

Remote Sensing Monitoring and Analysis of Chlorophyll-a Concentration Change in Coastal Waters of Reclamation Project

Yunfei Zhang, Yang Li

School of Architectural and Surveying & Mapping Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou Jiangxi
Email: 545392342@qq.com

Received: May 3rd, 2019; accepted: May 17th, 2019; published: May 24th, 2019

Abstract

Based on the Landsat image, a mathematical regression model of chlorophyll a concentration in the water around Phoenix Island in Sanya Bay was established to invert the concentration of chlorophyll a in the water around Phoenix Island. The influence of the construction of the second phase of Phoenix Island on the change of chlorophyll a concentration in water was analyzed from the perspective of time and space. The results showed that the concentration of chlorophyll a in the waters around Sanya Bay and Phoenix Island increased year by year. After the construction of the second phase of Phoenix Island in April 2014, the concentration of chlorophyll a in the surrounding sea area increased, and the effect gradually disappeared after the completion of reclamation. The concentration of chlorophyll a in the sea near Phoenix Island is higher than that in the far-off sea. The rate of change of chlorophyll a concentration in the nearshore water body during construction is different from that in the sea away from the artificial island. When the offshore distance is the same, the water body adjacent to Phoenix Island is farther away from Phoenix Island. The concentration of chlorophyll a is high. These phenomena reflect that some effects caused by the reclamation process of Phoenix Island will promote the rapid increase of chlorophyll a concentration in local waters, thus changing the ecological environment of coastal ocean waters to some extent.

Keywords

Phoenix Island, Chlorophyll a, Remote Sensing Inversion

围填海工程近岸水体叶绿素a浓度变化遥感监测分析

张云飞, 李 杨

摘要

基于Landsat影像, 建立三亚湾凤凰岛周围水体叶绿素a浓度数学回归模型, 反演凤凰岛周围水体叶绿素a浓度, 从时间和空间角度分析凤凰岛二期施工建设对水体叶绿素a浓度变化的影响。结果表明: 三亚湾及凤凰岛附近水域叶绿素a浓度在逐年升高; 2014年4月凤凰岛二期开始施工后, 周围海域叶绿素a浓度上升速度加快, 填海完成后这一影响会逐渐消失。靠近凤凰岛的海域比远离的海域叶绿素a浓度高, 施工建设期间近岸水体叶绿素a浓度变化速率不同于远离人工岛的海域; 离岸距离相同的情况下, 紧邻凤凰岛的水体比远离凤凰岛的叶绿素a浓度高。这些现象反映了凤凰岛填海过程造成的一些影响会促使局部水域叶绿素a浓度快速增大, 从而在一定程度上改变了近岸海洋水体生态环境。

关键词

凤凰岛, 叶绿素a, 遥感反演

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

围填海项目作为一种解决人地关系紧张的方法, 在过去几十年间极大的满足了人类发展对土地资源的大量需求[1] [2] [3]。随着沿海省市社会和经济的快速发展, 围填海项目常常被作为城市间优先开展的工程项目之一, 而离岸人工岛作为围填海主要方式之一, 也逐渐的在我国发展建设起来[4] [5] [6]。海南省四面环海, 具有旷阔的海洋资源, 为了响应“国际旅游岛”重大战略, 带动沿海城市经济发展, 海南省陆续在其环岛区域进行了一系列包括离岸人工岛在内的填海造陆工程。自2000年至2018年, 海南省共批准建设离岸人工岛项目共计12处, 计划填海总面积共计1894.86 ha。

围填海活动改变了周围水体动力条件, 造成了氮、磷和叶绿素a浓度升高[7] [8], 水体质量受到污染; 估算叶绿素a浓度能够及时的掌握水质信息, 方便我们评价人类活动和外部条件对水环境造成的影响[9]。在评估水体叶绿素a浓度研究中, 遥感技术由于其快速, 高效, 覆盖范围广等不可替代的优势, 成为如今反演水体叶绿素a浓度的优选方法。罗建美等基于环境卫星建立了滦河口北部近岸水域的叶绿素a浓度反演模型, 经验证反演效果最好的波段组合为(B3/B1)的倒数模型[10]; 陈芸芝基于半分析模型, 融合了AquaMODIS、TerraMODIS、SeaWiFS 3种传感器的波段反射率, 反演了东海近岸水体的叶绿素a浓度, 取得了较好的效果[11]; 张明慧基于MODIS时间序列数据, 采用适用于样本数较少的随即森林法和波段比值法, 结合浮标观测数据对福建近岸不同时间的水体进行了叶绿素a浓度反演[12]。

本文以凤凰岛为研究区, 主要针对凤凰岛周边的近岸水体, 开展叶绿素a浓度的遥感监测及叶绿素a浓度的时空变化分析, 对比了凤凰岛工程建设期间周围海水叶绿素a浓度变化趋势, 从而评估凤凰岛工程对周围海洋造成的生态影响。

