

# 利用遥感技术估算南海北部表层异养细菌丰度\*

王剑<sup>1,2,3</sup>, 陈楚群<sup>1,2,3</sup>, 周伟华<sup>4</sup>, 李祥付<sup>1</sup>, 吴颀<sup>1</sup>, 叶海彬<sup>1</sup>, 唐世林<sup>1,3</sup>

1. 热带海洋环境国家重点实验室(中国科学院南海海洋研究所), 广东 广州 510301;
2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 广东省海洋遥感重点实验室(中国科学院南海海洋研究所), 广东 广州 510301;
4. 热带海洋生物资源与生态重点实验室(中国科学院南海海洋研究所), 广东 广州 510301

**摘要:** 常规异养细菌监测方法精度高但费时费力且不能连续观测, 而卫星遥感成本低、可以大面积同步、长时间周期观测, 可与常规方法互补。文章利用南海北部 10 个航次采集的表层异养细菌丰度和卫星遥感反射率, 采用统计回归的方法建立了异养细菌丰度的遥感模型, 其模型决定系数为 0.81, 均方根误差为  $2.44 \times 10^8$  个·L<sup>-1</sup>, 平均相对误差为 21%, 具有较好表现。利用该模型估算南海北部表层异养细菌丰度, 结果显示: 从珠江河口到南海北部开阔海域, 异养细菌丰度逐渐减小。夏季河口地区平均异养细菌丰度最高, 春季最低; 近岸海域靠近珠江河口西侧的平均异养细菌丰度高于东侧; 冬季陆架地区平均异养细菌丰度最高, 夏季最低; 开阔海域的异养细菌丰度变化幅度较小。

**关键词:** 异养细菌; 水色遥感; 空间分布; 南海北部

中图分类号: P735.13 文献标识码: A 文章编号: 1009-5470(2021)05-0053-10

## Estimating the spatial distribution of heterotrophic bacteria abundance in the Northern South China Sea using remote sensing\*

WANG Jian<sup>1,2,3</sup>, CHEN Chuqun<sup>1,2,3</sup>, ZHOU Weihua<sup>4</sup>, LI Xiangfu<sup>1</sup>, WU Jie<sup>1</sup>, YE Haibin<sup>1</sup>, TANG Shilin<sup>1,3</sup>

1. State Key Laboratory of Tropical Oceanography (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 Key Laboratory of Ocean Remote Sensing (South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences), Guangzhou 510301, China;
4. Key Laboratory of Tropical Marine Bio-resources and Ecology (South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences), Guangzhou 510301, China.

**Abstract:** Heterotrophic bacteria play an important role in using organic matter, and their abundance indicates eutrophication of water. The conventional methods of monitoring heterotrophic bacteria abundance are highly accurate but time-consuming and laborious; measurements are discrete. Satellite remote sensing technology, characterized by low-cost, large-area synchronization, and long-term repeated observations, is complement with conventional methods. In this study, we use the abundance of heterotrophic bacteria observed during 10 cruises in the northern South China Sea and satellite remote sensing

收稿日期: 2020-10-30; 修订日期: 2020-12-21。殷波编辑

基金项目: 国家重点研发计划专项(2018YFC1406604); 国家自然科学基金委-广东省联合基金(U1901215); 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州)人才团队引进重大专项(GML2019ZD0305); 广东省科技计划项目(2017B0202017002)

作者简介: 王剑(1994—), 男, 湖北省安陆市人, 硕士研究生, 主要从事海洋水色遥感研究。email: 18810916182@163.com

通信作者: 陈楚群。email: cqchen@scsio.ac.cn

\*感谢中国科学院南海海洋研究所的施震博士、张霞博士和袁翔城博士提供的宝贵航次观测数据, 文中的数据分析采用中国科学院南海海洋研究所的高性能计算集群得到。

Received date: 2020-10-30; Revised date: 2020-12-21. Editor: YIN Bo

Foundation item: National Key Research and Development Projects (2018YFC1406604); National Natural Science Foundation of China (U1901215); Key Special Project for Introduced Talents Team of Southern Marine Science and Engineering Guangdong, Laboratory (Guangzhou) (GML2019ZD0305); Science and Technology Planning Project of Guangdong Province, China (2017B020217002)

Corresponding author: CHEN Chuqun. email: cqchen@scsio.ac.cn

reflectance data to develop an algorithm to estimate heterotrophic bacteria abundance using statistical regression methods. The coefficient of determination of this model is 0.81, the root-mean-square error is  $2.44 \times 10^8$  cells·L<sup>-1</sup>, and the average relative error is 21%. The established model is used for retrieving the abundance of heterotrophic bacteria on the surface of the northern South China Sea. The abundance of heterotrophic bacteria gradually decrease from the Pearl River Estuary to the open sea. The average abundance of heterotrophic bacteria in the estuary area reaches the highest in summer and the lowest in spring. The average bacterial abundance in the coastal waters near the Pearl River Estuary is higher on the west side than on the east side. Bacterial abundance in the shelf area is the highest in winter and lowest in summer; bacterial abundance in the open sea has little variation from season to season.

**Key words:** heterotrophic bacteria; ocean color remote sensing; spatial distribution; Northern South China Sea

南海北部海域是近岸向深海的过渡区域, 具有复杂的生态系统特征, 已有的研究发现异养细菌丰度在南海北部海域存在显著的空间变化(Yuan et al, 2011; Zhou et al, 2011)。异养细菌丰度研究目前主要是基于常规监测方法(王生福等, 2013; 荆红梅等, 2018), 该方法精度虽然高, 但需要花费大量人力和物力。相比较而言, 卫星遥感技术具有低成本、大面积同步、长时间观测的特点, 能够与常规方法互补监测异养细菌。然而异养细菌作为海洋中的微生物颗粒, 虽然能够直接对海洋中的光产生衰减作用, 但自然水体中的物质组分众多, 直接分离异养细菌的光学信号受到众多物质干扰, 存在较大困难(Mobley et al, 1997; Stramski et al, 2001)。目前国内对外对异养细菌丰度的遥感模型研究可以分为两类: 1) 基于异养细菌丰度与浮游植物、悬浮颗粒物的关系建立异养细菌丰度的估算模型。Li等(2004)通过收集全球陆架和开阔海域现场测量的异养细菌丰度和叶绿素 *a* 质量浓度数据, 建立了异养细菌丰度与叶绿素 *a* 质量浓度的数学模型。Duarte等(2005)研究发现该模型在陆架和开阔海域具有较好表现, 但在近岸海域表现欠佳。Crump等(2017)发现研究河口地区的异养细菌与悬浮颗粒物具有紧密关系, 并使用异养细菌丰度与悬浮物浓度、叶绿素 *a* 质量浓度等建立了细菌丰度的估算模型。Priyaja等(2016)使用阿拉伯海观测的异养细菌丰度和颗粒有机碳浓度数据建立了两者的关系模型, 并提出利用颗粒有机碳浓度估算异养细菌丰度。2) 基于颗粒物衰减系数估算异养细菌丰度。Montes-Hugo等(2007)使用近岸海域观测的异养细菌丰度和测量的颗粒物衰减系数分析发现二者存在相关性, 并提出异养细菌丰度与水中有机颗粒物浓度存在相关关系。异养细菌丰度的模型研究目前主要是基于异养细菌丰度与颗粒物参量(浮游植物、悬浮颗粒物、颗粒物衰减系数等)建立模型, 再通过遥感反演的颗粒物参量估算细菌

