

# 我国海洋滩涂主要污染物的研究概况

何培<sup>1,2</sup>, 张明明<sup>2</sup>, 李强<sup>1,2</sup>, 徐阳<sup>1,2</sup>, 王忠<sup>3</sup>, 凌君芬<sup>3</sup>, 黄金田<sup>2</sup>

(1. 大连海洋大学, 辽宁 大连 116023; 2. 盐城工学院, 江苏 盐城 224051; 3. 建湖县水产技术指导站, 江苏 盐城 224700)

**摘要:** 随着经济的发展和水平的提高, 海洋滩涂因其资源丰富且易开发, 受到了越来越多的关注。然而, 由于过度开发、环境污染及异常海况变动造成海洋滩涂生态正在恶化并日趋加剧。在介绍海洋滩涂主要污染物类型的基础上, 本文对海洋滩涂沉积物中污染物的组成、来源、空间分布及污染水平进行概述, 列举滩涂污染生态风险评估主要方法, 剖析滩涂污染引发的主要问题, 总结近年来滩涂治理的思路和措施, 旨在为新型沿海滩涂管理及资源开发提供一定的理论基础。

**关键词:** 海洋滩涂; 多环芳烃; 持久性有机污染物; 重金属; 新型污染物; 评价方法

**中图分类号:** X55      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-3096(2018)08-0131-08

**DOI:** 10.11759/hyxx20180305001

海洋滩涂其概念的界定, 目前学术界尚未达成共识, 从不同角度出发, 具有狭义和广义之分。在学术上, 海洋滩涂被称为潮间带(Tidal Zone); 在开发利用上, 不仅包括潮间带, 还包括高潮和低潮区域可开发利用的部分, 也有学者称其为海涂与潮滩(Tidal Flat)或者海滩(Coastal Beach)<sup>[1]</sup>, 是一种广义的理解。本文将从广义上的沿海滩涂进行论述。沿海滩涂按照地质构造的不同, 可分为泥滩、沙滩和岩滩三种。我国滩涂分布十分广泛, 北起鸭绿江口, 南至广西北仑河口, 包括四大海域(渤海、黄海、东海和南海)沿岸的 11 个省市, 横跨热带、亚热带和温带地区, 共有约 21 709 km<sup>2</sup> 的广阔滩涂<sup>[2]</sup>。滩涂是海洋与陆地的过渡带, 可以为生物提供广泛的栖息地或适宜的生境, 且由于环境复杂多变, 退、涨潮时会带来丰富的有机物质, 为滩涂生物提供了充足的营养物质, 使生物多样性增加。不同类型高生产力的滩涂栖息地也吸引着人们进行滩涂的开发和利用。但是, 滩涂的开放性又对滩涂的生态环境构成了一定的威胁, 如城市化进程与工农业迅速发展、大气沉降、陆地河流径流污染物汇聚、海洋船舶石油运输泄漏等, 导致滩涂中多环芳烃类污染物、持久性有机污染物、重金属和新型污染物等引起的污染问题日益突出。

海洋滩涂沉积物是各种污染物在潮间带的汇和源, 污染物质沉积又通过地球化学循环进入水体, 形成二次污染。点源与非点源污染物及无机盐、矿物质的长期输入, 经过沉降和富集, 累积到一定程

度, 就会对底栖动物、植物产生相应的毒害效应, 影响动植物群落的组成及丰度, 甚至间接危害人类的健康安全。我国滩涂大部分位于海湾、河口、长江口和黄河口等地区, 这些地区由于城市化进程及人类活动影响, 污染物累积要高于其它滩涂区域。研究一些特殊位置的滩涂沉积物污染特征可为了解掌握滩涂生态环境提供重要的参考信息。因此, 研究各地区污染状况及程度将为滩涂环境污染的预防和治理提供一定的科学依据, 也为海洋生态修复奠定前期基础。

## 1 滩涂污染物类型

### 1.1 多环芳烃

多环芳烃(Polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)是一类疏水性有机污染物, 具有两个或两个以上的

收稿日期: 2018-03-05; 修回日期: 2018-07-24

基金项目: 江苏省水生生物资源重大专项(ZYHB16-5); 江苏省高等学校自然科学研究面上项目(17KJB240002); 江苏省海洋滩涂生物化学与生物技术重点实验室开放课题(K2016-15, K2016-16)

[Foundation: Projects of Aquatic Biological Resources Major Program of Jiangsu Province, No. ZYHB16-5; Projects of Natural Science Research in Colleges and Universities of Jiangsu Province, No. 17KJB240002; Open Subject of Key Laboratory of Biochemistry and Biotechnology in Marine Beach, No. K2016-15, K2016-16]

作者简介: 何培(1992-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 生态学及水产养殖, 电话: 13673352932, E-mail: 729329966@qq.com; 张明明(1982-), 博士, 通信作者, 研究方向: 生态学, E-mail: zhangmingm44ok@163.com; 黄金田(1957-), 教授, 通信作者, 研究方向: 生态学、水产动物繁育学, E-mail: hjt@ycit.cn

苯环以稠环形式相连接,广泛分布在沉积物、土壤、空气和水生态系统中<sup>[3]</sup>。化石燃料的不完全燃烧和其他烃类化合物的燃烧、石油泄漏、工业废弃物、大气沉降和地表径流等是其主要污染源<sup>[4]</sup>。滩涂沉积物被认为是PAHs的主要储层,生活在潮间带区的动植物群落长期暴露于PAHs,将会给滩涂生态环境带来一系列威胁,同时,PAHs也被认为是石油中最为剧毒的组分,通过干扰生物膜流动性发挥其毒性<sup>[5]</sup>。

