

翁清鹏,秦泉,李峰,等.全球海洋叶绿素 a 浓度时空演变及其与气候变化因子的相关分析[J].海洋气象学报,2025,45(2): 118-126.

WENG Qingpeng, QIN Quan, LI Feng, et al. Spatiotemporal variability of global ocean Chlorophyll-a concentration and its correlation with climate change factors[J]. Journal of Marine Meteorology, 2025, 45(2): 118-126. DOI: 10.19513/j.cnki.hyqxxb.20240526001. (in Chinese)

全球海洋叶绿素 a 浓度时空演变及其与气候变化因子的相关分析

翁清鹏¹, 秦泉^{2,3}, 李峰^{2,3}, 冯冬含^{2,3}, 韩东枫^{2,3}, 王晗^{2,3}, 卢辰⁴, 刘峻成⁴

(1. 华设设计集团股份有限公司, 江苏 南京 210014; 2. 山东省气象防灾减灾重点实验室, 山东 济南 250031; 3. 山东省气候中心, 山东 济南 250031; 4. 南京信息工程大学海洋科学学院, 江苏 南京 210044)

摘要 叶绿素 a (Chlorophyll-a, Chl-a) 浓度可以表征海洋浮游植物生物量, 反映海洋生物的丰富度和多样性。卫星遥感技术在监测全球大尺度海洋 Chl-a 浓度时空分布方面展现出显著优势。基于 2003—2022 年 MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) Chl-a 浓度数据, 调查分析全球大尺度海洋 Chl-a 浓度时空分布特征与变化趋势, 进而分析其与全球海面温度 (sea surface temperature, SST)、厄尔尼诺-南方涛动 (El Niño-Southern Oscillation, ENSO) 和印度洋偶极子 (Indian Ocean Dipole, IOD) 的相关关系。结果表明: (1) 空间上, 沿岸海域 Chl-a 浓度普遍高于离岸海域, 远洋海域最低 (小于 $0.03 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$)。时间上, Chl-a 浓度呈明显的季节变化。相比近海水体, 远洋 Chl-a 浓度季节变化不明显。(2) 太平洋、印度洋、大西洋的远洋海域 Chl-a 浓度总体趋势变化较小。绝大多数近岸海域的 Chl-a 浓度呈增长趋势。(3) 全球海洋水体 Chl-a 浓度最高的月份大致沿纬度方向呈现带状分布。(4) 整体而言, Chl-a 浓度与 SST 在 $40^{\circ}\text{S} \sim 40^{\circ}\text{N}$ 海域呈显著负相关关系 ($p < 0.05$), 高纬度海域主要呈正相关。Chl-a 浓度与 ENSO 和 IOD 之间的相关关系也呈现明显的季节性海域差异, 表明 ENSO 和 IOD 对不同海域 Chl-a 浓度变化的影响不同。

关键词 全球海域; Chl-a 浓度; MODIS; ENSO; 时空变化

中图分类号: P714; P735 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2025)02-0118-09

DOI: 10.19513/j.cnki.hyqxxb.20240526001

Spatiotemporal variability of global ocean Chlorophyll-a concentration and its correlation with climate change factors

WENG Qingpeng¹, QIN Quan^{2,3}, LI Feng^{2,3}, FENG Donghan^{2,3}, HAN Dongfeng^{2,3},
WANG Han^{2,3}, LU Chen⁴, LIU Juncheng⁴

(1. China Design Group Co., Ltd., Nanjing 210014, China; 2. Key Laboratory for Meteorological Disaster Prevention and Mitigation of Shandong, Jinan 250031, China; 3. Shandong Climate Center, Jinan 250031, China; 4. School of Marine Sciences, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract Chlorophyll-a (Chl-a) concentration serves as a crucial indicator of marine phytoplankton biomass, reflecting the richness and diversity of marine ecosystems. Satellite remote sensing technology offers significant advantages in monitoring the spatiotemporal distribution of large-scale Chl-a

收稿日期: 2024-05-26; 修回日期: 2024-08-01

基金项目: 华东区域气象科技协同创新基金合作项目 (QYHZ202307); 山东省气象局科研项目 (2022sdqxm01)

第一作者: 翁清鹏, w422463242@163.com。

通信作者: 秦泉, qqan0303@163.com。

concentrations across global ocean waters. Using MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) Chl-a concentration data from 2003 to 2022, this study analyzes the spatiotemporal variability and trends of the Chl-a concentrations in global oceans, and their relationships with the global sea surface temperature (SST), El Niño-Southern Oscillation (ENSO) and the Indian Ocean Dipole (IOD) are examined. The results are outlined below. (1) Spatially, the Chl-a concentrations in coastal waters are generally higher than those in offshore waters, with the lowest concentrations observed in pelagic waters (less than $0.03 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$). Seasonally, Chl-a concentrations exhibit significant variations, with nearshore waters showing more pronounced seasonal changes than pelagic waters. (2) In the open waters of the Pacific, Indian and Atlantic oceans, the trend of the Chl-a concentrations remains mildly changes. However, Chl-a concentrations show an increasing trend in the majority of nearshore waters. (3) The months with the highest Chl-a concentrations across global ocean waters vary in a band-like pattern with latitude. (4) Generally, the Chl-a concentrations exhibit significant negative correlations with SST ($p < 0.05$) between 40°S and 40°N , while positive correlations are observed in other latitudes. The correlations between Chl-a concentrations and ENSO/IOD also display significant seasonal variations, indicating that ENSO and IOD have different impacts on the variations of Chl-a concentrations in different sea regions.

