



## 2 青岛近岸浒苔暴发的原因

### 2.1 浒苔的生存条件

**2.1.1 温度。**研究表明,环境温度影响浒苔生长<sup>[6]</sup>。温度是控制浒苔生长速率和营养盐吸收的重要因子之一,因为温度通过控制光合作用和呼吸作用酶的活性,进一步控制对营养盐的吸收。在10~30℃的水体中浒苔可以存活,其中20~25℃为其最适宜生长的温度条件,尤其在24℃条件下浒苔的叶状体分枝明显增多;15~20℃生长较好,藻体保持鲜绿的颜色;26~32℃条件下,浒苔不能够长期正常生长,一段时间后藻体颜色有发黄趋势;大于32℃,浒苔会很快死亡。

**2.1.2 盐度。**浒苔对盐度有较广的适应范围,在盐度为10~40的海水中都能正常生长,在盐度为24~28时最适宜其生长。其中,在海水盐度为24时浒苔的生长达到了最大值。Dan等<sup>[7]</sup>的研究结果显示,浒苔生殖细胞成熟的盐度范围为5.0~52.0,孢子释放的盐度范围为13.2~45.3<sup>[8]</sup>,假根形成的盐度范围为1.6~52.0。

**2.1.3 光照。**研究结果显示,当光照强度大于9  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  浒苔开始生长<sup>[9]</sup>;当光照强度大于18  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,浒苔生长较为适宜;当光照强度为72  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,浒苔的生长达到极大值。

**2.1.4 营养物质。**浒苔的生长受到海水中氮、磷富营养物

质的影响,浒苔在生长过程中消耗大量的氮、磷营养盐,不同的氮磷比对浒苔的生长有一定的影响。氮磷比为10:1时,硝酸盐和磷酸盐的浓度下降较快。另外,不同的氮磷比在一定程度上能够反映浒苔生长受限营养盐的指标,低氮磷比意味着氮受限,而高氮磷比可能意味着磷受限,若确定限制因子的具体阈值,需要进一步通过试验来确定。

**2.2 浒苔暴发的原因分析** 浒苔在源头出现暴发是水体富营养化的结果,即限制浒苔生长的因素在短时间内得到满足的情况下发生的。该研究通过青岛地区的实际环境因素与浒苔生长条件对比,确定青岛地区浒苔暴发的原因。

**2.2.1 气温条件。**根据浒苔的生长条件和青岛市各月的气温可以发现(表1),在6、7、8月的气温不断升高,导致海水温度不断升高,浒苔在最适宜生长的温度范围内,这会促使浒苔的生长加快。但是,从2005~2009年同一时期的气温变化情况可以看出,近年青岛近岸浒苔暴发与当地的温度情况并无直接联系。

**2.2.2 降水情况。**由表2可知,2007和2008年6、7月份的降雨较往年相比明显增多,大量岸边的污染物通过径流进入近岸海域,增加了水体中有机物质含量,为浒苔生长提供养分条件,同时降水量的增加会降低海水的盐度,对浒苔生长起到了促进作用。

表1 2005~2009年青岛市各月平均气温情况

℃

年份	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
2005	-0.7	-0.9	4.7	12.5	16.5	22.3	25.2	24.3	21.5	16.4	11.5	0.4
2006	1.1	0.7	6.3	11.4	16.8	20.3	24.4	26.3	21.8	19.5	11.2	2.8
2007	0.9	5.0	7.0	12.3	18.5	20.6	24.0	25.6	22.3	16.1	9.5	3.6
2008	-1.1	0.5	7.0	11.5	16.0	19.4	24.3	25.1	21.7	17.4	9.7	3.0
2009	-0.2	3.5	6.1	11.7	18.2	21.6	23.8	25.1	22.0	18.3	6.3	1.5

表2 2005~2009年青岛市各月降水情况

mm

年份	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
2005	0	29.0	8.9	10.5	53.1	83.7	63.2	256.7	290.9	21.5	5.8	7.5
2006	9.0	7.7	2.8	31.4	65.2	52.5	142.5	119.2	2.3	1.1	25.8	30.6
2007	5.9	10.6	65.8	47.5	75.9	201.4	161.7	482.2	258.3	13.1	0	30.8
2008	10.6	7.4	16.2	62.6	77.1	49.7	370.0	205.4	30.2	71.9	24.5	7.6
2009	0.6	14.4	31.8	45.1	60.3	77.0	258.6	87.1	19.5	33.0	22.8	17.1

