

我国海岸带污染生态环境效应研究现状

史戈 曾辉 常文静*

(北京大学深圳研究生院城市规划与设计学院, 广东深圳 518055)

摘要 本文从海岸带污染生态环境效应研究的阶段性特点、工作区域特征、重点研究介质、重点污染物类型等方面对我国 1987—2017 年 30 年间针对大陆沿海地区的相关研究进行了分析和总结。结果显示, 2000 年之前我国该领域研究较为零散, 全面性和系统性不足。此后以 2007 年为界, 分为前期各类研究均衡增长和后期以痕量毒害污染物为主两个阶段; 重点研究区选择以快速城市化和工业化岸线区域、河口及海湾地区为主; 研究介质主要以沉积物、生物和水体为主。目前研究的广度和深度存在不足, 缺乏基础数据的广泛监测和长期积累, 缺少关键生态环境问题的分区界定和分类管控; 今后需要深化重点污染物的源汇过程特征研究, 加强从城市规划的根源层面进行理论与实践相结合的政策与技术体系建设。

关键词 沿海地区; 污染物; 文献计量; 区域差异

Review on pollution ecological environmental effects of coastal zone in China. SHI Ge, ZENG Hui, CHANG Wen-jing* (*Shenzhen Graduate School, Peking University, Shenzhen 518055, Guangdong, China*).

Abstract: We reviewed literatures related to eco-environmental effects of human activities in the coastal areas of China over the past 30 years (1987–2017) from aspects of characteristics of eco-environmental effects over different stages, characteristics of the study areas, characteristics of the research media, and characteristics of the key pollutants. The results showed that research in this field was not systematic and comprehensive before 2000. Afterwards, the changes of research foci in this field could be assigned into two stages, i.e., rapid growth of various researches during 2001–2007 and focusing on heavy metals and organic toxic pollutants after that. Most of the selected study areas in the literatures located in the coastal regions, estuaries and bays with rapid urbanization and industrialization. The studied pollution media mainly included sediments, organisms, and water. Overall, the depth and extent of the reviewed studies were insufficient, and there was lack of long-term monitoring data. Moreover, geographic identifications and management of different types of key eco-environmental problems were missing in the previous studies. In the future, the characteristics of sources and sinks of key pollutants also need to be further studied. Theoretical and applied researches focusing on policies and technical system constructions need to be strengthened from urban planning perspective.

Key words: coastal area; contaminant; bibliometrics; regional difference.

随着社会经济活动的不断积聚和发展, 海岸带作为陆海交汇的生态过渡地带, 污染问题日益突出 (Doney, 2010), 对区域生态环境产生显著的负面影响, 导致生物多样性减少 (Howarth, 2008; Liu, 2013), 生态服务功能减弱 (Barbier *et al.*, 2011)。国

际上很早就开始关注海岸带地区污染生态环境效应问题, 并开展了大量长期定位监测、基础理论和管理研究 (Kennish, 2002; Tornero *et al.*, 2014)。相对而言, 我国该领域研究起步较晚, 研究工作的全面性和系统性明显不足。本文采用文献汇总分析法, 在 CNKI 和 Web of Science 核心数据库中对海岸带、污染、生态环境等相关主题词进行检索和手工筛选, 得

国家科技专项 (2017YFC0505801) 资助。

收稿日期: 2018-04-01 接受日期: 2018-12-05

* 通讯作者 E-mail: changwj@pku.sz.edu.cn

到共 1053 篇文献(其中,中文文献 590 篇,英文文献 463 篇),文献报道了 1987—2017 年(文献截止到 2017 年 9 月)我国大陆海岸带污染环境效应研究工作。通过梳理总结,阐明相关研究的主要内容和发展趋势,分析研究的时序阶段特点、区域空间尺度特征和介质间差异化特征,提出现存问题与展望,以期为我国海岸带污染环境效应的基础理论研究、防控治理研究乃至海岸带环境管理实务工作提供科学依据(Debout *et al.*, 2008)。

1 海岸带污染环境生态效应研究的基本特征

1.1 主要研究内容

我国海岸带污染环境效应研究内容可分成基础理论和应用研究两大类(图 1),按照污染物类型划分主要包括氮磷营养盐类、重金属污染和有机污染物,其中有机污染物包括持久有机污染物和新型污染物(如微塑料、药品、个人护理产品等)(He *et al.*, 2016; Auta *et al.*, 2017; Páez-Osuna *et al.*, 2017),按照具体研究内容包括污染物赋存状态、来源解析、空间分布特征、生态环境评价、历史演进趋势、迁移富集行为等,另外,还有污染物调查监测、单项或多种污染防控与治理、生态保护与修复技术研发及应用、

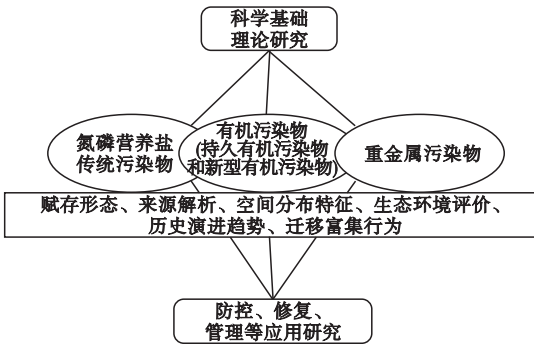
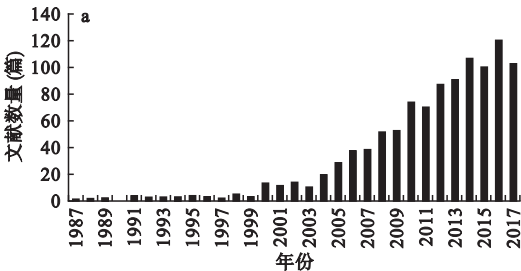


图 1 海岸带污染生态环境效应研究的重点话题
Fig.1 Key topics of the pollution eco-environmental effects in coastal areas



管理政策及法规体系建设等研究。

1.2 研究工作的时序特征

我国这方面研究始于 20 世纪八十年代中期,研究数量和主题表现出明显的阶段性特征(图 2a)。2000 年之前,研究数量较少,主题和区域分散,表明近岸海域污染问题还没有引起足够重视。2000 年之后,随着《中华人民共和国海洋环境保护法》及《近岸海域环境功能区管理办法》两部法规的颁布实施,研究数量显著增加。从图 2b 看出,不同时段的研究重点,2007 年前三类主要污染物研究数量差异不大,2007 年之后重金属和有机污染物成为热点话题。这是因为本世纪初期我国海岸带污染问题积累时间长,研究基础薄弱,各分支研究呈齐头并进态势,之后传统营养盐和石油类污染研究逐渐淡化,重金属和持久性有机污染物等具有累积性生态毒害风险效应的痕量毒害污染物研究逐渐成为重点话题(Cao *et al.*, 2009; He *et al.*, 2013)。整体上,这是我国海岸带环境管理需求与国际研究发展共同影响的结果。

