

DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20200327001

http://www.yykxjz.cn/

侯兴, 王颖, 刘天红, 杜美荣, 高亚平, 姜妮妮, 李凤雪, 董世鹏, 李文豪, 蒋增杰. 4种常见经济滤食性贝类摄食活动对球等鞭金藻产生二甲基硫化物的影响. 渔业科学进展, 2021, 42(5): 124-131

HOU X, WANG Y, LIU T H, DU M R, GAO Y P, JIANG W W, LI F X, DONG S P, LI W H, JIANG Z J. Effects of feeding activities by four common economic bivalves on the production of dimethyl sulfur compounds from *Isochrysis galbana*. Progress in Fishery Sciences, 2021, 42(5): 124-131

4种常见经济滤食性贝类摄食活动 对球等鞭金藻产生二甲基硫化物的影响*

侯兴^{1,2} 王颖³ 刘天红³ 杜美荣¹ 高亚平¹
姜妮妮¹ 李凤雪¹ 董世鹏^{1,2} 李文豪^{1,2} 蒋增杰^{1,4①}

- (1. 中国水产科学研究院黄海水产研究所 农业农村部海洋渔业可持续发展重点实验室 山东 青岛 266071;
2. 上海海洋大学水产与生命学院 上海 201306; 3. 山东省海洋生物研究院 山东 青岛 266104;
4. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室海洋渔业科学与食物产出过程功能实验室 山东 青岛 266071)

摘要 本研究以紫贻贝(*Mytilus edulis*)、长牡蛎(*Crassostrea gigas*)、栉孔扇贝(*Azumapecten farreri*)和菲律宾蛤仔(*Ruditapes philippinarum*) 4种常见经济滤食性贝类作为研究对象, 选取二甲基巯丙酸(DMSP)含量较高的球等鞭金藻(*Isochrysis galbana*)为实验藻种, 在室内模拟了静水和扰动2种条件下水体中二甲基硫化物[DMS(P)]的变化情况, 并分析了贝类粪便中DMS(P)的释放过程对水体DMS(P)浓度的影响。结果显示, 在静水条件下, 4种贝类的摄食对微藻二甲基硫(DMS)的释放无显著的促进作用($P>0.05$), 但通过生物沉积显著降低了水体中颗粒态DMSP(DMSP_p)含量($P<0.05$), 其中, 约40%摄入的DMSP_p转化为粪便DMSP(DMSP_f)。扰动条件显示, DMSP_f会随水体扰动而扩散于水体中, 进而增加水体中总悬浮态DMAP(DMSP_t)和DMS的量; 原水总水体扰动实验中, 与对照组(0 r/min)相比, 实验组DMS和DMSP_t最大, 分别增加了16.8%和38.5倍。定量粪便扰动实验显示, 在装有0.08 g粪便的1 L去DMS海水中, 随着扰动程度的增加, 水体中的DMS和DMSP_t也相应增加, 与对照组的7.6和906.4 nmol/L相比, 最大可升高至21.3和2505.9 nmol/L, 分别增加了180%和174%。研究结果为深入认识贝类摄食活动对海洋硫循环的影响提供了数据支撑。

关键词 滤食性贝类; 摄食活动; 浮游植物; 二甲基硫化物

中图分类号 S961 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2021)05-0124-08

二甲基硫(DMS)是海洋中重要的挥发性生源硫 化物, 被认为是一种“负温室气体”, 其进入大气的氧

* 青岛海洋科学与技术试点国家实验室主任基金(QNLM201707)、中国水产科学研究院基本科研业务费(2020TD50)、山东省泰山学者青年专家计划资助项目(tsqn201909166)、青岛海洋科学与技术试点国家实验室海洋渔业科学与食物产出过程功能实验室渔业科技青年人才计划项目(2018-MFS-T13)和财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系共同资助 [This work was supported by Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology (QNLM201707), Central Public-Interest Scientific Institution Basal Research Fund, CAFS (2020TD50), the Young Taishan Scholars Program of Shandong Province (tsqn201909166), Youth Talent Program Supported by Laboratory for Marine Fisheries Science and Food Production Processes, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao) (2018-MFS-T13), and China Agriculture Research System of MOF and MARA]. 侯兴, E-mail: houxing_up@163.com

① 通讯作者: 蒋增杰, 研究员, E-mail: jiangzj@ysfri.ac.cn

收稿日期: 2020-03-27, 收修改稿日期: 2020-05-08

化产物增加大气云凝结核的数量, 提高云层对太阳光的反射率, 使全球热量收入减少, 进而缓解全球气候变暖(Charlson *et al.*, 1987)。二甲基巯基丙酸(DMSP)是 DMS 的重要前体物质, 其主要分布在浮游植物和大型藻类中, 是渗透压调节物质(Kirst, 1996)。浮游植物通过浮游动物摄食、微生物的新陈代谢、病毒侵蚀、藻细胞的衰老等途径在 DMSP 裂解酶作用下产生 DMS (Dacey *et al.*, 1986; Malin *et al.*, 1994; 杨桂朋等, 2009; Belviso *et al.*, 1990; Christaki *et al.*, 1996)。其中, 浮游动物摄食作用是导致 DMS 产生的重要途径, 浮游植物细胞中 DMSP 和 DMSP 裂解酶分别处在不同细胞隔室内, 浮游动物摄食使分隔的 DMSP 和 DMSP 裂解酶在其食物液泡中得以混合, 从而促进 DMS 的释放(张瑜, 2013); 另外, 浮游植物细胞内的 DMSP 不易通过正常的细胞膜渗透到细胞外, 经浮游动物摄食作用使浮游植物细胞破裂, 促进了 DMSP 的释放, 造成了 DMSP 和酶的相互作用(Dacey *et al.*, 1986)。Wolfe 等(1996)研究认为, 浮游动物摄食促进了浮游植物细胞中 DMSP 裂解酶的活性, 从而促进 DMS 的释放。