丰度, 该方法不仅会引进中间量影响模型的精度和应用, 而且会忽视水体中异养细菌本身的光学特性。本研究直接针对异养细菌丰度与遥感反射率进行相关关系分析, 从而建立异养细菌丰度的遥感模型, 该类方法尚未见报道。

由于与异养细菌采样同步的现场观测光学数据少, 研究采用 MODIS/Aqua 传感器获取的卫星影像数据处理得到遥感反射率数据。该卫星传感器自 1999 年发射以来已经对海洋进行了长时间连续的观测, 其卫星数据被广泛使用。本研究采用自 2004 年至 2017 年南海北部 10 个航次观测的异养细菌丰度数据与匹配的卫星遥感反射率数据建立异养细菌丰度遥感模型。卫星遥感反射率数据采用在中国近岸海域具有较好表现的大气校正方法对 10 个航次观测时间段的 MODIS 影像校正得到, 模型建立通过分析遥感反射率的波段组合与异养细菌丰度的相关性, 选择相关性较好的波段组合建立异养细菌丰度估算模型。建立的模型运用到 MODIS 卫星影像数据获取南海北部海域表层异养细菌丰度的空间分布信息。

## 1 研究区域与数据

### 1.1 研究区域

南海地处亚洲东南部, 是位于热带、亚热带西太平洋最大的边缘海, 周年水温和盐度较高。南海北部海域北与中国华南大陆相连, 东与太平洋通过吕宋海峡相通(图 1)。南海北部地形复杂, 根据水深划分为沿岸区域(水深小于 40m), 陆架地区( $40\text{m} \leq \text{水深} \leq 200\text{m}$ ), 和开阔海域(水深大于 200m)。其气候属于典型的季风气候, 11 月到翌年 4 月主要是强劲的东北季风, 6—8 月是西南季风, 9—10 月是季风转换期(Pan et al, 2018)。南海北部海域是近岸向深海生态系统的过渡区域, 北边受近岸珠江低盐度、富营养淡水输入, 东边受到来自太平洋的黑潮侵入,

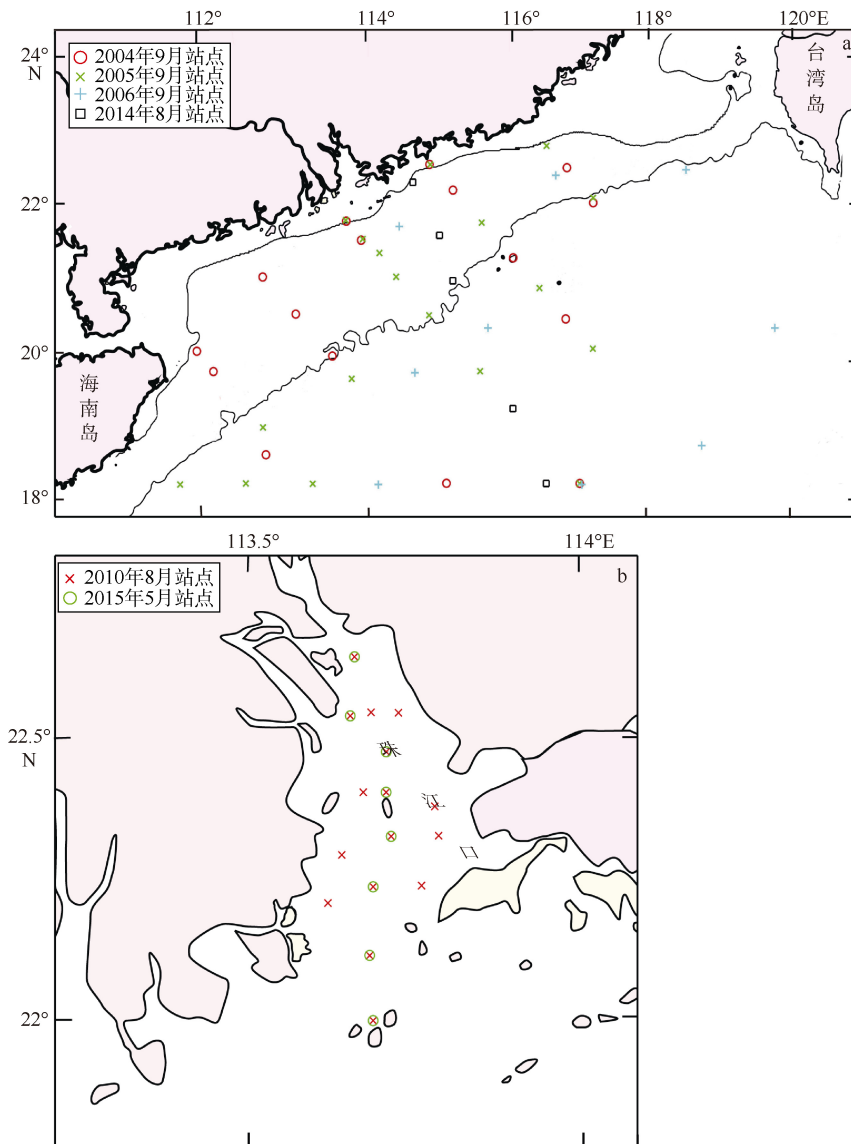


图1 研究区及航次观测站点分布图

a. 南海北部站点分布图; b. 珠江河口站点分布图。基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载审图号为 GS(2016)2924 和 GS(2019)3266 标准地图制作

Fig. 1 Distribution map of the study area and cruise observation stations. (a) sample site map of the northern South China Sea; (b) sample site map of the Pearl River Estuary

南边是南海高盐、贫营养的开阔海域, 河流输入和海洋动力过程都对南海北部的生物地球化学空间分布具有显著的影响(Wong et al, 2015)。

### 1.2 现场观测数据

现场观测数据是 10 个航次采集南海北部表层水样带回实验室后经测量得到, 异养细菌丰度(heterotrophic bacteria abundance, HBA), 叶绿素 *a* 质量浓度(Chl *a*)以及颗粒有机碳浓度(particulate organic carbon, POC)数据分别采用常规方法测量得到(Chen et al, 2009; Yuan et al, 2011; 张霞 等, 2012; 季风云 等, 2017), 河口及近岸地区观测站点时间范围为

