

韩露, 邓雪, 李培峰, 等. 海水温度对衰亡期浒苔释放生源硫影响的模拟研究[J]. 海洋学报, 2018, 40(10): 110—118, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2018.10.011

Han Lu, Deng Xue, Li Peifeng, et al. Effects of temperature on biogenic sulfur production of *Ulva prolifera* during the decline period [J]. *Haiyang Xuebao*, 2018, 40(10): 110—118, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2018.10.011

# 海水温度对衰亡期浒苔释放生源硫影响的模拟研究

韩露<sup>1,2</sup>, 邓雪<sup>1,2</sup>, 李培峰<sup>1</sup>, 高先池<sup>1\*</sup>, 刘春颖<sup>1,2</sup>

(1. 中国海洋大学 化学化工学院, 山东 青岛 266100; 2. 中国海洋大学 海洋化学理论与工程技术教育部重点实验室, 山东 青岛 266100)

**摘要:** 为研究浒苔释放生源硫的特征, 本文对采集于黄海绿潮中期和末期的浒苔进行了实验室模拟培养, 探讨了不同温度对衰亡期浒苔释放生源硫化物的影响。实验结果表明, 在 10~25℃ 温度范围内, 温度升高能够加速浒苔的衰亡。二甲基硫(DMS)的平均释放速率范围为 2.79~150.70 nmol/(L·g·d), 二甲基巯基丙酸内盐(DMSP)的平均释放速率范围为 2.16~113.26 nmol/(L·g·d)。温度升高能够使 DMS 和 DMSP 的释放速率加快, 释放量增加, DMS 最大平均释放速率在 25℃ 条件下比 10℃ 条件下升高了约 60%, 培养液中 DMS 浓度升高了 2~3 倍。采集于绿潮末期的浒苔培养液中的 DMS 和 DMSP 和采集于绿潮中期的浒苔相比, 浓度有所增加, 采集于浒苔绿潮末期浒苔培养液中 DMS 的最高平均浓度为 418.41 nmol/L, 约为中期的 4 倍; DMSP 的最高平均浓度为 316.14 nmol/L, 是中期的 3 倍。浒苔绿潮的爆发会对水体中的硫体系循环产生影响, 进而影响该海域生态环境。

**关键词:** 浒苔; 衰亡; 温度; 二甲基硫; 二甲基巯基丙酸内盐

中图分类号: Q178.1

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2018)10-0110-09

## 1 引言

大型海洋绿藻大量增殖并引发其在浅海区和潮间带生物量大量积累的异常生态现象被称为绿潮<sup>[1]</sup>。2007 年以来, 我国黄海海域连续多年暴发了大规模的绿潮。浒苔(*Ulva prolifera*)作为绿潮主要肇事藻和释放二甲基硫(DMS)的优势藻种<sup>[2-3]</sup>, 对生源硫的释放及海洋生态环境的影响引起了研究者的关注。浒苔, 属于绿藻门、石莼目、石莼科<sup>[4]</sup>, 是一种分布广泛、广温广盐、繁殖能力极强的一种大型绿藻<sup>[5-7]</sup>。

近年来研究表明, 南黄海的苏北浅滩的紫菜养殖区域是黄海海域绿潮暴发的源头<sup>[8]</sup>, 养殖区内丰富的

营养盐以及数量众多的紫菜养殖架为浒苔的生长提供了良好的环境<sup>[9]</sup>。每年的 3—4 月的紫菜收割时期, 随着养殖区的紫菜收割, 大量的浒苔被剔落漂浮于海面, 此时为浒苔绿潮暴发的早期阶段<sup>[10]</sup>。根据 2017 年国家海洋局北海分局的卫星观测数据显示 (<http://www.ncsb.gov.cn/>), 漂浮的浒苔在风力流场等作用下从南黄海向北移动, 且分布规模及覆盖海域面积不断扩大, 6 月下旬达到最大规模, 并到达青岛、日照等沿海城市, 最大覆盖规模达到 312 km<sup>2</sup>, 这一阶段为绿潮暴发的中期阶段。6 月下旬开始, 浒苔绿潮面积开始减小并逐渐消失, 直至 7 月中下旬完全消失, 此阶段为浒苔绿潮暴发的末期阶段。

收稿日期: 2018-03-23; 修订日期: 2018-06-13。

基金项目: 国家自然科学基金 (41676065); 国家重点研发计划 (2016YFA0601301); 高校自主基金 (201762032)。

作者简介: 韩露 (1993—), 女, 山东省枣庄市人, 从事海洋化学研究。E-mail: hanlu8925@163.com

\* 通信作者: 高先池 (1962—), 男, 山东省荣成市人, 硕士, 高级工程师, 从事海洋化学研究。E-mail: gaoxch@ouc.edu.cn

浒苔在整个生命过程中对海水中的硫循环会产生影响<sup>[11]</sup>。浒苔吸收海水中的硫酸盐并在体内同化还原生成二甲基巯基丙酸内盐(DMSP),DMSP在体内能起到调节藻体细胞渗透压,充当低温下冷冻保护剂等作用,是藻类的重要硫代谢产物之一<sup>[12-13]</sup>。释放出来的DMSP除了充当细菌的碳源和硫源,主要通过两种途径降解,一是通过微生物和藻类产生的DMSP裂解酶降解产生二甲基硫(DMS)和丙烯酸<sup>[14]</sup>,二是进行去甲基化反应,在载体(如四氯化叶酸)和酶的作用下生成MMPA(3-methiolpropionate),MMPA再分解成为甲硫醇和丙烯酸盐。其中,DMS是海水中重要的有机生源硫化物,海洋每年向大气中排放的DMS约占全球海洋硫释放总量的2/3,由海洋进入大气的DMS能与空气中的NO<sub>3</sub>、OH、IO等自由基反应,最终生成非海盐硫酸盐,成为硫酸盐气溶胶的主要来源,进而对全球的环境和气候产生重要影响<sup>[15-16]</sup>。Carlson等<sup>[17]</sup>在1987年提出了“CLAW假说”,描述了DMS的排放与全球气候变化之间可能存在的负反馈过程。DMS在大气中的氧化产物还会对酸雨的形成产生重要影响。

