中国水产科学 2019 年 1 月, 26(1): 44–52
Journal of Fishery Sciences of China

研究论文

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2019.18208

汕头南澳–东山海域初级生产力的时空特征

柯志新[1, 2, 3], 陈丹婷[1, 2], 谭烨辉[1, 2], 刘华健[1], 刘甲星[1]

1. 中国科学院南海海洋研究所, 中国科学院热带海洋生物资源与生态重点实验室, 广东 广州 510301;
2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 广东省应用海洋生物学重点实验室, 广东 广州 510301

摘要: 根据 2014 年 9 月(秋季)、12 月(冬季)、2015 年 4 月(春季)、2016 年 7 月(夏季)在南澳岛与东山岛之间的近海海域进行的生态环境调查, 分析了该海域叶绿素 a 浓度和初级生产力的时空变化特征。结果表明, 叶绿素 a 浓度变化范围为 0.37~14.9 μg/L, 平均值分别为: 夏季(8.2 μg/L)>秋季(4.9 μg/L)>冬季(1.52 μg/L)>春季(1.47 μg/L)。表层初级生产力的波动范围为 0.6~45 mg(C)/(m^3·h), 平均值分别为: 秋季 20.3 mg(C)/(m^3·h)>夏季 18.2 mg(C)/(m^3·h)>春季 14.4 mg(C)/(m^3·h)>冬季 5.6 mg(C)/(m^3·h)。水柱初级生产力变动范围为 14.1~3066.6 mg(C)/(m^2·d), 平均值分别为: 秋季 1034.2 mg(C)/(m^2·d)>夏季 715.5 mg(C)/(m^2·d)>春季 453.4 mg(C)/(m^2·d)>冬季 133.8 mg(C)/(m^2·d)。除夏季外, 整个调查海域的叶绿素 a 浓度空间变化规律基本为由西北向东南方向递减; 夏季调查海域表层叶绿素 a 的浓度都较高, 在南澳岛的南面出现一个叶绿素 a 的低值区。该海域初级生产力的空间分布规律性较差。叶绿素 a 和初级生产力与营养盐浓度在春季均呈显著正相关, 但在其他季节相关性不强。氮营养盐在春季和秋季可能是南澳–东山海域浮游植物生长的潜在限制因子。为获得较好的渔业增养殖效益, 应该根据初级生产力现状对该海域的养殖品种和规模进行合理规划。

关键词: 初级生产力; 叶绿素 a; 南澳岛; 渔业资源
中图分类号: S931 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005–8737–(2019)01–0044–09

海洋初级生产力是决定海洋渔业资源潜在产量的最重要因素, 也是海洋生态系统能流和物流分析中的重要指标。利用海洋初级生产力指标结合营养动态模型和 Cushing 模型可以估算海域内鱼类资源的潜在产量, 合理规划渔业生产[1-3]。高产渔场一般位于浮游生物丰度高的海域, 初级生产力的大小决定了浮游动物等饵料生物的资源量, 从而决定了渔业资源量的大小[4]。研究表明, 西太平洋柔鱼的资源丰度与净初级生产力的大小呈显著正相关关系[5-6]。在近海增养殖水域, 初级生产力是估算水体养殖容量的重要指标之一。养殖量过高会引起养殖水域环境恶化, 并且造成养殖水产生物死亡率高, 养殖周期变长等负面影响[7]。浮游植物的生物量和生产力水平对营养盐浓度变化存在直接的响应, 对评价海洋环境健康状况, 评估资源潜力均具有重要意义。

南澳岛与东山岛之间的海域海洋生物资源丰富, 是粤东重要的海产养殖基地, 并被列为中国重要的海洋牧场示范区之一。该海域主要以筏式养殖为主, 主要养殖对象为太平洋牡蛎、坛紫菜和龙须菜。由于过度捕捞和开发, 该海域的水质环境恶化, 渔业资源衰退严重[7-8]。邻近的柘林湾因大规模增养殖渔业和高强度的排污排废引起的水体富营养化已经很大程度上改变了该水域的浮

收稿日期: 2018-06-12; **修订日期:** 2018-07-17.
基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201403008); 国家重点基础研究发展计划项目(2015CB452903); 国家自然科学基金项目(31670458, 41806198); 国家科技基础资源调查专项项目(2017FY201404).
作者简介: 柯志新(1976–), 副研究员, 主要从事海洋生态环境方面研究. E-mail: kzx@scsio.ac.cn
通信作者: 谭烨辉, 研究员, 主要从事海洋浮游动物生态学方面研究. E-mail: tanyh@scsio.ac.cn

游植物群落结构和时空分布, 生物多样性与均匀度明显下降, 硅藻赤潮发生几率增加[8-9]。陈伟洲等[7]报道由于过度养殖, 南澳岛深澳湾的太平洋牡蛎养殖经济效益明显下降, 出现牡蛎死亡率增加、肥满度不够等现象。依据初级生产力水平合理规划海域的增养殖品种和养殖量, 是渔业资源增养殖可持续发展的重要前提。南澳岛与东山岛之间海域的水体初级生产力分布特征及其制约因素的相关资料还比较少。本研究调查了该海域表层叶绿素 a 浓度和初级生产力的时空变化特征, 并分析了其与环境因子的关系, 以期为南澳–东山海域制定合理的增养殖策略、提高该海域的生物资源利用效率提供帮助。