8:30—16:00。数据采集范围为  $111^{\circ}$ — $119^{\circ}$ E,  $18^{\circ}$ — $23^{\circ}$ N, 航次观测时间和观测点数分布如表 1, 使用航次观测站点的经纬度坐标绘制航次站点分布图(图 1)。

### 1.3 卫星数据

卫星数据采用中等分辨率成像光谱仪(moderate-resolution imaging spectroradiometer, MODIS)获取得到的一级产品数据。卫星数据的 8~15 波段是为海洋水色遥感参量反演设计的, 具有较高的信噪比。其卫星影像空间分辨率为 1000m, 时间分辨率为 1d, 自 1999 年以来已经长时间持续获取了质量较好的

表 1 南海北部现场观测数据集

Tab. 1 Field observation data in the Northern South China Sea

| 观测时间  | 站点个数             | 观测量                    |
|---|------------------|------------------------|
| 2010年8月3—8日, 2011年1月6—10日                                 | 航次观测位置一致, 各16组数据 | HBA, POC, Chl <i>a</i> |
| 2015年5月10—12日, 2015年8月7—11日, 2016年1月10—14日, 2017年6月10—15日 | 航次观测位置一致, 各8组数据  | HBA, Chl <i>a</i>      |
| 2004年9月18日—10月3日  | 16组数据            | HBA, POC, Chl <i>a</i> |
| 2005年9月6—22日  | 17组数据            | HBA, Chl <i>a</i>      |
| 2006年9月15—27日   | 10组数据            | HBA, Chl <i>a</i>      |
| 2014年8月20日  | 5组数据             | HBA                    |

注: HBA 表示异养细菌丰度; POC 表示颗粒有机碳浓度; Chl *a* 表示叶绿素 *a* 质量浓度

海洋卫星数据。研究从卫星数据网站(<https://earthdata.nasa.gov/>)下载 10 个航次观测时间段和 2017 年 4 个季节典型月份的 MODIS 影像作为研究使用的卫星数据, 时间包括 2004 年 9 月、2005 年 9 月、2006 年 9 月、2010 年 8 月、2011 年 1 月、2014 年 8 月、2015 年 5 月和 8 月、2016 年 1 月、2017 年 1 月、4 月、6 月、7 月和 10 月。

## 2 研究方法

首先对 MODIS 影像进行大气校正预处理, 获取影像的遥感反射率; 然后使用现场取样站点的经纬度数据与卫星影像数据进行空间匹配, 获取异养细菌观测站点的遥感反射率; 接着采用统计回归方法建立异养细菌丰度与遥感反射率的关系模型; 最后将建立的模型运用到南海北部海域分析表层异养细菌丰度的空间分布。

### 2.1 卫星影像大气校正

卫星传感器获取的可见光波段辐射超过 90% 来自于大气散射辐射和表面辐射, 海洋中近表层水体散射和反射信号不足 10% (Ruddick et al, 2000)。影像的大气校正从卫星传感器接收的总信号中去除大气散射和表面反射影响, 获取准确离水辐射量的过程。目前水色遥感软件 SeaDAS (SeaWiFS Data Analysis System) 自带的大气校正算法对中国近岸海域的卫星影像进行校正常常失效 (He et al, 2004)。本研究采用 He 等 (2014) 提出的短波红外波段指数外推的大气算法 (shortwave infrared exponential extrapolation, SWIRE) 卫星影像进行处理, 该算法利用短波红外对浑浊水体悬浮物浓度变化不敏感的特性, 使用短波红外和近红外波段构建指数函数, 将浑浊水体转换为等效清洁水体, 再使用标准大气校正算法进行处理, 该算法在中国近岸海域被验证优于水色遥感软件自带大气校正方法, 在珠江河口及其他浑浊区域与实测遥感反射率对比具有较好的表

现 (Ye et al, 2017)。研究对 10 个航次采集时间段和 2017 年 4 个月份的 MODIS 影像采用影像自带的经纬度数据进行位置标定, 采用 SWIRE 算法进行大气校正处理。

### 2.2 数据匹配

大气校正后的卫星影像采用图像重投影、拼接和裁剪等基本处理, 获取研究区卫星影像。数据匹配参考 Bailey 等 (2001) 提出的匹配方法, 时间匹配采用  $\pm 1d$  的匹配时间差, 空间匹配使用异养细菌观测站点的经纬度与卫星影像的经纬度进行位置匹配, 获取观测站点对应的最邻近像元位置。以观测站点所在像元为中心设计  $3 \times 3$  的窗口, 首先剔除检测窗口内存在的云覆盖、水陆边界、太阳耀斑、高太阳天顶角和高传感器观测天顶角等异常像元, 并要求窗口内有效像元个数大于 7; 然后计算  $3 \times 3$  窗口内数据的变异系数, 要求数据的变异系数小于 0.30, 满足前面条件的数据采用公式 (1) 计算匹配点感反射率。

$$z^* = \sum_i [(1.5 \times \sigma - z') < z_i < (1.5 \times \sigma + z')] / N \quad (1)$$

公式中,  $z^*$  是计算得到的匹配点遥感反射率;  $z'$  是  $3 \times 3$  窗口内数据的平均值;  $\sigma$  是  $3 \times 3$  窗口内数据的方差;  $N$  是满足  $\pm 1.5 \times \sigma$  条件的像元个数。

在 MATLAB 软件中编写数据匹配程序, 使用现场观测的 112 组数据与预处理后的 MODIS 卫星影像匹配。使用最邻近法搜索取样站点对应的影像像元坐标, 并以匹配像元为中心构建  $3 \times 3$  窗口, 使用匹配规则进行判断, 总共有 75 组数据符合要求, 使用公式 (1) 计算匹配的遥感反射率。

### 2.3 遥感算法构建

水色遥感中常采用统计回归方法构建遥感模型 (陈楚群 等, 1996; Stramski et al, 1999; 赵英时, 2003; 杜成功 等, 2016; 逢淑娜 等, 2019)。统计回归模型中的变量  $Y$  和变量  $X$  分别由数据  $[y_1, y_2, \dots, y_i]$  与  $[x_1, x_2, \dots, x_i]$  组成,  $Y = \mu X + \varepsilon$ ,  $\mu$  和  $\varepsilon$  表示系数项; 此外  $X$

也是  $R$  的函数  $x_i = \sum_{k=1}^n \eta_k f_k(R_{i1}, R_{i2}, \dots, R_{ij})$ ,  $\eta_k$  表示系数项, 两个模型联合并展开形成新的形式:

$$y_i = \beta_0 + \sum_{k=1}^k \beta_k f_k(R_{i1}, R_{i2}, \dots, R_{ij}) + \varepsilon_i \quad (2)$$