Keywords global ocean; Chl-a concentration; MODIS; ENSO; spatiotemporal variability

0 引言

叶绿素 a (Chlorophyll-a, Chl-a) 浓度常用于表征海洋浮游植物生物量,反映海洋生物的丰富度和多样性,并产生约 50% 地球初级生产力^[1-3]。Chl-a 浓度的分布特征可客观反映海域浮游植物的生长状况及其对气候变化的响应^[4]。海洋 Chl-a 浓度是监测海洋水质和探测海洋渔场的重要指数,其时空特征包含海区基本的生态信息,与海区的温度、盐度、光照强度以及风潮流等环境因素密切相关^[5]。此外,Chl-a 浓度分布可能与环境因素和气候变化有关,如风、温度、盐度、营养水平^[6]。因此,掌握海洋 Chl-a 浓度的时空演变及其气候环境变化关系,有助于提高对海洋生态系统及其气候变化关系理解。

相比于航次调查数据,卫星遥感数据可提供大面积、周期性观测资料,为海洋 Chl-a 浓度动态监测提供了极大便利。目前,常用 Chl-a 浓度产品有 MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) 遥感产品、SeaWiFS (Sea-viewing Wide Field of View Sensor) 遥感产品等。Chl-a 浓度遥感反演算法主要分为半经验方法、经验方法和分析方法 3 类。其中,经验方法利用 Chl-a 浓度和敏感波段的遥感反射信号之间的统计关系,应用最为广泛^[7]。自 1978 年海岸带水色扫描仪 (coastal zone color scanner, CZCS) 问世运行以来,海洋水色遥感技术和相关算法迅速

发展,以“波段比值”作为基础的经验算法得到飞速发展。目前对于海洋 Chl-a 浓度时空演变规律的研究,已有研究大多数聚焦于局部海域。基于 2002—2018 年 Aqua-MODIS Chl-a 浓度数据,田洪阵等^[8]对黄海 Chl-a 浓度的时空变化进行研究。江杉等^[9]则基于 2004—2018 年 MODIS Chl-a 浓度,对东海 Chl-a 浓度开展时空分析研究。赵辉等^[10]以 SeaWiFS Chl-a 浓度资料为基础,分析了南海 Chl-a 浓度多年平均的时空分布,进而得出其时空分布特征与流场、风场、陆源物质的输入和相关气候变化等有关。Joy-Warren^[11]在时间和空间尺度上研究南大洋 Chl-a 浓度演变。Kilpatrick 等^[12]则利用卫星观测资料得出南加州湾的 Chl-a 浓度特异变化受当地测深影响和临近海岸线弯曲地形的共同作用。

除了 Chl-a 浓度时空演变外,学者开展了局部海域 Chl-a 浓度时空演变与气候变化之间的关系。例如,Anilkumar 等^[13]详细研究了南大洋印度洋海域锋面、淡水输入和 Chl-a 浓度变化。Lopes 等^[14]则进一步探讨了当前气候和未来气候情景上升流事件期间伊比利亚半岛近沿海 Chl-a 浓度变化。李和阳等^[15]通过对历史文献及数据资料分析,初步建立了西太平洋 Chl-a 浓度对气候变化响应概念模型,探讨 Chl-a 浓度、海面温度 (sea surface temperature, SST) 及营养盐如何响应长期气候变化。此外,部分学者针对全球大尺度海域开展了 Chl-a 浓度遥感研

究。陈小燕^[16]提出了基于遥感的长时间序列 Chl-a 浓度的多尺度变化研究,通过对 Chl-a 浓度的季节、年际和趋势变化分析及对浮游植物藻华发生时间的季节和年际变化分析,深入分析不同尺度强迫[短时间尺度事件台风、涡旋等以及气候事件厄尔尼诺-南方涛动(El Niño-Southern Oscillation, ENSO)、印度洋偶极子(Indian Ocean Dipole, IOD)等]对 Chl-a 浓度的影响机制。Hammond 等^[17]通过拟合贝叶斯分层时空模型来量化 1997—2013 年 2—3 月海洋 Chl-a 浓度变化趋势。

综上所述,已有研究大多数侧重于局部海域的 Chl-a 浓度时空变化研究,而针对全球大尺度海洋 Chl-a 浓度时空特征及其与气候变化关系研究相对较少。为此,基于长时序(2003—2022 年)MODIS Chl-a 浓度遥感产品数据集,此文深入分析全球大尺度海域的 Chl-a 浓度时空演变规律及其变化趋势。结合多种气候变化因子(如 SST、ENSO、IOD 等),探讨全球海洋 Chl-a 浓度变化与气候变化的关系,以期提高对全球海洋生态系统与环境变化及其对气候变化响应的理解。

1 研究数据和研究方法

1.1 研究数据

1.1.1 MODIS Chl-a 浓度和 SST 产品

选取 Aqua-MODIS Chl-a 浓度官网产品开展研究,使用的 Chl-a 浓度产品为月尺度,空间分辨率为 9 km,时间跨度为 2003 年 1 月—2022 年 12 月,来源于美国航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA) Ocean Color 网站(<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>)。中分辨率成像光谱仪 MODIS 是由 NASA 在地球观测卫星 Terra(轨道高度为 705 km,当地时间 10:30 过境,降轨)和 Aqua(轨道高度为 705 km,当地时间 13:30 过境,升轨)上使用的传感器。MODIS 传感器共有 36 个波段,光谱范围从可见光(0.4 μm)到热红外(14.4 μm),并在全光谱范围内实现动态监测地表温度、海洋水色和大气成分特性(如气溶胶、水汽、大气温度和臭氧)等,在大气、陆地和海洋的物理、化学、生物学等领域中被广泛应用。

为了研究全球大尺度海洋 Chl-a 浓度与 SST 的季节性变化关系,从 NASA Ocean Color 网站下载

SST 月产品数据,空间分辨率为 9 km,时间跨度为 2003 年 1 月—2022 年 12 月。

1.1.2 ENSO 和 IOD 气候变化因子

Niño3.4 指数是判断厄尔尼诺和拉尼娜现象的主要指标之一,反映太平洋赤道中东部的 SST 变化情况,也称为中东部厄尔尼诺区,即 $5^{\circ}\text{S} \sim 5^{\circ}\text{N}$ 和 $170^{\circ} \sim 120^{\circ}\text{W}$ 区域^[18-19]。Niño3.4 指数获取来源为美国国家海洋和大气管理局官网(<https://psl.noaa.gov/data/correlation/nina34.data>)。Niño3.4 指数的计算方法具体为将该区域内每个月的 SST 平均值与 1961—1990 年的月平均值相比较,如果平均值高于该时间段的平均值 0.5°C 或更多,则被认为是厄尔尼诺事件;如果平均温度低于平均值 0.5°C 或更多,则被认为是拉尼娜事件^[20]。

