

黄海大海洋生态系区域监测体系建设的对策建议

王孝程^{1,2}, 贾川^{1,3}, 张怡¹, 靳青青¹, 王紫竹¹, 刘永健¹, 王燕¹,
邵魁双¹, 王守强⁴, 关春江¹, 郭皓¹

(1.国家海洋环境监测中心 大连 116023;

2.自然资源部海洋灾害预报技术重点实验室 北京 100081;

3.北海道大学 札幌 0418611; 4.自然资源部第一海洋研究所 青岛 266061)

摘要:为促进黄海生态环境保护和生态灾害治理工作,文章基于历史资料的收集和整理,分析黄海大海洋生态系的生态环境背景及其存在的问题,并提出区域监测体系建设的对策建议。研究结果表明:黄海大海洋生态系的气候变化和营养盐变化是浮游生物群落的重要影响因素,赤潮、绿潮和水母暴发是黄海大海洋生态系的主要生态灾害;应通过加强各种形式的监测和合作,不断构建黄海大海洋生态系区域监测体系。

关键词:黄海大海洋生态系;气候变化;营养盐;海洋生态灾害;海洋监测

中图分类号:P722.5;P71;P76

文献标志码:A

文章编号:1005-9857(2022)02-0088-07

Suggestions for the Construction of the Regional Monitoring System of the Yellow Sea Large Marine Ecosystem

WANG Xiaocheng^{1,2}, JIA Chuan^{1,3}, ZHANG Yi¹, JIN Qingqing¹, WANG Zizhu¹, LIU Yongjian¹,
WANG Yan¹, SHAO Kuishuang¹, WANG Shouqiang⁴, GUAN Chunjiang¹, GUO Hao¹

(1.National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian 116023, China;

2.Key Laboratory of Marine Hazards Forecasting, MNR, Beijing 100081, China;

3.Hokkaido University, Sapporo 0418611, Japan;

4.First Institute of Oceanography, MNR, Qingdao 266061, China)

Abstract: In order to promote the ecological environment protection and ecological disaster control of Yellow Sea, this paper analyzed the background of ecological environment and problems, and put forward suggestions for the construction of regional monitoring system based on the collection of historical data. The results showed that climate change and nutrient changes were the important factors affecting plankton community. The red tide, green tide and jellyfish bloom were the main ecological disasters of the Yellow Sea Large Marine Ecosystem (YSLME). The re-

收稿日期:2021-04-29;修订日期:2022-01-30

基金项目:联合国开发计划署/全球环境机构(UNDP/GEF)减轻黄海大海洋生态系统环境压力项目二期项目;国家自然科学基金项目(42106155);国家海洋环境监测中心博士科研启动经费项目;辽宁省博士科研启动基金计划项目(2020-BS-290);自然资源部海洋灾害预报技术重点实验室开放基金项目(LOMF1805)。

作者简介:王孝程,高级工程师,博士,研究方向为海洋生态学

gional monitoring system of the YSLME should be established by strengthening various forms of monitoring and cooperation continuously.

Keywords: Yellow Sea Large Marine Ecosystem, Climate change, Nutrient, Marine ecological disaster, Marine monitoring

0 引言

在习近平生态文明思想的指引下,我国不断加强海洋生态环境保护的重视程度,海洋生态文明建设取得显著成效,海洋生态环境质量得到明显改善。黄海大海洋生态系是连接中国大陆与朝鲜半岛的重要海域,保护好黄海生态环境对于构建海洋命运共同体意义重大。开展区域监测体系建设有利于更好地评估区域生态环境状况和摸清区域生态环境底数,可为共同开展黄海大海洋生态系的生态环境保护工作提供基础资料、研究指导和管理建议。