目前浒苔衰亡期释放生源硫对水体的影响还未得到深入的研究。本研究对采集于绿潮不同阶段的浒苔进行实验室模拟培养,测定培养过程中水体中DMS和DMSP的浓度,探讨了不同温度对衰亡期浒苔释放生源硫的影响,以期了解绿潮暴发期间物质的迁移转化规律,为研究绿潮对海洋生态环境的影响提供参考依据。

## 2 材料与方法

### 2.1 实验材料

实验浒苔:(1)2017年6月于青岛石老人海水浴场附近收集的新鲜浒苔(浒苔处于绿潮暴发中期),经生物鉴别确定为浒苔,并从中挑选出生理状态较为完好的浒苔。实验前,将其置于经0.22 μm醋酸纤维滤膜过滤后的自然海水中,并在黑暗条件下将其饥饿培养3 d。(2)2017年7月于青岛第二海水浴场收集的新鲜浒苔(浒苔处于绿潮暴发末期),处理方式同上。

实验用海水:采用青岛石老人海域天然海水,并经过0.22 μm的醋酸纤维滤膜过滤,用于培养浒苔。

### 2.2 实验方案

根据浒苔的适宜生长温度(10~25℃)<sup>[10]</sup>和南黄海春、夏季的水温,设置4种不同的温度条件,分别

为10℃,15℃,20℃和25℃。每个组设置两个平行组,且每组设置一个无浒苔的空白对照实验。

**培养方式:**将上述饥饿培养后的浒苔藻体用200目的滤网过滤,并用吸水纸充分吸干藻体上的水分,用电子天平(Scout SE-SE602F,常州奥豪斯仪器厂)称重( $4.00 \pm 0.01$ )g,放入装有4 L已灭菌海水(高压灭菌锅,LDZX-50KBS,上海申安医疗器械厂)的锥形瓶中,并根据f/2<sup>[18]</sup>配方添加营养液;空白对照组除不加入浒苔外,均与实验组条件一致。

**培养条件:**将4个光照培养箱(GXZ-3808/3008,宁波江南仪器厂)的培养温度分别设置为(10±0.5)℃,(15±0.5)℃,(20±0.5)℃和(25±0.5)℃,光暗比为12 h:12 h,光照密度为74 μmol/(m<sup>2</sup>·s)。

**取样分析:**连续培养20 d,在培养期间不换水,并在培养期间的第0、5、10、15和20天的上午9:00定时取样。测定浒苔的湿质量、培养液中DMS和DMSP含量。

### 2.3 测定方法

**浒苔湿质量的测定:**用200目的滤网对浒苔进行过滤,并用吸水纸充分吸干藻体上的水分,用分析天平进行称重,并记录培养过程中浒苔湿质量变化<sup>[19]</sup>。

**DMS的测定:**取2 mL培养液样品于洁净干燥的10 mL血清瓶中,并立即加盖密封。测定时,首先用高纯氮气对样品进行吹扫,使血清瓶内样品中的DMS吹出,经干燥管干燥后富集于浸没在液氮冷阱内的捕集管中,定时吹扫3.5 min。将捕集管从冷阱中拿出后迅速加热以解析出富集的DMS,使得释放出的DMS随载气进入气相色谱仪(GC-6850,美国安捷伦公司),经过火焰光度检测器(FPD)进行检测,记录峰面积,并通过工作曲线计算出海水样品中的DMS浓度。此方法的检出限为0.4 nmol/L,精密度为5%<sup>[20]</sup>。

**DMSP的测定:**DMSP在强碱(pH>13)的作用下能够按照1:1的比例降解为DMS和丙烯酸(AA),因此可以通过测定DMS的浓度间接的测定DMSP的浓度<sup>[21]</sup>。取4 mL培养液样品,于样品中添加40 μL 50%浓硫酸进行酸化后冷藏密封保存24 h。测定时,首先向样品中加入200 μL浓度为10 mol/L的KOH溶液,并进行密封,在冷藏条件下碱解24 h,使DMSP完全碱解为DMS,然后按照测定DMS的方法间接测定样品中DMSP的浓度。

### 3 实验结果

#### 3.1 温度对绿潮中期浒苔释放生源硫的影响

##### 3.1.1 浒苔的生长变化

不同温度条件下浒苔在各阶段的湿质量变化如图 1 所示,从图中可以看出,在低温即 10℃ 和 15℃ 条件下,浒苔的湿质量略有增长,但变化不明显;在温度为 20℃ 和 25℃ 条件下,浒苔湿质量呈下降趋势,且培养结束时,大部分浒苔已无生命力,部分藻体已处于白化甚至腐烂状态,说明浒苔处于衰亡状态。