我国是海水养殖大国, 贝类占海水养殖总产量的 70%以上, 其中, 牡蛎(*Ostrea gigas*)、蛤、扇贝和贻贝(*Mytilus edulis*)等滤食性贝类占贝类总产量的 90%以上(中国渔业统计年鉴, 2019)。滤食性贝类与浮游动物生态位相似, 食物来源均以浮游植物为主, 通过鳃丝和其上着生的前纤毛、前侧纤毛、侧纤毛的配合摄取食物颗粒(董波等, 2000), 滤食性贝类摄食活动对浮游植物产生二甲基硫化物[DMS(P)]可能存在重要影响, 然而, 目前有关滤食性贝类、浮游植物、DMS(P)三者之间作用关系的研究较少, 仅有 Hill 等(2007)研究了静水条件下, 紫贻贝(*Mytilus edulis*)和海湾扇贝(*Argopecten irradians*)摄食扁藻(*Tetraselmis sp.*)对 DMS(P)的影响。本研究以长牡蛎(*Crassostrea gigas*)、栉孔扇贝(*Chlamys farreri*)、紫贻贝、菲律宾蛤仔(*Ruditapes philippinarum*) 4 种主要经济滤食性贝类为研究对象, 以 DMSP 含量较高的球等鞭金藻(*Isochrysis galbana*)作为饵料藻种, 探讨了静水和扰动条件下, 水体的 DMS(P)变化以及贝类粪便 DMS(P)释放的影响, 研究结果将为深入探讨贝类摄食活动对海洋硫循环的影响提供数据支撑, 并拓展气候变化背景下养殖贝类生态功能的认识。

1 材料与方法

1.1 实验藻种和贝类

实验所用球等鞭金藻由中国水产科学研究院黄

海水产研究所微藻培养实验室提供。采用脱脂棉过滤后的灭菌自然海水, pH 为 8.0, 盐度为 35, 使用 f/2 培养液, 将藻液置于光照培养箱中培养至指数生长期待用。光暗周期为 12 : 12, 培养温度为 18℃, 每天轻摇 2 次, 使用血球计数板测定微藻密度。

实验贝类选用长牡蛎、栉孔扇贝、紫贻贝、菲律宾蛤仔, 壳长分别为 6.5~7.6、6.0~6.8、5.6~6.4、3.0~3.3 cm, 放于水温为 18℃流水池中充氧暂养, 每天投喂 2 次金藻。预实验结果显示, 贝类摄食作用会导致粪便 DMSP 的产生, 因此, 在正式实验前进行饥饿处理 24 h。选择规格相似、活性良好的贝类, 除去体表附着物, 对于紫贻贝和栉孔扇贝 2 种具有足丝的贝类, 将其足丝沿贝壳边缘小心剪除。

1.2 静水条件下, 摄食对金藻产生 DMS(P)的影响

1.2.1 不同浓度饵料实验 为了探究贝类摄食不同浓度的金藻对水体 DMS(P)的影响, 选用紫贻贝作为实验贝类, 将指数生长期的金藻稀释, 分成浓度分别为 2×10^5 、 3×10^5 、 4×10^5 和 5×10^5 cells/mL 进行投喂。

选用 5.6 L 高约 30 cm 的聚乙烯塑料桶作为实验容器, 向其中加入藻液至满, 水温为 18℃时向实验组容器底部放入 1 个贻贝, 以不添加贻贝组作为对照组, 并向其中充入等量的微量 O_2 , 保证溶解氧(DO) > 8.0 mg/L, 气石置于贝类上方, 确保贻贝进行正常的摄食活动并不扰动粪便。向液面顶部覆盖保鲜膜以尽量避免与外界接触, 摄食过程避光进行。每组设置 3 个平行。通过预实验得知, 饥饿处理的贝类并不会增加去 DMS 海水的 DMS(P)浓度。

实验以贻贝开始摄食计时, 持续 21 h。实验结束后, 在无扰动的条件下, 虹吸上层水体约 1 L, 测定 DMS、总 DMSP(DMSP_t)、溶解态 DMSP(DMSP_d)浓度和颗粒态 DMSP(DMSP_p)。使用均质仪将剩余含贝类粪便的少量水体(100~200 mL)混匀, 测定粪便 DMSP(DMSP_f)浓度。通过预实验得知, 对照组 DMSP_p 在 21 h 内变化很小, 被摄食 DMSP_p 采用对照组和实验组 DMSP_p 的差值表示(下同)。

1.2.2 不同贝类摄食实验 为了探讨不同贝类摄食金藻对水体 DMS(P)的影响, 选择长牡蛎、栉孔扇贝、紫贻贝、菲律宾蛤仔作为实验贝类, 投喂与 1.2.1 中相同批次浓度为 4×10^5 cells/mL 的金藻。采用相同的实验条件和测定方法。

1.3 扰动条件下, 粪便对水体 DMS(P)产生的影响

为了探究扰动条件下贝类粪便对水体 DMS(P)的影响, 选择紫贻贝作为摄食贝类, 贝类及金藻与 1.2.1

中批次相同,在 1.2.2 静置摄食实验结束后,取出紫贻贝,选用贝类摄食后的水体,进行原水总水体扰动实验;另选平行组进行定量粪便扰动实验。

1.3.1 原水总水体扰动实验 使用数显恒温磁力搅拌器(85-2 型,丹瑞),设定 5 个扰动速度 0(对照组)、15、70、200、500 r/min,对原水总水体(粪便及水体)进行 5 min 扰动处理。整个实验期间,水温未出现明显升高现象,始终稳定在 18℃~19℃之间,测定各组实验前后的 DMS、DMSP_t 和 DMSP_d 的浓度,每组各设置 3 个平行。

1.3.2 定量粪便扰动实验 将上层水体虹吸移除,仅保留粪便,使用改装后的一次性塑料滴管小心移取,使用分析天平称量 5 份 0.08 g 紫贻贝粪便,分别置于 2 L 聚乙烯塑料桶中,加入 1 L 经高温灭菌处理后的去 DMS 海水,使用数显恒温磁力搅拌器,设定 5 个扰动速度 0(对照组)、15、70、200、500 r/min,对水体进行 5 min 扰动处理。整个实验期间,水温未发生明显变化,始终稳定在 18℃~19℃之间,测定各组 DMS、DMSP_t 和 DMSP_d 的浓度。

