

全球海洋初级生产力标准化距平数据集

孙雨琦^{1,2}, 薛存金^{2,3*}, 洪娅岚⁴, 徐洋峰^{2,5}, 刘敬一^{2,6}

1. 中国地质大学(北京), 北京 100083; 2. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094;
3. 中国科学院数字地球重点实验室, 北京 100094; 4. 曼迪匹艾(北京)科技服务有限公司,
北京 101100; 5. 中国石油大学(华东), 青岛 266580; 6. 中国电子科技集团公司航天
信息应用技术重点实验室, 石家庄 050081

摘要: 海洋净初级生产力 (Marine Net Primary Production, MNPP) 是海洋生态系统中的重要参数, 是衡量海洋浮游植物光合作用能力的指标, 其异常变化模式的时空特征与全球气候变化、碳循环和全球生态环境具有密切联系。本文采用俄勒冈州立大学海洋生产力网站提供的 1998 年 1 月至 2002 年 12 月期间的 SeaWiFS.R2014 版和 2003 年 1 月至 2019 年 12 月期间的 MODIS.R2018 版两类产品作为原始数据, 采用地理时空统计分析方法, 研制了全球海域 1998–2019 年的年、季、月三种时间尺度的全球海洋初级生产力标准化距平数据集, 该数据集空间分辨率为 $9\text{ km} \times 9\text{ km}$, 时间分辨率为月, 数据格式为 HDF4, 数据量 16.82 GB (压缩后 4.81 GB)。本文利用 MEI (Multiple ENSO Index) 指数初步分析了海洋初级生产力异常变化模式与 ENSO (El Niño-Southern Oscillation) 事件之间的耦合关系, 结果表明海洋初级生产力异常变化模式与 ENSO 事件的生消演变存在密切关系, 证明了全球海洋初级生产力标准化距平数据集的可行性和有效性。

关键词: 海洋初级生产力; 异常变化; 月均距平; 季均距平; 年均距平; 数据集

DOI: <https://doi.org/10.3974/geodp.2021.02.08>

CSTR: <https://cstr.science.org.cn/CSTR:20146.14.2021.02.08>

数据可用性声明:

本文关联实体数据集已在《全球变化数据仓储电子杂志(中英文)》出版, 可获取:

<https://doi.org/10.3974/geodb.2020.07.13.V1> 或 <https://cstr.science.org.cn/CSTR:20146.11.2020.07.13.V1>.

1 前言

海洋净初级生产力 (Marine Net Primary Production, MNPP) 即单位面积上海洋浮游植物光合作用的能力^[1], 是海洋生态系统中的重要参数, 它有助于了解全球的碳循环、渔业生产能力等^[2]。卫星遥感技术的应用为研究 MNPP 提供了新的可能, 具有覆盖面积大、观

收稿日期: 2021-02-02; 修订日期: 2021-04-02; 出版日期: 2021-06-25

基金项目: 中国科学院 (XDA19060103); 中华人民共和国科学技术部 (2017YFB0503605); 国家自然科学基金 (41671401)

*通讯作者: 薛存金 0000-0003-3605-6578, 中国科学院空天信息创新研究院, xuecj@aircas.ac.cn

数据引用方式: [1] 孙雨琦, 薛存金, 洪娅岚等. 全球海洋初级生产力标准化距平数据集[J]. 全球变化数据学报, 2021, 5(2): 162–174. <https://doi.org/10.3974/geodp.2021.02.08>. <https://cstr.science.org.cn/CSTR:20146.14.2021.02.08>.

[2] 孙雨琦, 薛存金, 洪娅岚等. 全球海洋初级生产力标准化距平数据集 (1998–2019)[J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2020. <https://doi.org/10.3974/geodb.2020.07.13.V1>. <https://cstr.science.org.cn/CSTR:20146.11.2020.07.13.V1>.

测时间序列长等特点,使它成为大时空尺度海洋浮游植物丰度测量与研究必不可少的工具。MNPP 在时间和空间上存在异常变化,即某时刻相对于长时间序列平均状态的变化,如月均异常变化、季均异常变化、年均异常变化等^[3]。MNPP 的异常变化及与海洋环境要素存在关联关系,这种关联关系存在不同的时空分布特征^[4]。MNPP 的异常变化模式及与海洋环境要素的关联模式可为明确浮游植物时空分布的主要影响因子提供基础,同时为研究气候变化如何影响海洋食物网提供依据^[5]。此外,MNPP 的异常变化与厄尔尼诺-南方涛动(El Niño-Southern Oscillation, ENSO)事件也存在密切联系^[6],如,Bastos 等发现 ENSO 与 MNPP 之间存在很强的反相关性,这主要是由热带与亚热带纬度地区生态系统驱动的^[7]; Chavez 等发现在 ENSO 发生期间,热带地区由于上升流和养分供应的影响, MNPP 明显增加^[8]。因此,开展 MNPP 的异常变化研究具有重大意义^[9]。尽管已有多种基于卫星遥感的 MNPP 数据集,比如 GlobalMarineABMP_NPP^[10], Chlorophyll-a Concen of Poyang Lake, China^[11], MuSyQ-NPP-1km-2013^[12],但目前针对 MNPP 异常变化的时空数据集还没有相关报道。

