

大凌河口沉积物重金属、PCBs 潜在生态风险评价

王 摆¹, 吴金浩¹, 于 坤², 田甲申¹, 王召会¹, 韩家波¹

(1. 辽宁省海洋水产科学研究院 辽宁 大连 116023; 2. 国家海洋局海洋减灾中心 北京 100194)

摘 要:基于2010年10月对大凌河口表层沉积物中有机碳(TOC)、总氮(TN)、总磷(TP)、重金属(Cu、Pb、Zn、Cd、Hg、As)、多氯联苯(PCBs)的调查数据,采用单因子指数法和Hakanson生态风险指数法对重金属、PCBs进行分析与评价。研究表明:大凌河口重金属、PCBs的潜在生态危害系数大小为: Cd > Hg > As > Pb > PCBs > Cu > Zn, Cd是主要潜在生态风险因子。通过相关性分析发现:大凌河口沉积物TOC和TN含量、TN与TP含量之间成极显著正相关性,表明TN与TOC、TN与TP有相同或相似的来源;而PCBs含量与TOC存在显著的负相关性。

关键词:大凌河口;沉积物;重金属;多氯联苯;生态风险评价

中图分类号:P736;X826 文献标识码:A 文章编号:1007-6336(2014)04-0556-06

DOI:10.13634/j.cnki.mes.2014.04.011

Heavy metals , PCBs and their potential ecological risk assessment in the sediment at Dalinghe Estuary

WANG Bai¹, WU Jin-hao¹, YU Kun², TIAN Jia-shen¹, WANG Zhao-hui¹, HAN Jia-bo¹

(1. Liaoning Ocean and Fisheries Science Research Institute , Dalian 116023 , China; 2. National Marine Hazard Mitigation Service , SOA , Beijing 100194 , China)

Abstract:Through analyzing the contents of different pollutants (Zn , Pb , Cu , Cd , Hg , As , PCBs , TOC , TN and TP) in the surface sediment at Dalinghe Estuary , with adopting pollution parameter techniques of single factor and Hakanson potential ecological risk index techniques , the quality status of these pollutants in the sediments were evaluated based on the monitoring data of surface sediments at Dalinghe Estuary (Oct. , 2010) . The results showed that the heavy metals and PCBs possessed rather light potential ecological risks , and the sequence of potential ecological risk of these pollutants was Cd > Hg > As > Pb > PCBs > Cu > Zn , Cd was main factor of potential ecological risks in the Dalinghe Estuary . There were positive correlation-ship between TOC and TN contents , TN and TP contents , suggested that TOC and TN , TN and TP might have the same or similar resources . And there was negative correlation-ship between PBCs and TOC .

Key words: Dalinghe Estuary; sediment; heavy metals; PCBs; ecological risk assessment

河口作为连接陆、海生态系统的主要通道,在物理、化学和生物过程的耦合作用下,具有明显的过滤作用,其有机质的生物地球化学循环是河口生态系统的关键组成部分,为河口生态系统的碎

屑食物链提供物质保证^[1]。河口同时容纳了淡水、半咸水、海水,彼此之间存在着复杂的界面,具有重要的物理、化学、生物以及地质意义。地形和水动力条件共同决定了河口是生态环境脆弱的地

收稿日期:2013-11-27,修订日期:2013-12-31

基金项目:国家科技支撑计划项目(2010BAC68B02);海洋公益性行业科研专项(201205012-7)