IOD 是指印度洋南部和印度洋东部的 SST、气压和风速等要素的周期性变化,即热带印度洋固有的海洋-大气耦合气候现象^[21]。IOD 变动会影响印度洋周围国家的气候,是降雨变化的重要因素之一^[22],并且 IOD 存在显著的季节位相锁定的特征,通常在夏季开始发展,秋季达到峰值,并在冬季迅速衰减。IOD 指数由印度洋东西 2 个区域的海面温差决定,其中西极在西印度洋的阿拉伯海($10^{\circ}\text{S} \sim 10^{\circ}\text{N}$, $50^{\circ} \sim 70^{\circ}\text{E}$),东极在印度尼西亚南部东印度洋($10^{\circ}\text{S} \sim 0^{\circ}$, $90^{\circ} \sim 110^{\circ}\text{E}$)^[23]。

1.2 研究方法

1.2.1 Chl-a 浓度的时空产品获取

为了获取不同时间尺度的 Chl-a 浓度产品,基于 2003—2022 年 20 年的 MODIS Chl-a 浓度月产品,采用均值合成法得到全球 Chl-a 浓度的月尺度和季节尺度平均结果。需要说明的是,MODIS Chl-a 浓度月产品数据会存在无效像元,故采用均值合成法生成不同时间尺度的 Chl-a 浓度均值时,如果所有有效像元数量低于全部数据数量的 30%(即小于 $240 \times 30\% = 72$),则相应像元的 Chl-a 浓度均值结果设置为空值。文中将 3—5 月记为北半球春季,6—8 月记为北半球夏季,9—11 月记为北半球秋季,12 月—次年 2 月记为北半球冬季。

1.2.2 Chl-a 浓度变化趋势计算

由于 Chl-a 浓度具有明显的季节变动,采用 Chl-a 浓度距平值分析其变化趋势。Chl-a 浓度距平值是表示某一时刻的 Chl-a 浓度与多年同一时刻平均值的

差值,其计算方式见公式(1)。在 Chl-a 浓度距平数据获取的基础上,采用 Theil-Sen Median 方法(又称为 Sen 斜率估计)计算 2003—2022 年 Chl-a 浓度变化趋势,并采用双边趋势 Mann-Kendall 检验。Theil-Sen Median 方法是一种稳健的非参数统计的趋势计算方法,对于测量误差和利群数据不敏感,适用于长时序数据的趋势分析。对于待测点,所有有效像元数量大于 120 个(240×50%)以上才得到斜率,否则该像元的变化趋势设置为空值。同时,将趋势分析未通过 90% 置信度检验的像元设置为空值。

$$\rho'_{\text{Chl-a}_{i,j}} = \rho_{\text{Chl-a}_{i,j}} - \bar{\rho}_{\text{Chl-a}_j} \quad (1)$$

其中: $\rho'_{\text{Chl-a}_{i,j}}$ 为某一时刻的 Chl-a 浓度距平, $\rho_{\text{Chl-a}_{i,j}}$ 为某一时刻的 Chl-a 浓度, $\bar{\rho}_{\text{Chl-a}_j}$ 为多年同一时刻的 Chl-a 浓度均值,单位为 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$; i 表示年份; j 表示月份。

1.2.3 相关性分析

为了探讨 Chl-a 浓度与 SST、Niño3.4 指数、IOD 指数之间的相关性,文中使用 Pearson 相关系数(r)来衡量相关程度。如果两个变量的相关系数大于零,表示两者呈正相关;如果相关系数小于零,则表示两者呈负相关;只有两者相关系数的置信区间大于 95%(即显著性水平 $p < 0.05$)才认为具有相关性。

2 研究结果

2.1 全球大尺度海洋 Chl-a 浓度时空分布特征

2.1.1 空间分布特征

基于近 20 年(2003—2022 年)MODIS Chl-a 浓度月产品,获取全球大尺度海洋 Chl-a 浓度空间特征分布,如图 1 所示。整体而言,高纬度(南北纬 40°之外,下同)区域的 Chl-a 浓度大多高于低纬度(南北纬 40°之间,下同)区域。此外,近岸海域 Chl-a 浓度普遍高于远洋海域。例如,太平洋近海海域 Chl-a 浓度(大部分为 $0.30 \sim 6.00 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$)大于远洋海域 Chl-a 浓度(小于 $0.30 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$),这与钱宏林等^[24]依据中美热带海洋和全球大气研究(Tropical Ocean and Global Atmosphere, TOGA)计划得出的 Chl-a 浓度空间分布相符。亚欧大陆沿北冰洋海域的 Chl-a 浓度整体偏大,部分甚至达到 $10.00 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 左右。此外,北半球沿岸海域的 Chl-a 浓度总体略高于南半球沿岸海域。

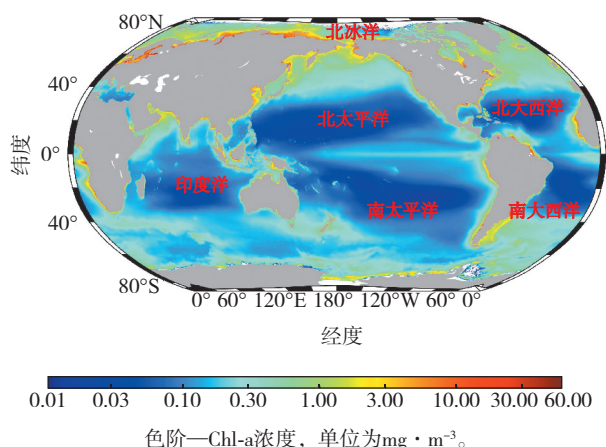


图 1 2003—2022 年全球海洋 Chl-a 浓度的空间分布

Fig.1 Spatial distribution of global ocean Chl-a concentrations from 2003 to 2022