2. 研究区概况

凤凰岛位于海南省三亚市三亚湾, 是一座通过填海造陆建起来的人工岛, 地理位置跨 $18^{\circ}13'50''\sim 18^{\circ}14'50''\text{N}$, $109^{\circ}28'20''\sim 109^{\circ}29'50''\text{E}$ (图 1) 整座凤凰岛由两期工程组成, 两期共填海面积达到 89.2 公顷(包括两岛之间的连接道路)。一期工程于 2002 年开始动工, 2004 年基本完成了填海计划; 二期工程于 2014 年开始动工, 2016 年基本完成填海工作。

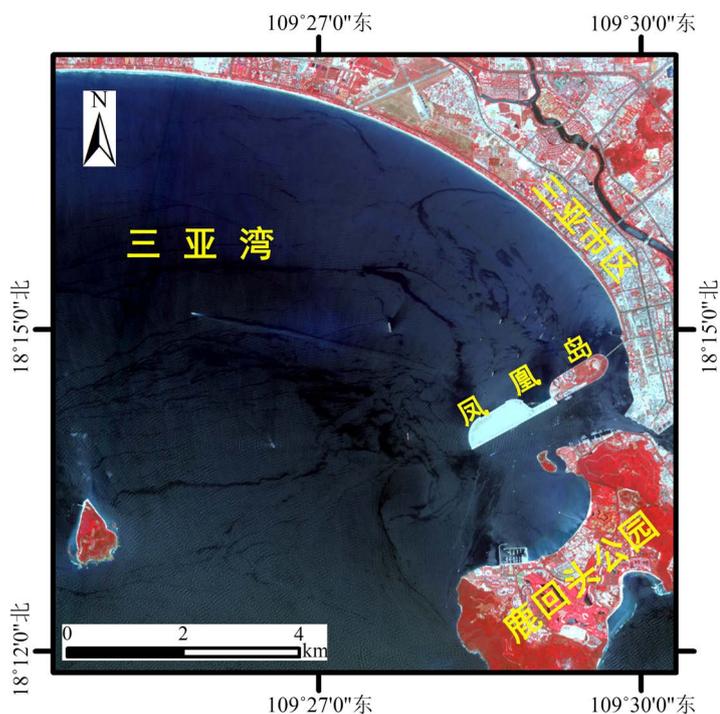


Figure 1. Overview of the study area
图 1. 研究区概况图

对于人工岛施工建设对周围水体叶绿素 a 浓度产生变化影响的范围依据《围填海项目生态评估技术指南(试行)》中对水质评估的要求, 一般以用海外缘线为起点划定, 围填海面积大于等于 5 ha 的向外扩展 15 km, 小于 5 ha 的向外扩展 8 km。由于凤凰岛填海面积都大于 5 ha, 所以本文以三亚湾海岸线向海洋方向延伸 15 km 的水体为研究对象。

3. 数据与方法

3.1. 野外测量数据

本论文使用的叶绿素 a 浓度实测数据来自于海南省海洋监测预告中心提供的水质监测报告。实测数据为 2012~2016 年每年 5 月 19 日与 8 月 23 日的采样数据, 采样点叶绿素 a 实测值如表 1 所示。采样点的分布如图 2 所示, 共 7 个采样点, 水体叶绿素 a 浓度量测方式为固定浮标采集水样, 然后在实验室使用分光光度计法对叶绿素 a 浓度进行测定。

3.2. 反演模型的建立

3.2.1. 影像选择

经过对影像研究区范围内云量、成像时间和实测数据采样时间相关联, 经过筛选本文选取 3 景时间

分别为2013年5月19日、2014年5月22日和2016年8月31日的影像来建立叶绿素 a 浓度的反演模型, 研究区内均无云覆盖, 影像成像时间和叶绿素 a 浓度实测时间相差不足 5 天, 考虑到短期内水体条件变化不大, 所选影像可以用来建立反演模型, Landsat 数据从美国地址调查局(USGS)网站下载 (<http://glovis.usgs.gov/>)。

Table 1. Chlorophyll a concentration measured data
表 1. 叶绿素 a 浓度实测数据

	北纬	东经	2012.5	2012.8	2013.5	2013.8	2014.5	2014.8	2015.5	2015.8	2016.5	2016.8
1	18°13'53"	109°28'42"	1.87	1.70	1.94	1.87	2.13	2.02	2.09	1.94	1.77	1.63
2	18°12'45"	109°27'36"	1.43	1.31	1.51	1.50	1.92	1.76	1.98	1.91	1.58	1.32
3	18°15'08"	109°27'31"	1.69	1.55	1.78	1.69	1.93	1.67	1.92	1.76	1.14	0.96
4	18°13'06"	109°26'09"	1.48	1.34	1.61	1.54	1.87	1.63	1.85	1.66	1.07	0.89
5	18°15'35"	109°24'34"	1.56	1.50	1.59	1.43	2.03	1.89	2.01	1.82	1.44	1.26
6	18°13'44"	109°24'00"	1.42	1.29	1.57	1.51	2.06	1.96	2.12	1.90	1.19	1.01
7	18°15'42"	109°21'44"	1.60	1.54	1.68	1.56	1.96	1.88	1.99	1.84	1.56	1.34