1.4 二甲基硫化物分析

1.4.1 检测方法建立及工作曲线绘制 使用固相微萃取-气相色谱与质谱联用法(solid-phase microextraction and gas chromatography-mass spectrometry)测定 DMS,具体操作方法及工作曲线绘制如下:

QP2010SE 气相色谱与质谱联用仪(岛津,日本)搭配 AOC-5000 自动进样器(CTC),使用 60 m × 0.32 mm 1.8 μm Vocol 色谱柱(Supleco)进样口温度为 210℃,使用分流模式,分流比为 7.5:1,离子源温度为 200℃,载气为高纯氦气(99.999%),流速为 3 mL/min,进样时间为 1 min,柱前压为 85.0 kPa,柱箱温度为 35℃,保持 3 min 后,以 3℃/min 的速率升到 40℃,保持 1 min 后,以 10℃/min 的速率升到 100℃,再以 20℃/min 的速率升到 210℃,保持 10 min,溶剂延迟时间为 1 min,MS 检测器电压为 100 eV,检测和数据采集选择 SIM 模式,质荷比 m/z 选择 47 和 62。萃取温度为 24℃,萃取时间为 20 min,解析时间为 2 min,使用 Carboxen/Polydimethylsiloxane (CAR/PDMS)萃取纤维(75 μm, Supleco)。

将 DMS 标准品(色谱纯, Sigma-Aldrich)加入甲醇(色谱纯, ThermoFisher 公司, 美国)中,配制成 1.0 g/L 的标准储备液, -20℃ 避光保存。绘制工作曲线时,取 10.0 mL 去 DMS 海水装于预先加入 2.5 g NaCl(分析纯)的 20.0 mL 顶空瓶中,再加入一定量的 DMS 储

备液配制成一系列浓度的标准品,拧紧瓶盖,使用外标法定量并绘制标准曲线。在 10~100,000 ng/L 的范围内均展现出良好的线性,方法的性能参数见表 1。

表 1 方法的性能参数
Tab.1 Performance parameter of SPME-GC/MS

指标 Indices	参数值 Parameter values
R ²	>0.996
回收率 Recovery ratio	93%~103%
相对标准偏差 Relative standard deviation	<7%
检出限 Detection limit	0.11 nmol/L

1.4.2 样品分析 DMS 的分析:待测样品采取与 DMS 标准品同样的操作方法,吸取 10 mL 待测样品注入到装有 2.5 g NaCl 的顶空瓶中,拧紧瓶盖,放于自动进样器中待测。

DMSP 的分析:DMSP 在强碱作用下(pH≥13)会按 1:1 的比例完全转化为 DMS 和丙烯酸(Dacey *et al*, 1987),故通过测定 DMS 含量即可间接得到 DMSP 的含量。DMSP 样品(浓度过高时进行稀释)分成 2 份,取 10 mL DMSP 样品直接加入预先装有 2.5 g NaCl 的顶空瓶中,加入 0.5 mL 10.0 mol/L 的 NaOH,密封玻璃瓶,4℃ 避光保存 24 h,使 DMSP 完全碱解为 DMS,通过测定 DMS 含量间接得到 DMSP_t 的含量;另一份 DMSP 样品经 0.45 μm Whatman GF/F 滤膜进行小体积重力过滤(SVDF)(Kiene *et al*, 2006),滤液使用相同处理方法测定 DMSP_d。DMSP_p 由 DMSP_t 减去 DMSP_d 得到。DMSP_t 测定步骤同 DMSP_t,注意扣除水体 DMS 和 DMSP_t 浓度。

1.5 数据处理与分析

数据处理和柱状图绘制采用 Excel 2016 软件,差异显著采用 SPSS 19.0 分析软件。

2 结果与分析

2.1 静水条件下,贝类摄食金藻对 DMS(P)产生的影响

2.1.1 静水条件下,贻贝摄食不同浓度金藻对 DMS(P)产生的影响 从图 1 可以看出,不同浓度饵料实验中,金藻浓度分别为 2×10⁵、3×10⁵、4×10⁵、5×10⁵ cells/mL,实验组和对照组的 DMS 浓度分别为(177.93±7.42)和(181.83±8.50)、(240.33±9.50)和(230.03±10.05)、(299.09±9.67)和(297.17±12.00)、(391.93±17.04)和(384.69±16.06) nmol/L。与对照组相比,实验组的 DMS 变化范围在 97.0%~104.6%之间,差异不显著(P>0.05)(图 1a)。

DMSP_d 实验组和对照组的浓度分别为

(27.93±11.24)和(36.10±16.15)、(45.33±17.00)和(40.38±15.73)、(39.67±18.44)和(30.33±19.73)、(45.01±14.11)和(45.33±11.50) nmol/L。各实验组均并未有显著的升高或者降低现象($P>0.05$),且无论对照组还是实验组,相对于 DMSP_p, DMSP_d的浓度较低,约为 DMSP_p的 1% (图 1b)。

DMSP_p 实验组和对照组的浓度分别为(40.99±40.29)和(3234.83±208.90)、(81.97±91.06)和(4908.58±

318.25)、(97.58±55.29)和(6503.17±458.98)、(968.67±463.19)和(8220.42±302.08) nmol/L。与对照组相比,实验组 DMSP_p浓度均呈显著降低趋势($P<0.01$),且贝类的摄食百分比越高,对应的DMSP_p降低程度越大(图 1c)。

DMSP_f 分别为 1305.8、1421.8、3259.6、2507.5 nmol/L,分别占据摄入 DMSP_p的 40.9%、29.5%、50.9%和 34.6%(图 1d)。贻贝摄食量分别占投喂总量的 99.0%、98.7%、99.0%和 87.2%(图 1e)。

