

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*

张文静^{1,2} 孙晓霞^{1,3①} 陈芸燕^{1,2} 李俊磊^{1,2} 杜娟¹

(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 2014 年冬季对西太平洋雅浦区 Y3 海山及其邻近大洋海域不同粒径浮游植物叶绿素 *a* 浓度进行了现场观测, 同时结合温度、盐度、营养盐数据, 分析了 Y3 海山区总叶绿素 *a* 浓度分布情况, 不同粒级浮游植物对总叶绿素 *a* 浓度的贡献率及其与环境因子的关系, 并与热带西太平洋大洋区(DY 断面)进行了比较。结果表明: Y3 海山 A、B 断面与 DY 断面水体平均叶绿素 *a* 浓度相差不大, 分别为 0.057、0.054 和 0.051 mg/m³, A、B 和 DY 三个断面各水层(0、30、75、100、150 和 200m)叶绿素 *a* 浓度变化范围分别为 0.009—0.205、0.005—0.236 和 0.007—0.229 mg/m³。不同粒级浮游植物的叶绿素 *a* 占总叶绿素 *a* 的比例从大到小依次为微微型浮游植物、微型浮游植物和小型浮游植物, 三者各断面的比例分别为 A 断面: 59.97%, 25.39%, 14.64%; B 断面: 50.87%, 30.70%, 18.43%; DY 断面: 55.87%, 29.87%, 14.26%。微微型浮游植物在整个调查区域为优势类群, 在 A、B 和 DY 三个断面的平均浓度分别为 0.025、0.026 和 0.029 mg/m³。各站位均有次表层叶绿素 *a* 浓度最高值现象, 其中 Y3 海山区西南部和东南部为叶绿素 *a* 浓度高值区。洋流、温度和营养盐均对叶绿素 *a* 浓度分布有一定的影响。本研究发现海山经典假说不适用于 2014 年冬季的 Y3 海山区。

关键词 西太平洋海山; 浮游植物叶绿素 *a*; 粒级结构; 环境因子

中图分类号 P71704 doi: 10.11693/hyhz20160100020

海山(seamount)是指深海大洋生态系统中位于海平面以下, 高度大于 1000m 的隆起地形(Rogers, 1994)。海山特殊的地形地貌使其拥有复杂的水文地理环境特征(Chivers *et al.*, 2013), 洋流系统会因为地形障碍形成泰勒柱等独特水团(Genin *et al.*, 1985; Dower *et al.*, 1992; Dower *et al.*, 1996), 这种复杂的物理过程从营养来源、栖息地、沉积物的形成等多个方面造就了海山独特的生境, 使得海山生态系统拥有相比大洋环境而言更独特的生物区系, 有较高的生物量和物种多样性(Rogers, 1994)。因此, 海山生态系统一直受到国际和国内各研究者的关注(汪品先, 2013)。

目前针对海山区浮游生态学展开了一系列研究, 对浮游植物生态学的研究在大西洋区海山开展较多(Mouriño *et al.*, 2001; Mendonça *et al.*, 2012; Brotas *et al.*, 2013; Santos *et al.*, 2013; Tarcisio *et al.*, 2013; Denda *et al.*, 2014; Brito *et al.*, 2015), 在北太平洋和东北太平洋也有开展(Genin *et al.*, 1985; Dower *et al.*, 1992; Odate *et al.*, 1998), 但是目前还未见有关西太平洋海山的报道。研究表明, 分布在有些海山附近的底栖生物和鱼类等的生物量要高于所在大洋的背景值(Genin *et al.*, 1985; Dower *et al.*, 1992; Sime-Ngando *et al.*, 1992; Genin, 2004; Rowden *et al.*, 2010)。关于支撑该高生物量的饵料来源有 3 种假说: 经典假说、外来

* 中国科学院海洋先导科技专项(A 类), XDA11030204 号; 国家重点基础研究发展计划(973)资助项目, 2014CB441504 号。张文静, 硕士研究生, E-mail: wenjing271@126.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: 2016-01-08, 收修改稿日期: 2016-03-25

营养补充假说和颗粒有机物补充假说(张武昌等, 2014), 其中与初级生产力有关的是经典假说。经典假说是指局部上升流和封闭的反气旋涡旋(泰勒柱)共同作用促进了局地浮游植物的生长, 提高了初级生产力和次级生产力, 从而支撑游泳动物种群的生长(Dower *et al.*, 1996)。各学者针对这一假说展开了一系列研究, 但是结果不一。有的研究支持海山区具有高叶绿素浓度和初级生产力(Dower *et al.*, 1992), 有的研究表明海山区叶绿素浓度与周围海水中的浓度相当, 甚至浮游动物的生物量可能减少(Comeau *et al.*, 1995; Mouriño *et al.*, 2001; Rowden *et al.*, 2010)。

西太平洋是全球海山的集中分布地, 海洋生物多样性较高, 也是我国未来海山研究的重点区域(秦蕴珊等, 2011; 张均龙等, 2013)。热带西太平洋是典型的寡营养海域, 从台湾南部到雅浦海山断面区跨越黑潮区和北赤道流系, 同时位于西太平洋暖池区。目前, 对该区域浮游植物叶绿素的相关研究较少, 对雅浦区 Y3 海山浮游植物生态学的研究更是鲜有报道。

本文利用 2014 年冬季热带西太平洋台湾南部到雅浦区 Y3 海山断面和 Y3 海山区的温度、盐度、营

养盐、叶绿素 *a* 浓度数据, 首次对热带西太平洋海山浮游植物叶绿素 *a* 的粒级结构进行了研究, 分析探讨了 Y3 海山区叶绿素 *a* 浓度分布特征, 计算各粒级浮游植物对叶绿素 *a* 的贡献率并与相邻热带西太平洋区域叶绿素 *a* 浓度进行比较, 以期了解热带西太平洋海山浮游植物叶绿素 *a* 浓度、粒级结构特征及其与环境因子之间的关系, 系统研究热带西太平洋海山生态系统特征, 丰富海山浮游生态学的研究。

