漂浮浒苔藻体健康评价及其在青岛近岸海域绿潮监测中的应用

沙婧婧[1,2],温若冰[1,2],曾小霖[1,2],张洪亮[1,2],李继业[1,2],赵升[1,2]

(1.国家海洋局北海环境监测中心 青岛 266033;2.山东省海洋生态环境与防灾减灾重点实验室 青岛 266033)

摘要:我国黄海绿潮是目前世界上发生规模最大的绿潮灾害。浒苔(*Ulva prolifera*)由于其独特的生物学特性,在与其他海藻竞争中占据明显优势,导致暴发性生长从而形成浒苔绿潮。目前迫切需要验证并完善有效可行的漂浮浒苔藻体健康评价体系,来判断其生长状态、健康状况及增殖潜力。文章研究了黄海青岛海域漂浮绿潮藻浒苔光合作用的基本特性,并评价了其健康状况的等级。根据藻体状态对应其颜色和最大光量子产量(Fv/Fm)的差异,对 2016 年 6—7 月青岛近岸海域的漂浮浒苔藻体健康状态等级进行了测定和评价,发现各采样站位的浒苔藻体处于以下 3 个不同等级:Ⅱ级亚健康藻体,其 Fv/Fm 最高出现在站位 L24,仅为 0.66;Ⅲ级半健康藻体,其 Fv/Fm 最高出现在 L2,为 0.59;Ⅳ级衰老藻体,其 Fv/Fm 最高出现在 L1,仅为 0.40。其中,6 月各采样站位主要以Ⅲ级和Ⅳ级藻体为主;而 7 月各站位主要以Ⅳ级藻体为主。结果表明,漂浮至青岛海域的绿潮藻浒苔大多状态较差,趋于衰亡,不能健康存活。研究处于不同时期漂浮浒苔藻体的光合生理参数,筛选合适的评价指标,并试用于绿潮监测和评价业务化工作中,对于今后确立黄海漂浮浒苔藻体健康评价方法以及预测绿潮发展趋势具有重要意义。

关键词:绿潮;浒苔;Fv/Fm;健康等级评价;青岛

中图分类号:X5;P76 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-9857(2018)09-0074-08

Health Grade Evaluation for Free-Floating *Ulva prolifera* and Its Application in the Green Tide Monitoring along Qingdao Coast

SHA Jingjing[1,2], WEN Ruobing[1,2], ZENG Xiaolin[1,2], ZHANG Hongliang[1,2], LI Jiye[1,2], ZHAO Sheng[1,2]

(1. North China Sea Environmental Monitoring Center, State Oceanic Administration, Qingdao 266033, China; 2. Shandong Provincial Key Laboratory of Marine Ecological Environment and Disaster Prevention and Mitigation, State Oceanic Administration, Qingdao 266033, China)

Abstract: The macroalgal blooms occurred in the Yellow Sea is currently the largest green tide disasters in the world.Because of its unique biological characteristics, *Ulva prolifera* occupy obvi-

收稿日期:2018-03-19;**修订日期:**2018-08-09

基金项目:北海分局海洋科技项目(2018B01);山东省海洋生态环境与防灾减灾重点实验室开放基金资助项目(201602);国家海洋局海洋溢油鉴别与损害评估技术重点实验室开放基金项目(201701).

作者简介:沙婧婧,工程师,博士,研究方向为海洋生态学、海洋环境监测与评价

通信作者:赵升,高级工程师,硕士,研究方向为海洋藻类学、海洋环境监测与评价

ous advantage in the competition with other algae, leading to explosive growth in green tide. There is an urgent need to validate and perfect the effective and feasible health evaluation method for the green tide algae, to determine its growth status, health status and proliferation potential. This paper studied the photosynthetic physiological parameters and grade evaluation of free-floating algae *Ulva prolifera* along Qingdao coast area in the Yellow Sea. According to the algae physiological states corresponding to the color and maximum light quantum yield (Fv/Fm), in June and July, 2016, the health status and the evaluation grade of free-floating algae *Ulva prolifera* along Qingdao coast in the Yellow Sea were determined. It was found that all samples belonged to the following three different levels: Grade Ⅱ, sub-health algae, its highest Fv/Fm value in L24 was only 0.66; Grade Ⅲ, ill-health algae, its highest Fv/Fm in L2 was 0.59; Grade IV, decayed algae, its highest Fv/Fm in L1 was only 0.40. Furthermore, the health grades of floating *Ulva prolifera* were mainly composed of Grade Ⅲ and IV in June and were predominated by Grade Ⅲ in July, indicating that most free-floating *Ulva prolifera* could not survive in Qingdao coast. The results showed that most of the green tide algae was tending to decline, couldn't healthy survival. Research on photosynthetic physiological parameters, such as screening suitable evaluation index of the free-floating green tide algae in different period is of great significance, which can be applied to the system of monitoring *Ulva prolifera*, establishing the health evaluation method and forecasting the trend of green tide.