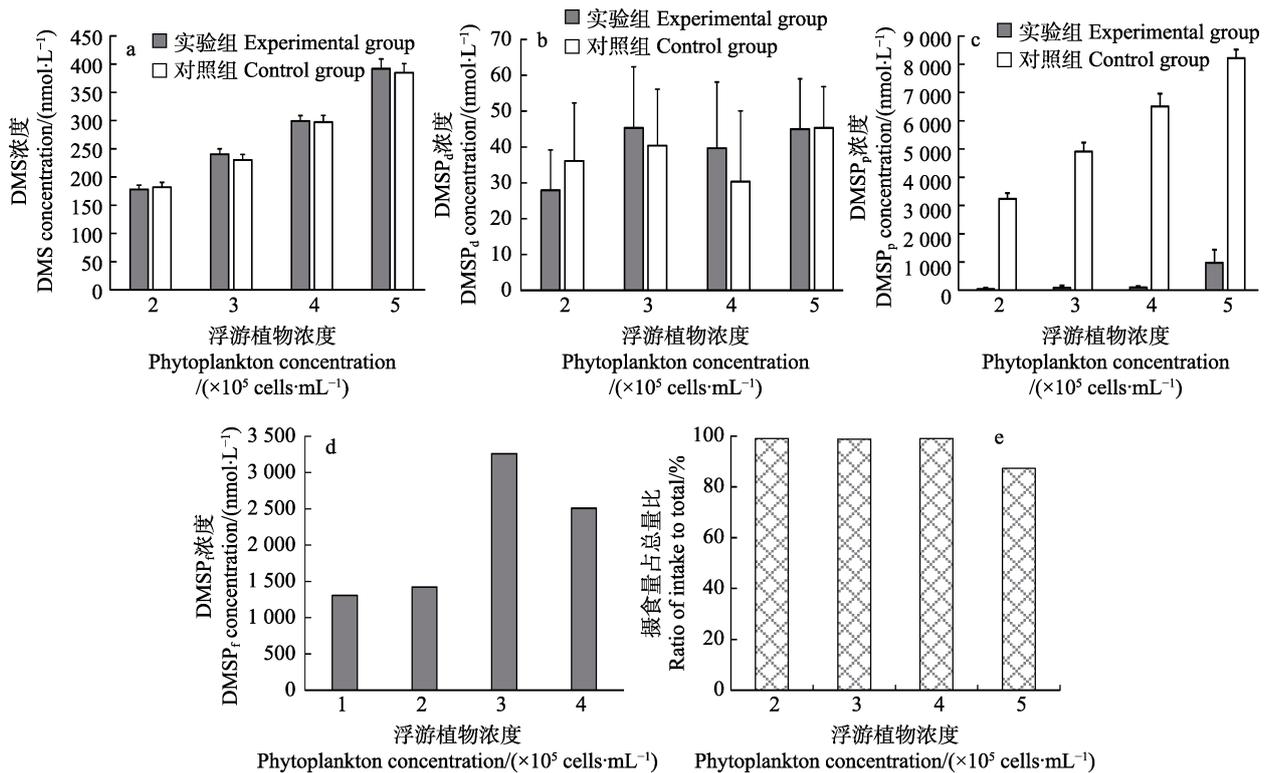


图 1 贻贝摄食不同浓度金藻对 DMS(P)产生和转移的影响

Fig.1 Effects of mussel feeding on *I. galbana* at different concentrations on production and transfer of DMS(P)

- a: 贻贝摄食不同浓度金藻对 DMS 的影响; b: 贻贝摄食不同浓度金藻对 DMSP_d的影响; c: 贻贝摄食不同浓度金藻对 DMSP_p的影响; d: 贻贝摄食不同浓度金藻对 DMSP_f产量的影响; e: 摄食量占饵料总量比
- a: Effects of mussel feeding on *I. galbana* at different concentrations on DMS production;
- b: Effects of mussel feeding on *I. galbana* at different concentrations on DMSP_d production;
- c: Effects of mussel feeding on *I. galbana* at different concentrations on DMSP_p production;
- d: Effects of mussel feeding on *I. galbana* at different concentrations on DMSP_f production; e: Ratio of intake to total

2.1.2 静水条件下,不同贝类摄食金藻对 DMS(P)产生的影响 从图 2 可以看出,对于 DMS,在牡蛎、贻贝、扇贝、蛤仔的摄食下,实验组浓度分别为(288.17±12.35)、(299.01±9.55)、(305.17±17.23)、(310.97±10.55) nmol/L,对照组 DMS 浓度为(297.17±12.00) nmol/L,与对照组相比,实验组的 DMS 变化范围在 97.0%~104.6%之间,差异不显著($P>0.05$) (图 2a)。

DMSP_d 实验组浓度分别为(20.33±18.02)、(39.67±18.43)、(26.01±14.19)、(28.67±30.33) nmol/L,对照组浓度为(30.33±19.74) nmol/L。各实验组中均并未有显著的升高或者降低现象($P>0.05$),无论对照组还是实验组,相对于 DMSP_p, DMSP_d的浓度较低,约为 DMSP_p的 1% (图 2b)。

DMSP_p 实验组浓度分别为 (23.36±24.74)、(60.33±17.50)、(78.67±28.02)、(3433.44±451.09) nmol/L,

对照组为(6304.2±384.32) nmol/L。与对照组相比,实验组 DMSP_p 浓度均极显著降低($P<0.01$),并且贝类的摄食百分比越高,对应的 DMSP_p 浓度降低程度越大(图 2c)。

牡蛎、贻贝、扇贝和蛤仔组 DMSP_f 浓度分别为 2510.8、3467.8、3604.5 和 1200.5 nmol/L,分别占据了摄入 DMSP_p 的 40.0%、55.5%、57.9%和 41.8%(图 2d)。

牡蛎、贻贝、扇贝和蛤仔组摄食量分别占投喂总量的 100.0%、99.0%、99.70%和 49.4%(图 2e)。

2.2 扰动条件下,贝类粪便对水体 DMS(P)产生的影响

2.2.1 原水总水体扰动

不同扰动程度对原水总水体 DMS(P)的影响见图 3。从图 3 可以看出,在 0、15、70、200 和 500 r/min 转速下,原水总水体 DMS 分别为(302.21±11.59)、(318±11.11)、(345.07±15.31)、(353.09±18.02)和(349.57±14.05) nmol/L。随着扰动程度的增加,DMS 浓度均有增加的现象,其中,70、200 和 500 r/min 组与对照组相比差异显著($P<0.05$),