**2.2.3 水质情况。**根据近年来青岛市环境监测中心站对海岸线排放的污水进行的监测,检测指标符合海洋水质I类标准。其中,无机氮(以N计) $\leq 0.20 \text{ mg/L}$ ,非离子氨 $\leq 0.020 \text{ mg/L}$ ,活性磷酸盐(以P计) $\leq 0.015 \text{ mg/L}$ 。

通过上述分析可以得出,青岛近岸海域并没有给浒苔暴发提供适宜的环境条件,青岛近岸暴发的浒苔必然来自其他海域。梁宗英等<sup>[10]</sup>的研究也表明,青岛近岸暴发的浒苔由外海海域漂移而至。

**2.2.4 全球气候变化。**浒苔在我国沿海地区大规模的暴发与全球气候变化有着密切的联系。全球气候变暖导致海水温度的升高,海洋中动植物的分布区系由此发生变化。大型海洋藻类的一些种类,会因为需要适应新的温度条件和富营养化条件而出现暴发生长的现象,造成海洋生态灾难。自20世纪70年代中期以来,在全球气候变暖的大背景下,我国黄

海、东海海水表层温度一直呈上升趋势。其中,东海海水表层温度在80年代和90年代分别上升了0.6和0.7℃,平均每年上升0.087℃,而全球的每年平均升温幅度为0.014℃。随着西太平洋暖流向北的加强,台湾暖流和黑潮也会随之向北加强,到达长江口及其邻近海域,从而导致暖水种类的浮游植物北移到达长江口附近海域。2008年黄海浒苔大面积漂浮是在5月初最先被发现,并向青岛周边海域漂移,到6月初浒苔的分布面积达到12 900  $\text{km}^2$ ,直到7月中旬以后渐渐消退。黄海中南部海水温度在此期间的变化要比往年推迟12~14 d,达到22℃,而从6月10日开始约有15 d的海水温度维持在19~20℃,为浒苔的暴发生长提供了合适的温度条件和较长的生长时间。通过对比2003~2008年的MODIS卫星资料发现,黄海、东海SST春季升温一直处于较高水平,但在2008年5、6月,该区域的升温变得相对迟缓,较往年明显

偏低,为 19~20℃,尤其在发生浒苔漂浮的海域,这是浒苔生长的最适温度条件。7 月份以后,黄海、东海海域 SST 迅速上升,回到较高温度。但是,这种海水温度的特殊变化是在海洋水温上升的大背景下发生的,这对浒苔生长的机制具有重要的意义。

### 3 浒苔暴发的影响

每当浒苔出现时,以往人们只是意识到浒苔暴发的危害,盲目地进行打捞。然而,这却浪费掉了一次利用浒苔净化水质的机会,合理地处理浒苔具有重要的经济和社会效益。

#### 3.1 浒苔的有利影响

**3.1.1 改善水质。**浒苔生长消耗水体中大量的氮磷等营养物质,对改善水体中营养盐的含量及其结构有着重要的作用。根据东海分局有关资料,在连云港以南、射阳河口以北的  $2.4 \times 10^4$  km<sup>2</sup> 海域,为浒苔典型暴发海域。纪焕红等<sup>[11]</sup>利用该暴发海域浒苔前后所做的 2 个航次的调查结果,来分析浒苔对改善水质的贡献。Fujita 研究表明,浒苔藻体内的磷含量为 0.75% (DW),氮含量为 1.59% (DW)。Rvillares 通过对西班牙西北海岸的浒苔成分进行研究,发现其藻体中 C、N、P 的含量分别为 385、30.4、0.958 mg/g (DW)。2008 年青岛近岸浒苔暴发时,打捞出的浒苔约  $1.0 \times 10^7$  t (青岛近岸海域浒苔中的水分含量为 7.05%),初步估计吸收的氮磷分别有  $1.4 \times 10^5$  和  $7.0 \times 10^4$  t。

**3.1.2 吸收水体中无机碳。**海洋中的海藻及藻类光合作用吸收大气层中大量的 CO<sub>2</sub>,是抵御全球变暖的强有力武器。这要归于藻类较快的光合作用速率,一些海藻所吸收的二氧化碳数量比陆地植物吸收的 5 倍还要多。张继红等研究表明,2002 年我国人工养殖的海藻量达  $1.1 \times 10^6$  t (DW),每年大约有  $3.3 \times 10^5$  t 的碳从海水中移出<sup>[12]</sup>。浒苔藻体内含有丰富的碳水化合物,海水中的溶解性无机碳通过光合作用转化为有机碳,从而大大提高了海洋生态系统的固碳能力和初级生产力,海水中的二氧化碳的分压因此降低,这会使海水中的 pH 升高,进而促使大气中的二氧化碳向海洋中扩散,从而降低空气中二氧化碳的含量。