Key words: Green tide, *Ulva prolifera*, Fv/Fm, Health grade evaluation, Qingdao

0　引言

绿潮(green tide)是指由石莼属和浒苔属等海洋大型绿藻大量增殖或聚集所成的一种有害藻华[1]。世界上很多地区已经报道了绿潮现象，包括欧洲、美洲、澳洲和亚洲地区[2-10]。我国黄海绿潮是目前世界上发生规模最大的绿潮灾害。2007 年 6 月，在我国南黄海局部海域首次观察到大型绿藻形成的绿潮现象，但绿潮规模不大，影响区域较小；其后自 2008 年以来，我国黄海海域连年暴发大规模的浒苔绿潮，每年 5—8 月周期性暴发与消亡，最大分布面积超过 5 万 km^2，已发展为我国一种较为普遍的海洋灾害。

绿潮灾害一旦产生，对黄海沿岸地区景观、环境和养殖业构成了持续威胁。绿潮海藻腐烂之后会导致水体缺氧、产生很多有毒的次生产物[11]，导致大量水生生物死亡，并使得生物物种的多样性、丰度和总生物量减少，种群结构被改变，对沿海的生态系统造成严重威胁[2,12-14]；藻体覆盖海水表面，削弱穿透进入海水的光强[15]；随着汹涌的海浪冲击，大量绿潮藻堆积到海岸上，会导致海岸的美观性受到影响，从而冲击旅游业的发展。

在黄海海域连年持续大规模暴发的绿潮藻种基本上都是绿藻门、绿藻纲、石莼目、石莼科、石莼属的浒苔(*Ulva prolifera*)[5,16]。浒苔属于广盐、广温性海藻[4]，但是其生长所需的盐度与温度都有一定的范畴。浒苔在合适的生长环境中，因为具备得天独厚的优势，所以和其他海藻竞争营养盐占据上风，能够缩短繁殖时间，促进藻类大规模快速生长，从而产生规模较大的浒苔绿潮。

针对青岛近岸海域中规模较大的浒苔绿潮，需要密切监测它们的增殖情况、健康情况、生长情况。藻体最大光量子产量数值能够反映出藻类光合作用与生长受到外界因素的影响情况[17-18]。而且，藻体叶绿素荧光测定不会对藻体造成任何损害，非常快捷方便。本研究期望借助监测漂浮浒苔藻体 Fv/Fm 光合生理参数的方法[19]，即时监测和判断青岛海域漂浮藻体健康程度及生长活力，筛选、验证并完善绿潮藻的健康评价方法，为浒苔绿潮监测和处置提

供科学参考和技术支持。

1 材料与方法

1.1 绿潮藻漂浮浒苔样品采集

2016 年 6—7 月，自国家海洋局北海分局启动绿潮应急预案后，国家海洋局北海环境监测中心技术人员乘坐中国海监船，对青岛沿岸重点海域开展绿潮应急监测。重点监测漂浮绿潮分布区的北部、西部，适度关注距岸较近的漂浮浒苔密集分布区位置、范围。以青岛沿海东南方向的“浒苔通道”海域为重点监测范围，根据绿潮分布卫星解译图设置走航监测线，重点关注对青岛影响较大的 35°N 以北海域浒苔绿潮分布情况。监测船舶在航渡期间开展绿潮分布的走航监测和采样，及时测定和记录。监测项目包括绿潮藻颜色、分布情况、光合作用效率等。

2016 年 6 月 20 日至 7 月 12 日，实验组人员乘坐中国海监船，对青岛浒苔漂浮区域进行了巡查，共设了 40 个漂浮浒苔采样站位(L1～L40，6 月 L1～L2 站，7 月 L22～L40 站)，各站位经纬度详见表 1。在青岛海域进行监测过程中，捞取海上漂浮绿潮藻，每个站位采集漂浮浒苔共 5 个平行样。使用 0.22 μm 孔径滤膜过滤海水，对采集到的浒苔样品轻轻地进行清洗，使其表面的漂浮物、杂藻、泥巴、污水被清理干净，之后静置在过滤海水中，待下一步实验进行。