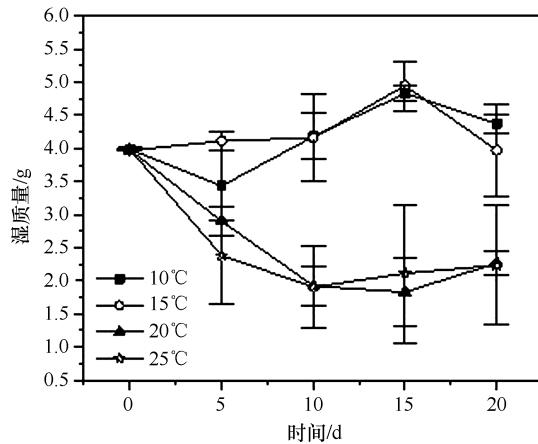


图 1 绿潮中期浒苔在不同温度条件下的湿质量变化

Fig.1 The variations of wet weight of *Ulva prolifera* at different temperatures during the middle of the green tide

##### 3.1.2 DMS 和 DMSP 的变化

在扣除空白对照组中的本底值之后(下同),培养液中 DMS 浓度变化如图 2a 所示。4 组海水样品中 DMS 的浓度变化范围分别为 10.51~123.32(平均为 54.18, 下同)、15.34~164.80(82.88)、10.20~137.60(97.24)、7.20~158.44(109.77) nmol/(L·g)。在不同温度条件下,DMS 浓度的变化趋势基本一致,呈现出先增大后减小的变化趋势,在第 10~15 天时的释放量达到最高值,且每个温度条件下均有一个 DMS 的快速释放期,即 DMS 的浓度迅速达到一个高值。

培养期间各组 DMSP 浓度的变化如图 2b 所示,在 0~5 天内 DMSP 的浓度有降低的趋势,5~10 天内 DMSP 浓度快速增大,从第 10 天开始浓度逐渐降低。总体上 DMSP 的浓度比初始值有较大的提高,第 5 天之后呈现出先增大后减小的趋势,随着浒苔藻体的衰亡 DMSP 快速大量的释放到水体。4 个组的海水样品中培养液中 DMSP 浓度的变化范围分别为 18.59~54.00(42.17)、24.14~121.19(60.54)、26.90~173.72(92.48) 和 38.45~187.41(100.10) nmol/(L·g)。DMSP 释放量与温度呈正相关关系,表明温度升高可以加速浒苔的衰亡,使藻体内的 DMSP 大量释放到水体当中。且温度的升高增强了 DMSP 裂解酶的活性,使大量的 DMSP 降解为 DMS<sup>[22~23]</sup>。这和 DMS 在温度高的条件下释放量高且释放速率快的现象相一致。

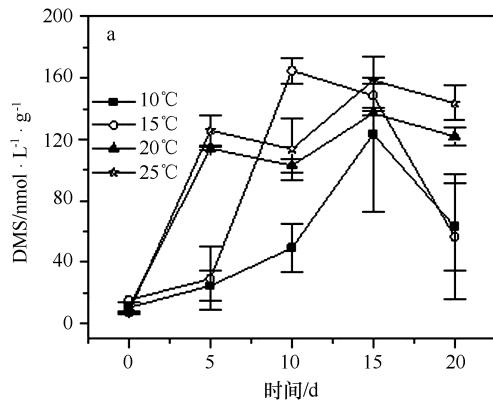


图 2 绿潮中期浒苔在不同温度条件下释放 DMS (a) 和 DMSP (b) 的变化趋势

Fig.2 Concentrations of DMS (a) and DMSP (b) at different temperatures during the middle of the green tide

为进一步探讨温度对衰亡期浒苔释放生源硫的影响,我们计算出每段取样间隔内 DMS 和 DMSP 的平均释放速率(其中,正值表示释放速率,负值表示消耗速率,本文仅对释放过程进行探讨,因此对负值不

做过多讨论,下同)。培养液中 DMS 平均释放速率变化如图 3a 所示,4 组海水样品中 DMS 的平均释放速率的变化范围为 2.84~14.82(7.52)、2.79~27.11(14.95)、6.8~20.75(13.77) 和 8.96~23.74(16.35)

nmol/(L·g·d)。4组海水样品中DMS的最大平均释放速率分别为14.82、27.11、20.75和23.74 nmol/(L·g·d),DMS最大平均释放速率在25℃条件下比10℃条件下提高了约60%。不同温度条件下,DMS的快速释放期也有差别,10℃条件下,DMS的快速释放期在第10~15天;15℃条件下DMS快速释放期在第5~10天;20℃和25℃条件下DMS的快速释放期在前5天,显而易见,DMS的快速释放期随温度的升高而提前出现。

培养液中DMSP平均释放速率变化如图3b所示,不同条件下水样中的DMSP均在第5~10天快速释放,4组海水样品中DMSP的最大平均释放速率分别为7.08、19.41、29.36和29.79 nmol/(L·g·d),释放速率与温度有正相关关系,25℃条件下的DMSP平均释放速率约为10℃条件下的4倍。