1.3 研究工作的区域特征

案例研究是揭示科学问题的关键和制定管理策略的基础,研究工作的区域差异和尺度特征能够反映各地区研究侧重和趋势。从图 3 可以看出,超过 70% 的研究集中在渤海湾及山东半岛地区、杭州湾与长江口地区、广东沿岸地区,空间尺度较小。仅 9.7% 的文献涉及海岸带全域。按照污染物类型可以发现,营养盐类研究集中在山东半岛和广东地区,有机污染物研究集中在南黄海和东南沿海一带,重金属污染研究主要在广东地区、黄海和渤海沿岸。区域内研究结构也有所差异,渤海湾和南海沿岸地区侧重重金属污染研究,黄海和东海沿岸更关注有机污染研究,而各地区营养盐类研究数量均处于较低水平,这与地区污染水平、科研条件和管理需求有关。

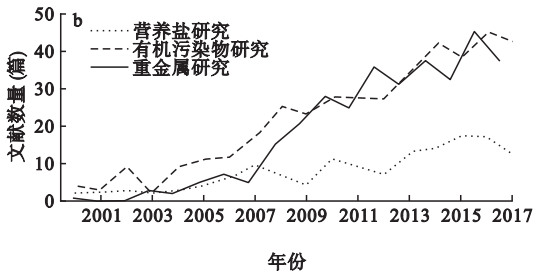


图 2 我国海岸带污染环境效应研究文献统计分析
Fig.2 Statistic analysis of the literature on pollution eco-environmental effects in China's coastal zones
a. 海岸带污染生态环境效应研究文献数; b. 2000—2017 年不同主题研究文献数量。

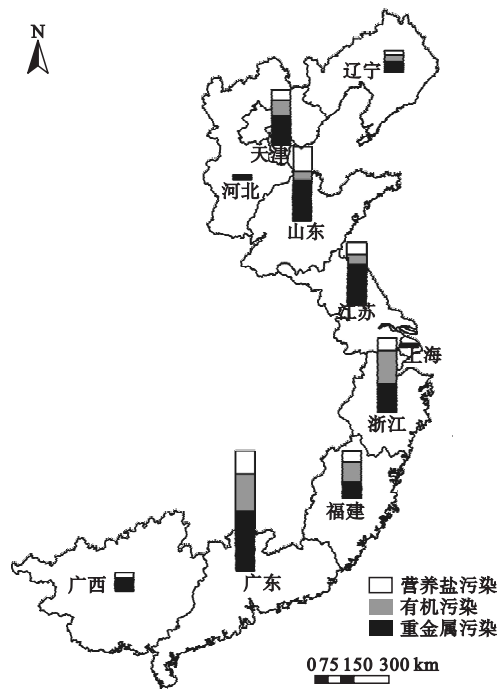


图3 我国大陆沿海各省污染生态环境效应研究分异特征
Fig.3 Regional differentiation characteristics of the study cases of pollution eco-environmental effects in China's coastal zones

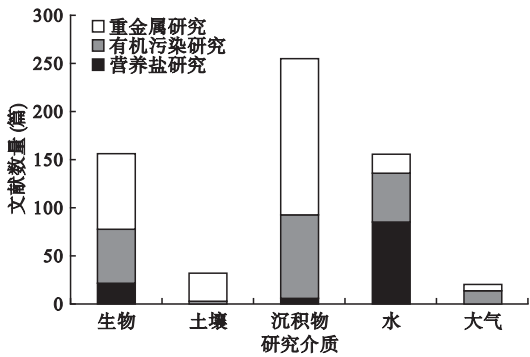


图4 我国海岸带污染生态环境效应研究介质分布
Fig.4 Medium distribution of pollution eco-environmental effects in China's coastal zones

表1 我国主要近岸海域氮磷污染状况

Table 1 Nitrogen and phosphorus pollution status of China's major coastal areas

| 区域 | | 无机氮 (mg · L ⁻¹) | 活性磷 (mg · L ⁻¹) | 氮磷比 | 富营养化指数 | 数据来源 |
|----------|----|-----------------------------|-----------------------------|-----------|--------|-----------|
| 天津 | | 0.88 | 0.072 | | | 褚帆等,2015 |
| 黄河口 | | 0.25 | 0.010 | 51.1 | 0.56 | 胡琴等,2016 |
| 山东黄岛区 | | 0.21 | 0.050 | | 0.14 | 过锋等,2015 |
| 江苏 | | 0.25 | 0.020 | | 1.52 | 姜晟等,2012 |
| 浙江灰鳖洋 | | 1.14 | 0.066 | 19.3 | 2.38 | 贾怡然等,2014 |
| 福建宁德金蛇头海 | 春季 | 0.63 | 0.050 | 26.8~31.1 | 1.10 | 余祚渊,2017 |
| | 夏季 | 0.05 | 0.083 | 10.9~17.5 | 2.07 | |
| 福建东山湾 | | 0.10 | 0.016 | 28.5 | | 姜双城等,2016 |
| 广东龙江口 | | 2.61 | 0.180 | 10.8~13.1 | | 蒋奕雄,2015 |
| 珠江口 | | 0.89 | 0.033 | 31.8 | 8.20 | 谢群等,2017 |
| 广西防城港 | | 0.12 | 0.014 | 12.0 | 1.10 | 赖俊翔等,2013 |

无机氮、有机磷含量为均值。

1.4 研究工作的介质类型

重点介质中各类研究表现出明显的差异(图4),沉积物和生物体中重金属和有机物污染研究较多。这是由于沉积物体系作为污染沉降的蓄积库,能够间接表征地区污染水平,再释放会引发二次污染,对海洋生物具有负面的生态风险效应;而海产生物常成为污染物进入人体的载体,存在食品安全问题,对人体健康构成威胁。水环境介质以营养盐研究为主,综合评估多种污染物的水环境质量评价研究较少。另外,土壤介质研究数量较少且以重金属污染为主。大气环境介质研究整体较少,是由于其具有的大尺度区域联动效应,难以准确反映局部地区污染过程与特征,但大气沉降污染物不容忽视,尤其是全球贸易发展导致船舶排放污染物增加(Viana *et al.*, 2014)。综合多介质研究较少,污染物在关键介质界面间迁移转化过程研究不足。总之,不同介质研究数量和各介质中不同污染物类型研究占比不同,这与污染本身的赋存状态、研究侧重和管理需求等有关。

