

# 基于陆海统筹的渤海山东省近岸海域总氮总量控制研究

余 东, 朱容娟, 梁 斌, 郑 楠

(国家海洋环境监测中心, 辽宁 大连 116023)

**摘 要:** 总氮为山东省渤海近岸海域总量控制的主要污染物, 本文利用输出系数法评估了陆源污染物入海总量, 研究了总氮陆源入海时空分布格局。结合山东省渤海近岸海水水质目标, 运用入海负荷最优化法, 本研究得到 12 条主要河流的总氮允许入海量为 86,184 t/a, 为达成渤海综合治理攻坚战的水质目标, 总氮需减排 60,505 t/a。基于陆海统筹考虑, 本文分配了研究范围内各地市总氮削减量。本研究对有效改善山东省渤海近岸海域环境质量具有重要参考价值。

**关键词:** 陆海统筹; 总量控制; 总氮

中图分类号: X55 文献标识码: A 文章编号: 1007-6336(2021)06-0832-06

## Study on total nitrogen quantity control in Shandong province coastal area of Bohai Sea based on land and sea coordination

YU Dong, ZHU Rong-juan, LIANG Bin, ZHENG Nan

(National Marine Environment Monitoring Center, Dalian 116023, China)

**Abstract:** In this paper, total nitrogen is determined as the main pollutant for total quantity control in the coastal area of Bohai Sea in Shandong province. The total quantity of land-based pollutants into the sea is evaluated by using the output coefficient method, and the source and spatial-temporal distribution pattern of land-based pollutants into the sea are clarified. Combined with the coastal water quality target, the allowable inflow of 12 main rivers is calculated to be 86,184 tons/year by using the optimization method of sea load. In order to achieve the water quality goal of Bohai Sea pollution control, it is necessary to reduce the emission by 60,505 tons/year. Plan the land and sea as a whole, the total nitrogen reduction of cities in the study area was allocated. This study has important reference value for effectively improving the environmental quality of Bohai Coastal Waters in Shandong province.

**Key words:** land and sea coordination; total quantity control; total nitrogen

山东省渤海近岸海域主要包括莱州湾、黄河口和渤海湾南部海域。从 20 世纪 80 年代开始, 在高强度陆源污染物排放、大规模无序围填海作业等多重人类活动的作用下, 山东省渤海近岸海域环境质量显著下降, 生态系统呈亚健康状况, 突出表现在溶解无机氮 (DIN) 含量超标严重, 氮磷比严重失衡, 富营养化程度居高不下, 赤

潮等生态灾害时有发生<sup>[1]</sup>。山东省渤海近岸海域已成为我国近岸环境问题最突出的海区, 严重制约了环渤海经济社会的可持续发展。

党的十九大以来, 在坚决打好污染防治攻坚战的时代背景下, 渤海是重要的污染防治攻坚战, 山东省政府高度重视近岸海域污染防治工作, 2017 年印发了《山东省近岸海域污染防治实

收稿日期: 2021-07-19, 修订日期: 2021-09-16

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFC1401208)

作者简介: 余 东 (1981—), 男, 河南郑州人, 博士, 主要研究方向为海洋环境规划与管理, E-mail: dyu@nmemc.org.cn

通讯作者: 梁 斌 (1979—), 男, 河北沧州人, 硕士, 主要研究方向为海洋环境规划与管理, E-mail: bliang@nmemc.org.cn

施方案》, 2019 年印发了《山东省打好渤海区域环境综合治理攻坚战作战方案》, 力求圆满完成攻坚战目标。本文基于陆海统筹, 对山东省渤海近岸海域总氮产生、排放进行总量控制研究, 着力解决渤海近岸污染基础研究工作不足的问题, 为有效改善山东省渤海近岸海域环境质量, 实现《渤海综合治理攻坚战行动计划》水质目标, 提升山东省渤海近岸海域的环境管理水平提供科学依据和技术支撑。