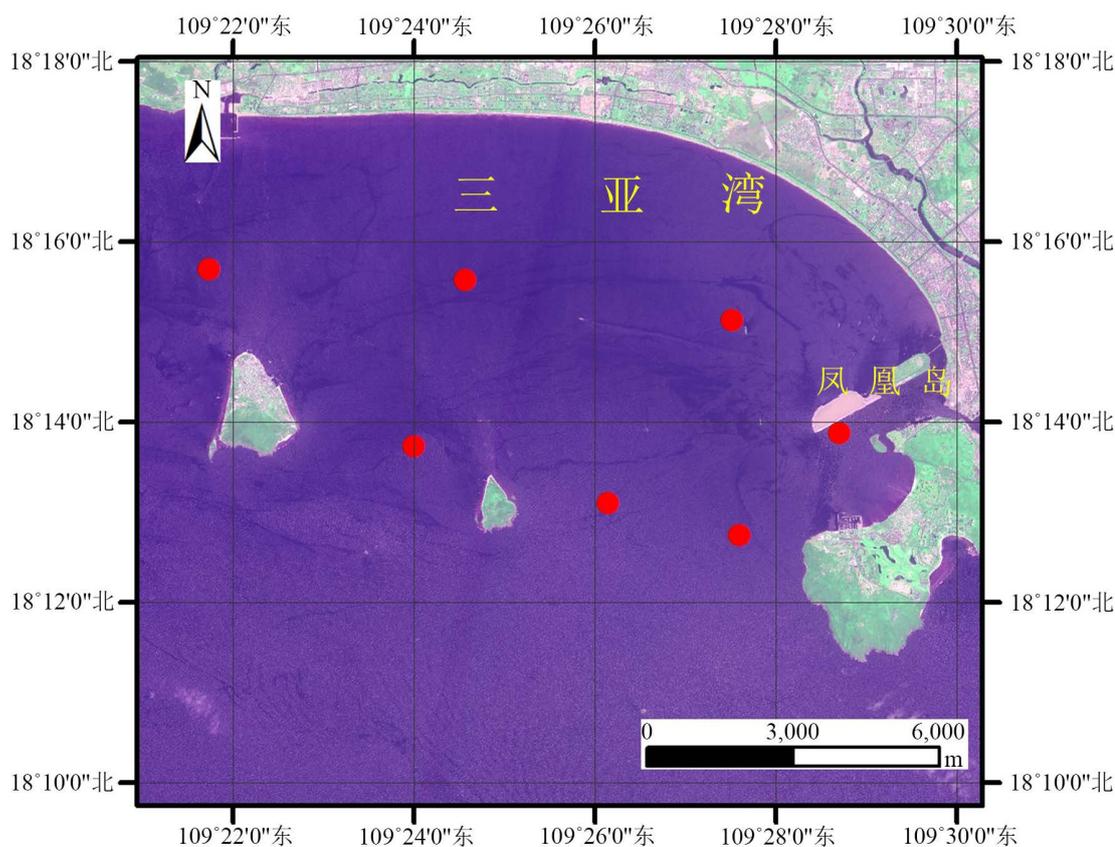


Figure 2. Distribution map of Phoenix island water sampling points
图 2. 凤凰岛水体采样点分布图

3.2.2. 敏感波段选择

蓝、绿、红和近红外波段常用来进行叶绿素 a 浓度反演[13], 文本将影像的 4 个波段的中心波长分别

命名为 B1、B2、B3、B4, 根据波段反射率对于叶绿素 a 浓度的敏感度, 本文对 Landsat 8 卫星的 4 个波段的反射率与叶绿素 a 浓度进行相关性分析及比较。发现 B2 (绿波段) 的反射率和叶绿素 a 浓度的相关性最高, 如表 2 所示。

Table 2. Correlation analysis between single-band reflectance and chlorophyll a measured value

表 2. 单波段反射率与叶绿素 a 实测值相关性分析

反射率	B1	B2	B3	B4
相关系数	0.2007	0.5039	0.3596	0.4333

对 4 个波段进行组合分析, 研究各个波段反射率比值和叶绿素 a 浓度的相关性。蓝绿波比值最早被提出作为近岸水体叶绿素 a 浓度反演的优选方法[14], 但后来逐渐被红波段和近红外段所替代[15]。但大多数使用红波近红外比值的研究中, 选取的卫星传感器数据的近红外波段大多数在 700 nm 附近, 本文选用的 Landsat 8 卫星近红外波段在 860 nm, 红波近红外比值的效果未知。通过对 Landsat 8 大气校正后的影像光谱反射率进行观察, 离岸较远水域水体在绿波处有反射峰, 在红光出有反射谷; 临近岸边水体的反射谷向近红外方向移动。对 R1/R2、R2/R4、R2/R3、R1/R4、R3/R2 五个波段比值与叶绿素 a 浓度进行相关性分析, 发现相关性最好的波段反射率比值为 R1/R2, 如表 3 所示。表 4 为归一化植被指数(NDVI) [16] 和改进的归一化水体指数(MNDWI) [17]与叶绿素 a 之间的相关性比值。

