

段云莹, 裴绍峰, 廖名稳, 等. 辽河三角洲滨海湿地水域初级生产力研究进展[J]. 海洋地质前沿, 2022, 38(6): 16-24.

DUAN Yunying, PEI Shaofeng, LIAO Mingwen, et al. Research progress on primary productivity of coastal wetland waters in Liao River Delta[J]. Marine Geology Frontiers, 2022, 38(6): 16-24.

辽河三角洲滨海湿地水域初级生产力研究进展

段云莹^{1,3,4}, 裴绍峰^{1,2,3*}, 廖名稳^{1,3}, 翟世奎⁴, 杨士雄^{1,2,3}, 叶思源^{1,2,3},
赵俐红⁵, 王锦^{1,3}, 袁红明^{1,2,3}, 周攀^{1,3}, 江星浩^{1,3}

(1 青岛海洋地质研究所生态地质与气候变化实验室, 青岛 266237; 2 青岛海洋科学与技术试点国家实验室海洋地质过程与环境功能实验室, 青岛 266061; 3 中国地质调查局滨海湿地生物地质重点实验室, 青岛 266237; 4 中国海洋大学海洋地球科学学院, 青岛 266100; 5 山东科技大学地球科学与工程学院, 青岛 266590)

摘要:滨海湿地位于海洋与陆地生态系统的交错过渡带, 具有极高的生产力和光合固碳效率, 是海岸带蓝色碳汇的重要组成部分。滨海湿地生产力不仅由芦苇、翅碱蓬、红树林等陆上植被提供, 水体中浮游植物的光合固碳也是提供初级生产力的重要途径。以往较多的调查和研究集中在陆上植被, 而对于滨海湿地水域浮游植物和底栖微藻的报道较少。近年来随着各国政府和学者对二氧化碳排放和气候变化的关注, 滨海湿地多圈层生态系统的碳循环和碳汇过程成为研究热点, 而湿地水域生产力和光合固碳过程作为多圈层碳循环中重要的一个环节亦应受到足够的重视。以中国北方典型的盐沼湿地区域——辽河三角洲滨海湿地为案例, 对湿地水域生产力研究进展进行综述, 并对其影响因素进行讨论, 以期为国家碳循环与碳中和目标调查提供参考资料。

关键词:滨海湿地; 水域初级生产力; 辽河三角洲; 光照; 温度; 营养盐

中图分类号: P736; Q178

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2021.133

0 引言

湿地与森林、海洋并称为地球三大生态系统。滨海湿地处于海洋生态系统和陆地生态系统的交错过渡地带, 是湿地类型中重要的一种。国内外学者对滨海湿地尚未有统一的定义, 陆健健^[1]参照国际湿地保护公约及其他国家对湿地的定义提出: 滨

海湿地包括陆缘和水缘两部分, 陆缘是指含 60% 以上湿生植物的植被区, 水缘为海平面以下 6 m 的近海区域^[2], 包括内陆与外流江间流域中自然的或人工的、咸水的或淡水的所有流动或静止的、间歇或永久的富水区域(枯水期水深 2 m 以上的水域除外)。可见, 水体对于滨海湿地如同血液, 在其内部和边缘广泛存在, 且贯通了陆地植被、土壤微生物与水体浮游植物等复杂交错的生态体系, 对湿地的生态系统稳定和持续发展起到了至关重要的作用。

作为高生产力生态系统之一, 滨海湿地的生产力和光合固碳能力甚至超过集约的农业系统^[3], 主要表现在陆上生态系统植被初级生产力和水域生态系统初级生产力两个方面。前者是指绿色植物在单位时间、单位面积上由光合作用所产生有机质的能力^[4]; 后者是指水体中初级生产者(自养生物)通过光合作用或化学合成在单位时间、单位空间内合成有机物质的量^[5]。水域初级生产力是水体食物链的基础环节, 也是反映生态系统生产潜力的基本参数。对于水域生态系统而言, 初级生产力不仅决

收稿日期: 2021-04-30

资助项目: 国家自然科学基金“C-14 示踪技术测定海洋初级生产力的相关问题研究”(41306175); 人力资源和社会保障部留学人员科技活动项目择优重点项目“同位素示踪技术在精确测定湿地水域固碳能力中的应用”(2013-14-007-JY); 政府间国际科技创新合作重点专项(2016YFE0109600); 中国地质调查局项目“江苏滨海湿地多圈层交互带综合地质调查”(DD20189503)与“黄渤海海岸带重点生态保护修复区综合地质调查”(20201100000200502)

作者简介: 段云莹(1996—), 女, 在读硕士, 主要从事海洋地球化学方面的研究工作。E-mail: 3116796294@qq.com

* 通讯作者: 裴绍峰(1981—), 男, 博士, 研究员, 主要从事海洋生态学方面的研究工作。E-mail: peishaofeng@gmail.com

定该系统的溶氧状况, 还直接或间接地影响其他生物和化学过程^[6]。在中国, 初级生产力的研究在最近几十年有了较快发展^[7]。

无论是在水域面积相对较小的内陆湿地生态系统中, 还是在面积较大的三角洲湿地或滨海湿地中, 水体中藻类的生产力都是不可忽视的一部分^[8]。然而, 无论国内还是国际上, 目前针对滨海湿地水域浮游植物以及底栖微藻所支撑的水体初级生产力的研究远远少于针对陆上植被初级生产力的研究^[9]。由于浮游植物和底栖微藻的生产力不易现场精确测定, 对于滨海湿地水域初级生产力的研究多采用叶绿素含量结合遥感调查的方法。在中国主要的滨海湿地地区, 如辽河三角洲、黄河三角洲、长江三角洲、珠江三角洲和江苏沿海滩涂等, 初级生产力的调查和研究多以天然湿地植被(盐生、湿生和水生)和人工水稻为研究对象, 主要通过收割、烘干称重等方法获取植物的生物量, 进而估算净初级生产力。比如, 辽河三角洲多关注芦苇、翅碱蓬等沼泽植被^[10-12], 江苏滨海湿地研究芦苇和互花米草居多^[13-15], 黄河三角洲关注测定芦苇、碱蓬和稻田等的初级生产力^[16-18]。灌木、小乔木尤其是水生浮游和底栖植物的样品获取和生产力精确测定较为困难, 目前取样方法易对灌木、小乔木造成破坏, 因此, 多引用国际上已有的调查结果进行评估或基于遥感方法进行精度有限的调查。此外, 在珠江口多研究浮游植物的初级生产力^[19-21], 而在湛江口、北部湾等潮滩湿地则多以红树林为研究对象^[22]。