2.1.2 季节尺度分布特征

文中采用均值合成法得到全球海域的 Chl-a 浓度季节平均值,以分析全球大尺度海洋 Chl-a 浓度在季节尺度上的变化规律,如图 2 所示。在北半球春季(3—5 月),低纬度海域的 Chl-a 浓度普遍偏低,大多维持在 $0.01 \sim 0.30 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ (除南美洲西侧的赤道外);高纬度海域的 Chl-a 浓度则维持在 $0.30 \sim 1.00 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。近海区域的 Chl-a 浓度普遍大于远洋区域,尤其是波罗的海等海域达到春季最大值,与 Fleming-Lehtinen 等^[25]对波罗的海 Chl-a 浓度的长期考察相符合。相比于春季(3—5 月),北半球夏季(6—8 月)的近海 Chl-a 浓度增大,部分区域超过 $4.00 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。这是由于近海光照和温度适宜,同时夏季入海河流排放增加,携带了较多营养盐,促进近海浮游植物生长^[26]。此外,亚欧大陆紧邻北冰洋沿海区域的 Chl-a 浓度则明显偏高。远洋区域的浮游植物因受到营养盐贫瘠限制,Chl-a 浓度变化不大。在北半球秋季(9—11 月),全球 Chl-a 浓度在夏季的基础上持续上升,更多近海区域的 Chl-a 浓度出现秋季暴发现象,但存在南印度洋等海域的 Chl-a 浓度逐渐下降的变化趋势。在北半球冬季(12 月—次年 2 月),全球海洋 Chl-a 浓度呈现较低值,尤其是在低纬度大洋海域,Chl-a 浓度小于 $0.30 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。需要注意的是,相比于北半球秋季(9—11 月),40°S 以南海域的 Chl-a 浓度出现增加现象。整体而言,Chl-a 浓度均呈现出近岸海域较高,远岸海域较低,并有较明显的季节性变化趋势,夏季升高,冬季降低。

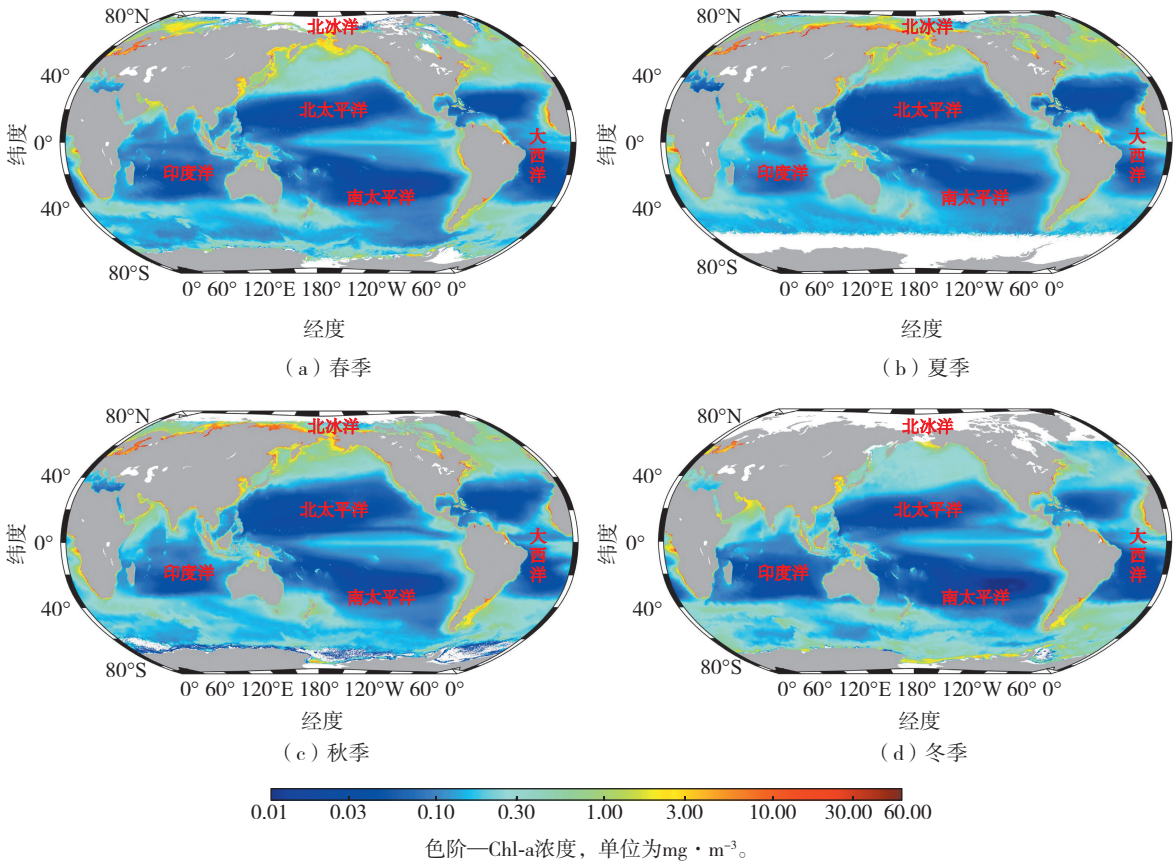


图 2 2003—2022 年全球海洋 Chl-a 浓度季节分布
Fig.2 Seasonal distribution of global ocean Chl-a concentrations from 2003 to 2022

2.2 Chl-a 浓度最大月空间分布

在全球月平均 Chl-a 浓度的时空分布基础上, 对每个像元点上 12 个月的月平均值进行比较, 得出月平均最大值的所属月份(图 3)。整体而言, 全球海域月平均 Chl-a 浓度最大值所属月份大致呈现出同一纬度月份相同的纬向条带分布, 且随纬度增加月份增加。在北半球随纬度上升, 月份从 1 月递增到 5 月; 在南半球随纬度上升, 月份从 6 月递增到 12 月。其中, 在北太平洋和北大西洋海域月平均最大值出现的月份主要集中在 1 月和 2 月。在 40°N 左右, Chl-a 浓度月平均最大值出现的月份主要集中在 4 月, 且随着纬度升高, 月份也逐渐递增至 7 月和 8 月。在南太平洋、南大西洋和印度洋海域, 月平均最大值出现的月份则主要集中在 7 月和 8 月, 并且随着纬度升高, Chl-a 浓度月平均最大值出现的月份也递增到 11 月和 12 月等。印度洋 Chl-a 浓度最大值出现的月份与洪丽莎等^[27]在 2011 年 1 月通过中国“大洋一号”科考船对印度洋进行的环境综合调查结论一致。

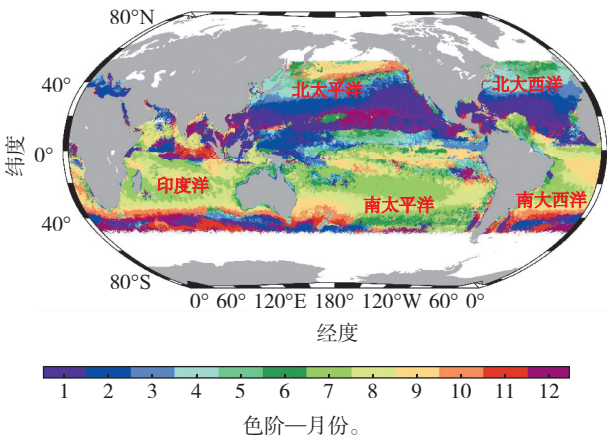


图 3 全球 Chl-a 浓度最大值出现月份的空间分布
Fig.3 Spatial distribution of the months with the highest Chl-a concentrations in global oceans