Table 3. Correlation analysis between the ratio of band reflectance and the measured value of chlorophyll a concentration

表 3. 波段反射率比值与叶绿素 a 浓度实测值相关性分析

反射率	R1/R2	R2/R4	R2/R3	R1/R4	R3/R4
相关系数	0.7887	0.1596	0.2672	0.5463	0.1302

Table 4. Correlation analysis between the combined value of band and the measured value of chlorophyll a concentration

表 4. 波段组合值与叶绿素 a 浓度实测值相关性分析

反射率	(R4 - R3)/(R4 + R3)	(R2 - R5)/(R2 + R5)
相关系数	0.2608	0.6553

3.2.3. 反演模型建立

通过上一节中单波段、波段比值相关性较好的几组来构建凤凰岛近岸水体的叶绿素 a 浓度遥感反演模型, 并比较模型间的误差大小, 最终选择相关性最好的一个模型来作为凤凰岛近岸水体叶绿素 a 浓度反演模型。反演模型的相关性如表 5 所示。

由表 5 可知, 四个敏感波段的拟合中, 波段比值(R1/R2)的各类算法拟合度较高, 尤其二次函数的决定系数最高, 为 0.6589, 最低值为 $R^2 = 0.254$ 出现在单波段算法(R2)的线性函数算法中, 每个反演模型内部中的 R2 相差不大。根据以上结果, 本文选择线性拟合效果最好的波段比值模型(R1/R2)中的二次函数模型作为凤凰岛周围水体叶绿素 a 浓度反演模型。

3.2.4. 模型精度验证

本文使用了 2013 年 5 月、2014 年 5 月和 2016 年 8 月 3 次测量共计 21 个采样点中的 15 个进行建模, 6 个用于模型精度分析。反演精度运用均方根误差 RMSE 和相对误差 RE 进行分析, 公式如下所示。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2}{n}} \quad (1)$$

Table 5. Various types of chlorophyll a inversion models
表 5. 各种类型的叶绿素 a 反演模型

算法类型	数学表达式	反演模型	R ²
单波段算法(R ₂)	一次函数	$y = 196.83x + 190.81$	R ² = 0.254
	二次函数	$y = -566.95x^2 + 1969.4x - 1117.4$	R ² = 0.484
	幂函数	$y = 355.37x^{0.709}$	R ² = 0.3829
	指数函数	$y = 243.03e^{0.4333x}$	R ² = 0.3207
	对数函数	$y = 321.92 \ln(x) + 363.48$	R ² = 0.303
波段比值(R ₁ /R ₂)	一次函数	$y = -0.358x + 1.6442$	R ² = 0.6221
	二次函数	$y = 0.2636x^2 - 1.1822x + 2.2525$	R ² = 0.6589
	幂函数	$y = 1.3212x - 0.503$	R ² = 0.6056
	指数函数	$y = 1.7994e - 0.332x$	R ² = 0.5907
	对数函数	$y = -0.547 \ln(x) + 1.3127$	R ² = 0.6475
波段比值(R ₁ /R ₄)	一次函数	$y = -1.1993x + 4.4474$	R ² = 0.2984
	二次函数	$y = 0.2037x^2 - 1.8362x + 4.9174$	R ² = 0.2994
	幂函数	$y = 3.245x - 0.673$	R ² = 0.2996
	指数函数	$y = 4.9569e - 0.45x$	R ² = 0.3009
	对数函数	$y = -1.783 \ln(x) + 3.3146$	R ² = 0.2941
波段组合(MNDWI)	一次函数	$y = -0.2664x + 0.8206$	R ² = 0.4974
	二次函数	$y = -0.0435x^2 - 0.1304x + 0.7202$	R ² = 0.4988
	幂函数	$y = 0.5791x - 1.017$	R ² = 0.4713
	指数函数	$y = 1.1178e - 0.691x$	R ² = 0.4885
	对数函数	$y = -0.392 \ln(x) + 0.5671$	R ² = 0.48

$$RE = \frac{|\hat{x}_i - x_i|}{y_i} \times 100\% \quad (2)$$

式中, n 为散点的个数, x_i 为第 i 个点的叶绿素 a 实测浓度值, \hat{x} 为第 i 个叶绿素 a 浓度的估算值。

表 6 可知, 运用蓝绿波比值反演模型反演出来的叶绿素 a 浓度大多比实测值偏小, 其中有一个点与实测数据相差较大, 可能是因为在野外水体采样过程中, 受到外界条件影响, 建立反演模型的过程需要优化, 考虑多种因素的影响与作用。

通过上述实验得到的叶绿素 a 浓度反演模型对凤凰岛工程周围水体进行反演, 获取水体叶绿素 a 浓度数据, 并对叶绿素 a 浓度进行时间、空间角度的分析。

4. 结果与分析

本文以三亚湾海岸线向海洋方向延伸 15 km 的水体为研究对象, 选取 2013 年 6 月至 2018 年 8 月间的 Landsat OLI 卫星影像进行叶绿素 a 浓度反演, 影像保证研究区内无云, 且每年在雨季和旱季各有一期。通过反演结果获取如图 3 中 0 至 15 号点水体的叶绿素 a 浓度数据, 对其叶绿素 a 浓度变化进行时空变化分析。其中 0 号点在凤凰岛二期工程附近, 7 号点位置接近 15 km 范围处, 0 至 7 号点接近等距分布。