## 1 总量控制研究进展

总量控制制度是一项专业性、技术性较强的制度, 其实施不仅需要方向性、原则性的规定, 更需要有具体、可操作的技术指导。水环境总量控制是一种比较先进的水环境保护思想和管理方法。20 世纪 60 年代开始, 美国、欧盟、日本等发达国家的水质规划是污染物总量控制研究的早期示范, 以浓度控制为主。随着时代发展和科技进步, 水质规划中加入了总量控制的概念。美国切萨皮克湾采取最大日负荷总量(TMDL)策略<sup>[2-4]</sup>, 充分考虑总量控制和分配的主要因素, 实施以来水环境污染控制取得了明显的成效。欧洲波罗的海沿岸国家, 通过排海污染物总量控制和综合治理措施, 波罗的海生态环境得到恢复和改善<sup>[5-6]</sup>。日本的濑户内海<sup>[7-8]</sup>, 通过《濑户内海环境保护特别措施法》等立法措施, 总量控制实践同样取得了丰硕成果。近年来, 总量控制在水环境保护中的作用日益凸显, 国内也进行了诸多相关研究<sup>[9-10]</sup>, 但相关研究缺少陆海统筹方面的关注, 基本都只是把入海污染物的允许排放量分配到各排污源, 无法制定相关控制方案, 缺少可操作性。陆源是海洋污染物的主要来源, 只有把陆地的污染治理好, 才能从源头减轻海洋污染, 因此, 陆海统筹应是近岸海域污染物总量控制的主要原则。

## 2 技术路线

本文把“流域-河口-近海”作为一个有机整体, 统筹考虑陆域和海域的产污、纳污情况, 根据海洋环境质量改善目标和管理要求确定陆域、海域减排控制要求, 并进一步将减排控制要

求上溯至流域, 逐步实现上下游、海陆间污染的联防联控。本研究包括总量控制区域确定、水质调查与评价、总量控制指标识别、陆源污染物入海总量调查评估、水质目标制定、允许排放量计算、污染物削减总量分配等主要部分, 技术路线见图 1。

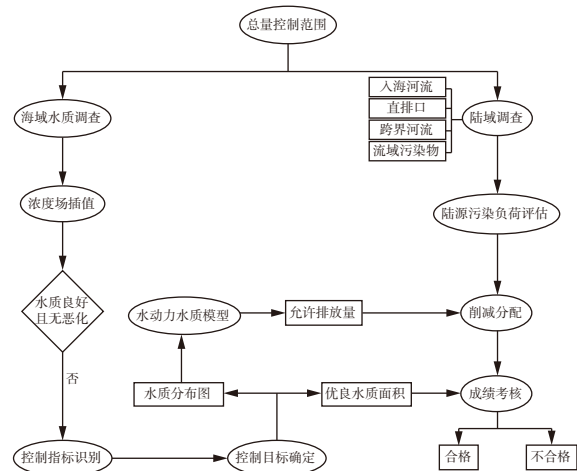


图 1 总量控制技术路线

Fig. 1 Total quantity control technology roadmap

## 3 山东省渤海近岸海域总氮总量控制

### 3.1 总量控制区域

首先确定海域范围, 再“以海定陆”确定陆域范围。考虑地方政府是总量控制实施的主体, 在确定海域和陆域范围时, 以相关地市级、县级行政区划为边界。

**海域范围:** 山东省渤海近岸海域, 包括滨州市、东营市、潍坊市、烟台市(招远市、龙口市)管辖海域, 山东省与河北省交界海域, 山东省与渤海中部交界海域, 等等。

**陆域范围:** 通过河流或入海直排口向渤海海域直接和间接输入污染物的山东省陆域范围。包括滨州市、德州市、东营市、菏泽市、济南市、济宁市、聊城市、泰安市、淄博市、潍坊市、烟台市、青岛市、日照市、临沂市等 14 市。其中, 烟台市、青岛市、菏泽市、日照市、济宁市等城市仅有部分区域位于本文的研究范围内。