1　材料与方法

1.1　样品采集

于 2014 年 9 月(秋季)、12 月(冬季)、2015 年 4 月(春季)、2016 年 7 月(夏季)在汕头南澳至福建东山之间的海域进行了水体理化因子、叶绿素 a 和初级生产力的调查工作, 共设置 14 个站位(图 1)。水样用 5 L 有机玻璃采水器采集, 表层水采集于水面下 0.5 m 处。水体的温度和盐度等参数由水质多参数仪(YSI-6600, USA)原位测定。海水透明度用 Secchi 盘测定, 并依此估算站位的真光层深度。所有水样处理前, 用 200 μmol/L 孔径的筛绢预过滤, 以除去大多数的浮游动物。

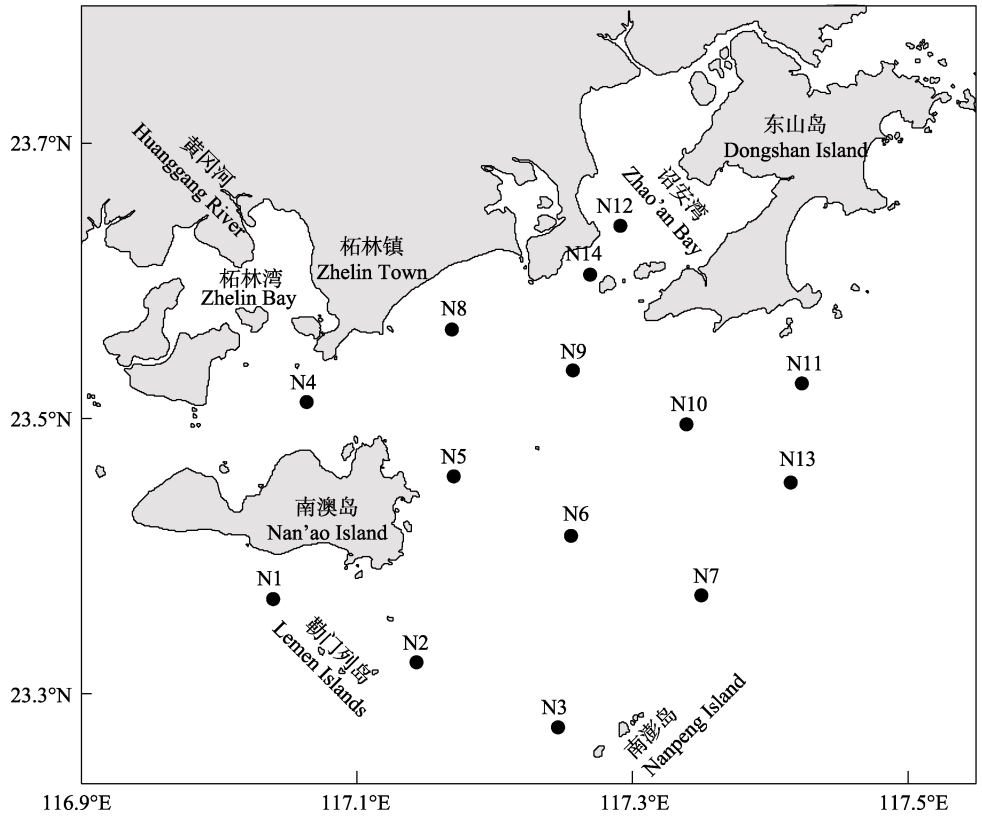

图 1　南澳–东山海域地图及调查站位分布

Fig. 1　Map of Nan'ao-Dongshan coastal region and location of sampling stations

1.2　叶绿素和营养盐分析

量取水样 0.25~1 L, 用孔径为 0.7 μm 的玻璃纤维滤膜(GF/F)过滤, 过滤后的滤膜用中性滤纸吸干水分后用锡箔纸包裹标记, 过滤液和滤膜均放入–20℃冰箱冷冻保存, 分别用于营养盐和叶绿素 a 的分析。海水的营养盐浓度用注射式营养盐自动分析仪(Lachat QC8500, USA)测定。叶绿素 a 用萃取荧光法测定, 在低温避光的条件下将叶绿素滤膜浸泡于 10 mL 浓度为 90%的丙酮中萃取 24 h, 离心后取上清液于 Turner-Design 10 型荧

光光度计下测定。

1.3 表层和水柱初级生产力测定

初级生产力采用放射性同位素(^{14}C)示踪法测定。取 0.3 L 表层水样平均分装至 3 个 Nalgene 培养瓶中，设置两个白瓶和一个黑瓶，分别加入 74 kBq 的 $NaH^{14}CO_3$ 示踪剂，混合均匀后置于甲板上流水培养箱内模拟培养 4~6 h。培养结束后，将水样过滤至直径为 25 mm 的 GF/F 膜上，样品吸去多余水分后置于–20℃冰箱保存。在实验室内，加入闪烁液黑暗处理 24 h，最后经液体闪烁计数仪(Beckman LS-6500, USA)进行放射性活度的测定。初级生产力的具体测定和计算方法参考《海洋调查规范》。水柱初级生产力依据 Cadée 等[10]提出的简化公式进行估算:

$$IPP = \frac{PP \times D \times E}{2},$$

式中, IPP 为水柱初级生产力[mg(C)/(m^2·d)]; PP 为表层初级生产力[mg(C)/(m^3·h)] ; D 为昼长时间(h), 本研究取 12 h; E 为真光层深度(m), 取海水透明度的 3 倍[11], 真光层深度超过水深时按水深深度计算。

1.4 数据处理

采用 SPSS 19.0 软件进行数据分析，包括运用单因子方差分析(ANOVA)比较不同季节的差异，以及对初级生产力和理化因子进行相关性分析。分析前，将初级生产力数据、环境因子进行 lg(x+1)转换。

