

doi: 10.7541/2020.133

青海湖刚毛藻分布特征变化及成因分析

郝美玉¹ 朱欢² 熊雄² 何玉邦³ 敖鸿毅² 虞功亮² 吴辰熙² 刘国祥²
罗泽¹ 刘剑彤² 闫保平¹

(1. 中国科学院计算机网络信息中心, 北京 100190; 2. 中国科学院水生生物研究所淡水生态与生物技术国家重点实验室, 武汉 430072; 3. 青海湖国家级自然保护区管理局, 西宁 810007)

摘要: 研究通过现场调查、资料收集和遥感影像解译, 分析了青海湖水质及刚毛藻分布特征的变化。研究表明, 2011—2019年间青海湖主要水质指标保持动态稳定, 水质未呈现显著变化趋势。2019年现场调查发现, 近岸浅水区域存在数量可观的刚毛藻分布, 其中以鸟岛和布哈河口周边区域刚毛藻生物量最大, 8月的平均生物量达到5213.4 g/m²。遥感影像分析显示, 刚毛藻主要分布在青海湖西部及西北部湖湾及入湖河口附近, 1987—2019年间刚毛藻覆盖面积呈先下降后上升趋势。分析表明, 近年来刚毛藻生物量增加和覆盖面积扩大可能与青海湖水位不断上涨以及新生浅水淹没区范围的扩大有关。目前, 刚毛藻分布的这种变化对青海湖水生生态环境的影响尚不明确, 后续需进一步关注气候变化与人类活动双重影响下青海湖的水生态系统健康问题。

关键词: 刚毛藻; 青海湖; 气候变化; 遥感影像; 成因分析

中图分类号: Q932.8

文献标识码: A

文章编号: 1000-3207(2020)05-1152-07

青海湖位于青藏高原东北部、青海省境内, 是我国最大的湖泊。青海湖被认为是一个至少在早-中更新世就已经形成的新构造断陷湖。晚更新世初期, 由于新构造运动, 导致湖区周围山地强烈隆起, 东部比其他部分隆生更为强烈, 从而堵塞了古湖的出口, 青海湖逐步演变为闭塞湖^[1]。全新世以来, 随着湖盆周围的继续隆生, 气候日趋干燥, 导致湖泊面积缩小, 水位下降。青海湖也由淡水湖逐渐转变为咸水湖。目前青海湖盐度在11‰—12‰, 水体主要阴离子为Cl⁻, 主要阳离子为Na⁺和Mg²⁺^[2]。

由于所处区域独特的地理位置和生态环境特征, 青海湖是我国乃至世界上鸟类及其他野生动物保护的重要区域。早在1992年青海湖国家级自然保护区就被列入拉姆塞尔公约(Ramsar Convention)国际重要湿地名录。然而, 多年来流域内的旅游和农牧业的发展以及生产生活污水的排放给青海湖的水生态环境带来了巨大的压力。据当地相关部门统计资料, 2018年青海湖景区旅游人口已突破

400万人次, 2018年环湖四县每年农药的用量为1.25×10⁷ kg, 牛羊的出栏量分别达到14.55万头和195.73万只。旅游和农牧业发展导致的污染物输入增加, 对青海湖的水生态环境保护带来一定的压力。

在全球气候变化的大背景下, 近年来整个青藏高原的气候呈现出暖湿化趋势^[3]。青海湖流域同样受到了全球变化带来的影响。1961—2004年, 青海湖水位每年平均下降0.76 m。但2005年以来, 青海湖的水位持续回升, 从2004年的3192.86 m上升到2018年的3195.41 m, 湖面面积也因此从4274 km²扩大到4502 km²^[4]。近年来湖面的不断上升以及周边人类活动影响的加剧伴随出现了一些新生环境问题。例如, 刚毛藻在青海湖近岸水域大量繁殖并形成水华, 且刚毛藻水华覆盖的面积呈逐年增加的趋势。

刚毛藻(*Cladophora*)属于绿藻门(Chlorophyta)石莼纲(Ulvophyceae)刚毛藻目(Cladophorales)。刚毛藻目中的藻类均为大型丝状藻类, 是一种典型底

收稿日期: 2020-04-01; 修订日期: 2020-08-26

基金项目: 国家科技基础条件平台项目(DKA2019-12-02-18); 中科院信息化专项课题(XXH13505-03-205)资助 [Supported by the National R & D Infrastructure and Facility Development Program of China, "Fundamental Science Data Sharing Platform" (DKA2019-12-02-18); the Special Project of Informatization of Chinese Academy of Sciences (XXH13505-03-205)]

