

2016 年春季西太平洋 M2 海山浮游植物 粒级结构与初级生产力研究*

代 晟^{1,2} 孙晓霞^{1,2,3①} 梁俊华¹ 田梓杨^{1,2} 刘 涛^{1,2}

(1. 中国科学院海洋研究所 山东胶州湾海洋生态系统国家野外科学观测研究站 青岛 266071; 2. 中国科学院大学 北京 100049; 3. 青岛海洋科学与技术国家实验室 海洋生态与环境科学功能实验室 青岛 266071)

摘要 2016 年 3 月对西太平洋马里亚纳区域 M2 海山浮游植物粒级结构和分粒级初级生产力进行了观测, 同时结合温度、盐度和营养盐浓度, 研究了 M2 海山的总叶绿素 *a* 浓度的分布规律, 不同粒级浮游植物对总叶绿素 *a* 的贡献率及其与环境因子的关系, 初级生产力结构和分布特征。结果表明: M2 海山各水层叶绿素 *a* 浓度变化范围分别为 0.004—0.304mg/m³, 平均叶绿素 *a* 浓度为 0.094mg/m³。微小型浮游植物在整个调查区域内为最优势类群, 对总叶绿素 *a* 浓度的贡献率达到了 85%, 微型浮游植物和小型浮游植物的贡献率均较低, 分别为 10%和 5%。M2 海山的叶绿素 *a* 浓度最大层均在 100m 深度附近的次表层, 其中西南部和东南部为叶绿素 *a* 浓度高值区。M2 海山的平均初级生产力为 71.31mgC/(m²·d), 初级生产力的主要贡献者为微型和微小型浮游植物, 其中微型浮游植物贡献率达到了 72%, 微小型浮游植物贡献率为 28%。M2 海山的海山效应不明显, 浅海山(<200m)可能对浮游植物的生长存在促进作用。

关键词 热带西太平洋; 海山; 浮游植物叶绿素 *a*; 粒级结构; 初级生产力

中图分类号 P717 **doi:** 10.11693/hyhz20170900237

海山(seamount)通常是指深海大洋中位于水面以下, 高度大于 1000m 的隆起地形(Epp *et al*, 1989)。海山是研究海洋生物活动的热点区域, 全球范围内估计有 3 万座海山(张均龙等, 2013), 但有研究记录的只有不到 1% (Clark *et al*, 2012; Djurhuus *et al*, 2017; Read *et al*, 2017)。

由于海山独特的地形特征, 一些学者认为洋流在流经海山的复杂地形时, 形成内波、上升流和泰勒柱(Genin *et al*, 1985; Dower *et al*, 1992)等物理过程, 促进了海水的垂直混合, 有利于浮游植物的生长(White *et al*, 2007), 进而支撑起了海山区域较高的浮游生物、底栖动物和鱼类的生物量, 特别是在一些寡营养海区(Clark *et al*, 2010; Letessier *et al*, 2017), 这一理论被称为“海山效应”的经典假说(Dower *et al*, 1996)。在 Cobb Seamount (Dower *et al*, 1992)和 Minami-

kasuga Seamount (Genin *et al*, 1985)海山山顶附近发现了由泰勒柱引起的浮游植物生物量和初级生产力升高的现象, 但该现象在同一海山并不长期存在, 如 Cobb Seamount (Comeau *et al*, 1995), 还有一些海山如 Britannia Seamount (Young *et al*, 2011)、Vercelli Seamount (Misic *et al*, 2012)和 Komahashi No.2 Seamount (Odate *et al*, 1998)等的研究并不支持该假说。

热带西太平洋是海山系统分布最集中的海区之一(张均龙等, 2013), 该海域长期存在物理分层现象, 表层具有高温寡营养盐和低生产力的特征(Messié *et al*, 2006), 受营养盐和光照的限制, 叶绿素最大层(deep chlorophyll maximum layer, DCML)常出现在温跃层上层附近 (Cordeiro *et al*, 2013)。以往研究表明该海区初级生产者主要为微型和微小型浮游植物

* 中国科学院战略性先导科技专项(A 类), XDA11030204 号; “973”课题“陆坡浮游生物群落分布及功能”, 2014CB441504 号; 中国科学院创新交叉团队“海洋中尺度动力过程及其生态效应”项目资助。代晟, 硕士研究生, E-mail: 270611540@qq.com

通讯作者: 孙晓霞, 博士生导师, 研究员, E-mail: xsun@qdio.ac.cn

收稿日期: 2017-09-18, 收修改稿日期: 2017-10-10

(Zhang *et al*, 2012), 聚球藻和原绿球藻为优势藻类 (Le Bouteiller *et al*, 1992)。该区域的海山属于典型的寡营养海域海山, 目前对该区域海山的各项研究尚处于起步阶段, 浮游植物与初级生产力的研究鲜有报道, 海山是否会引引起生产力升高等现象尚不明确。

本研究于 2016 年 3 月热带西太平洋 M2 海山 (11.19°—11.49°N, 139.13°—139.55°E) 开展环境因子、分级叶绿素 *a* 浓度和初级生产力等研究, 首次对 M2 海山区浮游植物分布特征和粒级结构, 初级生产力结构特征进行了分析, 并主要与张文静等(2016)报道的同海域的雅浦 Y3 海山的浮游植物粒级结构与环境因素进行了对比, 以期了解 M2 海山区浮游植物粒级

结构、分布特征与环境因子之间的关系, M2 海山的初级生产力情况, 以及导致不同海山之间叶绿素 *a* 浓度和粒级结构差异的原因, 为深入了解热带寡营养海域海山生态系统特征与初级生产过程奠定基础。

1 材料与方法

1.1 采样站位

2016 年 3 月 14—24 日在热带西太平洋近马里亚纳海沟的 M2 海山 (11.19°—11.49°N, 139.13°—139.55°E) 分 A、B 两个断面, 共 21 个站位对分粒级叶绿素 *a* 浓度和分粒级初级生产力进行了调查。采样站位如图 1 所示。