扰动能促进粪便中 DMS(P)的释放而导致水体 DMS 浓度显著增加,最大可使原水总水体 DMS 增加 16.8%(图 3a)。

原水总水体 DMSP_d 浓度分别为(38.01±19.08)、(29.98±22.00)、(46.99±23.10)和(41.07±19.00) nmol/L,扰动处理下,与对照组相比均未出现显著的升高或者降低现象(图 3b)。

原水总水体 DMSP_f 浓度分别为 58.32、672.91、2200.40、2305.82 和 2641.28 nmol/L,随着水体扰动程度的增加,粪便向水体的扩散量增加,DMSP_f 浓度逐渐增加,最大可使原水总水体 DMSP_f 增加 38.5 倍(图 3c)。

2.2.2 定量粪便扰动

不同扰动程度水体中 DMS(P)浓度变化情况见表 2。从表 2 可以看出,在 0~500 r/min 转速范围内,随着扰动程度的加强,水体中 DMS 和 DMSP_f 的浓度均呈现升高的趋势,二者的浓度分别从静置状态下的 7.6 和 906.4 nmol/L 升高到最大 21.3 和 2505.9 nmol/L,分别增加了 180%和 174%。

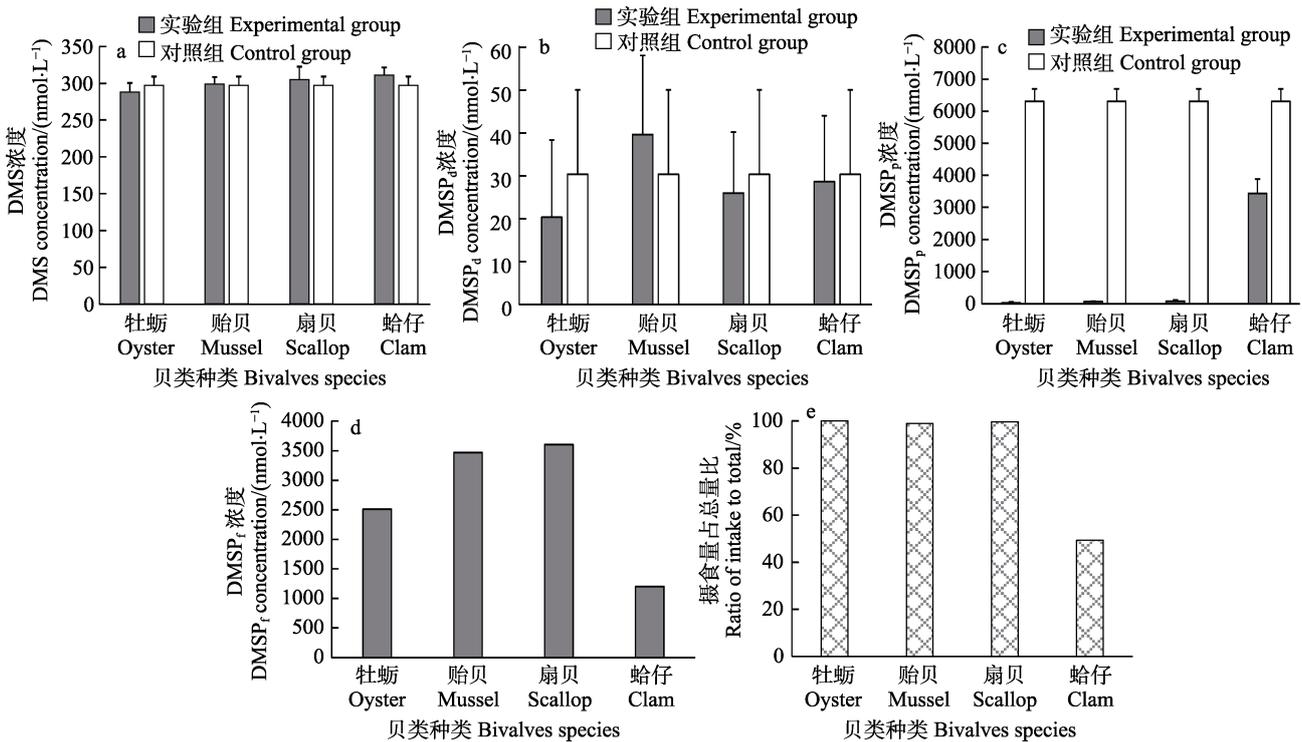


图 2 不同贝类摄食金藻对 DMS(P)产生和转移的影响

Fig.2 Effects of feeding on *I. galbana* by different bivalves on production and transfer of DMS(P)

a: 不同贝类摄食金藻对 DMS 的影响; b: 不同贝类摄食金藻对 DMSP_d 的影响;

c: 不同贝类摄食金藻对 DMSP_p 的影响; d: 不同贝类摄食金藻对 DMSP_f 产量的影响; e: 摄食量占饵料总量比

a: Effects of feeding on *I. galbana* by different bivalves on DMS production; b: Effects of feeding on *I. galbana* by different bivalves on DMSP_d production; c: Effects of feeding on *I. galbana* by different bivalves on DMSP_p production;

d: Effects of feeding on *I. galbana* by different bivalves on DMSP_f production; e: Ratio of intake to total