2.3 全球海洋 Chl-a 浓度长期变化趋势

为了分析近 20 年全球海洋 Chl-a 浓度变化趋势, 首先计算得到近 20 年月尺度 Chl-a 浓度距平, 进而获取全球海洋 Chl-a 浓度变化趋势(图 4)。需要说明的是, 图 4 仅展示了通过 90%置信度检验的 Chl-a 浓度

趋势,未通过置信度检验或无数据像元设置为白色显示。太平洋、印度洋、大西洋远洋海域 Chl-a 浓度的变化总体较小(变化速率约低于 $1.5 \times 10^{-3} \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{a}^{-1}$)。绝大多数近岸海域的 Chl-a 浓度呈增长趋势,特别在日本北部和东北部海域(图4中区域1)、南美洲北部和东南部海域(图4中区域2和区域3),其增长速率为 $6.0 \times 10^{-3} \sim 8.0 \times 10^{-3} \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{a}^{-1}$ 。此外,在北大西洋的北部海域(图4中区域7和区域8)也有高增长速率海域,增长速率处于 $6.0 \times 10^{-3} \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{a}^{-1}$ 左右。除此之外,部分海域 Chl-a 浓度出现负增长速率,比如澳大利亚的东南海域(图4中区域4)、墨西哥的西南海域(图4中区域5)、非洲西部沿大西洋(图4中区域6)近岸海域,近乎达到 $-5.0 \times 10^{-3} \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

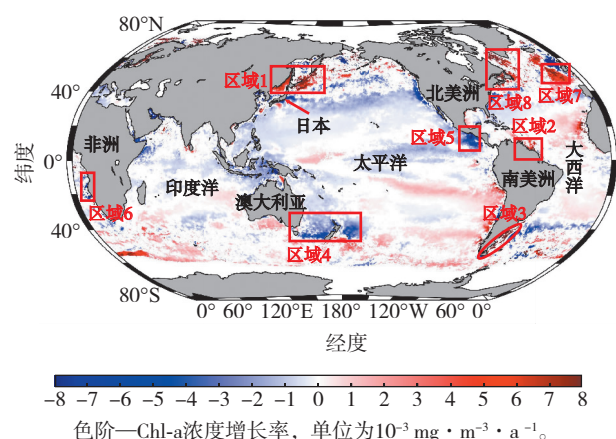


图4 2003—2022年全球Chl-a浓度的变化趋势空间分布
Fig.4 Spatial distribution of trend of global ocean Chl-a concentrations from 2003 to 2022

2.4 全球海洋 Chl-a 浓度与气候变化因子关系分析

文中着重分析3个气候变化因子(SST、Niño 3.4指数、IOD指数)与全球海洋 Chl-a 浓度的相关性,以探究气候变化对海洋 Chl-a 浓度的影响。这里,Chl-a 浓度与气候因子相关性分析是基于月尺度资料开展的。正如1.2.3节所述,文中通过相关系数(r)来定量评价它们之间的相关关系。下列3种情况,像元的相关系数(r)将设置成空值:(1)参与计算的有效像元数量低于时间序列数量的50%,(2)显著性水平 $p > 0.05$,(3)相关系数(r)绝对值低于0.4(即 $|r| < 0.4$)。换言之,下文仅展示相关系数 $|r| \geq 0.4$ 的像元,以更好展示两者之间的显著相关关系。

2.4.1 Chl-a 浓度与 SST 季节性相关分析

全球海域的 Chl-a 浓度与 SST 的季节相关性,如图5所示。在北半球春季(图5a),低纬度海域的

Chl-a 浓度与 SST 均呈显著负相关,相关系数(r)为 $-1.0 \sim -0.6$ 。此外,在太平洋赤道和印度洋南部的部分海域,Chl-a 浓度与 SST 呈正相关。在高纬度部分海域,Chl-a 浓度与 SST 呈正相关。北半球夏季(图5b),绝大部分海域 Chl-a 浓度均与 SST 呈较显著负相关。而在北半球秋季(图5c), 40°S 以南大部分海域的 Chl-a 浓度与 SST 呈正相关,相关系数大于0.6。北半球冬季(图5d),Chl-a 浓度与 SST 的相关性同春季分布相似。整体上,远洋海域的 Chl-a 浓度与 SST 之间主要呈负相关,主要位于 $40^\circ\text{S} \sim 40^\circ\text{N}$ 。在高纬度海域,Chl-a 浓度与 SST 主要呈显著正相关。

2.4.2 Chl-a 浓度与 Niño3.4 指数季节性相关分析

图6展示了 Chl-a 浓度与 Niño3.4 指数季节性相关关系分布,可以看出, Niño3.4 指数与 Chl-a 浓度的显著相关关系主要位于 $30^\circ\text{S} \sim 50^\circ\text{N}$ 。北半球春季(图6a),大西洋海域和 40°N 以北海域的 Chl-a 浓度对 Niño3.4 指数变化不敏感,绝大多数海域无显著相关性,表明 ENSO 影响相对较小。在太平洋海域的 $40^\circ\text{S} \sim 40^\circ\text{N}$ 和印度洋海域, Chl-a 浓度与 Niño3.4 指数呈负相关,相关系数为 $-0.8 \sim -0.6$ 。而在高纬度小部分大洋海域, Chl-a 浓度与 Niño3.4 指数呈正相关,相关系数为 $0.6 \sim 0.8$,与廖静思等^[28]的研究结论相符。北半球夏季(图6b),太平洋赤道附近海域、大西洋北部和南部海域呈负相关(图6b中黑框所示),同时其他零星海域也呈负相关,如澳大利亚西部和南部海域。在大西洋赤道附近海域、澳大利亚北部和东部海域, Chl-a 浓度和 Niño3.4 指数呈显著正相关,见图6b中绿框所示。其他海域两者相关性不显著。北半球秋季(图6c),太平洋赤道附近海域和南美洲周边海域呈显著负相关。Chl-a 浓度与 Niño3.4 指数的正相关性主要位于太平洋的 $10^\circ \sim 40^\circ\text{N}$ 和 $10^\circ \sim 40^\circ\text{S}$ 海域、大西洋东北部海域。北半球冬季(图6d),太平洋赤道南北侧海域 Chl-a 浓度与 Niño3.4 指数呈显著负相关,但赤道附近无明显相关,如图6d中区域1所示。对于其他海域,如大西洋和印度洋,两者主要呈正相关。