近年来, 随着各国政府和学者对二氧化碳排放和气候变化的关注, 滨海湿地多圈层生态系统的碳循环和碳汇过程成为研究热点, 特别是高精度测量技术的发展也极大地促进了对滨海湿地水域浮游植物和底栖微藻初级生产力的探索^[23]。本文以辽河三角洲滨海湿地为例, 主要探讨和概述该滨海湿地水域生态系统初级生产力的研究现状。

1 辽河三角洲滨海湿地水域生态系统概述

辽河三角洲(121°25′–123°55′E, 40°40′–41°25′N)是中国四大河口三角洲之一, 位于辽河平原南部、渤海辽东湾顶部, 是由辽河、双台子河、大凌河、小凌河等一系列河流和海浪作用形成的冲海积平原^[24], 湿地、潮沟遍布, 属于中国北方滨海湿地和滩涂分布最为集中的区域^[24-25](图 1)。卫星遥感监测

表明, 辽河三角洲面积总计约 7 248 km²^[26], 湿地面积约为 3 148.6 km²^[27], 其中天然湿地和人工湿地分别占 50.8% 和 49.2%。



图 1 研究区位置分布图

Fig.1 Location of the study area

根据国际《国际湿地公约》(拉姆萨尔公约, The Ramsar Convention)的定义, 滨海湿地的下限为低潮时 6 m 水深以内的浅海水域^[28]。因此, 为方便研究和讨论, 我们把该区滨海湿地水域大体分解为两部分: 一部分为近海及海岸湿地水域(低潮时水深 6 m 以内的浅海域及其沿岸海水浸湿地带), 另一部分为滨海湿地中的河流、湖泊、水塘等水体。以往文献关于辽河三角洲滨海湿地总面积和其中水域面积的统计有一定的差异, 如张绪良等^[24]研究表明, 辽河三角洲滨海湿地总面积约 4 513 km², 其中低潮时水深 6 m 以内浅海水域约为 734.79 km², 河口区高低潮之间水域约占 341.12 km²。国家林业局调查规划院科技基金中的项目“辽河三角洲湿地资源及其生物多样性的遥感监测研究”通过遥感判读和 GIS 数据处理, 得到辽河三角洲各个湿地类型的面积, 指出辽河三角洲深度不超过 6 m 的浅海水域的面积为 1 075.92 km²^[26]。索安宁等^[12]通过解释 CBERS 卫星影像, 得出辽河三角洲盘锦地区湿地总面积为 3 868 km²。同样利用遥感技术, 刘秀云和满瀛^[28]指出辽东湾 5 m 等深线以内的浅海面积为 4 400 km²。而中国地质调查局滨海湿地生物地质重点实验室^[29]通过遥感调查发现, 2009 年低潮时不超过 6 m 的浅海水域的面积为 4 507.71 km², 可见两者的遥感调查数据较为接近。

关于滨海湿地陆上水域面积(非滨海部分)的统计也有很多报道, 目前多采用遥感调查, 不同年份的统计结果有所差别(表 1)。根据 1997 年 TM 影像数据资料^[26]将辽河三角洲湿地进行分级分类, 得出河流(含大部分河口区)和芦苇池塘面积分别为 1 240.09 和 45.74 km², 天然水域面积高达 1 285.83 km², 水库和养殖区面积为 168.14 km²。2000 年的

遥感调查结果^[28]指出辽东湾湿地中河流面积为127.0 km²,湖泊面积为27.5 km²,水库池塘和水产养殖区面积为3 714.0 km²;2005年滨海湿地天然水域面积为871.41 km²,水库坑塘和水产养殖区则占了201.10 km²,与2000年相比有大幅度降低^[30];2007年统计辽河三角洲盘锦地区滨海湿地河流面积为109.72 km²,河口水域约1 047 km²,养殖池塘和水库

面积为196.86 km²^[12],该值与2005年的统计结果十分接近。本文根据BRIX等^[29]对2003年和2009年卫星影像的解译和分类结果,计算了辽河三角洲陆上水域总面积,得出2009年辽河三角洲陆上水体总面积为926.65 km²,比2003年减少了55.87 km²,天然水域和水库坑塘面积分别下降7.68%和23.84%,而水产养殖区面积增加约18.36%。

表1 辽河三角洲滨海湿地陆上水域面积遥感统计

Table 1 Remote sensing statistics of land water area of coastal wetland in Liao River Delta

年份	天然水域(河流、湖泊等)	水库坑塘	水产养殖区	文献
1997	1 285.83	47.92	120.22	黄桂林等 ^[26]
2000	154.50	393.50	3 320.50	刘秀云等 ^[28]
2005	871.41	40.46	160.64	杨帆等 ^[30]
2007	1 156.73	45.86	151.00	索安宁等 ^[12]
2003	206.42	432.45	343.65	BRIX等 ^[29]
2009	190.56	329.36	406.73	