滩涂PAHs的浓度分布取决于时空变化、地理形态、水流动力学以及溢油事故的严重程度等因素。据报道,在高度发达的工业区域,沿海河口滩涂具有较高的PAHs浓度<sup>[6]</sup>。在中国,沿海河口滩涂地区PAHs浓度要高于其他地区,这是因为河流可将河岸地区的PAHs输送到河口地区。其中,珠江口的PAHs平均高达1863.0 ng/g<sup>[7]</sup>,这里是中国农业、经济发达区域最多的地区,地表径流经河流汇聚此地。大辽河口、长江河口以及岷江河口等地也都具有较高的含量<sup>[8]</sup>。黄国培<sup>[9]</sup>对渤海沿岸天津段滩涂沉积物多环芳烃含量分布采用GC/MS进行了分析,发现渤海湾滩涂PAHs含量呈北高南低的趋势。

我国受石油污染严重,由于是石油需求大国,因此造成的石油泄漏事故频频发生。如2010年大连新港输油管道发生爆炸,污染400 km<sup>2</sup>的海域<sup>[10]</sup>,2011年蓬莱19-3海上油田发生溢油500 t的事故,2016年陕西长庆油田连续发生3次严重石油泄漏事故<sup>[11]</sup>以及2018年1月14日东海“桑吉”油轮发生爆炸,形成了10 km<sup>2</sup>的油污带。大量的石油泄露造成海洋生态的污染,石油中的多环芳烃由于其高疏水性、持久性和低挥发性,经过潮汐、水动力的作用,大多积聚在沿海滩涂沉积物中,又通过动植物呼吸、吸收、摄入和其他方法运输到生物圈,对潮间带生物造成难以弥补的损害。郭玉清等<sup>[12]</sup>通过研究渤海潮间带小型底栖动物海线虫与底栖桡足类数量之比的变动表明PAHs对底栖生物群落的组成和结构具有显著影响。PAHs的特性导致了其在环境中持久、难降解,也可导致其具有急性毒性、遗传毒性和免疫毒性<sup>[13]</sup>。黄逸君等<sup>[14]</sup>研究发现PAHs对浮游植物群落的毒性效应,PAHs通过摄取、呼吸、皮肤接触等途径进入生物体,可造成细胞水平的活体损伤,如DNA损伤;也可导致微生物、动物和植物的突变<sup>[15]</sup>。Bolognesi等将贻贝暴露在高剂量PAHs下,发现贻贝(*Bathymodiolus platifrons*)消化腺DNA断线率增高<sup>[16]</sup>。

## 1.2 持久性有机污染物

持久性有机污染物(Persistent Organic Pollutants, POPs)是指具有多种有毒物质合成和高度耐环境降解的有机化合物,主要包括1种多氯联苯(Polychlorinated biphenyls, PCBs)和9种有机氯农药(Organic chlorinated pesticides, OCPs)以及二噁英、呋喃(PCDFs)等,POPs调查、研究关注点大多集中在OCPs和PCBs。在中国,POPs主要来源于工业生产,包括工业废水和废渣的排放、农药厂生产的农药和废水<sup>[17]</sup>。

OCPs具有生物分解困难、脂溶性高、中度慢性和急性毒性等一些重要特征。在中国,二氯二苯三氯乙烷(DDTs)和六氯环己烷(HCHs)是生产和使用最广泛的有机氯农药,DDTs平均浓度范围从2.2~10.5 ng/g, HCHs平均浓度范围从0.1~8.6 ng/g<sup>[17]</sup>,东北部辽河三角洲和珠江三角洲HCHs含量相似,但均高于比莱州湾、渤海湾等海岸带含量;而DDTs含量在辽河三角洲、乐清湾、珠江河口、渤海湾等地区含量相似<sup>[18]</sup>。PCBs也成为世界关注的一类重要的毒性环境POPs,长江口(最高148.2 ng/g)和珠江口(最高338.5 ng/g)的PCB浓度明显高于其他区域如厦门湾(最高9.3 ng/g)<sup>[17]</sup>。这一结果归因于长江口和珠江口分别位于长江三角洲和珠江三角洲经济发达地区,表明工业发达地区的PCBs污染更为严重。

海洋滩涂沉积物中POPs具有稳定性和持久性,其慢性毒性对环境严重的生态风险,它能对底栖生物产生麻醉作用,并且也会影响滩涂水生动物发育,诱发畸形,丧失生育能力造成机体免疫缺陷,而且POPs可进入水生食物网,通过食物链起点微藻,在海产品体内富集,进入人体蓄积,对人类的健康构成威胁。如Jo等<sup>[19]</sup>研究发现,在长牡蛎(*Crassostrea gigas*)生命早期阶段,暴露于POPs临界浓度,牡蛎胚胎发育更容易受到影响。贺心然等<sup>[20]</sup>对灌河口潮间带大型底栖动物进行调查,发现潮间带优势种为光滑河篮蛤(*Potamocorbula laevis*),总平均丰度为92个/m<sup>2</sup>,低于邻近海域,相关分析表明,POPs对生物量和丰度具有显著或较大影响。POPs中PCBs对微藻中牟氏角毛藻(*Chaetoceros muelleri*)和亚心形扁藻(*Platymonas subcordiformis*)超氧化物歧化酶(Superoxide dismutase, SOD)活性还具有诱导作用<sup>[21]</sup>。