作者简介: 郝美玉(1984—), 女, 硕士, 高级工程师; 研究方向为地学领域科研信息化。E-mail: hmy@cnic.cn

通信作者: 吴辰熙(1981—), 男, 博士, 研究员; 研究方向为污染物生态学。E-mail: chenxi.wu@ihb.ac.cn

栖附着藻类, 其广布于河流、湖泊和近海的浅水水域^[5, 6]。刚毛藻环境适应性强, 从贫营养到富营养水体, 从极地到温带, 从淡水到咸水都能存活^[7]。刚毛藻的存在能够促进水生态系统的生物地球化学循环、增加水生态系统的层次结构、提高物种多样性并有抑制其他藻类水华的效果。但刚毛藻过量生长影响景观和抑制沉水植物生长, 其分解腐烂导致水质恶化并产生难闻气味^[7, 8]。

历史上刚毛藻在青海湖一直有分布。根据中国科学院水生生物研究所黎尚豪先生在1969年的报道, 在青海湖二郎剑和黑马河等湖湾中有大量漂浮的刚毛藻, 并堆积成“绿色的堤岸”, 厚达0.5 m以上, 宽度至1 m, 长达100 m以上^[9]。而在20世纪60年代开展的青海湖综合考察中, 研究人员在湖区西部靠近布哈河口的鸟岛和西北部靠近泉吉河口沿岸也观察到大量刚毛藻。刚毛藻生物量较高的样点主要在二郎剑、沙柳河口和布哈河口等区域^[1]。杨洪志等^[10]在1997年的调查表明, 刚毛藻是青海湖底栖藻类的优势物种, 并估算青海湖的刚毛藻赋存量约为 9.42×10^8 kg。但姚维志等^[11]2006—2010年对青海湖的调查却较少发现刚毛藻, 并认为刚毛藻的分布范围有所缩小。

鉴于刚毛藻的生命代谢对于水域生态系统结构和功能的显著影响, 考虑到青海湖生态环境保护的现实需求, 有必要开展刚毛藻分布特征及其影响因素研究, 服务于青海湖水生态环境保护的科学管理决策。本研究利用遥感影像阈值分割和统计的方法, 对近年来青海湖刚毛藻遥感影像进行了解译, 分析了刚毛藻在青海湖分布特征的变化, 通过对青

海湖水环境特征变化的分析, 探讨了导致刚毛藻水华问题产生的原因, 以期对青海湖刚毛藻水华的防控及其生态影响评估提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

青海湖流域的总面积为 29661 km^2 , 地跨天峻、海晏、刚察和共和四县。流域内地形复杂, 地势由西北部向青海湖递减, 最高海拔为5200 m, 高差2200 m。植被类型以草原和草甸为主。流域内有大小河流40余条, 主要河流有布哈河、沙柳河、黑马河、泉吉河和菜挤河等。青海湖为流域内封闭的半咸水湖, 由主湖和尕斯库勒湖、新尕斯库勒湖、金沙湾和耳海等子湖组成。湖体呈椭圆形, 西北走向, 周长360 km, 东西长约106 km, 南北平均宽约63 km。水位在3193.5 m时, 湖区水域面积为 4294 km^2 , 容积为 $743 \times 10^8 \text{ m}^3$, 平均水深16 m, 最大水深26 m^[12]。

1.2 样品采集与分析

采样点位布置如图1所示, 采样点位覆盖整个青海湖且尽量保持与1961年青海湖综合考察中点位一致^[1]。2011年至2015年每年6月和8月各采集1次, 2016—2019年每年6—8月期间采集1次。现场用Hach HQ40多参数水质分析仪测定水温(WT)、电导率(EC)、pH和溶解氧(DO), 用塞氏盘法测定水体透明度。水样用10 L有机玻璃采水器采集, 回实验室用过硫酸钾消解钼酸盐分光光度法测定总磷(TP)、碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法总氮(TN)、纳氏试剂分光光度法测定氨氮(NH_4^+-N)、碱性高锰酸钾法测定高锰酸盐指数(COD_{Mn})和重量