2 结果与分析

2.1 理化因子特征

调查海域的温、盐、营养盐等理化指标的季节差异见表 1。表层水温变化范围为 15.7~28.6℃，冬季温度最低，春季次之，秋季的平均水温最高。四季表层水温平均分别为：秋季 27.6℃>夏季 24.4℃>春季 21.8℃>冬季 17.1℃。表层盐度的变化范围为 22.1~34.2，夏季的空间差异最大，最低值出现在南澳岛北部内湾，冬季空间差异最小。四季表层盐度的平均值分别为：春季 33.3>秋季 31.7>夏季 30.7>冬季 29.9。营养盐浓度存在显著的季节差异，一般来说冬季的营养盐浓度最高，秋季最低。总溶解无机氮(DIN)的表层平均值依次为：冬季 20.1 μmol/L>夏季 7.2 μmol/L>春季 6.4 μmol/L>秋季 3.2 μmol/L。溶解无机磷(DIP)的表层平均值依次为：冬季 0.88 μmol/L>秋季 0.52 μmol/L>春季 0.24 μmol/L>夏季 0.19 μmol/L。活性硅酸盐(SiO_3)则表现为夏季最高，四季均值依次为：夏季 43.7 μmol/L>冬季 29.8 μmol/L>秋季 16.7 μmol/L>春季 11.8 μmol/L。夏季南澳–东山海域的理化因子明显受到沿岸径流冲淡水的影响，营养盐最高值和盐度最低值均位于最靠近柘林湾口的 N4 站。秋季营养盐的 N/P 比最低，变动范围为 2.7~15.9，平均只有 6.7。

表 1 南澳–东山海域表层水体温度、盐度、营养盐和叶绿素 a 含量

Tab. 1 Average values of temperature, salinity, nutrients and Chl a in surface waters in coastal region of Nan'ao-Dongshan coastal region

参数 parameter	春季 spring		夏季 summer		秋季 autumn		冬季 winter	
	范围 range	均值 mean	范围 range	均值 mean	范围 range	均值 mean	范围 range	均值 mean
温度/℃ temperature	20.6–23.3	21.8	22.5–26.2	24.4	26.2–28.6	27.6	15.7–18.5	17.1
盐度 salinity	30.4–34.2	33.3	22.1–33.9	30.7	29.3–33.8	31.7	29.1–31.3	29.9
透明度/m transparency	1–9	3.4	1.2–3	1.9	1–7	2.8	0.5–2	1.1
硝酸盐/(μmol/L) NO_3^-	0.2–20.9	4.0	0.1–16.9	5.2	0.4–6.5	1.2	11.1–21.7	18.3
亚硝酸盐/(μmol/L) NO_2^-	0.1–1.0	0.3	0.03–1.0	0.5	0.1–0.4	0.2	0.2–1.0	0.5
氨氮/(μmol/L) NH_4^+	0.2–8.1	2.1	0.3–3.1	1.5	0.6–5.6	1.8	0.6–5.0	1.2
溶解无机氮/(μmol/L) DIN	1.3–26.6	6.4	0.7–20.8	7.2	1.3–12.5	3.2	12.3–26.5	20.1
溶解无机磷/(μmol/L) DIP	0.2–0.5	0.2	0.03–0.3	0.2	1.3–12.5	0.5	0.4–1.3	0.9
硅酸盐/(μmol/L) SiO_3	1.8–56.1	11.8	27.7–93.2	43.7	8.7–39.9	16.7	15.5–42.2	29.8
氮磷比 N/P ratio	6.6–86.6	24.3	5.9–111.1	38.8	2.7–15.9	6.7	17.3–33.3	24
叶绿素 a/(μg/L) Chl a	0.4–3.9	1.5	2.2–14.9	8.2	1.5–11.4	4.9	1.1–2.2	1.5

2.2　叶绿素 a 浓度分布特征

南澳–东山海域表层水体叶绿素 a 的浓度变化范围为 0.37~14.9 μg/L, 夏季叶绿素 a 浓度最高, 其次为秋季, 春季和秋季的叶绿素 a 浓度接近。四季叶绿素 a 浓度的平均值依次为: 夏季 8.2 μg/L>秋季 4.9 μg/L>冬季 1.52 μg/L>春季 1.47 μg/L。总的来看, 整个调查海域的叶绿素 a 浓度基本由西北向东南方向递减(图 2)。春季表层叶绿素 a 浓度的最高值出现在柘林湾口附近的 N4 站, 秋季和冬季的表层叶绿素 a 最高值均发生在靠近北部柘林镇与诏安湾之间的近岸水域(图 2)。夏季的叶绿素 a 浓度显著高于其他季节, 分布规律也与其他季节有所不同, 近岸至远岸的梯度增加的趋势不明显, 最大值发生在远岸最靠近台湾海峡的 N13 站, 达到 14.9 μg/L。南澳岛南部水域在夏季显示出明显的叶绿素 a 低值, 另外在诏安湾内的养殖区内也出现了较低的叶绿素 a 的浓度。

2.3　初级生产力水平空间分布特征

受采样时培养条件的限制, 并没有在每个站位进行初级生产力的培养实验。研究结果表明, 表层水的初级生产力水平的波动范围为 0.6~45 mg(C)/(m^3·h)。四季的均值依次为: 秋季 20.3 mg(C)/(m^3·h)>夏季 18.2 mg(C)/(m^3·h)>春季 14.4 mg(C)/(m^3·h)>冬季 5.6 mg(C)/(m^3·h), 以秋季的表层初级生产力水平最高, 夏季次之, 冬季的初级生产力水平显著低于其他 3 个季节。初级生产力的高值基本都发生在近岸水域, 但各个季节的高值区均不同(图 3)。春季的分布特征与叶绿素 a 浓度的分布趋势基本相同, 最高值出现在柘林湾口的 N4 站[33.7 mg(C)/(m^3·h)]; 夏季的分布特征比较复杂, 南澳岛南部水域出现较低的值, 而在叶绿素 a 浓度较小的诏安湾内的 N12 站位却显示出最大的初级生产力[45 mg(C)/(m^3·h)]; 秋季的初级生产力整体分布比较均匀, 在靠近柘林镇