## 1.3 重金属

重金属被认为是全球沿海和海洋环境中的主要人为污染物,重金属元素密度一般大于4.5 g/cm<sup>3</sup>,

主要包括 Zn、Cu、Cd、Pb、Cr、Hg、As、Sn、Ni、Co 等。国际上沿海海域重金属污染的研究始于 20 世纪 60 年代,国内大量开展滩涂重金属研究是始于 20 世纪 80 年代<sup>[22-24]</sup>。滩涂重金属污染来源比较广泛,包括大气的沉降、工业污染、海洋来源和生活污水<sup>[25]</sup>等。

目前,在滩涂环境污染研究中受到广泛关注的重金属是 Hg、Cd、Pb、As、Cu、Cr 和 Zn 等,在渤海、黄海和东海海岸带的含量较多,而在南海及北部湾等潮间带污染程度较轻<sup>[26]</sup>,这可能由渤海、黄海和东海分别位于大辽河口、黄河口以及长江口的地表径流导致的。锦州湾是中国渤海西北岸辽东湾西北部重要的港湾之一,据报道,Cd、Zn、Cu、Pb、Hg、As、Cr 和 Ni 在沉积物中的含量分别为 488、13933、1227、1828、41、820、72 和 96 mg/kg<sup>[26]</sup>,重金属 Zn 污染较明显,天津沿海潮间带重金属分布趋势从北到南逐渐降低,可能是由于北段沿海厂矿污水排放高于南部<sup>[27]</sup>。在中国东部黄海胶州湾重金属 Hg 和 Cu 污染也较为突出<sup>[28]</sup>。崇明东滩是长江口最重要的滩涂之一,李雅娟等<sup>[29]</sup>利用 ArcGIS 地理信息系统空间插值法研究了重金属的空间分布,结果表明,Cu、Pb、Zn、Cd 含量分别为 42、27、69、71 和 0.23  $\mu\text{g/g}$ ,均超过当地背景值,Cd、Pb、Cu 污染程度较高。在中国南方,广西北海潮间带沉积物中重金属含量一般比中国其他地区较低,生态风险系数(PER)分别为 Zn(69.81)、Pb(16.58)、Cu(12.76)、As(9.08)、Cd(0.22) 和 Hg(0.07),生态风险都相对轻微<sup>[30]</sup>。这与中国北方工业的大力发展有关,相对而言,北海岸线比南部地区重金属污染更为严重,而中国南部沿海地区重金属污染程度较轻。

重金属在水体中能形成螯合物和金属络合物,易吸附在潮间带沉积物中,经物理化学作用,最终在沉积物中蓄积;也能充当重金属源,影响物种多样性和丰度,致使海洋滩涂生态系统恶化<sup>[31]</sup>,并沿水生食物链进行生物放大,威胁到上层营养级甚至是人类的健康。Al-Sayed 等从巴林沿海两个牡蛎养殖场测定牡蛎重金属蓄积程度,Pb 和 Cd 的浓度分别为 1.8~14.0  $\mu\text{g/g}$  和 0.4~3.8  $\mu\text{g/g}$ ,均高于世界卫生组织推荐的标准值<sup>[32]</sup>。张莹<sup>[33]</sup>等研究了莱州湾多毛类底栖动物群落生态特征,绝对优势种为小头虫,多样性指数与重金属 Pb、Cu、Zn、Cd 的含量呈负相关。

#### 1.4 新型污染物

新型污染物与传统污染物不同,它们是新近出

现或是一直存在,但是认识有限的化合物。新型污染物仅在过去的 20 多年间才被发现并广泛研究,由于检测到环境中含量水平相对较低,所以缺乏敏感准确的分析方法,并与其对应的政策法规尚不完善,评价的污染指标缺乏统一的标准。但这些污染物普遍存在于水生和陆地环境中,包括人为和天然存在的化学品、药物和个人护理产品、非法药物、工程纳米材料和抗生素抗性基因的代谢产物和转化产物等<sup>[34]</sup>,故新型污染物主要来自人类相关活动、市政污水处理厂排放、以及动物、农业和水产养殖,还有在治疗上施用的抗生素和用于调节生殖系统、动物生长的合成激素。这些化合物均可在污水处理厂中的废水、地表水、饮用水和地下水中检测到<sup>[35]</sup>。

目前,研究结果显示,新型污染物的暴露量并不是特别严重,而且不同海域的滩涂新型污染物沉积量和种类差异较大,如渤海半封闭的地理位置更容易使污染物沉积。多溴联苯醚(Polybrominated diphenyl ethers, PBDEs)是一类重要的溴代阻燃剂,被广泛应用在工业产品中。全氟类化合物(Perfluorinated compounds, PFCs)中,全氟辛酸(Perfluorooctanoic acid, PFOA)和全氟辛烷磺酸(Perfluorooctane sulfonate, PFOS)也是应用最广的两种全氟化合物,同时还有抗生素类在环境中广泛存在。研究表明,青岛近海岸沉积物污染物中 PBDEs 含量较高,以六溴代以下的化合物为主<sup>[36]</sup>;莱州湾和渤海湾河口地区沉积物中 PBDEs 也显著高于长江三角洲河口地区<sup>[37]</sup>。PFOS 在长江口沉积物中含量最高,显著高于珠江口,黄浦江沉积物中以 PFOA 为主<sup>[38]</sup>,温州近海滩涂沉积物中 PFOS 和 PFOA 也明显较高,相对而言,南海沿岸和近海珠江三角洲地区含量较低<sup>[39]</sup>。抗生素污染的检测表明,发现主要有脱水红霉素、磺胺甲恶唑和甲氧苄氨嘧啶,史晓东等<sup>[40]</sup>调查发现崇明东滩新型污染物主要为双氯芬酸钠和红霉素,这些抗生素都能对沿海滩涂产生不同程度的污染。