表 1 青岛近岸海域漂浮浒苔样品采集站位信息

日期	监测站位	经度(E)	纬度(N)
6.20	L1	120.8980	35.8365
6.21	L2	120.9919	35.7524
6.21	L3	120.7620	35.7498
6.22	L4	120.9000	35.4667
6.23	L5	120.2333	35.4500
6.23	L6	120.3167	35.6667
6.23	L7	120.3833	35.8500
6.23	L8	120.4000	35.9500
6.24	L9	120.6974	35.9024
6.25	L10	120.4048	35.8225
6.25	L11	120.4156	35.7326
6.25	L12	120.5837	35.8459
6.25	L13	120.6057	35.7327
6.25	L14	120.7340	35.8650
6.25	L15	120.9210	35.8830
6.26	L16	121.0130	35.9720
6.26	L17	120.8700	36.0580
6.28	L18	120.2250	35.8530
6.28	L19	120.3180	35.9530
6.29	L20	120.7020	36.0400
6.29	L21	120.3790	36.0290
6.29	L22	120.3070	36.0470
7.1	L23	120.4730	36.0110
7.1	L24	120.3940	36.0260
7.3	L25	120.3709	35.9781
7.4	L26	120.6388	35.9929
7.5	L27	120.2488	35.8623
7.5	L28	119.9966	35.5005
7.6	L29	120.0702	35.5610
7.6	L30	120.2922	35.7391
7.6	L31	120.5672	35.9414
7.7	L32	120.6339	36.0906
7.7	L33	120.2944	36.0464
7.7	L34	120.3278	36.0386
7.8	L35	120.3553	36.0350
7.10	L36	120.4827	36.0322
7.10	L37	120.7487	36.0966
7.11	L38	120.0680	35.4160
7.12	L39	120.5111	35.5453
7.12	L40	121.0975	35.6445

1.2 浒苔藻体颜色观察

根据漂浮浒苔藻体颜色分类标准，将各站位采集的每个藻体平行样，挑选数根置于白瓷盘中，观察颜色并分类。

1.3 浒苔藻体叶绿素荧光活性 Fv/Fm 测定方法

对所采的每个藻体平行样现场测定叶绿素荧光活性 Fv/Fm，以评价藻体健康等级。使用 Dual-PAM 荧光仪测量对叶绿素荧光进行测量，具体方法可以参考王阳阳等[20]与汤文仲等[21]。测定前样品都要经充分暗适应 5 min，测量过程由专业的 Windows 操作软件 DualPAM 控制，将测量光启动，当光信号平稳之后，将饱和脉冲键打开，把 Fv/Fm 予以记录。

1.4 藻体健康评价等级

国内学者通过研究发现，漂浮浒苔藻体在一般

的环境中，生理状态会表现出一定的差异性，相对应地，叶绿素含量和 Fv/Fm 也不同[22]。曹佳春等[22]研究了黄海青岛海域漂浮绿潮藻浒苔的光合生理特性并进行状态等级评价。结合漂浮浒苔藻体的不同颜色，具体测定 Fv/Fm，从而构建评价藻体健康程度的基本等级，初步将藻体分为了 4 个等级：Ⅰ级健康藻体、Ⅱ级亚健康藻体、Ⅲ级半健康藻体、Ⅳ级衰老藻体（表 2）。依据上述等级划分，对所采样品进行漂浮绿潮藻浒苔藻体健康评价。

表 2　漂浮绿潮藻浒苔藻体健康评价等级划分

等级	颜色	Fv/Fm
I	绿色(G)	0.70～0.75
II	黄绿色(GY)	0.60～0.69
III	黄色(Y)	0.41～0.59
IV	白色(W)	0～0.40

1.5　数据处理

应用 SPSS Statistics 17.0 分析软件和 Excel 对数据进行统计分析。回归分析、方差分析绿潮浒苔的叶绿素荧光活性 Fv/Fm 值，以 $P<0.05$ 作为差异显著性水平，得到的全部数据都用平均值±标准误（X ± SE）表示。采用 Sigmaplot 10.0 和 Excel 作图。

2　结果

2.1　青岛海域浒苔形态特征

监测过程中发现，青岛海域漂浮绿潮呈条带状或斑块状，且多为黄绿色或黄色，青岛海域藻体一般都是管状或囊状的，颜色为黄绿色或浅绿色，有些也表现出白色；藻体细胞多呈浅绿或黄绿色，且间隔增大，内部填充物缺失，部分细胞出现颗粒化。通过上述现象我们能够了解到，该海域的浒苔藻体已经趋于衰亡状态。

2.2　青岛海域藻体荧光活性

图 1 为青岛海域站 6 月 L1～L22 共 22 个站位采样的漂浮藻体叶绿素荧光参数 Fv/Fm。其中，绿潮浒苔藻体荧光参数 Fv/Fm 均值有 10 个站位超过了 0.40。其中，站位 L2 的 Fv/Fm 均值达到 0.62，为最高值；其次是 L1、L4、L6、L15、L19、L20、L21、L22，均值在 0.41～0.59 范围内；剩下站位的 Fv/Fm 值均低于 0.40，站位 12 的 Fv/Fm 均值最低，为 0.13。