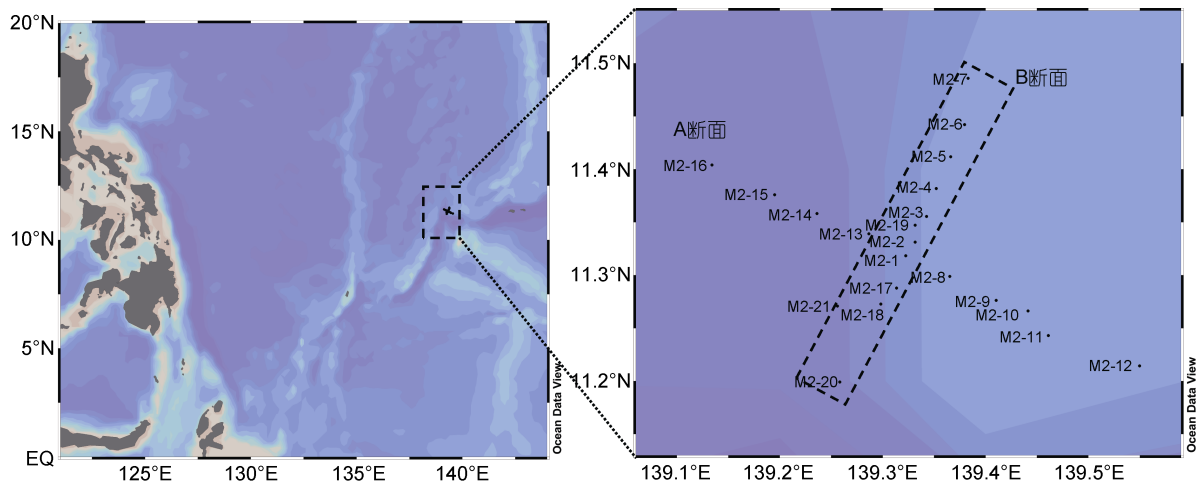


图 1 M2 海山采样站位图(右图方框代表 B 断面分布范围)

Fig.1 Sampling stations of Seamount M2 (Transections A and B)

1.2 研究方法

各站温度、盐度的垂直剖面数据用 CTD (SBE911) 进行测量, 其中 A 断面温盐数据在采集时, CTD 传感器出现故障, 导致该断面温盐数据缺失。

根据海洋调查规范(GB/T12763.6-2007), 采用 Niskin 采水器分 0、15、30、50、75、100、150、200m 共 8 层采集水样后, 先用孔径为 200 μ m 的筛绢过滤, 去除水体中的浮游动物, 之后每层取 2000mL 水, 分别用 20 μ m 筛绢、2 μ m Whatman Nuclepore Track-Etch 滤膜和 0.7 μ m Whatman GF/F 滤膜过滤, 取得 20—200 μ m (小型浮游植物, micro-phytoplankton)、2—20 μ m (微型浮游植物, nano-phytoplankton) 和 0.7—2 μ m (微微型浮游植物, pico-phytoplankton) 的叶绿素 *a* 样品, 同时取 2000mL 水, 用 0.7 μ m Whatman GF/F 滤膜过滤得到总叶绿素 *a* 样品。样品避光-20°C 冷冻保存带回实验室经 90% 丙酮萃取 24h 后, 用 Turner-Designs-

Model 10 荧光计测定并计算叶绿素 *a* 浓度。

硝酸盐、亚硝酸盐、磷酸盐、硅酸盐样品分别在 0、15、30、50、75、100、150 和 200m 水层取水 250ml, 按照海洋调查规范(GB12763.4-2007) 进行测定, 用 0.45 μ m 的混合纤维滤膜过滤后装入 250mL 高密度聚乙烯瓶中, 用占水样体积千分之二的氯仿固定后于 -20° 下冷冻保存, 在实验室用连续流动分析仪 (QuAAatro, Germany) 分析测定。

根据海洋调查规范(GB/T12763.6-2007), 分别在光强为表层的 100%、50%、30%、10%、5% 和 1% 的深度上采水, 水样用 200 μ m 筛绢过滤, 然后分别加入 0.037kBq 的 14 C 工作液, 用中性衰光材料控制光照强度, 在具有流动的海水水槽内培养 4—6h, 培养体积为 250cm³。培养结束后, 按与叶绿素相同的分级方法过滤样品。滤膜用浓盐酸熏蒸 15min 装入闪烁瓶, -20°C 冰冻保存, 带回实验室用 XH-6925 液体闪烁计

数器测定样品的 ^{14}C 放射性活度。按海洋调查规范的方法中的公式计算每一水层初级生产力, 然后根据(公式 1)计算水柱初级生产力, 最后测定水柱叶绿素 a 浓度, 根据(公式 2)计算水柱叶绿素同化系数。

公式 1:

$$P_s = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{P_{vi} + P_{vi+1}}{2} (D_{i+1} - D_i)$$

式中, P_s 为水柱初级生产力, $\text{mgC}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$; P_{vi} 为第 i 层初级生产力, $\text{mgC}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$; D_i 为第 i 层深度, m ; n 为采样层次数($1 \leq i \leq n-1$)。

公式 2:

$$I = \frac{P_s}{\text{chl } a}$$

式中, I 为水柱叶绿素同化系数, $\text{mgC}/(\text{mg chl } a \cdot \text{h})$; P_s 为水柱初级生产力, $\text{mgC}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$; $\text{chl } a$ 为水柱叶绿素 a

浓度, mg/m^3 。

1.3 数据分析

使用 Ocean Data View(4.5.5) 绘制图, 采用 Microsoft Office Excel 2016 绘制表格, 用 $R(3.4.0)$ 进行双侧显著性 T 检验和主成分分析。

2 结果

2.1 温盐分布特征

M2 海山 B 断面温度、盐度分布见图 2。总体上, B 断面温度和盐度的垂直分布较为相似, 呈现明显的分层现象。且海山东北部靠近山体的区域表现为温度和盐度的涌升。如图 2a 所示, 表层水温($<50\text{m}$)达到了 28°C , 在 75m 深度处, 开始出现温跃层; 海山山顶的东北部等温线有明显波动, 在 75m 水层 M2-03 站位温度最低为 26.39°C , 出现等温线抬升的现象; 东北部等温线总体比西南部密集, 在海山东北部表层盐度出现低值区, 小于 34.6 ; 盐度最大层均位于 100m 附近(图 2b), 对应在 $20\text{—}26^\circ\text{C}$ 等温线之间, 其波动情况与等温线相吻合。