各种药物、抗生素及化工制品等新型污染物的出现,不仅产生生态毒害作用,还由于其疏水性和亲脂性特征而积聚在生物群中,通过食物链积累和生物放大,影响人类的免疫系统、神经系统和生殖系统。美国海鲜抗生素调查报告<sup>[41]</sup>指出,滩涂贝类中可检测到 5 种抗生素,尽管含量不高,但长期接触低浓度抗生素会产生耐药性,进而突变产生抗生素的抗性基因,诱发超级细菌的产生。Liu 在绿色贻贝(*Perna viridis*)中,对两个占主要地位的 PFOS 和

PFOA 进行了环境毒性检测, 结果表明 PFCs 能在生物不同水平上诱发一系列不良反应, 包括氧化应激、DNA 损伤、膜不稳定、抑制滤过率和体重减轻, 并且相关分析表明, 活性氧的过量产生可能是主要的毒性途径<sup>[42]</sup>。

## 2 滩涂沉积物污染生态风险评价

生态风险评价(ecological risk assessment, ERA)能够为环境污染的预防和治理提供依据, 主要包括鉴别污染物、检测污染物效应浓度及危害程度, 同时, 人体健康风险也被囊括为生态风险评价。

近几十年来, 各种风险评估指标已被应用于评估滩涂沉积物中污染物的环境风险, 其中, 重金属评估指标主要包括: 地理累计指数(geoaccumulation index,  $I_{geo}$ )<sup>[43]</sup>、富集因子(enrichment factor, EF)<sup>[44]</sup>、沉积物质量基准法(sediment quality guidelines, SQGs)、Hakanson 潜在生态风险指数法<sup>[45]</sup>、污染负荷指数法、次生相富集系数法和尼梅罗综合指数法等<sup>[46]</sup>; 其次, 有机污染物在滩涂沉积物生态风险评价中, 常用的方法有沉积物质量基准法(SQGs)<sup>[47]</sup>、沉积物质量标准法(SQSS)<sup>[48]</sup>和 BaP 毒性当量浓度<sup>[49]</sup>等。由于单一评价方法存在一定的缺陷, 人们通常采用多种评价方法相结合来评价沉积物中重金属污染程度, 如 Sun 等<sup>[50]</sup>选取沉积物质量基准法和地理累计指数法评价闽江潮间带沉积物重金属污染水平, 通过 SQGs 划分阈值效应水平(threshold effects level, TEL)和可能效应水平(probable effects level, PEL), 当某一污染物浓度低于 TEL 时, 生物毒性作用可能不存在, 而高于 TEL 时, 经常发生生物毒性作用, 当其浓度范围从 TEL 到 PEL 时会偶尔发生毒性作用<sup>[51]</sup>, 得出只有一个站位采集的样品中 Pb 和 Ni 超过 PEL 水平, 其余站位 Pb、Cr、Cu、Zn 和 Ni 都在 PEL 值以下, 属于中度污染; 而基于地理累计指数将污染程度划分为未污染到严重污染六个等级, Ni 污染程度表现较为严重, 其余重金属污染水平仍然在中下程度, 这与 SQGs 法评价结果基本一致; 滩涂沉积物中持久性有机污染物的风险评价通常采用 Long 等<sup>[47]</sup>学者提出的沉积物中 POPs 环境质量标准进行的, 依据 SQGs 将 POPs 各类污染物含量划分为生态效应低值(effects range low, ERL)和生态效应中值(effects range mean, ERM)。黄磊等<sup>[52]</sup>通过效应区间低中值法对三沙湾表层沉积物中 POPs 风险程度进行评估, 结果表明 PAHs、PCBs 和 OCPs 的污染程度及生态风险均处

于较低水平。BaP 毒性当量浓度是 PAHs 生态风险评价中的一种致癌毒性评估方法, 选择致癌性强、生理毒性特征研究最清楚的苯并[a]芘(BaP)作为参照物质, Qian 等<sup>[53]</sup>采用 BaP 毒性当量因子(toxicity equivalence factor, TEF)用于估计渤海湾潮间带表层沉积物中 BaP 毒性当量(BaP<sub>eq</sub>)浓度, 潮间带沉积物中 7 种致癌 PAHs 当量的浓度为 3.84~28.78 ng/g, 平均值为 15.44 ng/g。7 种致癌 PAHs 的平均 BaP<sub>eq</sub> 都大于各自 TEF 值, 占 16 种 PAHs 的 98.54%, 说明这七种致癌 PAHs 在该地区污染较为严重, 由于其对人类潜在的毒性危害, 需要引起重视。

## 3 滩涂污染物的治理措施

目前滩涂沉积物污染治理既是研究的热点, 也是研究的难点。滩涂污染治理的基本策略是运用最有效的技术和方法, 去除或减少滩涂污染环境中污染物, 常用的方法有物理修复、化学修复和生物修复等。