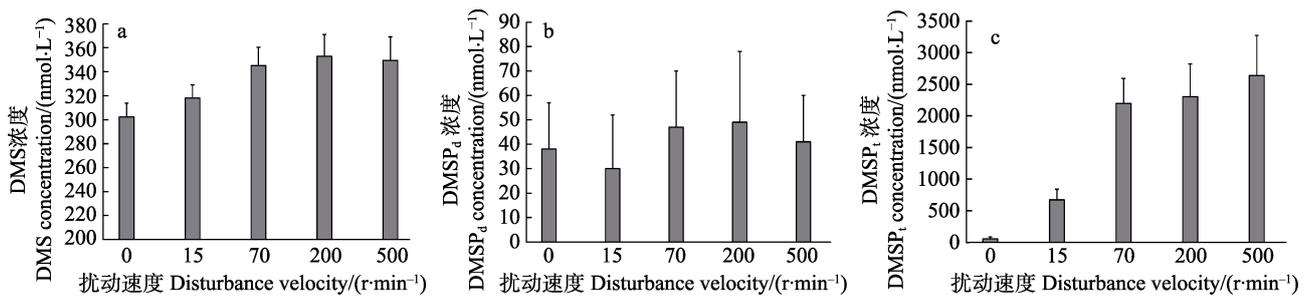


图 3 不同扰动程度对原水总水体 DMS(P)的影响

Fig.3 Effects of different disturbance velocity on total original water DMS(P)

a: 不同扰动速度对原水总水体 DMS 的影响; b: 不同扰动速度对原水总水体 DMSP_d 的影响;c: 不同扰动程度对原水总水体 DMSP_t 的影响a: Effects of different disturbance velocity on total original water DMS; b: Effects of different disturbance velocity on total original water DMSP_d; c: Effects of different disturbance velocity on total original water DMSP_t

表 2 不同扰动速度下粪便水体中 DMS(P)浓度变化

Tab.2 Variation of DMS(P) concentration in fecal water with different disturbance velocity

扰动速度 Disturbance velocity /(r·min ⁻¹)	粪便量 Feces weight /g	DMS /(nmol·L ⁻¹)	DMSP _d /(nmol·L ⁻¹)	DMSP _t /(nmol/L ⁻¹)
0	0	0	0	0
0	0.08	7.6	24.9	906.4
15	0.08	5.8	19.8	983.3
70	0.08	16.4	20.5	1010.7
200	0.08	20.5	22.2	2505.9
500	0.08	21.3	11.2	2283.2

3 讨论

自 Dacey 等(1986)首次通过室内桡足类摄食鞭毛藻(*Gymnodinium nelson*)的研究表明,浮游动物对浮游植物的摄食作用可促进水体中 DMS 的增加,已有众多研究得到了类似的结论(Belviso *et al.*, 1990; Leck *et al.*, 1990; Christaki *et al.*, 1996; 张瑜, 2013)。Kasamatsu 等(2004)研究指出,浮游动物的“Sloppy feeding”摄食方式,使其摄食过程中对浮游植物细胞摄食不完全,机械破碎导致 DMS 的产生。与上述结果不同, Kwint 等(1996)在桡足类近亲真帘水蚤(*Eurytemora affinis*)摄食浮游三角褐指藻(*Phaeodactylum tricorutum*)和威氏海链藻(*Thalassiosira weissflogii*)研究中发现,桡足类的摄食活动并未导致水体中的 DMS 增加,DMSP 几乎均以粪便颗粒的形式排出,进一步分析表明,浮游动物摄食最重要的作用是将浮游植物中的 DMSP 转移到粪便颗粒中。Hill 等(2007)对静水条件下,紫贻贝和海湾扇贝摄食扁藻(*Tetraselmis sp.*)的研究也表明,滤食性贝类的摄食活动对微藻 DMS 的释放未产生明显的促进作用,这与本研究结果相一致。产生

这种现象的原因可能与滤食性贝类的摄食机制有关,贝类通过选食器官(鳃、唇瓣、食物选择盲囊)完成食物颗粒的收集、运输、截取和筛选后,进入消化道进行消化吸收,未消化的食物颗粒以粪便形式排出体外(董波等, 2000),这种摄食机制使得浮游植物以被鳃分泌黏液包裹的形式进入消化器官内完成同化,同时,排出的粪便也被代谢产生的黏液包裹,使得静水条件下,粪便中的 DMS(P)难以通过固-液界面形成扩散,由此导致静水条件下,水体中 DMS 没有出现显著增加的现象。对于紫贻贝和栉孔扇贝等具有足丝的贝类来说,除了摄食活动是影响水体 DMS 浓度因素外,足丝腺分泌的足丝蛋白极强的吸附作用也是可能的因素之一。凌文康等(2019)研究表明,紫贻贝足丝分泌的足丝蛋白对海水中的重金属等化学物质具有很强的吸附能力,但关于足丝蛋白吸附作用与 DMS 迁移和转化之间潜在的关系目前尚未见相关报道,值得在后续的研究进一步深入探讨。在静水实验中发现,粪便中约占据了贝类摄入 DMSP_p 的 40%,如此高的含量可能对水体 DMSP 和 DMS 产生潜在的影响。滤食性贝类通过生物沉积过程在水环境和沉积环境之间发挥着生物耦联作用。在广岛湾牡蛎养殖区,一台 200 m² 筏架在 300 d 养殖期内可产生 19.3 t 粪物质(干重)。Hatcher 等(1994)在加拿大的一个封闭海湾观察到贻贝养殖区的沉积速率是非养殖海区的 2 倍以上;在烟台四十里湾,壳高为 41.1 mm 的栉孔扇贝生物沉积速率最高达 230 mg/(g·d)(周毅等, 2003)。稳定碳氮同位素的研究结果表明,长牡蛎生物沉积物对沉积物有机质的贡献率平均为(13.96±8.62)% (任黎华, 2014)。滤食性贝类养殖活动的主要区域在浅海,由于受到海底地形、区域构造环境、径流、海洋环流等影响,浅海的环境复杂而多变(尹燕欣, 2012)。扰动实验发现,随着粪便中 DMSP 的扩散,水体中 DMSP_t