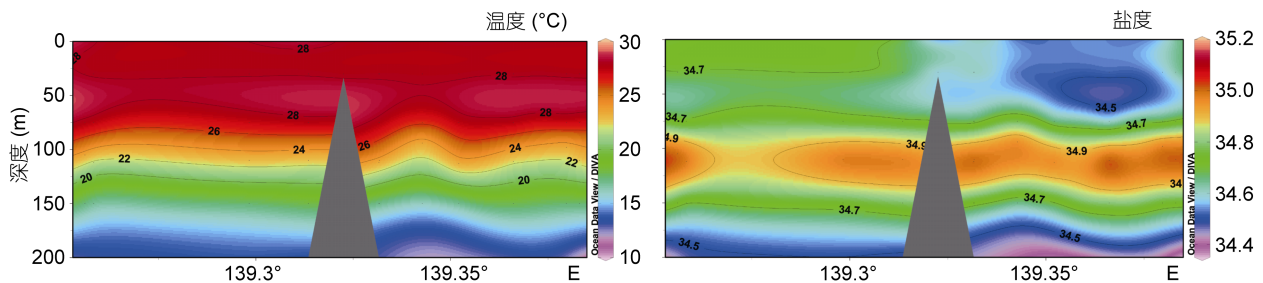


图 2 M2 海山 B 断面温度、盐度垂直分布图

Fig.2 Vertical distribution of temperature () and salinity in Seamount M2 across Transection B

注: a. B 断面温度分布; b. B 断面盐度分布

2.2 叶绿素 a 分布特征

2.2.1 总叶绿素 a 分布特征 A 断面叶绿素 a 浓度的平均值为 $(0.094 \pm 0.010)\text{mg}/\text{m}^3$, 各水层浓度的变化范围为 $0.011\text{—}0.304\text{mg}/\text{m}^3$ 。表层叶绿素 a 浓度的平均值为 $(0.042 \pm 0.012)\text{mg}/\text{m}^3$, 最高浓度值为 $0.068\text{mg}/\text{m}^3$, 出现在 M2 海山的 M2-12 站位, 最低浓度为 $0.027\text{mg}/\text{m}^3$, 出现在 M2-08 站位。各水层叶绿素 a 平均浓度最大值为 $0.236\text{mg}/\text{m}^3$, 位于 100m 水层, 变化范围为 $0.177\text{—}0.304\text{mg}/\text{m}^3$, DCML 均在 100m 水深附近(图 3a)。水柱叶绿素 a 浓度范围为 $15.355\text{—}21.367\text{mg}/\text{m}^2$, 平均值为 $(18.898 \pm 1.994)\text{mg}/\text{m}^2$ 。A 断面水体平均叶绿素 a 浓度变化范围为 0.077—

$0.107\text{mg}/\text{m}^3$, 在山顶附近的 M2-10 站位平均叶绿素 a 浓度最高, 东南部浓度高于西北部。

B 断面叶绿素 a 浓度的平均值为 $(0.094 \pm 0.008)\text{mg}/\text{m}^3$, 各水层浓度的变化范围为 $0.004\text{—}0.262\text{mg}/\text{m}^3$ 。表层叶绿素 a 浓度的平均值为 $(0.040 \pm 0.005)\text{mg}/\text{m}^3$, 最高浓度为 $0.047\text{mg}/\text{m}^3$, 位于 M2-18 站位, 最低为 $0.029\text{mg}/\text{m}^3$, 位于 M2-02 站位, 各水层叶绿素 a 平均浓度最大值为 $0.231\text{mg}/\text{m}^3$, 位于 100m 水层, 除 M2-20 站位外, DCML 均为 100m (图 3b)。水柱叶绿素 a 浓度范围为 $16.338\text{—}21.197\text{mg}/\text{m}^2$, 平均值为 $(18.710 \pm 1.617)\text{mg}/\text{m}^2$ 。B 断面水体平均叶绿素 a 浓度变化范围为 $0.082\text{—}0.106\text{mg}/\text{m}^3$, 在海山的西南部

M2-20 站位平均叶绿素 *a* 浓度最高, 东北部 DCML 的叶绿素 *a* 浓度高于西南部(图 3b)。

M2-01 站位位于山顶处, 水深只有 37m, 没有出现 DCML, 表层叶绿素 *a* 浓度为 0.533mg/m³, 水柱叶绿素 *a* 浓度为 1.098mg/m²。

海山各个水层叶绿素 *a* 浓度分布都不均匀, 最小值在 200m 水层, 最大层为最小层的 10—20 倍。A、B 断面表层叶绿素 *a* 浓度相当。M2 海山的叶绿素分布呈现西南部高于东北部, 东南部高于西北部的趋势; 垂直分布上, 随深度的增加, 各个站位的叶绿素 *a* 浓度均出现先增加后减小的趋势, DCML 多出现在 100m 水层, 其波动情况与等温线波动一致, 在海山

M2-03 站位出现抬升的情况, 整体分布与盐度最大层基本吻合(图 2, 图 3b)。

2.2.2 分粒级叶绿素 *a* 浓度分布 海山 A 断面小型浮游植物叶绿素 *a* 浓度的平均值为 0.003mg/m³, 各水层的变化范围为 0.0001—0.010mg/m³; 微型浮游植物叶绿素 *a* 浓度平均值为 0.011mg/m³, 变化范围为 0.0001—0.032mg/m³, 微微型浮游植物叶绿素 *a* 浓度平均值为 0.085 mg/m³, 各水层的变化范围为 0.0113—0.274mg/m³。海山 B 断面各粒级叶绿素 *a* 的结构与 A 断面相似, 其浓度也相近, 平均浓度分别是 0.003、0.009、0.073mg/m³, 各水层的变化范围分别为 0.0001—0.011、0.0012—0.024、0.0017—