1 材料与方法

1.1 调查站位

2014 年 12 月 3 日至 2015 年 1 月 7 日在热带西太平洋雅浦区 Y3 海山(8.76°—9.02°N, 137.62°—137.95°E)及其邻近大洋区共 23 个站位(如图 1)对叶绿素 *a* 进行现场观测和采样, 其中 Y3-0 站位位于海山的山顶处。该研究区域位于热带西太平洋暖池区(0°—16°N, 125°—145°E)(张立峰等, 2006)。为了将海山区叶绿素 *a* 浓度分布情况与大洋区作对比, 选取 DY 断面获取热带西太平洋区的背景值, 该断面横跨黑潮源区和北赤道流区。

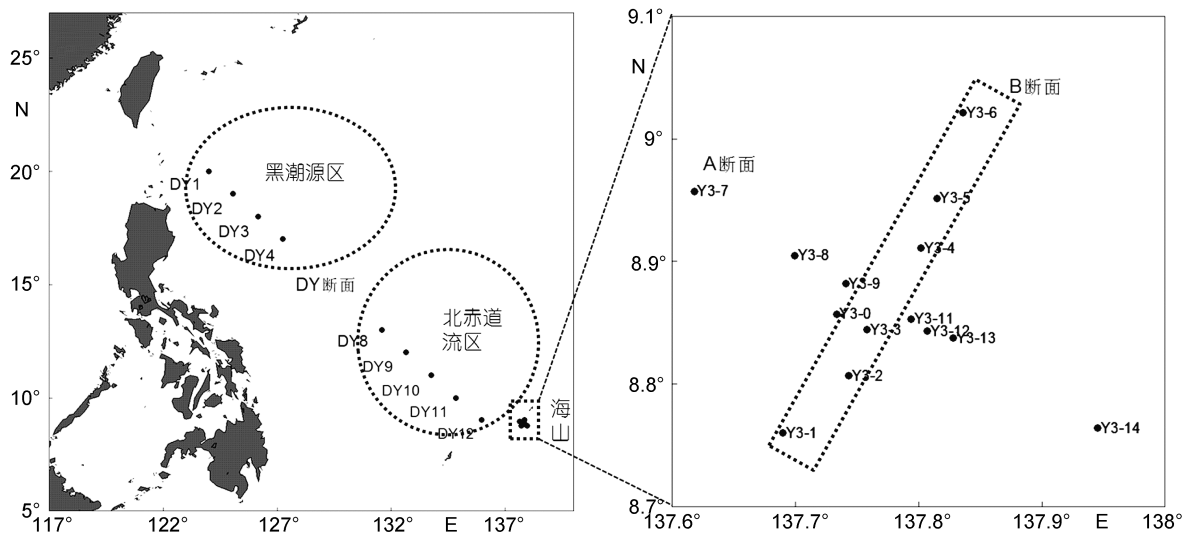


图 1 西太平洋区和雅浦海山区采样站位图(右图虚线方框代表 B 断面分布范围)

Fig. 1 Sampling stations in the western Pacific Ocean (Transect DY) and Seamount Y3 (Transects A and B)

注: 左图: DY 断面; 右图: 海山 A 断面和 B 断面

1.2 方法

各站用 CTD(SBE911)(Sea-bird 公司, 美国)测量温度、盐度垂直剖面, 采用 Niskin 采水器(KC-Denmark 公司, 丹麦)在各站分 6 层采集水样。

根据海洋调查规范(GB/T12763.6-2007), 分粒级叶绿素 *a* 的采集水层分别为 0、30、75、100、150 和

200m。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(Whatman 公司, 英国)和 0.7 μ m Whatman GF/F 滤膜(Whatman 公司, 英国)过滤, 分别取得 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 μm (微型浮游植物, pico-phytoplankton)的叶绿素 *a* 样品, 同时取 2000mL 水, 经 0.7 μm Whatman GF/F 滤膜过滤得到总叶绿素 *a* 样品。样品避光于-20 $^{\circ}\text{C}$ 冷冻保存带回实验室测定其浓度。叶绿素 *a* 先用 90%的丙酮萃取 12—24 小时, 用 Turner 荧光光度计(Turner Designs 公司, 美国)测定叶绿素 *a* 浓度。

硝酸盐、亚硝酸盐、磷酸盐、硅酸盐样品的采集按照海洋调查规范(GB12763.6-2007)进行, 分别在 0、30、75、100、150 和 200m 各水层取水 250mL, 用 0.7 μm Whatman GF/F 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 $^{\circ}\text{C}$ 下冷冻保存, 在实验室用 QuAatro 连续流动分析仪(SEAL 公司, 德国)测定。

1.3 数据分析

使用 Ocean Data View, Surfer 绘制图, 采用 SAS 9.2 进行 Pearson 相关性分析和双侧显著性检测, 用 Microsoft Office Excel 2010 绘制表格。

2 结果与讨论

2.1 温盐分布特征

Y3 海山区两个断面均有呈上升趋势的等温线(图 2a, c), 而相邻的热带西太平洋区(DY 断面)中靠近 Y3 海山的区域(北赤道流区, 图 2e 右)与远离海山的区域(黑潮区, 图 2e 左)温度分布有明显差异, 前者(图 2e 右)有明显呈上升趋势的等温线, 后者温度变化较缓, 等温线分布较前者分散(图 2e 左)。在靠近海山的区域(图 2e 右), 开始出现等温线抬升的趋势, 在海山山顶 Y3-0(8.86 $^{\circ}\text{N}$, 137.73 $^{\circ}\text{E}$)上方有明显抬升的等温线(图 2a), 与 Genin 等(1985)对 Minami-Kasuga 海山研究中的泰勒柱现象相似, 这是由于海山的地形特征, 使得流经海山处的洋流由于地形障碍造成等温线呈抬升趋势的局部异常分布。并非所有的海山都能观察到泰勒柱现象, 即便在同一个海山, 泰勒柱也并非能被持续观察到(Genin *et al*, 1985; Odate *et al*, 1998; Mouriño *et al*, 2001)。