为保护黄海生态环境,合理和可持续地管理和开发利用黄海大海洋生态系,以生态系统调查为基础,2004年联合国开发计划署和全球环境基金携手中国和韩国正式启动“减轻黄海大海洋生态系环境压力”项目(YSLME项目)。一期项目完成跨界诊断分析,通过“2010—2020战略行动计划”,并于2011年完成。二期项目于2014年2月获得全球环境基金首席执行官的批准,并于同年7月获得中国政府、联合国开发计划署和联合国项目事务厅的批准,旨在支持“2010—2020战略行动计划”的实施;二期项目于2017年7月开始,并于2020年12月完成。YSLME项目促进黄海大海洋生态系的区域对话以及科学领域的交流和实践,激发对区域监测技术和方法的研究活力。在YSLME项目的大背景下,中韩双方的海洋科学研究人员对黄海海域的生物多样性、渔业、生态系统和环境污染等方面进行实地考察和研究,收集种类繁多的大量黄海生态环境综合数据,为黄海生态环境保护工作提供重要的基础资料。

本研究通过历史资料的收集和整理,总结黄海大海洋生态系气候变化和营养盐变化对浮游生物群落的影响,梳理赤潮、绿潮和水母暴发等海洋生态灾害的基本情况,并提出黄海大海洋生态系区域监测体系建设的对策建议。

1 黄海大海洋生态系的生态环境背景

根据黄海大海洋生态系的项目定义,黄海是半封闭的水体,西接蓬莱以南的中国大陆,东临朝鲜半岛和济州岛。

1.1 气候变化对浮游生物群落的影响

1.1.1 黄海海水温度的长期变化

近年来黄海海水水柱温度、表面温度和底层温度均呈上升趋势,年均变化量为 $0.038^{\circ}\text{C}\sim 0.094^{\circ}\text{C}$,升温较为显著(图1)^[1]。

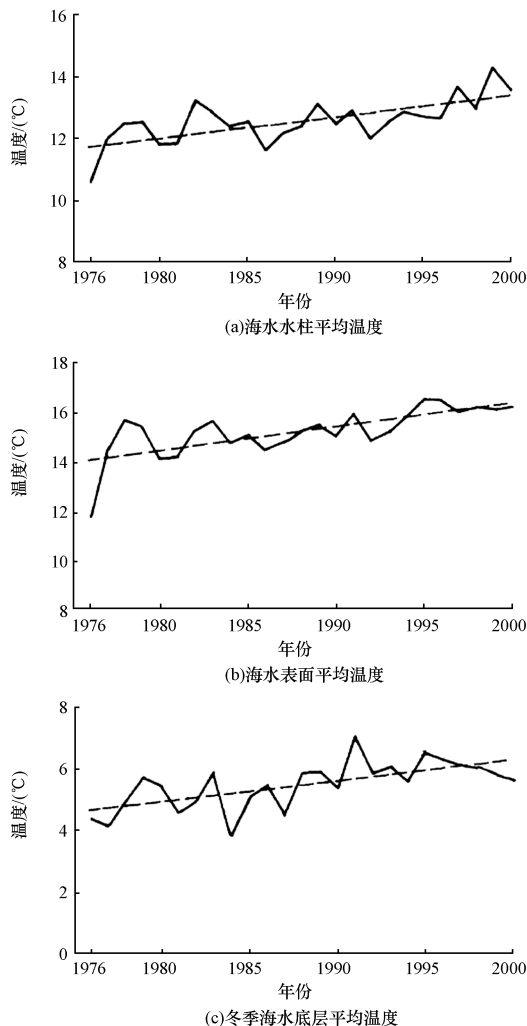


图1 1976—2000年黄海海水温度的变化趋势
(36°N 标准断面,实线表示温度,虚线表示其线性回归)

此外,1976—2000 年黄海海水温度的上升趋势与近年来我国北方气候的变暖趋势以及邻近海域(如渤海和东海)海表温度的上升趋势相一致^[1]。

黄海冷水团是存在于黄海中央水槽的独特水文现象,对于研究黄海的气候变化至关重要^[2]。全球海表温度资料数据库记录的黄海冷水团海域(124°E、36.0°N)海表温度的变化范围比韩国海洋资料中心(KODC)数据库记录的(125°E、35.9°N)较小,前者相对后者在 8 月低约 1.5℃,在 2 月和 4 月则高约 1.5℃;而就长期变化趋势而言,上述 2 个数据库十分相似,并与国际综合海气数据集(ICOADS)相似^[2]。