通过人为控制污染源的排放, 使沉积物自然降解或自身净化的方法, 是一种最常用的物理修复手段, 但耗时较长, 且具有一定的局限性。还有如安全填埋, 高温焚烧, 热解析等, 都属于物理修复, 但是这些手段费用较高, 且只能治理污染程度较轻、区域较小的地方。化学修复主要是运用化学试剂进行化学反应, 使沉积物中污染物质降解成无毒或毒性较低的化合物。常用的化学试剂有过氧化氢、氯化铁、铝盐和石灰等。如陈彩成等<sup>[54]</sup>运用高级氧化修复技术去除滩涂中的石油, 当过氧化氢(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)与滩涂沉积物之比为 0.05, Fe<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> 与 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 摩尔比为 0.1 时, 去除率达 57.4%, FeSO<sub>4</sub> 与 Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 摩尔比为 0.05 时, 去除率达 60.4%。生物修复又包括植物修复和微生物修复, 是指利用生物代谢治理环境污染, 利用植物、动物和微生物等吸收、降解及转化, 使污染物浓度降低。Paquin 等<sup>[55]</sup>利用 20 种植物降解 PAHs, 其中, 矮木槿(*Hibiscus tiliaceus*)和香根草(*Vetiver zizanoides*)降解 PAHs, 降解率高达 90%; 吕芳等<sup>[56]</sup>采用室内培养褐藻海黍子(*Sargassum muticum*)和红藻脆江蓠(*Gracilaria chouae*), 海黍子对重金属 Zn<sup>2+</sup> 和 Cd<sup>2+</sup> 的富集能力高于脆江蓠。相对于上述修复技术, 微生物修复效果更为明显, 利用微生物繁殖快、适应性强等特点, 可以将有害有机污染物降解为水和二氧化碳等小分子化合物或是将重金属转化为无毒化合物。Johri 等<sup>[57]</sup>发现鞘胺醇单胞菌 3d 就能完全降解 5 mg/L 的  $\alpha$ -HCH; Abbondanzi 等<sup>[58]</sup>通过平板菌落划线法从沉积物中直

接筛选降解 PAHs 土著微生物,并将其应用到沉积物中进行污染治理,效果较好。Balachandran 等<sup>[59]</sup>使用分离出的土著链霉菌(*Streptomyces taceae*)对石油和 PAHs 进行降解,7 d 内对柴油和萘去除率高达 98.25% 和 99.14%。微生物修复能够经济有效地对滩涂沉积物污染进行修复,且修复损害程度低,是较理想的滩涂污染修复手段。

## 4 展望

随着滩涂资源开发利用的加强,沿海滩涂环境受到了一定程度的影响,随之而来的是滩涂生物和人类食品的安全问题。如何加强滩涂污染监测、如何控制滩涂污染及其修复,是目前亟待解决的重要问题。在未来,应加强技术的革新,需通过互联网平台对滩涂污染状况进行实时更新,研究污染物快速检测技术,建立有害污染物预警系统;加强研究各类型污染物转化迁移规律、富集规律,追踪污染源,从不同的海域、不同的范围和不同的视角进行系统性研究,做到预防、控制和治理相结合。近年来,国内外对滩涂沉积物污染进行了大量的研究,但大多数都集中于某一类污染物质,对某一地区的污染状况调查也并不全面。监测某地区滩涂污染状况,应综合全面考虑各种类型污染物,才能真实反应该地区污染程度,从而进行综合有效治理。通过现场调查监测和历史资料收集分析筛选示范区生态修复的动植物品种,为了避免生物入侵尽量选用土著种。根据不同污染物的降解功能和特征来筛选生态修复的微生物品种。在复合污染的滩涂区可以利用动植物与微生物进行联合修复。但是,这些品种的选择都要符合生态系统的结构理论、生态位和生态适宜性原理等。滩涂污染物的监测和研究,也是当前海洋生态修复的必需前期基础。

### 参考文献:

- [1] 彭建,王仰麟.我国沿海滩涂的研究[J].北京大学学报(自然科学版),2000,36(6):832-839.  
Peng Jian, Wang Yanglin. A Study on shoaly land in China[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinesis, 2000, 36(6): 862-839.
- [2] 全国海岸带办公室《环境质量调查报告》编写组.中国海岸带和海涂资源综合调查专业报告集.第十集,环境质量调查报告[M].北京:海洋出版社,1989.  
National Coastal Zone Office "Environmental quality survey report compilation group." China coastal and tidal flat resources survey report. Tenth set, environmental quality survey[M]. Beijing: Ocean Press, 1989.
- [3] Boström C E, Gerde P, Hanberg A, et al. Cancer risk assessment, indicators, and guidelines for polycyclic aromatic hydrocarbons in the ambient air[J]. Environmental health perspectives, 2002, 110(Suppl 3): 451-488.
- [4] Masood N, Zakaria M P, Halimoon N, et al. Anthropogenic waste indicators (AWIs), particularly PAHs and LABs, in Malaysian sediments: Application of aquatic environment for identifying anthropogenic pollution[J]. Marine pollution bulletin, 2016, 102(1): 160-175.
- [5] Part J. PAHs and related compounds[C]//Neilson A H. Allard A S, Remberger M. The handbook of environmental chemistry, 1998: 1-80.
- [6] Hartzell S E, Unger M A, McGee B L, et al. Effects-based spatial assessment of contaminated estuarine sediments from Bear Creek, Baltimore Harbor, MD, USA[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, 24(28): 22158-22172.
- [7] Hewitt J E, Thrush S F. Effective long-term ecological monitoring using spatially and temporally nested sampling[J]. Environmental monitoring and assessment, 2007, 133(1-3): 295-307.
- [8] Duan X, Liu J, Zhang D, et al. An assessment of human influences on sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in the estuarine and coastal sediments of China[J]. Marine pollution bulletin, 2015, 97(1): 309-318.
- [9] 黄国培,陈颖军,林田,等.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[J].中国环境科学,2011,31(11):1856-1863.  
Huang Guopei, Chen Yinjun, Lin Tian, et al. The distribution and ecological risk of polycyclic aromatic hydrocarbons of surface sediments in the intertidal zone of Bohai Bay, China[J]. China Environmental Science, 2011, 31(11): 1856-1863.
- [10] 朱童晖.大连新港海域原油污染处置的反思与启示[J].海洋开发与管理,2010,27(8):34-38.  
Zhu Tonghui. Reflection and Inspiration on the Disposal of Oil Spill Accident in Xin'gang, Dalian[J]. Ocean Development and Management, 2010, 27(8): 34-38.
- [11] 张雷,赵奇,武伟男,等.石油污染土壤生物修复技术现状与展望[J].现代化工,2018,1:18-22.  
Zhang Lei, Zhao Qi, Wu Weinan, et al. Status and prospects on bioremediation technologies for petroleum contaminated soil[J]. Modern Chemical Industry, 2018, 1: 18-22.
- [12] 郭玉清,张志南,慕芳红.渤海海洋线虫与底栖桡足类数量之比的应用研究[J].海洋科学,2002,26(12):27-31.  
Guo Yuqing, Zhang Zhinan, Mu Fanghong. The study on the ratio of abundance of nematodes to that of copepods in the Bohai Sea[J]. Marine sciences, 2002, 26(12): 27-31.