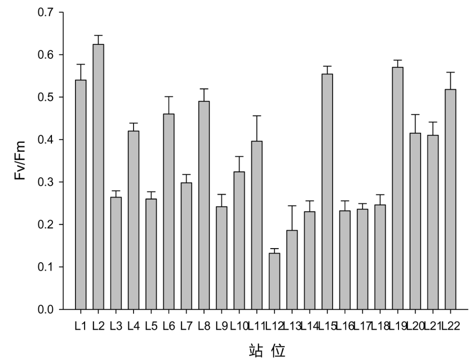

图 1　6 月各采样点漂浮浒苔藻体的 Fv/Fm

图 2 为青岛海域站 7 月 L23～L40 共 18 个站位采样的漂浮藻体叶绿素荧光参数 Fv/Fm。其中，L23～L26 共 4 个站位的绿潮浒苔藻体荧光参数 Fv/Fm 均值都大于 0.40。站位 L25 的 Fv/Fm 均值为 0.6，达到最高；其次是 L24、L25、L26 的值，在 0.41～0.59 范畴内；L23 的 Fv/Fm 均值为 0.40；其余站位的 Fv/Fm 均低于 0.40，站位 40 的 Fv/Fm 均值最低，为 0.08。与 7 月前期的 L23～L28 各采样站位的 Fv/Fm 相比，之后的大多数采样站位的 Fv/Fm 均有显著下降（$P<0.01$）。

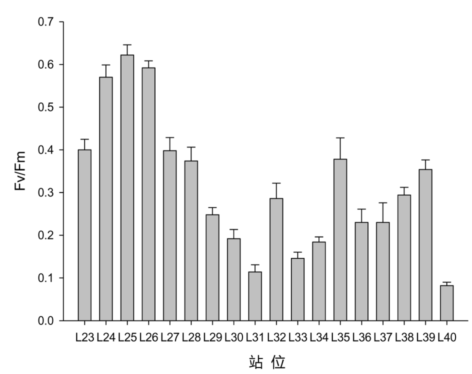

图 2　7 月各采样点漂浮浒苔藻体的 Fv/Fm

2.3　青岛海域藻体健康等级评定

根据藻体颜色，将 6 月 L1～L22 共 22 个采样点的样品分类后，测定荧光参数 Fv/Fm，根据曹佳春等[22]藻体状态评价体系，通过研究表明，青岛 6

月海域漂浮浒苔主要是Ⅱ级藻体、Ⅲ级藻体与Ⅳ级藻体，其中，Ⅲ级藻体与Ⅳ级藻体占比例更高($P<0.01$)。占比例最高的是 L2 站位采样点的Ⅱ级藻体，高达 60%，L15 站位的Ⅲ级藻体所占比例最高的，达到 100%(图 3)。站位 L2 的藻体是亚健康状态，站位 L1、L4、L6、L15、L19、L20、L21、L22 的藻体为半健康藻体，余下各站位的藻体都表现出衰老的状态。

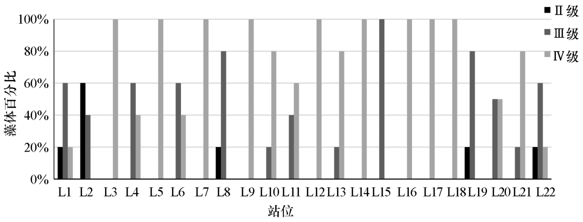

图 3 6 月各采样站位不同健康等级藻体所占百分比

根据 7 月 L23～L40 共 18 个采样点结合藻体的不同颜色，对 Fv/Fm 进行测定，研究表明，青岛海域 7 月漂浮浒苔可以评级为Ⅱ级藻体，Ⅲ级藻体与Ⅳ级藻体，主要是Ⅲ级藻体与Ⅳ级藻体($P<0.01$)。L25 站位采样点的Ⅱ级藻体所占比例最高，达到 80%，L24 站位采样点的Ⅲ级藻体所占比例最高，也达到 80%(图 4)。将以上荧光参数 Fv/Fm 结合藻体颜色观察结果，根据藻体状态评价系统，站位 L25 的藻体是亚健康藻体，站位 L24～L26 的藻体是半健康藻体，剩下站位全部都是衰老藻体。7 月总体与 6 月相比，大多站位藻体光合能力降低，Ⅳ级藻体所占比例更高，上述研究说明青岛海域的绿潮浒苔藻体细胞与藻体已经处在趋于衰亡的状态。