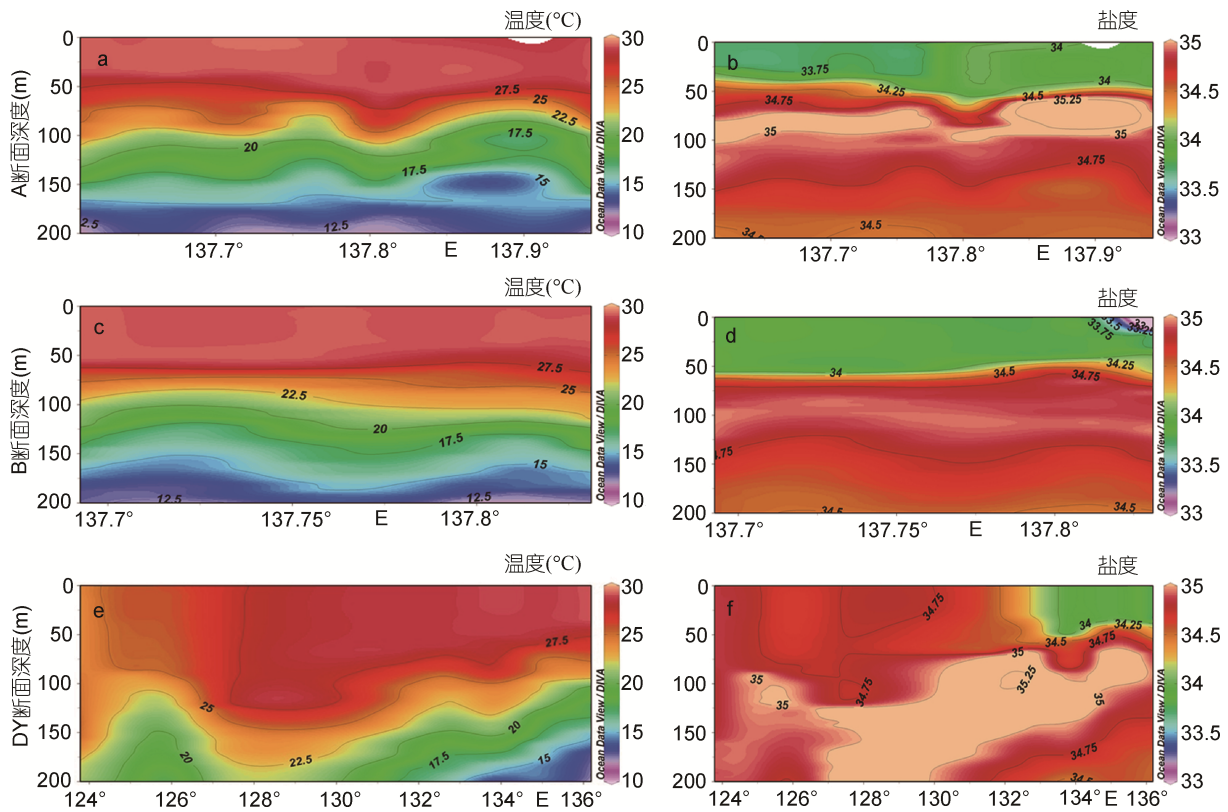


图 2 Y3 海山 A、B 断面和西太平洋 DY 断面温度、盐度垂直分布图

Fig. 2 Vertical distribution of temperature ($^{\circ}\text{C}$), salinity in the western Pacific Ocean (Transect DY) and Seamount Y3 (Transects A and B)

注: a. A 断面温度分布; b. A 断面盐度分布; c. B 断面温度分布; d. B 断面盐度分布; e. DY 断面温度分布; f. DY 断面盐度分布

另外 Y3 海山区(图 2a, c)和靠近海山的大洋区域(图 2e 右)表层温度在 28°C 以上, 位于西太平洋的暖池区(张启龙等, 1997)。这里年均表层水温不低于 28°C, 常年降水较多, 使得表层的盐度较低, 随着深度的增加, 盐度逐渐升高, 在暖池区的下边界处(约 100m 左右)盐度达到最高值(图 2b, d)(图 f 右)。

2.2 叶绿素 *a* 浓度分布

海山 A 断面叶绿素 *a* 浓度的平均值为 0.057mg/m³。各水层叶绿素 *a* 浓度的变化范围为 0.009—0.205mg/m³。表层叶绿素 *a* 浓度的平均值为 0.026mg/m³, 最高浓度

值为 0.047mg/m³, 出现在 Y3 海山西北部 Y3-7 站位, 最低浓度值为 0.009mg/m³, 位于靠近海山山顶西北部的 Y3-9 站位。各水层叶绿素 *a* 平均浓度最大值为 0.124mg/m³, 位于 100m 水层, 整个 A 断面除 Y3-8 站位叶绿素 *a* 浓度最大值水层为 75m 外, 其余站位叶绿素 *a* 浓度最大值水层均为 100m(图 3a)。水柱叶绿素 *a* 浓度范围为 8.229—17.108 mg/m², 平均值为 11.442mg/m²。A 断面水体平均叶绿素 *a* 浓度在山顶附近的东南部出现高值, 东南部浓度高于西北部, 变化范围为 0.041—0.085mg/m³ (图 3a)。