#### 3.2 浒苔暴发产生的危害

**3.2.1 对近岸生态环境的影响。**浒苔暴发后,对近岸的生态环境产生一系列的影响,如与其他海藻、浮游动物出现竞争,浒苔作为优势种,造成局部海域生物多样性降低;浒苔死亡后分解减小水体中溶解氧的浓度,从而导致水体表层和底层的物理、化学性质产生不利变化,降低底栖动物的多度,影响鱼类、海鸟的生存,减少了海洋生物资源。

**3.2.2 对近岸海上活动的影响。**大量的浒苔漂浮在海水表面,严重影响到了人们的海上活动。例如,2008 年北京奥运会青岛奥帆赛举办地所在海区的 1/3 曾被浒苔覆盖,若不及时清理,将严重影响青岛奥帆赛的顺利进行。此外,大量的浒苔积聚在海水表面,对作业渔船产生较大的影响,因为浒苔大暴发使藻体的厚度可以达到相当高的值,甚至可以支撑成年人。在这种情况下,作业船只的螺旋桨和船体易被浒苔

藻体缠绕,对船只安全造成严重的潜在威胁。同时,在这种情况下渔民捕鱼效率极低,很容易网到大量的浒苔,对渔网的破坏力也很大,使渔民遭受巨大的经济损失。

**3.2.3 对沿海养殖业的影响。**浒苔暴发是对紫菜养殖的主要威胁之一,浒苔有着极强的环境适应能力和繁殖能力,并且作为浒苔养殖架上的附着物与紫菜产生竞争,严重降低紫菜的品级率和产量。研究表明,浒苔在生长过程中分泌的一种克生类化合物能够抑制浮游植物的生长。浮游植物数量的减少可通过食物链进而对处于海洋食物链顶级的鱼类数量产生影响,从而使渔业资源减少。此外,浒苔在消亡过程中消耗水中大量的溶解氧,导致鱼类等生物窒息死亡。近年来,青岛近岸浒苔侵袭给胶南地区的鲍鱼、牙鲆鱼、海参养殖户带来了巨大的经济损失。

#### 4 应对浒苔暴发的对策

**4.1 建立浒苔灾害应急预案** 青岛近岸浒苔暴发事件使我们不得不重视海洋环境突发事件应急管理的重要性<sup>[13]</sup>。目前,人们尚不能杜绝浒苔暴发的情况下,为尽量减少青岛近岸受到浒苔灾害的威胁,构建青岛近岸浒苔灾害应急预案,建立应急队伍等措施显得尤为重要。

**4.2 确定浒苔合理的打捞时间** 浒苔在存活期间可以起到净化水质、防止赤潮发生的作用。但是处于消亡时期的浒苔厌氧分解会消耗水体的溶解氧,改变水体的物理和化学性质,对底栖生物和鱼类生存产生严重的影响。因此,合理地确定浒苔的打捞时间,最大限度地利用其优势,摒弃其危害显得十分重要。当对青岛近岸水域的海上景观要求较高时,则需要尽早的打捞浒苔,防止浒苔出现大发生。例如,2008 年奥运会青岛奥帆赛举办期间,需要杜绝浒苔在比赛区域漂浮,此时人们就需要及时地打捞,防止影响奥帆赛的正常举办。当人们对青岛近岸水域的景观要求不高时,可利用浒苔净化当地水质。浒苔在存活期间可以消耗水体中大量的氮磷等富营养物质,改善全球的碳循环。浒苔的生命周期一般在 15~20 d,可根据当地实际情况在浒苔消亡前对其进行打捞。

**4.3 浒苔作为生物资源的利用价值** 人们打捞出来的浒苔作为生物资源具有广阔的应用前景。浒苔营养丰富,蛋白质、糖类、脂肪、纤维、灰份含量分别为 19.5%、58.1%、0.3%、6.8%、15.3%,是高膳食纤维、高蛋白、低能量、低脂肪,且富含维生素和矿物质的天然理想营养饲料的原料<sup>[14]</sup>。以浒苔为原料生产海藻肥、养殖饲料等,具有广泛的开发潜力。同时,林英庭等<sup>[13]</sup>通过对青岛近岸海域浒苔藻体的营养成分、微量元素和重金属含量的分析发现,青岛近岸海域浒苔中重金属的含量明显低于其他海域,而微量元素的含量高于其他海域。