采用上面形式构建遥感模型, 模型中的  $y_i$  代表第  $i$  个站点测量的异养细菌丰度(单位:  $\times 10^8$  个 $\cdot L^{-1}$ );  $R_{ij}$  代表第  $i$  个站点匹配的 MODIS 影像数据第  $j$  个水色波段的卫星遥感反射率;  $f_k$  是遥感反射率的单波段、波段比值、波段差值、差值与和值比值组合的函数;  $\eta_k$  是系数项,  $\beta_0$  是常数项;  $\varepsilon_i$  是第  $i$  个站点的随机误差;  $k$  是组合形式的变量, 取值为 1, 2。模型求解采用最小二乘法满足  $\varepsilon$  最小, 求解系数矩阵。使用决定系数( $R^2$ )、均方根误差(RMSE)和平均相对误差(MAPD)评价模型。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_i (y_i - y'_i)^2}{\sum_i (y_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i)^2} \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y'_i)^2}{n}} \quad (4)$$

$$MAPD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|y_i - y'_i|}{y_i} \times 100\% \quad (5)$$

式中:  $y'_i$  表示模型预测值,  $y_i$  表示现场观测值;  $n$  表示现场观测值的个数。

### 3 结果

#### 3.1 实测异养细菌丰度

南海北部现场观测数据的异养细菌丰度范围为  $2.27 \sim 26.81 \times 10^8$  个 $\cdot L^{-1}$ , 叶绿素  $a$  质量浓度范围为  $0.04 \sim 11.05 \mu g \cdot L^{-1}$ , 颗粒有机碳浓度范围为  $0.008 \sim 2.53 \times 10^3 \mu g \cdot L^{-1}$ 。匹配的 75 组异养细菌丰度范围为  $2.27 \sim 23.56 \times 10^8$  个 $\cdot L^{-1}$ , 平均异养细菌丰度为  $9.84 \times 10^8$  个 $\cdot L^{-1}$ 。其中, 河口和近岸地区 46 组匹配点, 异养细菌丰度范围为  $6.48 \sim 23.56 \times 10^8$  个 $\cdot L^{-1}$ , 平均异养细菌丰度为  $13.08 \times 10^8$  个 $\cdot L^{-1}$ ; 陆架地区 10 组匹配点, 异养细菌丰度范围为  $2.9 \sim 8.94 \times 10^8$  个 $\cdot L^{-1}$ , 平均异养细菌丰度为  $4.82 \times 10^8$  个 $\cdot L^{-1}$ ; 开阔海域 19 组匹配点, 异养细菌丰度范围为  $2.27 \sim 6.59 \times 10^8$  个 $\cdot L^{-1}$ , 平均异养细菌丰度为  $3.32 \times 10^8$  个 $\cdot L^{-1}$ 。使用统计直方图展示匹配结果的异养细菌丰度分布, 其异养细菌丰度 50% 的数值小于  $8.2 \times 10^8$  个 $\cdot L^{-1}$  (图 2)。

#### 3.2 模型建立和验证

使用 MODIS 的 8 个水色波段遥感反射率(中心波长分别为 412nm、443nm、488nm、531nm、551nm、

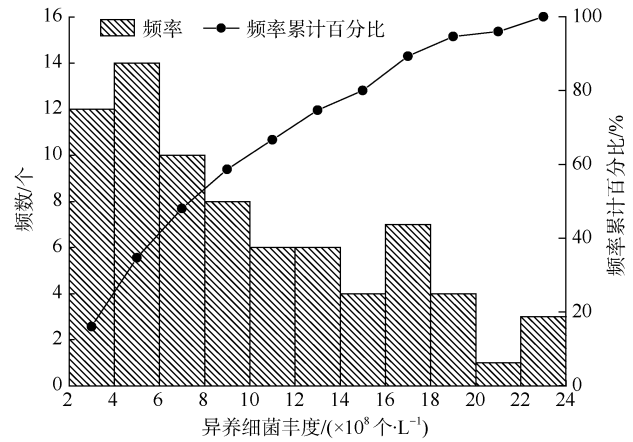


图 2 匹配的实测异养细菌丰度统计直方图

Fig. 2 Measured heterotrophic bacteria abundance statistical distribution histogram of matching sites

667nm、678nm 和 748nm, 分别使用  $R_{rs}(412)$ 、 $R_{rs}(443)$ 、 $R_{rs}(488)$ 、 $R_{rs}(531)$ 、 $R_{rs}(551)$ 、 $R_{rs}(667)$ 、 $R_{rs}(678)$ 、 $R_{rs}(748)$  中任意两波段比值、差值、和值、差值与和值的比值以及单波段进行遥感反射率波段组合, 总共构建 120 种组合方式, 与实测异养细菌丰度数据进行相关性分析, 相关性结果如图 3 所示。

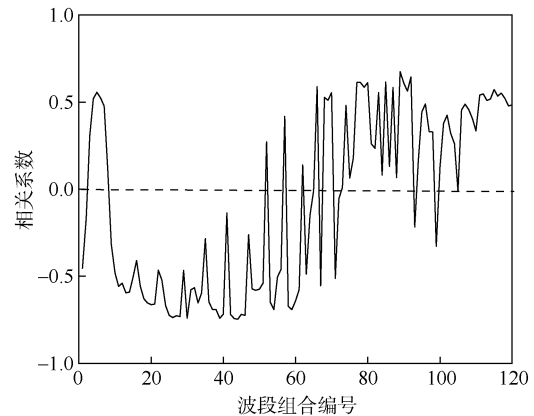


图 3 遥感反射率波段组合和实测异养细菌丰度的相关系数统计图

Fig. 3 Statistical graph of correlation coefficient between remote sensing reflectance band combination and measured bacterial abundance

75 组匹配数据按照异养细菌丰度从大到小进行排序, 等间隔抽取 55 组数据建立模型, 剩余 20 组数据用来验证模型。采用相关系数绝对值大于 0.65 的 20 个波段组合构建异养细菌丰度模型, 以每种波段组合为自变量, 采用 2.3 中的模型构建线性模型、指数模型和二次函数模型。同时考虑多变量对异养细菌丰度的共同作用和影响, 对变量采用逐步线性回归分析, 建立多元回归模型。选择模型中具有较好表现的 7 种模型进行展示(表 2), 从表 2 中可以知道,