造成上述面积统计差异的原因可能是目前对于辽河三角洲滨海湿地的准确边界没有统一的说法,而且同样是用卫星遥感调查,由于湿地的分类标准、卫星影像、解译精度和解译人员等不同,也会导致统计结果存在较大差异;另一方面,滨海湿地近年来受到气候变化与人类干扰的双重威胁而一直处于退化中,湿地总面积呈明显降低趋势。据以往研究^[28],1986—2000年,辽河三角洲河流、湖泊和滩涂的面积分别减少了80.5、53.9和265.1 km²。其中,盘锦水域面积在1986—2004年以平均16.3 km²/a的速率急剧萎缩,至今65%的水体已经消失^[31]。近年来,尤其是2003—2009年,辽河三角洲河流、池塘、盐湖和水产养殖场的面积分别变化了-8%、-26%、-22%和18%^[29],可见天然水域正在逐步退化,而水产养殖场等人工水域明显增多。

此外,遥感资料的海潮潮位变化也会对其精度产生影响,使用不同时期的遥感资料对湿地进行监测,由于季节性水位变化,丰水季与枯水季的资料可能有较大差异^[32]。如黄桂林等^[32]对比1997年和1994年遥感资料发现前者的潮位较后者要高,这导致1997年遥感资料所反映的河口水域面积比1994年反而增大了。

2 辽河三角洲水域初级生产力研究近况

测定水域初级生产力的方法有多种,如黑白瓶

溶解氧法、叶绿素法、遥感法等,但这些方法的精度有限或需要结合其他方法才能准确评估生产力。1952年,E. STEEMANN NIELSEN^[33]首次提出使用放射性¹⁴C同位素示踪法来测定浮游植物光合作用,由于该方法具有精确度高、操作简单、耗时短且费用低的优点,在国际上迅速推广,也促进了初级生产力的研究的迅速发展^[34-35]。彭作圣^[36]最早于20世纪60年代开始对初级生产力的测定方法进行研究,然而直到80年代中国海洋初级生产力的测试和研究才迎来蓬勃发展^[35]。中国学者对近海、海湾、大洋乃至两极海域都陆续开展了多次调查和研究,获得了翔实的资料和丰富的成果;与此同时,中国¹⁴C同位素示踪技术和测试方法也逐渐成熟完善,并逐步与国际相关大科学计划接轨。

由于湿地中水域具有面积分散、难于统计、水况变化复杂、总体面积相对较小等特点,并未受到足够的重视,相关调查资料和数据相对有限。以辽河三角洲滨海湿地水域为例,目前大多可查到文献中的研究区域集中在属于湿地定义范围内的辽东湾北部近海水域,或其外延的渤海海域,且时间大多集中在20世纪80—90年代,相关历史数据在表2中进行了总结。尽管近海水域位置稍有偏差,但都位于北半球地质环境的渤海海域内,因此在数据相对缺乏的情况下,仍有一定的参考价值。比如,吕瑞华等^[37]对渤海水域初级生产力进行了研究,发现1982—1983年和1992—1993年渤海水域生产力

平均值由 $312 \text{ mgC}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 降至 $216 \text{ mgC}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 降幅约为 30%, 其中以辽东湾下降最多, 从 1982—1983 年的 $325 \text{ mgC}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 降低至 1992—1993 年的 $96 \text{ mgC}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 降幅高达 70%, 而造成渤海水域初级生产力降低的原因, 还有待进一步研究。马志强等^[38] 将辽东湾北部海区划分成东、西、中 3 部分, 并计算了 2002 年北部海区各分区的初级生产力, 结果表明北部海区东部海域的初级生产力整体最高, 而中部海区初级生产力显著低于东、西部海域, 区域差异明显。PEI 等^[39] 利用¹⁴C 示踪法针对辽东湾北部滨海湿地的近海和河口水域进行了较为精确的调查, 结果发现水域生产力受光照、温度和营养盐的影响较大, 透明度较好且温度、营养盐适宜的局部近海水域初级生产力在夏季可高达 $722 \text{ mgC}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 远远高于水体混浊的辽河口水域生产力(可低至 $26 \text{ mgC}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$)。可见, 水域初级生产力受环境条件的影响, 可能会出现较大的差异。

此外, 多次调查显示渤海初级生产力存在显著的季节变化, 如吕培顶等^[40] 测定了 1980—1981 年渤海水域初级生产力, 得出春季 > 秋季 > 夏季 > 冬季的季节分布特征; 马志强等^[38] 认为渤海辽东湾

北部海区初级生产力不仅存在区域差异, 季节差异也很明显, 近岸水域呈现夏季高于春季和秋季的特点, 其中 8 月初级生产力最高, 平均 $222.88 \text{ mgC}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 10 月最低, 平均为 $62.98 \text{ mgC}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 该研究结果与吕培顶等^[40] 正好相反。然而王俊和李洪志^[41] 也对渤海近岸水域初级生产力进行了计算, 得出的季节变化特征为夏季 > 春季 > 秋季, 辽东湾地区亦是如此, 该结果与马志强等^[38] 的研究基本一致, 但是有学者指出造成这种结果的原因可能与 1998 年厄尔尼诺现象有关^[42]。

对于辽河三角洲水域初级生产力的研究以近海海域为主, 针对三角洲内部水域的研究较少, 只有一些零星的研究数据。如索安宁等^[12] 利用植被生物量碳换算公式计算了 2008 年辽河三角洲盘锦地区芦苇湿地的固碳量, 高达 $11\,539.72 \text{ mgC}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 其次为稻田, 约为 $5\,591.78 \text{ mgC}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$; 而崔林林等^[43] 采用改进的 CASA 模型估算了 2011 年辽河三角洲盐沼湿地的植被初级生产力, 为 $86.74 \sim 6\,622.52 \text{ mgC}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 且初级生产力以核心区芦苇沼泽最高, 并向四周降低, 然而核心区最高值远低于 2008 年的平均值, 这主要与碳转换系数的选取有关。

表 2 辽河三角洲水域初级生产力历史数据对比

Table 2 Comparison of historical data of primary productivity in Liao River Delta