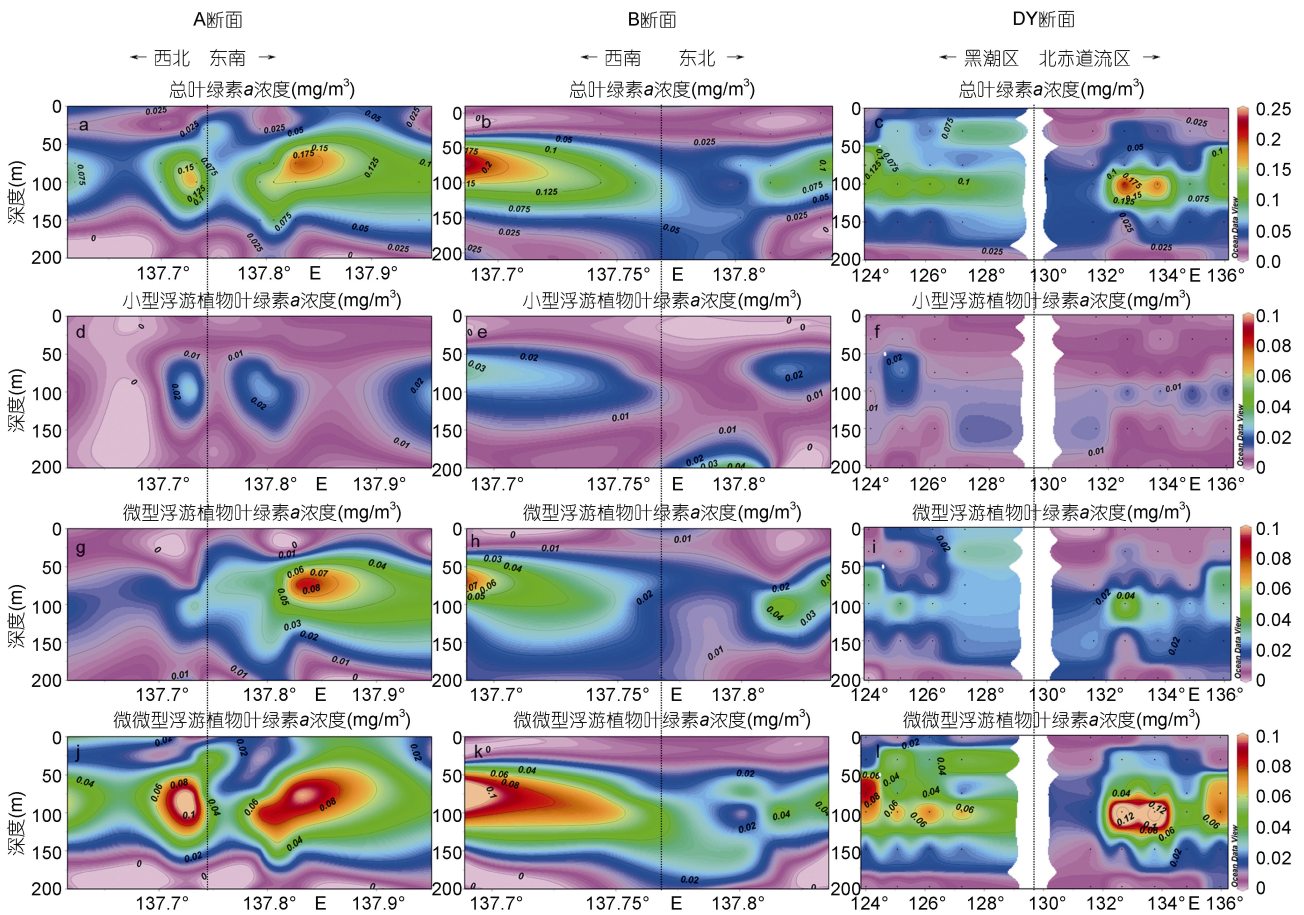


图 3 Y3 海山 A、B 断面和西太平洋区分级叶绿素 *a* 垂直分布情况

Fig. 3 Vertical distribution of size-fractionated Chl *a* in the western Pacific Ocean (Transect DY) and Seamount Y3 (Transects 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. DY 断面总叶绿素 *a* 浓度分布; d. A 断面小型浮游植物叶绿素 *a* 浓度分布; e. B 断面小型浮游植物叶绿素 *a* 浓度分布; f. DY 断面小型浮游植物叶绿素 *a* 浓度分布; g. A 断面微型浮游植物叶绿素 *a* 浓度分布; h. B 断面微型浮游植物叶绿素 *a* 浓度分布; i. DY 断面微型浮游植物叶绿素 *a* 浓度分布; j. A 断面微微型浮游植物叶绿素 *a* 浓度分布; k. B 断面微微型浮游植物叶绿素 *a* 浓度分布; l. DY 断面微微型浮游植物叶绿素 *a* 浓度分布

海山 B 断面叶绿素 *a* 浓度的平均值为 0.054mg/m³。各水层叶绿素 *a* 浓度的变化范围为 0.005—0.236mg/m³。表层叶绿素 *a* 浓度的平均值为 0.011mg/m³, 在整个断面表层浓度都较低, 变化范围为 0.005—0.021mg/m³,

最高最低值站位均在海山山顶附近, 最低值位于山顶东北部的 Y3-5 站位, 最高值位于山顶西南部的 Y3-3 站位。叶绿素 *a* 浓度最大值水层集中在 75m(图 3b), 平均浓度为 0.106mg/m³, 该水层叶绿素 *a* 浓度的

变化范围为 0.051—0.236mg/m³。水柱叶绿素 *a* 浓度范围为 7.954—17.347mg/m², 平均值为 10.772mg/m²。水体平均叶绿素 *a* 浓度在 B 断面西南部出现最高值, 变化范围为 0.040—0.087mg/m³(图 3b)。