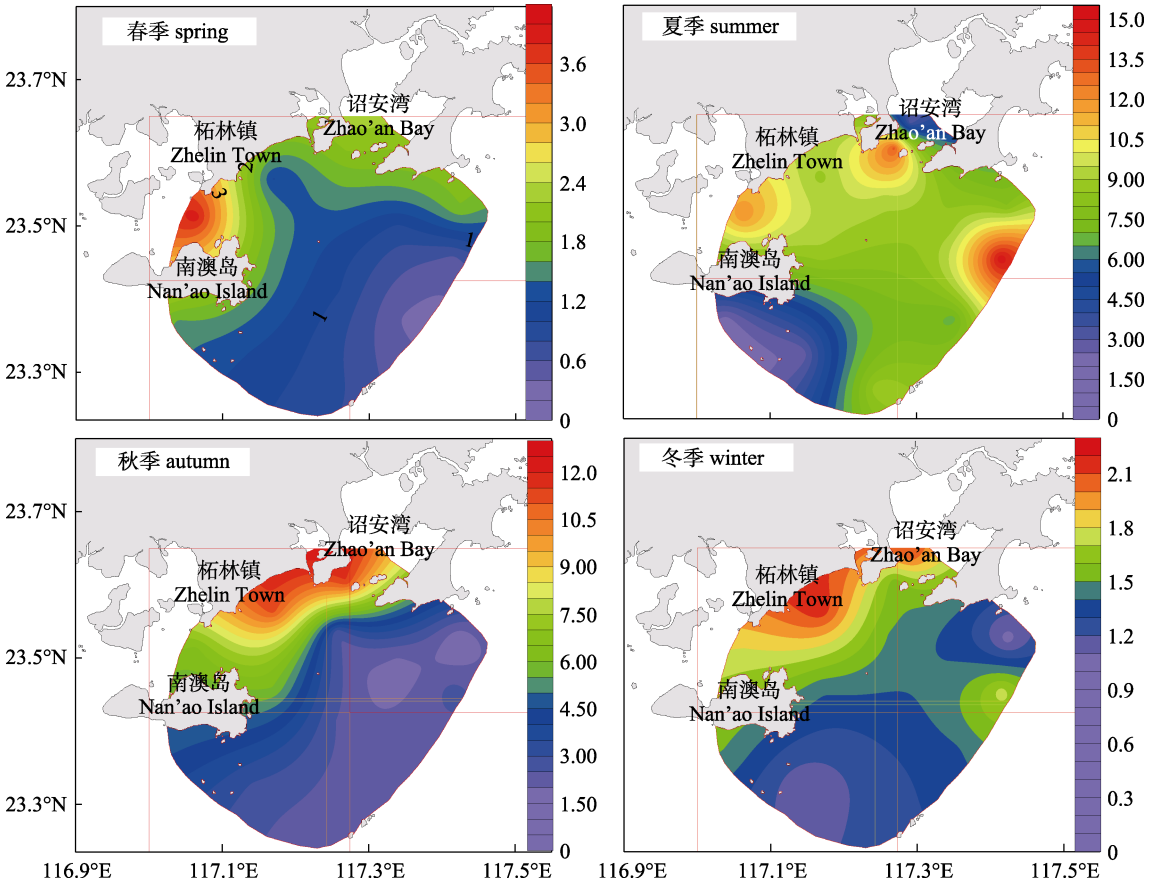

图 2　南澳–东山海域表层水体叶绿素 a 浓度(μg/L)的空间分布特征

Fig. 2　Spatial distribution of chlorophyll a concentration (μg/L) in the surface water of Nan'ao-Dongshan coastal region