表 2 较好表现的 7 种异养细菌丰度与遥感反射率模型

Tab. 2 Seven well-performing models of heterotrophic bacteria abundance and remote sensing reflectance

| 序号 | 模型  | 模型评估  |   |          |
|----|---|-------|---|----------|
|    |   | $R^2$ | RMSE<br>/( $\times 10^8$ 个 $\cdot L^{-1}$ ) | MAPD / % |
| 1  | $HBA = 8.12 \times e^{(R_{rs}(551)-R_{rs}(412))/(R_{rs}(551)+R_{rs}(412))} - 1.58$  | 0.72  | 3.02  | 30       |
| 2  | $HBA = 11.75 \times e^{(R_{rs}(551)-R_{rs}(443))/(R_{rs}(551)+R_{rs}(443))} - 3.34$   | 0.71  | 3.16  | 32       |
| 3  | $HBA = 8.95 \times e^{(R_{rs}(551)-R_{rs}(412))/(R_{rs}(551)+R_{rs}(412))} - 154.4 \times e^{(R_{rs}(551)-R_{rs}(412))} + 151.8$                                | 0.76  | 2.83  | 25       |
| 4  | $HBA = 5.81 \times e^{(R_{rs}(551)-R_{rs}(412))/(R_{rs}(551)+R_{rs}(412))} + 0.41 \times e^{R_{rs}(667)/R_{rs}(443)} - 0.35$                                    | 0.81  | 2.44  | 21       |
| 5  | $HBA = 11.52 \times [(R_{rs}(531) - R_{rs}(443))/(R_{rs}(531) + R_{rs}(443))]^2 + 16.38 \times (R_{rs}(531) - R_{rs}(5443))/(R_{rs}(531) + R_{rs}(443)) + 5.86$ | 0.71  | 3.35  | 35       |
| 6  | $HBA = 6.11 \times [(R_{rs}(551) - R_{rs}(412))/(R_{rs}(551) + R_{rs}(412))]^2 + 4.18 \times (R_{rs}(551) - R_{rs}(412))/(R_{rs}(551) + R_{rs}(412)) + 5.89$    | 0.75  | 2.95  | 28       |
| 7  | $HBA = 11.68 \times [(R_{rs}(551) - R_{rs}(443))/(R_{rs}(551) + R_{rs}(443))]^2 + 14.58 \times (R_{rs}(551) - R_{rs}(443))/(R_{rs}(551) + R_{rs}(443)) + 5.92$  | 0.74  | 2.98  | 29       |

注: HBA 表示异养细菌丰度;  $R_{rs}(412)$ 、 $R_{rs}(443)$ 、 $R_{rs}(531)$ 、 $R_{rs}(551)$ 、 $R_{rs}(667)$  表示中心波长分别为 412nm、443nm、531nm、551nm、667nm 的遥感反射率;  $R^2$  表示确定系数, RMSE 表示均方根误差, MAPD 表示平均相对误差

建模效果最好的是模型 4, 模型的确定系数  $R^2$  为 0.81, RMSE 为  $2.44 \times 10^8$  个 $\cdot L^{-1}$ , MAPD 为 21%。

使用剩余 20 组数据验证模型 4 的精度, 其中河口和近岸海域数据 13 组, 陆架和开阔海域数据 7 组。经验证可知实测异养细菌丰度与模型计算得到的异养细菌丰度的拟合曲线斜率为 0.83, 模型的确定系数  $R^2$  为 0.82, RMSE 为  $1.9 \times 10^8$  个 $\cdot L^{-1}$ , MPAD 为 19%。模型中陆架和开阔海域验证点(图 4 中的实心圆)的结果相对较好, 平均相对误差为 13%; 河口和近岸海域验证点(图 4 中的空心圆)存在个别样本

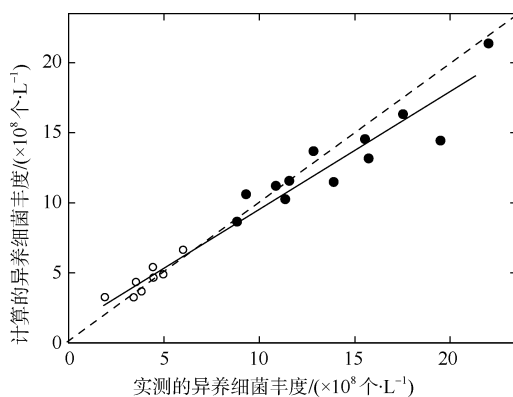


图 4 实测异养细菌丰度与计算的异养细菌丰度验证结果图

空心圆为陆架和开阔海域的验证点, 实心圆为河口和近岸海域的验证点, 黑色虚线为 1:1 线, 黑色实线为实测异养细菌丰度与模型计算异养细菌丰度的线性拟合线

Fig. 4 Comparison between measured bacterial abundance and estimated heterotrophic bacterial abundance verification results. The hollow circle are the verification points of the continental shelf and the open sea area, the filled circle are the verification points of the estuary and coastal waters. The black dotted line is the 1:1 line, and the purple solid line is the fitting line

误差相对较大, 平均相对误差为 25%, 从验证结果可知模型的准确度总体相对较好(图 4)。

### 3.3 模型比较

前人使用现场观测的异养细菌丰度与叶绿素  $a$  质量浓度、颗粒有机碳浓度分别建立了不同的异养细菌丰度模型(Li et al, 2004; Priyaja et al, 2016)。本研究使用南海北部观测得到的异养细菌丰度(单位:  $\times 10^8$  个 $\cdot L^{-1}$ )与叶绿素  $a$  质量浓度(Chl  $a$ , 单位:  $\mu g \cdot L^{-1}$ )和颗粒有机碳浓度(POC, 单位:  $\times 10^3 \mu g \cdot L^{-1}$ )进行模型区域化分析, 结果显示, 异养细菌丰度与叶绿素  $a$  质量浓度的相关系数为 0.52, 与颗粒有机碳浓度的相关系数为 0.82, 使用线性、对数以及二次函数建立异养细菌丰度与颗粒有机碳浓度的模型, 表 3 中的模型 1 是表现最好的模型。将研究区划分为河口到近岸海域以及陆架到开阔海域两部分, 异养细菌丰度和叶绿素  $a$  质量浓度的相关系数在河口和近岸海域为 0.34, 在陆架与开阔海域地区为 0.76, 使用线性、对数以及二次函数建立陆架与开阔海域异养细菌丰度和叶绿素  $a$  质量浓度的模型, 表 3 中的模型 2 是表现最好的模型。通过比较本研究使用遥感反射率建立的模型(表 2 中的模型 4)与原有模型(表 3 中的模型)的决定系数、均方根误差和平均相对误差, 可以知道本研究建立的模型具有更好表现。

### 3.4 南海北部异养细菌空间分布

研究选择 2017 年 4 个月份(4 月、7 月、10 月和 1 月)作为春季、夏季、秋季、冬季 4 个季节的代表月份, 使用 SWIRE 方法对 4 个月份的 MODIS 影像进行大气校正, 采用本研究建立的模型 4 反演得到南海北部表层 4 个季节的异养细菌丰度分布(图 5)。从图 5 中可以知道从河口到近岸海域再到开阔海域,