DY 断面叶绿素 *a* 浓度的平均值为 0.051mg/m³。各水层叶绿素 *a* 浓度的变化范围为 0.007—0.229mg/m³。表层叶绿素 *a* 浓度的平均值为 0.020mg/m³, 变化范围为 0.007—0.050mg/m³, 高值区出现在远离 Y3 海山的黑潮源区, 其中 DY-4 站位浓度最高。靠近 Y3 海山的北赤道流区表层叶绿素 *a* 浓度远远低于黑潮区值。叶绿素 *a* 浓度最大值水层集中在 100m, 只有 DY-1 站位出现在 75m 水层。叶绿素 *a* 平均浓度为 0.129mg/m³, 最大值水层为 100m, 与海山 A 断面叶绿素 *a* 浓度最大值水层的平均浓度相当。水柱叶绿素 *a* 浓度范围为 6.311—13.116mg/m², 平均值为 10.285mg/m²。水体平均叶绿素 *a* 浓度在远离 Y3 海山的 4 个站位出现高值, 在靠近 Y3 海山的 DY-10 站位也出现高值, 变化范围为 0.031—0.066mg/m³。远离海山站位(黑潮源区)的水体平均叶绿素 *a* 浓度要比靠近海山站位的高(图 3c)。

A、B、DY 断面 0、30、75、100、150 和 200m 水层叶绿素 *a* 平均浓度的变化范围见表 1, 从靠近 Y3 海山的西太平洋区到 Y3 海山各水层叶绿素 *a* 浓度分布不均匀, 叶绿素 *a* 浓度低值在表层或 200m 水层, 叶绿素 *a* 浓度最大层的值是浓度最小层值的 5—10 倍。海山 A 断面表层叶绿素 *a* 浓度最高, 其次为 DY 断面, 海山 B 断面最低。叶绿素 *a* 浓度最大层浓度排序依次是 DY 断面 > 海山 B 断面 > 海山 A 断面, 3 个断面水体平均叶绿素 *a* 水平相当。就 Y3 海山而言, 叶绿素 *a* 浓度分布呈现海山西南部高于东北部(图 3b), 东南部高于西北部的趋势(图 3a), 叶绿素 *a* 浓度最高值并非在山顶处; 垂直分布上, 随深度增加各站位叶绿素 *a* 浓度均呈现先增大后减小的趋势, 75m 以上和

100m 以下是叶绿素 *a* 浓度低值水层, 浓度最大值多出现在 75m 和 100m 水层。75—100m 水层是盐跃层的底端和温跃层的中部, 由于盐跃层和温跃层的存在, 使得下层水的上涌过程受阻, 营养盐在 75—100m 水层达到最大值, 促进浮游植物的生长, 出现了次表层叶绿素 *a* 浓度最高值现象。这一研究结果与齐雨藻等(1992)在热带西太平洋发现的叶绿素垂直分布结果一致。Genin 等(1985)、Comeau 等(1995)和 Odate 等(1998)分别在对 Minami-Kasuga 海山、Cobb 海山和 Komahashi No.2 海山的研究中也发现明显的次表层叶绿素 *a* 浓度最大值现象, 但是 Great Meteor 海山(Mouriño *et al.*, 2001)次表层和温跃层的叶绿素 *a* 浓度最大值却时有时无。Y3 海山附近热带西太平洋区的叶绿素 *a* 浓度呈现靠近 Y3 海山的区域(北赤道流区)大于远离 Y3 海山区域(黑潮源区)的分布趋势(图 3c); 垂直分布上, 靠近海山区域的叶绿素 *a* 浓度分布与 Y3 海山区的垂直分布结构相似, 而远离海山的区域表层叶绿素 *a* 浓度要高于靠近海山的区域, 这与黑潮源区的营养盐浓度分布有关(表 2)。黑潮源区的营养盐浓度要低于靠近海山的区域, 叶绿素 *a* 浓度与磷酸盐和硅酸盐浓度均呈负相关关系(表 3)。以往研究表明, 北赤道流区洋流的西向传播使得 B 断面 200m 以上均有向西的动力输运(陈锦年等, 2003)。本研究发现 A 断面 100m 以上水层有向西的动力输运过程, 100—200m 开始出现反向的动力输运过程, 这一过程使得 Y3 海山西南部收获更多的营养物质, 从而使得 Y3 海山出现西南部和东南部叶绿素 *a* 浓度高值区。本研究与齐雨藻等(1992)于 1986 年在热带西太平洋区的调查时间都在冬季, 比较发现 2014 年海山区和邻近热带西太平洋区的叶绿素 *a* 浓度水平明显低于 1986 年热带西太平洋区, 叶绿素 *a* 最大层的平均浓度是 1986 年的 1/3。

表 1 各断面不同水层叶绿素 *a* 浓度平均值和变化范围(单位: mg/m³)

Tab. 1 The range of average Chl *a* concentration on different transects

水层(m)	海山 A 断面		海山 B 断面		DY 断面	
	变化范围	均值	变化范围	均值	变化范围	均值
0	0.009—0.047	0.027	0.005—0.021	0.011	0.007—0.050	0.026
30	0.010—0.079	0.031	0.006—0.022	0.016	0.016—0.089	0.044
75	0.067—0.205	0.106	0.051—0.236	0.106	0.026—0.140	0.062
100	0.078—0.181	0.124	0.021—0.147	0.098	0.049—0.229	0.129
150	0.022—0.109	0.050	0.010—0.060	0.039	0.018—0.056	0.039
200	0.031—0.018	0.018	0.012—0.050	0.027	0.010—0.031	0.018
平均	0.041—0.085	0.057	0.040—0.087	0.054	0.032—0.066	0.051

表 2 DY 断面不同区域表层叶绿素 *a* 浓度与营养盐浓度
Tab. 2 The Chl *a* and nutrient concentrations from 0 to 75m depth on DY transect