- [13] Burchiel S W, Luster M I. Signaling by environmental polycyclic aromatic hydrocarbons in human lymphocytes[J]. *Clinical Immunology*, 2001, 98(1): 2-10.
- [14] 黄逸君, 江志兵, 曾江宁, 等. 石油烃污染对海洋浮游植物群落的短期毒性效应[J]. *植物生态学报*, 2010, 34(9): 1095-1106.  
Huang Yijun, Jiang Zhibin, Zeng Jiangning, et al. Short-term toxic effects of crude oil pollution on marine phytoplankton community[J]. *Journal of Plant Ecology (Chinese Version)*, 2010, 34(9): 1095-1106.
- [15] 董继元. 兰州地区多环芳烃环境归趋模拟和风险评价[D]. 兰州: 兰州大学, 2010.  
Dong Jiyuan. Modelling environmental fate and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in the Lanzhou area[D]. Doctoral Thesis, Lanzhou University, Lanzhou, China, 2010.
- [16] Bolognesi C, Frenzilli G, Lasagna C, et al. Genotoxicity biomarkers in *Mytilus galloprovincialis*: wild versus caged mussels[J]. *Mutation Research/Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis*, 2004, 552(1): 153-162.
- [17] Peng L, Dai X, Yu A. Assessment of the spatial and temporal distribution of legacy persistent organic pollutants and recommendations for sample collection from the surficial sediments of estuaries and seas in China[J]. *Chemosphere*, 2015, 119: S138-S144.
- [18] Wang L, Jia H, Liu X, et al. Historical contamination and ecological risk of organochlorine pesticides in sediment core in northeastern Chinese river[J]. *Ecotoxicology and environmental safety*, 2013, 93(4): 112-120.
- [19] Jo Q, Choy E J, Kang C K, et al. Effects of the coastal sediment elutriates containing persistent organic pollutants (POPs) on early reproductive outputs of the Pacific oyster, *Crassostrea gigas*[J]. *Journal of Environmental Biology*, 2008, 29: 507-512.
- [20] 贺心然, 陈斌林, 高文婕, 等. 灌河口潮间带及其入海河段秋季大型底栖动物生态学研究[J]. *海洋科学*, 2015, 39(5): 28-35.  
He Xinran, Chen Binlin, Gao Wenjie, et al. Ecological studies of macrobenthos in the intertidal zone and near sea section of Guan River in autumn[J]. *Marine Sciences*, 2015, 39(5): 28-35.
- [21] 吴越, 陈星星, 潘齐存, 等. 多氯联苯在两种海洋微藻中毒性效应及富集效应的研究[J]. *海洋科学*, 2017, 41(3): 61-67.  
Wu Yue, Chen xingxing, Pan Qicun, et al. A study of toxicity and bioaccumulation of PCBs in two species of marine microalgae[J]. *Marine Sciences*, 2017, 41(3): 61-67.
- [22] 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.  
Zhang Lijie, Wang Gui, Yao De, et al. Characteristics of heavy metal pollution in the Licun River estuary, Jiaozhou Bay, Qingdao[J]. *Journal of Shandong University of Technology*, 2003, 17(1): 8-14.
- [23] 王爱军, 叶翔, 李团结, 等. 近百年来珠江口淇澳岛滨海湿地沉积物重金属累积及生态危害评价[J]. *环境科学*, 2011, 32(5): 1306-1314.  
Wang Aijun, Ye Xiang, Li Tuanjie, et al. Heavy metal accumulation during last hundred years and its assessment of potential ecological risk in the coastal wetland of Qi'ao Island, Pearl River Estuary of China[J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2011, 32(5): 1306-1314.
- [24] 陈满荣. 长江口潮滩沉积物重金属污染研究[M]. 上海: 华东师范大学出版社, 2009.  
Chen Manrong. The study on heavy metals pollution in tidal sediments in the Yangtze Estuary[M]. Shanghai: East China Normal University Press, 2009.
- [25] Liu Z, Pan S, Sun Z, et al. Heavy metal spatial variability and historical changes in the Yangtze River estuary and North Jiangsu tidal flat[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2015, 98(1-2): 115-129.
- [26] Pan K, Wang W X. Trace metal contamination in estuarine and coastal environments in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2012, 421-422(3): 3-16.
- [27] 曹红英, 梁涛, 王立军, 等. 近海潮间带水体及沉积物中重金属的含量及分布特征[J]. *环境科学*, 2006, 27(1): 126-131.  
Cao Hongying, Liang Tao, Wang Lijun, et al. Contents and distribution characteristics of heavy metals in water and sediment of intertidalite[J]. *Environmental Science*, 2006, 27(1): 126-131.
- [28] 刘义峰, 吴桑云, 陈勇, 等. 胶州湾潮间带沉积物主要污染来源及分布特征[J]. *海洋科学进展*, 2010, 28(2): 163-169.  
Liu Yifeng, Wu Sangyun, Chen Yong, et al. Sources and distributions of main pollutants in the intertidal sediments of the Jiaozhou Bay[J]. *Advances in Marine Science*, 2010, 28(2): 163-169.
- [29] 李雅娟, 杨世伦, 侯立军, 等. 崇明东滩表层沉积物重金属空间分布特征及其污染评价[J]. *环境科学*, 2012, 33(7): 2368-2375.  
Li Yajuan, Yang Shilun, Hou Lijun, et al. Spatial distribution and contamination evaluation of heavy metals in the intertidal surface sediments of Eastern Chongming[J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2012, 33(7): 2368-2375.
- [30] 夏鹏, 孟宪伟, 印萍, 等. 广西北海潮间带沉积物中重金属的污染状况及其潜在生态危害[J]. *海洋科学进展*, 2008, 26(4): 471-477.