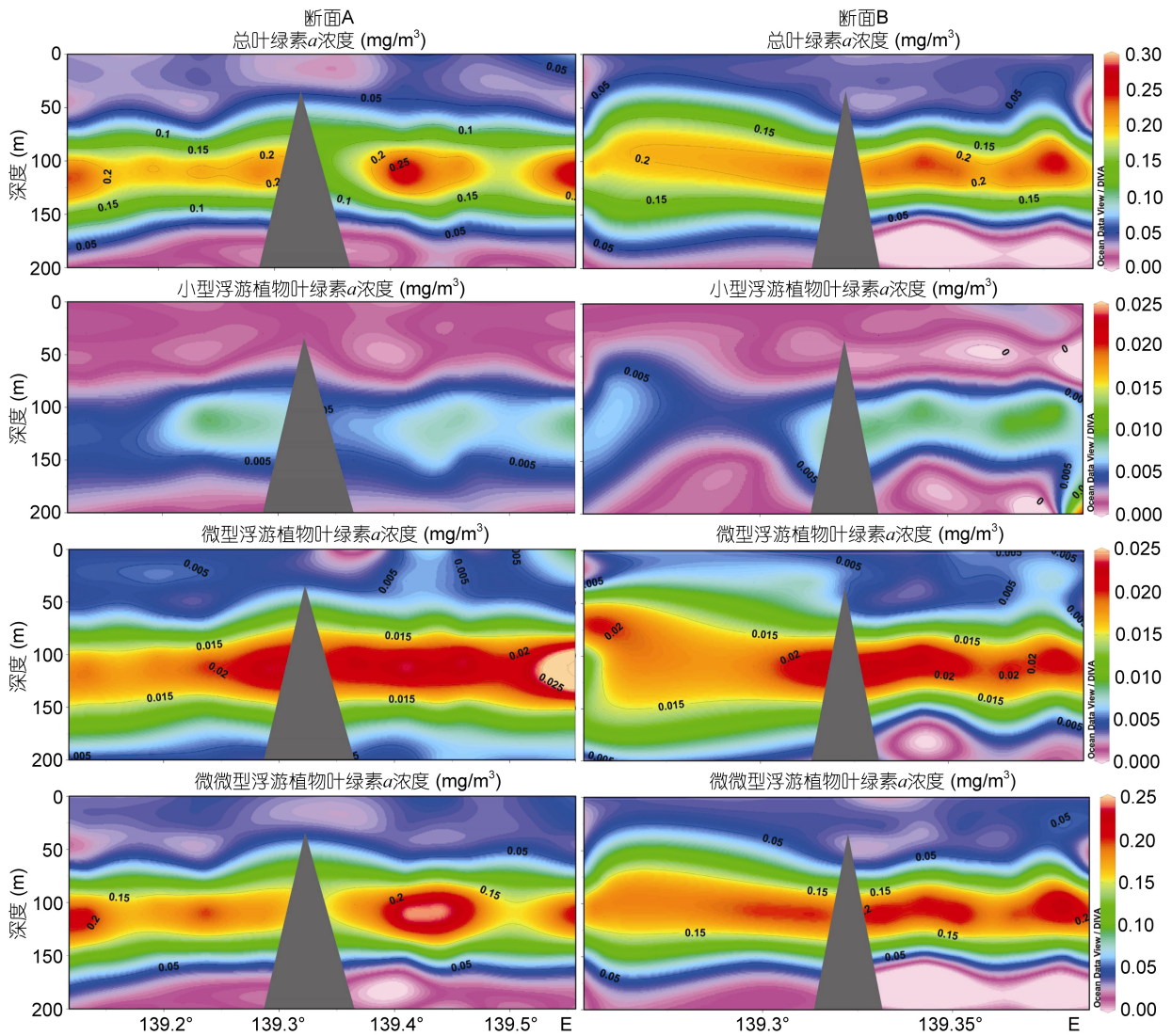


图 3 M2 海山 A、B 断面分粒级叶绿素 *a* 垂直分布情况

Fig.3 Vertical distribution of size-fractionated Chl a in Seamount M2 (Transsections A and B)

注: a. A 断面总叶绿素 *a* 浓度分布; b. B 断面总叶绿素 *a* 浓度分布; c. A 断面小型浮游植物叶绿素 *a* 浓度分布; d. B 断面小型浮游植物叶绿素 *a* 浓度分布; e. A 断面微型浮游植物叶绿素 *a* 浓度分布; f. B 断面微型浮游植物叶绿素 *a* 浓度分布; g. A 断面微微型浮游植物叶绿素 *a* 浓度分布; h. B 断面微微型浮游植物叶绿素 *a* 浓度分布

0.248mg/m³。三种粒级的浮游植物叶绿素 *a* 浓度最大层均与总叶绿素 *a* 浓度最大层相吻合, 在 100m 附近。其中小型浮游植物和微型浮游植物叶绿素 *a* 浓度在海山斜坡附近出现高值(图 3c, d, e, f)。

两个断面的浮游植物粒级结构相似, 微微型浮游植物的叶绿素 *a* 浓度贡献率最高, 均占了总叶绿

素 *a* 浓度的 85% 以上, 其次是微型浮游植物, 贡献最小的都是小型浮游植物, 贡献率不足 5%。100m 以上水层, 微微型浮游植物叶绿素 *a* 的贡献率最高, 随水深的增加, 其贡献率开始下降, 在 150—200m 水层, 微型浮游植物叶绿素 *a* 的贡献率提高到 20% 以上(表 1)。