2.4.3 Chl-a 浓度与 IOD 指数的季节性相关分析

图7展示了全球海洋 Chl-a 浓度与 IOD 指数的季节性相关关系结果。北半球春季(图7a),IOD 指数和 Chl-a 浓度的显著正相关海域主要位于赤道以南海域,而负相关海域主要位于太平洋赤道北部局部海域($0^\circ \sim 20^\circ\text{N}$)。北半球夏季(图7b),两者之间的显著相关海域主要位于印度洋,其中印度洋西北

部海域呈负相关,而印度洋东北部海域呈正相关。其他零星海域也呈现出相关性。北半球秋季(图7c),印度洋整体相关性与北半球夏季差别不大。此外,在太平洋赤道附近海域 Chl-a 浓度与 IOD 指数的相关性呈负相关,在太平洋南部海域呈正相关。北半球冬季(图7d),赤道以南大部分海域的 Chl-a

浓度和 IOD 指数呈正相关,如澳大利亚附近海域、太平洋赤道以南海域。太平洋赤道以北的零星海域出现 Chl-a 浓度和 IOD 指数的负相关。整体而言,Chl-a 浓度与 IOD 指数的相关性主要位于赤道以南海域,如在北半球夏季和秋季的印度洋海域,北半球秋季和冬季的太平洋海域。

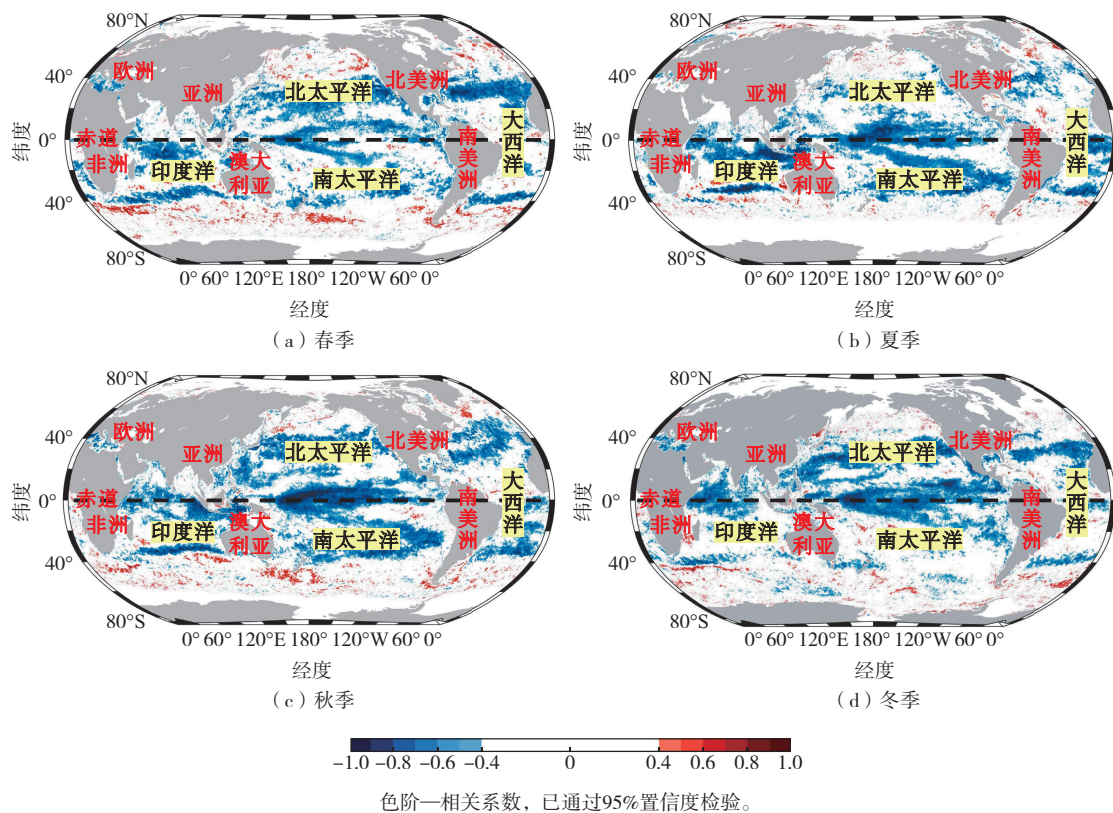


图5 Chl-a 浓度与 SST 之间相关系数的季节分布

Fig.5 Seasonal distribution of correlation coefficients between Chl-a concentration and SST

3 结论

基于 2003—2022 年的 MODIS Chl-a 浓度、SST、Niño3.4 指数和 IOD 指数数据,揭示了不同时间尺度下的全球海域 Chl-a 浓度分布特征,并探讨了其与 SST、Niño3.4 指数、IOD 指数气候因子的相关关系。得到的主要结论如下:

(1) 全球海洋 Chl-a 浓度呈明显时空特征差异。在空间上,近海 Chl-a 浓度整体上高于远洋海域 Chl-a 浓度。Chl-a 浓度低值区主要位于低纬度海域。Chl-a 浓度存在较明显的季节性变化趋势,约在夏季升高、冬季降低。全球海域月平均 Chl-a 浓度最大值所在月份大致呈现出同一纬度月份相同的条带分布,随纬度增加月份增大。

(2) 太平洋、印度洋、大西洋的远岸海域 Chl-a

浓度变化较小。大多数近海海域 Chl-a 浓度呈增长趋势,如日本北部和东北部海域、南美洲北部和东南部海域、北大西洋北部海域。印度洋西北部海域、非洲西部沿大西洋近岸海域、澳大利亚东南海域 Chl-a 浓度出现负增长。