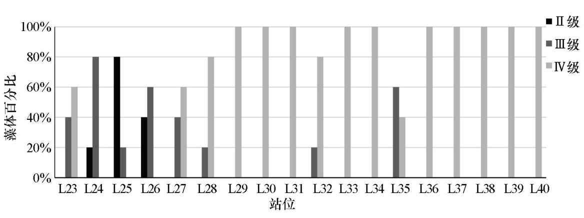

图 4 7 月各采样站位不同健康等级藻体所占百分比

6 月样品中，Ⅱ级黄绿色亚健康藻体、Ⅲ级黄色半健康藻体 Fv/Fm 都比Ⅳ级衰亡藻体要显著高($P<0.01$)。Ⅱ级藻体的 Fv/Fm 变化并不显著，而Ⅲ级、Ⅳ级藻体的 Fv/Fm 变化则比较明显(图 5)。7 月样品中，Ⅳ衰亡藻体的总比例最高，占绝对优势。样品中Ⅱ级黄绿色亚健康藻体、Ⅲ级黄色半健康藻体 Fv/Fm 都比Ⅳ级衰亡藻体要显著高($P<0.01$)。Ⅱ级、Ⅲ级藻体的 Fv/Fm 变化较小，而Ⅳ级藻体的 Fv/Fm 变化较大(图 6)。

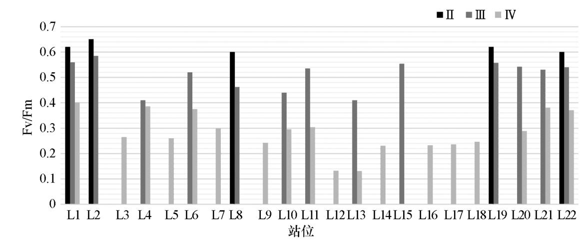

图 5 6 月各采样站位不同健康等级藻体的 Fv/Fm

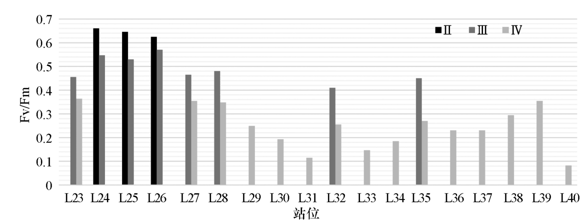

图 6 7 月各采样站位不同健康等级藻体的 Fv/Fm

3 讨论

处于不同状态的浒苔藻体，其藻体活性不同，增殖潜力不同。在本研究过程中，利用藻体叶绿素荧光活性测定技术，根据野外实测的荧光参数的结果，结合观察漂浮浒苔在野外自然环境下的藻体颜色、细胞形态，判断其所处于的生理状态，从而评价藻体状态和增殖潜力。本研究中青岛海域浒苔藻体呈浅绿或黄绿色，也有部分藻体发白，海上漂浮藻体呈条带状或斑块状；藻体形态多为囊状或管状；藻体细胞多呈浅绿或黄绿色，且间隔增大，内部填充物缺失，部分细胞出现颗粒化，处于细胞凋亡状态，且少量藻体出现生殖细胞放散等现象。6 月，漂浮浒苔藻体叶绿素荧光参数 Fv/Fm 测定结果中，约 40.90% 的站位在 0.41～0.59 范围内，约 54.54%的站位均低于 0.4；7 月，约 77.78%的站位均低于 0.40。7 月总体与 6 月相比，大多站位藻体光合能力下降。6—7 月，监测海域Ⅳ级藻体所占比例更高，其叶绿素荧光活性比Ⅱ级藻体与Ⅲ级藻体要明显低很多，相应的 Fv/Fm 也要比正常值低，最

低值达到 0.08，基本无法进行光合作用。结合藻体颜色呈现出由浅绿色或黄绿色向白色转变的暴发末期特征，及藻体细胞显微观察结果，研究表明，青岛海域的绿潮浒苔藻体已经处在趋于衰亡的状态。

生长环境条件的变化可以影响绿潮藻的形态和生理状态，进一步导致暴发生物量的动态增长和减少，所以环境因子的变化也可能是导致青岛海域绿潮衰亡的主要原因。本研究中，笔者同时监测了调查海域的生态因子参数，包括水温、光照强度、盐度、pH 值和营养盐等。适宜的温度和盐度是绿潮暴发的主要条件，也是绿潮持续时间较长、暴发规模大的原因之一。6 月调查海域表层和10 m层温度的变化范围为 16.72℃ ～ 22.31℃，平均值为 19.53℃；表层和 10 m 层盐度的变化范围为 30.17～31.95，平均值为 31.52。7 月调查海域表层和 10 m 层温度的变化范围为 17.82℃～28.60℃，平均值为 22.82℃；表层和 10 m 层盐度的变化范围为 29.94～31.82，平均值为 31.68。温度和盐度均处于浒苔藻体生长和孢子释放的适应范围内（温度：15℃～30℃；盐度：16～40）[23]。可见，温度和盐度并不是青岛海域绿潮藻趋于衰亡的主要限制因素。