Table 6. Accuracy analysis of chlorophyll a empirical model
表 6. 叶绿素 a 经验模型精度分析

验证点序号	实测值/mg·L ⁻¹	反演值/mg·L ⁻¹	相对误差	均方根误差(μg/L)
1	1.95	1.74	10.7%	0.196
2	1.63	1.42	12.8%	
3	2.13	1.85	13.1%	
4	0.89	1.05	17.9%	
5	1.59	1.44	9.4%	
6	1.79	1.66	7.3%	

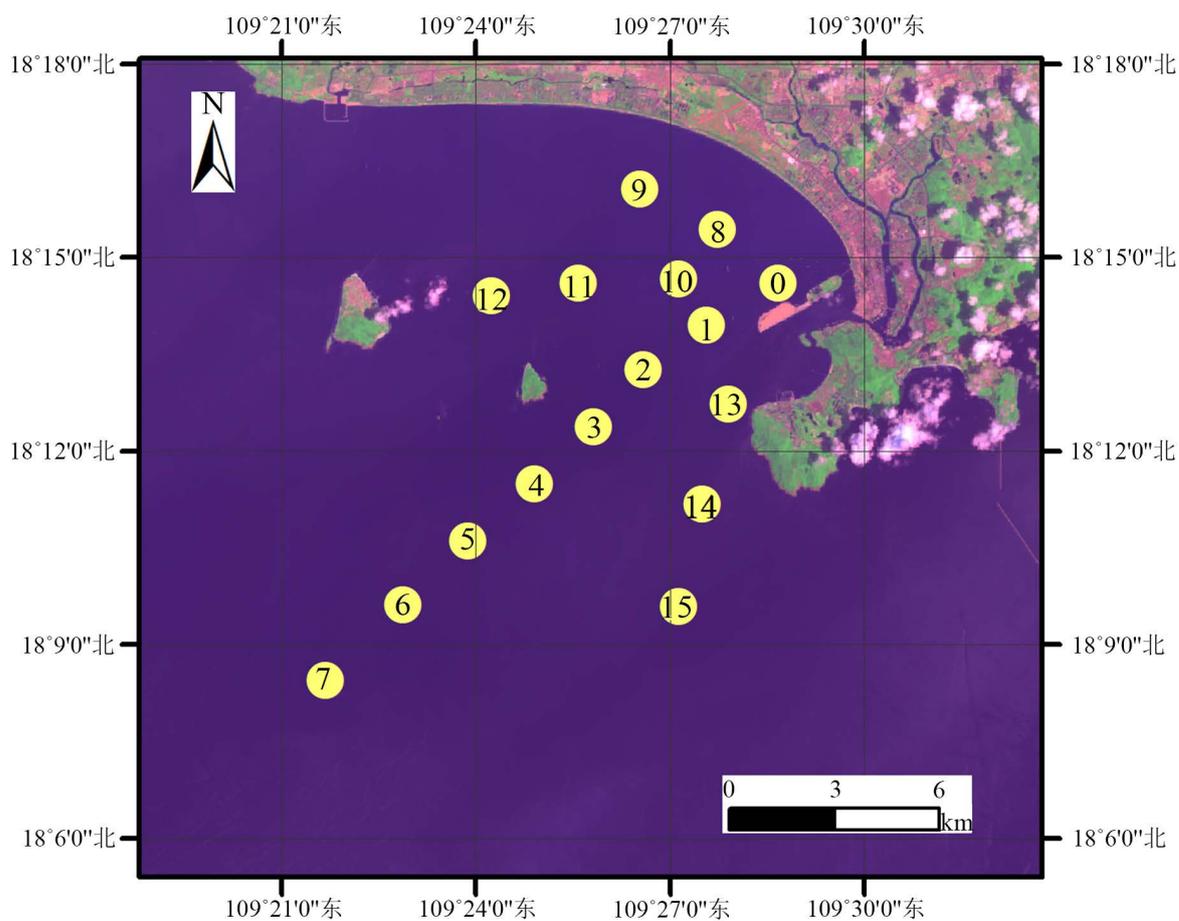


Figure 3. Phoenix island inversion point distribution map

图 3. 凤凰岛反演点位分布图

如图 4 和图 5 所示, 分别是夏季季风和冬季季风条件下凤凰岛周围 0~7 号点的叶绿素 a 浓度数据, 由图 4、图 5 可知, 无论在夏季季风和冬季季风条件下, 凤凰岛附近区域水体叶绿素 a 浓度呈现近海区浓度高, 远海区浓度低的特点, 且近海和远海的浓度随时间变化趋势相同, 导致该变化趋势产生的原因可能是南海水体叶绿素 a 浓度受南海季风条件下大洋环流的影响[18]。由图中可发现, 在夏季季风条件下, 2013 年至 2018 年水体叶绿素 a 浓度变化有一次波谷和波峰, 分别是 2015 年 9 月和 2017 年 6 月; 在冬季季风条件下, 2014 年至 2018 年期间水体叶绿素 a 浓度变化有一次波峰, 发生在 2015 年 12 月, 且波峰之前远