作者简介:王 摆(1981-),男,安徽明光人,助理研究员,研究方向为海洋生态学,E-mail: Wangbai1980@hotmail.com

通讯作者:韩家波(1962-),男,研究员,研究方向为海洋生物学,E-mail: jbhan@sina.com

区,对自然变化和环境变化有着很敏感的反应,并且又是经济、交通、旅游等人文活动的集中地,故生态环境很容易受到破坏^[2]。据统计,每年从陆地经河口进入海洋的物质约为210亿t,一些重金属(Cd、Cu等),约50%由河口进入海洋,Ag、Co等甚至达到90%^[3]。河口区域物理、化学和生物作用较海洋更为剧烈,相对于开阔海域,河口地区水的存留时间很短,水体中污染物浓度受到多种因素的影响,而沉积物中污染物的浓度是长期积累的结果。因此,对沉积物中污染物进行分析评价较水质分析更具代表性,分析测试也更简单、可靠。

目前,国内对河口沉积物进行评价多侧重于重金属和有机污染方面,且多集中于黄河口、长江口及珠江口等主要河道^[4-7]。对大凌河口通过分析沉积物基本理化性质和主要污染因子相结合的研究报道较少。本文通过对大凌河口沉积物理化因子、湿地水环境及特征污染物的研究,分析探讨了污染物分布特征、污染程度及其生态风险,以期对大凌河口近岸沉积物污染控制和风险评价提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

大凌河口位于辽河三角洲湿地西部,总面积1016 km²,属温带季风大陆性气候,年平均气温8.4℃,年平均降水量610 mm,无霜期160 d~180 d,年日照时数为2700 h。主要植被类型为沼生芦苇(*Phragmites australis*)群落、翅碱蓬(*Suaeda heteroptera*)群落、香蒲(*Typha orientalis*)等。

1.2 样方调查

本研究野外调查于2010年10月开展。根据大凌河口水文地貌特征的分布范围,沿大凌河河流方向和垂直河流方向设置了2条样带,每条样带设置5×5 m²的样地4~5个,共9个样地(DLE-1~DLE-9),每个样地分为25个1×1 m²小样格,3个小样格为1个样方,每个样地内随机设置3个样方,共调查了27个样方。样地布设见图1,其中DLE-1低潮滩,DLE-9为高潮滩,DLE-6紧邻大凌河。

1.3 样品采集与测量

每个样方随机设置5个采样点,取0~2 cm

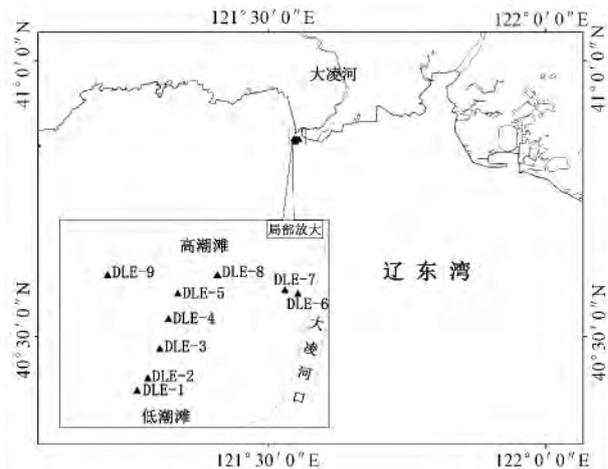


图1 大凌河口采样地设置

Fig. 1 The sample stations at Dalinghe Estuary

表层沉积物,将同一样地的5份沉积物样品混合,用于土壤指标的测量。重金属、TOC和PCBs依据GB18668-2002中规定的分析方法测定,TN依据LY/T1228-1999测定,TP依据LY/T1232-1999测定。

1.4 单因子评价法、潜在生态风险指数法

采用单因子指数法对大凌河口沉积物中TOC、TN、TP、重金属和PCBs进行分析和评价,单因子污染指数计算公式为: $S_i = C_i / C_s$ 。其中: S_i 为沉积物中评价因子的污染指数; C_i 为评价因子的实测值; C_s 为评价因子的标准值。

潜在生态风险指数法^[8]计算公式为: $E_r^i = T_r^i C_f^i$, $C_f^i = T_r^i C_n^i / C_s^i$, $RI = \sum E_r^i = \sum T_r^i C_n^i / C_s^i$ 。式中: C_f^i 为第*i*种污染物污染系数; C_n^i 为第*i*种污染物实测浓度; C_s^i 为第*i*种污染物参照值; T_r^i 为污染物的毒性系数。