- Xia Peng, Meng Xianwei, Yin Ping, et al. Heavy metal pollution and its potential ecological risk in the sediments from the Beihai Intertidal Zone of Guangxi Province[J]. *Advances in Marine Science*, 2008, 26(4): 471-477.
- [31] Hosono T, Su C C, Delinom R, et al. Decline in heavy metal contamination in marine sediments in Jakarta Bay, Indonesia due to increasing environmental regulations[J]. *Estuarine Coastal & Shelf Science*, 2011, 92(2): 297-306.
- [32] Al-Sayed H A, Mahasneh A M, Al-Saad J. Variations of trace metal concentrations in seawater and pearl oyster *Pinctada radiata* from Bahrain (Arabian Gulf)[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 1994, 28(6): 370-374.
- [33] 张莹, 刘元进, 张英, 等. 莱州湾多毛类底栖动物生态特征及其对环境变化的响应[J]. *生态学杂志*, 2012, 31(4): 888-895.  
Zhang Ying, Liu Yuanjin, Zhang Ying, et al. Ecological characteristics of benthic polychaete community and its responses to environmental change in Laizhou Bay, Shandong Province of East China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(4): 888-895.
- [34] Lei M, Zhang L, Lei J, et al. Overview of emerging contaminants and associated human health effects[J]. *Biomed Research International*, 2015, 2015(4): 1-12.
- [35] Sun Q, Lv M, Hu A, et al. Seasonal variation in the occurrence and removal of pharmaceuticals and personal care products in a wastewater treatment plant in Xiamen, China[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2014, 277(4): 69-75.
- [36] 杨永亮, 潘静, 李悦, 等. 青岛近岸沉积物中持久性有机污染物多氯萘和多溴联苯醚[J]. *科学通报*, 2003, 48(21): 2244-2251.  
Yang Yongliang, Pan Jin, Li Yue, et al. Polychlorinated naphthalene and polybrominated diphenyl ethers of Persistent organic pollutants in coastal sediments in Qingdao[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(21): 2244-2251.
- [37] Chen S J, Gao X J, Mai B X, et al. Polybrominated diphenyl ethers in surface sediments of the Yangtze River Delta: Levels, distribution and potential hydrodynamic influence[J]. *Environmental Pollution*, 2006, 144(3): 951-957.
- [38] Pan G, You C. Sediment-water distribution of perfluorooctane sulfonate (PFOS) in Yangtze River Estuary[J]. *Environmental Pollution*, 2010, 158(5): 1363-1367.
- [39] 赵淑江, 曹培, 朱诚侃, 等. 温州近海海域海水及滩涂沉积物中 PFOS 和 PFOA 污染特征分析[J]. *海洋环境科学*, 2012, 31(2): 221-224.  
Zhao Shuijiang, Cao Pei, Zhu Chengkan, et al. Pollution characteristics of PFOS and PFOA in water and sediment samples from Wenzhou inshore[J]. *Marine environmental science*, 2012, 31(2): 221-224.
- [40] 史晓东, 战毅, 侯立军, 等. 上海市崇明县新型有机污染物调查[J]. *环境与生活*, 2014, 6: 114-116.  
Shi Xiaodong, Zhan Yi, Hou Lijun, et al. Investigation on Emerging contaminants in Chongming County, Shanghai[J]. *Green Living*, 2014, 6: 114-116.
- [41] Done H Y, Halden R U. Reconnaissance of 47 antibiotics and associated microbial risks in seafood sold in the United States[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2015, 282: 10-7.
- [42] Liu C, Gin K Y H, Chang V W C. Multi-biomarker responses in green mussels exposed to PFCs: effects at molecular, cellular, and physiological levels[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, 21(4): 2785-2794.
- [43] Müller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine river[J]. *GeoJournal*, 1969, 2(3): 108-118.
- [44] Gao X, Chen C T A. Heavy metal pollution status in surface sediments of the coastal Bohai Bay[J]. *Water Research*, 2012, 46(6): 1901-1911.
- [45] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach[J]. *Water research*, 1980, 14(8): 975-1001.
- [46] 陈明, 蔡青云, 徐慧, 等. 水体沉积物重金属污染风险评价研究进展[J]. *生态环境学报*, 2015, 24(6): 1069-1074.  
Chen Ming, Cai Qingyun, Xu Hui, et al. Research progress of risk assessment of heavy metals pollution in water body sediments[J]. *Ecology & Environmental Sciences*, 2015, 24 (6): 1069-1074.
- [47] Long E R, Macdonald D D, Smith S L, et al. Incidence of adverse biological effects within ranges of chemical concentrations in marine and estuarine sediments[J]. *Environmental management*, 1995, 19(1): 81-97.
- [48] Environment Canada, Ministère du Développement durable de l'Environnement et des Parcs du Québec. Criteria for the assessment of sediment quality in Quebec and application frameworks: prevention, dredging and remediation [S]. 2007. 1-39.
- [49] Nisbet I C T, Lagoy P K. Toxic equivalency factors (TEFs) for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs)[J]. *Regulatory toxicology and pharmacology*, 1992, 16(3): 290-300.
- [50] Sun Z, Li J, He T, et al. Spatial variation and toxicity assessment for heavy metals in sediments of intertidal zone in a typical subtropical estuary (Min River) of China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(29): 23080-23095.
- [51] MacDonald D D, Ingersoll C G, Berger T A. Development and evaluation of consensus-based sediment quality guidelines for freshwater ecosystems[J]. *Archives of environmental contamination and toxicology*, 2000,