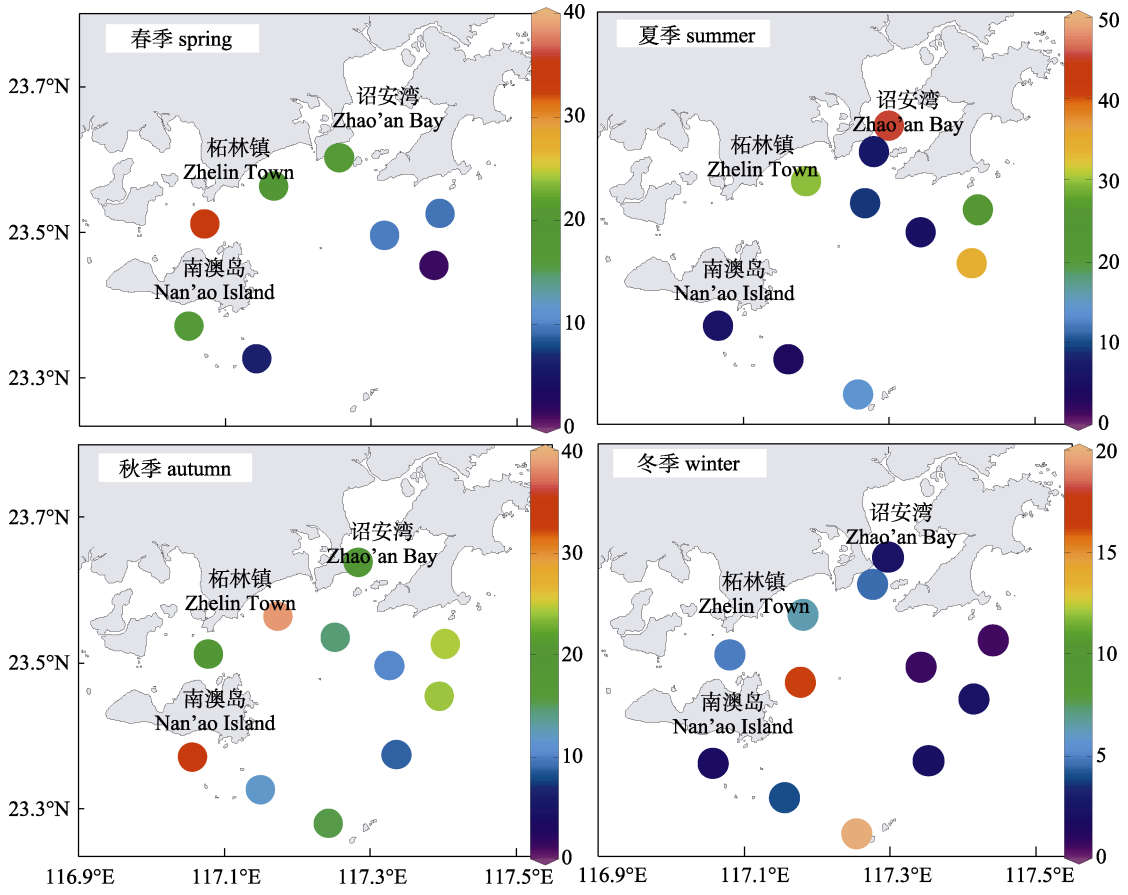

图 3 南澳–东山海域表层水体初级生产力[mg(C)/(m^3·h)]的水平分布特征

Fig. 3 The spatial distribution of primary productivity [mg(C)/(m^3·h)] in the surface water of Nan'ao-Dongshan coastal region

的近岸水域 N8 站出现最高值[38.6 mg(C)/(m^3·h)], 南澳岛南部次之; 冬季最高值出现在南部远岸的 N3 站[20 mg(C)/(m^3·h)]。

水柱初级生产力分布与表层初级生产力基本相近, 变动范围为 14.1~3066.6 mg(C)/(m^2·d) (图 4)。秋季最高, 冬季最低, 四季均值分别为: 秋季 1034.2 mg(C)/(m^2·d)>夏季 715.5 mg(C)/(m^2·d)>春季 453.4 mg(C)/(m^2·d)>冬季 133.8 mg(C)/(m^2·d)。春季和夏季基本呈现近岸高于远岸的趋势, 高值区位于诏安湾或柘林湾的近岸水域, 但秋季和冬季梯度分布规律不明显。夏季和秋季在最靠近台湾海峡的 N13 站都显示出比较高的初级生产力。在冬季, 水柱初级生产力水平都很低, 而在最远岸的 N3 显示出最高的水柱初级生产力。

2.4 叶绿素和初级生产力与理化因子的关系

相关分析显示, 只有在春季叶绿素 a 浓度、表层初级生产力与营养盐浓度呈显著相关(表 2), 其他季节没有发现显著的相关性。春季叶绿素 a 和初级生产力与盐度均呈显著负相关关系, 且与营养盐浓度多呈显著正相关, 反映了春季径流输入的高营养盐冲淡水对浮游植物生物量和初级生产力有积极的促进作用。叶绿素 a 浓度和表层初级生产力均主要与氮营养盐和 N/P 比呈显著正相关关系, 表明该海域氮营养盐在调控浮游植物生长和初级生产力上更为重要。

3 讨论

3.1 初级生产力的空间分布特征及控制因子

汕头南澳岛至漳州东山岛之间的海域, 水文条件复杂, 沿岸受到韩江、黄冈河等地表径流输入的影响, 远岸受到台湾浅滩上升流的影响, 浮游植物生物量和初级生产力存在明显的时空变化。初级生产力受多种环境因素影响, 一般来说初级生产力与叶绿素 a 浓度的相关关系显著, 同