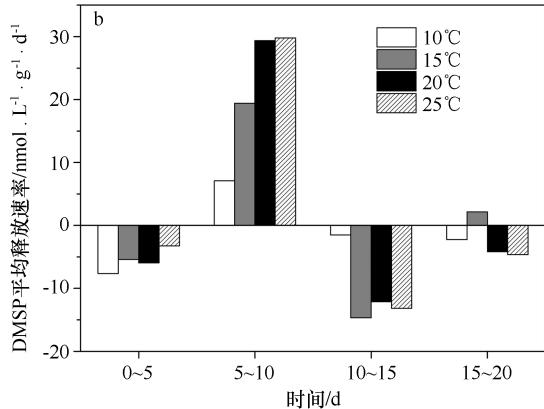
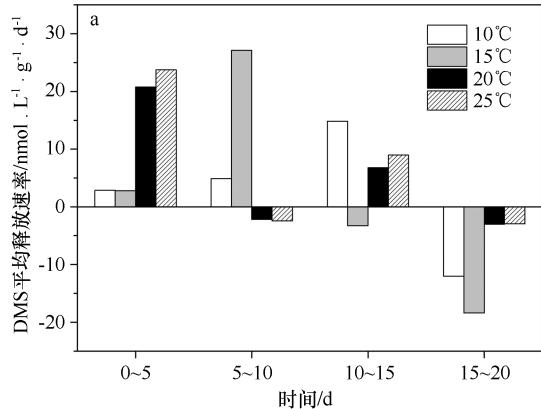


图3 绿潮中期浒苔在不同温度条件下释放DMS(a)和DMSP(b)的变化趋势

Fig.3 Releasing rate of DMS (a) and DMSP (b) at different temperatures during the middle of the green tide

### 3.2 温度对绿潮末期浒苔释放生源硫的影响

#### 3.2.1 浒苔的生长变化

不同温度条件下浒苔在各阶段的湿质量变化如图4所示。在培养的前5天,绿苔湿质量略有增长,5天后湿质量呈现下降趋势,虽然在第10~15天湿质量有略微增长的浮动,但此时浒苔的生理状态已经表现为白化并开始腐烂。因此浒苔湿质量的总体趋势是呈下降状态的,且随着温度的升高湿质量下降越快。此时的浒苔正处于绿潮爆发末期,说明高温可以加速浒苔的衰亡。

#### 3.2.2 DMS 和 DMSP 的变化

培养期间各组DMS浓度变化趋势如图5a所示。4组海水样品中DMS的浓度变化范围分别为12.37~267.95(103.25)、34.16~1150.28(418.41)、32.03~981.54(319.99)和33.39~1115.00(318.33) nmol/(L·g)。DMS的浓度变化趋势和采集于绿潮中期浒苔的DMS浓度变化趋势基本一致,呈现出先增大后减小的趋势,在第10~15天的释放量达到最高值,释放量和温度大致呈正相关关系。和采集于绿潮中期的浒苔相比,DMS释放量大大增加,在10℃条件下,

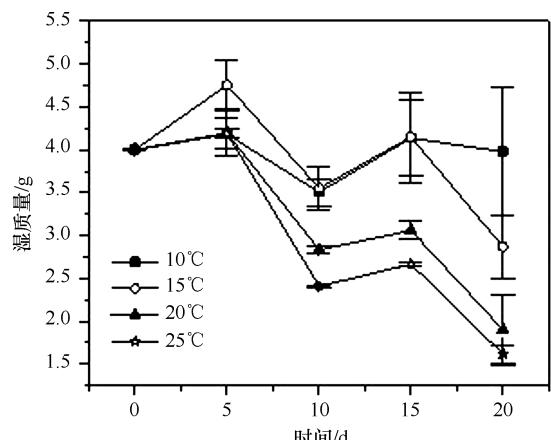


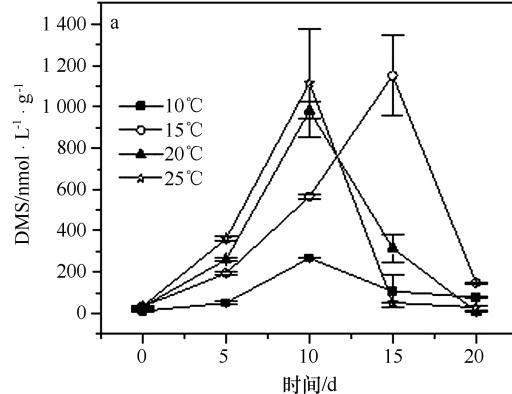
图4 绿潮末期浒苔在不同温度条件下的湿质量变化

Fig.4 The variations of wet weight of *Ulva prolifera* at different temperatures during the end of the green tide

采集于绿潮末期的浒苔培养液中DMS最高浓度是绿潮中期的2倍,在15、20和25℃条件下,绿潮末期浒苔培养液中的DMS最高浓度分别是中期的5倍、3倍和3倍。

培养期间各组DMSP浓度变化趋势如图5b所

示。4组海水样品中 DMSP 的浓度变化范围分别为  $25.31 \sim 461.07$  ( $184.78$ )、 $63.93 \sim 689.21$  ( $316.14$ )、 $48.46 \sim 454.34$  ( $298.03$ ) 和  $63.93 \sim 499.89$  ( $291.59$ )  $\text{nmol}/(\text{L} \cdot \text{g})$ 。DMSP 的浓度同样呈现先增大后减小的趋势,  $10^\circ\text{C}$  和  $15^\circ\text{C}$  条件下在第 15 天达到最高值,



$20^\circ\text{C}$  和  $25^\circ\text{C}$  条件下在第 10 天达到最高值。浓度变化的大致趋势同采集于绿潮中期浒苔的变化规律一致,但是采集于绿潮末期的 4 组浒苔培养液中 DMSP 的最高浓度分别是采集于绿潮中期浒苔的 4 倍、5 倍、3 倍和 3 倍。