(3) 海洋 Chl-a 浓度与 SST 在全年保持低纬度海域显著负相关,其他海域主要表现为显著正相关。Niño3.4 指数与 Chl-a 浓度的显著相关性主要位于太平洋海域,其中赤道附近海域呈现负相关,其他海域主要呈现正相关。ENSO 在春季主要影响印度洋 Chl-a 浓度变化,在夏季和秋季主要影响大西洋 Chl-a 浓度变化。IOD 指数对 Chl-a 浓度的显著影响主要介于 40°S~30°N 的海域(尤其赤道附近海域),并且呈现较明显的季节差异。

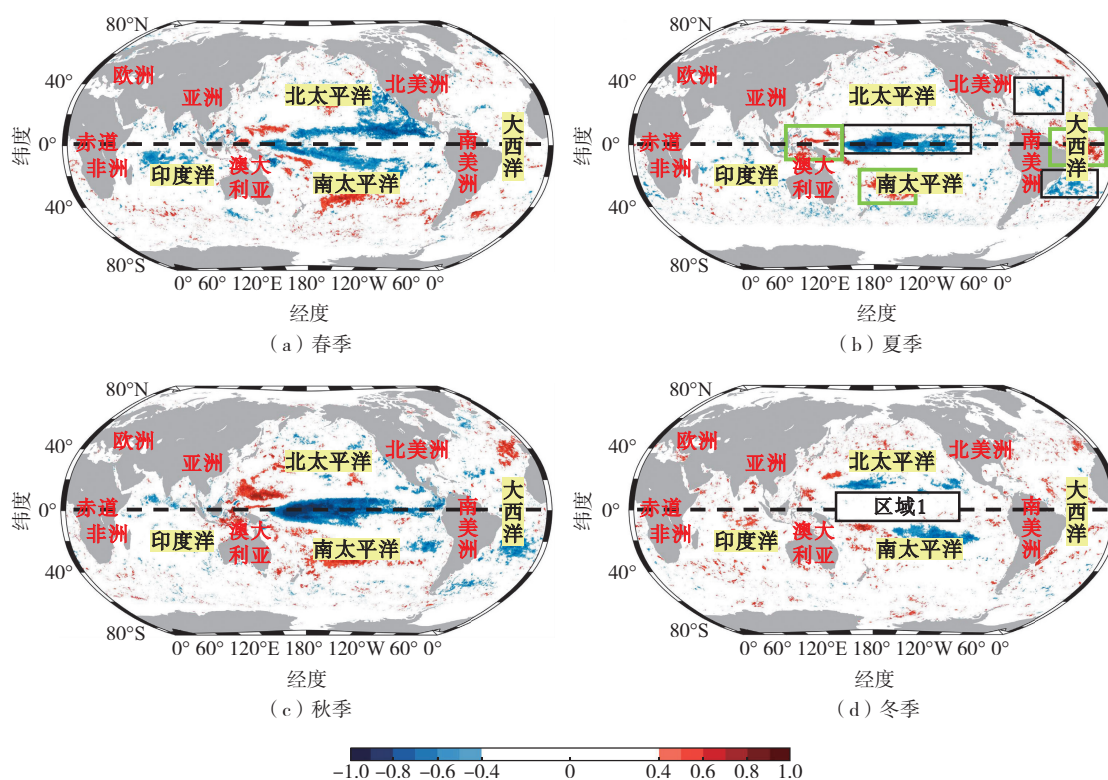


图 6 Chl-a 浓度与 Niño3.4 指数之间相关系数的季节分布

Fig.6 Seasonal distribution of correlation coefficients between Chl-a concentrations and Niño3.4 index

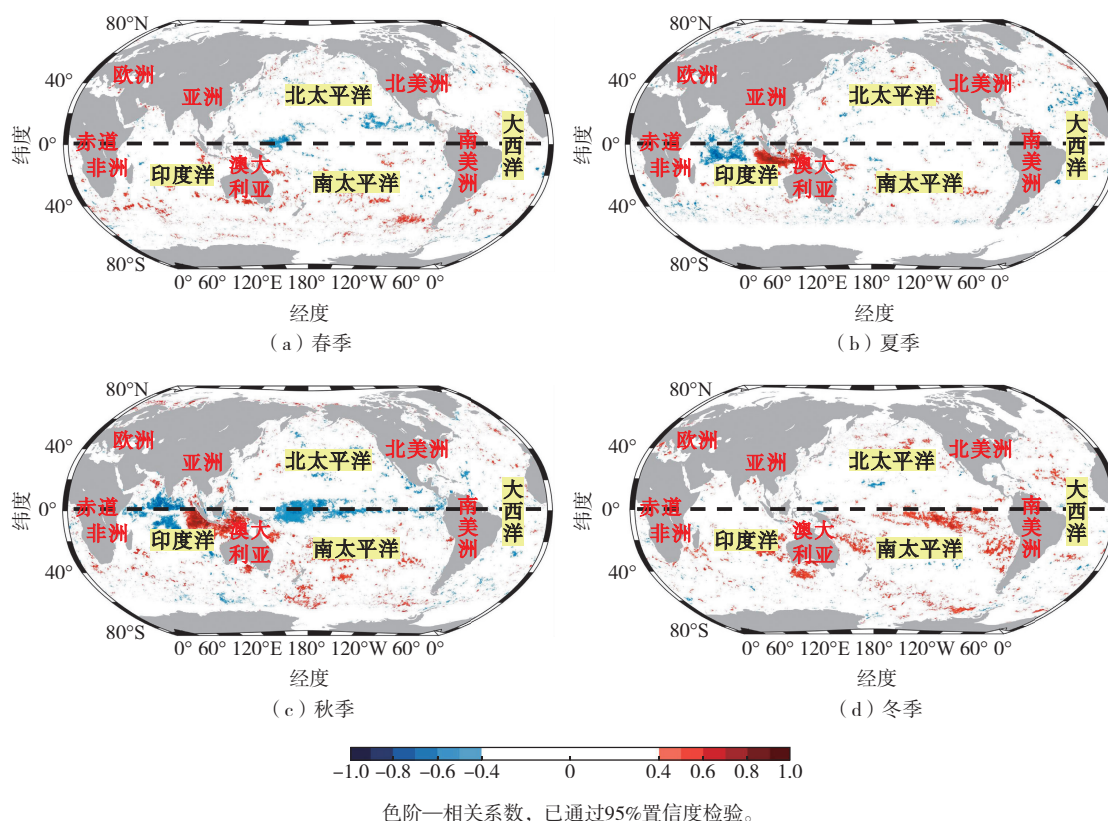


图 7 Chl-a 浓度与 IOD 指数之间相关系数的季节分布

Fig.7 Seasonal distribution of correlation coefficients between Chl-a concentrations and IOD index