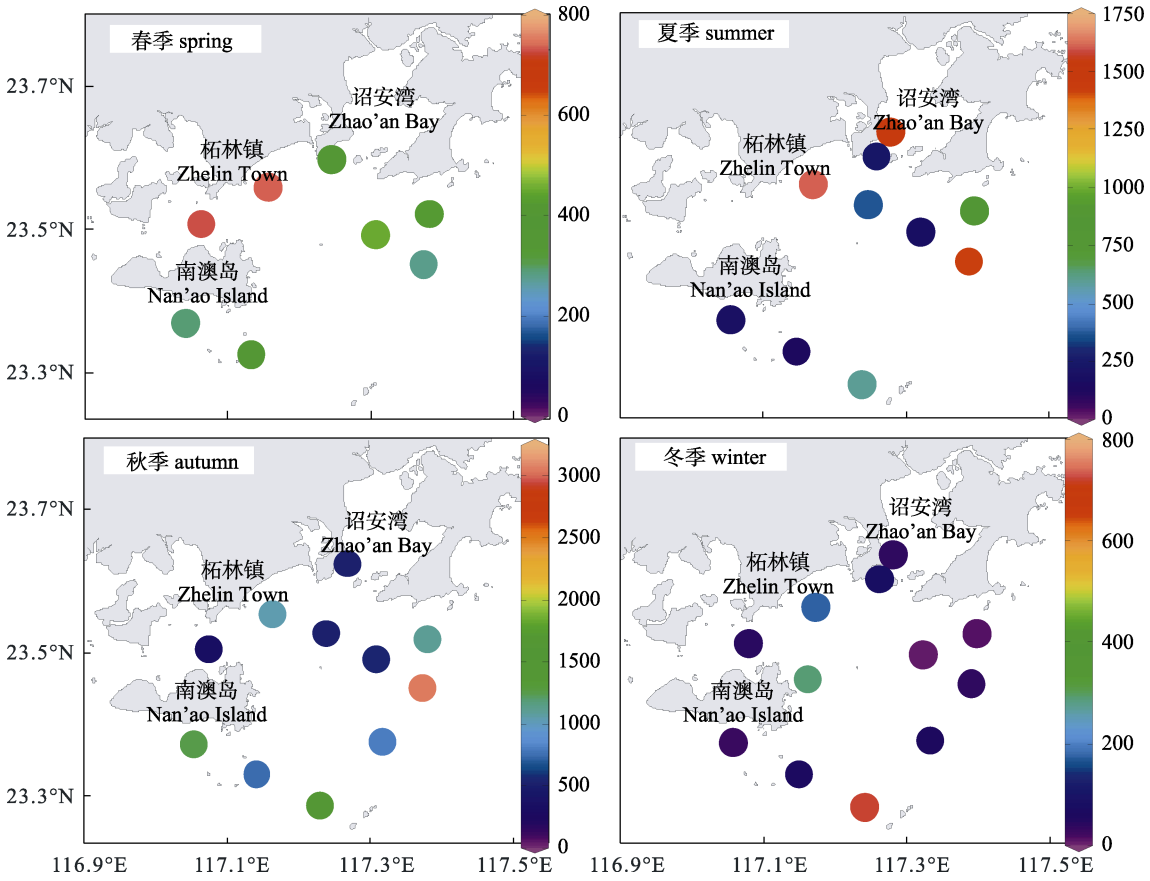

图 4　南澳–东山海域水柱初级生产力[mg(C)/(m^2·d)]的水平分布特征

Fig. 4　The spatial distribution of depth-integrated primary productivity [mg(C)/(m^2·d)] in the coastal region of Nan'ao-Dongshan

表 2　春季南澳–东山海域表层水体叶绿素 a、初级生产力与理化因子的相关关系

Tab. 2　Correlation coefficients for the relationship between chlorophyll a, primary productivity and environmental parameters

指标 item	温度 temperature	盐度 salinity	透明度 transparency	硝态氮 NO_3^-	亚硝氮 NO_2^-	氨氮 NH_4^+	溶解无机氮 DIH	溶解无机磷 DIP	硅酸盐 SiO_3	氮磷比 N/P
叶绿素 a chlorophyll a	0.033	–0.727**	–0.824**	0.690**	0.689**	0.487	0.664**	0.156	0.651*	0.718**
表层初级生产力 surface primary productivity	0.178	–0.798*	–0.919**	0.831*	0.832*	0.614	0.785*	0.506	0.775*	0.760*
水柱初级生产力 depth-integrated primary productivity	0.637	–0.865**	–0.371	0.596	0.723*	0.540	0.597	0.817*	0.483	0.399

注: *表示显著相关(P<0.05), **表示极显著相关(P<0.01).

Note: * significant correlation (P<0.05), ** extremely significant correlation (P<0.01).

时与主要营养盐存在显著的正相关关系，营养盐是影响浮游植物初级生产力的最直接因素[12-13]。本研究发现，春季的叶绿素 a 浓度和初级生产力与营养盐的关系紧密，但是其他季节则看不到显著的相关关系。这可能因为春季为季风间期，近岸和远岸水体交换强度不大，营养盐和叶绿素 a 浓度在春季均按近岸至远岸梯级增加。在其他季节，受季风和海流的影响，该海域的水文情况复杂，初级生产力受到多方因素影响，故营养盐调控的上行效应不显著。在南海，氮营养盐一般是

限制海洋初级生产力的最重要因子[14]。本研究显示，氮营养盐在春季和秋季可能是南澳–东山海域的潜在限制因子，春季的叶绿素 a 浓度和初级生产力主要与氮营养盐浓度呈显著正相关，而且除了近岸的几个站位的 N/P 比在 25~87 之间外，水深大于 20 m 的远岸站位的 N/P 比均小于 16。在秋季，N/P 比平均只有 6.7，浮游植物生长受氮限制的程度更大。

总的来看，本调查海域的水质比较健康，叶绿素 a 和营养盐浓度大都维持在一个比较低的水平。值得注意的是，冬季的 DIN 浓度是其他季节的 3~5 倍，这可能与冬季台湾海峡南下的高营养盐沿岸流有关。南澳岛近海是中国龙须菜养殖的重要基地，冬季高的营养盐也给当地紫菜和龙须菜等大型海藻养殖提供了营养基础。尽管冬季具有较高的营养盐浓度，但水体的叶绿素 a 浓度和初级生产力水平都是最低的，这可能主要与较低的水温不适于浮游植物的生长有关，而冬季该海域大规模养殖的龙须菜对近岸浮游植物的生长也有明显的抑制作用，在夏季龙须菜收割后，该海区的叶绿素 a 含量会显著上升[15]。光照和浊度是影响浮游植物生长和初级生产力水平的另一个重要因素[16]。在冬季调查期间，受寒潮大风扰动水体的影响，调查海域的水体透明度普遍在 1~1.5 m 之间，直接导致水柱初级生产力的降低。而秋季水体的透明度最高，平均透明度都超过 3 m，水柱初级生产力远高于其他季节。本研究表明，南澳–东山海域水柱初级生产力年均值为 584.2 mg(C)/(m^2·d)，要高于之前报道的台湾海峡沿岸区的 273 mg(C)/(m^2·d)[1]，表明该海域的潜在渔业资源量相对较高。