现有可利用的黄海冷水团海域浮游生物丰度和分布的资料较少,长时间序列的缺失导致目前无法定量评估气候变化与浮游生物群落之间的关系。而影响黄海冷水团海域浮游生物群落的因素很多,包括十分复杂的物理-化学-生物过程的相互作用。从海洋食物链的营养关系来看,浮游植物主要受光照度、温度、营养盐浓度和高营养级牧食者的影响,而浮游动物主要受浮游植物以及游泳生物上、下行控制作用的影响。

结合历史数据和黄海大海洋生态系一期项目成果,本研究分析黄海浮游生物群落特征^[3]。

1.1.2 对浮游植物的影响

1983—2008 年南黄海表层叶绿素 a(Chl-a)平均浓度为 0.11~1.62 mg/m³,其中 1996—1998 年低于 1983—1986 年,2007 年后呈升高趋势并在 2006—2007 年达到峰值(四季平均值均高于 1.00 mg/m³)。在过去的 50 年中,黄海浮游植物(网采样品)的细胞丰度波动较大,跨越至少 4 个数量级,2006 年夏季记录的最高丰度为 6.34 × 10⁸ cells/m³,而 2005 年 5 月记录的最低丰度仅为 2.59 × 10⁴ cells/m³,从整体来看无明显规律性变化趋势。尽管实验室研究发现温度对硅藻细胞的大小和生长速率有显著影响^[4],但尚无现场观测资料支持浮游植物生物量与温度之间具有明显关系^[5]。在自然海洋环境中,温度和营养盐浓度具有很强的共相关性^[6],温度的作用更多的是改变营养盐的可利用性而不是直接影响浮游植物的生长。

针对黄海浮游植物季节性水华的最新研究结果表明,温度变化与浮游植物藻华发生之间存在一定的关系。季节性的升温 and 降温不仅影响浮游植物的生理过程,而且通过改变水体结构而影响藻华发生。海表水体的快速升温不仅提前南黄海春季藻华发生的时间,而且增强南黄海春季藻华发生的强度,而海表水体的快速降温可能是造成部分海域秋季藻华发生强度减弱的原因之一。海表水体的快速升温导致海水上混合层变浅,能够促进表层浮游植物的快速生长,而缓慢升温对春季藻华的影响是消极的。对于不同的季节性藻华,上行效应具有显著的空间差异性。例如:在未来的气候变化背景下,黄海季节性升温(降温)的速率可能显著加快,可能导致黄海中部海域春季藻华发生更早,并进一步削弱秋季藻华发生的强度,同时可能增强近岸海域冬季藻华发生的强度。此外,在夏季藻华主导的海域,季节性升温(降温)速率变化可能不如河流径流变化的影响更重要^[7]。

1.1.3 对浮游动物的影响

2006—2018 年黄海春季和夏季浮游动物生物量高于秋季和冬季^[8-9],这与 1958—1959 年、2000—2001 年和 2017—2018 年的记录结果一致。从长期变化来看,近年来黄海浮游动物生物量呈增长趋势。此外,胶质浮游动物对浮游动物生物量的贡献远大于非胶质浮游动物,这与近年来水母频发的现象一致。

北黄海冷水团海域的中华哲水蚤丰度呈现显著的年际变化特征,其中 2011—2014 年显著高于 1959 年和 1982 年,2011—2014 年的平均丰度是 1959 年的 5.5 倍;2006—2007 年也大大高于 1959 年和 1982 年,2006—2007 年的平均丰度是 1959 年的 5.7 倍。同时,北黄海的中华哲水蚤丰度高于南黄海和东海北部海域,表明中华哲水蚤在不同海域对气候变化的响应特征不同^[10]。

1.2 营养盐变化对浮游生物群落的影响

营养盐的浓度和组成是影响浮游植物生长和群落结构的重要因素。近年来,人类活动显著影响近岸海域的营养盐结构,是导致氮磷硅比例失衡、富营养化现象严重、赤潮和绿潮等生态灾害频发以

