOYLE C J, PABLO F, LIM R P, et al. Assessment of metal toxicity in sediment pore water from lake Macquarie, Australia [J]. Arch Environ Contam Toxicol, 2003, 44 (3): 343-350.
- [27] 彭景, 李泽琴, 侯家渝. 地累积指数法及生态危害指数评价法在土壤重金属污染中的应用及探讨 [J]. 广东微量元素科学, 2007, 14 (8): 13-17.
PENG Jing, LI Zeqin, HOU Jiayu. Application of the index of geo-accumulation index and ecological risk index to assessment heavy metal pollution in soils [J]. Guangdong Trace Elements Sci, 2007, 14 (8): 13-17. (in Chinese)
- [28] 徐争启, 倪师军, 庾先国, 等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算 [J]. 环境科学与技术, 2008, 31 (2): 112-115.
XU Zhengqi, NI Shijun, TUO Xianguo, et al. Calculation of heavy metals' toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index [J]. Environ Sci Technol, 2008, 31 (2): 112-115. (in Chinese)