**4.3.1 加工成饲料。**浒苔是一种天然海藻,富含粗纤维,矿物质及蛋白质,且不含有天然生物毒素和次生有毒有害物质<sup>[14]</sup>,也不存在人为添加化学物质的可能,可直接晒干粉碎作为食物或饲料。同时,海藻粉中含有丰富的维生素 A、B、C 等营养物质和钾、钠等矿物质,这些物质不仅能够满足养殖

动物对维生素等营养素和微量元素的需求,还可以促进动物的发育,提高其免疫力。浒苔作为海藻类养殖饲料,用于水产养殖,能够有效地促进鱼、虾生长,提高产量和品质;用于家禽养殖,可使蛋黄中胆固醇的含量明显降低,提高蛋类的品质。周蔚等<sup>[15]</sup>研究发现,浒苔替代部分常规饲料饲喂肉兔,对肉兔的发育具有良好作用。

**4.3.2 加工成有机肥。**浒苔藻体中含有大量的氮磷营养物质,将浒苔与绿色垃圾混合发酵产出优质有机肥料。黄连光等指出,浒苔富含氮、磷、钾、有机质、微量元素,添加适当比例的污泥、麦草和鸡粪进行堆肥发酵与无害化处理,其处理结果均符合国家标准<sup>[16]</sup>。自青岛近海岸浒苔暴发后,中国海洋大学的专家就与有关企业研制相关技术设备用于浒苔降解、加工制备和多糖的提取,重点是浒苔在海藻肥的研究应用。

**4.3.3 作为生物能源。**浒苔死亡后,藻体发酵可产生甲烷。可将收集起来的浒苔压缩后投放到沼气池中发酵产生沼气,废渣可用作有机肥。人们还可以在浒苔中提炼出生物质油,复旦大学陈建民教授成功地将大海藻浒苔转化制成生物质油,从而使浒苔变废为宝,作为一种新能源的原材料。据介绍,在 220~320℃ 的水热条件下经过 10~30 min,可从 1 t 浒苔中提炼出 230 kg 的生物油。

**4.4 减少营养物质排海量** 近岸水域中氮、磷有着十分广泛的来源,如人们在日常生活中产生的生活垃圾以及工厂排放的工业污水。磷的主要来源是磷洗涤剂废水和在农田中被雨水冲刷的磷肥。预防浒苔灾害的发生,就要时刻保证人类活动排放污水的水质。

**4.4.1 洗涤剂禁磷。**目前,大部分洗涤剂废水中的磷以三聚磷酸钠的形式存在。我国每年大约有  $6 \times 10^5 \sim 7 \times 10^5$  t 的洗涤废水被排放到江河湖海,这已大大超出了水体的自净能力。通过洗涤剂禁磷可以控制洗涤剂污水中磷酸盐的含量,从而实现从源头上控磷,同时,这也是目前较简单、易行的控磷措施。通过洗涤剂禁磷可以最大限度地减少水体的磷负荷,有效缓解水体富营养化的问题。目前洗涤剂禁磷在我国沿海地区和内陆湖泊地区已经基本实现,缓解了我国水体水质的富营养化,若在全国范围内禁磷,则会更有利于水环境质量的提升。

**4.4.2 人工湿地法处理入海污水。**青岛近岸的浒苔能够长时间生长,说明水体中含有相当的富营养化物质,控制入海污水中氮磷等富营养化物质的含量对预防浒苔暴发和控制浒苔生长具有重要意义。近些年来,人工湿地法被用于处理富营养化的污水,人工湿地因其处理污水具有低投入、能耗低、高效率、易管理等优点,被广泛应用于各类水体的净化,如美国的 Apopka 湖<sup>[19]</sup>、英国伦敦的泰晤士河<sup>[20]</sup>。因此,可以通过人工湿地来进一步处理排入青岛近岸的污水,以控制浒苔的发生。然而,不同类型的人工湿地因其结构和运行方式的差异,在处理对象和处理效率方面存在一定的差异。目前的人工湿地法因其工艺结构的不同分为表面流、垂直流和潜流 3 种类型。就目前实际运行的人工湿地处理效果来看,

垂直流人工湿地对氨氮、总磷和总氮的处理效果最好<sup>[19]</sup>(平均去除效率分别可达到 33.2%、58.8%、52.3%),潜流人工湿地对叶绿素 a 和高锰酸钾指数的去除效果较好,表面流人工湿地对各种污染物的处理效果不及前两者。因此,可选择对富营养化物质处理效果最好的垂直流人工湿地。