表 1 M2 海山不同水层分粒级叶绿素 *a* 浓度贡献率(%)
Tab.1 Contribution (in percentage) of size-fractionated Chl *a* in different depths of every transection

| | 粒级 | 表层 | 50m | 100m | 150m | 200m | 总体 |
|---------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| A 断面 | 小型浮游植物 | 2.43 | 2.75 | 2.88 | 5.39 | 7.84 | 3.46 |
| | 微型浮游植物 | 10.34 | 12.1 | 9.39 | 13.81 | 21.56 | 11.13 |
| | 微微型浮游植物 | 87.23 | 85.15 | 87.73 | 80.8 | 70.6 | 85.41 |
| B 断面 | 小型浮游植物 | 3.82 | 2.59 | 3.28 | 5.88 | 11.38 | 3.78 |
| | 微型浮游植物 | 11.65 | 11.11 | 8.59 | 14.08 | 20.35 | 10.98 |
| | 微微型浮游植物 | 84.53 | 86.3 | 88.13 | 80.04 | 68.27 | 85.24 |

2.3 M2 海山初级生产力

M2 海山的叶绿素同化系数为 1.3587mgC/(mg chl*a*·h), 水柱初级生产力为 71.31mgC/(m²·d)。海山南部和北部初级生产力较高, 南部高于北部, 东部和西部生产力较低, 山顶处由于水深只有 37m, 没有出现叶绿素最大层, 因此初级生产力最低(图 4)。初级生产力组成主要为微型和微微型浮游植物, 其中微型浮游植物贡献率达到了 72%, 微微型浮游植物贡献率为 28%, 小型浮游植物可以忽略不计。

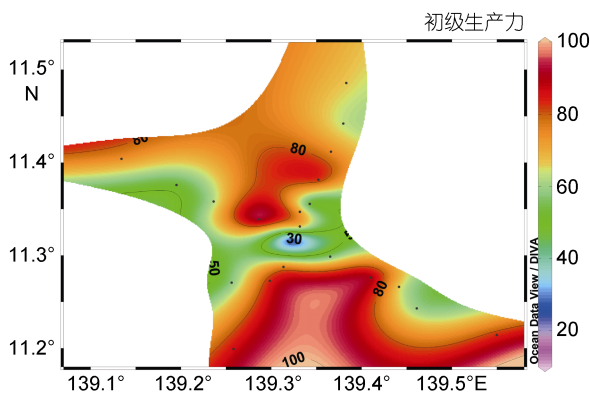


图 4 M2 海山区水柱初级生产力分布图(单位: mgC/(m²·d))

Fig.4 The distribution of primary productivity in Seamount M2 (mgC/(m²·d))

2.4 M2 海山营养盐

由表 2 可以看出, M2 海山的主要营养盐如磷酸盐、硝酸盐、硅酸盐等在 75m 及以上水层浓度较低, 尤其是硝酸盐浓度在 0m 和 15m 水层不到 1μg/L; 在

DCML 以下, 磷酸盐、硝酸盐和硅酸盐的浓度开始随水深增加而升高。200m 以上, 亚硝酸盐浓度均低于 1μg/L, 氨氮在 200m 水深处浓度大约是 150m 以上水层的 10 倍。

3 讨论

3.1 M2 海山区水文环境

M2 海山区位于热带西太平洋暖池区, 表层水温常年在 28°C 以上, 存在严重的水水分层现象(Messié *et al*, 2006), 从图 2 可以看出该海域温跃层较深, 接近 75m。北赤道流以 20cm/s 左右的流速自东向西流经 M2 海山(王凡等, 2001), 受到突起地形的影响, 上游的水流被压缩, 会导致气旋和反气旋漩涡的形成(Read *et al*, 2017), 进而在局部区域生成上升流, 使得水温较低、营养盐较为丰富的下层水上涌。如海山东北方向发现了等温线抬升的现象, 该现象暗示此处可能存在由涡引起的上升流等垂向运动物理过程。洋流在流经海山时, 和复杂的地形相互作用形成很多物理过程, 如内波、涡和泰勒柱等。Mouriño 等(2001)在 1992 年的 Great Meteor 海山山顶处发现了泰勒柱现象, 但在 1999 年对此海山的研究中没有发现到泰勒柱, 只观察到等温线抬升的现象, 等温线抬升的现象在多处海山的研究中均有发现(Comeau *et al*, 1995; Cordeiro *et al*, 2013; 张文静等, 2016)。

3.2 叶绿素 *a* 结构与分布特征

浮游植物的分布主要受温度、盐度、光照和营养盐等控制。对 M2 海山各站位的温度、盐度、硝酸盐、

表 2 M2 海山不同水层营养盐的平均浓度
Tab.2 The average nutrient concentration in different layers in Seamount M2

| 水层(m) | 磷酸盐($\mu\text{g/L}$) | 硝酸盐($\mu\text{g/L}$) | 亚硝酸盐($\mu\text{g/L}$) | 硅酸盐($\mu\text{g/L}$) | 氨氮($\mu\text{g/L}$) |
|-------|------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|-----------------------|
| 0 | 7.63 \pm 2.78 | 0.52 \pm 0.70 | 0.17 \pm 0.15 | 67.40 \pm 19.66 | 0.81 \pm 0.87 |
| 15 | 8.62 \pm 4.25 | 0.75 \pm 1.00 | 0.27 \pm 0.33 | 63.59 \pm 20.57 | 2.20 \pm 2.64 |
| 30 | 7.35 \pm 3.28 | 2.30 \pm 3.45 | 0.32 \pm 0.34 | 81.07 \pm 58.38 | 2.53 \pm 5.67 |
| 50 | 10.42 \pm 2.49 | 2.36 \pm 3.48 | 0.33 \pm 0.26 | 55.72 \pm 12.80 | 1.82 \pm 1.08 |
| 75 | 7.28 \pm 4.73 | 2.56 \pm 6.56 | 0.33 \pm 0.63 | 71.95 \pm 24.11 | 1.58 \pm 0.98 |
| DCM | 11.14 \pm 3.88 | 7.78 \pm 10.27 | 0.89 \pm 0.88 | 93.11 \pm 16.22 | 1.46 \pm 1.14 |
| 150 | 21.56 \pm 5.98 | 120.97 \pm 28.92 | 0.85 \pm 0.90 | 237.99 \pm 92.27 | 1.49 \pm 0.52 |
| 200 | 42.13 \pm 10.20 | 229.50 \pm 55.98 | 0.84 \pm 0.94 | 508.60 \pm 194.82 | 19.74 \pm 24.58 |