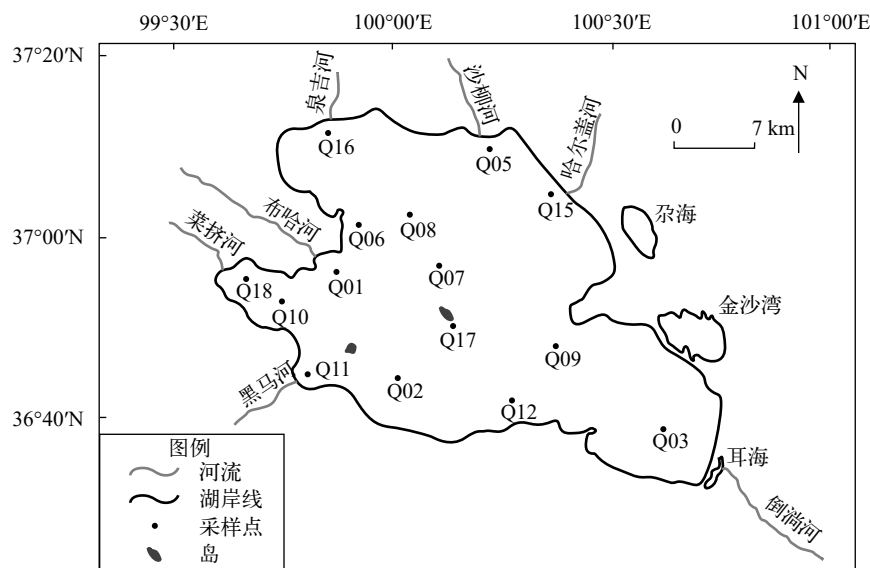


图1 青海湖采样点位置图

Fig. 1 Sampling sites in Qinghai Lake

法测定矿化度。

1.3 遥感数据获取与分析

本研究所用遥感数据源为青海湖地区的Landsat系列卫星数据, 轨道号133/34, 传感器包括Landsat-5 TM、Landsat-7 TM/ETM和Landsat-8 OLI, 分辨率为30 m, 数据获取时间以藻类生长旺盛的7月底或8月初最佳。每年选取时期相近、影像清晰和入湖河口处湖面无云覆盖的影像进行波段运算和刚毛藻水华分析提取研究, 最终选取了1987—2019年中12个代表性的年份。Google Earth影像和2019年高分1、2号卫星影像(分辨率为1 m和2 m)用来进行参考和结果校正。影像数据来源于地理空间数据云网站(www.gscloud.cn)。

本研究主要探讨青海湖刚毛藻水华在聚集较为严重的入湖河口处的分布, 为了减少湿地与刚毛藻水华的混淆, 先把水体提取出来, 水体提取方法参照基于阈值多波段谱间关系法 $(\text{band}_{\text{Green}} + \text{band}_{\text{red}}) - (\text{band}_{\text{NIR}} + \text{band}_{\text{SWIR1}}) > T$, T 为整数。刚毛藻水华提取采用阈值分割法, 首先导入遥感影像的蓝光波段, 用青海湖水体边界裁剪, 获得水体的蓝光波段影像。结合实际采用目视解译方法, 圈出刚毛藻水华核心区、清水区及含刚毛藻水华的清水混合区, 尽量多地提取分析样本。采用均值滤波对划定的区域进行过滤, 输出滤波后的影像。最后通过区域统计功能完成各区域的最大值、最小值和均值等的统计, 均衡各区域的统计值, 寻找可行的阈值, 以阈

值为界进行二分类, 观察效果, 反复调整阈值, 直至分类结果良好, 再一次用水体边界裁剪, 得到最终的刚毛藻水华分布范围。个别年份由于影像质量限制, 采用人工目视解译方法进行辅助和微调。

1.4 统计分析

水质参数年际变化用单因素方差分析(ANOVA)进行比较, 并利用SPSS Ver.18.0完成。水质参数的均值以及方差计算等用Excel完成。

2 结果

2.1 青海湖水质变化

青海湖水体呈弱碱性, pH平均值为8.9—9.5。DO平均值为6.5—8.9 mg/L, 考虑到青海湖地区的高海拔和低气压情况, DO处于接近饱和或过饱和状态。水体平均透明度为2.2—4.7 m, 且6月采样调查水体透明度均高于8月。矿化度近年略有下降, 从14 g/L下降到13 g/L。如图2所示, TP年际变化较大, 总体在0.01—0.06 mg/L。TN年际变化相对较小, 均值在0.8 mg/L左右。 NH_4^+-N 在0.1—0.6 mg/L, NH_4^+-N 占TN的比例相对较低, 多数时候不是N的主要存在形态。 COD_{Mn} 年际变化相对较小, 除2017年达到4.7 mg/L之外, 大多在2.5 mg/L左右。总体来看, 青海湖水质仍保持较好, 未发现近年来水质呈现显著变化的趋势($P < 0.05$)。