海区(调查年份)	叶绿素a含量/(mg/m^3)	初级生产力估算/[$\text{mgC}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$]	文献
渤海水域(1980—1981)	1.04(春)、0.69(夏)、 1.27(秋)、0.64(冬)	357(春)、171(夏)、 305(秋)、88(冬)	吕培顶等 ^[40]
渤海水域(1982—1983)	1.05	312	吕瑞华等 ^[37]
渤海水域(1992—1993)	0.61	216	吕瑞华等 ^[37]
辽东湾(1982—1983)		325	吕瑞华等 ^[37]
辽东湾(1992—1993)		96	吕瑞华等 ^[37]
渤海近岸水域(1998)	2.88	327	王俊和李洪志 ^[41]
辽东湾(1998)	3.99(5月)、3.69(8月)、0.93(10月)	464(5月)、487(8月)、87(10月)	王俊和李洪志 ^[41]
渤海中部及其邻近海域(1998秋)	1.892	163.6	孙军等 ^[44]
渤海中部及其邻近海域(1999春)	1.621	323.7	孙军等 ^[44]
辽东湾北部海区(2002)		141.10(4月)、95.69(5月)、139.99(6月)、 148.96(7月)、154.93(8月)、149.85(9月)、 60.24(10月)	马志强等 ^[38]
盘锦芦苇湿地(2008秋)		11 539.72	索安宁等 ^[12]
辽河三角洲盐沼湿地(2011秋)		86.74~6 622.52	崔林林等 ^[43]
辽东湾北部近海(2013夏)	6.35 ± 3.36	721.82 ± 626.74	Pei等 ^[39]
辽东湾北部河口(2013夏)	4.80 ± 3.56	26.01 ± 19.74	Pei等 ^[39]

辽河三角洲滨海湿地水域生态系统中不同的初级生产者对生产力的贡献是存在差异的, 主要的贡献者是浮游植物和底栖植物。研究表明, 辽东湾的浮游植物种类以硅藻为主, 占总量的 97% 以上^[38]。

在浅海水域区, 由于河流带来大量营养物质, 因此多生长淡水和咸水藻类; 而且离河口区越近, 淡水藻类越多^[24]。

2009 年双秀芝等对辽东湾近岸海域浮游植物

群落进行了调查分析,得出辽东湾近岸海区浮游植物主要由硅藻和甲藻组成,所占比例分别为71.08%和26.51%(春季)^[45],78.12%和18.75%(春季)^[46],84.15%和14.63%(夏季)^[47],83.33%和15.28%(冬季)^[47]。其中硅藻门主要以圆筛藻属、角毛藻属和菱形藻属为主;甲藻门以原多甲藻属或角藻属为主,不同季节优势种存在差异^[45-47]。底栖植物生活环境多样,附着于其他水生植物、石块、砂砾、泥炭等基质上,在辽河三角洲滨海滩涂上大面积分布,以硅藻为典型,包括针杆藻属、羽纹藻属和舟形藻属等^[48];河流和浅水湖泊中也有大量的底栖藻类,经查明^[49],大辽河及其主要支流中底栖藻类种类丰富,包含硅藻、绿藻、蓝藻、裸藻、金藻和黄藻等7个门,共208种,其中以硅藻门和绿藻门最多,分别占比64.90%和21.15%。

然而,对于辽河三角洲湿地水域初级生产力的研究多涉及对浮游植物生产力的探究,而针对底栖植物对初级生产力的贡献以及湖泊水域初级生产力的测定较少。底栖植物在潮间带、滨海水域、湖泊、池塘和河流等水域均有分布,以往研究^[50-55]表明,底栖藻类通常具有较高的初级生产力,在大多数河口、近岸浅水和湖泊生态系统,如黄河三角洲潮间带、长江口盐沼湿地、红海北部^[56]等,底栖藻类对总生物量和初级生产力的贡献等同于甚至远远高于上覆水体中的浮游植物,不仅给浮游动物和鱼类提供了丰富的食物来源,还能大量吸收微生物分解有机质产生的营养盐,缓解水域富营养化问题。因此,研究辽河三角洲湿地底栖植物的初级生产力对于了解其在生态系统中的作用和功能具有重要意义。

综上,以往研究区域和对象多集中在整个渤海水域,对辽河三角洲滨海湿地所包含的辽东湾北部水域初级生产力的研究相对较少,而针对陆上水体,如河流、湖泊、水塘等生产力的测试更是鲜有文献记载,并且涉及的初级生产者多为浮游植物,对于底栖植物的研究也十分缺乏。因此,此类调查和研究有待今后逐步加强。

3 影响水域初级生产力的主要环境因素

一般情况下,水域初级生产力受到光照强度、光照时间、营养盐含量、温度、动物的捕食、透明度、浊度(光限制)、水扰动、盐度、pH等环境因素的影响^[5,7,38,44]。实验表明,在温盐、pH等条件适宜的情况下,低光强时,藻类的光合作用速率与光照强度

成正比;随着光强增大,光合速率也加速,直至达到一定光强后,光合速率达到饱和而后产生光抑制^[57]。因此,在特定环境条件下,初级生产力可能会受控于光照。高会旺等^[58]对影响渤海水域初级生产力的因素按重要性由大到小进行了排序,前者顺序为光照透明度、温度、营养盐和海面辐射强度,并依据生态动力学模拟实验结果,认为以上4种环境因子均能改变初级生产力的大小及其时间变化趋势。光照对渤海初级生产力的影响也受到许多其他学者^[37,44,59]的重视。其次是营养盐和温度,二者多通过影响浮游植物生物量进而影响初级生产力^[59]。浮游植物生物量多通过叶绿素a的浓度来反映,如裴绍峰等^[60]对辽东湾近海叶绿素a和初级生产力分布规律的研究表明,叶绿素a的含量对初级生产力的区域分布具有较为直接的影响。