### 3.2 水质评价和总量控制指标识别

山东省渤海近岸海域 2011—2019 年海水水质状况见图 2。山东省渤海近岸海域海水水质总体呈波动趋势, 优良水质的比例平均值达



图2 渤海山东省近岸海域 2011—2019 年海水水质状况  
Fig. 2 Seawater quality of Bohai Sea in Shandong province from 2011 to 2019

65.2%。2012 年和 2013 年优良水质比例较低,不到 50%,水质下降显著。2014 年以后,多数年份恢复到 70% 以上。劣四类水质比例平均值为 10.1%, 2012 年、2013 年、2015 年、2018 年劣四

类水质比例超过 10%,其他年份劣四类水质比例均在 10% 以内。主要超标物质为无机氮,海水中无机氮的来源与陆源输入总氮息息相关,考虑陆海衔接,总量控制指标识别为总氮。

### 3.3 陆源污染物入海总量调查评估

陆源污染物入海总量调查评估采用输出系数法,数据基准年设定为 2018 年。结合收集的山东省水利部门调查资料,在系统分析基础上,归并了部分入海口邻近河流,确定了黄河、小清河等 12 条入海河流作为研究对象。对山东省 DEM 数据进行水文分析,提取河网及汇水区,最终划分为 20 个流域,82 个子流域,其中 25 个子流域为入海流域,如图 3 所示。

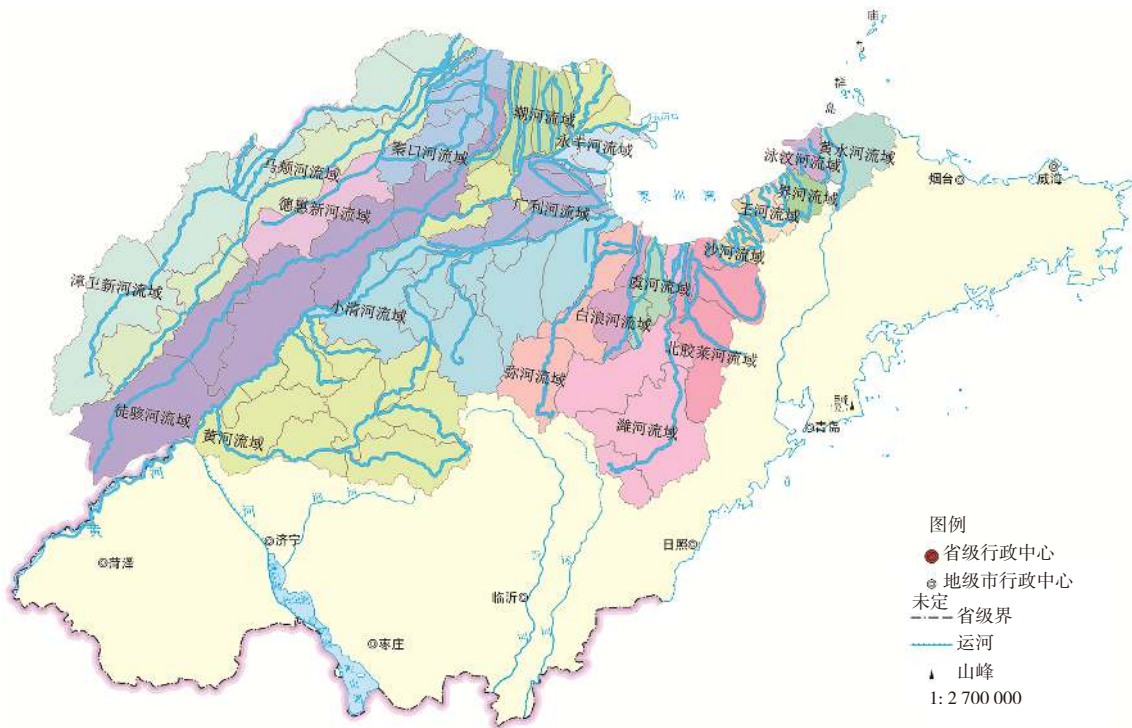


图3 山东省主要渤海入海河流子流域划分结果

Fig. 3 Sub watershed division of main rivers into the sea in Shandong province

基于水利部门入境、入海河流流量数据,根据流域水量平衡原理,计算山东省主要渤海入海河流的径流量:

$$W_{\text{实测径流量}} = W_{\text{天然}} - W_{\text{工业}} - W_{\text{农业}} - W_{\text{生活}} - W_{\text{库蒸发}} - W_{\text{库渗漏}} - W_{\text{蓄变}} - W_{\text{调水}}$$

式中:  $W_{\text{实测径流量}}$  为河流实际径流量;  $W_{\text{天然}}$  为水资源公报中天然径流量;  $W_{\text{工业}}$ 、 $W_{\text{农业}}$ 、 $W_{\text{生活}}$  分别为工业、农业灌溉、居民生活耗水量;  $W_{\text{库蒸发}}$

为水库、闸坝库区水面蒸发与陆面蒸发的差值;  $W_{\text{库渗漏}}$  为水库、闸坝渗漏量;  $W_{\text{蓄变}}$  为年初、年末水库及地下水蓄水量的变化,增加为正,减少为负;  $W_{\text{调水}}$  为跨流域调水及分洪量,调出为正,调入为负。

根据物质守恒定律,流域中氮、磷营养盐的滞留量( $R$ )等于流域营养盐的排放量( $D$ )减去流域出口处营养盐的负荷量( $L$ ),即  $R = D - L$  [11]。



通过以上公式可以估算出河流系统中氮营养盐的滞留系数( $R/D$ ):

$$\frac{R}{D} = 1 - \frac{1}{1 + R/L} \quad (1)$$

$$R/L = aHL^b \quad (2)$$

$$HL = Q(A_{L,R} + 0.001 \times A^{1.185}) \quad (3)$$

式中: $HL$ 为水力负荷,表示单位时间内通过单位面积的水体体积; $a$ 、 $b$ 为模型系数,根据物质类型取常数值,对于总氮, $a = 1.9$ , $b = -0.49$ ; $Q$ 为河流年平均径流量; $A_{L,R}$ 为水库、湖泊的面积; $A$ 为子流域面积。

流域滞留是由陆面滞留和河道水库滞留叠加而成,将每个子流域的滞留分解为陆面滞留系数、河道水库滞留系数;然后根据流域汇流关系计算出入境污染物、点源污染物、面源污染物的入海系数;入境污染物、点源污染物、面源污染物的排放量乘以各自对应的入海系数,即得到入境污染物、点源污染物、面源污染物的入海量。

通过计算得到,2018年,山东省总氮入海量为147035吨,其中,河流总氮入海量为145799吨,直排口总氮入海量为1256吨。山东省境内自产出总氮入海量为33680吨,占总氮入海量的22.9%,由山东省外排放到山东省的总氮入海量为113355吨,占总氮入海量的77.1%,是境内自产出总氮入海量的3.4倍。

在山东省境内自产出总氮的入海量33680吨中,工业总氮入海量为2617吨,城镇居民生活总氮入海量为11870吨,农业化肥总氮入海量为3601吨,畜禽养殖总氮入海量为10602吨,农村居民生活总氮入海量为4545吨,淡水养殖总氮入海量为445吨。从行业看,总氮入海量贡献大小依次为城镇居民生活、畜禽养殖、农村居民生活、农业化肥、工业、淡水养殖。

### 3.4 水质目标制定

《渤海综合治理攻坚战行动计划》设定了山东省渤海近岸海域水质目标:“进一步保证近岸海域水质的稳定,全年符合优良海水水质的比例平均值不低于75%,第四类和劣四类海水水质比例全年平均值不超过10%”。据此目标,结合山东省近年来水质状况分布,本文综合确定了山东省渤海近岸海域水质目标具体空间分布,见图4。



