

基于沉积物污染风险与生态系统服务价值的环境管理优先级初步研究

——以渤海为例

林婉妮, 王 诺, 吴 暖

(大连海事大学 交通运输工程学院, 辽宁 大连 116026)

摘要: 不同海域所面对的污染风险及各自生态系统服务价值均不相同, 因而在环保资金有限的情况下, 应制定更有针对性的管理优先级和环境保护策略。文中以我国渤海为例, 分别对渤海内各不同海湾的污染风险和海洋生态系统服务价值进行了评估。研究结果表明, 辽东湾的管理优先级最高, 其余依次是莱州湾和渤海湾。在此基础上, 提出了针对不同海湾特点的管理策略。文中提出的方法和思路对于如何有效制定海洋环境保护策略具有重要的应用价值和借鉴意义。

关键词: 污染; 风险; 生态系统; 价值; 环境

中图分类号: X87 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2018)03-0046-07

DOI: 10.11759/hyxx20170731001

在环境保护资金有限的情况下, 如何才能取得保护海洋环境的最佳效果, 这是沿海国家在制定海洋发展规划与管理策略中经常遇到的难题^[1-3]。由于不同海域所面对的污染风险以及本身生态系统服务的价值均不相同, 所以相应的管理策略也应随之变化, 认清这一点, 并寻求行之有效的科学管理方法, 对于更为有效地保护海洋环境, 具有重要意义。

目前, 根据污染风险评估结果来制定海洋管理策略已有一些研究成果, 如沉积物管理策略的制定、陆源污染物排放问题的处理对策、海洋污水排污口的管理策略等, 这些成果在一定程度上解决了海域环境污染问题, 为开展进一步的环境调查和管理措施提供了依据^[4-7]。除污染风险外, 生态系统服务价值也是制定环境保护策略时需要考虑的因素。目前, 在海洋生态系统服务价值的研究方面, Costanza 等^[8]对生态系统服务进行了分类并对各项服务的价值进行了估算; Sarah 等^[9]以海洋生态系统服务价值为依据, 对美国俄勒冈州海岸规划进行了优化; Li 等^[10]提出将生态系统服务融入沿海战略的规划中, 并以我国胶州湾为例来阐述这种管理方式的优缺点; 刘旭等^[11]总结了国内外生态系统服务价值在海洋综合管理方面的应用; 黄博强等^[12]评估了 1986—2010 年漳州地区生态系统服务价值的时空变化过程; 叶翔等^[13]研究了泉州湾沿岸人类活动对滨海湿地生态系统的影响并提出相应治理策略; 杨颖等^[14]分析了近

30 年来长江口海域生态系统环境的变化趋势。由上述分析可以看到, 海洋污染风险以及生态系统服务价值等因素在制定海洋管理策略中都有所体现, 但同时将二者结合起来评价海洋环境, 并根据评价结果有针对性地制定海域环境管理策略还鲜有研究。

鉴于当前我国海洋污染状况严重, 以生态系统服务价值作为环保决策重要依据的理念还未全面建立, 相应的评价方法还不完善等问题, 本文尝试性地将污染风险和生态系统服务价值相结合以确定渤海内不同海湾管理的优先等级, 为有针对性地制定环保管理策略提供科学依据。

1 研究区域

渤海是我国唯一的半封闭内海, 位于北纬 37°0′~41°0′、东经 116°35′~122°0′, 三面环陆, 东面以渤海海峡与黄海相连, 海峡口宽 59 海里, 水域面积 75 618 km², 由渤海湾、莱州湾和辽东湾等 3 个海湾组成。渤海湾位于渤海西部, 水域面积 11 530 km², 其沿岸湿地是我国水鸟的主要分布区之一; 莱州湾位于渤海南

收稿日期: 2017-07-31; 修回日期: 2018-01-30

基金项目: 国家海洋软科学项目(JJYX201612-1)

[Foundation: National Marine Soft Science Program of China, No.JJYX 201612-1]

作者简介: 林婉妮(1991-), 女, 博士研究生, 主要研究方向为海洋经济与环境, E-mail: lwn@dlnu.edu.cn; 王诺, 通信作者, E-mail: wangnuodl@126.com

部, 水域面积 11 040 km², 是我国重要的渔业和海盐生产区; 辽东湾位于渤海北部, 水域面积 25 070 km², 是我国重要的渔业生产区, 同时也是我国二级保护动物斑海豹的重要栖息地。沿岸的大连市、盘锦市、秦皇岛市是我国著名的旅游和度假区。