绿潮藻自身具有独特的特点，能够在很短的时间内吸收很多营养盐，从而扩增生物量，且相对于其他藻类而言，其繁殖方式具有多元化的特点，所以更具竞争性。在过去的研究中，相关专家一致认为海水富营养化是导致绿潮大规模暴发的根本原因，最显著的特点是，海水中营养盐的浓度持续升高，氮磷含量增加，它们均为绿潮藻快速扩增提供了条件[24-25]。我国山东、江苏等沿海地区的养殖业规模不断扩大，海水中有很多营养盐，使得当地海水存在严重的富营养化情况，诱发了黄海绿潮产生。Liu 等[26]研究之后指出，2008 年大规模暴发的浒苔和苏北浅滩周边的浒苔是同源的，所以，江苏大规模栽培紫菜可能是导致绿潮暴发的主要原因。除此之外，盐度、温度、光照都可能导致绿潮大规模暴发。无论是对于盐度还是温度，绿潮藻都有极强的适应力，其会在适合的环境中，成为极具竞争优势的藻类，并且大规模生长繁殖。

大量研究表明，大型绿藻具有高比表面，呈现高营养吸收速率。处于生长期的绿潮浒苔需要更多的营养，而藻的生长速率通常是与它们储存营养物质的能力有关的，其需要依靠持续高水平的营养盐来维持暴发[27-28]。目前研究显示南黄海海区为高营养盐区，陆源径流输入和黄海暖流携带的营养盐补充量要大于浮游植物的消耗量，丰富的营养盐保证了该区域浒苔的生长需要[29]。由此可见，充足的营养盐是绿潮发生的物质基础。本研究中的监测结果显示，与同期南黄海尤其苏北沿岸海域的营养盐数据资料相比，青岛海域的营养盐水平要低很多。经统计在青岛海域绿潮监测站位中，表层 DIN 和 PO_4^{3-}－P 含量超过一类海水水质标准的百分比分别达 14.29％ 和 5.71％。DIN 和 PO_4^{3-}－P 的平均含量分别为 7.54 μmol/L 和 0.14 μmol/L，营养盐含量要明显低于南黄海海区，尤其是沿岸海域的营养盐含量，更进一步证明了青岛海域的低营养水平不足以支撑绿潮大规模暴发。绿潮藻集中漂浮分布于青岛海域的时间大多为每年 6—7 月，是年度中气温较高的时段，日照时间长，推测绿潮藻漂移至海水透明度相对较高的青岛海域[30]，长时间暴露在高温高光照的环境中，加之该海域低营养盐水平无法满足大量绿潮浒苔的营养需求，促使绿潮浒苔在该海域趋于衰亡，进入暴发末期。

对于植物体而言，最主要的生化反应就是光合作用，其能够促进植物的繁殖与生长，并且为植物储备源源不断的能量，所以推测绿潮浒苔的光合系统对海水表面不断变化的环境特征，有其本身的适应性。采集之后的藻体会受到多元化因素的胁迫，假如样品经过运输之后，在实验室中测定其荧光参数，其值和直接测定会有显著的差异。所以本次研究选择采集自然环境中的漂浮浒苔样本，并且使用叶绿素荧光技术直接在现场测定藻类光合生理参数，这种测定方法能够得到更真实准确的数据。根据藻体最大光量子产量发生变化的研究数据，能够说明藻类光合作用以及生长情况受到不同环境的影响[17]。测定藻体叶绿素荧光的方法不会对藻体造成任何的不良影响，而且快速、简单。通过研究表明，漂浮浒苔藻体在自然环境中的生理状态有所差异，健康等级较高的藻体具有较高的光合活性，

Fv/Fm 值也相应较高。因此,有很多数据都能够被充分利用,可通过不断的研究,促进浒苔藻体健康评价系统完善和进一步发展,明确黄海绿潮漂浮浒苔的光合作用特征在其生长竞争中取得优势地位的作用,为即时监测和判断漂浮浒苔藻体健康程度、生长活力及增殖潜力奠定基础。现阶段大部分研究表明,在一般情况下,绿藻的 Fv/Fm 在 0.70~0.75 范围内[31]。本次研究青岛海域浒苔藻体的 Fv/Fm 值大多比 0.60 低,这说明青岛海域漂浮浒苔藻体的光合作用能力较弱。

国内外大量研究表明,当藻类处于剧烈变化的环境压力包括温度、光照、盐度、摄食动物等的胁迫时能相应产生大量的活性氧(reactive oxygen species,ROS)[32-35]。为了保障自身能够应对外因的不良影响与威胁,藻类具备抗氧化能力,可以清除活性氧(Reactive Oxygene Species,ROS)自由基的抗逆保护体系。较高的抗氧化酶活性及抗氧化剂含量通常与藻体较强的抗逆能力相关[36]。当外界环境胁迫超过藻类自身的耐受限度时,体内的抗氧化系统不足以及时清除 ROS,导致 ROS 在细胞内过量累积,往往会对植物体造成严重的氧化性损伤,引起脂膜过氧化,光合作用系统的破坏,一些关键酶的失活及 DNA 结构的损伤等[36-37],使得平时的新陈代谢受到不良影响,甚至导致植物的衰亡。与高等植物相似,藻类主要通过体内的抗氧化系统来维持 ROS 产生和消除的动态平衡。Choo 等[32]研究发现,对 ROS 耐受种的藻类比敏感种的抗氧化系统更为有效。因此,黄海漂浮浒苔的抗氧化活性这类指标也可以纳入绿潮监测与评价体系。