及生态结构显著改变的重要原因。

20世纪90年代至2017年,南黄海表层和底层溶解无机氮浓度呈先升高(20世纪90年代至21世纪00年代)后降低的变化特征,其中2006—2007年达最高值。20世纪90年代至21世纪10年代的磷酸盐浓度整体相近。硅酸盐浓度波动较大,其中20世纪50—90年代的表层硅酸盐浓度降低近50%,近年来基本保持不变;与表层硅酸盐相比,底层硅酸盐浓度表现为先降低后升高的变化特征,2017年显著高于20世纪90年代至21世纪00年代,并呈逐渐回升趋势^[11]。20世纪90年代至2017年,南黄海表层和底层氮磷比整体呈升高趋势,最高值分别出现在21世纪00年代、2017年以及20世纪90年代至2017年;硅氮比也呈先降低后升高的变化趋势^[11]。

根据连云港海州湾赤潮监控区的监测数据统计结果,浮游植物群落变化与营养盐的氮磷比和硅氮比密切相关。2014年5—10月,丹东东港海域硅氮比的月平均值分别为0.54、0.75、0.83、0.41、1.31和1.11,浮游植物生长受到硅限制和磷限制,导致硅藻类植物数量减少,而甲藻类植物数量爆发性增长。连云港海州湾海域的氮磷比严重失衡,硅氮比普遍小于1,浮游植物生长普遍且长期受到硅限制和磷限制,导致甲藻类植物的出现频率显著增加。

目前对营养盐限制因子的大量研究结果表明,改变海洋的营养盐结构可影响浮游植物群落结构^[12-15]。其中,溶解无机氮与磷的比值升高会引起初级生产力降低,更加适合硅藻类植物成为优势种;而当磷限制转向硅限制时,优势种由硅藻类植物演替为甲藻类植物。较高浓度的氮盐有利于甲藻类植物生长,而硅酸盐有利于硅藻类植物生长^[16-19]。

2 黄海大海洋生态系的生态环境问题

2.1 有害藻华暴发

有害藻华是国际公认的,指代有害藻类爆发性增殖(不论其浓度如何),因其对公众健康、水产养殖、水体环境和娱乐活动造成负面影响而被视为有害藻华。黄海发生的有害藻华主要包括微型藻类(主要指赤潮)和大型藻类(主要指绿潮)2个大类。

根据《中国海洋生态环境状况公报》,黄海赤潮的发生次数不断增加,赤潮在许多海域已属常见现象(图2)。

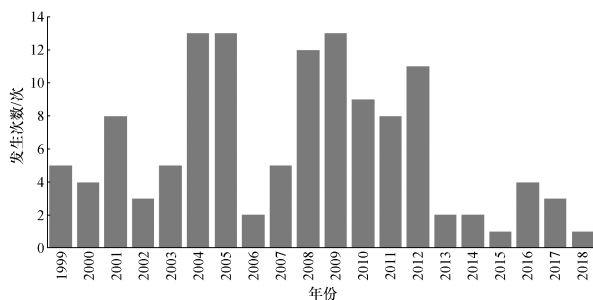


图2 1999—2018年黄海赤潮的发生次数

由图2可以看出,1999—2018年黄海赤潮的发生次数在1~13次的区间内剧烈波动,年均发生次数为6次。其中,1999—2003年年均为5次,2004—2012年年均为10次,2013—2018年年均为2次。2013—2018年黄海赤潮的发生次数明显减少,与2004—2012年和1999—2003年相比分别减少80%和60%。在所有赤潮事件中,有56%的甲藻赤潮、27%的硅藻赤潮、12%的针胞藻赤潮和4%的原生动物赤潮,而仅有1%的金藻赤潮。