此外,初级生产力还与光照时间长短和水体透明度有关。辽河三角洲滨海湿地水域初级生产力存在季节变化:夏季高,冬季低。主要因为夏季光照时间长,日射量大,水体透明度高,水域总初级生产力达到最高水平。冬季则相反,除受光照时间和光强的控制外,还与冬季强烈的水体混合导致透明度降低有关^[37]。为了进一步揭示透明度对初级生产力的影响,高会旺等^[58]分析了渤海各海区海水透明度与初级生产力之间的相关关系,发现除莱州湾外相关系数都在0.9以上,并依据数值实验结果得出:透明度增加一倍或减半,相应初级生产力增加65%或减少40%;由此认为,水体透明度在很大程度上控制着初级生产力的变化。

温度对辽河三角洲滨海湿地水域初级生产力的影响主要体现在冬季和早春季^[61]。以往研究计算了各环境因素与渤海水域初级生产力的相关关系,得出海水温度与初级生产力的相关系数为0.66,因此认为温度是影响渤海水域初级生产力的一个重要环境因子^[58]。此外渤海初级生产力和叶绿素a的季节变化均与海水温度的变化趋势有很好的一致性^[62],可见温度对浮游植物的生长具有重要作用,在稍强光照下能通过影响光合或呼吸作用影响浮游植物群落数量,因此冬季生产力低与海水温度密不可分。

除了光照、温度条件影响较大外,初级生产力还受营养盐浓度的控制^[44]。浮游植物光合作用所需营养物质中构成限制的主要是硝酸盐、亚硝酸盐、磷酸盐、铵盐、硅酸盐等^[63]。受水深^[44]、人类活动^[15]、陆源输入^[64]等的影响,这些限制性元素在不

同的海域有所差异。以往研究表明, 除莱州湾为显著的磷限制, 渤海大多区域受无机氮限制^[65], 但是近 20 年来, 随着周边城市污水、农业废水的排放以及黄河断流的影响, 陆源硅的排放量减少, 大量无机氮随河流输送至莱州湾, 并且在海流的作用下输运至渤海海域, 造成营养盐结构失衡, 氮磷比值明显升高, 硅氮比值降低, 已有从氮限制转为磷限制的趋势^[66]。限制性元素在各海湾有所不同, 而在近岸与中部海域也存在差异。1998—1999 年对渤海中部及其邻近海域叶绿素浓度和初级生产力的估算结果都表现为中部海区低于边缘海区, 推测陆源输入的营养盐刺激了近海浮游植物的生长; 此外, 在边缘海区水深较浅, 营养盐可以快速地底部沉积物中得到补充, 导致叶绿素浓度和初级生产力较高^[44]。在研究初夏渤海湾的生产力时, 也发现了类似的分布规律: 营养盐丰富的近岸初级生产力水平远高于中部和湾口海域, 中部和湾口海域的初级生产力分别受到磷和氮营养盐的限制^[64]。然而, 在靠近河口的近岸区, 受到河流冲淡水的影响, 营养盐的浓度降低, 较强的水动力导致水体浑浊度高, 初级生产力主要受到光照的限制, 营养盐的限制作用减弱^[67]。

此外, 同一海域不同季节的营养盐限制情况也存在差异。研究表明^[44], 在秋季, 影响渤海浮游植物生长的主要营养盐是磷酸盐和硅酸盐; 而在春季, 硝酸盐和亚硝酸盐则成为主要限制因子, 其中亚硝酸盐主要来源于浮游植物内部对硝酸盐的还原和渗漏。

在水域生态系统中, 浮游动物对浮游植物进行捕食也可能降低初级生产力^[63]。通过在辽东湾北部海区设站, 马志强等^[38]对比了 6 月和 8 月浮游动物的差异, 发现 6 月浮游动物的生物量显著高于 8 月, 这恰与 6 月平均初级生产力低于 8 月的情况相一致。然而, 也有研究^[7, 68]表明, 在海湾及河口 2 种水体中, 浮游动物对浮游植物的摄食虽对整个生态系统具有重要意义, 但通常不是限制浮游植物初级生产力的主要因素。

某些微量元素的浓度过低或过高也会对水域初级生产力产生影响, 如 Fe、Cu、Pb、Zn、Cd、Mn 和 Se 等^[69-71]。其中 Fe 元素在 HNLC(高营养盐低叶绿素)海区被认为是限制浮游植物生产力的重要因子^[72]。如向此类区域加入大量的 Fe, 会加速浮游植物生长, 吸收过量的 N、P 等营养盐, 促进初级生产过程, 从而加速碳向海洋深层运输, 缓解温室

效应, 这就是著名的“铁假说”^[73]。尽管该假说遭受了很多质疑, 但也增加了人们对微量元素的关注和研究。其他元素如 Cu、Cd、Mn 等多具有生物毒性, 通常会抑制浮游植物的生长。但是, 目前此类研究还局限于某一种藻类或某几种微量元素, 而对于微量元素与光照、营养盐和温度等的耦合效应尚不清楚, 还需要更加深入、系统的研究。

潮汐和环流对浮游植物生物量和初级生产力也具有重要影响, 该物理过程可控制营养盐的空间分布, 进而影响浮游植物的生物量乃至初级生产力。研究表明, 莱州湾夏季大潮汛时湾内初级生产力比小潮汛时高出一倍^[35], 这可能是由于较强的水动力加速了营养盐从底质沉积物中分离, 使得潮汐携带的营养物质增多, 浮游植物因此大量繁殖。而渤海环流的存在同样会加速营养盐的聚集, 尤其是在各大海湾, 如辽东湾湾内环流方向为顺时针, 湾顶北上进流流速通常大于南下出流流速^[74], 导致河流排放的无机氮等营养物质不易扩散, 在湾内富集, 形成叶绿素 a 和初级生产力高值区, 尤其是春季, 在湾顶东部海域的分布范围和强度较大^[74-75]。

除以上因素外, 上升流^[35]、纬度^[63]、盐度^[63, 76]、水质^[63]和特殊地质灾害(如厄尔尼诺现象)^[42]等因素都会影响初级生产力的大小, 是在开展滨海湿地水域和近海初级生产力调查和研究中不容忽视的因素。