表 3 较好表现的异养细菌丰度与颗粒有机碳浓度、叶绿素 *a* 质量浓度模型Tab. 3 Well-performing model of combining heterotrophic bacteria abundance with particle organic carbon concentration, chlorophyll *a* concentration model

| 序号 | 模型  | $R^2$ | RMSE/( $\times 10^8$ 个 $\cdot L^{-1}$ ) | MAPD / % |
|----|---|-------|---|----------|
| 1  | $\lg(\text{HBA})=0.37 \times \lg(\text{POC})+6.07$    | 0.78  | 2.66                                    | 28       |
| 2  | $\lg(\text{HBA})=0.28 \times \lg(\text{Chl } a)+5.88$ | 0.76  | 2.43                                    | 25       |

注: HBA 表示异养细菌丰度; POC 表示颗粒有机碳浓度; Chl *a* 表示叶绿素 *a* 质量浓度。  $R^2$  表示确定系数, RMSE 表示均方根误差, MAPD 表示平均相对误差

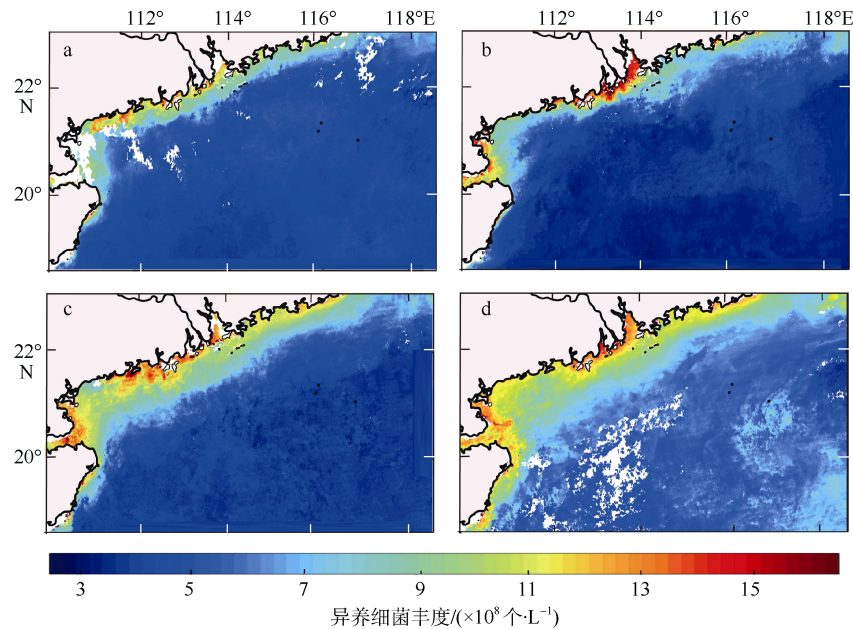


图 5 2017 年 4 个季节异养细菌丰度空间分布图

a. 春季; b. 夏季; c. 秋季; d. 冬季。基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载审图号为 GS(2016)2924 标准地图制作。图中的白色区域为无值区域, 由该地区云对卫星影像遮挡造成

Fig. 5 Spatial distribution of heterotrophic bacteria abundance in four seasons in 2017. (a) spring, (b) summer, (c) autumn, and (d) winter. The white areas appearing in the figure are non-valued areas, which are caused by the cloud blocking the satellite image in the area

异养细菌丰度逐渐下降。珠江河口和近岸地区的异养细菌丰度较高, 大于  $9 \times 10^8$  个 $\cdot L^{-1}$ ; 陆架地区介于  $3.2 \times 10^8 \sim 8.5 \times 10^8$  个 $\cdot L^{-1}$  之间, 开阔海域的异养细菌丰度为  $2.7 \times 10^8 \sim 7.5 \times 10^8$  个 $\cdot L^{-1}$ 。河口地区, 夏季的平均异养细菌丰度最高, 春季最低, 冬季河口西侧的异养细菌丰度高于东侧。近岸海域的异养细菌丰度在靠近河口处西侧的平均异养细菌丰度高于东侧。陆架海域冬季的平均异养细菌丰度最高, 夏季最低。开阔海域 4 个季节的丰度变化幅度很小, 在靠近吕宋口附近海域的异养细菌丰度明显高于其他开阔海域。

## 4 讨论

### 4.1 模型分析

研究使用 MODIS 影像的遥感反射率与现场观测的异养细菌丰度构建了异养细菌丰度的遥感模

型。为了评估模型的精度和适用性, 对模型建立中产生不确定性的两个影响因素—建模数据和方法进行分析。

研究在缺乏现场同步光学观测数据条件下, 采用卫星遥感反射率参与构建模型。卫星遥感反射率使用大气模型对大气传输过程模拟计算得到, 由于复杂的传输过程, 大气模型计算的波段遥感反射率与实测遥感反射率相比会存在误差 (Wang et al, 2007)。研究选用在南海北部具有较好表现的 SWIRE 大气校正模型对卫星影像进行大气校正处理, 获得了相对准确的遥感反射率 (He et al, 2014)。数据匹配参考 Bailey 等 (2001) 提出的匹配准则, 匹配获取的卫星遥感反射率代表的是像元范围的遥感反射率, 与实测站点对应区域的遥感反射率会存在误差 (Chen et al, 2012)。研究构建  $3 \times 3$  的匹配窗口, 计算窗口内数据的变异系数筛选出遥感反射率变化相对

较小的匹配点, 减弱空间尺度差异造成的影响 (Bailey et al, 2006), 该方法匹配获取的遥感反射率参与构建模型具有一定的可行性 (Cao et al, 2017)。此外, 研究采用宽的匹配时间差 $\pm 24\text{h}$  进行数据的时间匹配, 该方法与同步观测的数据相比会存在误差。Yuan 等(2011)对南海北部地区 24h 内的异养细菌丰度变化研究发现其丰度的变化幅度小, 采用 $\pm 24\text{h}$  的匹配时间差在多云的南海北部海域获得更多的匹配数据具有一定可行性 (Hu et al, 2015)。匹配的异养细菌丰度数据广泛分布在河口和近岸海域、陆架和开阔海域地区, 其异养细菌丰度范围与 Zhou 等(2011)研究观测的异养细菌丰度范围相比具有一致性。