水层(m)	区域	叶绿素 <i>a</i> (mg/m ³)	磷酸盐(μmol/L)	硝酸盐(μmol/L)	亚硝酸盐(μmol/L)	硅酸盐(μmol/L)
0	远离 Y3 海山区	0.037	0.020	—	—	0.279
	靠近 Y3 海山区	0.016	0.043	—	—	0.285
30	远离 Y3 海山区	0.062	0.026	—	—	0.270
	靠近 Y3 海山区	0.029	0.046	—	—	0.191
75	远离 Y3 海山区	0.078	0.023	—	—	0.248
	靠近 Y3 海山区	0.049	0.098	—	—	0.558

注：“—”表示低于仪器的检出限

表 3 Y3 海山邻近西太平洋区 DY 断面各粒级浮游植物叶绿素 *a* 浓度与环境因子的相关性分析结果
Tab. 3 Correlation between Chl *a* concentration and environmental factors for DY transect in the western Pacific Ocean near Seamount Y3

	温度	盐度	磷酸盐	硝酸盐	亚硝酸盐	硅酸盐
总叶绿素 <i>a</i>	0.11	0.41**	-0.19	-0.26	0.54**	-0.21
小型浮游植物叶绿素 <i>a</i>	-0.06	0.23	0.07	-0.03	0.40**	0.004
微型浮游植物叶绿素 <i>a</i>	0.17	0.12	-0.22	-0.28*	0.38**	-0.25
微微型浮游植物叶绿素 <i>a</i>	0.22	0.16	-0.22	-0.28*	0.38**	-0.23

注: *表示差异显著($P < 0.05$), **表示差异极显著($P < 0.01$)

为了比较海山区与相邻热带西太平洋区叶绿素 *a* 浓度有无差异, 对各断面叶绿素 *a* 浓度最大值进行统计学分析, 结果显示 3 个断面的最大叶绿素 *a* 浓度无统计学差异(各断面最大叶绿素 *a* 浓度平均值: A 断面 0.125mg/m³, B 断面 0.126mg/m³, DY 断面 0.124mg/m³, $P > 0.05$), 即 Y3 海山区叶绿素 *a* 浓度水平与大洋区并无显著差异, 这一结果表明经典假说在 2014 年冬季 Y3 海山的调查区并不适用。Dower 等(1992)通过对 Cobb 海山浮游生物的调查提出了经典假说(Dower *et al.*, 1996), 但是 Comeau 等(1995)对 Cobb 海山的调查却不支持该假说。类似的情况出现在 Komahashi No.2 海山: Furuya 等(1983)认为, 泰勒柱使得真光层有丰富的营养盐, 与之伴随的是次表层高的叶绿素 *a* 浓度, 而 Odate 等(1998)对 Komahashi No.2 海山次表层叶绿素 *a* 浓度最高值与泰勒柱关系的研究表明, 出现次表层叶绿素 *a* 浓度最高值的区域并不一定有泰勒柱的存在。

2.3 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 0.008mg/m³, 各水层的变化范围为 0.001—0.033mg/m³; 微型浮游植物叶绿素 *a* 浓度的平均值为 0.014mg/m³, 各水层变化范围为 0.0001—0.091mg/m³; 微微型浮游植物叶绿素 *a* 浓度的平均值为 0.025mg/m³, 各水层的变化范围为 0.0004—0.110mg/m³, A 断面微微型叶绿素 *a* 对总叶绿素 *a* 的贡献率在 3 个断面中最高

(图 3d, g, j; 表 4)。海山 B 断面各粒级叶绿素 *a* 的结构与 A 断面相似, 微型浮游植物和小型浮游植物叶绿素 *a* 浓度的比例有所上升, 其中小型浮游植物、微型浮游植物和微微型浮游植物叶绿素 *a* 浓度的平均值分别为 0.009、0.016 和 0.026mg/m³, 各水层小型浮游植物、微型浮游植物和微微型浮游植物叶绿素 *a* 浓度的变化范围分别为 0.001—0.043、0.001—0.790 和 0.001—0.123mg/m³(图 e, h, k; 表 4)。DY 断面小型浮游植物的比例与 A 断面相似, 整体结构与海山断面相同, 仍然是微微型浮游植物贡献率最大, 其叶绿素 *a* 浓度的平均值为 0.028mg/m³, 各水层变化范围为 0.001—0.154mg/m³, 其变化幅度在各粒级中最小; 其次是微型浮游植物, 平均叶绿素 *a* 浓度为 0.015mg/m³, 各水层变化范围为 0.0001—0.061mg/m³; 贡献率最小的是小型浮游植物, 各水层叶绿素 *a* 最小浓度值为 0.002mg/m³, 最大浓度值位于 DY—3 站位的次表层, 为 0.023mg/m³, 其平均叶绿素 *a* 浓度为 0.007 mg/m³(图 f, I, l; 表 4)。

表 4 大洋区和海山区分粒级叶绿素 *a* 浓度贡献率(%)
Tab. 4 Contribution (in percentage) of size-fractionated Chl *a* on different transects

	DY 断面	海山 A 断面	海山 B 断面
小型浮游植物叶绿素 <i>a</i>	14.26	14.64	18.43
微型浮游植物叶绿素 <i>a</i>	29.87	25.39	30.70
微微型浮游植物叶绿素 <i>a</i>	55.87	59.97	50.87