4 总结与展望

综合考虑以往研究资料, 认为莱州湾水域初级生产力主要影响因素为光照、营养盐和温度, 目前主要采用叶绿素法测定。但是, 随着同位素标记技术的发展和高精度仪器设备的应用, 水域初级生产力的测试结果将会更加精确高效; 加之, 人们认识水平不断提高, 对影响浮游植物初级生产的因素会有更深入的研究, 尤其是某些微量元素的浓度, 如 Fe、Cu、Pb、Zn、Cd、Mn 等, 而且对于微量元素与光照、营养盐和温度等因素的耦合效应尚不清楚, 今后还需要更加深入、细致的研究。

目前, 对辽河三角洲滨海水域的研究较多, 集中在辽东湾北部水域, 对水域初级生产力的研究大多以整个渤海水域为基础, 且主要基于遥感资料, 实地考察的资料很少, 以后需要更多地针对辽河三角洲内部水域和辽东湾海域初级生产力的现场调查和研究; 虽然以往有对辽东湾水域初级生产力估

算的报道,但多集中在20世纪90年代,对该区初级生产力的研究应该增加时间频率、缩小空间尺度。

此外,辽河三角洲湿地初级生产力的研究多涉及水稻、芦苇等湿生植被^[10-12,43]及浮游植物^[38,41,44],而针对水域底栖植物对初级生产力的贡献以及湖泊初级生产力的测定较少。由于底栖植物处于食物链的底端,往往具有较高的初级生产力,甚至可能比上覆水体中的浮游植物对生态系统的贡献和影响更大,对于缓解水域富营养化问题更是有不可忽视的作用,今后需要加强这方面的研究。

致谢:衷心感谢所有课题组成员和各位审稿专家对本文提出的宝贵意见!

参考文献:

- [1] 陆健健. 中国滨海湿地的分类[J]. 环境导报, 1996(1): 1-2.
- [2] 张晓龙, 李培英, 李萍, 等. 中国滨海湿地研究现状与展望[J]. 海洋科学进展, 2005, 23(1): 87-95.
- [3] 陆健健. 我国滨海湿地的功能[J]. 环境导报, 1996(1): 41-42.
- [4] LIETH H, WHITTAKER R H. Primary productivity of the biosphere[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1975.
- [5] FALKOWSKI P G, RAVEN J A. Aquatic Photosynthesis: (Second Edition) [M]. United States: Princeton University Press, 2007.
- [6] 阎希柱. 初级生产力的不同测定方法[J]. 水产学杂志, 2000, 13(1): 81-86.
- [7] 宋星宇, 黄良民, 石彦荣. 河口、海湾生态系统初级生产力研究进展[J]. 生态科学, 2004, 23(3): 265-269.
- [8] PINCKNEY J L, ZINGMARK R G. Modeling the annual production of intertidal benthic microalgae in estuarine ecosystems[J]. Journal of Phycology, 1993, 29(4): 396-407.
- [9] FAHEY T J, KNAPP A K, FAHEY T J, et al. Principles and standards for measuring primary production[M]. New York: Oxford University Press, 2007.
- [10] 汲玉河, 周广胜. 辽河三角洲地区植被的地上净初级生产力格局及其制约因子[J]. 生态环境学报, 2010, 19(10): 2269-2274.
- [11] 陈吉龙, 何蕾, 温兆飞, 等. 辽河三角洲河口芦苇沼泽湿地植被固碳潜力[J]. 生态学报, 2017, 37(16): 5402-5410.
- [12] 索安宁, 赵冬至, 张丰收. 我国北方河口湿地植被储碳、固碳功能研究: 以辽河三角洲盘锦地区为例[J]. 海洋学研究, 2010, 28(3): 67-71.
- [13] 钦佩, 马连琨, 谢民, 等. Fe、Cu、Mn、Zn在互花米草(spartina alterniflora)初级生产中的动态研究[J]. 生态学报, 1993, 13(1): 67-74.
- [14] 宗世贤, 刘昉助, 黄致远, 等. 江苏海岸带滨海盐土植被和沙生植被生物量和能量研究[J]. 植物资源与环境, 1992, 1(2): 25-30.
- [15] 王长永, 仲崇信, 钦佩. 米草光合作用速率季节变化及其对初级生产的影响[J]. 农村生态环境, 1994, 10(3): 14-17.
- [16] 张绪良, 张朝晖, 徐宗军, 等. 黄河三角洲滨海湿地植被的储碳量和固碳能力[J]. 安全与环境学报, 2012, 12(6): 145-149.
- [17] 路广, 韩美, 徐泽华, 等. 黄河三角洲新生湿地净初级生产力时空变化[J]. 生态学杂志, 2019, 38(4): 1113-1122.
- [18] 池源, 石洪华, 孙景宽, 等. 近30年来黄河三角洲植被净初级生产力时空特征及主要影响因素[J]. 生态学报, 2018, 38(8): 2683-2697.
- [19] 蔡显明, 宁修仁, 刘子琳. 珠江口初级生产力和新生产力研究[J]. 海洋学报(中文版), 2002(3): 101-111.
- [20] 黄邦钦, 洪华生, 柯林, 等. 珠江口分粒级叶绿素a和初级生产力研究[J]. 海洋学报(中文版), 2005(6): 182-188.
- [21] 蒋万祥, 赖子尼, 庞世勋, 等. 珠江口叶绿素a时空分布及初级生产力[J]. 生态与农村环境学报, 2010, 26(2): 132-136.
- [22] 田义超, 黄远林, 陶进, 等. 基于无人机影像的北部湾典型岛群红树林生态系统净初级生产力估算[J]. 热带地理, 2019, 39(4): 583-596.
- [23] 裴绍峰, LAWS E A, 叶思源, 等. 利用¹⁴C标记技术测定海洋初级生产力的综述[J]. 海洋科学, 2014, 38(12): 149-156.
- [24] 张绪良, 张朝晖, 谷东起, 等. 辽河三角洲滨海湿地的演化[J]. 生态环境学报, 2009, 18(3): 1002-1009.
- [25] 王宪礼, 肖笃宁, 布仁仓, 等. 辽河三角洲湿地的景观格局分析[J]. 生态学报, 1997, 17(3): 317-323.
- [26] 黄桂林, 张建军, 李玉祥. 辽河三角洲湿地分类及现状分析: 辽河三角洲湿地资源及其生物多样性的遥感监测系列论文之一[J]. 林业资源管理, 2000(4): 51-56.
- [27] 刘红玉, 吕宪国, 刘振乾, 等. 辽河三角洲湿地资源与区域持续发展[J]. 地理科学, 2000, 20(6): 545-551.
- [28] 崔保山, 杨志峰. 湿地学[M]. 北京: 北京师范大学出版社, 2006: 8-9.
- [29] BRIX H, YE S Y, LAWS E A, et al. Large-scale management of common reed, Phragmites australis, for paper production: a case study from the Liaohe Delta, China[J]. Ecological Engineering, 2014, 73: 760-769.
- [30] 杨帆. 基于RS和GIS的辽东湾滨海湿地景观动态变化研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2007.
- [31] 徐玲玲, 张玉书, 陈鹏狮, 等. 近20年盘锦湿地变化特征及影响因素分析[J]. 自然资源学报, 2009, 24(3): 483-490.
- [32] 黄桂林, 张建军, 韩爱慧, 等. 3S技术在辽河三角洲湿地监测中的应用: 辽河三角洲湿地资源及其生物多样性的遥感监测系列论文之二[J]. 林业资源管理, 2000(5): 51-56.
- [33] NIELSEN E S. The use of radioactive carbon (¹⁴C) for measuring organic production in the sea[J]. ICES Journal of Marine Science, 1952, 18(2): 117-140.
- [34] PETERSON B J. Aquatic primary productivity and the ¹⁴C-CO₂ method: a history of the productivity problem[J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1980, 11(1): 359-385.
- [35] 宁修仁, 刘子琳, 蔡显明. 我国海洋初级生产力研究二十年[J]. 东海海洋, 2000, 18(3): 13-20.
- [36] 彭作圣, 李丕廉, 费修纆. C¹⁴安瓿的封装技术[J]. 海洋与湖沼, 1964, 6(4): 433-434, 436.
- [37] 吕瑞华, 夏滨, 李宝华, 等. 渤海水域初级生产力10年间的变化[J]. 海洋科学进展, 1999, 17(3): 80-86.