绿潮的出现始于20世纪60年代末期,最初在欧洲出现,随后在美洲、大洋洲和亚洲的一些经济发达地区出现。我国绿潮出现于20世纪末期,由于规模较小并未引起注意,直到2008年大型浒苔绿潮大规模暴发,当年青岛政府清理浒苔超过100万t,公众才意识到绿潮的威力和危害。此后连年暴发由浒苔形成的大规模绿潮,且分布面积和覆盖面积呈波动性变化。近年来绿潮的种类和数量呈增长趋势,如大连星海湾的马泽藻和马尾藻绿潮以及烟台的孔石莼绿潮,2015年后漂浮浒苔种群甚至出现在丹东的大鹿岛地区。

2.2 水母暴发

近年来,由于全球气候变化、人类开发利用海洋强度加大和渔业资源捕捞过度等因素,近岸海域生态系统发生巨大变化,水母暴发现象越来越频繁,威胁沿海地区用水安全、滨海浴场安全和渔业捕捞,已成为继赤潮和绿潮等全球生态灾害之后的新型海洋生态灾害,我国北方海域水母灾害的发生

频率显著高于南方海域^[20]。自 20 世纪 90 年代中后期起,黄海连年发生大型水母暴发现象,沙海蜇和海月水母是暴发的主要物种,使海洋生态环境严重恶化^[21]。青岛、烟台和威海等海域经常发生海月水母暴发事件,2009 年 7 月大量海月水母涌入青岛发电厂海水泵房取水口,严重堵塞海水循环泵的过滤网,工作人员在 3 d 中清理水母约 10 t^[22]。2011 年 7 月下旬胶州湾出现大量成体沙海蜇和白色霞水母^[23],2013 年 7—9 月黄海中部海域出现沙海蜇暴发现象^[24]。

3 黄海大海洋生态系区域监测体系建设的对策建议

近年来,在气候变化和人类活动的共同影响下,黄海大海洋生态系正面临前所未有的压力。黄海大海洋生态系作为连接中国大陆与朝鲜半岛的重要海域,涉及中国、韩国和朝鲜 3 个国家。因此,通过加强国际合作,以共同开展科学研究为基础,逐步构建区域监测体系,进一步解决生态环境问题,对于保护黄海生态环境和践行海洋命运共同体理念具有重要意义。基于此,建议以跟踪监测气候变化和营养盐变化对浮游生物群落的影响以及解决赤潮、绿潮和水母暴发等主要生态环境问题为抓手,逐步构建黄海大海洋生态系区域监测体系,进一步加强交流合作,推动黄海大海洋生态系的可持续发展。

3.1 区域监测体系的构建

历史资料的积累对构建区域监测体系十分重要,黄海大海洋生态系区域监测体系的构建应充分参考历史资料以及保持监测的连续性,在不断完善常规监测体系的同时加强应急监测,深入开展海洋生态灾害针对性监测,逐步拓展多方法相结合的试验性监测。

3.1.1 持续开展气候变化和营养盐变化对浮游生物群落影响的跟踪监测和评估

气候变化和营养盐变化是浮游生物群落的主要影响因素,掌握其长期变化的规律和趋势是阐明浮游生物群落变化特征的基础。建议结合《“十四五”海洋生态环境质量监测网络布设方案》的监测站位,同步开展气候变化和营养盐变化对浮

游生物群落影响的年际连续性监测。同时,在现有监测站位的基础上,在黄海适当增加监测点位,以保证对黄海大海洋生态系的全覆盖。

3.1.2 加强应急监测,深入开展海洋生态灾害针对性监测

海洋生态灾害发生的海域通常具有明显的差异性和特异性。例如:目前黄海报道的赤潮多发生在连云港海州湾和丹东东港海域,绿潮多发生在青岛近岸海域,而水母灾害主要发生在青岛、烟台和威海等海域。建议以海洋生态灾害发生频率较高的局部海域为核心区,呈放射性布设监测点位并延伸至潜在源头海域,于每年 5—10 月开展海洋生态灾害发生全过程的跟踪监测,加强对灾害发生机理的认知。同时,针对可能出现的突发生态环境事件制定应急方案,结合跟踪监测结果提前采取相应措施。