图 4 山东省渤海近岸海域水质目标示意图

Fig. 4 Figure of seawater quality target in Shandong province coastal area of Bohai Sea

### 3.5 总氮允许排放量和削减量计算

基于FVCOM数值模拟技术,开展渤海属地化的研发应用,并对山东省渤海近岸海域(含黄河入海口邻近海域)进行局部加密。采用非结构化网格和有限体积法来提高对曲折岸线的贴合程度。以最新版海图数据制作网格水深,部分缺失数据由ETOPO1补充和订正,采用NCEP CFS逐小时风场和tpxo 9.0潮汐数据作为模型驱动和边界条件,构建渤海精细化数值模型,其中,山东省渤海近岸海域水平网格精度为10~200m(图5)。并利用对流扩散方程构建山东省渤海近岸海域的水动力-水质耦合模型。根据水质控制目标,在不同水质标准的两种水域的交界线上设水质控制点,使这些点的浓度不超过较严格的海水水质类别,以保证各类水域分别达标。采用入海负荷线性规划法计算各污染源的污染物允许排放量,计算结果见表1。

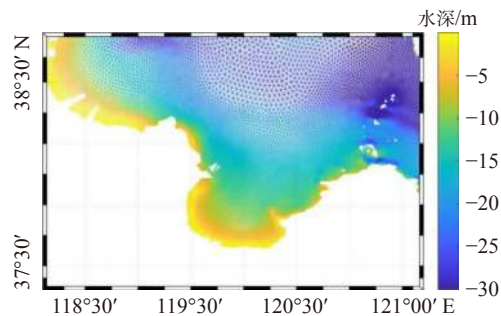


图 5 模型计算网格及水深

Fig. 5 The mesh and water depth of the model

表1 各污染源总氮允许排放量表(单位:t/a)

河口	允许排放量	现状排放量	削减量	削减比例
潮河	636	489	-147	尚有余量
广利河	635	488	-147	尚有余量
黄河	60805	123200	55221	45%
黄水河	854	657	-197	尚有余量
胶莱河	316	1249	934	75%
马颊河	2240	2473	-15	尚有余量
弥河	481	2623	2031	77%
徒骇河	4027	3586	-1075	尚有余量
王河	1373	1056	-317	尚有余量
潍河	721	1216	499	41%
小清河	3749	7266	3552	49%
漳卫新河	2247	2386	166	7%
合计	86184	146689	60505	41%

从评估结果可以看出:

(1)山东省渤海近岸海域总氮需大幅削减。为达成水质控制目标,总氮排放量需削减 60505 t/a,削减比例达到 41%。

(2)总氮排放量削减量最大的是黄河,其总氮排放量需削减高达 55221 t/a,削减比例达到 45%。需要指出的是,黄河入海量评估都是以利津水文站的调查资料作为率定基础数据,但利津水文站距离黄河实际入海口约 100 km,且临近河口是大面积的国家级河口湿地自然保护区,拥有良好的自然生态环境,构成生态屏障,大片芦苇、碱蓬湿地对营养物质具有很好的生态削减作用,实际黄河河口区域的营养物质环境容量应大于本次评估得出的允许排放量。另一方面,根据黄河流域陆源污染评估,黄河山东省境内总氮产生量只占黄河入海总氮量的 8%,按此比例,山东省黄河总氮削减量为 4418 t/a。

(3)小清河总氮排放量在诸河中仅次于黄河,远高于其他河流,需要大幅削减其总氮入海量。小清河位于莱州湾湾底,河口区域为港口、围海养殖、盐田等,周边和河道多人工岸线,造成该区域水动力条件较弱并缺少自然生态屏障。本研究过程中,小清河正进行整治复航工程建设,随着该工程建设的完成,将对河道、河口进行清理整治,可观后效。