2 重点污染物类型的研究进展及特点

2.1 氮磷营养盐与富营养化研究

营养盐污染及水体富营养化问题是海岸带污染生态环境效应研究的传统话题,也是海岸带陆海环境管理工作的持续热点(Howarth *et al.*, 2002; Heisler *et al.*, 2008)。近岸海域污染评价通过测定氮磷含量水平,采用富营养化指数法、营养状态指数法判断水体的富营养化程度及其类型(Li *et al.*, 2015)。表1为近年来我国主要近岸海域污染状况汇总,可以看出,水体富营养化问题普遍存在(Qu *et al.*, 2016),特别是高速城市化的沿海区域。

探讨区域营养盐含量和比例的时空分异特征是近年来主要的研究内容。如深圳市周围的珠江口、深圳湾、大鹏湾、大亚湾地区营养盐表现出明显的西高东低的趋势(桓清柳等, 2016); 天津渤海湾地区 2008—2015 年无机氮含量在 $0.6\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 上下波动, 无机磷含量呈现上升趋势并于 2013 年达到峰值 $0.072\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (刘洋等, 2014)。另外, 氮磷比结果显示, 我国近岸海域多数地区均为磷限制型富营养化, 部分地区随季节变化会转变为氮限制。

水体中营养盐来源与成因分析是揭示污染演化趋势, 开展水环境管理的基础。研究表明, 近岸海域氮磷浓度与盐度呈负相关关系(胡琴等, 2016), 多数区域均表现为近岸向远岸、湾内向湾外递减的规律(杨静等, 2015; 郭富等, 2017), 说明陆源污染排放和径流输入是污染的主要来源, 具体包括农业施肥、养殖排放、生活污水和工业废水, 地区间不同污染源贡献有所差异。污染成因除了与来源密切相关, 还与自然条件有关, 比如大亚湾等半封闭海湾水体交换能力弱, 填海造陆加剧污染物难以向外海扩散, 还有防城港湾内的养殖桩阻碍了海水流动, 水体自净能力弱, 污染程度较为严重。

营养盐大量排放和氮磷比结构差异共同作用于生态系统产生一系列生态环境效应(Painting *et al.*, 2007)。比如长江口地区由于植物大量摄取磷酸盐, 导致 N/P 值高达 50.9(尹艳娥等, 2014), 而珠江口则与之相反, 富集于沉积物中的铁-磷内源营养物质释放导致磷盐丰富(黄小平等, 2010)。不同的氮磷比例影响植物生长, 决定群落结构特征(Zhou *et al.*, 2015a), 如较高的氮磷比(30~300) 形成以硅藻类为优势种(比例达 80% 以上) 的浮游植物群落(黄小平等, 2010), 氮限制地区海洋卡盾藻生长受到抑制, 氮含量一旦上升极易诱发卡盾藻爆发引起赤潮(袁美玲等, 2008)。

表 2 我国主要近岸海域沉积物中 PAHs 含量 ($\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$)
Table 2 PAHs ($\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$) in sediments of China's major coastal areas

| 区域 | PAHs | 数据来源 | 区域 | PAHs | 数据来源 |
|-------|---------------|-----------------------------|-------|--------------|-----------------------------|
| 辽东湾 | 191.99~624.44 | Zhang <i>et al.</i> , 2016a | 泛杭州湾 | 106.10 | 胡小萌等, 2017 |
| 渤海湾 | 175.10 | 国文等, 2015 | 长江口 | 737.65 | 沈小明等, 2014 |
| 天津 | 228.10 | 南炳旭等, 2014 | 福建泉州湾 | 354.80 | 庄婉娥等, 2011 |
| 莱州湾 | 554.24 | 张道来等, 2016 | 厦门 | 949.60 | 程启明等, 2015 |
| 威海 | 326.14 | 张道来等, 2016 | 大亚湾 | 126.20 | Yan <i>et al.</i> , 2009 |
| 青岛 | 496.46 | 张道来等, 2016 | 深圳 | 870.65 | 刘晓东等, 2016 |
| 山东半岛 | 262.08 | Zhang <i>et al.</i> , 2015a | 珠江口 | 563.52 | Zhang <i>et al.</i> , 2015b |
| 南黄海中部 | 255.10 | 张生银等, 2013 | 北部湾 | 29.00~438.00 | Kaiser <i>et al.</i> , 2016 |

上表数据为 PAHs 含量均值。

2.2 有机污染研究

持久毒害有机污染物因具有长期残留性、生物累积性和高毒性, 而受到广泛关注。主要研究对象有多环芳烃(PAHs)、多溴联苯醚(PBDEs)、多氯联苯(PCBs)、有机氯农药(OCPs)(包括六六六(HCHs)、滴滴涕(DDTs))等。表 2 为我国主要近岸海域沉积物中 PAHs 含量, 表明东南沿海、山东半岛污染较为严重(周俊丽等, 2013); 我国 PBDEs 含量在 1990 年后迅速增加(Li *et al.*, 2016), 特别在珠江口地区; PCBs 全国污染水平较低, 珠江口地区最为严重, 含量介于效应区间低值和效应区间中值之间; OCPs 污染在我国东南沿岸较为严重, 闽江口地区含量已逼近国家水质标准临界值, 珠江口地区已达警戒水平, 超过国际沉积物质量安全标准(王教凯等, 2013)。总体而言, 珠江口西部地区各类有机污染物水平已高出风险评价标准(Pintado-Herrera *et al.*, 2017)。

利用沉积物中 PAHs 含量能反映地区有机污染状况, 分析其与经济水平和人口数量之间的相互关系, 可以反映人类活动对有机污染的贡献(王教凯等, 2013)。由图 5 可以看出, 有机污染在经济发展水平高的地区较为严重(谷河泉等, 2008), 不仅与人口数量有关, 还受到能源消费结构与效率、科技水平等的多重影响。关于 PAHs 来源, 主要以热成因为主, 其次为石油源(张生银等, 2013; 母清林等, 2015), 港口工业群集聚, 航海交通运输, 石油钻探开采等频繁的海上活动以及接纳径流带来的市政污水是主要污染源, 同时, 滨海旅游业发达的城市机动车尾气排放作用亦不容忽视。污染物产生后主要通过地表径流、沿岸排放、海上活动以及大气长距离传输和沉降的方式输送入海(Kang *et al.*, 2017; Shang *et al.*, 2017)。