参考文献:

- [1] BOYCE D G, DOWD M, LEWIS M R, et al. Estimating global chlorophyll changes over the past century[J]. *Prog Oceanogr*, 2014, 122: 163-173.
- [2] LI H, LI X R, SONG D H, et al. Prediction on daily spatial distribution of chlorophyll-a in coastal seas using a synthetic method of remote sensing, machine learning and numerical modeling[J]. *Sci Total Environ*, 2024, 910: 168642.
- [3] WU J H, LEE Z P, GOES J I, et al. Evaluation of three contrasting models in estimating primary production from ocean color remote sensing using long-term time-series data at oceanic and coastal sites [J]. *Remote Sens Environ*, 2024, 302: 113983.
- [4] HELBLING E W, VILLAFANE V E, NARVARTE M A, et al. The impact of extreme weather events exceeds those due to global-change drivers on coastal phytoplankton assemblages[J]. *Sci Total Environ*, 2024, 918: 170644.
- [5] 丛丕福, 牛铮, 蒙继华, 等. 1998—2003 年卫星反演的中国陆架海叶绿素 a 浓度变化分析[J]. *海洋环境科学*, 2006, 25(1): 30-33.
- [6] OSEJI O F, CHIGBU P, OGHENEKARO E, et al. Spatiotemporal patterns of phytoplankton composition and abundance in the Maryland Coastal Bays: the influence of freshwater discharge and anthropogenic activities [J]. *Estuar Coast Shelf Sci*, 2018, 207: 119-131.
- [7] 李芝凤, 韩冰, 贾迪, 等. 南海北部叶绿素 a 浓度遥感反演算法评估与 COCTS 反演算法构建[J]. *海洋技术学报*, 2022, 41(6): 1-7.
- [8] 田洪阵, 刘沁萍, GOES J I, 等. 基于 2002—2018 年 MODIS 数据的黄海叶绿素 a 时空变化研究[J]. *海洋通报*, 2020, 39(1): 101-110.
- [9] 江杉, 王益澄, 马仁锋. 中国东海叶绿素浓度变化分析及其海水温度响应[J]. *测绘通报*, 2020(6): 39-44.
- [10] 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*, 2005, 27(4): 45-52.
- [11] JOY-WARREN H L. The importance of spatial and temporal scales in understanding chlorophyll variability in the southern ocean[J]. *Glob Biogeochem Cycles*, 2022, 36(10): e2022GB007550.
- [12] KILPATRICK T, XIE S P, MILLER A J, et al. Satellite observations of enhanced chlorophyll variability in the southern California bight [J]. *J Geophys Res: Oceans*, 2018, 123(10): 7550-7563.
- [13] ANILKUMAR N, GEORGE J V, CHACKO R, et al. Variability of fronts, fresh water input and chlorophyll in the Indian Ocean sector of the Southern Ocean[J]. *N Z J Mar Freshwater Res*, 2015, 49(1): 20-40.
- [14] LOPES J F, FERREIRA J A, CARDOSO A C, et al. Variability of temperature and chlorophyll of the Iberian Peninsula near coastal ecosystem during an upwelling event for the present climate and a future climate scenario [J]. *J Mar Syst*, 2014, 129: 271-288.
- [15] 李和阳, 林莉, 郑滢, 等. 西太平洋叶绿素 a 浓度对气候变化响应概念模型初探[J]. *应用海洋学学报*, 2020, 39(2): 153-161.
- [16] 陈小燕. 基于遥感的长时间序列浮游植物的多尺度变化研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [17] HAMMOND M L, BEAULIEU C, SAHU S K, et al. Assessing trends and uncertainties in satellite-era ocean chlorophyll using space-time modeling [J]. *Glob Biogeochem Cycles*, 2017, 31(7): 1103-1117.
- [18] 周明颀, 简茂球. 热带印度洋及周边海温对 ENSO 响应的年代际变化[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2023, 62(1): 64-74.
- [19] 张文珺, 李建平. ENSO 事件下赤道中东太平洋海温场非对称性特征[J]. *海洋气象学报*, 2024, 44(1): 1-13.
- [20] 林婷婷, 李春. ENSO 与南海 SST 关系的年代际变化[J]. *海洋气象学报*, 2019, 39(2): 68-75.
- [21] 彭蔚然, 黄丹青. 夏季印度洋海温偶极子对冬季东亚高空急流的影响研究[J]. *气象科学*, 2022, 42(3): 334-340.
- [22] 郭飞燕, 左卫强, 郭飞龙, 等. 伴随 IOD 型和独立型 ENSO 对山东气候年际变化的影响[J]. *海洋气象学报*, 2017, 37(4): 34-48.
- [23] 郭品文, 吴清传. 印度洋偶极子向海盆一致模转变的年代际变化及其成因[J]. *大气科学学报*, 2022, 45(4): 562-572.
- [24] 钱宏林, 齐雨藻. 热带西太平洋叶绿素 a 的分布与环境因素之间的关系[J]. *暨南大学学报(自然科学与医学版)*, 1992, 13(3): 116-123.
- [25] FLEMING-LEHTINEN V, LAAMANEN M, KUOSA H, et al. Long-term development of inorganic nutrients and chlorophyll alpha in the open northern Baltic Sea [J]. *Ambio*, 2008, 37(2): 86-92.
- [26] ZHANG H L, QIU Z F, SUN D Y, et al. Seasonal and interannual variability of satellite-derived chlorophyll-a (2000–2012) in the Bohai Sea, China [J]. *Remote Sens*, 2017, 9(6): 582.
- [27] 洪丽莎, 王春生, 周亚东, 等. 夏季西南印度洋叶绿素 a 分布特征[J]. *生态学报*, 2012, 32(14): 4525-4534.
- [28] 廖静思, 陆志波, 王娟, 等. 南大洋扇区夏季表层海水叶绿素 a 分布特征及其原因分析[J]. *四川环境*, 2019, 38(1): 105-115.