(4)弥河、胶莱河也需要大幅削减总氮排放量,其中,弥河归并了虞河、白浪河等河流,这与这些河口区域的控制目标较严格(第二类海水水

质标准)有关。这些河流同样于莱州湾湾底入海,距离小清河河口不远,同时受到了黄河一定的影响。这些河口区域也多为围海养殖、盐田等人工岸线区域。在可能的情况下,退围还湿、增加生态屏障是减少这些河流对海洋生态环境影响的途径之一。

### 3.6 陆源行政区总氮削减量分配

根据本文进行的陆源污染入河负荷评估,本着谁污染谁负责的原则,对陆域各地市级行政区进行总氮排放量削减分配。山东省渤海入海河流域涉及的地市入河总氮量以及在水质目标条件下各地市总氮削减量见表 2。

表2 各地市总氮削减量分配表

Tab.2 Distribution table of total nitrogen reduction in different cities

地市	入河总氮量/t	比例/(%)	总氮削减量/t
滨州	10625	10.0	966
东营	6411	6.0	583
潍坊	5260	4.9	478
烟台	8029	7.5	730
德州	18015	16.9	1638
聊城	12143	11.4	1104
济宁	22	0.0	2
临沂	2789	2.6	254
泰安	18687	17.5	1699
济南	14227	13.3	1293
日照	117	0.1	11
青岛	825	0.8	75
淄博	9567	9.0	870
合计	106717		9702

## 4 讨论

本文在对山东省渤海近岸海域污染源调查和历史数据分析基础上,确定总氮作为总量控制的主要污染物;利用输出系数法评估陆源污染物入海总量,弄清了陆源入海污染物来源及时空分布格局,评估了分流域、分区域、分海域、分行业的主要污染物入河入海污染贡献情况;结合山东渤海近岸海水水质目标,计算了各主要河流的允许入海量,进而与陆源入海污染物时空分布格局相结合,陆海统筹考虑,确定了各行政区总氮削减量,可为流域内污染物总量分配与减排提供科学依据,有助于与地方具体生态环境管理工作接轨,具有可操作性。

在山东省渤海近岸海域海水水质后续的管理实践中,应继续定量考核总量控制成果。对于未能达到总量控制目标的区域,重新检视,制定新一轮的总量控制管理措施;对于达到总量控制目标的区域,维持状况或制定更高的管理目标。