和 DMS 的量增加。在总水体扰动实验中, 相比如对照组, 实验组 DMS 和 DMSP_i 浓度最大分别增加了 16.8% 和 38.5 倍。同时海区调查也发现, 在近岸海域 Niel 海湾(Jean, 2009)、威尼斯泻湖(Gambaro, 2002)甚至白令海海盆西南部海域的深层海水中(>2000 m) (Li *et al.*, 2007)均具有很高的 DMS(P)浓度, 高 DMS(P)含量的沉积物再悬浮和扩散作用可能是诱发此现象的原因。在这样的背景下, 仅仅基于实验室内的静水实验结果将大大局限对于 DMS(P)生物地球化学过程的认识, 这也是本研究尝试开展一定程度扰动实验的出发点和落脚点。对于养殖海区来说, 外界环境对生物沉积物的扰动作用主要有 2 个过程: 一个过程是在生物沉积物向海底沉降的过程中。研究表明, 中等规格(5.46±0.54) cm 的长牡蛎生物沉积物的平均沉降速率约为(1.16±0.54) cm/s (任黎华, 2014)。以桑沟湾的平均水深为 7 m 来估算, 需要 10 min 到达海底, 在此过程中, 浪、流等作用导致生物沉积物破碎、扩散、悬浮, 生物沉积物与水体接触的比表面积增大, 接触时间延长, 使沉积物-水界面得到充分的物质交换。另一个过程发生在沉降到海底的生物沉积物的再悬浮作用。王丕波等(2005)研究表明, 在浅水区海底沉积物再悬浮更为显著, 风浪、潮汐、潮流等因素引起的海水运动是重要诱因。以我国典型滤食性贝类养殖海湾桑沟湾为例, 沉积物再悬浮通量的数量级在 10⁻⁵~10⁻⁶ kg/(m²·s)之间, 全年约有 171 d 沉积物处于再悬浮状态(蒋增杰, 2008); 浅水湖 Apopka 湖每年 70%时段有 50%沉积物受到风浪扰动而悬浮(蒋增杰, 2008), 如此频繁且强烈的再悬浮作用使生物沉积物中的 DMS(P)有了向水体中再次释放的机会。

本研究虽然获得了贝类通过生物沉积物再释放过程对 DMS(P)如 DMS、DMSP_i 浓度有一定影响的一些数据和线索, 但是并未发现 DMSP_d 浓度显著增加现象。DMSP_d 转化时间较快, 本身浓度变化并不明显, 加之 DMSP_d 的测定方法为间接法测定, 这些因素均可能是此结果的原因。最后, 本研究的结论是基于室内可控条件下, 模拟获得的养殖海区的水文条件。实际水环境条件等极为复杂, 相应的 DMS(P)的产生和迁移转化过程也更为复杂, 研究结果向海区的拓展和应用尚需要后续开展一系列现场围隔等形式的野外观测研究进行综合解读。

参 考 文 献

BELVISO S, KIM S, Rassoulzadegan F, *et al.* Production of dimethylsulfonium propionate (DMSP) and dimethylsulfide (DMS) by a microbial food web. *Limnology and Oceanography*, 1990, 35(8): 1810-1821

CHARLSON R J, LOVELOCK J E, ANDREA M O, *et al.*

Oceanic phytoplankton, atmospheric sulphur, cloud albedo and climate. *Nature*, 1987, 326(6114): 655-661

CHRISTAKI U, BELVISO S, DOLAN J R, *et al.* Assessment of the role of copepods and ciliates in the release to solution of particulate DMSP. *Marine Ecology Progress*, 1996, 141(1/2/3): 119-127

DACEY J W H, BLOUGH N V. Hydroxide decomposition of dimethylsulfoniopropionate to form dimethylsulfide. *Geophysical Research Letters*, 1987, 14(12): 1246-1249

DACEY J W H, WAKEHAM S G. Oceanic dimethylsulfide: Production during zooplankton grazing on phytoplankton. *Science*, 1986, 233(4770): 1314-1316

DONG B, XUE Q Z, LI J. Advances in studies on the feeding physiology of suspension-feeding of luses. *Marine Sciences*, 2000, 24(7): 31-34 [董波, 薛钦昭, 李军. 滤食性贝类摄食生理的研究进展. *海洋科学*, 2000, 24(7): 31-34]

Fisheries Bureau of Ministry of Agriculture. 2019 China fishery statistical yearbook. Beijing: China Agriculture Press, 2019 [农业农村部渔业渔政管理局. 2019 中国渔业统计年鉴. 北京: 中国农业出版社, 2019]

GAMBARO A, MORET I, PIAZZA R, *et al.* Winter evolution of DMS and DMSP in Venice Lagoon water and sediment. *Annali di Chimica*, 2002, 92(92): 217-227

HATCHER A, GRANT J, SCHOFIELD B. Effects of suspended mussel culture (*Mytilus* spp.) on sedimentation, benthic respiration and sediment nutrient dynamics in a coastal bay. *Marine Ecology Progress Series*, 1994, 115(3): 219-235

HILL R W, DACEY J W H. Processing of ingested dimethylsulfoniopropionate by mussels *Mytilus edulis* and scallops *Argopecten irradians*. *Marine Ecology Progress*, 2007, 343(1): 131-140

JEAN N, BOGE G, JAMET J L, *et al.* Plankton origin of particulate dimethylsulfoniopropionate in a Mediterranean oligotrophic coastal and shallow ecosystem. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 2009, 81(4): 470-480

JIANG Z J. Dynamic mechanism of sediment resuspension and its ecological effects on polyculture of shellfish and macroalgae in shallow sea. Doctoral Dissertation of Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2008 [蒋增杰. 浅海贝藻养殖水域沉积物再悬浮的发生机制及生态效应. 中国科学院研究生院博士研究生学位论文, 2008]

KASAMATSU N, KAWAGUCHI S, WATANABE S, *et al.* Possible impacts of zooplankton grazing on dimethylsulfide production in the Antarctic Ocean. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2004, 61(5): 736-743

KIENE R P, SLEZAK D. Low dissolved DMSP concentrations in seawater revealed by small-volume gravity filtration and dialysis sampling. *Limnology and Oceanography Methods*, 2006, 4(4): 80-95

KIRST G O. Osmotic adjustment in phytoplankton and macroalgae: The use of dimethylsulfoniopropionate (DMSP). In: Kiene RP, Visscher PT, Keller MD, *et al.* Biological environment chemistry of DMSP and related sulfonium compounds. New York: Plenum Press, 1996, 121-130

KWINT R L J, IRIGOIEN X, KRAMER K J M. Copepods and DMSP. In: Kiene RP, Visscher PT, Keller MD, *et al.* Biological and environmental chemistry of DMSP and related sulfonium compounds. New York: Plenum Press, 1996, 239-252

LECK C, LARSSON U, BÅGANDER L E, *et al.* Dimethyl sulfide in the Baltic Sea: Annual variability in relation to biological activity. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 1990, 95(C3): 3353-3363