海区的叶绿素 a 浓度持续增加, 波峰后远海区的叶绿素 a 浓度持续减小。两种类型季风条件下发生的 3 次叶绿素 a 浓度变化中可以显而易见的是, 每次变化的时候, 靠近人工岛的点叶绿素 a 浓度变化速率小于远海区域, 结合凤凰岛人工岛施工的时间, 这 3 次变化幅度有明显区别的时间均处于凤凰岛二期工程施工期间。

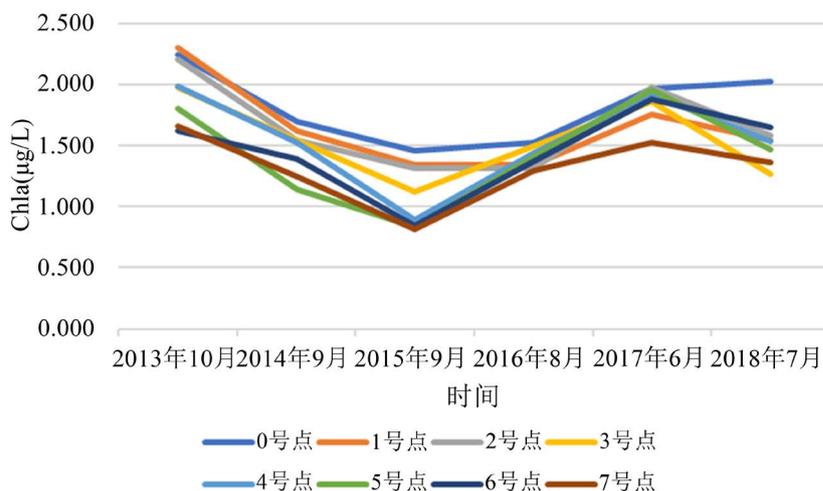


Figure 4. Changes of chlorophyll a concentration in summer monsoon at 0 - 7 Phoenix island

图 4. 凤凰岛 0~7 号点夏季季风叶绿素 a 浓度变化

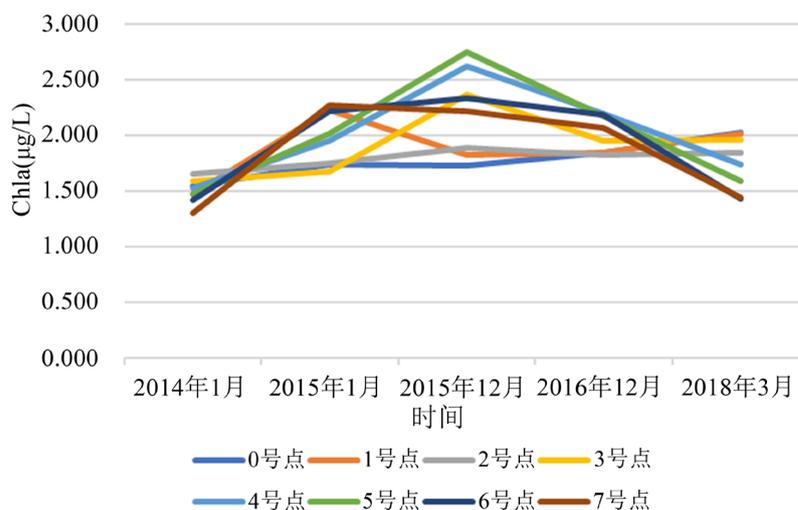


Figure 5. Changes of chlorophyll a concentration in winter monsoon at 0 - 7 Phoenix island

图 5. 凤凰岛 0~7 号点冬季季风叶绿素 a 浓度变化

由本文前面内容对人工岛施工进度的监测中可知, 2015 年 3 月高分影像显示, 凤凰岛 1 期和 2 期工程之间的连接区域已经完成填海, 证明凤凰岛 2 期工程的开工是在此月份之前; 2015 年 1 月近岸区域叶绿素 a 浓度趋势小于远海区可能与人工岛开工有关, 施工船作业加剧了水体扰动, 造成浅海区底泥氮磷盐溶解于水, 此时局部区域叶绿素 a 浓度升高, 从而削弱了大洋环流给近海区域叶绿素 a 浓度变化带来的影响, 这与[19]的结论具有一致性。2016 年 12 月之后, 远海区和近海区的叶绿素 a 浓度都维持在相对较为稳定的水平, 文章前面内容可知在 2016 年 10 月凤凰岛 2 期工程已经完成了全部的填海任务, 工程结束, 对周围水体的影响也降到最低, 证明人为活动对水体叶绿素 a 浓度会造成一定影响, 与赵辉等对