- [38] 马志强,周遵春,薛克,等.辽东湾北部海区初级生产力与渔业资源的关系[J].*水产科学*,2004,23(4):12-15.
- [39] PEI S, LAWS E A, Zhang H, et al. Study on chemical hydrography, chlorophyll-a and primary productivity in Liaodong Bay, China[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2018, 202: 103-113.
- [40] 吕培顶,费尊乐,毛兴华,等.渤海水域叶绿素a的分布及初级生产力的估算[J].*海洋学报(中文版)*,1984,6(1):90-98.
- [41] 王俊,李洪志.渤海近岸叶绿素和初级生产力研究[J].*海洋水产研究*,2002,23(1):23-28.
- [42] 赵辉,张淑平.中国近海浮游植物叶绿素、初级生产力时空变化及其影响机制研究进展[J].*广东海洋大学学报*,2014,34(1):98-104.
- [43] 崔林林,李国胜,欧阳宁雷,等.滨海盐沼湿地植被净初级生产力变化对土壤因子的响应[J].*生态学报*,2020,40(19):7018-7029.
- [44] 孙军,刘东艳,柴心玉,等.1998—1999年春季渤海中部及其邻近海域叶绿素a浓度及初级生产力估算[J].*生态学报*,2003,23(3):517-526.
- [45] 双秀芝,宫相忠,何青,等.2009年春季辽东湾浮游植物群落[J].*海洋湖沼通报*,2011(3):32-38.
- [46] 栾莎,宫相忠,双秀芝,等.2009年春季辽东湾网采浮游植物群落结构[J].*海洋科学*,2012,36(5):57-64.
- [47] 高伟,宫相忠,双秀芝,等.2009年夏、冬季辽东湾网采浮游植物群落结构分析[J].*海洋湖沼通报*,2012(4):162-170.
- [48] 董厚德,全奎国,邵成,等.辽河河口湿地自然保护区植物群落生态的研究[J].*应用生态学报*,1995(2):190-195.
- [49] 王丽,丛玉婷,卢亚楠,等.太子河流域及其主要支流底栖藻类群落与环境因子的关系[J].*水产养殖*,2018,39(7):6-10.
- [50] 姚晓.黄河三角洲南部潮间带底栖生产力研究[D].青岛:中国海洋大学,2010.
- [51] 商翔,管卫兵,张经.长江口盐沼湿地底栖微藻的分布特征及其对有机质产出的贡献[J].*海洋学报(中文版)*,2009,31(5):40-47.
- [52] 凌晓欢.梁子湖底栖藻类初级生产力及刚毛藻水处理效果研究[D].武汉:中国科学院研究生院(水生生物研究所),2007.
- [53] 贾沁贤,黄玉瑶,高玉荣.青海尕斯库勒湖初级生产力特点[J].*应用与环境生物学报*,1999(5):483-486.
- [54] KROMKAMP J, PEENE J, VAN RIJSWIJK P, et al. Nutrients, light and primary production by phytoplankton and microphytobenthos in the eutrophic, turbid Westerschelde estuary (The Netherlands)[J]. *Hydrobiologia*, 1995, 311(1): 9-19.
- [55] NOZAIS C, PERISSINOTTO R, MUNDREE S. Annual cycle of microalgal biomass in a South African temporarily-open estuary: nutrient versus light limitation[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2001, 223(1): 39-48.
- [56] HAAS A F, NAUMANN M S, STRUCK U, et al. Organic matter release by coral reef associated benthic algae in the Northern Red Sea[J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2010, 389(1/2): 53-60.
- [57] 李文权,王宪,李淑英.光照强度及环境要素对海洋初级生产力的影响[J].*厦门大学学报(自然科学版)*,1989,28(4):423-426.
- [58] 高会旺,杨华,张英娟,等.渤海初级生产力的若干理化影响因素初步分析[J].*青岛海洋大学学报(自然科学版)*,2001,31(4):487-494.
- [59] FALKOWSKI P G. Molecular ecology of phytoplankton photosynthesis, in: primary productivity and biogeochemical cycles in the sea[M]. New York: Plenum Press, 1992: 47-67.
- [60] 裴绍峰,祝雅轩,张海波,等.辽东湾夏季叶绿素a分布特征与浮游植物溶解有机碳释放率估算[J].*海洋地质前沿*,2018,34(9):64-72.
- [61] SUN J, LIU D Y, QIAN S B. Preliminary study on seasonal succession and development pathway of phytoplankton community in the Bohai Sea[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2001, 20(2): 251-260.
- [62] 费尊乐,毛兴华,朱明远,等.渤海生产力研究——I.叶绿素a的分布特征与季节变化[J].*海洋学报(中文版)*,1988(1):99-106.
- [63] 陈国华,黄良民,王汉奎,等.珊瑚礁生态系统初级生产力研究进展[J].*生态学报*,2004(12):2863-2869.
- [64] 张海波,裴绍峰,祝雅轩,等.初夏渤海湾初级生产力分布特征及影响因素[J].*生态学报*,2019,39(17):6416-6424.
- [65] 刘浩,尹宝树.渤海生态动力过程的模型研究Ⅱ.营养盐以及叶绿素a的季节变化[J].*海洋学报*,2007,29(4):20-33.
- [66] 蒋红,崔毅,陈碧鹃,等.渤海近20年来营养盐变化趋势研究[J].*渔业科学进展*,2005,26(6):61-67.
- [67] GOOSEN N K, KROMKAMP J, PEENE J, et al. Bacterial and phytoplankton production in the maximum turbidity zone of three European estuaries: the Elbe, Westerschelde and Gironde[J]. *Journal of Marine Systems*, 1999, 22(2/3): 151-171.
- [68] RUIZ A, FRANCO J, VILLATE F. Microzooplankton grazing in the Estuary of Mundaka, Spain, and its impact on phytoplankton distribution along the salinity gradient[J]. *Aquatic Microbial Ecology*, 1998, 14(3): 281-288.
- [69] 张首临,刘明星,李国基,等.4种重金属离子对海洋三角褐指藻生长影响的研究[J].*海洋与湖沼*,1995,26(6):582-585.
- [70] 屠霄霞.铁对海洋初级生产力的影响[J].*农机化研究*,2007(3):18-20.
- [71] 李吉方,李德尚,张兆琪,等.微量元素对水库初级生产力的影响[J].*青岛海洋大学学报(自然科学版)*,1998,28(4):56-61.
- [72] 张武昌,孙松.铁假说和HNLC海区的现场铁加富实验[J].*地球科学进展*,2002,17(4):612-615.
- [73] Martin J H. Glacial - interglacial CO₂ change: the iron hypothesis[J]. *Paleoceanography*, 1990, 5(1): 1-13.
- [74] 刘喜惠,刘方,丁页,等.渤海环流对近岸海域无机氮分布特征的影响[J].*中国环境监测*,2019,35(6):78-84.
- [75] 祝雅轩.莱州湾与辽东湾营养盐特征及其对生态环境的影响:对比研究[D].北京:中国地质大学(北京),2019.
- [76] 沈志良.长江口海区理化环境对初级生产力的影响[J].*海洋湖沼通报*,1993(1):47-51.