2.2 青海湖刚毛藻生物量及其分布特征

青海湖主湖区的青海刚毛藻(*Cladophora qing-*

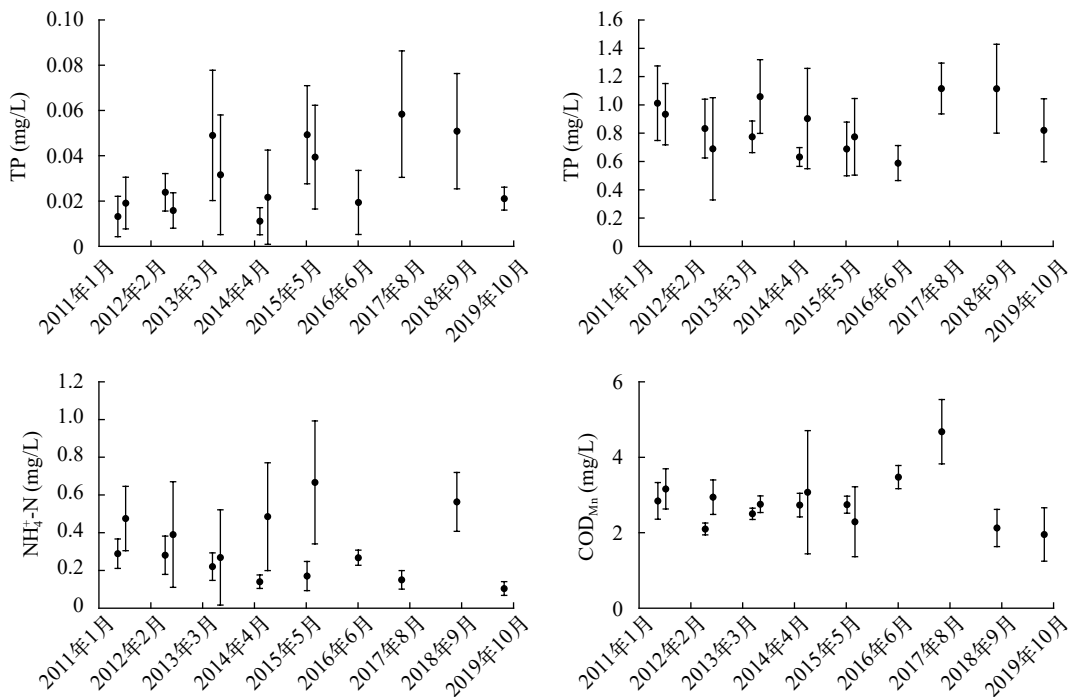


图2 2011—2019年青海湖水质参数变化情况(全湖平均值及方差)

Fig. 2 Variation of Qinghai Lake water quality from 2011 to 2019 (mean and standard deviation of the whole lake)

haiensis)存在附着生长型和浮漂生长型两种形态。这两种形态的刚毛藻其实为一种,即营固着生长的刚毛藻在形成一定生物量后受风浪作用植物体发生断裂而漂浮(图3)。在形成漂浮群体后,刚毛藻的形态特征发生少许变化,主要表现在:固着生长的刚毛藻分枝更为稠密,而漂浮生长的刚毛藻分枝较为稀疏。产生这种形态差异的主要原因可能是刚毛藻为适应不同生活方式而在植物体结构上进行的调整。根据2019年的现场调查结果,青海湖环湖浅水区域存在数量可观的刚毛藻分布。5月鸟岛周边刚毛藻生物量均值为 446.2 g/m^2 ,最高值为 1739.2 g/m^2 ,而鸟岛之外的其他区域刚毛藻生物量均值为 48.1 g/m^2 。8月鸟岛周边刚毛藻现存量均值为 5213.4 g/m^2 ,最高值为 10076.8 g/m^2 ,而其他区域刚毛藻生物量均值为 411.1 g/m^2 。

从刚毛藻的遥感影像提取结果分析得出,空间上刚毛藻主要分布青海湖西部及西北部湖湾及入湖河口附近(图4),时间上刚毛藻覆盖面积呈现出下降后上升的趋势(图5)。1995—2006年,刚毛藻覆盖面积处于较低水平,但2008—2016年,刚毛藻覆盖面积显著增大,2016年以后刚毛藻分布面积有所回落,但仍处于较高的水平。刚毛藻分布面积与青海湖水位呈显著正相关($P < 0.05$),相比水位最低的2004年,刚毛藻水华覆盖面积在2016年增大了近2.4倍。2016年后,尽管青海湖水位还在继续上升,但刚毛藻覆盖面积反而有所下降。

3 讨论

近些年来,由于人类活动影响的加剧,经常有刚毛藻在静止水体或沿岸中大量爆发的相关报道^[8,13]。大多数刚毛藻依靠固着器营固着生长,植物体成长到一定长度时往往会发生断裂而形成漂浮群体。

由于稳定基质有利于刚毛藻繁殖细胞的萌发附着,因此刚毛藻的着生偏好于稳定基质。绝大多数刚毛藻对于稳定基质的类型基本没有选择性偏好性,自然生境中刚毛藻可着生于沉水的树木枝干、水底岩石木桩和各种沉水植物的茎叶表面等。