污染评价指标及其与污染程度和潜在生态风险程度的关系参考 Hakanson 提出的划分标准^[9]。

表1 评价指标与污染程度和潜在生态危险程度的关系^[9]
Tab. 1 Relation between evaluation and contamination degree and potential ecological risk

S_i	单因子污染物 污染程度	E_r^i	单因子污染物 生态危害程度	RI	总的潜在生态 风险程度
<1	低	<40	低	<150	低
1~3	中等	40~80	中	150~300	中等
3~6	重	80~160	较重	300~600	重
≥6	严重	160~320	重	≥600	严重
		≥320	严重		

2 结果与讨论

2.1 大凌河口沉积物理化特性及营养盐来源分析

由表2可知,各站位表层沉积物pH值变化不大,范围为7.63~8.17。全盐含量在(7.12~19.11) $\times 10^{-3}$,含水率变化比较大,分布范围为23.60%~85.77%。

表2 大凌河口湿地沉积物基本理化指标

Tab. 2 Physical and chemical characters of sediments at Dalinghe Estuary

站位	pH	$w / \times 10^{-3}$				含水率/(%)
		全盐	TOC	TN	TP	
DLE-1	7.97	12.50	7.12	0.49	0.40	66.37
DLE-2	7.90	10.80	5.52	0.33	0.37	77.87
DLE-3	8.00	8.59	14.1	0.79	0.52	85.30
DLE-4	7.93	10.45	10.9	0.67	0.52	67.50
DLE-5	7.63	14.68	14.9	0.85	0.53	70.50
DLE-6	7.73	8.08	9.02	0.57	0.49	85.77
DLE-7	7.63	7.12	7.97	0.47	0.44	35.67
DLE-8	7.67	13.49	13.8	0.79	0.63	41.80
DLE-9	8.17	19.11	8.86	0.50	0.49	23.60
均值	7.85	11.65	10.24	0.61	0.49	61.60

通过对大凌河口 TOC 和 TN 及 TP 和 TN 的

表3 大凌河口湿地沉积物中重金属、PCBs 含量

Tab. 3 The concentrations of heavy metals, PCBs in sediments at Dalinghe Estuary

站位	重金属 / $\times 10^{-6}$						PCBs / $\times 10^{-9}$							
	Zn	Pb	Cu	Cd	As	Hg	PCBs	PCB ₂₈	PCB ₅₂	PCB ₁₁₈	PCB ₁₃₈	PCB ₁₅₃	PCB ₁₅₅	PCB ₁₉₈
DLE-1	97.0	23.8	20.0	0.80	8.10	0.06	2.718	0.149	—	—	0.000	2.363	0.057	0.149
DLE-2	—	—	—	—	—	—	1.880	0.190	—	0.071	0.062	1.186	0.132	0.239
DLE-3	104.6	28.5	25.8	0.92	7.43	0.05	0.643	—	—	—	—	0.643	—	—
DLE-4	91.2	29.2	28.8	2.20	9.20	0.05	0.770	0.174	—	—	0.058	0.369	0.096	0.072
DLE-5	115.5	30.8	31.9	1.11	9.20	0.07	0.273	—	0.034	—	—	0.181	—	0.058
DLE-6	90.5	24.6	23.1	0.70	8.68	0.06	1.075	0.283	—	0.066	0.086	0.395	0.087	0.158
DLE-7	54.0	9.4	7.3	0.34	7.06	0.06	—	—	—	—	—	—	—	—
DLE-8	90.7	24.6	17.9	0.62	11.35	0.09	—	—	—	—	—	—	—	—
DLE-9	82.0	27.4	21.8	0.42	10.27	0.07	—	—	—	—	—	—	—	—