Research progress on primary productivity of coastal wetland waters in Liao River Delta

DUAN Yunying^{1,3,4}, PEI Shaofeng^{1,2,3*}, LIAO Mingwen^{1,3}, ZHAI Shikui⁴, YANG Shixiong^{1,2,3}, YE Siyuan^{1,2,3}, ZHAO Lihong⁵, WANG Jin^{1,3}, YUAN Hongming^{1,2,3}, ZHOU Pan^{1,3}, JIANG Xinghao^{1,3}

(1 Laboratory of Ecological Geology and Climate Change, Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266237, China; 2 Laboratory for Marine Geology, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266061, China; 3 Key Laboratory of Coastal Wetland Biogeology, China Geological Survey, Qingdao 266237, China; 4 College of Marine Earth Sciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 5 College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: Located in the transitional zone between marine and terrestrial ecosystems, coastal wetland has extremely high productivity and photosynthetic carbon sequestration efficiency, which is an important part of the coastal blue carbon sink. The productivity of coastal wetlands depends not only on terrestrial vegetation such as reed, seablite and mangrove, but also on photosynthetic carbon fixation of phytoplankton in water. However, more studies in the past focused on terrestrial vegetation, and few reports on phytoplankton and benthic microalgae in coastal wetland waters. In recent years, the carbon cycle and carbon sink process of the multi-sphere ecosystem of coastal wetland have become research hotspots with the attention from governments and scientists to carbon dioxide emissions and climate change. As a key link of the multi-sphere carbon cycle, the productivity and photosynthetic carbon sequestration in wetland waters should be paid more attention. In this paper, the coastal wetland of Liao River Delta, a typical salt marsh region in northern China, was taken as a case study to review the research progress of wetland water productivity and discuss its influencing factors, to provide a reference for fulfilling the national carbon cycle and carbon neutralization commission.

Key words: coastal wetland; primary productivity of water area; Liao River Delta; light; temperature; nutrients