郭亮亮等^[14]研究发现,氨氮、水下光照强度和溶解性正磷酸盐是影响刚毛藻群落特征的关键因素。2011—2019年期间,青海湖全湖平均营养盐浓度存在一定波动,但总体未出现显著升高的趋势。因此,近年来青海湖刚毛藻水华覆盖面积扩大可能不是青海湖营养水平变化所致。但不排除新生淹没区植物残体、土壤和牛羊粪便等的营养释放会导致局部区域营养浓度上升,从而影响刚毛藻的生长可能。有研究表明磷是影响北美五大湖刚毛藻生物量的限制性因子^[15]。新生淹没区内源磷释放可能对刚毛藻生物量增加也有贡献,但需进一步的研究验证。

我们发现刚毛藻覆盖面积与青海湖水位呈现显著正相关性($P < 0.05$)。水位上升可能是导致青海湖刚毛藻覆盖面积扩大的重要因素之一。由于气候变化的影响,青海湖水位从1961年开始波动下降,到2004年到达最低,但从2004年至今,青海湖水位持续回升^[16]。2019年青海湖水位为3195.76 m,相比2004年上升了近3 m,基本恢复到20世纪60年代初期的水平。水位上涨的直接影响就是湖泊面积的扩大以及新生淹没区的形成。水位上涨导致超过 300 km^2 的沿湖土地淹没。新生淹没区由于水深较浅,能为附着在淹没土壤表面的刚毛藻提供较好的光照条件。同时,新生淹没区尚未分解的植物残体,也为刚毛藻提供了立体的着生基质。因此,大面积新生淹没区的形成为刚毛藻的生长提供了适宜的生境。



图3 青海湖刚毛藻显微图片

Fig. 3 Microscopic pictures of *Cladophora* from Qinghai Lake

此外, 由于青海湖的地形特征的影响, 青海湖主要在正西、正东和西北方向面积扩张较大, 尤其是正西面积扩张最大^[17]。同时青海湖东部湖岸线多以沙滩和裸地为主, 而西部和西北部多为草场。因此, 西部和西北部形成的新生淹没区能为刚毛藻提供更为适宜的附着基质。这也解释了刚毛藻水华在空间上主要分布在青海湖西部及西北部湖湾及入湖河口处的现象。

最后, 由于青海湖流域气候变暖, 可能导致适宜刚毛藻生长的时间延长, 从而导致其更大生物量的形成。研究表明, 15—20℃左右是刚毛藻生长最适宜的温度, 温度过高或过低都会影响刚毛藻生长, 甚至导致其死亡^[18]。研究发现, 1969—2016年期间

青海湖非冰期表层湖水平均温度呈逐渐升高趋势, 变化倾向率为0.05℃/年, 相比60—70年代, 非冰期表层湖水平均温度上升了2℃左右^[19]。青海湖地处青藏高原高寒高海拔地区, 年平均气温不到2℃^[20]。因此, 近年来青海湖水温的升高, 可能给刚毛藻创造了更长的适宜生长的时间窗口。

根据青海湖刚毛藻调查结果, 认为青海湖刚毛藻的大量爆发需要3个必须条件: (1)充足的着生基质, 而湖水上涨淹没的草地提供了大量草茎, 这给刚毛藻的着生、缠绕提供了充分条件; (2)足够的营养盐, 刚毛藻是典型的磷限制藻类, 鸟岛周边是候鸟聚集区域和牧场, 这使得新生淹没区土壤会释放大量的内源性磷; (3)充足的光照, 新生淹没区