注“—”表示未检测出。

与国内外典型的河口和滨岸带比较(表4),大凌河口沉积物中,Cd 污染较为严重,其他因子平均含量处于相对较低的水平,但整体来看,该地区重金属含量远远低于国外污染严重的河口^[14-17],如英国的 Thames 河口^[16],且 Zn、Pb、Cu

相关性分析发现,TOC 和 TN 含量之间呈极显著线性正相关 $y = 5.21 \times 10^{-2}x + 7.25 \times 10^{-2}$ (公式1,其中 y 为 TN, x 为 TOC) 相关系数 $R = 0.9871$; TN 和 TP 含量之间呈显著线性正相关 $y = 3.7 \times 10^{-1}x + 2.63 \times 10^{-1}$ (公式2,其中 y 为 TP, x 为 TN) 相关系数 $R = 0.8490$,说明 TN 与 TOC 具有显著的同源相关性,TN 和 TP 具有相同或相似的来源。公式1中有一正的截距,说明 TN 中有一部分氮与 TOC 来源不同,这部分特殊形态的氮主要是无机氮(IN)。在应用 C/N 比这一指标时应尽可能扣除 IN 影响,以便能更准确地判别有机质的来源。校正后,TOC/ON 为 17.05~21.44,平均值为 19.30。表明大凌河口沉积物中有机质属混源有机质,且陆源输入的成分较大。

2.2 大凌河口沉积物中重金属、PCBs 分布特征

由表3可知,大凌河口沉积物中重金属的分布呈带状分布,但最大值不是出现在 DLE-7、DLE-8 和 DLE-9 高潮滩,而是出现在临近这几个站位的次高潮滩 DLE-4 和 DLE-5 站位,然后向低潮滩逐渐降低,在 DLE-2 站位没有检测出重金属含量,这可能是受不同水动力条件作用的影响。沿岸分布上,DLE-6、DLE-8 和 DLE-9 站位重金属含量处于同一水平,而 DLE-7 站位除 Hg 外,Zn、Pb、Cu、Cd 和 As 要明显低于其它站位。

含量均低于国内受人类活动影响较大的长江口、珠江口和闽江口,Hg 含量和各河口处于同一水平,As 含量要大于长江口和辽河口,而远小于珠江口,Cd 污染要比长江口、珠江口、闽江口严重,而轻于辽河口^[3,10-12]。

PCBs 含量呈明显的带状分布,由河口向海外逐渐增大。按 PCBs 组分来看,六氯高氯代联苯(PCB₁₃₈、PCB₁₅₃、PCB₁₅₅)要远高于三氯(PCB₂₈)、四氯(PCB₅₂)、五氯(PCB₁₁₈)低氯代联苯和八氯高氯代联苯(PCB₁₉₈),PCB₅₂只在 DLE-5 检测出,而

DLE-3 站位只检测出 PCB₁₅₃,我国生产应用的多氯联苯以三氯联苯和五氯联苯为主^[18]。在本研究中五氯联苯的浓度很小,可能是由于五氯联苯在环境中易降解脱氯^[19]。六氯联苯的高浓度可能是由于当地的生产历史及现有工业的不同所致。