在过去的几十年中, 渤海地区因其丰富的资源已成为我国经济活动与人类活动最为密集的地区之一。随着周边地区经济的高速发展, 大量的工业废水与城市污水被排入渤海。因渤海属于半封闭浅海, 水体与外界交换的能力很低, 污染物难以扩散, 导致水质状况不断恶化。

2 评价方法

2.1 污染风险评估

已有研究表明, 沉积污染物对底栖生物的影响要大于海水污染物^[15]。因此本文对污染风险的评估主要考虑的是含多种污染物的沉积物对生态环境的危害。根据渤海海域污染物的分布特征, 选取能在环境或动植物体内积蓄, 对人类产生长远不良影响的第一类污染物进行风险评估, 包括重金属汞(Hg)、铜(Cu)、镉(Cd)、锌(Zn)、铬(Cr)、铅(Pb)、砷(As)、镍(Ni)以及有机污染物多环芳烃(PAHs)、多氯联苯(PCBs)和滴滴涕(DDTs)。本研究中, PAHs 包括有 16 种有机化合物(萘(Nap)、萘(Acy)、萘烯(Ace)、芴(Fl)、菲(Phe)、蒽(Ant)、荧蒽(Flu)、芘(Pyr)、苯并蒽(BaA)、屈(Chr)、苯并荧蒽(BbF)、苯并荧蒽(BkF)、苯并芘(BaP)、茚并芘(InP)、二苯并蒽(DBA)和苯并芘(BP)); PCBs 包括有 37 种有机化合物(PCB-17、18、28、31、33、44、49、52、70、74、82、87、95、99、101、105、110、118、128、132、138、149、151、153、156、158、169、170、171、177、180、183、187、191、194、195 和 205)。污染物浓度数据来自于沿岸省市的环境公报及已有的研究调查报告。沉积物质量基准采用目前国际通用的澳大利亚和新西兰环保委员会沉积物质量基准(ANZECC/ARMCANZ 2000)。该标准对于每一种污染物都有两组对应的基准值, 即浓度效用低值(ERL)和浓度效用中值(ERM)。当某种污染物浓度低于 ERL 时, 表示该污染物基本不会引起负面的生物效应; 当浓度介于 ERL 和 ERM 之间时, 表示该污染物会偶尔引起不利的生物效应; 当浓度高于 ERM 时, 表示该污染物会经常引起不利的生物效应^[16]。因此, 当某一污染物浓度超过 ERL 时, 表明该海域需要做进一步的调查和加强管理。

污染物通常不会单独存在于生态系统, 而是通过吸附、沉降等过程存于沉积物中。因此, 本文采取平均效用中值系数(MERM_{Qs})度量含多种污染物的沉积物对环境的作用, 其计算公式为:

$$MERM_{Qs} = \left(\sum_i^n EC_i / ERM_i \right) / n \quad (1)$$

式中, EC_i 表示污染物浓度, ERM_i 表示污染物的 ERM 值, n 表示污染物种类个数。

2.2 渤海生态系统服务价值评估

2.2.1 渤海生态系统服务分类

参照联合国 2000 年提出的生态系统服务分类体系, 结合渤海海域的实际情况, 渤海供给服务包括食品生产和氧气生产服务; 调节服务包括气候调节和水质净化调节服务; 文化服务包括旅游娱乐和科研服务; 支持服务为物种多样性维持服务。

2.2.2 渤海生态系统服务价值计算

本文以 2014 年作为评估基准年, 基于渤海周边沿岸各省市发布的经济及环境统计公报, 收集相关研究数据, 采用市场价格法、成本替代法和成果参照法, 对渤海各海湾生态系统的各项服务价值分别进行估算。

(1) 食品生产

渤海海洋生态系统的食品生产服务价值主要来自近海捕捞和养殖的海产品(包括鱼类、甲壳类、贝类、藻类及其他海产品)的市场交易价值。食品生产服务价值采用市场价格法进行评估。计算公式为:

$$V_f = \sum (Q_i P_i) \quad (2)$$

式中, V_f 为食品生产服务价值, 单位为万元; Q_i 为第 i 类养殖和捕捞水产品的产量, 单位为 t/a, $i=1, 2, 3, 4, 5$ 分别代表鱼类、甲壳类、贝类、藻类和其他; P_i 为第 i 类养殖和捕捞水产品的平均市场价格, 单位为元/kg; 养殖和捕捞水产品的平均市场价格采用当地海产品批发市场同类海产品价格计算。