- 39(1): 20-31.
- [52] 黄磊, 孙桂华, 袁晓婕. 三沙湾表层沉积物中有机污染物的含量及风险评价[J]. 海洋地质前沿, 2017, 33(8): 63-69.  
Huang Lei, Sun Guihua, Yuan Xiaojie. Concentrations of organic pollutants in surface sediments of the Sansha Bay and risk evaluation[J]. Marine Geology Frontiers, 2017, 33(8): 63-69.
- [53] Qian X, Liang B, Fu W, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in surface sediments from the intertidal zone of Bohai Bay, Northeast China: Spatial distribution, composition, sources and ecological risk assessment[J]. Marine pollution bulletin, 2016, 112(1-2): 349-358.
- [54] 陈彩成, 李青青, 王旌, 等. 滩涂石油污染高级氧化修复技术[J]. 环境工程学报, 2016, 10(5): 2700-2706.  
Chen Caicheng, Li Qingqing, Wang Jing, et al. Advanced oxidation technology for remediation of petroleum-contaminated tidal flat[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(5): 2700-2706.
- [55] Paquin D, Ogoshi R, Campbell S, et al. Bench-scale phytoremediation of polycyclic aromatic hydrocarbon-contaminated marine sediment with tropical plants[J]. International Journal of Phytoremediation, 2002, 4(4): 297-313.
- [56] 吕芳, 丁刚, 吴海一, 等. 海黍子和脆江蓠对重金属锌、镉富集的比较研究[J]. 海洋科学, 2017, 41(1): 18-23.  
Lv Fang, Ding Gang, Wu Haiyi, et al. Comparative study on heavy metal accumulation in *Sargassum muticum* and *Gracilaria chouae*[J]. Marine Sciences, 2017, 41(1): 18-23.
- [57] Johri A K, Dua M, Tuteja D, et al. Degradation of alpha, beta, gamma and delta-hexachlorocyclohexanes by *Sphingomonas paucimobilis*[J]. Biotechnology letters, 1998, 20(9): 885-887.
- [58] Abbondanzi F, Bruzzi L, Campisi T, et al. Biodegradability of polycyclic aromatic hydrocarbons in brackish sediments: preliminary studies of an integrated monitoring[J]. International biodeterioration & biodegradation, 2006, 57(4): 214-221.
- [59] Balachandran C, Duraipandiyan V, Balakrishna K, et al. Petroleum and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) degradation and naphthalene metabolism in *Streptomyces* sp. (ERI-CPDA-1) isolated from oil contaminated soil[J]. Bioresource Technology, 2012, 112(3): 83-90.

## Review on main pollutants in marine tidal flat, China

HE Pei<sup>1, 2</sup>, ZHANG Ming-ming<sup>2</sup>, LI Qiang<sup>1, 2</sup>, XU Yang<sup>1, 2</sup>, WANG Zhong<sup>3</sup>, LING Jun-fen<sup>3</sup>, HUANG Jin-tian<sup>2</sup>

(1. College of Fisheries and Life Sciences, Dalian Ocean University, Dalian 116023, Province Liaoning, China; 2. School of Marine and Biological Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng 224051, Province Jiangsu, China; 3. Jianhu County Fisheries Technical Guidance Station, Yancheng 224700, Province Jiangsu, China)

**Received:** Mar. 5, 2018

**Key words:** Ocean intertidal zone; Polycyclic aromatic hydrocarbons; Persistent organic pollutants; Heavy metals; Emerging contaminants; Evaluation method

**Abstract:** With the economic development and improvement of living standard, the exploitation and usage of marine tidal flat have drawn much attention, as it is rich in natural resources and easily exploited. However, the marine mudflat ecology has been destroyed due to overexploitation, environmental pollution, and abnormal sea conditions. Based on the introduction of the main types of pollutants in marine tidal flats, the present research does the following: 1) summarizes the main composition, source, spatial distribution, and pollution level of marine beach sediment pollutants, 2) illustrates some major ecological risk assessment methods to assess pollution; 3) mentions problems caused by pollutants; and 4) propose some strategies to control/treat these pollutants. This paper can provide some theoretical bases for management of the new coastal beach and development of resources.

(本文编辑: 康亦兼)