LI C X, WANG B D, YANG G P, *et al.* Occurrence and turnover of biogenic sulfur in the Bering Sea during summer. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2017, 122(11): 8567-8592

LING W K, HUANG H W, LIU B, *et al.* Mercury and cadmium resistance and enrichment mechanism of mussel foot fibroin. *Journal of Shenzhen University Science and Engineering*,

- 2019, 36(4): 361–366 [凌文康, 黄慧炜, 刘冰, 等. 贻贝足丝蛋白的汞、镉抗性及其富集机制. 深圳大学学报(理工版), 2019, 36(04): 361–366]
- MALIN G, LISS P S, TURNER S M. Dimethyl sulphide: production and atmospheric consequences. In: Green JC, Leadbeater BSC. The hapotophyte algae. Oxford: Clarendon Press, 1994, 303–320
- REN L H. Research on carbon sequestration of cultured oyster *Crassostrea giga* and its fouling organisms in Sanggou Bay. Doctoral Dissertation of Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2014 [任黎华. 桑沟湾筏式养殖长牡蛎及其主要滤食性附着生物固碳功能研究. 中国科学院研究生院博士研究生学位论文, 2014]
- WANG P B, SONG J M, GUO Z Y, *et al.* The inducements of resuspension of sea surface sediment and their effects on recycle of biogenic elements. *Marine Sciences*, 2005, 29(10): 77–80 [王丕波, 宋金明, 郭占勇, 等. 海洋表层沉积物再悬浮的诱因及其对生源要素循环的影响. 海洋科学, 2005, 29(10): 77–80]
- WOLFE G V, STEINKE M. Grazing-activated production of dimethyl sulfide (DMS) by two clones of *Emiliania huxleyi*. *Limnology and Oceanography*, 1996, 41(6): 1151–1160
- YANG G P, LI X. Biologic processes that influence the production of dimethylsulfide (DMS) from marine phytoplankton. *Periodical of Ocean University of China (Natural Science)*. 2009, 39(3): 453–460, 542 [杨桂朋, 厉承焜. 海洋生物对二甲基硫生产的控制作用研究. 中国海洋大学学报(自然科学版) 2009, 39(3): 453–460, 542]
- YIN Y X. Study of shallow water “a characteristics” based on marine seismology. Doctoral Dissertation of Ocean University of China, 2012 [尹燕欣. 基于海洋地震学的浅海水体特征研究. 中国海洋大学博士研究生学位论文, 2012]
- ZHANG Y. Influence of zooplankton grazing on the production and transfer of dimethylsulfide. Master's Thesis of Ocean University of China, 2012 [张瑜. 浮游动物摄食对二甲基硫产生和转移的影响. 中国海洋大学硕士研究生学位论文, 2012]
- ZHOU Y, YANG H S, ZHANG F S. Biodeposition by seawater bivalve mollusk. *Marine Sciences*, 2003, 27(2): 23–26 [周毅, 杨红生, 张福绥. 海水双壳贝类的生物沉积及其生态效应. 海洋科学, 2003, 27(2): 23–26]

(编辑 陈严)

Effects of Feeding Activities by Four Common Economic Bivalves on the Production of Dimethyl Sulfur Compounds from *Isochrysis galbana*

HOU Xing^{1,2}, WANG Ying³, LIU Tianhong³, DU Meirong¹, GAO Yaping¹, JIANG Weiwei¹,
LI Fengxue¹, DONG Shipeng^{1,2}, LI Wenhao^{1,2}, JIANG Zengjie^{1,4}

(1. Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Key Laboratory of Sustainable Development of Marine Fisheries, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Qingdao, Shandong 266071, China; 2. College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 3. Marine Biology Institute of Shandong Province Qingdao, Shandong 266104; 4. Laboratory for Marine Fisheries Science and Food Production Processes, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao, Shandong 266071, China)

Abstract Dimethyl sulfide (DMS) is an important biological sulfide in the ocean that can alleviate global warming. Dimethylsulfoniopropionate (DMSP) is the DMS precursor and mainly exists in phytoplankton. Filter-feeding bivalves are an important ecological group in coastal ecosystems, and their phytoplankton feeding activities may affect the production of dimethyl sulfide. In this study, four common economic filter-feeding bivalves, the Pacific oyster *Crassostrea gigas*, blue mussel *Mytilus edulis*, Zhikong scallop *Chlamys farreri*, and manila clam *Ruditapes philippinarum* were selected as experimental subjects, and fed them on the microalgae *Isochrysis galbana* with higher dimethylsulfoniopropionate (DMSP) contents. Variations of dimethyl sulfide (DMS) and DMSP in the water under static and disturbance conditions were monitored in a laboratory simulation experiment, and the effects of DMS(P) release from bivalve feces were analyzed. The results showed that the bivalves' feeding activities on phytoplankton had no significant effect on the release of DMS ($P > 0.05$) under static conditions, but the concentration of DMSP_p was significantly reduced by biodeposition ($P < 0.05$), ~40% of the DMSP_p intake was converted to fecal DMSP (DMSP_f). DMSP_f diffused into the water under disturbance conditions, and increased the concentrations of total suspended DMSP (DMSP_t) and DMS. The disturbance experiment of total original water revealed that compared to the control group (0 r/min), the DMS and DMSP_t in the treatment group, can increased up to 16.8% and 38.5% respectively. Further disturbance experiment of quantitative fecal found that the DMS and DMSP_t concentrations in 1 L of seawater containing 0.08 g of feces increased following disturbance. DMS and DMSP_t increased from 7.6 nmol/L and 906.4 nmol/L (static condition) to a maximum of 21.3 nmol/L and 2 505.9 nmol/L (disturbance condition), representing increases of 180% and 174%, respectively. This study contributes to a better understanding of how bivalves' feeding activities influence the marine sulfur cycle, the follow-up research can be extended to the field enclosure experiment and aquaculture area investigation.

Key words Filter-feeding bivalve; Feeding activity; Phytoplankton; Dimethyl sulfur compound

① Corresponding author: JIANG Zengjie, E-mail: jiangzj@ysfri.ac.cn