(2) 氧气生产

渤海生态系统的氧气生产服务主要来自于藻类通过光合作用释放的氧气(O_2), 其价值可基于海域初级生产力进行评估, 计算公式为:

$$V_o = A \cdot S \cdot P_c \cdot C_o \quad (3)$$

式中, V_o 为氧气生产服务价值, 单位万元; S 为评估海域的面积, 单位 m^2 ; P_c 为海域的初级生产力, 单位 g/m^2 ; C_o 为氧气制造成本, 单位元/t; A 为氧气同化系数。文中, 渤海海域的平均初级生产力取 $90 g/m^2$ (以

固定碳的能力计算), 氧气同化系数取 0.73; 应用成本替代法, 取我国造林成本(352 元/t)和工业制氧成本(420 元/t)的平均值 386 元/t 作为氧气制造成本。

(3) 气候调节

渤海生态系统的气候调节服务主要通过藻类对 CO₂ 进行固定, 计算公式为:

$$V_c = S \cdot P_c \cdot C_c \quad (4)$$

式中, V_c 为气候调节服务价值, 单位万元; S 为评估海域的面积, 单位 m²; P_c 为海域的初级生产力, 单位 g/m²; C_c 为固定碳的成本, 单位元/t; 应用成本替代法, 取我国平均造林成本(260 元/t)和碳税(1 122 元/t)的平均值作为固定碳的成本。

(4) 水质净化调节

渤海海洋生态系统的水质净化调节服务主要表现为对进入海域的营养盐氮(N)和磷(P)的生物净化, 以及对 COD 和石油烃的清除过程。对近岸海域 N 和 P 的生物净化价值可基于海洋生物吸收的 N 和 P 数量, 采用成本替代法来计算; 对 COD 和石油烃的去除价值可基于一定海水水质标准下渤海各海湾 COD 和石油烃环境容量, 采用成本替代法来计算, 具体表达式为:

$$V_p = \sum(X_{jh} C_{Nh}) + \sum(Y_{jk} C_{wk}) \quad (5)$$

式中, V_p 为水质净化调节服务价值, 单位为万元; X_{jh} 为海域 j 中营养盐 h 的含量, 单位为 t; C_{Nh} 为处理营养盐 h 的人工成本, 单位为元/t; Y_{jk} 为海域 j 的污染物 k 的环境容量, 单位为 t; C_{wk} 为处理污染物 k 的人工成本, 单位为元/t。

海洋生物在进行光合作用的同时, 按照一定比例吸收碳、氮和磷, 该比例为 Redfield 比值。已知渤海海域的平均初级生产力为 90 g/m²(以固定碳的能力计算), 结合各海湾面积, 根据 Redfield 比值即可计算出各海湾生态系统每年固定的氮和磷的量。参考我国污水处理条例, 氮和磷的人工处理成本分别为 1500 元/t 和 2500 元/t。

根据官方发布的渤海环境保护总体规划(2008—2020 年), 渤海海域水质的管理目标为二类水质。在二类海水水质标准下, 可得到渤海各海湾 COD 与石油烃的环境容量。参考我国污水处理条例, 我国 COD 和石油类污染物的处理成本分别为 4300 元/t 和 7000 元/t。

(5) 旅游娱乐

渤海各海湾的旅游娱乐服务价值可根据沿岸各滨海城市旅游及娱乐的人数及费用支出来计量, 经调查, 各沿海城市旅游产业总收入中有 60%来自海

岸带景区, 因此娱乐服务所产生的价值可按沿海城市旅游总收入的 60%计算, 其计算公式为:

$$V_t = 0.6 \times \sum(X_g C_g) \quad (6)$$

式中, X_g 为城市 g 的旅游人数, 单位为人; C_g 为城市 g 的旅游人均费用, 单位为万元/人。B 为各海湾旅游服务价值占沿岸城市旅游总收入的比例。

(6) 科研服务

科研服务价值评估采用成果参照法。参考 Chen 等^[17]对我国生态系统服务价值的估算, 单位面积生态系统的平均科研文化价值为 3.5 万元/km²。

(7) 维持生物多样性

海洋为生物种群提供重要的产卵场、越冬场和避难所等庇护场所。物种多样性维持的价值量可采用条件价值法进行评估, 其计算公式为:

$$V_d = \sum(W_u H_u \eta) \quad (7)$$

式中, V_d 为物种多样性维持的价值量, 单位为万元/年; W_u 为评估海域的第 u 沿岸城市以家庭为单位的物种多样性保护支付意愿的平均值, 单位为元/户年; H_u 为评估海域的第 u 沿岸城市的家庭户数, 单位为户; η 为支付率。