表 4 国内外部分河口沉积物中重金属的含量

Tab. 4 Heavy metals concentrations in sediments at different in estuaries

地区	采样时间	$w / \times 10^{-6}$					
		Zn	Pb	Cu	Cd	As	Hg
长江口 ^[10]	1998	189	47	91	0.59	—	—
长江口 ^[3]	1988 ~ 1999	—	15.4	—	0.12	3.3	0.05
珠江口 ^[3]	1988 ~ 1999	—	30.1	—	0.69	23.55	0.13
珠江口 ^[11]	2004	130.4	53.3	39.4	0.62	—	—
辽河口 ^[3]	1988 ~ 1999	—	18.9	—	3.38	5.7	0.07
闽江口 ^[12]	1996	100.3	43.7	27.9	0.165	—	—
胶州湾 ^[13]	2003	60.1	23.6	28.2	0.03	—	—
葡萄牙 Douro 河口 ^[14]	1998	20 ~ 137	12 ~ 44	2.4 ~ 4.7	0.2 ~ 0.49	—	—
英国 Blackwater 河口 ^[15]	1995	89	42	24	0.34	—	—
英国 Thames 河口 ^[16]	1993	219	179	61	1.3	—	—
美国 Narrangansett 湾 ^[17]	1995	250	140	190	0.8	—	—

表 5 我国主要河口沉积物中 PCBs 浓度

Tab. 5 Concentration of PCBs in sediments at main estuaries in China

河口	$w(\text{平均}) / \times 10^{-9}$	$w(\text{范围}) / \times 10^{-9}$
鸭绿江口 ^[3]	0.4	0.2 ~ 0.9
辽河口 ^[3]	0.4	0.2 ~ 1.3
黄河口 ^[20]	1.3	0.7 ~ 2.4
长江口 ^[20-21]	9.3	3.0 ~ 28.6
珠江口 ^[20, 22-23]	52.2	0.1 ~ 461
闽江口 ^[20, 24-25]	19.18	4.7 ~ 57.9
九龙江口 ^[21, 23, 26]	6.18	0.01 ~ 75.7

我国河口地区多为经济比较发达的地区, PCBs 的污染也就比较多。目前对我国主要河口沉积物 PCBs 浓度已有一定程度的分析研究(表 5)。由表可知,全国范围内,PCBs 水平南部发达地区要比北方略高一些,PCBs 污染水平由低到高的顺序为:黄河口 < 辽河口 < 九龙江口 < 长江口 < 闽江口 < 珠江口^[3, 20-26]。珠江口沉积物中 PCBs 浓度水平最高,其中最高值出现于香港新界地区(491×10^{-9}),珠江流域是我国新兴加工工业基地,近年来经济发展迅猛,人口密度剧增,工业废水和生物污水大量排放,使得这一地区环境质量发生明显变化,目前珠江口污染以陆源污染为主^[20, 22-23]。珠江口沉积物中 PCBs 浓度水平较高主要是由于半封闭的港湾,水交换条件差,航运比

较发达,加之受工业废水和生活污水排放的影响。闽江口沉积物 PCBs 高浓度的原因可能是当地居民的生活污染^[20, 24-25]。本研究各站位 PCBs 浓度低于九龙江口^[21, 23, 26]而高于辽河口^[3]和黄河口^[20]。

2.3 大凌河口沉积物 PCBs 含量与 TOC 相关性分析

有研究表明,PCBs 总量与 TOC 呈显著正相关关系,说明 TOC 是影响沉积物中 PCBs 分布的重要因素^[27],PCBs 具有高亲脂性、高辛醇-水分配系数的特点,因此易留于沉积物的有机质和生物体中,TOC 代表沉积物中有机质的含量,有机质通过吸附、络合等作用对 PCBs 有着较高的富集性,对沉积物中 PCBs 分布产生影响^[28]。而本研究中大凌河口沉积物 PCBs 含量与 TOC 呈显著负相关(图 2),这可能与当地 PCBs 组分特点有关。