有机污染物的自身理化性质和环境行为影响其

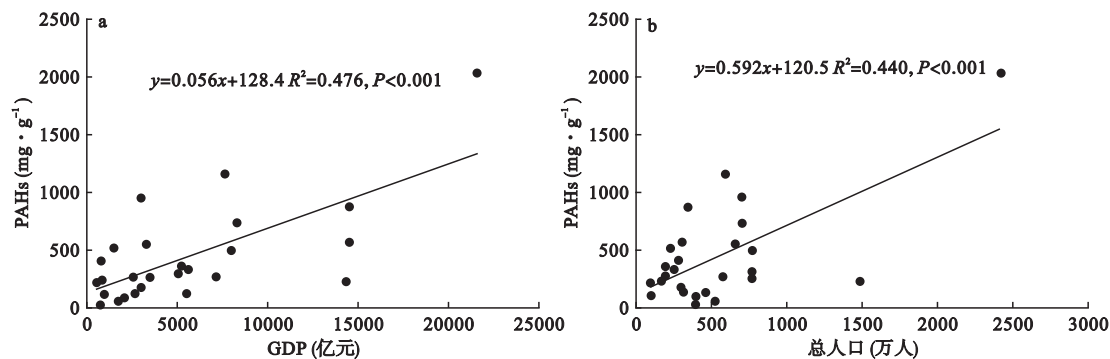


图 5 我国主要沿海城市 GDP 及人口与近岸海域沉积物 PAHs 浓度关系
Fig.5 Relationship between GDP, population and PAHs concentrations in sediments of China's major coastal cities
a. GDP 总量与近岸海域沉积物 PAHs 浓度关系; b. 总人口与近岸海域沉积物 PAHs 浓度关系。

在各介质中的组分含量和分布特征,分子量和结构的差异影响挥发、溶解、吸附、化学分解等行为,造成迁移转化等过程差异。研究发现,沉积物中有机物分子量较水体中高,如珠江口沉积物中以五氯和六氯联苯(占总量的 60%~80%)居多,水体中则多为低氯代类型(王教凯等,2013)。另外,吸附作用是影响污染分布的重要因素(谷河泉等,2008),如渤海湾潮间带、大亚湾湿地地区 PAHs 与黑碳(BC)、总有机碳(TC)浓度具有较高的相关性(黄国培等,2011)。

除环境介质研究之外,研究还关注到生物毒性效应,不仅可以揭示污染物生物转化和累积规律,也能从侧面反映区域污染状况。有机污染物在生物体内的空间分布特征与沉积物分布趋势有一定的相关性,如秦皇岛近岸海域贝类产品中 PAHs 的致癌风险指数高于 USEPA 建议的可接受致癌风险指数(李厦等,2014),珠江口地区氯苯类有机物在底栖贝类体内富集放大的趋势明显(黄小平等,2010),PCBs 的 Risk Quotient (RQ)结果显示会对食用大量海产的居民带来健康威胁(王教凯等,2013),OCPs 污染程度可能影响渔民健康(谷河泉等,2008)。但是,由于缺乏统一的评估标准,评价结果难以对比。

整体上,持久有机物污染研究关注各类污染物在环境介质中的时空分布、来源分析和环境风险评价,同时也注重其对生物体的累积毒性效应,但是,在赋存形态和行为过程方面研究略为不足。

2.3 重金属污染

海岸带地区重金属污染来源解析、时空分异特征评价、分布成因分析和生物效应研究,是长期关注的话题。我国海岸带地区重金属污染主要源自人为的煤炭石油燃烧、金属冶炼、工业生产、矿石开采、电

子垃圾排放等(Pan *et al.*, 2012; 陈彬等, 2016)。另外,养殖业和生活污水也有一定贡献(Zhang *et al.*, 2016b),例如广东地区生产生活废水排放解释了重金属污染的 76.89%(孙钦帮等, 2017),广西养殖区含砷饵料使近岸海域污染严重。此外,河流输入是重金属最主要的入海方式,其次为排污口直接排放,近年来海域大气气溶胶中 Cr、Cu、Pb 沉降通量有所提高(谷河泉等, 2008),南黄海 Zn 的大气输入占比高达 38.8%(Pan *et al.*, 2012; 陈彬等, 2016)。污染源解析主要基于元素组成和相态特征的统计分析,或基于指纹特征的同位素示踪分析等(Zhou *et al.*, 2015b),但都存在一定程度的不确定性(Woods *et al.*, 2012)。

海洋环境公报显示,我国近海沉积物重金属污染整体上较为轻微,但个别地区需要引起重视。由表 3 可以看出,我国南海北部沿岸地区、渤海湾、长江口等地污染相对严重(秦延文等, 2012; 滕德强等, 2012; Xiao *et al.*, 2017)。各类重金属分布略有不同,Zn、Cu、Pb 普遍含量较高,集中在渤海和南海沿岸地区,Cr 在黄海、东海沿岸地区含量也较高,Cd 含量绝对值小,但生态风险高(张亚南等, 2013; 倪志鑫等, 2016)。

区域产业结构、元素性质、水环境条件、海洋动力和水文条件、地形地貌、颗粒沉积物含量等多种因素都会影响污染物分布,其中污染源(工业源和排污口)影响最为显著,如锦州湾受纳葫芦岛冶炼厂污水排放导致 Zn 污染呈现北高南低的趋势(Pan *et al.*, 2012; 陈彬等, 2016),大亚湾地区海水重金属污染在核电站、经济开发区附近高值明显(彭勃等, 2015),污染含量随距污染源距离增加而衰减(李磊等, 2012; 张现荣等, 2012; Gao *et al.*, 2014)。此外,

表 3 我国主要近岸海域沉积物重金属含量(mg · kg⁻¹)
Table 3 Heavy metal concentrations (mg · kg⁻¹) in sediments of China's major coastal areas