3 结果与讨论

3.1 污染风险评估

各主要污染物浓度的统计值及对应的 ERL 和 ERM 值见表 1。需要说明的是, 近年来由石油烃、阻燃剂引起的渤海海洋污染问题也较为突出^[18-20], 但因获取数据需要时间, 因此本文仅以表 1 中的污染物进行评估分析。由表 1 可知, 在渤海湾近岸表层沉积物中, 重金属 As 和 Ni 的平均浓度在 ERL 与 ERM 值之间, 其余污染物的平均浓度均低于 ERL 值, 但渤海湾北部海域的 Zn、与西部海域的 Ni 的浓度均超过对应的 ERM 值, 因此判断渤海湾沉积物中 As 会偶尔引起不利的生物效应, Ni 和 Zn 在渤海湾西部和北部海域经常引起不利的生物效应。在莱州湾近岸表层污染物中, 重金属 As 和 Ni 平均浓度在 ERL 和 ERM 值之间, 其余均低于 ERL, 因此判断莱州湾的沉积物中 As 和 Ni 会偶尔引起不利的生物效应。在辽东湾近岸表层污染物中, 重金属 As、Ni 和 Hg 的平均浓度介于 ERL 和 ERM 值之间, 其余均低于 ERL, 但北部海域的 Hg 的浓度已超过 ERM 值, 说明辽东湾的沉积物中 As 和 Ni 会偶尔引起不利的生物效应, 辽东湾北部海域会经常由 Hg 引起不利的生物效应。

目前,许多研究已报道了由有毒重金属与有机物引起的不利生物效应,如重金属 As、Cd、Pb 和 Ni 会干扰海洋生物正常的新陈代谢,使其内分泌发生紊乱^[21-23];Hg 会损害海洋生物体的 DNA,并产生氧化损伤^[24-26],不仅如此,Hg 还会由生物累积过程通过食物链对人类神经系统造成伤害,如 1956 年发生在日

本的水俣病就是由于人们食用了汞含量过高的鱼类后,在体内积累,逐渐引起的神经性疾病^[27];有机污染物 PCBs 会对海洋生物的免疫系统造成损伤^[28]。根据以上分析可知,渤海各海湾的部分海域会由沉积物引起不利的生物效应,因而需要对各湾做进一步的环境监测与治理。

表 1 污染物浓度的统计值、对应的 ERL 和 ERM 值和各湾的沉积物污染风险等级

Tab. 1 Major contaminant concentrations in the Bohai Sea (ng/g), guidelines (ERL and ERM) for each individual contaminant and pollution risk level

污染物类型	渤海湾				莱州湾				辽东湾				ERL	ERM
	样本数量	平均值	最大	最小	样本数量	平均值	最大	最小	样本数量	平均值	最大	最小		
重金属/(μg)														
Cd	117	0.172	0.98	0	146	0.17	0.47	0	298	0.23	0.64	0	1.2	10
Cr	102	53.63	224.5	10.2	116	45.91	91.1	27.66	186	48.9	103	8	81	370
Cu	117	26.17	63	7.2	146	13.92	47.24	0.11	426	22.21	35.96	8	34	270
Ni	78	32.72	52.7	14.1	85	20.95	47.1	7.6	186	22.22	50.3	7	20.9	52
Pb	117	26.89	66.4	8.7	146	18.23	62.6	3.18	426	27.82	56.9	4.3	46.7	218
Hg	39	0.065	0.68	0.03	92	0.071	0.38	0	376	4.44	53.7	0	0.15	0.71
Zn	117	88.61	457.3	34	146	52.4	107	12.8	426	73.83	145	14.5	150	410
As	24	16.15	—	—	85	10.41	22.51	3.24	376	10.08	56	3.1	8.2	70
有机物/(ng/g)														
PAHs	7	28	34.6	24.7	6	55	139.2	24.7	26	231.34	2079.4	28.4	4022	44792
DDTs	16	0.88	4.6	0.35	10	0.47	1.13	0.35	30	1.372	12.14	0.35	1.58	46.1
PCBs	16	1	5.1	0.2	10	0.2	0.2	0.2	30	1.05	7.7	0.2	22.7	180
MERMQs	0.14				0.09				0.68				—	—
风险等级 (MERMQs 范围)	2(0.1~0.5)				1(<0.1)				3(>0.5)				—	—