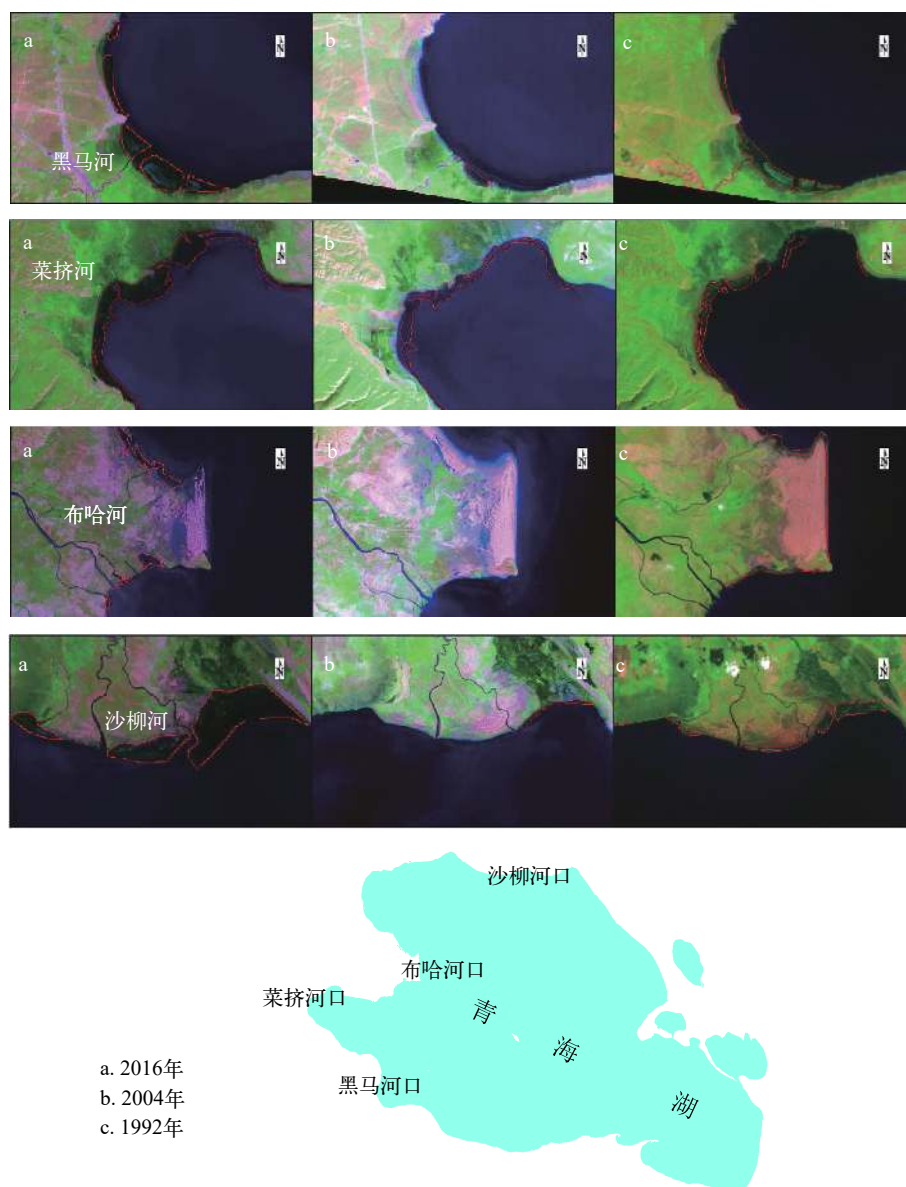


图4 1992、2004和2016年青海湖典型区域刚毛藻分布情况对比(红色多边形区域代表刚毛藻分布范围)

Fig. 4 Comparison of distribution of *Cladophora* in typical areas of Qinghai Lake in 1992, 2004 and 2016 (The red polygon area represents the distribution range of *Cladophora*)

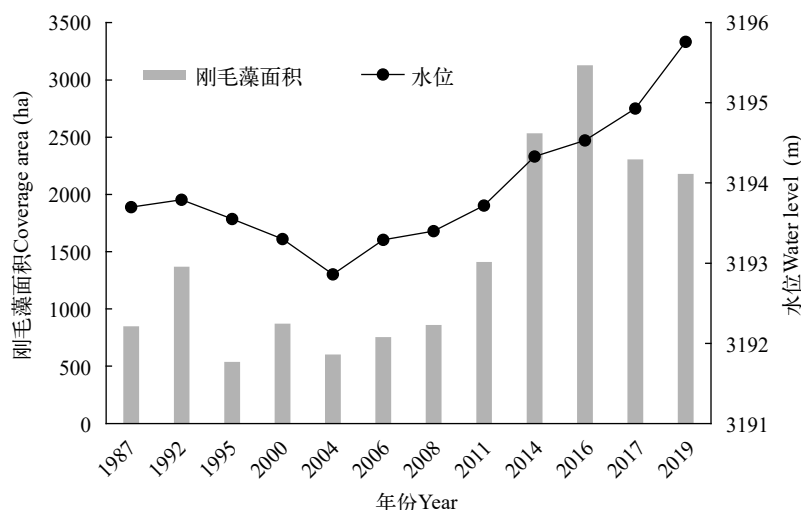


图5 1987—2019年青海湖水位及河口及近岸带刚毛藻覆盖面积变化

Fig. 5 Changes in water level and *Cladophora* coverage area in the estuary and nearshore zone of Qinghai Lake from 1987 to 2019

大部分区域较浅,光照能够到达水体底层,这使刚毛藻在水柱中得以实现立体生长,即着生、缠绕和漂浮。

刚毛藻生物量增加对青海湖水生态环境的影响目前尚不明确。刚毛藻直接带来的是对感官的影响,尤其是在刚毛藻生物量消亡的时期,大量刚毛藻残体由于风浪的作用,堆积在湖岸带,影响景观的同时还会在分解过程中释放难闻的异味物质,并造成周边的水质的恶化。此外,刚毛藻在湖面的堆积会影响水体的透光度,从而可能对原有沉水植物造成不利的影响。与此同时,刚毛藻大量生长提高了水体的初级生产力,可能会给浮游动物、底栖动物和鱼类提供食物来源和栖息场所。然而由于目前相关研究还极为有限,还需要进一步对其影响开展系统深入的研究。