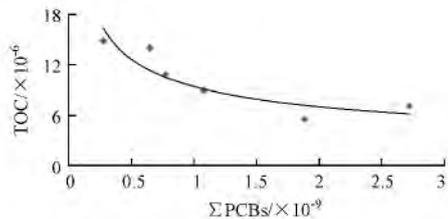


图 2 表层沉积物中 PCBs 与 TOC 的相关性分析

Fig. 2 Correlation analysis between PCBs and TOC of surface sediments

2.4 大凌河口沉积物重金属、PCBs 潜在生态风险评价

大凌河口表层沉积物重金属、PCBs 单项潜在生态危害系数和潜在生态危害指数评价结果见表6。Zn、Pb、Cu、As、Hg 和 PCBs 的 E_r^i 均小于轻微生态危害划分的标准值,而 Cd 在 DLE-1、DLE-3、DLE-4、DLE-5 和 DLE-6 站位大于标准值,且在 DLE-4 达到了 132,说明 Cd 在 DLE-4 站位的潜在危害强,其影响程度也大大高于其它重金属。所有站位沉积物中 PCBs 的潜在生态危害系数 (E_r^i) 均小于轻微生态危害的划分标准值,其中 DLE-7、DLE-8 和 DLE-9 站位无 PCBs 污染。各种污染物的生态危害系数为 $Cd > Hg > As > Pb > PCBs > Cu > Zn$ 。从个站位的 RI 来看,DLE-4 站位 RI 值大于 150,表明此站位重金属、PCBs 的潜在生态危害为中等。

表6 大凌河口沉积物中重金属和 PCBs 单项潜在生态危害系数 (E_r^i) 和潜在生态危害指数 (RI)

Tab.6 Potential ecological risk factors (E_r^i) and risk indices (RI) of Heavy metals and PCBs in surface sediment at Dalinghe Estuary

站位	E_r^i							RI
	PCBs	Zn	Pb	Cu	Cd	As	Hg	
DLE-1	1.21	4.76	3.33	48	5.4	9.6	10.9	83.2
DLE-2	0	0	0	0	0	0	7.5	7.5
DLE-3	1.31	5.70	4.30	55.2	4.95	8	2.6	82.06
DLE-4	1.14	5.84	4.80	132	6.13	8	3.1	161.01
DLE-5	1.44	6.16	5.31	66.6	6.13	11.2	1.1	97.94
DLE-6	1.13	4.92	3.85	42	5.79	9.6	4.3	71.59
DLE-7	0.68	1.88	1.22	20.4	4.71	9.6	0	38.49
DLE-8	1.14	4.92	2.98	37.2	7.57	14.4	0	68.21
DLE-9	1.03	5.48	3.63	25.2	6.85	11.2	0	53.39

3 结论

(1) 大凌河口沉积物 TOC 和 TN 含量之间呈极显著正相关,说明 TN 与 TOC 具有显著的同源相关性;大凌河口表层沉积物 TN 和 TP 含量之间呈显著正相关,说明 TN 和 TP 具有相同或相似的来源。

(2) 大凌河口沉积物中重金属的分布呈带状分布,而且要比国内外典型的河口和滨岸带重金属含量低;PCBs 的潜在生态危害系数均小于轻微生态危害的划分标准值,重金属、PCBs 的生态危

害系数为 $Cd > Hg > As > Pb > PCBs > Cu > Zn$,Cd 是主要潜在生态风险因子。

参考文献:

- [1] GOÑI M A, TEIXEIRA M J, PERKEY D W. Sources and distribution of organic matter in a river-dominated estuary (Winyah Bay, SC, USA) [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2003, 57(5): 1023-1048.
- [2] JOSEPH K A, BALCHAND A N. The application of coastal regulation zones in coastal management appraisal of Indian experience [J]. Ocean & Coastal Management, 2000, 43(6): 515-526.
- [3] 马德毅, 王菊英. 中国主要河口沉积物污染及潜在生态风险评价[J]. 中国环境科学, 2003, 23(5): 521-525.
- [4] 程远梅, 祝凌燕, 田胜艳, 等. 海河及渤海表层沉积物中多环芳烃的分布于来源[J]. 环境科学学报, 2009, 2(11): 2420-2426.
- [5] BIGOT M, SALIOT A, LI J, et al. Organic geochemistry of surface sediments from the Huanghe Estuary and adjacent Bohai Sea (China) [J]. Chemical Geology, 1989, 75(4): 339-350.
- [6] 杨毅, 刘敏, 许世远, 等. 长江口潮滩表层沉积物中 PCBs 和 OCPs 的分布[J]. 中国环境科学, 2003, 23(2): 215-219.
- [7] 彭晓彤, 周怀阳, 翁焕新, 等. 珠江口沉积柱中重金属 V, Ni 和 Co 的分布特征、迁移机制和污染评价[J]. 浙江大学学报(理学版), 2003, 30(1): 103-108.
- [8] 丁喜桂, 叶思源, 高宗军. 近海沉积物重金属污染评价方法[J]. 海洋地质动态, 2005, 21(8): 31-36.
- [9] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach [J]. Water Research, 1980, 14(8): 975-1001.
- [10] 柳林, 许世远, 陈振楼, 等. 上海滨岸带潮滩表层沉积物中重金属的空间分布与环境质量评价[J]. 上海地质, 2000, 73(1): 1-5.
- [11] 黄向青, 梁开, 刘雄. 珠江口表层沉积物有害重金属分布及评价[J]. 海洋湖沼通报, 2006, (3): 27-35.
- [12] 洪丽玉, 洪华生, 徐立, 等. 闽江口-马祖海域表层沉积物及沿岸养殖区生物体中的 Cu, Pb, Zn, Cd 含量分布[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2000, 39(1): 89-95.
- [13] 李玉, 俞志命, 曹西华, 等. 重金属在胶州湾表层沉积物中的分布与富集[J]. 海洋与湖沼, 2005, 6(36): 580-589.
- [14] MUCHA, A P, VASCONCELOS M T S D, BORDALO A A. Spatial and seasonal variations of the macro-benthic community and metal contamination in the Douro Estuary (Portugal) [J]. Marine Environmental Research, 2005, 60(5): 531-550.
- [15] EMMERSON R H C, O'REILLY-WIESE S B, MACLEOD C L, et al. A multivariate assessment of metal distribution in inter-tidal sediments of the Blackwater Estuary, UK [J]. Marine Pollution Bulletin, 1997, 34(11): 960-968.
- [16] BUCKEY D E, SMITH J N, WINTER G V. Accumulation of contaminant metals in marine sediments of Halifax Harbour,