为评估绿潮藻生长状态、繁殖活力等,在 2016 年的绿潮船舶业务化监测中,我们采用了浒苔藻体的叶绿素荧光活性(Fv/Fm)这一参数,结合藻体颜色,即时监测和判断漂浮浒苔的藻体状态、健康程度及生长活力。这对于船舶监测的布设站位,判断绿潮预警等级以及组织力量进行浒苔打捞和防治工作具有重要的指导意义。然而,目前未能将光合作用要素与绿潮藻的相对生长率、生物量等建立较为明确的定量关系。因此,下一步应研究测定黄海漂浮浒苔的抗氧化能力,对抗氧化活性等指标加以论证,配合叶绿素荧光参数、叶绿素含量、相对生长率等指标的使用,对藻体健康状况、生物量以及增殖潜力进行全面评价和预测,确立更加完备的绿潮浒苔评价方法,使绿潮灾害的评估和预测更准确、更科学,这对于黄海浒苔绿潮大规模暴发的潜力评估及科学预测预警是非常关键的。

参考文献

[1] FLETCHER R L.The Occurrence of “Green Tides”[M].Heidelberg:Springer Berlin Heidelberg,1996:7-43.

[2] NELSON T A,HABERLIN K,NELSON A V,et al.Ecological and physiological controls of species composition in green macroalgal blooms[J].Ecology,2008,89(5):1287-98.

[3] KIM J H,KANG E J,PARK M G,et al.Effects of temperature and irradiance on photosynthesis and growth of a green-tide-forming species(*Ulva linza*) in the Yellow Sea[J].Journal of Applied Phycology,2011,23(3):421-32.

[4] TAYLOR R, FLETCHER R L, RAVEN J A. Preliminary Studies on the Growth of Selected ‘Green Tide’ Algae in Laboratory Culture: Effects of Irradiance, Temperature, Salinity and Nutrients on Growth Rate[J]. Botanica Marina, 2001, 44(4):327-36.

[5] SUN S, WANG F, LI C, et al. Emerging challenges: Massive green algae blooms in the Yellow Sea[J]. Nature Precedings, 2008,2266(9):1-13.

[6] YABE T, ISHII Y, AMANO Y, et al. Green tide formed by free-floating *Ulva* spp. at Yatsu tidal flat, Japan[J]. Limnology, 2009,10(3):239-45.

[7] KIM K Y,CHOI T S,KIM J H,et al.Physiological ecology and seasonality of *Ulva pertusa* on a temperate rocky shore[J]. Phycologia,2004,43(4):483-92.

[8] ALSTYNE K L V,NELSON A V,VYVYAN J R,et al.Dopamine functions as an antiherbivore defense in the temperate green alga *Ulvaria obscura*[J]. Oecologia, 2006, 148(2): 304-11.

[9] GARCÍA-ROBLEDO E,CORZO A,PAPA-SPYROU S,et al.Photosynthetic activity and community shifts of microphytobenthos covered by green macroalgae[J]. Environmental Microbiology Reports,2012,4(3):316-25.

[10] PERROT T, ROSSI N, MÉNESGUEN A, et al. Modelling green macroalgal blooms on the coasts of Brittany, France to enhance water quality management[J].Journal of Marine Systems,2014,132(4):38-53.

[11] NELSON T A,NELSON A V,TJOELKER M.Seasonal and Spatial Patterns of “Green Tides”(Ulvoid Algal Blooms) and

Related Water Quality Parameters in the Coastal Waters of Washington State, USA[J]. Botanica Marina, 2003, 46(3): 263-75.

[12] DAHLGREN S, KAUTSKY L. Can different vegetative states in shallow coastal bays of the Baltic Sea be linked to internal nutrient levels and external nutrient load? [J]. Hydrobiologia, 2004, 514(1-3): 249-258.

[13] LOPES R J, PARDAL M Â, MARQUES J C. Impact of macroalgal blooms and wader predation on intertidal macroinvertebrates: experimental evidence from the Mondego estuary (Portugal)[J]. Journal of Experimental Marine Biology & Ecology, 2000, 249(2): 165-79.

[14] BEREZINA N A, TSIPLENKINA I G, PANKOVA E S, et al. Dynamics of invertebrate communities on the stony littoral of the Neva Estuary (Baltic Sea) under macroalgal blooms and bioinvasions[J]. Transitional Waters Bulletin, 2007, 1(1): 65-76.

[15] VIVAN V, JAMES M C, JENNIFER H, et al. Macroalgal blooms in shallow estuaries: Controls and ecophysiological and ecosystem con-sequences[J]. Limnology & Oceanography, 1997, 42(5 part 2): 1105-18.