| 区域 | Cu | Pb | Zn | Cd | Cr | Hg | As | 文献来源 |
|--------------|-------------|-------------|-------------|-----------|-------------|-----------|------------|--|
| 鸭绿江口 | 9.37 | 17.95 | 37.86 | 0.20 | 24.30 | 0.05 | 6.36 | Li <i>et al.</i> ,2017 |
| 大辽河口 | 6.84 | 14.28 | 27.65 | 0.45 | 25.42 | | 22.78 | 张雷等,2014 |
| 辽东湾 | 19.40 | 31.80 | 71.70 | | 46.40 | 0.04 | 8.30 | Hu <i>et al.</i> ,2013 |
| 滦河口 | 18.76 | 30.98 | 44.63 | 0.09 | 44.14 | 0.02 | 7.21 | Liu <i>et al.</i> ,2016 |
| 秦皇岛 | 7.86 | 27.60 | 81.60 | 0.14 | 93.70 | | | Zhu <i>et al.</i> ,2016 |
| 渤海中部 | 24.34 | 30.69 | 79.91 | 0.14 | 69.54 | | | Liu <i>et al.</i> ,2015 |
| 渤海南部 | 65.90 | 24.54 | 122.68 | 0.18 | 54.31 | 0.05 | 9.63 | Xu <i>et al.</i> ,2014 |
| 莱州湾 | 10.99~22.00 | 13.37~21.90 | 50.63~60.40 | 0.12~0.19 | 32.69~60.00 | | 8.90~12.70 | Xu <i>et al.</i> ,2015a;Zhang <i>et al.</i> ,2015a |
| 山东半岛北部 | 18.70 | 18.20 | 61.00 | 0.09 | 59.00 | | 8.90 | Xu <i>et al.</i> ,2015b |
| 青岛 | 23.10 | 25.00 | 71.10 | 0.82 | 64.30 | 0.32 | 11.40 | 刘珊珊等,2015 |
| 黄海 | 15.90 | 11.30 | 46.20 | 0.12 | 8.46 | | | Jiang <i>et al.</i> ,2014 |
| 南黄海和东海 | 20.00 | 21.80 | 78.40 | 0.21 | 77.20 | | | Xu <i>et al.</i> ,2018 |
| 杭州湾、长江口、舟山群岛 | 21.80~24.70 | 18.80~25.41 | 44.29~85.20 | 0.14~0.19 | 60.75~79.10 | 0.02~0.05 | 9.10~10.67 | 柴小平等,2015;李磊等,2012;Wang <i>et al.</i> ,2015 |
| 东海 | 33.10 | 28.00 | 102.40 | 0.30 | 84.20 | | | Yu <i>et al.</i> ,2013 |
| 福建罗源湾 | 18.77 | 8.11 | 33.60 | 0.52 | | 0.05 | 6.48 | 高文华等,2012 |
| 汕头湾 | 48.50 | 51.60 | 153.30 | 0.67 | 53.60 | 0.07 | 10.79 | Qiao <i>et al.</i> ,2013 |
| 大亚湾 | 16.46 | 37.01 | 87.81 | 0.07 | 59.03 | 0.04 | 8.16 | Zhao <i>et al.</i> ,2016a |
| 广东西部沿海 | 43.83 | 44.29 | 139.93 | 0.38 | 86.97 | 0.13 | 20.83 | Zhao <i>et al.</i> ,2016b |
| 北部湾东部 | 58.26 | 27.99 | 67.28 | 0.16 | 53.65 | | | Dou <i>et al.</i> ,2013 |

上表数据为各元素含量均值,为避免各案例研究偶然性和差异性,同一地区研究取多篇文章给出均值的范围。

莱州湾受到水动力影响,形成独特的沉降格局(Pan *et al.* ,2012;陈彬等,2016),胶州湾则主要受地形影响(谷河泉等,2008),滦河口、长江口、珠江口受细颗粒物和有机质影响,在最大浑浊带附近形成峰值(刘金庆等,2016)。

重金属的生物富集水平评价多集中在海洋双壳类动物(牡蛎、蛤仔、贻贝)、鱼类、甲壳类动物及植物(靳明华等,2014)。不同生物对各种重金属的富集能力不同,基本呈 Zn>Cu>Cd>Cr>As>Pb>Hg 的趋势,富集能力强的底栖软体生物可作为环境指示生物(Lu *et al.* ,2017;Beyer *et al.* ,2017)。通过对比各地区生物体中重金属富集浓度结果,发现珠江口水生生物痕量金属平均浓度高于其他地区,且仍有增加趋势(黄小平等,2010),Cu、Cr、Zn、Cd、Pb 均超出人类健康风险评估的安全限值(Wang *et al.* ,2013;Hu *et al.* ,2016)。此外,研究发现,生物富集重金属水平与沉积物中含量基本一致,表明沉积物是生物摄取重金属的主要来源(刘启明等,2013)。总之,重金属的生物累积评价研究受到普遍关注,涉及到不同生物类型和组织器官,同时,通过生物富集水平可侧面反映当地重金属污染程度,能够为环境保护和食品安全相关问题提供依据。

3 问题与展望

海岸带作为我国生态文明建设和可持续发展的关键区域,研究工作不容忽视。总结国内海岸带污染生态环境效应研究特征,发现现存的几点不足,并针对重点问题提出展望:

(1)数据积累不足。多数研究针对特定污染物展开,时空尺度较小,综合环境评估不足,大型专项调查工作仅有“全国海岸带和海涂资源综合调查”和“我国近海海洋综合调查与评价”,缺乏系统的长期定位监测。需要扩展研究广度和时空尺度,注重大尺度和长时限的共性问题和规律研究,提升科学研究水准。

(2)理论与实践相结合的综合性研究欠缺。多数研究止步于揭示污染时空特征和生态评价。国际海岸带陆海相互作用计划(LOICZ)提出优先研究海岸带管理和科学研究的关联性,我国这方面还处于起步阶段,防控、治理、修复技术研究还未尽完善,难以将科学成果转化为管理手段。需要重视应用导向型研究,合理安排理论和应用研究的投入结构,提升研究的实践价值。

(3)污染源解析和行为过程多为定性描述,定量研究缺乏。需要加强源汇生态过程研究,重视污

染物共源特征和演化规律研究,弄清区域关键污染问题发生发展的时空过程,为寻求合理的解决路径提供科学依据。

(4) 缺乏针对污染生态环境效应的城市规划与产业布局研究。LOICZ 计划提出加强都市化与海岸带动态变化关系研究,通过合理的城市调控策略,解决生态环境问题,目前我国在这个领域还基本处于空白(田海涛等,2014)。需要综合运用规划、设计、工程、管理、政策等多学科交叉手段,考虑城市自身的自然条件和发展阶段,顶层规划城市发展模式和产业结构配置,为从根本上改善生态环境创造条件。