青海湖作为我国重要的保护湿地,后续还需进一步关注气候变化与人类活动双重影响下的水生态环境问题。开展关于新生淹没区营养释放、流域污染负荷输入、有害藻类水华演变和水生态系统结构功能变化等问题的研究,合理评估气候变化与人类活动对青海湖水生态系统健康的影响,从而制定有针对性的管控措施,保障大美青海湖的生态系统健康。

参考文献:

- [1] Lanzhou Institute of Geology, Comprehensive Investigation Report of Qinghai Lake [M]. Beijing: Science Press, 1979: 15-22. [中国科学院兰州地质研究所. 青海湖综合考察报告 [M]. 北京: 科学出版社, 1979: 15-22.]
- [2] Ao H Y, Wu C X, Xiong X, *et al.* Water and sediment quality in Qinghai Lake, China: a revisit after half a century [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2014, **186**(4): 2121-2133.
- [3] Chen D L, Xu B Q, Yao T D, *et al.* Assessment of past, present and future environmental changes on the Tibetan Plateau [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2019, **60**(32): 3025-3035. [陈德亮, 徐柏青, 姚檀栋, 等. 青藏高原环境变化科学评估: 过去、现在与未来 [J]. 科学通报, 2019, **60**(32): 3025-3035.]
- [4] Bai W R, Yu D, Liu C H, *et al.* Trend and cause analysis of water level and area of Qinghai Lake under the background of global warming [J]. *Qinghai Science and Technology*, 2019(3): 72-78. [白文蓉, 余迪, 刘彩红, 等. 气候变暖背景下青海湖水位及面积变化趋势及成因分析 [J]. 青海科技, 2019(3): 72-78.]
- [5] Higgins S N, Pennuto C M, Howell E T, *et al.* Urban influences on *Cladophora* blooms in Lake Ontario [J]. *Journal of Great Lakes Research*, 2012, **38**(Sup 4): 116-123.
- [6] Higgins S N, Malkin S Y, Howell E T, *et al.* An ecological review of *Cladophora glomerata* (Chlorophyta) in the Laurentian Great lakes [J]. *Journal of Phycology*, 2008, **44**(4): 839-854.
- [7] Liu X, Chen Y W. A review on the ecology of *Cladophora* [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2018, **30**(4): 881-896. [刘霞, 陈宇炜. 刚毛藻(*Cladophora*)生态学研究进展 [J]. 湖泊科学, 2018, **30**(4): 881-896.]
- [8] Yang K, Dong J, Guo L L. The population structure and the distributing characteristics of *Cladophora* in the littoral zone of Dianchi Lake [J]. *Journal of Hydroecology*, 2013, **34**(3): 8-16. [杨凯, 董静, 郭亮亮, 等. 滇池沿岸带刚毛藻种群结构及分布特征 [J]. 水生态学杂志, 2013, **34**(3): 8-16.]
- [9] Li S H. A preliminary Study on the Types, Evolution and Biological Productivity of Qinghai Lake [C]. Proceedings of the Second Plenary Session of the Western Pacific Fisheries Research Commission. Beijing: Science Press, 1959: 97-105. [黎尚豪. 青海湖的类型、演变及其生物生产力的初步研究 [C]. 太平洋西部渔业研究委员会第二次全体会议论文集. 北京: 科学出版社, 1959: 97-105.]
- [10] Yang H Z, Wang J L. Analysis on the benthos and their productivity in Qinghai Lake [J]. *Qinghai Science and Technology*, 1997, **4**(3): 36-39. [杨洪志, 王基琳. 青海湖底栖生物及其生产力分析 [J]. 青海科技, 1997, **4**(3): 36-