注:表中污染物浓度以干质量计;ERL 和 ERM 数据来源于澳大利亚和新西兰环保委员会沉积物质量基准

由公式(1),经计算可得各海湾平均效用中值系数(MERMQs),渤海湾为 0.14,莱州湾为 0.09,辽东湾为 0.68。根据 Long 等^[14]的研究,MERMQs 越大,则毒性事件的发生率越高。结合渤海实际情况,本文根据 MERMQs 将污染风险划分为 3 个等级,其中 3 级为最高污染风险等级, MERMQs>0.5; 1 级为最低污染风险等级, MERMQs<0.1。根据风险等级的划分范围,渤海湾污染风险等级为 2 级、莱州湾 1 级,辽东湾 3 级(表 1)。

3.2 生态系统服务价值评估

渤海湾、莱州湾和辽东湾 3 个海湾生态系统服务总价值的计算结果见表 2。由表 2 可知,3 个海湾生态系统服务价值总量为 1251 亿元,其中,渤海湾为 191.85 亿元,占渤海服务价值总量的 14.7%;莱州湾

为 318 亿元,占价值总量的 26%;辽东湾为 742 亿元,占价值总量的 59%。

计算结果表明,辽东湾海域生态系统服务价值总量大于渤海湾和莱州湾 2 个海域服务价值之和,这是由于辽东湾具有丰富的饵料生物和较好的生境,因此能支持更多数量的鱼类以及其他经济生物的养殖和捕捞生产。而且,辽东湾沿岸分布有大连、盘锦和秦皇岛等重要旅游城市,每年的旅游人数远超其他海湾的沿岸城市,因此辽东湾的旅游服务价值远高于渤海湾与莱州湾。

为区分各海湾生态系统服务价值的相对大小,按 3 个海湾生态系统服务价值占总价值的比重划分等级,其中,3 级为最高等级,表示生态系统服务价值等级最高;1 级表示生态系统服务价值等级最低。

由此,可得到渤海湾生态系统服务价值等级为 1 级,莱州湾为 2 级,辽东湾 3 级(表 2)。

表 2 渤海各湾生态系统服务价值及等级划分
Tab. 2 Ecosystem service values and levels for the Bohai Bay, Laizhou Bay, and Liaodong Bay

服务功能	渤海湾	莱州湾	辽东湾
食品生产	135.462	259.32	612.18
氧气生产	10.68	14.71	37.84
气候调节	7.19	9.89	25.44
水质净化调节	6.54	3.4326	10.38
旅游娱乐	27.81	27.0294	46.76
科研服务	4.15	3.921	8.90
维持生物多样性	0.02	0.03	0.11
合计	191.85	318.33	741.61
占总价值比重/%	15	26	59
等级(比重范围)	1(1%~25%)	2(25%~50%)	3(50%~100%)

注:表中数字单位为亿元

3.3 管理优先级

管理优先级是海洋管理决策中的重要环节,因为优先级可以使有限的环保资源得到充分有效利用,使亟需保护的海域得到足够的重视。生态系统为海洋珍稀生物与各种植物提供了庇护所,并为人类的生活与旅游休闲活动提供了场所,因此生态系统服务价值对于海洋管理决策十分重要。基于上述分析,优先管理区域应是生态系统服务价值较高的区域。

图 1 为根据各区域不同生态系统服务价值与污染风险等级划分的 3 个优先管理等级,其中颜色的深浅代表优先级的大小,最深的颜色代表优先级最高,即 级,最浅的颜色代表优先级最低,即 级。根据图 1,结合渤海湾、莱州湾和辽东湾的污染风险等级与生态系统服务价值等级,确定出辽东湾属于管理级别最高的 级,莱州湾属于 级,渤海湾属

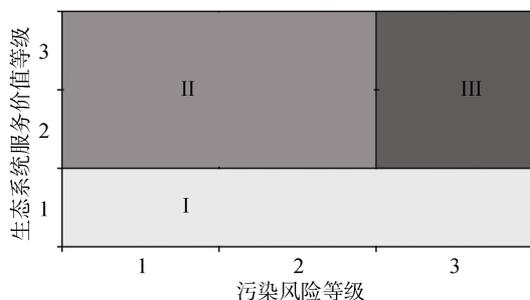


图 1 海域管理优先级划分

Fig. 1 Priority Management Matrix

于 级。根据渤海环境保护总体规划(2008—2020 年)》,各级政府对渤海各海湾环境治理的投资额度统计表明,对辽东湾、莱州湾和渤海湾的环保投资额分别为 47、37 和 32 亿元,治理力度的排序与本文得出的管理级别排序一致,从而验证了本文方法的合理性。