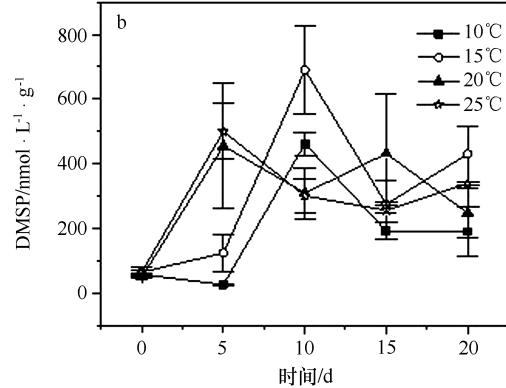


图 5 绿潮末期浒苔在不同温度条件下释放 DMS (a) 和 DMSP (b) 的变化趋势

Fig.5 Concentrations of DMS (a) and DMSP (b) at different temperatures during the end of the green tide

DMS 在每个取样间隔时间内的平均释放速率如图 6a 所示。在培养期间的第 0~10 天, DMS 的释放速率均为正值, 除  $15^\circ\text{C}$  条件下在第 10~15 天内释放速率最大外, 其余 3 组均在第 5~10 天内释放速率最大。4 组海水样品中 DMS 的最大平均释放速率分别为  $43.45$ 、 $116.94$ 、 $144.36$  和  $150.70$   $\text{nmol}/(\text{L} \cdot \text{g} \cdot \text{d})$ , 随温度的升高 DMS 的释放速率有加快的趋势。相比较采集于绿潮中期浒苔的 DMS 最大平均释放速率, 采集于绿潮末期的浒苔在不同温度下的 DMS 最大平均释放速率分别约为中期的 3 倍、4 倍、7 倍和 6 倍,

各组的最大释放速率较中期均明显升高。

DMSP 在每个取样间隔时间内平均释放速率如图 6b 所示。 $10^\circ\text{C}$  和  $15^\circ\text{C}$  条件下的浒苔在第 5~10 天内 DMSP 的释放速率最大, 而在  $20^\circ\text{C}$  和  $25^\circ\text{C}$  条件下, 在培养的前 5 天释放速率就已经达到最大, 说明温度的升高有利于藻体释放 DMSP。4 组 DMSP 的最大平均释放速率分别为  $87.15$ 、 $113.26$ 、 $81.18$  和  $87.19$   $\text{nmol}/(\text{L} \cdot \text{g} \cdot \text{d})$ , 较处于绿潮中期浒苔的 DMSP 最大平均释放速率也有明显的升高, 分别约为中期的 12 倍、6 倍、3 倍和 3 倍。

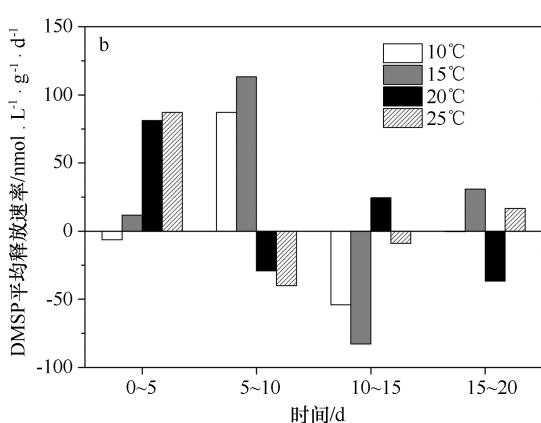
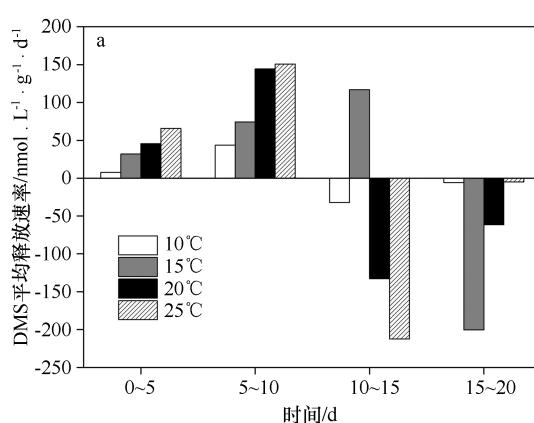


图 6 绿潮末期浒苔在不同温度条件下释放 DMS (a) 和 DMSP (b) 的变化趋势

Fig.6 Releasing rate of DMS (a) and DMSP (b) at different temperatures during the end of the green tide

## 4 讨论

引发绿潮的浒苔来自于江苏沿岸海域<sup>[24-25]</sup>,受海流及风力影响每年于6月登陆青岛,在青岛海域及潮间带堆积的浒苔基本已达到衰亡期,7月开始绿潮面积减小直至消失<sup>[26]</sup>,取样时在青岛近海堆积的浒苔已经或者开始处于衰亡期。因此在营养盐、光照、温度等适宜的条件下没有出现生长状态。绿潮暴发期间,浒苔吸收了海水中大量的生源要素,并在体内储存营养物质。在浒苔衰亡期间,随着藻体的不断分解腐烂,不仅会消耗水体中大量的氧气,还会将大量生源要素释放至水体当中,必然会对水体及生态环境造成影响<sup>[27-28]</sup>。

通过实验室模拟培养,我们发现,浒苔在衰亡期间释放DMS和DMSP的量远远高于生长期。Nguyen等<sup>[29]</sup>在对几种藻类的研究中发现,处于衰亡期的骨条藻的DMS释放量是其在生长期释放量的7倍,甲藻在衰亡期的DMS释放量比其在生长期的释放量高24倍。这是因为在藻类的生长期,DMSP不断在藻体细胞内合成积累,但由于细胞膜的选择透过性,因此并不能将DMSP大量释放至水体中。而处于衰亡期的藻体细胞则十分容易破裂,将体内积累的DMSP释放至水体,并在微生物等的作用下进一步降解产生DMS。