3.1.3 逐步拓展多方法相结合的试验性监测

在已有传统监测方法的基础上,探索开展新技术方法的试验性监测。例如:传统监测方法依赖细胞形状、细胞大小和叶绿体排列方式等显微的形态学特征来区分赤潮藻类,但形态学鉴定技术存在一定的局限性;近年来基于核酸的分子技术已被广泛应用于对有害藻类的检测,使较低浓度细胞的检测成为现实。

绿潮的大规模发生具有复杂性和短暂性,对绿潮的监测和预测须在海上进行快速、密集、广泛和持续的观测,仅依靠船只取样和实验室化学或生物分析的传统手段无法满足监测要求。可结合卫星遥感监测技术大面积监测海洋生态灾害发生情况,受云层影响时可结合无人机技术,实现全时段的实时监测。同时,开展潮间带和养殖浮筏等监测,实现对绿潮藻类的溯源。近岸海域水母监测可采用浮游生物网和锚流网相结合的方式,对于大范围的大型水母监测,在传统网具监测的基础上应同步开展走航监测。

3.2 合作构建区域监测体系

尽管 YSLME 项目的一期和二期项目已经取得良好效果,黄海大海洋生态系已得到一定程度的有效保护,但生态环境问题突出和治理机制不够畅通

等问题仍然存在。基于此,建议探索建立联合协调机制,不断完善监测体系;同时,充分利用现有合作机制,不断拓展合作空间。

3.2.1 探索建立联合协调机制,不断完善监测体系

统一的监测方法和标准以及有效的信息共享是顺利开展区域监测的基础。建议成立联合科学工作组和专家组,定期组织科学技术层面的交流研讨,加强信息共享,分享本国海洋生态环境监测和海洋生态灾害治理的最佳实践,并积极跟踪各领域的研究动态。定期开展监测技术方法交流和培训,加快制定并由工作组和专家组联合确定统一监测方法和标准,开展试验性监测并组织制定区域监测技术指南。以水母灾害监测为试点,结合韩国已建立的较成熟的水母监测网络,开展联合航次调查,联合开展连云港—仁川、青岛—仁川、大连—福冈和仁川—烟台—大连—仁川等航线的走航监测。

3.2.2 充分利用现有合作机制,不断拓展合作空间

在区域层面的中日韩环境部长会议、西北太平洋行动计划和北太平洋海洋科学组织等机制下,积极推动开展海洋领域应对气候变化、海洋生物多样性保护政策和社区实践以及海洋生态灾害监测预警和评估的案例收集和研究,充分探讨各国在海洋生态环境保护 and 海洋生态灾害治理等领域取得的进展和成绩,促进监测技术方法交流。充分依托现有“中韩黄海环境联合调查研究”等项目,推动开展气候变化和营养盐变化对浮游生物群落的影响以及赤潮、绿潮和水母暴发等生态灾害的跟踪监测。