[16] YE N, ZHUANG Z, JIN X, et al. China is on the track tackling *Enteromorpha* spp. forming green tide[J]. Nature Publishing Group, 2008, 2352(10): 1-10.

[17] 张晓雯,毛玉泽,庄志猛,等.黄海绿潮浒苔的形态学观察及分子鉴定[J].中国水产科学,2008,15(5):822-9.

[18] PAPAGEORGIOU G C. Chlorophyll a fluorescent: A signature of Photosynthesis[M]. Dordrecht: Springer, 2004: 279-319.

[19] 陈莲花,刘雷.叶绿素荧光技术在藻类光合作用中的应用[J].江西科学,2007,25(6):788-790.

[20] 王阳阳,霍元子,曹佳春,等.低温、低光照强度对扁浒苔生长的影响[J].中国水产科学,2010,17(3):593-599.

[21] 汤文仲,李信书,黄海燕,等.不同光强和温度对长石莼(缘管浒苔)光合作用和叶绿素荧光参数的影响[J].水产学报,2009,33(5):762-69.

[22] 曹佳春,吴青,张建恒,等.青岛海域漂浮浒苔光合生理特性及藻体状态等级评价研究[J].上海海洋大学学报,2013,22(6):922-7.

[23] 王建伟,阎斌伦,林阿朋,等.浒苔(*Enteromorpha prolifera*)生长及孢子释放的生态因子研究[J].海洋通报,2007,26(2):60-65.

[24] LESKINEN E, ALSTROM-RAPAPORT C, PAMILO P. Phylogeographical structure, distribution and genetic variation of the green algae *Ulva intestinalis* and *U. compressa* (Chlorophyta) in the Baltic Sea area[J]. Molecular Ecology, 2004, 13(8): 2257.

[25] 夏斌,马绍赛,崔毅,等.黄海绿潮(浒苔)暴发区温盐、溶解氧和营养盐的分布特征及其与绿潮发生的关系[J].渔业科学进展,2009,30(5):94-101.

[26] LIU F, PANG S J, CHOPIN T, et al. The dominant *Ulva*, strain of the 2008 green algal bloom in the Yellow Sea was not detected in the coastal waters of Qingdao in the following winter[J]. Journal of Applied Phycology, 2010, 22(5): 531-540.

[27] PEDERSON M F, BORUM J. Nutrient control of estuarine macroalgae: growth strategy and the balance between nitrogen requirements and uptake[J]. Marine Ecology Progress Series, 1997, 161: 155-163.

[28] 刘静雯,董双林,马甡.温度和盐度对几种大型海藻生长率和NH_4-N吸收的影响[J].海洋学报,2001,23(2):109-116.

[29] 高嵩,范士亮,韩秀荣,等.浒苔绿潮与南黄海近岸海域水质的关系[J].中国环境科学,2014,34(1):213-218.

[30] 张林慧,张建恒,赵升,等.2014年青岛海域消亡漂浮浒苔生理特征研究[J].上海海洋大学学报,2016,25(4):591-598.

[31] LONGSTAFF B J, KILDEA T, RUNCIE J W, et al. An in situ study of photosynthetic oxygen exchange and electron transport rate in the marine macroalga *Ulva lactuca* (Chlorophyta)[J]. Photosynthesis Research, 2002, 74(3): 281-93.

[32] CHOO K, SNOEIJS P, PEDERSÉN M. Oxidative stress tolerance in the filamentous green algae *Cladophora glomerata* and *Enteromorpha ahlneriana*[J]. Journal of Experimental Marine Biology & Ecology, 2004, 298(1): 111-23.

[33] CHOI T S, KANG E J, KIM J H, et al. Effect of salinity on growth and nutrient uptake of *Ulva pertusa* (Chlorophyta) from an eelgrass bed[J]. Algae, 2010, 25(1): 17-26.

[34] LU I F, SUNG M S, LEE T M. Salinity stress and hydrogen peroxide regulation of antioxidant defense system in *Ulva fasciata*[J]. Marine Biology, 2006, 150(1): 1-15.

[35] LIU D, KEESING J K, DONG Z, et al. Recurrence of the world's largest green-tide in 2009 in Yellow Sea, China: Porphyra yezoensis aquaculture rafts confirmed as nursery for macroalgal blooms[J]. Marine Pollution Bulletin, 2010, 60(9): 1423-32.

[36] IMLAY J A. Pathways of Oxidative Damage[J]. Annual Review in Microbiology, 2003, 57(1): 395-418.

[37] JINI D, JOSEPH B. Development of Salt Stress-Tolerant Plants by Gene Manipulation of Antioxidant Enzymes[J]. Asian Journal of Agricultural Research, 2011, 5(1): 17-27.