在对绿潮中期浒苔的培养实验中,水体中DMS的最高浓度达到164.80 nmol/L,DMSP的最高浓度达到187.41 nmol/L,远远高于正常海水中二者的浓度。在对绿潮末期浒苔的培养实验中,水体中DMS的最高平均浓度为418.41 nmol/L,DMSP的最高平均浓度为316.14 nmol/L,分别比绿潮中期的水体中高出4倍和3倍,更是远高于正常海水中DMS和DMSP的浓度<sup>[30]</sup>。许高宾<sup>[31]</sup>于2015年浒苔绿潮暴发时期和暴发之后的两个时期,对青岛近海海域的现场调查结果表明,海水中浒苔暴发中后期的DMSP<sub>t</sub>的释放浓度约是绿潮暴发前海水中的2~3倍,DMSP<sub>d</sub>浓度约为绿潮暴发前的2倍,DMS浓度约为绿潮暴发前的4~6倍。实验室内模拟培养结果与现场数据相吻合。

因此,浒苔在衰亡期间会引起海水中DMS和DMSP的累积,水体中高浓度的DMS可释放到大气中,进一步影响该区域硫的海气通量,其在空气中的氧化产物还是形成酸雨的重要原因之一<sup>[32]</sup>。另外,DMS在大气中发生氧化反应生成SO<sub>2</sub>和甲基磺酸盐

(MSA),再通过同相或异相反应生成非海盐硫酸盐(nss-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>),形成气溶胶,可以增加大气中云凝结核(CCN)数量。很多研究调查研究表明大气中的DMS,nss-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、MSA和CCN之间有相同的变化趋势,并且发现在南大西洋和北太平洋上空有40%~50%的CCN的浓度变化可以通过DMS解释,DMS对CCN的贡献非常显著<sup>[33-34]</sup>。

两组实验中,DMS和DMSP的释放量和释放速率均与温度呈正相关关系。由于DMS不能由浮游植物直接产生,而是通过酶裂解、自溶解等方式由DMSP裂解为DMS,温度的变化可以影响DMSP裂解酶的活性<sup>[35-37]</sup>。因此,温度升高不仅会加速浒苔藻体的衰亡,使藻体内的DMSP释放到水体中,也能增加DMSP裂解酶的活性,使DMSP分解为DMS。在绿潮暴发期间,尤其是绿潮暴发末期通常为每年的7~8月,此时水温不断升高,超过浒苔生长的最适温度,浒苔藻体会逐渐分解消散,在此期间会导致大量的DMS和DMSP等生源硫化物的释放。据实验室内模拟培养测得的DMS的平均释放速率,以及国家海洋局北海分局统计的青岛近海打捞浒苔质量粗略估算,黄海浒苔绿潮爆发期间对DMS的释放总量已达1 300 t,DMSP的释放总量达3 000 t,而实际还有更多藻体在水体中分解,未被打捞。丁月曼<sup>[11]</sup>的研究估算出浒苔绿潮爆发期间迁移了约1.6万t硫。因此绿潮暴发对整个暴发海域的生源硫释放出大量的生源硫,足以影响该海域硫体系的循环,进而影响海洋生态环境。

## 5 结论

(1)在10~25℃范围内,处于绿潮中期和末期的浒苔几乎没有明显增长,温度升高会使其湿质量减小更快,说明温度升高会加速浒苔的衰亡。

(2)处于绿潮中期的浒苔,DMS和DMSP在10℃条件下释放量最小,释放速率最低,DMS和DMSP平均浓度分别为54.18 nmol/(L·g)和42.17 nmol/(L·g)。25℃条件下DMS和DMSP释放速率最快且释放量较高,DMS和DMSP平均浓度分别为109.77 nmol/(L·g)和100.10 nmol/(L·g)。说明培养体系中温度的升高会促进浒苔衰亡并释放大量的生源硫化物。

(3)处于绿潮末期的浒苔与绿潮中期的浒苔,释放DMS和DMSP的规律一致,但释放量远远高于中期。水体中DMS的最高平均浓度为418.41 nmol/L,

约为中期的 4 倍;DMSP 的最高平均浓度为 316.14 nmol/L,是中期的 3 倍。说明绿潮暴发末期,浒苔对生源硫的释放量巨大,使水体中的 DMS 和 DMSP 在