参考文献

- 柴小平, 胡宝兰, 魏娜, 等. 2015. 杭州湾及邻近海域表层沉积物重金属的分布、来源及评价. 环境科学学报, **35**(12): 3906–3916.
- 陈彬, 刘健, 范德江, 等. 2016. 中国东部海域底质沉积物中重金属研究现状. 海洋地质与第四纪地质, **36**(1): 43–56.
- 程启明, 黄青, 廖祯妮, 等. 2015. 厦门杏林湾水系表层沉积物中 PAHs 分析与风险评估. 环境科学, **36**(1): 179–185.
- 褚帆, 刘宪斌, 刘占广, 等. 2015. 天津近岸海域海水富营养化评价及其主成分分析. 海洋通报, **34**(1): 107–112.
- 高文华, 杜永芬, 王丹丹, 等. 2012. 福建罗源湾潮间带沉积物重金属含量空间分布及其环境质量影响. 环境科学, **33**(9): 3097–3103.
- 谷河泉, 陈庆强. 2008. 中国近海持久性毒害污染物研究进展. 生态学报, **28**(12): 6243–6251.
- 郭富, 王保栋, 辛明, 等. 2017. 2015 年春、夏季莱州湾营养盐分布特征. 海洋科学进展, **35**(2): 258–266.
- 国文, 薛文平, 姚文君, 等. 2015. 渤海表层沉积物中多环芳烃赋存特征及来源分析. 海洋环境科学, **34**(3): 330–336.
- 过锋, 陈聚法, 张艳, 等. 2015. 黄岛区南部海域营养水平和有机污染状况分析与评价. 渔业科学进展, **36**(4): 44–50.
- 胡琴, 曲亮, 黄必桂, 等. 2016. 2014 年秋季黄河口附近海域营养现状与评价. 海洋环境科学, **35**(5): 732–738.
- 胡小萌, 潘玉良, 张庆红, 等. 2017. 泛杭州湾海域沉积物中多环芳烃分布及源解析. 海洋环境科学, **36**(1): 107–113.
- 桓清柳, 庞仁松, 周秋伶, 等. 2016. 深圳近岸海域氮、磷营养盐变化趋势及其与赤潮发生的关系. 海洋环境科学, **35**(6): 908–914.
- 黄国培, 陈颖军, 林田, 等. 2011. 渤海湾潮间带表层沉积物中多环芳烃的含量分布和生态风险. 中国环境科学, **31**(11): 1856–1863.
- 黄小平, 田磊, 彭勃, 等. 2010. 珠江口海域环境污染研究进展. 热带海洋学报, **29**(1): 1–7.
- 贾怡然, 贾佳, 李铁军. 2014. 灰鳖洋富营养化发展趋势研究. 海洋湖沼通报, (4): 79–83.
- 姜晟, 李俊龙, 李旭文, 等. 2012. 江苏近岸海域富营养化现状评价与成因分析. 环境监测管理和技术, **24**(4): 26–29.
- 姜双城, 林培梅, 吴立峰, 等. 2016. 东山湾营养盐结构特征及影响因素分析. 海洋开发与管理, **33**(12): 39–48.
- 蒋奕雄. 2015. 龙江入海口水域氮、磷含量变化及富营养化评价. 福建水产, **37**(3): 211–219.
- 靳明华, 丁振华, 周海超, 等. 2014. 海岸带不同林龄木麻黄对重金属的吸收与富集作用. 生态学杂志, **33**(8): 2183–2187.
- 赖俊翔, 陈宪云, 柯珂, 等. 2013. 广西防城港市近岸海域营养盐分布及富营养化研究. 海洋技术, **32**(3): 63–69, 91.
- 李磊, 平仙隐, 王云龙, 等. 2012. 长江口及邻近海域沉积物中重金属研究——时空分布及污染分析. 中国环境科学, **32**(12): 2245–2252.
- 李磊, 袁骐, 平仙隐, 等. 2011. 舟山附近海域表层沉积物中重金属污染及其潜在生态风险评价. 海洋环境科学, **30**(5): 677–680.
- 李厦, 刘宪斌, 田胜艳, 等. 2014. 唐山和秦皇岛近岸海域贝类体内 PAHs 含量与健康风险. 海洋通报, **33**(2): 169–173.
- 刘金庆, 印萍, 张勇, 等. 2016. 滦河口沉积物重金属分布及生态风险评价. 海洋地质与第四纪地质, **36**(5): 43–52.
- 刘启明, 林建清, 张亚平, 等. 2013. 福建沿海牡蛎重金属含量特征及其在不同组织器官的分布. 海洋环境科学, **32**(3): 343–346, 352.
- 刘珊珊, 张勇, 毕世普, 等. 2015. 青岛近海底质沉积物重金属元素分布特征及环境质量评价. 海洋环境科学, **34**(6): 891–897.
- 刘晓东, 周凯, 唐俊逸, 等. 2016. 深圳近岸海域表层沉积物中多环芳烃分布特征及源解析. 人民珠江, (10): 84–88.
- 刘洋, 阚文静, 张秋丰. 2014. 近 4 年来天津赤潮监控区营养盐变化及富营养化特征. 海洋开发与管理, **31**(4): 83–85.
- 母清林, 方杰, 邵君波, 等. 2015. 长江口及浙江近岸海域表层沉积物中多环芳烃分布、来源与风险评价. 环境科学, **36**(3): 839–846.
- 南炳旭, 王丽平, 刘录三, 等. 2014. 天津近岸海域表层沉积物中 PAHs 污染特征及风险. 环境科学研究, **27**(11): 1323–1330.
- 倪志鑫, 张霞, 蔡伟叙, 等. 2016. 珠江口沉积物中重金属分布、形态特征及风险分析. 海洋环境科学, **35**(3): 321–328.
- 彭勃, 彭加喜, 孙凯峰. 2015. 大亚湾及邻近海域重金属污染的研究进展. 生态科学, **34**(3): 170–180.
- 秦延文, 郑丙辉, 李小宝, 等. 2012. 渤海湾海岸带开发对近岸沉积物重金属的影响. 环境科学, **33**(7): 2359–