各断面水体中小型浮游植物叶绿素 *a* 的平均浓度均小于 $0.01\text{mg}/\text{m}^3$, 微微型浮游植物叶绿素 *a* 平均浓度在各粒级中最高。3 个断面中, 微微型浮游植物叶绿素 *a* 对总叶绿素 *a* 的贡献最大, 其次是微型浮游植物和小型浮游植物(表 4)。Y3 海山区, 3 个粒级浮游植物叶绿素 *a* 浓度的最高值亦非出现在山顶处。在与 Y3 海山相邻的热带西太平洋区, 靠近 Y3 海山区域的微微型浮游植物叶绿素 *a* 浓度高于远离 Y3 海山的黑潮区域。热带西太平洋海域是典型的寡营养海域, Y3 海山位于西太平洋暖池区, 海域温度较高, 更有利于微微型浮游植物的生长。而 Brito 等(2015)对大西洋 Gorrige 海山的研究显示, 微型浮游植物叶绿素 *a* 占优势地位, 这与两个海山所处大洋的营养盐和温度状况有关。A、B、DY 断面分粒级浮游植物叶绿素 *a* 的垂直分布也有次表层(75—100m)高值现象。有报道浮游植物叶绿素 *a* 的垂直分布与海洋环境、海底地形、黑潮次表层水的深度(朱碧英等, 1990)有关。结合 2.2 中的分析, 我们认为本研究中次表层高叶绿素 *a* 浓度的形成是由于温跃层、盐跃层的存在, 使得营养物质聚集在 75—100m 水层, 同时北赤道流及其分支黑潮在次表层有向西输运营养物质的过程, 这都使得次表层叶绿素 *a* 浓度最高。

2.4 各粒级叶绿素 *a* 浓度分布与环境因子的关系

将各断面叶绿素 *a* 浓度与温度、盐度和各种营养

盐进行相关性分析, 结果表明, 各因子与不同粒级浮游植物的叶绿素 *a* 浓度均有不同程度的相关性(表 3, 5, 6)。DY 断面不同粒级浮游植物叶绿素 *a* 浓度与亚硝酸盐浓度呈极显著正相关, 与硝酸盐浓度显著正相关, 说明在与 Y3 海山相邻的热带西太平洋区冬季氮营养盐可能是限制浮游植物生长的一个重要影响因素。而在 Y3 海山区, 温度与各粒级浮游植物叶绿素 *a* 浓度极显著正相关, Comeau 等(1995)对 Cobb 海山叶绿素 *a* 的研究也表明叶绿素 *a* 浓度与温度有很明显的正相关关系。Kawarada 等(1973)对北太平洋叶绿素 *a* 与环境因子的关系研究表明, 叶绿素 *a* 的分布与盐度和温度密切相关, 但是与营养盐的浓度无相关关系。本研究中, 各种氮、磷、硅营养盐与叶绿素 *a* 浓度呈现不同程度的相关性, 磷酸盐、硝酸盐和硅酸盐与分粒级浮游植物叶绿素 *a* 浓度主要呈负相关, 亚硝酸盐与叶绿素 *a* 浓度均呈极显著正相关关系。因浮游植物生长过程中对氮、磷、硅三种营养盐主要是消耗吸收, 所以其负相关关系得到很好的解释。而亚硝酸盐与叶绿素 *a* 浓度的关系在其他类似研究中很少见。亚硝酸盐通常以中间产物的形式形成, 与生物体的代谢和环境条件有密切关系, 因此我们推断该调查区域浮游植物的代谢过程比较旺盛。叶绿素 *a* 与亚硝酸盐的关系还有待进一步调查研究。

表 5 海山 A 断面各粒级浮游植物叶绿素 *a* 浓度与环境因子的相关性分析结果

Tab. 5 Correlation between Chl *a* concentration and environmental factors on Y3 Seamount transect A

海山 B 断面	温度	盐度	磷酸盐	硝酸盐	亚硝酸盐	硅酸盐
总叶绿素 <i>a</i>	0.64**	0.12	-0.27	-0.36*	0.60**	-0.35*
小型浮游植物叶绿素 <i>a</i>	0.74**	-0.05	-0.12	-0.18	0.59**	-0.18
微型浮游植物叶绿素 <i>a</i>	0.71**	-0.04	-0.09	-0.16	0.61**	-0.15
微微型浮游植物叶绿素 <i>a</i>	0.67**	0.13	-0.32*	-0.36*	0.54**	-0.37*

注: *表示差异显著($P<0.05$), **表示差异极显著($P<0.01$)

表 6 海山 B 断面各粒级浮游植物叶绿素 *a* 浓度与环境因子的相关性分析结果

Tab. 6 Correlation between Chl *a* concentration and environmental factors on Y3 Seamount transect B

	温度	盐度	磷酸盐	硝酸盐	亚硝酸盐	硅酸盐
总叶绿素 <i>a</i>	0.66**	-0.08	-0.08	-0.18	0.39	-0.16
小型浮游植物叶绿素 <i>a</i>	0.38*	-0.27	0.30	0.45**	0.12	0.28
微型浮游植物叶绿素 <i>a</i>	0.58**	-0.07	-0.04	0.004	0.58**	-0.10
微微型浮游植物叶绿素 <i>a</i>	0.45**	0.15	-0.26	-0.16	0.30	-0.32*

注: *表示差异显著($P<0.05$), **表示差异极显著($P<0.01$)

3 结论

(1) Y3 海山西南部和东南部为叶绿素 *a* 浓度高值区。

(2) Y3 海山区叶绿素 *a* 浓度最大值水层的叶绿素 *a* 浓度与相邻大洋区无统计学差异, 海山浮游生态学的经典假说在冬季 Y3 海山不适用。

(3) A、B、DY 断面叶绿素 *a* 粒级结构相似, 3 个粒级浮游植物叶绿素 *a* 所占比例从大到小依次为微型、微型和小型浮游植物。微型浮游植物叶绿素 *a* 对总叶绿素 *a* 贡献最大, 所占比例均在 50% 以上。三个断面微型浮游植物叶绿素 *a* 平均浓度分别为 0.025 mg/m^3 、 0.026 mg/m^3 、 0.029 mg/m^3 。

(4) 温度和营养盐均对叶绿素 *a* 浓度分布有影响。温度是影响 Y3 海山区叶绿素 *a* 浓度的重要因素之一; 各种营养盐的浓度也会影响叶绿素 *a* 浓度, 磷酸盐、硝酸盐和硅酸盐与分粒级浮游植物叶绿素 *a* 主要呈负相关, 亚硝酸盐与叶绿素 *a* 呈正相关关系。