南海叶绿素 a 受季节变化影响[20]的结论一致。2015 年 12 月凤凰岛二期工程已经开工一年多, 此时远海区叶绿素 a 浓度达到波峰最高值, 相较 2014 年存在较大幅度升高, 但是近海区还维持在相对较稳定的水平, 结合此时的季风条件, 发生这种情况的原因可能是在东北季风的影响下, 近海区域水体中溶解的底泥氮、磷随水流流向远海区, 造成该区域的叶绿素 a 浓度升高, 这与古园园等对南海西部夏季叶绿素 a 浓度高值带的年际变化研究中结论相同[21]。

图 6 为凤凰岛周围 2、8 和 9 号点自人工岛施工建设之前到施工结束后夏季和冬季的叶绿素 a 浓度数据。由图 3 可知, 8、9 号点距离岸边长度相近, 8 号点距离凤凰岛更近, 2、9 号点距离凤凰岛长度相近, 9 号点离岸距离较近。从上述 3 点的年度的叶绿素 a 浓度变化规律可知, 8、9 两处叶绿素 a 浓度相差不大, 并且变化趋势相同。在 2014 年 10 月之前, 统计数据显示 9 号点位置的叶绿素 a 浓度略高于 8 号点 2014 年 10 月之后的数据显示, 8 号点的叶绿素 a 浓度则一直略高于 9 号点, 上述情况产生的原因可能是在 2014 年 10 月之前, 凤凰岛 2 期工程还未开工, 叶绿素 a 浓度主要受到大洋叶绿素 a 浓度变化影响, 9 号点相对 8 号点位置离岸距离较近, 叶绿素 a 浓度相对较大; 当凤凰岛 2 期工程开工后, 由于 8 号点距离凤凰岛较近, 受到建岛施工期间人为因素的影响, 叶绿素 a 浓度相比远离凤凰岛的 9 号偏大一点。2 号点有还位于凤凰岛工程施工影响范围内, 叶绿素 a 浓度变化趋势和 8 号点相似, 又由于其离岸较远, 叶绿素 a 浓度低于离岸距离较近的 8、9 号点。

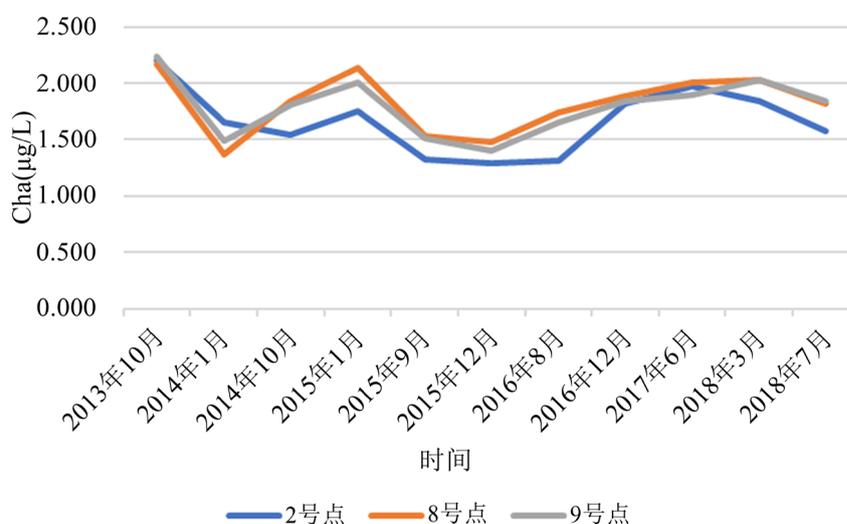


Figure 6. Changes in chlorophyll a concentration at points 2, 8, and 9 of Phoenix island
图 6. 凤凰岛 2、8、9 号点叶绿素 a 浓度变化

5. 总结

本文以凤凰岛为研究区, 以生态水环境的监测指标叶绿素 a 浓度为研究对象, 利用 Landsat 8 OLI 影像数据、实测叶绿素 a 浓度数据, 构建反演模型, 进行叶绿素 a 浓度反演, 以及模型的运用和评价, 对叶绿素 a 浓度的变化进行时间上、空间上多角度讨论, 初步分析凤凰岛对近海岸带水体造成的影响结果, 现得出以下几点结论:

- 1) 空间分布上, 凤凰岛近岸呈现了远离人工岛的海域叶绿素 a 浓度相较邻近人工岛海域低的特征。
- 2) 在凤凰岛二期工程未开始施工之前, 附近水体和远离人工岛的水体叶绿素 a 浓度变化趋势一致; 在人工岛工程施工期间, 出现了近海区域水体叶绿素 a 浓度升高的情况, 但是这一影响范围有限, 远离人工岛的水域叶绿素 a 浓度变化还是主要受到大洋水体的影响; 在工程施工结束后, 人工岛附近水体的