一定时间范围内都维持在相当高的水平,对水体中生源硫的循环有重大影响。

## 参考文献:

- [1] Charlier R H, Morand P, Finkl C W, et al. Green tides on the Brittany coasts[J]. Environmental Research, Engineering and Management, 2007, 3(41): 52—59.
- [2] Wang Wenjun, Wang Feijiu, Chen Songlin, et al. PCR amplification and sequence analysis of ITS regions of *Enteromorpha prolifera*[J]. Marine Fisheries Research, 2008, 29(5): 124—129.
- [3] Liu Dongyan, Keesing J K, Dong Zhijun, 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—1432.
- [4] 钱树本, 刘东艳, 孙军. 海藻学[M]. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2005: 529.  
Qian Shuben, Liu Dongyan, Sun Jun. Marine Phycology[M]. Qingdao: China Ocean University Press, 2005: 529.
- [5] Wang X K, Ma J H, Ye D C, et al. Preliminary study on the life history of *Enteromorpha prolifera*[J]. Marine Science Bulletin, 2007, 26(5): 112—116.
- [6] Liu Feng, Pang Shaojun, Xu Na, et al. *Ulva* diversity in the Yellow Sea during the large-scale green algal blooms in 2008—2009[J]. Phycological Research, 2010, 58(4): 270—279.
- [7] Luo Minbo, Liu Feng. Salinity-induced oxidative stress and regulation of antioxidant defense system in the marine macroalgae *Ulva prolifera*[J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2011, 409(1/2): 223—228.
- [8] Liu Feng, Pang Shaojun, Zhao Xiaobo, et al. Quantitative, molecular and growth analyses of *Ulva* microscopic propagules in the coastal sediment of Jiangsu province where green tides initially occurred[J]. Marine Environmental Research, 2012, 74: 56—63.
- [9] Liu Dongyan, Keesing J K, He Peimin, et al. The world's largest macroalgal bloom in the Yellow Sea, China: Formation and implications[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2013, 129: 2—10.
- [10] 刘峰, 逄少军. 黄海浒苔绿潮及其溯源研究进展[J]. 海洋科学进展, 2012, 30(3): 441—449.  
Liu Feng, Pang Shaojun. Research advances on green tides in the Yellow Sea[J]. Advances in Marine Science, 2012, 30(3): 441—449.
- [11] 丁月曼. 黄海浒苔绿潮中生源要素的迁移转化及对生态环境的影响[D]. 青岛: 中国科学院研究生院海洋研究所, 2014.  
Ding Yuemin. Impacts of *Ulva (Enteromorpha) prolifera* in the green tide on the Yellow Sea ecological environment—Implications from migration and transformation of biogenic elements[D]. Qingdao: Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2014.
- [12] Sunda W, Kieber D J, Kiene R P, et al. An antioxidant function for DMSP and DMS in marine algae[J]. Nature, 2002, 418(6895): 317—320.
- [13] Karsten U, Kück K, Vogt C, et al. Dimethylsulfoniopropionate Production in Phototrophic Organisms and its Physiological Functions as a Cryoprotectant[M]//Kiene R P, Visscher P T, Keller M D, et al. Biological and Environmental Chemistry of DMSP and Related Sulfonium Compounds. Boston, MA: Springer US, 1996: 143—153.
- [14] González J M, Johnston A W B, Vila-Costa M, et al. Genetics and molecular features of bacterial dimethylsulfoniopropionate (DMSP) and dimethylsulfide (DMS) transformations[C]//Timmis K N. Handbook of Hydrocarbon and Lipid Microbiology. Berlin: Springer, 2010.
- [15] Andreae M O. Ocean-atmosphere interactions in the global biogeochemical sulfur cycle[J]. Marine Chemistry, 1990, 30: 1—29.
- [16] Andreae M O, Raemdonck H. Dimethyl sulfide in the surface ocean and the marine atmosphere: a global view[J]. Science, 1983, 221(4612): 744—747.
- [17] Charlson R J, Lovelock J E, Andreae M O, et al. Oceanic phytoplankton, atmospheric sulfur, cloud albedo and climate[J]. Nature, 1987, 326: 655—661.
- [18] Guillard R R L, Ryther J H. Studies of marine planktonic diatoms: I. *Cyclotella nana* Hustedt, and *Detonula confervacea* (cleve) Gran[J]. Canadian Journal of Microbiology, 1962, 8(2): 229—239.
- [19] 李瑞香, 吴晓文, 韦钦胜, 等. 不同营养盐条件下浒苔的生长[J]. 海洋科学进展, 2009, 27(2): 211—216.  
Li Ruixiang, Wu Xiaowen, Wei Qinsheng, et al. Growth of *Enteromorpha prolifera* under different nutrient conditions[J]. Advances in Marine Science, 2009, 27(2): 211—216.
- [20] Oremland R S. Biogeochemistry of Global Change: Radiatively Active Trace Gases Selected Papers from the Tenth International Symposium on Environmental Biogeochemistry, San Francisco, August 19—24, 1991[M]. New York: Chapman & Hall, 1993.
- [21] Yang Guipeng, Jing Weiwen, Kang Zhiqiang, et al. Spatial variations of dimethylsulfide and dimethylsulfoniopropionate in the surface microlayer and in the subsurface waters of the South China Sea during springtime[J]. Marine Environmental Research, 2008, 65(1): 85—97.
- [22] Steinke M, Wolfe G V, Kirst G O. Partial characterisation of dimethylsulfoniopropionate (DMSP) lyase isozymes in 6 strains of *Emiliania huxleyi* [J]. Marine Ecology Progress Series, 1998, 175: 215—225.
- [23] Stefels J, van Boekel W. Production of DMS from dissolved DMSP in axenic cultures of the marine phytoplankton species *Phaeocystis* sp.[J]. Marine Ecology Progress Series, 1993, 97(1): 15—18.
- [24] Li Hongmei, Zhang Yongyu, Tang Hongjie, et al. Spatiotemporal variations of inorganic nutrients along the Jiangsu coast, China, and the occur-