表 3 M2 海山主要环境要素主成分分析结果
Tab.3 The Principal Component Analysis of the major environment factors in Seamount M2

| 环境因子 | 主成分 | | |
|------|--------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 |
| 温度 | -0.458 | 0.193 | -0.203 |
| 盐度 | -0.273 | -0.177 | 0.753 |
| 磷酸盐 | 0.487 | | 0.153 |
| 硝酸盐 | 0.492 | | |
| 亚硝酸盐 | | -0.726 | 0.245 |
| 硅酸盐 | 0.434 | 0.112 | 0.109 |
| 铵盐 | | -0.625 | -0.537 |

亚硝酸盐、磷酸盐、铵盐和硅酸盐进行主成分分析, 前三个主成分的累计概率为 91%, 结果如表 3。其中第一主成分主要由温度、硝酸盐、磷酸盐和硅酸盐组成, 第二主成分主要由铵盐和亚硝酸盐组成, 第三部分主要由盐度和铵盐组成。其中深度直接影响温度, 并间接通过温跃层影响营养盐的分布, 因此第一主成分主要代表了深度变化及其对温度和营养盐分布的影响; 第二主成分主要代表生物活动导致的铵盐和亚硝酸盐的变化; 第三主成分主要为洋流和密度分层引起的盐度变化。

温度、光照和营养盐随深度变化, 进而影响浮游植物的垂直分布。本航次营养盐数据表明在 DCML 及其以上的海水中各种营养盐的浓度都稳定在一个较低值, 尤其是硝酸盐浓度很低, 只有 $10\mu\text{g/L}$, 存在严重的营养盐限制; 在 DCML 以下, 主要营养盐的浓度随水深增加而增加。M2 海山位于西太平洋暖池区, 表层水温常年在 28°C 左右, 水体长期存在物理分层现象, 营养盐较为丰富的下层水无法与上层水进行交换, 上层水中营养盐成为浮游植物生长的限制因素, 并且该区域表层较强的光照会对浮游植物产生光抑制作用(李俊磊等, 2016), 在次表层, 浮游植物

可以从下层水得到营养盐, 同时也可以得到适当的光照强度, 而真光层下方, 光照成为限制浮游植物生长的主要因素, 因此出现次表层叶绿素 *a* 浓度最大值的现象。洋流流经海山时产生的物理过程可以直接影响浮游植物的分布, 另外还可以打破原有稳定的分层, 使下层有较丰富营养盐、水温较低的海水上涌, 从而促进了上层浮游植物的生长, 因此出现 DCML 与等温线相一致的波动情况。这一现象在 Minami-Kasuga 海山(Genin *et al.*, 1985)及 Komahashi No.2 海山(Odate *et al.*, 1998)也存在。

M2 海山微型浮游植物叶绿素 *a* 的贡献率达到了 85%, 稍高于 Zhang(2012)等人春季对该海区的调查, 与刘子琳等(2006)在 2002 年春季黑潮源区的浮游植物粒级结构相吻合。浮游植物的结构和分布主要受营养盐结构和光照的影响。微型浮游植物之所以占据绝对优势, 是因为调查区域所处的热带西太平洋海域是寡营养盐区, 表层营养盐尤其是硝酸盐浓度很低, 限制了小型和微型浮游植物的生长, 而微型的聚球藻可以通过固氮对硝酸盐进行补偿, 一些微型浮游植物可以适应深层较低光照强度(Mackey *et al.*, 2002), 如在南太平洋的调查中发现原绿球藻在 1%光照强度下处于优势地位(DiTullio *et al.*, 2003)。此次调查发现 150—200m 水层中, 随水深增加, 总叶绿素 *a* 浓度迅速下降, 但相对来说微型浮游植物贡献率有所提高(表 2)。Bouteiller 等(1992)在该海区的研究结果表明, 该海域 100m 以上水层, 微型蓝藻为优势藻种, 100m 以下水层, 聚球藻渐渐被微型原绿球藻所取代, 整个真光层中微型金藻(主要为颗石藻)垂直分布较均匀, 该研究结果与此次调查结果相吻合。

3.3 初级生产力

该海区表层水体营养盐耗尽, 初级生产力受营养盐限制, 而 DCML 营养盐相对丰富, 初级生产力却

受到光限制,因此整体初级生产力水平较低。本次调查 M2 海山的平均初级生产力为 $71.31\text{mgC}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$, 钱宏林等(1986)和 Friedrichs 等(2009)对该海域的生产力的估算结果为 $50\text{—}100\text{mgC}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$, 与本次调查结果较为一致。Genin 等(1985)和 Dower 等(1992)等分别在 Minamikasuga 海山和 Cobb 海山山顶附近均发现了初级生产力升高的现象,并由此提出了“海山效应”的经典假说(Dower *et al.*, 1996),但是此次对 M2 海山的调查结果并不支持该假说,Comeau 等(1995),White 等(2007),Young 等(2011)和 Misic 等(2012)对海山的调查中也并没有发现明显的初级生产力升高的现象。

此次调查结果表明在 M2 海山附近,虽然微型浮游植物对叶绿素 *a* 浓度的贡献率达到了 85%,但是其对初级生产力的贡献率只有 30%左右,初级生产力的主要贡献者为微型浮游植物。以往研究表明微型浮游植物初级生产力的贡献率远远低于叶绿素 *a* 的贡献率,尤其是在寡营养海区(Fernández *et al.*, 2003),如热带北大西洋寡营养水体的研究表明微型浮游植物虽然占浮游植物总生物量的 75%,但是却只贡献了一半左右的初级生产力(Fernández *et al.*, 2003)。

3.4 M2 海山与 Y3 海山比较

本次调查的 M2 海山与张文静等(2016)报道的雅浦 Y3 海山都位于热带西太平洋区域,均发现了等温线波动的现象,但是均未在山顶处发现泰勒柱存在。原因可能是地球自转偏向力在赤道附近很小,不足以形成泰勒柱(White *et al.*, 2007),也可能是该区域存在速率较快的向西流动的北赤道海流,阻止了海山上形成稳定循环流动(Read *et al.*, 2017)。