- 39.]
- [11] Yao W Z, Shi J Q, Qi H F, *et al.* Study on the phytoplankton in Qinghai Lake during summer of 2006-2010 [J]. *Freshwater Fisheries*, 2011, **41**(3): 22-28. [姚维志, 史健全, 祁洪芳, 等. 2006-2010年夏季青海湖浮游植物研究 [J]. 淡水渔业, 2011, **41**(3): 22-28.]
- [12] Chen G S, Chen X Q, Gou X J, *et al.* Eco-environmental Protection and Restoration in Qinghai Lake Basin [M]. Xining: Qinghai People Press, 2008: 1-2. [陈桂琛, 陈孝全, 苟新京. 青海湖流域生态环境保护与修复 [M]. 西宁: 青海人民出版社, 2008: 1-2.]
- [13] Pei G F, Liu G X, Hu Z Y. Spatial and temporal variation of benthic algal communities in the littoral zone of Lake Donghu [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2007, **31**(6): 836-842. [裴国风, 刘国祥, 胡征宇. 东湖沿岸带底栖藻类群落的时空变化 [J]. 水生生物学报, 2007, **31**(6): 836-842.]
- [14] Guo L L, Li L, Li L J, *et al.* The characteristics of *Cladophora* community and its influencing factors in a eutrophic lake [J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(12): 4667-4674. [郭亮亮, 李露, 李莉杰, 等. 富营养化湖泊刚毛藻建群特征及其影响因素 [J]. 中国环境科学, 2017, **37**(12): 4667-4674.]
- [15] Auer M T, Tomlinson L M, Higgins S N, *et al.* Great Lakes *Cladophora* in the 21st century: same algae-different ecosystem [J]. *Journal of Great Lakes Research*, 2010, **36**(2): 248-255.
- [16] Qi M M, Yao X J, Liu S Y, *et al.* Dynamic change of Lake Qinghai shoreline from 1973 to 2018 [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2020, **32**(2): 573-586. [祁苗苗, 姚晓军, 刘时银, 等. 1973—2018年青海湖岸线动态变化 [J]. 湖泊科学, 2020, **32**(2): 573-586.]
- [17] Li X D, Zhao H F, Wang G X, *et al.* Influence of watershed hydrothermal conditions and vegetation status on lake level of Qinghai Lake [J]. *Arid Land Geography*, 2019, **42**(3): 499-508. [李晓东, 赵慧芳, 汪关信, 等. 流域水热条件和植被状况对青海湖水位的影响 [J]. 干旱区地理, 2019, **42**(3): 499-508.]
- [18] Cambridge M L, Breeman A M, van den Hoek C. Temperature responses and distribution of Australian species of *Cladophora* (Cladophorales: Chlorophyta) [J]. *Aquatic Botany*, 1991, **40**(1): 73-90.
- [19] Li Q J. Variation characteristic of surface water temperature and its response to climate change in Qinghai Lake [J]. *Yellow River*, 2018, **40**(11): 25-29. [李其江. 青海湖表层水温变化特征及对气候变化的响应 [J]. 人民黄河, 2018, **40**(11): 25-29.]
- [20] Zeng X, Xiao T G, Jia L. Characteristics of area change of Qinghai Lake and its response to the climate change in the nearly 20 years [J]. *Journal of Chengdu University of Information Technology*, 2018, **33**(4): 438-447. [曾昔, 肖天贵, 假拉. 近20年青海湖的面积变化特征及其与周围气候变化的响应 [J]. 成都信息工程大学学报, 2018, **33**(4): 438-447.]

ANALYSIS ON THE DISTRIBUTION AND ORIGIN OF *CLADOPHORA* IN THE NEARSHORE WATER OF QINGHAI LAKE

HAO Mei-Yu¹, ZHU Huan², XIONG Xiong², HE Yu-Bang³, AO Hong-Yi², YU Gong-Liang², WU Chen-Xi²,
LIU Guo-Xiang², LUO Ze¹, LIU Jian-Tong² and YAN Bao-Ping¹

(1. Computer Network Information Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China; 3. Qinghai Lake National Nature Reserve Administration, Xining 810007, China)

Abstract: In recent years, the *Cladophora* bloom in the nearshore area of Qinghai Lake is becoming more and more serious. Based on field investigation, data collection and remote sensing image interpretation, the changes of water quality and distribution characteristics of *Cladophora* bloom in Qinghai Lake were analyzed. The results showed that the major water quality parameters of Qinghai Lake remained good from 2011 to 2019. Although there were some annual variations, no significant deterioration trend of water quality was observed. In 2019, the field survey found that there was a considerable amount of *Cladophora* in the coastal shallow water area of Qinghai Lake, and the biomass of *Cladophora* was the largest in the area around Bird Island and Buha River estuary, averaging 5213.4 g/m² in August. Remote sensing image analysis showed that *Cladophora* was mainly distributed in the west and northwest coast of Qinghai Lake and near the estuary of the lake spatially, and the coverage area of *Cladophora* decreased first and then increased from 1987 to 2019. The analysis showed that the increase of water area suitable for the growth of *Cladophora* due to the rise of water level in Qinghai Lake in recent years may be the main reason for the expansion of *Cladophora* bloom. At present, the impact of *Cladophora* bloom on the water ecological environment of Qinghai Lake is still not clear, and further attention should be focused on the water ecosystem health of Qinghai Lake under the impact of both climate change and anthropogenic activities.

Key words: *Cladophora*; Qinghai Lake; Climate change; Remote sensing image; Cause analysis