- rence of macroalgal blooms (green tides) in the southern Yellow Sea[J]. Harmful Algae, 2017, 63: 164–172.
- [25] Hu Lianbo, Hu Chuanmin, He Mingxia. Remote estimation of biomass of *Ulva prolifera* macroalgae in the Yellow Sea[J]. Remote Sensing of Environment, 2017, 192: 217–227.
- [26] 薛瑞, 吴孟泉, 刘杨, 等. 基于 HJ-1A/1B 的 2014 年黄海海域浒苔灾害时空分布[J]. 海洋科学, 2016, 40(7): 115–123.
- Xue Rui, Wu Mengquan, Liu Yang, et al. Spatial and temporal variability of *Ulva prolifera* in the Yellow Sea, China in 2014[J]. Marine Sciences, 2016, 40(7): 115–123.
- [27] 周林飞, 赵言稳, 关秀婷. 6 种水生植物腐烂过程中水质理化指标的变化室内模拟研究[J]. 湿地科学, 2016, 14(6): 832–839.
- Zhou Linfei, Zhao Yanwen, Guan Xiuting. The indoor simulation study on change of physical and chemical indicators of water quality during decomposition process of six kinds of aquatic plants[J]. Wetland Science, 2016, 14(6): 832–839.
- [28] 张菊, 邓焕广, 王东启, 等. 不同温度条件下徒骇河沉水植物腐烂对上覆水体中营养盐浓度的影响[J]. 水资源保护, 2011, 27(4): 22–26.
- Zhang Ju, Deng Huanguang, Wang Dongqi, et al. Impacts of decomposition of submerged plants on nutrient concentrations in overlying water in Tuaihe River under different temperatures[J]. Water Resources Protection, 2011, 27(4): 22–26.
- [29] Nguyen B C, Belviso S, Mihalopoulos N, et al. Dimethyl sulfide production during natural phytoplanktonic blooms[J]. Marine Chemistry, 1988, 24(2): 133–141.
- [30] Yang Guipeng, Song Yizhu, Zhang Hai, et al. Seasonal variation and biogeochemical cycling of dimethylsulfide (DMS) and dimethylsulfoniopropionate (DMSP) in the Yellow Sea and Bohai Sea[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2015, 119(12): 8897–8915.
- [31] 许高宾. 浒苔爆发对海水中生源硫代谢产物的影响[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2016.
- Xu Gaobin. Study on the effect of the outbreak of enteromorpha on biogenic sulfur production[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2016.
- [32] Andreae M O. The ocean as a source of atmospheric sulfur compounds[M]//Buat-Ménard P. The Role of Air-Sea Exchange in Geochemical Cycling. Dordrecht: Springer, 1986: 331–362.
- [33] Andreae M O, Elbert W, De Mora S J. Biogenic sulfur emissions and aerosols over the tropical South Atlantic: 3. Atmospheric dimethylsulfide, aerosols and cloud condensation nuclei[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1995, 100(D6): 11335–11356.
- [34] Hegg D A, Ferek R J, Hobbs P V, et al. Dimethyl sulfide and cloud condensation nucleus correlations in the northeast Pacific Ocean[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1991, 96(D7): 13189–13191.
- [35] Ledyard K M. Microbial cycling of DMSP and DMS in coastal and oligotrophic seawater[J]. Limnology and Oceanography, 1996, 41(1): 33–40.
- [36] Van Duyl F C, Gieskes W W C, Kop A J, et al. Biological control of short-term variations in the concentration of DMSP and DMS during a *Phaeocystis* spring bloom[J]. Journal of Sea Research, 1998, 40(3/4): 221–231.
- [37] Kiene R P, Linn L J. Distribution and turnover of dissolved DMSP and its relationship with bacterial production and dimethylsulfide in the Gulf of Mexico[J]. Limnology and Oceanography, 2000, 45(4): 849–861.

## Effects of temperature on biogenic sulfur production of *Ulva prolifera* during the decline period

Han Lu<sup>1,2</sup>, Deng Xue<sup>1,2</sup>, Li Peifeng<sup>1</sup>, Gao Xianchi<sup>1</sup>, Liu Chunying<sup>1,2</sup>

(1. College of Chemistry and Chemical Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Key Laboratory of Marine Chemistry Theory and Technology / Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

**Abstract:** In order to study the characteristics of the release of biogenic sulfur of *Ulva prolifera*, laboratory simulations were conducted on the *Ulva prolifera* collected in the middle and late green tides of the Yellow Sea. The effects of different temperatures on the release of biogenic sulfides from *Ulva prolifera* were investigated. The results are as follows: under the condition of 10–25°C, the increase of temperature can promote the decline of *Ulva prolifera*. The average release rate of DMS ranged from 2.79–150.70 nmol/(L·g·d), the average release rate of DMSP ranged from 2.16–113.26 nmol/(L·g·d). On the other hand, the high temperature can accelerate the releasing rates of dimethylsulfide (DMS) and dimethylsulfoniopropionate (DMSP), and increase the releasing amount. The maximum average release rate of DMS is increased by about 60% at 25°C compared with 10°C, and the concentration of DMS in culture fluid is increased by 2–3 times. The concentration of DMS and DMSP collected in the culture fluid of *Ulva prolifera* at the end of green tide was increased compared with that of *Ulva prolifera* taken during the mid-green tide. The highest concentration of DMS in the culture fluid at the end of green tide of

*Ulva prolifera* was 418.41 nmol/L, which was about 4 times of that in the middle period. The highest concentration of DMS in DMSP was 316.14 nmol/L, which was 3 times of the middle period. The outbreak of the green tide of the Enteromorpha will affect the circulation of the sulfur system in the water body and thus affect the ecological environment of the sea area.

**Key words:** *Ulva prolifera*; decline; temperature; dimethylsulfide (DMS); dimethylsulfonionpropionate (DMSP)