参考文献

- [1] LIN C L, NING X R, SU J L, et al. Environmental changes and responses of ecosystem of the Yellow Sea during 1976—2000 [J]. Journal of Marine Systems, 2005, 55(3/4): 223—234.
- [2] PARK S, CHU P C, LEE J, et al. Interannual-to-interdecadal variability of the Yellow Sea Cold Water Mass in 1967—2008: characteristics and seasonal forcings [J]. Journal of Marine Systems, 2011, 87(3/4): 177—193.
- [3] FU M Z, WANG Z L, PU X M et al. Changes of nutrient concentrations and N:P:Si ratios and their possible impacts on the Huanghai Sea ecosystem [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2012, 31(4): 101—112.
- [4] MONTAGNES D J, FRANKLIN D J. Effect of temperature on diatom volume, growth rate, and carbon and nitrogen content: reconsidering some paradigms [J]. Limnology and Oceanography, 2001, 46: 2008—2018.
- [5] FU M, WANG Z, LI Y, et al. Phytoplankton biomass size structure and its regulation in the Southern Yellow Sea (China): seasonal variability [J]. Continental Shelf Research, 2009, 29: 2178—2194.
- [6] AGAWIN N R S, DUARTE C M, AGUST S, et al. Nutrient and temperature control of the contribution of picoplankton to phytoplankton biomass and production [J]. Limnology and Oceanography, 2000, 45: 591—600.
- [7] SONG H, JI R, XIN M, et al. Spatial heterogeneity of seasonal phytoplankton blooms in a marginal sea: physical drivers and biological responses [J]. ICES Journal of Marine Science, 2020, doi:10.1093/icesjms/fsz176.
- [8] LIU P, SONG H, WANG X, et al. Seasonal variability of the zooplankton community in the southwest of Huanghai Sea (Yellow Sea) Cold Water Mass [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2012, 31(4): 127—139.
- [9] SHI Y Q, NIU M X, ZUO T, et al. Inter-annual and seasonal variations in zooplankton community structure in the Yellow Sea with possible influence of climatic variability [J]. Progress in Oceanography, 2020, 185: 102349.
- [10] YANG Q, LIU H, LIU G, et al. Spatio-temporal distribution pattern of *Calanus sinicus* and its relationship with climate variability in the northern Yellow Sea [J]. ICES Journal of Marine Science, 2018, 75(2): 764—772.
- [11] WEI Q, YAO Q, WANG B, et al. Long-term variation of nutrients in the southern Yellow Sea [J]. Continental Shelf Research, 2015, 111: 184—196.
- [12] REDFIELD C. On the proportions of organic derivations in sea water and their relation to the composition of plankton [A]. JOHNSTONE J. Memorial volume [M]. 1934: 177—192.
- [13] FISHER T R, GUSTAFSON A B, SELLNER K, et al. Spatial and temporal variation of resource limitation in Chesapeake Bay [J]. Marine Biology, 1999, 133(4): 763—778.
- [14] NELSON D M, TREGUER P, BRZEZINSKI M A, et al. Production and dissolution of biogenic silica in the ocean: revised global estimates, comparison with regional data and relationship to biogenic sedimentation [J]. Global Biogeochemistry Cycle, 1995, 9: 359—372.
- [15] JUSTIC D, RABALAIS N N, TURNER R E, et al. Changes in nutrient structure of river-dominated coastal waters: stoichiometric nutrient balance and its consequences [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1995, 40: 339—356.
- [16] ESCARAVAGE V, PRINS T C, SMAAL A C, et al. The re-

- sponse of phytoplankton communities to phosphorus input reduction in mesocosm experiments[J]. *Journal of Experimental Marine Biology & Ecology*, 1996, 198(1): 55–79.
- [17] BILLEN G, SOMVILLE M, BECKER E D, et al. A nitrogen budget of the Scheldt hydrographical basin[J]. *Netherlands Journal of Sea Research*, 1985, 19(3/4): 223–230.
- [18] JACOBSEN A, EGGE J K, HEIMDAL B R. Effects of increased concentration of nitrate and phosphate during a springbloom experiment in mesocosm[J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 1995, 187(2): 239–251.
- [19] 李京. 东海赤潮高发区营养盐结构及对浮游植物优势种演替的作用研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2008.
- [20] DONG Z, LIU D, KEESING J K, et al. Jellyfish blooms in China: dominant species, causes and consequences[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2010, 60(7): 954–963.
- [21] 吴颖, 李惠玉, 李圣法, 等. 大型水母的研究现状及展望[J]. *海洋渔业*, 2008(1): 82–89.
- [22] 黄旭光, 曾阳, 黄邦钦. 水母暴发与浮游生物群落[J]. *大自然*, 2017(1): 10–11.
- [23] 孙松, 于志刚, 李超伦, 等. 黄、东海水母暴发机理及其生态环境效应研究进展[J]. *海洋与湖沼*, 2012, 43(3): 401–405.
- [24] 曾阳, 黄旭光, 黄邦钦, 等. 大型水母沙海蜇暴发的温带贫营养海洋生态系统中细菌和浮游植物的关系[J]. *海洋学报(中文版)*, 2015, 35(10): 107–113.