#### 参考文献:

- [1] 李保磊,赵玉慧,杨琨,等.渤海海洋环境状况及保护建议[J].*海洋开发与管理*,2016,33(10):59-62.
- [2] 刘健.美国切萨皮克湾的综合治理[J].*世界农业*,1999(3):8-10.
- [3] EPA. Guidance for water quality-based decisions: the TMDL process[R]. Washington: Assessment and Watershed Protection Division, U. S. Environmental Protection Agency, 1991.
- [4] GARDINER N, PAULSON C, PIASKY T, et al. Regional stormwater BMPS: a solution for meeting future TMDL wasteload allocations in southern California[J]. *Proceedings of the Water Environment Federation*, 2003, 2003(4): 1250-1264.
- [5] 王燕,施维蓉.《欧盟水框架指令》及其成功经验[J].*节能与环保*,2010(7):14-16.
- [6] HEDIN S, DUBOIS A, IKONEN R, et al. The Water Framework Directive in the Baltic Sea Region Countries: vertical implementation, horizontal integration and transnational cooperation[R]. Stockholm: Nordic Council of Ministers, 2007.
- [7] 韦兴平.日本的海洋污染及防治对策[J].*海洋环境科学*,1988,7(2):102-106.
- [8] 慎丽华,石建中.日本濑户内海污染防治经验启示[C]//创新驱动与转型发展——青岛市第十一届学术年会论文集.青岛:青岛出版社,2013.
- [9] 丁东生.渤海主要污染物环境容量及陆源排污管理区分配容量计算[D].青岛:中国海洋大学,2012.
- [10] 赵骞,杨永俊,赵仕兰.入海污染物总量控制制度与技术的研究进展[J].*海洋开发与管理*,2013(2):65-71.
- [11] 许自舟,张志锋,梁斌,等.天津市陆源氮磷入海污染负荷总量评估[M].北京:海洋出版社,2016.
- [12] 山东省生态环境厅.2020年山东省生态环境状况公报[EB/OL].(2021-06-03)[2021-06-06].<http://xxgk.sdein.gov.cn/xxgkml/hjzkgb/202106/P020210603392845498635.pdf>.
- [13] 山东省生态环境厅.2019年-2020年山东省近岸海域环境监测信息公开[EB/OL].(2021-03-09)[2021-06-06].[http://jcc.sdein.gov.cn/hjzl/202103/t20210309\\_3545746.html](http://jcc.sdein.gov.cn/hjzl/202103/t20210309_3545746.html).
- [14] 杜培培,吴晓青,都晓岩,等.莱州湾海域空间开发利用现状评价[J].*海洋通报*,2017,36(1):19-26.
- [15] 国家海洋局生态环境保护司.海水质量状况评价技术规程(试行)[EB/OL].(2015-10)[2021-06-06].<http://f.mnr.gov.cn/201806/P020180628470906231876.pdf>.
- [16] GB3097-1997,海水水质标准[S].
- [17] 侯英民.山东海情[M].北京:海洋出版社,2010:117-118.
- [18] 刘义豪,杨秀兰,靳洋,等.莱州湾海域营养盐现状及年际变化规律[J].*渔业科学进展*,2011,32(4):1-5.
- [19] 赵玉庭,刘霞,李佳蕙,等.2013年莱州湾海域营养盐的平面分布及季节变化规律[J].*海洋环境科学*,2016,35(1):95-99.
- [20] 宋洪军,张朝晖,刘萍,等.莱州湾海洋浮游和底栖生物多样性分析[J].*海洋环境科学*,2015,34(6):844-851.
- [21] 朱玉玲.基于深度学习分类方法的山东省外来入侵物种互花米草遥感监测与分析[D].青岛:自然资源部第一海洋研究所,2020.
- [22] 万修全,吴德星,鲍献文,等.2000年夏季莱州湾主要观测要素的分布特征[J].*中国海洋大学学报:自然科学版*,2004,34(1):7-12.
- [23] 孙丕喜,王波,张朝晖,等.莱州湾海水中营养盐分布与富营养化的关系[J].*海洋科学进展*,2006,24(3):329-335.
- [24] 祝雅轩,裴绍峰,张海波,等.莱州湾营养盐和富营养化特征与研究进展[J].*海洋地质前沿*,2019,35(4):1-9.
- [25] 徐艳东,魏潇,李佳蕙,等.2013年春季莱州湾海水环境要素特征和富营养化评估[J].*中国环境监测*,2016,32(6):63-69.
- [26] 孟伟,于涛,郑丙辉,等.黄河流域氮磷营养盐动态特征及主要影响因素[J].*环境科学学报*,2007,27(12):2046-2051.
- [27] 陈敏,康萍萍,李永平.海水养殖氮磷污染负荷对莱州湾东岸水质的影响[J].*水电能源科学*,2017,35(2):58-60.
- [28] GB3838-2002,地表水环境质量标准[S].
- [29] 张燕伟,冯依蕾,冯存岸,等.莱州湾潮流场拉格朗日拟序结构研究[J].*水动力学研究与进展(A辑)*,2021,36(1):95-101.
- [30] 山东省人民政府办公厅.山东省人民政府办公厅关于印发2021年全省湾长制工作要点和3个省级海湾污染整治指导意见的通知[EB/OL].(2021-05-29)[2021-06-06].[http://www.shandong.gov.cn/art/2021/6/2/art\\_107851\\_112599.html](http://www.shandong.gov.cn/art/2021/6/2/art_107851_112599.html).

(上接第831页)