此次调查春季 M2 海山 A、B 断面平均叶绿素 *a* 浓度均为 $0.094\text{mg}/\text{m}^3$,明显高于冬季 Y3 海山的 0.057 和 $0.054\text{mg}/\text{m}^3$ (张文静等, 2016)。这可能是两座海山的山顶距海平面深浅程度不同引起的差异: M2 海山山顶深度仅为 37m,而 Y3 海山山顶深度接近 300m。通常较浅的海山浮游植物生物量相对较高。Sonnekus 等(2016)在西南印度洋的六座海山调查中发现,浅的海山(深度 $<200\text{m}$)对浮游植物的生物量有促进作用。较浅的 M2 海山可能在潮汐能和内波的作用下,在海山山顶部存在流速加快的现象,引起有机颗粒的再悬浮(Eriksen, 1991; Misic *et al.*, 2012),使得 M2 海山附近真光层中有较高的物质周转效率;另外 M2 海山真光层中可能存在底栖群落与浮游群落的直接作用(Cordeiro *et al.*, 2013),也会加快物质的循环,从而促

进各粒级浮游植物的生长。对两座海山的对比研究中发现春季 M2 海山的表层盐度(深度 $<30\text{m}$)显著高于雅浦 Y3 海山($df=51, P<0.05$), M2 海山 DCML 磷酸盐浓度极显著高于 Y3 海山(M2: $10.96\mu\text{g}/\text{L}$, Y3: $7.67\mu\text{g}/\text{L}$, $df=29, P<0.01$), M2 海山 DCML 硅酸盐浓度显著高于 Y3 海山(M2: $91.75\mu\text{g}/\text{L}$, Y3: $69.98\mu\text{g}/\text{L}$, $df=15, P<0.05$),可能是 M2 海山浮游植物叶绿素 *a* 浓度较高的直接原因。

M2 海山微型浮游植物对总叶绿素 *a* 的贡献率明显高于 Y3 海山。冬季雅浦 Y3 海山(张文静等, 2016)虽然也是微型浮游植物具有优势,但其对总叶绿素 *a* 的贡献率在 A 断面为 60%左右, B 断面只有 50%左右。与雅浦 Y3 海山的温度数据进行对比发现,春季 M2 海山的温跃层深度更深,在 75m 附近,与 Zhang 等(2012)和刘子琳等(2006)等人的调查相同,而 Y3 海山的温跃层在 50m 附近,推测分层深度的增加,会使得下层水的光照限制更加严重。M2 海山的 DCML 多位于 100m 以深,小型和微型浮游植物难以适应该水深的光照强度,而微型浮游植物如原绿球藻则能在较低的光照下生存,因此微型浮游植物在 M2 海山区贡献率更高。

Y3 海山的初级生产力为 $35.31\text{mgC}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$,其中微型浮游植物贡献率最高,接近 80%,微型浮游植物贡献率约为 17%(Y3 海山未发表数据)。以往研究表明,较大的浮游植物($>2\mu\text{m}$)拥有更高的光合作用效率,尤其是在寡营养海区(Fernández *et al.*, 2003),与 M2 和 Y3 调查结果相吻合。M2 海山的初级生产力约为 Y3 海山的 2 倍,两座海山的对比结果表明,浮游植物在较浅的海山有更高的生物量和初级生产力。

4 结论

(1) M2 海山存在物理过程引起的等温线波动的现象,该过程促进了下层水和上层水的垂直交换,进而影响浮游植物的分布,导致 DCML 的波动。

(2) M2 海山微型浮游植物叶绿素 *a* 对总叶绿素 *a* 的贡献最大,达到了 85%以上;初级生产力为 $71.31\text{mgC}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$,其中微型浮游植物对总初级生产力的贡献最高,为 72%。

(3) M2 海山的海山效应不明显。

(4) M2 海山的叶绿素 *a* 浓度和初级生产力接近 Y3 海山两倍,浅的海山($<200\text{m}$)可能对浮游植物生物量起促进作用。M2 海山微型浮游植物的贡献率更高,两座海山粒级结构的差异主要是由温跃层深度

决定的。

(5) 目前针对西太平洋海山的浮游生态学研究较少, 建议增加不同季节的航次, 对不同深度的海山进行系统研究。

致谢 本研究部分样品采集由本课题组成员陈芸燕、张文静、李俊磊和孙玉娥等人完成, 温盐数据由中国科学院海洋研究所海洋专项办公室提供, 营养盐数据由李学刚老师提供, 此次海上调查得到了“科学号”考察船全体工作人员的支持, 谨致谢忱。