- 2367.
- 沈小明, 吕爱娟, 沈加林, 等. 2014. 长江口启东—崇明岛航道沉积物中多环芳烃分布来源及生态风险评价. 岩矿测试, **33**(3): 374–380.
- 孙钦帮, 张冲, 乌立国, 等. 2017. 广东红海湾表层沉积物重金属含量的空间分布特征与污染状况评价. 生态环境学报, **26**(5): 843–849.
- 滕德强, 吕颂辉, 郭福星, 等. 2012. 长江口及其邻近海域表层沉积物中重金属分布和潜在生态危害评价. 海洋地质与第四纪地质, **32**(2): 11–19.
- 田海涛, 胡希声, 张少峰, 等. 2014. 茅尾海表层沉积物中重金属污染及潜在生态风险评价. 海洋环境科学, **33**(2): 187–191.
- 王教凯, 赵宗山. 2013. 珠江口典型持久性有机污染物 (POPs) 的研究进展. 海洋环境科学, **32**(6): 975–980.
- 谢群, 施玉珍, 张际标, 等. 2017. 珠江口海域春季富营养化现状与影响分析. 应用海洋学学报, **36**(3): 356–364.
- 杨静, 张仁铎, 赵庄明, 等. 2015. 近 25 年广西北部湾海域营养盐时空分布特征. 生态环境学报, **24**(9): 1493–1498.
- 尹艳娥, 沈新强, 蒋玫, 等. 2014. 长江口及邻近海域富营养化趋势分析及与环境因子关系. 生态环境学报, **23**(4): 622–629.
- 余祚溅. 2017. 宁德市金蛇头海域营养盐状况及富营养化程度. 河北渔业, (4): 32–33, 62.
- 袁美玲, 王朝晖, 李友富. 2008. N、P 营养盐对海洋卡盾藻 (*Chattonella marina*) 生长的影响. 生态学报, **28**(1): 430–435.
- 张道来, 刘娜, 朱志刚, 等. 2016. 山东半岛典型海岸带多环芳烃分布特征、来源解析及风险评价. 岩矿测试, **35**(5): 521–529.
- 张雷, 秦延文, 马迎群, 等. 2014. 大辽河感潮段及其近海河口重金属空间分布及污染评价. 环境科学, **35**(9): 3336–3345.
- 张生银, 李双林, 董贺平, 等. 2013. 南黄海中部表层沉积物中多环芳烃分布特征及来源分析. 中国环境科学, **33**(7): 1263–1270.
- 张现荣, 张勇, 叶青, 等. 2012. 辽东湾北部海域沉积物重金属环境质量和污染演化. 海洋地质与第四纪地质, **32**(2): 21–29.
- 张亚南, 贺青, 陈金民, 等. 2013. 珠江口及其邻近海域重金属的河口过程和沉积物污染风险评价. 海洋学报, **35**(2): 178–186.
- 周俊丽, 李霁, 刘征涛. 2013. 长江河口沉积物柱状样中多环芳烃沉积记录分析. 环境化学, **32**(6): 1098–1099.
- 庄婉娥, 汪霞霞, 姚文松, 等. 2011. 泉州湾表层沉积物中多环芳烃的含量分布特征及污染来源. 环境化学, **30**(5): 928–934.
- Auta HS, Emenike CU, Fauziah SH. 2017. Distribution and importance of microplastics in the marine environment: A review of the sources, fate, effects, and potential solutions. *Environment International*, **102**: 165–176.
- Barbier EB, Hacker SD, Kennedy C, et al. 2011. The value of estuarine and coastal ecosystem services. *Ecological Monographs*, **81**: 169–193.
- Beyer J, Green NW, Brooks S, et al. 2017. Blue mussels (*Mytilus edulis* spp.) as sentinel organisms in coastal pollution monitoring: A review. *Marine Environmental Research*, **130**: 338–365.
- Cao DD, Jiang GB, Zhou QF, et al. 2009. Organotin pollution in China: An overview of the current state and potential health risk. *Journal of Environmental Management*, **90**: S16–S24.
- Deboudt P, Dauvin JC, Lozachmeur O. 2008. Recent developments in coastal zone management in France: The transition towards integrated coastal zone management (1973–2007). *Ocean & Coastal Management*, **51**: 212–228.
- Doney SC. 2010. The growing human footprint on coastal and open-ocean biogeochemistry. *Science*, **328**: 1512–1516.
- Dou YG, Li J, Zhao JT, et al. 2013. Distribution, enrichment and source of heavy metals in surface sediments of the eastern Beibu Bay, South China Sea. *Marine Pollution Bulletin*, **67**: 137–145.
- Gao XL, Zhou FX, Chen CTA. 2014. Pollution status of the Bohai Sea: An overview of the environmental quality assessment related trace metals. *Environment International*, **62**: 12–30.
- He B, Yun ZJ, Shi JB, et al. 2013. Research progress of heavy metal pollution in China: Sources, analytical methods, status, and toxicity. *Chinese Science Bulletin*, **58**: 134–140.
- He ZX, Cheng XR, Kyzas GZ, et al. 2016. Pharmaceuticals pollution of aquaculture and its management in China. *Journal of Molecular Liquids*, **223**: 781–789.
- Heisler J, Glibert PM, Burkholder JM, et al. 2008. Eutrophication and harmful algal blooms: A scientific consensus. *Harmful Algae*, **8**: 3–13.
- Howarth RW, Sharpley A, Dan W. 2002. Sources of nutrient pollution to coastal waters in the United States: Implications for achieving coastal water quality goals. *Estuaries*, **25**: 656–676.
- Howarth RW. 2008. Coastal nitrogen pollution: A review of sources and trends globally and regionally. *Harmful Algae*, **8**: 14–20.
- Hu BQ, Li J, Zhao JT, et al. 2013. Heavy metal in surface sediments of the Liaodong Bay, Bohai Sea: distribution, contamination, and sources. *Environmental Monitoring & Assessment*, **185**: 5071–5083.
- Hu SG, Su ZJ, Jiang J, et al. 2016. Lead, cadmium pollution of seafood and human health risk assessment in the coastline of the southern China. *Stochastic Environmental Research & Risk Assessment*, **30**: 1379–1386.
- Jiang X, Teng A, Xu WZ, et al. 2014. Distribution and pollution assessment of heavy metals in surface sediments in the Yellow Sea. *Marine Pollution Bulletin*, **83**: 366–375.
- Kaiser D, Schulz-Bull DE, Wanek JJ. 2016. Profiles and inventories of organic pollutants in sediments from the central