3.2 初级生产力对渔业增养殖区划的意义

南澳岛周边海域是中国重要的海洋牧场之一，也是华南沿海唯一成功进行大型海藻大面积养殖的水域。近十几年来，北方的龙须菜、紫菜等大型海藻成功在当地引种推广，养殖大型海藻现在已成为当地渔民生活的重要经济来源。该海域位于南海的最北部，相对较低的水温使得这些适应低温的种类易于存活。从本研究结果来看，冬季水体中较高的营养盐也是大型海藻养殖成功推广的重要促进因素。龙须菜会和浮游植物竞争利用水体中的营养盐，在一定程度上会抑制浮游植物的生长。本研究显示，高营养盐高叶绿素水域一般位于柘林镇至诏安湾近岸，在该水域可以推广大型海藻兼营滤食性贝类的筏式养殖模式。滤食性贝类的养殖经济效益要高于大型海藻，而且不用投饵，对水质环境也可以起到调控的作用。贝类的滤食压力可对叶绿素和初级生产力起到关键的控制作用，将一个海湾里的牡蛎养殖清除后，叶绿素浓度会提高大约 4 倍[17]。由此推测，柘林湾里牡蛎的大规模养殖可能是导致湾内浮游植物含量不高的重要原因[8]。但是在进行放养规划的时候，应该注意根据水体的初级生产力水平科学规划放养密度。南澳岛周边某些海湾的太平洋牡蛎的放养密度已经超过了当地水域的养殖容量，在南澳深澳湾，由于太平洋牡蛎过度养殖，已经出现牡蛎死亡率增加、肥满度不够的现象，经济效益明显下降[7]。本研究获取的叶绿素和初级生产力数据，为该海域的养殖容量评估提供了基础数据。本研究结果显示，在南澳岛至柘林镇之间的水域，叶绿素 a 浓度常年都处于较高的水平，适合于大型海藻和滤食性贝类的增养殖。而南澳岛南部的水域，营养盐和叶绿素的浓度都较低，水体的透明度较高，则适合于抗风浪网箱或底播、放流等渔业增养殖模式。

本研究发现，夏季诏安湾内的站位具有较低的叶绿素 a 水平，但是却显示出最大的初级生产力。分析认为这应该与该海湾内大规模的牡蛎养殖有关。调查期间夏季诏安湾内的叶绿素 a 浓度为 3.2 μg/L，远低于周边其他近岸站位。目前的调查结果显示，在夏季生长旺盛的季节，诏安湾内牡蛎的滤食显著压制了该水域浮游植物的现存量。该海湾内牡蛎的养殖量或许在夏季已经超过了环境的承载值，可能已经出现饵料短缺的现象。之前的研究也发现柘林湾的高营养盐、低叶绿素 a 特征与该湾内大量养殖贝类有关[9]。夏季诏安湾内低叶绿素高初级生产力的特征也反映，一旦滤食压力减小该海湾内的浮游植物便会出现爆发式的增长，必须合理搭配养殖品种和控制养殖量，在充分利用水体初级生产的同时，保证良

好的水质环境。我国近年来大力提倡以海洋牧场的开发模式来推动近海渔业的增养殖，即对海洋生态系统进行生态友好型的改造，充分利用海洋初级生产力，提高生态系统能量的转化效率，促进渔业资源产出。合理的规划是可持续开发利用的前提，可以将本研究的水体初级生产力数据应用于营养动态模型或 Cushing 模型[18]，来估算南澳–东山海域生态系统渔业资源容纳量，为渔业资源合理开发提供参考。

参考文献

[1] Lu Z B, Dai Q S, Yan Y M. Productivity and maximum sustainable yield of fishery resources in Taiwan Strait and its adjacent waters[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2002, 9(1): 28-32. [卢振彬, 戴泉水, 颜尤民. 台湾海峡及其邻近海域渔业资源生产力和最大持续产量[J]. 中国水产科学, 2002, 9(1): 28-32.]

[2] Xiao F S. Fishery resource capacity in ecosystem of Minnan-Taiwan Shoal Fishing Ground[J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 2003, 22(4): 449-456. [肖方森. 闽南-台湾浅滩海域生态系统渔业资源容纳量[J]. 台湾海峡, 2003, 22(4): 449-456.

[3] Wang Z H, Li C H, Jia X P. The fishery production from the north part of the South China Sea using the primary production method[J]. Marine Fisheries Research, 2005, 26(3): 9-15. [王增焕, 李纯厚, 贾晓平. 应用初级生产力估算南海北部的渔业资源量[J]. 海洋水产研究, 2005, 26(3): 9-15.]

[4] Xu Z L, Cui X S, Huang H L. Distribution of zooplankton in *Ommastrephes batramii* fishing ground of the North Pacific Ocean and its relationship with the fishing ground[J]. Journal of Fisheries of China, 2004, 28(5): 515-521. [徐兆礼, 崔雪森, 黄洪亮. 北太平洋柔鱼渔场浮游动物数量分布及与渔场的关系[J]. 水产学报, 2004, 28(5): 515-521.]

[5] Ichii T, Mahapatra K, Sakai M, et al. Changes in abundance of the neon flying squid *Ommastrephes bartramii* in relation to climate change in the central North Pacific Ocean[J]. Marine Ecology Progress Series, 2011, 441: 151-164.

[6] Yu W, Chen X J, Yi Q. Relationship between spatio-temporal dynamics of neon flying squid *Ommastrephes bartramii* and net primary production in the northwest Pacific Ocean[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2016, 38(2): 64-72. [余为, 陈新军, 易倩. 西北太平洋海洋净初级生产力与柔鱼资源量变动关系的研究[J]. 海洋学报, 2016, 38(2): 64-72.]