参 考 文 献

- 王 凡, 张 平, 胡敦欣等, 2001. 热带西太平洋环流及其季节变化. 科学通报, 46(23): 1998—2002
- 刘子琳, 陈忠元, 周蓓锋等, 2006. 黑潮源区及其邻近海域叶绿素 *a* 浓度的季节分布. 海洋湖沼通报, (1): 58—63
- 李俊磊, 孙晓霞, 张文静等, 2016. 2014 年冬季西太平洋浮游植物光合作用特征. 海洋与湖沼, 47(5): 935—944
- 张文静, 孙晓霞, 陈芸燕等, 2016. 2014 年冬季热带西太平洋雅浦 Y3 海山浮游植物叶绿素 *a* 浓度及粒级结构. 海洋与湖沼, 47(4): 739—747
- 张均龙, 徐奎栋, 2013. 海山生物多样性研究进展与展望. 地球科学进展, 28(11): 1209—121
- 钱宏林, 齐雨藻, 1992. 1986 年 11—12 月热带西太平洋初级生产力的估算. 暨南大学学报(自然科学), 13(3): 124—129
- Clark M R, Rowden A A, Schlacher T *et al*, 2010. The ecology of seamounts: structure, function, and human impacts. Annual Review of Marine Science, 2: 253—278
- Clark M R, Schlacher T A, Rowden A A *et al*, 2012. Science priorities for seamounts: research links to conservation and management. PLoS One, 7(1): e29232
- Comeau L A, Vézina A F, Bourgeois M *et al*, 1995. Relationship between phytoplankton production and the physical structure of the water column near Cobb Seamount, Northeast Pacific. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 42(6): 993—1005
- Cordeiro T A, Brandini F P, Rosa R S *et al*, 2013. Deep chlorophyll maximum in western equatorial Atlantic—How does it interact with islands slopes and seamounts?. Marine Science, 3(1): 30—37
- DiTullio G R, Geesey M E, Jones D R *et al*, 2003. Phytoplankton assemblage structure and primary productivity along 170°W in the South Pacific Ocean. Marine Ecology-Progress Series, 255: 55—80
- Djurhuus A, Read J F, Rogers A D, 2017. The spatial distribution of particulate organic carbon and microorganisms on seamounts of the South West Indian Ridge. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 136: 73—84
- Dower J F, Mackas D L, 1996. “Seamount effects” in the zooplankton community near Cobb Seamount. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 43(6): 837—858
- Dower J, Freeland H, Juniper K, 1992. A strong biological response to oceanic flow past Cobb seamount. Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers, 39(7—8): 1139—1145
- Epp D, Smoot N C, 1989. Distribution of seamounts in the North-Atlantic. Nature, 337(6204): 254—257
- Eriksen C C, 1991. Observations of amplified flows atop a large seamount. Journal of Geophysical Research Oceans, 96(C8): 15227—15236
- Fernández E, Marañón E, Morán X A G *et al*, 2003. Potential causes for the unequal contribution of picophytoplankton to total biomass and productivity in oligotrophic waters. Marine Ecology Progress, 254: 101—109
- Friedrichs M A M, Carr M-E, Barber R T *et al*, 2009. Assessing the uncertainties of model estimates of primary productivity in the tropical Pacific Ocean. Journal of Marine Systems, 76(1—2): 113—133
- Genin A, Boehlert G W, 1985. Dynamics of temperature and chlorophyll structures above a seamount: an oceanic experiment. Journal of Marine Research, 43(4): 907—924
- Le Bouteiller A, Blanchot J, Rodier M, 1992. Size distribution patterns of phytoplankton in the western Pacific: towards a generalization for the tropical open ocean. Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers, 39(5): 805—823
- Letessier T B, De Grave S, Boersch-Supan P H *et al*, 2017. Seamount influences on mid-water shrimps (Decapoda) and gnathophausiids (Lophogastridea) of the south-west Indian ridge. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 136: 85—97
- Mackey D J, Blanchot J, Higgins H W *et al*, 2002. Phytoplankton abundances and community structure in the equatorial Pacific. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 49(13—14): 2561—2582
- Messié M, Radenac M-H, 2006. Seasonal variability of the surface chlorophyll in the western tropical Pacific from SeaWiFS data. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 53(10): 1581—1600
- Misic C, Bavestrello G, Bo M *et al*, 2012. The “seamount effect” as revealed by organic matter dynamics around a shallow seamount in the Tyrrhenian Sea (Vercelli Seamount, western Mediterranean). Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 67: 1—11
- Mouriño B, Fernández E, Serret P *et al*, 2001. Variability and seasonality of physical and biological fields at the Great Meteor Tablemount (subtropical NE Atlantic). Oceanologica Acta, 24(2): 167—185
- Odate T, Furuya K, 1998. Well-developed subsurface chlorophyll maximum near Komahashi No.2 Seamount in the summer of 1991. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 45(10): 1595—1607
- Read J, Pollard R, 2017. An introduction to the physical oceanography of six seamounts in the southwest Indian Ocean. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 136: 44—58
- Sonnekus M J, Bornman T G, Campbell E E, 2016. Phytoplankton and nutrient dynamics of six South West

- Indian Ocean seamounts. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 136: 59—72
- White M, Bashmachnikov I, Aristegui J *et al*, 2007. Physical Processes and Seamount Productivity. In: Pitcher T J, Morato T, Hart P J B *et al*, eds. *Seamounts: Ecology, Fisheries & Conservation*. Blackwell, Oxford, UK: Fish and Aquatic Resources Series, 62—84
- Young J W, Hobday A J, Campbell R A *et al*, 2011. The biological oceanography of the East Australian Current and surrounding waters in relation to tuna and billfish catches off eastern Australia. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 58(5): 720—733
- Zhang D S, Wang C S, Liu Z S *et al*, 2012. Spatial and temporal variability and size fractionation of chlorophyll *a* in the tropical and subtropical Pacific Ocean. *Acta Oceanologica Sinica*, 31(3): 120—131

BIOAMASS OF SIZE-FRACTIONATED PHYTOPLANKTON AND PRIMARY PRODUCTIVITY AT M2 SEAMOUNT IN TROPICAL WEST PACIFIC IN SPRING 2016

DAI Sheng^{1,2}, SUN Xiao-Xia^{1,2,3}, LIANG Jun-Hua¹, TIAN Zi-Yang^{1,2}, LIU Tao^{1,2}

(1. Jiaozhou Bay Marine Ecosystem Research Station, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Laboratory for Marine Ecology and Environmental Science, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China)

Abstract The distribution and concentration of size-fractionated chlorophyll *a* (chl *a*) and size-fractionated primary productivity at Seamount M2 in the western Pacific were investigated in spring 2016. The results show that the average chl *a* concentration was 0.094 mg/m³, of which pico-phytoplankton chl *a* was dominant for occupying >85%. The deep chlorophyll maximum layer (DCML) was observed at 100 m in depth. The primary productivity was about 71.31 mgC/(m²·d), and composed of mainly nano- and pico-phytoplankton productivity. The nano-phytoplankton productivity contributed 72% to the primary productivity, although the biomass of nano-phytoplankton was only about 10% of the total. The pico-phytoplankton productivity contributed 28% to the primary productivity. Therefore, no obvious “Seamount Effect” was found in Seamount M2, and a shallow seamount (<200 m) may promote the growth of phytoplankton.

Key words the Western Pacific; Seamount; phytoplankton chl *a*; size classes; primary productivity