叶绿素 a 的浓度变化会恢复到和远海区相同的变化状况, 工程带来的影响会逐渐消失, 因此围填海对水体叶绿素 a 浓度变化带来的影响是暂时的且影响范围有限的。

3) 对于凤凰岛周围水体出现的冬季季风条件下水域叶绿素 a 浓度高于夏季季风时的情况, 非人工岛施工造成的, 而是跟南海整体水体叶绿素 a 的值得季节变换有关, 夏季南海的高温不适合海藻类植物生长, 冬季温和的阳光条件促进海藻生长, 导致水体叶绿素 a 浓度升高。

通过对凤凰岛周围水体叶绿素 a 浓度的分析可知人工岛的围填海和建设过程会对周围水体的生态环境带来一些影响, 导致水体叶绿素 a 浓度升高, 由于近海水体和大洋水体的交换能力, 以及大洋水体自身对叶绿素 a 浓度的稀释能力, 相关部门应着重对施工期间近海水域的水质进行监测并制定环保措施。

参考文献

- [1] 范小杉, 何萍, 董敬儒. 基于项目可持续发展规划的海岸带生态承载力评价研究进展[J]. 地球科学进展, 2017, 32(1): 90-100.
- [2] 高志强, 刘向阳, 宁吉才, 等. 基于遥感的近 30a 中国海岸线和围填海面积变化及成因分析[J]. 农业工程学报, 2014, 30(12): 140-147.
- [3] 蔡权德. 基于平面点格拓扑结构的大连市围填海与城市空间关系研究[J]. 海洋环境科学, 2014, 33(3): 459-465.
- [4] 苗钰婷. 围海造陆的发展现状及未来发展趋势分析[J]. 科技创新与应用, 2017(21): 184-185.
- [5] 安国强. 基于多源数据的山东省围填海造地特点及发展趋势研究[J]. 海洋开发与管理, 2018, 35(3): 15-20.
- [6] 殷岳, 梅深. “海上人工岛建设关键技术研究”总体达国际先进水平[J]. 水道港口, 2014(3): 202.
- [7] 李文杰, 沈永明. 长江口北支中束窄工程对周边水动力及水质的影响[J]. 水运工程, 2017(12): 42-50.
- [8] 曹迪凡. 南汇东滩促淤圈围工程对周围水环境影响的数值模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2017.
- [9] Tang, D.L., Ni, I.H., Müller-Karger, F.E., *et al.* (1998) Analysis of Annual and Spatial Patterns of CZCS-Derived Pigment Concentration on the Continental Shelf of China. *Continental Shelf Research*, **18**, 1493-1515. [https://doi.org/10.1016/S0278-4343\(98\)00039-9](https://doi.org/10.1016/S0278-4343(98)00039-9)
- [10] 罗建美, 霍伟伟, 韩晓庆. 基于 HJ 卫星的近岸 II 类水体叶绿素 a 浓度定量遥感反演研究——以滦河口北部海域为例[J]. 海洋学报, 2017, 39(39): 129.
- [11] 陈芸芝, 郑高强, 汪小钦, 等. 基于 GSM01 融合的多传感器数据叶绿素 a 浓度反演[J]. 地球信息科学学报, 2013, 15(6): 911-917.
- [12] 张明慧, 苏华, 季博文. MODIS 时序影像的福建近岸叶绿素 a 浓度反演[J]. 环境科学学报, 2018, 38(12): 270-278.
- [13] 李莉, 尹球, 巩彩兰, 等. 太湖不同叶绿素 a 浓度水体荧光特征分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(1): 136-140.
- [14] Gitelson, A.A. (1993) Nature of the Peak near 700 nm on the Radiance Spectra and Its Application for Remote Estimation of Phytoplankton Pigments in Inland Waters. *Proceedings of SPIE—The International Society for Optical Engineering*, **1971**, 170-179. <https://doi.org/10.1117/12.150992>
- [15] Gitelson, A.A., Gritz, Y. and Merzlyak, M.N. (2003) Relationships between Leaf Chlorophyll Content and Spectral Reflectance and Algorithms for Non-Destructive Chlorophyll Assessment in Higher Plant Leaves. *Journal of Plant Physiology*, **160**, 271-282. <https://doi.org/10.1078/0176-1617-00887>
- [16] 张瑶, 郑立华, 孙红, 等. 基于二维相关光谱的水体叶绿素含量探测[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(2): 389-393.
- [17] 徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究[J]. 遥感学报, 2005, 9(5): 79-85.
- [18] 陈楚群, 施平, 庆文. 南海海域叶绿素浓度分布特征的卫星遥感分析[J]. 热带海洋学报, 2001, 20(2): 66-70.
- [19] 赵辉, 齐义泉, 王东晓, 等. 南海叶绿素浓度季节变化及空间分布特征研究[J]. 海洋学报(中文版), 2005, 27(4): 45-52.
- [20] 古园园, 王静, 储小青, 等. 夏季南海西部叶绿素浓度高值带的年际变化[J]. 海洋学报, 2017, 39(6): 1-9.
- [21] 林丽茹, 赵辉. 南海海域浮游植物叶绿素与海表温度季节变化特征分析[J]. 海洋学研究, 2012, 30(4): 46-54.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2330-1724，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：ojns@hanspub.org