致谢 本研究中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和李宁老师提供, 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

朱碧英, 王小羽, 1990. 日本以南和以东黑潮区 Chl *a* 的分布. 见: 国家海洋局科技司. 黑潮调查研究论文选(一). 北京: 海洋出版社, 427—433

齐雨藻, 钱宏林, 1992. 热带西太平洋叶绿素 *a* 的时空分布. 暨南大学学报(自然科学), 13(3): 103—115

汪品先, 2013. 从海洋内部研究海洋. 地球科学进展, 28(5): 517—520

张立峰, 许建平, 何金海, 2006. 西太平洋暖池研究的新进展. 海洋科学进展, 24(1): 108—116

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—1216

张启龙, 翁学传, 1997. 热带西太平洋暖池的某些海洋学特征分析. 海洋科学集刊, 38(1): 31—38

张武昌, 于莹, 李超伦等, 2014. 海山区浮游生态学研究. 海洋与湖沼, 45(5): 973—978

陈锦年, 宋贵震, 褚健婷等, 2003. 北赤道流区海温异常与 ENSO 循环. 热带海洋学报, 22(4): 10—17

秦蕴珊, 尹宏, 2011. 西太平洋——我国深海科学研究的优先战略选区. 地球科学进展, 26(3): 245—248

Brito A C, Sá C, Brotas V *et al*, 2015. Effect of phytoplankton size classes on bio-optical properties of phytoplankton in the Western Iberian coast: application of models. Remote Sensing of Environment, 156: 537—550

Brotas V, Brewin R J W, Sá C *et al*, 2013. Deriving phytoplankton size classes from satellite data: validation along a trophic gradient in the eastern Atlantic Ocean.

Remote Sensing of Environment, 134: 66—77

Chivers A J, Narayanaswamy B E, Lamont P A *et al*, 2013. Changes in polychaete standing stock and diversity on the northern side of Senghor Seamount (NE Atlantic). Biogeosciences, 10(6): 3535—3546

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

Denda A, Christiansen B, 2014. Zooplankton distribution patterns at two seamounts in the subtropical and tropical NE Atlantic. Marine Ecology, 35(2): 159—179

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

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

Furuya K, Marumo R, 1983. The structure of the phytoplankton community in the subsurface chlorophyll maxima in the western North Pacific Ocean. Journal of Plankton Research, 5(3): 393—406

Genin A, 2004. Bio-physical coupling in the formation of zooplankton and fish aggregations over abrupt topographies. Journal of Marine Systems, 50(1-2): 3—20

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

Kawarada Y, Sano A, 1973. Distribution of chlorophyll *a* and phaeopigments in the northwestern North Pacific in relation to the hydrographic conditions. In: Takenouti A Y eds. Biological oceanography of the northern North Pacific Ocean. Tokyo, Japan: Idemitsu Press, 125-138

Mendonça A, Aristegui J, Vilas J C *et al*, 2012. Is there a seamount effect on microbial community structure and biomass? The case study of seine and sedlo seamounts (Northeast Atlantic). PLoS One, 7(1): e29526

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

Rogers A D, 1994. The biology of seamounts. Advances in Marine Biology, 30: 305—350

Rowden A A, Dower J F, Schlacher T A *et al*, 2010. Paradigms in seamount ecology: fact, fiction and future. Marine Ecology, 31(S1): 226—241

Santos M, Moita M T, Bashmachnikov I *et al*, 2013. Phytoplankton variability and oceanographic conditions at Condor seamount, Azores (NE Atlantic). Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 98: 52—62

Sime-Ngando T, Juniper K, Vézina A, 1992. Ciliated protozoan communities over Cobb seamount: increase in biomass and spatial patchiness. *Marine Ecology Progress Series*, 89(1): 37—51

Tarcisio A C, Frederico P B, Ricardo S R *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

CHLOROPHYLL *A* CONCENTRATION AND SIZE STRUCTURE OF PHYTOPLANKTON AT YARP Y3 SEAMOUNT IN TROPICAL WEST PACIFIC IN WINTER 2014

ZHANG Wen-Jing^{1,2}, SUN Xiao-Xia^{1,3}, CHEN Yun-Yan^{1,2}, LI Jun-Lei^{1,2}, DU Juan¹

(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 size-fractionated chlorophyll *a* concentration (Chl *a*), temperature, salinity, and nutrients at Seamount Y3 near Yarp Trench in the western Pacific in winter 2014 were investigated. In terms of Chl *a*, size-fractionated contribution to the total Chl *a*, and correlation between Chl *a* and ambient factors, Seamount Y3 (Transects A and B) was compared with the tropical western Pacific (Transect DY). The results indicate that there were no obvious differences among Transects A, B and DY in average Chl *a* (0.057, 0.054, and 0.051 mg/m³, respectively), and in Chl *a* range in 0, 30, 75, 100, 150, and 200 m depth (0.009—0.205, 0.005—0.236, and 0.007—0.229 mg/m³, respectively). The size structures in the 3 transects were similar. Specifically, the proportion of Chl *a* from micro-phytoplankton, nano-phytoplankton, to pico-phytoplankton was in a descend order, i.e., 59.97%, 25.39%, 14.64% for Transect A; 50.87%, 30.70%, 18.43% for Transect B; and 55.87%, 29.87%, 14.26% for Transect DY. The average pico-phytoplankton Chl *a* was 0.025, 0.026, and 0.029 mg/m³, respectively. Phytoplankton was dominant, a subsurface Chl *a* maximum was common in all the study region, and higher Chl *a* was recorded to the southwest and southeast of Y3 Seamount. The Chl *a* distribution was affected by currents, temperature, and nutrients. The above data show that traditional explanation on Chl *a* in seamount does not fit for the case of Seamount Y3 in winter 2014.

Key words Western Pacific seamount; phytoplankton Chl *a*; size structure; ambient factor