## 5 结论

(1)青岛近岸暴发的浒苔并不来自于当地海域,而是来自黄海西北部距连云港以东 150 km 的海域。

(2)浒苔在生长期对水质具有净化作用,浒苔还是优质的生物资源和能源的原材料;处于消亡期的浒苔厌氧分解消耗水体中溶解氧,改变表层和底层水体的物理化学性质,对海洋生态系统、海上活动和海水养殖业造成严重影响。

(3)MODIS 遥感确定浒苔漂移路线对青岛近岸浒苔暴发具有重要预警作用,建立浒苔灾害的应急机制同样不可或缺;确定合理的打捞时间对应对浒苔灾害具有重要意义,人工湿地法处理入海污水是预防浒苔暴发的重要举措;青岛近海岸浒苔的暴发看似是偶然,其实是在全球气候变化和人类活动的影响下必然发生的。所以,在源头上预防浒苔的发生更为重要。这就要求人们在日常生产生活中的排放做到低磷、低氮、低碳。

## 参考文献

- [1] 丁爱秀. 山水风景与城市设计[D]. 天津:天津大学,2010.
- [2] 王婷. 浒苔对苏北近岸海域水质影响的初步研究[D]. 青岛:中国海洋大学,2011.
- [3] 李震. 青岛近海浒苔的污染与预防治理[J]. 海洋开发与管理,2010,27(9):42-43.
- [4] 乔方利,马德毅,宋明远,等. 2008 年黄海浒苔暴发的基本状况和科学应对措施[J]. 海洋科学进展,2008,26(3):409-410.
- [5] LOTZE H K, SCHRAMM W, SCHORIES D, et al. Control of macroalgal blooms at early developmental stages[J]. Oecologia,1999,119:46-54.
- [6] 王健伟,阎斌伦,林阿朋,等. 浒苔生长及孢子释放的生态因子研究[J]. 海洋通报,2007,26(2):61-65.
- [7] DAN A, HIRAOKA M, OHNO M, et al. Observations on the effect of salinity and photon fluence rate on the *Enteromorpha prolifera* [J]. Fisheries Science,2003,68:1182-1188.
- [8] 田千桃,霍元子,张寒野,等. 浒苔和条浒苔生长及其氨氮吸收动力学特征研究[J]. 上海海洋大学学报,2010,19(2):252-258.
- [9] 王健伟,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):61-65.
- [10] 梁宗英,林祥志,马牧,等. 浒苔漂流聚集绿潮现象的初步分析[J]. 中国海洋大学学报,2008,38(4):601-604.
- [11] 叶属峰,纪斌红,曹恋,等. 长江口海域赤潮成因及其防治对策[J]. 海洋科学,2004,28(5):26-31.
- [12] 张继红,方建光,唐启升. 中国浅海贝藻养殖对海洋碳循环的贡献[J]. 地球科学进展,2005,20(3):53-57.
- [13] 宋宁而,王琪. 从国外浒苔治理经验看海洋环境应急管理中社会组织的重要性[J]. 海洋开发与管理,2010,27(9):34-40.
- [14] 关洪斌,王晓兰,高秀莹,等. 4 种实用配方饲料对锦鲤诱食活性和生长的影响[J]. 资源开发与市场,2011,27(9):776-779.
- [15] 林英庭,朱风华,徐坤,等. 青岛海域浒苔营养成分分析与评价[J]. 饲料工业,2009,30(3):46-69.
- [16] 庞国兴,陈长法,陈欣,等. 浒苔饲料产业化技术研究[J]. 饲料工业,2009,30(23):43-44.
- [17] 周蔚,徐小明,嵇珍,等. 浒苔用作肉兔饲料的研究[J]. 江苏农业科学,2001(6):68-69.
- [18] 黄连光,石艳玲,徐中平. 浒苔制作有机肥研究[J]. 安徽农业科学,2010,38(23):12888-12890.
- [19] MAYS P A, EDWARDS G S. Comparison of heavy metal accumulation in a natural wetland and constructed wetlands receiving acid mine drainage [J]. Ecological Engineering,2001,16(4):487-500.
- [20] 籍国东,孙铁珩,常士俊. 自由表面流人工湿地处理超稠油废水[J]. 环境科学,2001,22(4):96-99.
- [21] 聂志丹,年跃刚,金相灿,等. 3 种类型人工湿地处理富营养化水体中试比较研究[J]. 环境科学,2007,28(8):1675-1680.