研究使用多元统计回归方法建立了异养细菌丰度的遥感反演模型。从较好表现的 7 种模型(表 2)中可以发现, 模型中都包含有绿波段(中心波长为 531nm 和 551nm 的波段), 该波段的遥感反射率与水体中的悬浮颗粒物具有紧密的关系 (Cao et al, 2017)。自然水体的异养细菌附着在浮游植物、有机碎屑等颗粒物表面获取生长繁殖必需的有机物, 与有机物具有紧密的关系 (Priyaja et al, 2016; Crump et al, 2017)。异养细菌密集附着在颗粒物表面, 与颗粒物共同对光产生衰减作用 (Montes-Hugo et al, 2007), 异养细菌在蓝波段 410nm 处存在吸收峰, 绿波段 550nm 处的吸收相对较弱, 散射相对较强, 建立模型使用的 551nm、412nm 波段包含异养细菌光谱特征 (Stramski et al, 2001)。此外, 研究建立的模型与其他人建立的模型进行比较可以知道, Li 等(2004)建立的异养细菌丰度与叶绿素 *a* 质量浓度模型在南海北部陆架和开阔海域具有较好的表现, 但不适用近岸地区, 与 Duarte 等(2005)研究结果一致。Priyaja 等(2016)使用现场观测数据建立的异养细菌丰度与颗粒有机碳浓度模型在南海北部具有很好的适用性, 但该方法应用到卫星遥感中, 由于估算颗粒有机碳浓度的遥感模型本身存在误差 (Liu et al, 2015), 该误差会传递到估算异养细菌丰度的模型中, 增加模型的不确定性, 模型的精度较差。利用遥感反射率建立的异养细菌丰度模型虽然仍受到诸多因素影响, 但与前面两个模型相比具有更好的表现。

#### 4.2 水文动力因素对细菌分布的影响

南海北部水文状况复杂, 异养细菌的分布受到众多水文动力因素的影响。南海北部受到珠江冲淡

水的影响, 上游的异养细菌随着河流输运到南海北部, 其丰度逐渐减小 (李祥付 等, 2018)。同时珠江的径流量在各个季节分布不均, 5 月至 8 月是雨季, 径流量增加, 更多的珠江径流进入到河口和南海北部近岸地区, 造成夏季平均异养细菌丰度较高, 降雨较少的春季平均异养细菌丰度较低 (Zhou et al, 2011; Zhang et al, 2013)。珠江河口的八大口门主要位于河口西侧, 并受到科氏力的影响使珠江入海径流向西偏转, 造成河口区西侧的异养细菌丰度大于东侧的异养细菌丰度, 这一结果与张霞等(2012)观测结果一致。陆架海域, 冬季南海北部混合层深度加深, 强劲的东北季风将次表层的异养细菌带到表层, 同时带入表层的有机物能促进异养细菌的生长和繁殖 (Yuan et al, 2011), 造成冬季平均异养细菌丰度增加。在靠近吕宋口附近海域, 该地区会受到中尺度涡旋, 热带风暴等动力过程影响, 造成局部海区异养细菌丰度明显增加 (Zubkov et al, 2002), 开阔海域总体上较少受到外来物质影响, 在 4 个季节里平均异养细菌丰度变化幅度小。

## 5 结论

本研究使用南海北部 10 个航次观测的异养细菌丰度和与之相匹配的 75 组 MODIS 遥感反射率数据, 其中 55 组数据使用多元统计回归方法建立异养细菌丰度遥感模型, 20 组数据用于检验模型精度。建立的模型相比前人的间接估算模型具有更好的表现, 模型的决定系数为 0.81, 均方根误差为  $2.44 \times 10^8 \text{ 个} \cdot \text{L}^{-1}$ , 平均相对误差为 21%。由于现场观测的光学数据缺乏, 研究对自然水体中的异养细菌丰度与现场观测光学参量(遥感反射率、吸收系数、散射系数等)的关系需要进一步探究和分析。此外, 研究中使用点位数据与面上数据进行匹配, 对匹配数据定量分析研究也需要进一步探索。

将建立的模型应用到南海北部, 分析南海北部表层异养细菌的空间分布, 结果显示: 从珠江河口到南海北部开阔海域, 异养细菌丰度逐渐减少。河口地区夏季平均异养细菌丰度最高, 春季最低; 陆架海域, 冬季平均异养细菌丰度最高, 夏季最低; 开阔海域 4 个季节异养细菌丰度变化幅度小。研究尝试利用遥感技术估算大面积海域表层异养细菌丰度, 相比常规异养细菌丰度监测方法, 具有成本低、大面积同步观测的优势, 对研究海域水环境质量也具有很好的指示作用。