- Nova Scotia: Environment Factors and historical trends [J]. *Applied Geochemistry*, 1995, 10(2): 175-195.
- [17] GOLDBERG E D, GAMBLE E, GRIFFIN J J, et al. Pollution history of Narragansett Bay as recorded in its sediments [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1997, 5(4): 549-561.
- [18] 阙明学, 温青, 刘广民, 等. 多氯联苯在自然水体中的分布现状与处理工艺[J]. *中国给水排水*, 2006, 22(24): 10-15.
- [19] 孙振中, 戚隽渊, 曾智超, 等. 长江口九段沙水域环境及生物体内多氯联苯分布[J]. *环境科学研究*, 2008, 21(3): 92-97.
- [20] WU Y, ZHANG J, ZHOU Q. Persistent organochlorine residues in sediments from Chinese river/estuary systems [J]. *Environmental Pollution*, 1999, 105(1): 143-150.
- [21] 杨毅, 刘敏, 侯立军. 长江口潮滩含氯有机物的分布与TOC、粒度的相关性[J]. *上海环境科学*, 2002, (9): 530-532.
- [22] WONG C K C, YEYNG H Y, CHEUNG R Y H, et al. Ecotoxicological assessment of persistent organic and heavy metal contamination in Hong Kong coastal sediment [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2000, 38(4): 486-493.
- [23] HONG H, XU L, ZHANG L, et al. Special guest paper: Environmental fate and chemistry of organic pollutants in the sediment of Xiamen and Victoria Harbours [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 1995, 31(4): 229-236.
- [24] ZHANG Z L, HONG H S, ZHOU J L, et al. Fate and assessment of persistent organic pollutants in water and sediment from Minjiang River Estuary, Southeast China [J]. *Chemosphere*, 2003, 52(9): 1432-1430.
- [25] 袁东星, 杨东宁, 陈猛, 等. 厦门西港及闽江口表层沉积物中多环芳烃和有机氯污染物的含量及分布[J]. *环境科学学报*, 2001, 21(1): 107-112.
- [26] 陈伟琪, 张珞平, 王新红, 等. 厦门港湾沉积物中有机氯农药和多氯联苯的垂直分布特征[J]. *海洋科学*, 1996, (2): 56-60.
- [27] 黄宏, 尹方, 吴莹, 等. 长江口表层沉积物中多氯联苯残留和风险评估[J]. *同济大学学报*, 2011, 39(10): 1500-1505.
- [28] BROWNAWELL B J, FARRINGTON J W. Biogeochemistry of PCBs in interstitial waters of a coastal marine sediment [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1986, 50(1): 157-163.
-
- (上接第555页)
- [13] 刘红, 何青, 王元叶, 等. 长江口表层沉积物粒度时空分布特征[J]. *沉积学报* 2007, 25(3): 445-455.
- [14] 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.
- [15] HALLOCK P, TALGE H K, COCKEY E M, et al. A new disease in reef-dwelling foraminifera: Implications for coastal sedimentation [J]. *Journal of Foraminiferal Research*, 1995, 25: 280-286.
- [16] GOLDSTEIN S T, BERNHARD J M. Theme Issue: Biology of Foraminifera: Applications in Paleoceanography, Paleobiology, and Environmental Sciences [J]. *Journal of Foraminiferal Research*, 1997, 27(4): 27-33.
- [17] 陈志华. 北冰洋西部沉积物地球化学特征及其环境指示意义[D]. 青岛: 中国海洋大学 2004.
- [18] 林治家, 陈多福, 刘芊. 海相沉积氧化还原环境的地球化学识别指标[J]. *矿物岩石地球化学通报* 2008, 27(1): 72-80.
- [19] MEYER P A. Applications of organic geochemistry to paleolimnological reconstructions: A summary of examples from the Laurentian Great Lakes [J]. *Org Geochem*, 2003, 34: 261-289.
- [20] MEYERS P A. Organic geochemical proxies of paleoceanographic, paleolimnologic and paleoclimatic processes [J]. *Org Geochem*, 1997, 27: 213-250.
- [21] 翦知湣, 黄维. 快速气候变化与高分辨率的深海沉积记录[J]. *地球科学进展* 2003, 18(5): 673-680.
- [22] 常凤鸣. 冲绳海槽晚更新世-全新世古环境演化[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所 2004.
- [23] 张美良, 涂林玲, 林玉石, 等. 中国西南地区中-晚全新世降温事件的石笋记录[J]. *中国岩溶* 2004, 23(4): 283-290.
- [24] 吴艳宏, 王苏民, 侯新花. 青藏高原中部错鄂全新世湖泊沉积物年代学研究[J]. *中国科学(D辑): 地球科学* 2006, 36(8): 713-722.
- [25] 张新荣, 胡克, 胡一帆, 等. 东北地区以泥炭为信息载体的全新世气候变迁研究进展[J]. *地质调查与研究* 2007, 30(1): 39-45.
- [26] 竺可桢. 中国近五千年来气候变迁的初步研究[J]. *中国科学*, 1973, 2: 168-189.
- [27] DENTON G H, KARLÉN W. Holocene climate variations: Their pattern and cause [J]. *Quaternary*, 1973, 3: 155-205.
- [28] 施雅风, 孔昭良, 王苏民, 等. 中国全新世大暖期的气候波动与重要事件 [J]. *中国科学(B辑)*, 1992, 22(12): 1300-1308.
- [29] 施少华. 中国全新世高温期中的气候突变事件及其对人类的影响[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1993, 13(4): 65-73.