3.4 管理策略

根据各海湾的管理优先级,便可制定相应的管理策略。海洋管理策略通常分为预防性和补救性两类。所谓预防性管理策略,是指以防范方式控制污染物入海;而补救性管理策略是指在控制污染的同时,逐步清除已存在于水环境中的污染物。对于优先管理等级最高的区域,其生态系统服务价值较高,因此应采取补救性和预防性相结合的管理策略:当污染风险较高时,应以补救性策略迅速减少沉积物对生态系统的风险;污染风险较低,则以预防性策略为主保护该地区的生态系统。对于优先管理等级较低的区域,由于其生态系统服务价值较低,则应根据其污染风险的大小采取补救性或预防性管理方式。

根据渤海各海湾的优先管理等级可得到有针对性的管理策略:对于渤海湾,尽管污染风险较高,但生态系统功能价值相对较低,属于 级管理区域,因此,可采取定期监测的办法,在环保资金允许的情况下,适当采取补救性管理策略;对于莱州湾,虽然污染风险相对略低,但具有中等程度的生态系统服务价值,属于 级管理区域,因此可采用预防性策略来防止环境恶化,如对沉积物风险等级进行调查、控制污染物排放量等;对于辽东湾,其污染风险与生态系统服务价值均最高,属于 级管理区域,因此应采取预防性和补救性相结合的管理策略,以补救性措施快速降低沉积物对生态的威胁,同时控制污染物入海防止环境继续恶化,如采用生物方法治理沉积物,控制污染物入海量,限制该海区的使用并加强公众环保意识等。管理优先级和相应的管理策略不是一成不变的,应根据污染风险等级和生态系统服务价值的变化随时进行调整。基于以上策略,管理部门应阶段性地对海洋环境污染和生态系统服务价值进行评估,根据评估结果,确定各海域的优先管理等级,从而制定下一阶段的海洋环境管理策略。

4 结论

由于人类对海洋的开发程度及各海域生态系统服务价值存在较大差异,所以相应的管理策略也应有所不同。应结合污染风险和海洋生态系统服务价值确定

相应的优先级,以便有针对性地管理海洋环境,提高环保资金的使用效率。对于我国渤海,对污染风险较高和生态系统服务价值较高的辽东湾(一级管理区),应采取预防性与补救性管理策略相结合的办法,重点应放在补救性管理策略,以迅速减少该海域的污染风险。同时从控制该海区污染物的进入;对污染风险较高,但生态系统服务价值较低的莱州湾(二级管理区),应采取预防型管理策略;对生态系统服务价值较低的渤海湾(三级管理区),应采取定期监测的办法,在环保资金允许的情况下,适当采取补救性管理策略。

在本文研究中,对渤海海洋环境保护的管理策略的建议只是初级的,在管理政策最终确定前,须由包括海洋管理者、科学工作者以及利益相关单位进行讨论优化。总之,将污染风险和海洋生态系统服务价值相结合来制定海洋管理策略的方法,其核心在于识别管理优先区域,这一方法在环保资金有限、海洋污染较为严重的情况下,对于制定更为有效的环境保护策略具有重要的应用价值和借鉴意义。

参考文献:

- [1] Bremer L L, Delevaux J M S, Leary J J K, et al. Opportunities and strategies to incorporate ecosystem services knowledge and decision support tools into planning and decision making in hawaii[J]. *Environmental Management*. 2015, 55(4): 884-899.
- [2] Tong S, Song N, Yan H, et al. Management measures and recommendations in improving the Bohai Sea environment over the last quarter century[J]. *Ocean & Coastal Management*. 2014, 91: 80-87.
- [3] 张杰,王进河,崔文连,等.我国海岸带面临的威胁、管理实践与“十三五”科技支撑工作重点——以青岛市、东营市和连云港市为例[J]. *海洋科学*, 2015, 2: 1-7.
Zhang Jie, Wang Jinhe, Cui Wenlian, et al. The threat, management practice and work focus of science and technology support in the China coastal zone during the 13th Five-Year: examples in Qingdao, Dongying and Lianyungang[J]. *Marine Sciences*, 2015, 2: 1-7.
- [4] Dagnino A, Viarengo A. Development of a decision support system to manage contamination in marine ecosystems[J]. *Science of The Total Environment*. 2014, 466-467: 119-126.
- [5] 赵明明,王传远,孙志高,等.黄河尾闾及近岸沉积物中重金属的含量分布及生态风险评估[J]. *海洋科学*, 2016, 1: 68-75.
Zhao Mingming, Wang Chuanyuan, Sun Zhigao, et al. Concentration, distribution, and ecological risk assessment of heavy metals in sediments from the tail reaches of the Yellow River Estuary[J]. *Marine Sciences*, 2016, 1: 68-75.
- [6] 杨一,李维尊,张景凯,等.渤海湾天津海域海洋环境污染防治策略探讨[J]. *海洋环境科学*, 2016, 1: 49-54.
Yang Yi, Li Weizun, Zhang Jingkai, et al. Discussion on marine environmental pollution prevention and control in Bohai Bay Tianjin Area[J]. *Marine Environmental Science*, 2016, 1: 49-54.
- [7] 祝慧娜,袁兴中,梁婕,等.河流水环境污染风险模糊综合评价模型[J]. *中国环境科学*, 2011, 3: 516-521.
Zhu Huina, Yuan Xingzhong, Liang Jie, et al. An integrated model for assessing the risk of water environmental pollution based on fuzziness[J]. *China Environmental Science*, 2011, 3: 516-521.
- [8] Costanza R, D'Arge R, Groot R D, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. *World Environment*, 1999, 387(1): 3-15.
- [9] Lester S E, Costello C, Halpern B S, et al. Evaluating tradeoffs among ecosystem services to inform marine spatial planning[J]. *Marine Policy*, 2013, 38(1): 80-89.
- [10] Li R, Li Y, van den Brink M, et al. The capacities of institutions for the integration of ecosystem services in coastal strategic planning: The case of Jiaozhou Bay[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2015, 107: 1-15.
- [11] 刘旭,赵桂慎,蔡文博,等.基于海洋生态系统服务功能的评估方法与海洋管理应用[J]. *生态经济*, 2015, 12: 146-149.
Liu Xu, Zhao Guishen, Cai Wenbo, et al. Reviews on Marine Ecosystem Services Valuation and Applying to Marine Management[J]. *Ecological Economy*, 2015, 12: 146-149.
- [12] 黄博强,黄金良,李迅,等.基于GIS和InVEST模型的海岸带生态系统服务价值时空动态变化分析——以龙海市为例[J]. *海洋环境科学*, 2015, 6: 916-924.
Huang Boqiang, Huang Jinliang, Li Xun, et al. Spatio-temporal dynamics of coastal ecosystem services using GIS and InVEST: a case study in the Longhai City[J]. *Marine Environmental Science*, 2015, 6: 916-924.
- [13] 叶翔,王爱军,马牧,等.高强度人类活动对泉州湾滨海湿地环境的影响及其对策[J]. *海洋科学*, 2016, 1: 94-100.
Ye Xiang, Wang Aijun, Ma Mu, et al. Effects of high-intensity human activities on the environment variations of coastal wetland in the Quanzhou Bay, China[J]. *Marine Sciences*, 2016, 1: 94-100.
- [14] 杨颖,徐韧.近30a来长江口海域生态环境状况变化趋势分析[J]. *海洋科学*, 2015, 10: 101-107.
Yang Ying, Xu Ren. The environment variation trend in the Changjiang River Estuary in the past 30a[J]. *Marine Sciences*, 2015, 10: 101-107.
- [15] Birch G F, Hutson P. Use of sediment risk and ecological/Conservation value for strategic management of estuarine environments: Sydney Estuary, Australia[J]. *Environmental Management*, 2009, 44(4): 836-850.
- [16] Long Er, Macdonald Dd. Recommended uses of empirically derived, sediment quality guidelines for marine and estuarine ecosystems[J]. *Hum Ecol Risk Assess*, 1998, 4: 1019-1039.
- [17] Chen Z, Zhang X. Value of ecosystem services in China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(10): 870-876.
- [18] 朱冰清,史薇,胡冠九.中国海洋环境中卤代阻燃剂