## 参考文献 References

- 陈楚群, 施平, 毛庆文, 1996. 应用 TM 数据估算沿海水表层叶绿素浓度模型研究[J]. 环境遥感, 11(3): 168–176. CHEN CHUQUN, SHI PING, MAO QINGWEN, 1996. Study on modeling chlorophyll concentration of surface coastal water using TM data[J]. Remote Sensing of Environment China, 11(3): 168–176 (in Chinese with English abstract).
- 杜成功, 李云梅, 王桥, 等, 2016. 面向 GOCI 数据的太湖总磷浓度反演及其日内变化研究[J]. 环境科学, 37(3): 862–872. DU CHENGGONG, LI YUNMEI, WANG QIAO, et al, 2016. Inversion model and daily variation of total phosphorus concentrations in Taihu lake based on GOCI data[J]. Environmental Science, 37(3): 862–872 (in Chinese with English abstract).
- 季凤云, 郭立梅, 李洪波, 等, 2017. 南海北部细菌丰度和细菌生产力分布及其与环境因子相关性[J]. 海洋环境科学, 36(3): 354–359. JI FENGYUN, GUO LIMEL, LI HONGBO, et al, 2017. Abundance and production of bacteria and their correlations with environmental factor[J]. Marine Environmental Science, 36(3): 354–359 (in Chinese with English abstract).
- 荆红梅, 韦誉, 郑丽平, 等, 2018. 三亚海域浮游病毒与细菌丰度的时空变化规律以及相关环境因子[J]. 热带海洋学报, 37(2): 36–46. JING HONGMEI, WEI YU, ZHENG LIPING, et al, 2018. Spatiotemporal variations of viroplankton and bacterioplankton abundance in Sanya waters and their related environmental factors[J]. Journal of Tropical Oceanography, 37(2): 36–46 (in Chinese with English abstract).
- 李祥付, 徐杰, 施震, 等, 2018. 珠江口异养细菌时空分布特征及其调控机制[J]. 热带海洋学报, 37(1): 27–36. LI XIANGFU, XU JIE, SHI ZHEN, et al, 2018. Spatial and temporal variation in heterotrophic bacteria and their regulators in the Pearl River Estuary[J]. Journal of Tropical Oceanography, 37(1): 27–36 (in Chinese with English abstract).
- 逢淑娜, 朱渭宁, 陈江, 等, 2019. Landsat-8 的舟山近岸海域总悬浮物遥感反演与时空变异研究[J]. 光谱学与光谱分析, 39(12): 3826–3832. PANG SHUNA, ZHU WEINING, CHEN JIANG, et al, 2019. Using Landsat-8 to remotely estimate and observe spatio-temporal variations of total suspended matter in Zhoushan coastal regions[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 39(12): 3826–3832 (in Chinese with English abstract).
- 王生福, 宋星宇, 黄良民, 等, 2013. 南海北部夏季浮游细菌生长效率初步研究[J]. 热带海洋学报, 32(6): 73–79. WANG SHENGFU, SONG XINGYU, HUANG LIANGMIN, et al, 2013. Preliminary study on marine bacterial growth efficiency in the northern South China Sea in summer[J]. Journal of Tropical Oceanography, 32(6): 73–79 (in Chinese with English abstract).
- 张霞, 黄小平, 施震, 等, 2012. 珠江口异养细菌丰度与环境因子的耦合关系[J]. 海洋学报, 34(6): 228–237. ZHANG XIA, HUANG XIAOPING, SHI ZHEN, et al, 2012. Coupling of heterotrophic bacteria abundance and environmental variables of the Zhujiang (Pearl) River Estuary[J]. Acta Oceanologica Sinica, 34(6): 228–237 (in Chinese with English abstract).
- BAILEY S, WANG MENGHUA, 2001. Satellite aerosol optical thickness match-up procedures[M]/FARGION G S, BARNES R, MCCLAIN C. In situ aerosol optical thickness collected by the SIMBIOS program (1997–2000): protocols, and data QC and analysis. NASA/TM–2001–209982. Greenbelt: Goddard Space Flight Center: 70–72.
- BAILEY S W, WERDELL P J, 2006. A multi-sensor approach for the on-orbit validation of ocean color satellite data products[J]. Remote Sensing of Environment, 102(1–2): 12–23.
- CAO ZHIGANG, DUAN HONGTAO, FENG LIAN, et al, 2017. Climate- and human-induced changes in suspended particulate matter over Lake Hongze on short and long timescales[J]. Remote Sensing of Environment, 192: 98–113.
- CHEN BINGZHANG, LIU HONGBIN, WANG ZONGLING, 2009. Trophic interactions within the microbial food web in the South China Sea revealed by size-fractionation method[J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 368: 59–66.
- CHEN JUN, WANG BAOJUN, SUN JIHONG, 2012. Scale correction of two-band ratio of red to near-infrared using imagery histogram approach: a case study on indian remote sensing satellite in yellow river estuary[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 5(2): 663–668.
- CRUMP B C, FINE L M, FORTUNATO C S, et al, 2017. Quantity and quality of particulate organic matter controls bacterial production in the Columbia River estuary[J]. Limnology and Oceanography, 62(6): 2713–2731.
- DUARTE C M, AGUSTI S, VAQUÉ D, et al, 2005. Experimental test of bacteria-phytoplankton coupling in the Southern Ocean[J]. Limnology and Oceanography, 50(6): 1844–1854.
- HE QUANJUN, CHEN CHUQUN, 2014. A new approach for atmospheric correction of MODIS imagery in turbid coastal waters: a case study for the Pearl River Estuary[J]. Remote Sensing Letters, 5(3): 249–257.
- HE XIANQIANG, PAN DELU, MAO ZHIHUA, 2004. Atmospheric correction of SeaWiFS imagery for turbid coastal and inland waters[J]. Acta Oceanologica Sinica, 23(4): 609–615.
- HU SHUIBO, CAO WENXI, WANG GUIFEN, et al, 2015. Empirical ocean color algorithm for estimating particulate organic carbon in the South China Sea[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 33(3): 764–778.
- LI W K W, HEAD E J H, GLEN HARRISON W, 2004. Macroecological limits of heterotrophic bacterial abundance in the ocean[J]. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 51(11): 1529–1540.

- LIU DONG, PAN DELU, BAI YAN, et al, 2015. Remote sensing observation of particulate organic carbon in the pearl river estuary[J]. *Remote Sensing*, 7(7): 8683–8704.
- MOBLEY C D, STRAMSKI D, 1997. Effects of microbial particles on oceanic optics: Methodology for radiative transfer modeling and example simulations[J]. *Limnology and Oceanography*, 42(3): 550–560.
- MONTES-HUGO M A, REYNOLDS R A, VERNET M, et al, 2007. Particulate beam attenuation coefficient, bacteria abundance, and production in marine nearshore waters[C] //Proceedings of SPIE 6680, coastal ocean remote sensing. San Diego: SPIE.
- PAN XIAOJU, WONG G T F, HO T-Y, et al, 2018. Remote sensing of surface [nitrite + nitrate] in river-influenced shelf-seas: the northern South China Sea shelf-sea[J]. *Remote Sensing of Environment*, 210: 1–11.
- PRIYAJA P, DWIVEDI R, SINI S, et al, 2016. Remote sensing of bacterial response to degrading phytoplankton in the Arabian Sea[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188(12): 662.
- RUDDICK K G, OVIDIO F, RIJKEBOER M, 2000. Atmospheric correction of SeaWiFS imagery for turbid coastal and inland waters[J]. *Applied Optics*, 39(6): 897–912.
- STRAMSKI D, REYNOLDS R A, KAHRU M, et al, 1999. Estimation of particulate organic carbon in the ocean from satellite remote sensing[J]. *Science*, 285(5425): 239–242.
- STRAMSKI D, BRICAUD A, MOREL A, 2001. Modeling the inherent optical properties of the ocean based on the detailed composition of the planktonic community[J]. *Applied Optics*, 40(18): 2929–2945.
- WANG MENGHUA, SHI WEI. 2007. The NIR-SWIR combined atmospheric correction approach for MODIS ocean color data processing[J]. *Optics Express*, 15(24): 15722–15733.
- WONG G T F, KU T-L, LIU HONGBIN, et al, 2015. The oceanography of the Northern south China Sea Shelf-Sea (NoSoCS) and its adjacent Waters-overview and Highlights[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 117: 3–9.
- YE HAIBIN, CHEN CHUQUN, YANG CHAOYU, 2017. Atmospheric correction of landsat-8/OLI imagery in turbid estuarine waters: a case study for the pearl river estuary[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 10(1): 252–261.
- YUAN XIANGCHENG, HE LEI, YIN KEDONG, et al, 2011. Bacterial distribution and nutrient limitation in relation to different water masses in the coastal and northwestern South China Sea in late summer[J]. *Continental Shelf Research*, 31(11): 1214–1223.
- ZHANG XIA, SHI ZHEN, LIU QINGXIA, et al, 2013. Spatial and temporal variations of picoplankton in three contrasting periods in the Pearl River Estuary, South China[J]. *Continental Shelf Research*, 56: 1–12.
- ZHOU WEIHUA, LONG AIMIN, JIANG TAO, et al, 2011. Bacterioplankton dynamics along the gradient from highly eutrophic Pearl River Estuary to oligotrophic northern South China Sea in wet season: implication for anthropogenic inputs[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 62(4): 726–733.
- ZUBKOV M V, FUCHS B M, TARRAN G A, et al, 2002. Mesoscale distribution of dominant bacterioplankton groups in the northern North Sea in early summer[J]. *Aquatic Microbial Ecology*, 29(2): 135–144.