[7] Chen W Z, Cao H B, Du H, et al. Research on carrying capacity of *Crassostrea gigas* in the Shen'ao Bay[J]. Ecological Science, 31(5): 558-562. [陈伟洲, 曹会彬, 杜虹, 等. 深澳湾太平洋牡蛎养殖容量研究[J]. 生态科学, 2012, 31(5): 558-562.]

[8] Zhou K, Huang C J, Jiang S, et al. Annual dynamics of phytoplankton in Zhelin Bay: 2000–2001[J]. Acta Ecologica Sinica, 2002, 22(5): 688-698. [周凯, 黄长江, 姜胜, 等. 2000~2001 年柘林湾浮游植物群落结构及数量变动的周年调查[J]. 生态学报, 2002, 22(5): 688-698.]

[9] Huang C J, Dong Q X, Wu C W, et al. Spatial temporal distribution of chlorophyll a in the Zhelin Bay– A large scale maricultural area[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2005, 27(2): 127-134. [黄长江, 董巧香, 吴常文, 等. 大规模增养殖区柘林湾叶绿素 a 的时空分布[J]. 海洋学报, 2005, 27(2): 127-134.]

[10] Cadée G C, Hegeman J. Primary production of phytoplankton in the Dutch Wadden sea[J]. Netherlands Journal of Sea Research, 1974, 8(2-3): 240-259.

[11] Holmes R W. The Secchi disk in turbid coastal waters[J]. Limnology and Oceanography, 1970, 15(5): 688-694.

[12] Lohrenzl S E, Fahnenstiel G L, Redalje D G, et al. Variations in primary production of northern Gulf of Mexico continental shelf waters linked to nutrient inputs from the Mississippi River[J]. Marine Ecology Progress Series, 1997, 155: 45-54.

[13] Song X Y, Wang S F, Li K Z, et al. Basic biological production and potential fishery production in Daya Bay[J]. Ecological Science, 2012, 31(1): 13-17. [宋星宇, 王生福, 李开枝, 等. 大亚湾基础生物生产力及潜在渔业生产量评估[J]. 生态科学, 2012, 31(1): 13-17.]

[14] Ning X, Chai F, Xue H, et al. Physical-biological oceanographic coupling influencing phytoplankton and primary production in the South China Sea[J]. Journal of Geophysical Research, 2004, 109: C10005.

[15] Huang Y S, Ou L J, Yang Y F. Nutrient competition between macroalgae *Gracilaria lemaneiformis* and phytoplankton in coastal waters of Nan'ao Island, Guangdong[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2017, 48(4): 806-813. [黄银爽, 欧林坚, 杨宇峰. 广东南澳岛大型海藻龙须菜与浮游植物对营养盐的竞争利用[J]. 海洋与湖沼, 2017, 48(4): 806-813.]

[16] Shen P P, Li G, Huang L M, et al. Spatio-temporal variability of phytoplankton assemblages in the Pearl River estuary, with special reference to the influence of turbidity and temperature[J]. Continental Shelf Research, 2009, 31(16): 1672-1681.

[17] Huang C H, Lin H J, Huang T C, et al. Responses of phytoplankton and periphyton to system-scale removal of oyster-culture racks from a eutrophic tropical lagoon[J]. Marine Ecology Progress Series, 2008, 358: 1-12.

[18] Cushing D H. Upwelling and the production of fish[J]. Advances in Marine Biology, 1971, 9: 255-334.

Temporal and spatial variations in primary production in the coastal region of Dongshan-Nan'ao

KE Zhixin[1, 2, 3], CHEN Danting[1, 2], TAN Yehui[1, 2], LIU Huajian[1], LIU Jiaxing[1]

1. Key Laboratory of Tropical Marine Bio-resources and Ecology, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Guangdong Provincial Key Laboratory of Applied Marine Biology, Guangzhou 510301, China

Abstract: Chlorophyll a (Chl a) concentrations and primary productivity were investigated in the surface water of the Nan'ao-Dongshan coastal area in September (autumn) and December (winter) of 2014, April (spring) of 2015, and July (summer) of 2017. The seasonal and spatial distribution patterns of Chl a and primary productivity were analyzed. The Chl a concentration varied from 0.37 μg/L to 14.9 μg/L. The average Chl a concentration in the surface water were summer (8.2 μg/L)>autumn (4.9 μg/L)>winter (1.52 μg/L)>spring (1.47 μg/L). The primary productivity varied from 0.6 to 45 mg(C)/(m^3·h), and the average values were autumn [20.3 mg(C)/(m^3·h)]>summer [18.2 mg(C)/(m^3·h)]>spring [14.4 mg(C)/(m^3·h)]>winter [5.6 mg(C)/(m^3·h)]. The depth-integrated primary productivity varied from 14.1 mg(C)/(m^2·d) to 3066.6 mg(C)/(m^2·d), and the average values were autumn [1034.2 mg(C)/(m^2·d)]>summer [715.5 mg(C)/(m^2·d)]>spring [453.4 mg(C)/(m^2·d)]>winter [133.8 mg(C)/(m^2·d)]. The Chl a concentration generally decreased from the northwest inshore region to the southeast offshore region during the four seasons. However, there was no clear pattern for the distribution of primary productivity. Significant correlations between Chl a, primary productivity, and nutrients were found only in spring. Nitrogen may be a relatively important limiting nutrition factor in the Nan'ao-Dongshan coastal region. In general, the water quality was healthy and the concentrations of Chl a and nutrients were relatively low. For the sustainable utilization of fishery resources, a reasonable plan regarding stocking densities is needed for the cultured species according to the primary productivity in the Nan'ao-Dongshan costal region.

Key words: primary productivity; chlorophyll a; Nan'ao Island; fishery resource

Corresponding author: TAN Yehui. E-mail: tanyh@scsio.ac.cn