- 的污染现状与研究进展[J]. 环境化学, 2017, 36(11): 2408-2423.
- Zhu Bingqing, Shi Wei, Hu Guanjiu. The pollution status and research progress on halogenated flame retardants in China marine environment[J]. Environmental Chemistry, 2017, 36(11): 2408-2423 .
- [19] 李胜勇, 邓伟, 张大海, 等. 渤海及邻近海域表层沉积物中烃类物质的分布特征及其指示意义[J]. 海洋环境科学, 2017, 36(4): 501-508.
- Li Shengyong, Deng Wei, Zhang Dahai, et al. Distribution and its indication significance of hydrocarbons in surface sediments from Bohai Sea and adjacent area[J]. Marine Environmental Science, 2017, 36(4): 501-508.
- [20] 刘亮, 王菊英, 胡莹莹, 等. 渤海近岸海域石油类污染变化趋势[J]. 海洋与湖沼, 2014, 45(1): 88-93.
- Liu Liang, Wang Juying, Hu Yingying, et al. Contamination by petroleum hydrocarbon in coastal waters of Bohai bay[J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 2014, 45(1): 88-93.
- [21] 宋晓娟, 贺心然, 陈斌林, 等. 灌河口海域表层沉积物中重金属的污染变化及潜在生态危害[J]. 海洋科学, 2013, 37(5): 25-32.
- Song Xiaojuan, He Xinran, Chen Binlin, et al. Variations and ecological risk assessments of heavy metals in surface sediments from Guan River Estuary[J]. Marine Sciences, 2013, 37(5): 25-32.
- [22] 母清林, 王晓华, 余运勇, 等. 浙江近岸海域贝类中重金属和贝毒污染状况研究[J]. 海洋科学, 2013, 37(1): 87-91.
- Mu Qinglin, Wang Xiaohua, She Yunyong, et al. Contamination status of heavy metals and shellfish poisoning in the shellfish samples of Zhejiang coastal areas[J]. Marine Sciences, 2013, 37(1): 87-91.
- [23] 任黎华, 张继红, 牛亚丽, 等. 桑沟湾长牡蛎生物沉积物对环境底质影响的同位素证据[J]. 海洋科学, 2015, (11): 79-85.
- Ren Lihua, Zhang Jihong, Niu Yali, et al. Stable isotope evidence for the sediment impacts on biodeposits from long-line cultured *Crassostrea gigas* in Sungo Bay[J]. Marine Sciences, 2015, (11): 79-85.
- [24] 王晓宇, 王清, 杨红生. 镉和汞两种重金属离子对四角蛤蜊的急性毒性[J]. 海洋科学, 2009, 33(12): 24-29, 113.
- Wang Xiaoyu, Wang Qing, Yang Hongsheng. Acute toxicities of Cd^{2+} and Hg^{2+} on *Macra veneriformis* Reeve[J]. Marine Sciences, 2009, 33(12): 24-29, 113.
- [25] 李顺兴, 郑凤英, 洪华生, 等. 氮磷营养盐与有机汞联合作用对微氏海链藻生长的影响[J]. 海洋科学, 2005, 10: 38-41.
- Li Shunxing, Zheng Fengying, Hong Huasheng, et al. Combined effect of nitrate and phosphate with organic mercury on the growth of *Thalassiosira weissflogii*[J]. Marine Sciences, 2005, 10: 38-41.
- [26] Ausili A, Gabellini M, Cammarata G, et al. Ecotoxicological and human health risk in a petrochemical district of southern Italy[J]. Marine Environmental Research. 2008, 66(1): 215-217.
- [27] De Flora S, Bannicelli C, Bagnasco M. Genotoxicity of mercury compounds[J]. Mutation Research. 1994, 317(1): 57.
- [28] Alava J J, Ikonomou M G, Ross P S, et al. Polychlorinated biphenyls and polybrominated diphenyl ethers in Galapagos sea lions (*Zalophus wollebaeki*)[J]. Environmental Toxicology & Chemistry. 2009, 28(11): 2271-2282.

Preliminary establishment of environmental management priorities based on sediment pollution risk and ecosystem service values: Bohai Sea

LIN Wan-ni, WANG Nuo, WU Nuan

(College of Transportation engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Received: Jul. 31, 2017

Key words: pollution; risk; ecosystem service value; environment

Abstract: Different coastal areas face different pollution risks and have different ecosystem service values, and the management priorities and strategies in these areas must be developed within the scope of limited environmental funds. In this paper, we propose a management method that combines the pollution risks and ecosystem service values to identify the management priorities of different bays, which are then used to determine appropriate management strategies. We identify the management priorities of various bays in China's Bohai Sea and recommend corresponding management strategies. This method has important application value and reference significance for developing effective environmental management strategies.

(本文编辑: 康亦兼)