- Beibu Gulf and its coastal mangroves. *Chemosphere*, **153**: 39–47.
- Kang M, Yang F, Ren H, *et al.* 2017. Influence of continental organic aerosols to the marine atmosphere over the East China Sea: Insights from lipids, PAHs and phthalates. *Science of the Total Environment*, **607**: 339–350.
- Kennish MJ. 2002. Environmental threats and environmental future of estuaries. *Environmental Conservation*, **29**: 78–107.
- Li HJ, Lin L, Ye S, *et al.* 2017. Assessment of nutrient and heavy metal contamination in the seawater and sediment of Yalujiang Estuary. *Marine Pollution Bulletin*, **117**: 499–506.
- Li JL, Zheng BH, Liu Y, *et al.* 2015. Classification of estuaries in China based on eutrophication susceptibility to nutrient load. *Science China: Earth Sciences*, **58**: 949–961.
- Li YY, Lin T, Hu LM, *et al.* 2016. Time trends of polybrominated diphenyl ethers in East China Seas: Response to the booming of PBDE pollution industry in China. *Environment International*, **92–93**: 507–514.
- Liu JQ, Yin P, Chen B, *et al.* 2016. Distribution and contamination assessment of heavy metals in surface sediments of the Luanhe River Estuary, northwest of the Bohai Sea. *Marine Pollution Bulletin*, **109**: 633–639.
- Liu JY. 2013. Status of marine biodiversity of the China Seas. *PLoS ONE*, **8**: e50719.
- Liu M, Zhang AB, Liao YJ, *et al.* 2015. The environment quality of heavy metals in sediments from the central Bohai Sea. *Marine Pollution Bulletin*, **100**: 534–543.
- Lu GY, Ke CH, Zhu AJ, *et al.* 2017. Oyster-based national mapping of trace metals pollution in the Chinese coastal waters. *Environmental Pollution*, **224**: 658–669.
- Páez-Osuna F, Sanchez-Cabeza JA, Ruiz-Fernández AC, *et al.* 2017. Environmental status of the Gulf of California: A pollution review. *Earth-Science Reviews*, **166**: 181–205.
- Painting SJ, Devlin MJ, Malcolm SJ, *et al.* 2007. Assessing the impact of nutrient enrichment in estuaries: Susceptibility to eutrophication. *Marine Pollution Bulletin*, **55**: 74–90.
- Pan K, Wang WX. 2012. Trace metal contamination in estuarine and coastal environments in China. *Science of the Total Environment*, **421**: 3–16.
- Pintado-Herrera MG, Wang CC, Lu JT, *et al.* 2017. Distribution, mass inventories, and ecological risk assessment of legacy and emerging contaminants in sediments from the Pearl River Estuary in China. *Journal of Hazardous Materials*, **323**: 128–138.
- Qiao YM, Yang Y, Gu JG, *et al.* 2013. Distribution and geochemical speciation of heavy metals in sediments from coastal area suffered rapid urbanization, a case study of Shantou Bay, China. *Marine Pollution Bulletin*, **68**: 140–146.
- Qu JH, Meng XL, Ye XQ, *et al.* 2016. Characteristic variation and original analysis of emergent water source pollution accidents in China between 1985 and 2013. *Environmental Science and Pollution Research*, **23**: 19675–19685.
- Shang DJ, Hu M, Guo QF, *et al.* 2017. Effects of continental anthropogenic sources on organic aerosols in the coastal atmosphere of East China. *Environmental Pollution*, **229**: 350–361.
- Tornero V, d'Alcala MR. 2014. Contamination by hazardous substances in the Gulf of Naples and nearby coastal areas: A review of sources, environmental levels and potential impacts in the MSFD perspective. *Science of the Total Environment*, **466–467**: 820–840.
- Viana M, Hammingh P, Colette A, *et al.* 2014. Impact of maritime transport emissions on coastal air quality in Europe. *Atmospheric Environment*, **90**: 96–105.
- Wang HT, Wang JW, Liu RM, *et al.* 2015. Spatial variation, environmental risk and biological hazard assessment of heavy metals in surface sediments of the Yangtze River estuary. *Marine Pollution Bulletin*, **93**: 250–258.
- Wang SL, Xu XR, Sun YX, *et al.* 2013. Heavy metal pollution in coastal areas of South China: A review. *Marine Pollution Bulletin*, **76**: 7–15.
- Woods AM, Lloyd JM, Zong YQ, *et al.* 2012. Spatial mapping of Pearl River Estuary surface sediment geochemistry: Influence of data analysis on environmental interpretation. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **115**: 218–233.
- Xiao CL, Jian HM, Chen LF, *et al.* 2017. Toxic metal pollution in the Yellow Sea and Bohai Sea, China: Distribution, controlling factors and potential risk. *Marine Pollution Bulletin*, **119**: 381–389.
- Xu FJ, Hu BQ, Yuan SQ, *et al.* 2018. Heavy metals in surface sediments of the continental shelf of the South Yellow Sea and East China Sea: Sources, distribution and contamination. *Catena*, **160**: 194–200.
- Xu G, Liu J, Pei SF, *et al.* 2015a. Sediment properties and trace metal pollution assessment in surface sediments of the Laizhou Bay, China. *Environmental Science and Pollution Research*, **22**: 11634–11647.
- Xu G, Pei SF, Liu J, *et al.* 2015b. Surface sediment properties and heavy metal pollution assessment in the near-shore area, north Shandong Peninsula. *Marine Pollution Bulletin*, **95**: 395–401.
- Xu L, Wang TY, Ni K, *et al.* 2014. Ecological risk assessment of arsenic and metals in surface sediments from estuarine and coastal areas of the Southern Bohai Sea, China. *Human and Ecological Risk Assessment*, **20**: 388–401.
- Yan W, Chi JS, Wang ZY, *et al.* 2009. Spatial and temporal distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in sediments from Daya Bay, South China. *Environmental Pollution*, **157**: 1823–1830.
- Yu Y, Song JM, Li XG, *et al.* 2013. Fractionation, sources and budgets of potential harmful elements in surface sediments of the East China Sea. *Marine Pollution Bulletin*, **68**: 157–167.
- Zhang AG, Zhao SL, Wang LL, *et al.* 2016a. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in seawater and sediments from the northern Liaodong Bay, China. *Marine Pollution*

- Bulletin*, **113**: 592–599.
- Zhang JF, Gao XL. 2015a. Heavy metals in surface sediments of the intertidal Laizhou Bay, Bohai Sea, China: Distributions, sources and contamination assessment. *Marine Pollution Bulletin*, **98**: 320–327.
- Zhang JD, Wang YS, Cheng H, *et al.* 2015b. Distribution and sources of the polycyclic aromatic hydrocarbons in the sediments of the Pearl River estuary, China. *Ecotoxicology*, **24**: 1643–1649.
- Zhang L, Shi Z, Zhang JP, *et al.* 2016b. Toxic heavy metals in sediments, seawater, and molluscs in the eastern and western coastal waters of Guangdong Province, South China. *Environmental Monitoring and Assessment*, **188**: 313.
- Zhao GM, Lu QY, Ye SY, *et al.* 2016b. Assessment of heavy metal contamination in surface sediments of the west Guangdong coastal region, China. *Marine Pollution Bulletin*, **108**: 268–274.
- Zhao GM, Ye SY, Yuan HM, *et al.* 2016a. Distribution and contamination of heavy metals in surface sediments of the Daya Bay and adjacent shelf, China. *Marine Pollution Bulletin*, **112**: 420–426.
- Zhou X, Sun L, Liu Y, *et al.* 2015b. Detection and calibration of anthropogenic lead emission in coastal sediments of China during the past 250 years. *Environmental Science and Pollution Research*, **22**: 16164–16172.
- Zhou YP, Tan LJ, Pang QT, *et al.* 2015a. Influence of nutrients pollution on the growth and organic matter output of *Ulva prolifera* in the southern Yellow Sea, China. *Marine Pollution Bulletin*, **95**: 107–114.
- Zhu ZM, Xue JH, Deng YZ, *et al.* 2016. Trace metal contamination in surface sediments of intertidal zone from Qinhuangdao, China, revealed by geochemical and magnetic approaches: Distribution, sources, and health risk assessment. *Marine Pollution Bulletin*, **105**: 422–429.
-
- 作者简介** 史 戈,女,1994年生,硕士研究生,主要从事生态规划与生态修复技术研究。E-mail: 1601213859@pku.edu.cn
- 责任编辑** 张 敏
-