基于此,本项研究基于已有月均 MNPP 数据集(1998.01–2019.12),利用地理时空统计分析方法,考虑海洋初级生产力的时空特征,设计了 MNPP 异常变化数据集生产方法,去除其季节性变动,从而生成年、季、月三种时间尺度的海洋初级生产力标准化距平数据集(MNPP monthly anomaly datasets, MNPP-MAD; MNPP seasonal anomaly datasets, MNPP-SAD; MNPP annual anomaly datasets, MNPP-AAD)。该数据集为全球气候变化研究提供数据基础。

2 数据集元数据简介

《全球海洋初级生产力标准化距平数据集(1998–2019)》^[13]的名称、作者、地理区域、数据年代、时间分辨率、空间分辨率、数据集组成、数据出版与共享服务平台、数据共享政策等信息见表1。

3 数据研发方法

3.1 数据来源

本文1998年1月至2002年12月的NPP数据源自SeaWiFS(Sea-Viewing Wide Field-of-View Sensor)卫星平台R2014版数据,基于SeaWiFS CHL、AVHRR SST、SeaWiFS PAR(光合作用辐射)数据,利用垂直广义生产模型(Vertically Generalized Production Model, VGPM)算法计算而来^[15];2003年1月至2019年12月期间的NPP数据源自Aqua卫星平台上的MODIS(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)传感器,数据版本为R2018,该数据集基于MODIS CHL、MODIS SST、MODIS PAR(光合作用辐射)数据,利用VGPM模型算法计算而来;两个时期的NPP数据均由俄勒冈州立大学^[6]海洋生产力网站提供,数据时间分辨率为月,空间分辨率为 $9\text{ km} \times 9\text{ km}$,全球网格数均为 2160×4320 。

3.2 算法流程

针对SeaWiFS和MODIS这两种传感器获得的数据,Couto等人对其进行了相关性与标准差分析,结果表明两种数据可以合并使用,合并结果不受传感器转换的影响^[16]。因此,

本文以两种传感器的 MNPP 数据集作为原始输入数据集。首先对原始数据进行空间转换，把原始数据的经度范围从-180°-180°转换至 0°-360°，然后利用时间插值算法和时间聚合算法处理得到季节尺度、年尺度的原始数据。时间插值算法，即若某时刻某栅格为无效值，则通过相邻时刻（上一时刻、下一时刻）相同位置栅格值取平均作为该时刻该位置的数值。时间聚合算法，以春季为例，由 3、4、5 月的数据进行均值处理，产生对应季节尺度数据；年尺度数据，则由每年 1-12 月的数据进行均值处理，产生对应年尺度数据。

表 1 《全球海洋初级生产力数据集（1998-2019）》元数据简表

条 目	描 述
数据集名称	全球海洋初级生产力标准化距平数据集（1998-2019）
数据集短名	Global_MNPP_Anomaly_1998-2019
作者信息	孙雨琦，中国地质大学（北京），中国科学院空天信息创新研究院, syqskdkd@126.com 薛存金 0000-0003-3605-6578, 中国科学院空天信息创新研究院, 中国科学院空天信息研究院数字地球重点实验室, xuecj@aircas.ac.cn 洪娅岚，曼迪匹艾（北京）科技服务有限公司, 515251357@qq.com 徐洋峰，中国石油大学（华东），中国科学院空天信息创新研究院, xuyf187627@163.com 刘敬一，中国电子科技集团公司航天信息应用技术重点实验室, liujy@aircas.ac.cn
地理区域	全球海域
数据年代	1998 年 1 月至 2019 年 12 月
时间分辨率	月、季、年
空间分辨率	9 km × 9 km
数据格式	HDF4
数据量	16.82 GB（压缩后 4.81 GB）
数据集组成	该数据集由六个数据集组成：全球海洋初级生产力年原始数据集；全球海洋初级生产力季节原始数据集；全球海洋初级生产力年原始数据集；全球海洋初级生产力月标准化距平数据集；全球海洋初级生产力季节标准化距平数据集；全球海洋初级生产力年标准化距平数据集
基金项目	中国科学院（XDA19060103）；中华人民共和国科学技术部（2017YFB0503605）；国家自然科学基金（41671401）
出版与共享服务平台	全球变化科学研究数据出版系统 http://www.geodoi.ac.cn
地址	北京市朝阳区大屯路甲 11 号 100101，中国科学院地理科学与资源研究所
数据共享政策	全球变化科学研究数据出版系统的“数据”包括元数据（中英文）、通过《全球变化数据仓储电子杂志（中英文）》发表的实体数据集和通过《全球变化数据学报（中英文）》发表的数据论文。其共享政策如下：（1）“数据”以最便利的方式通过互联网系统免费向全社会开放，用户免费浏览、免费下载；（2）最终用户使用“数据”需要按照引用格式在参考文献或适当的位置标注数据来源；（3）增值服务用户或以任何形式散发和传播（包括通过计算机服务器）“数据”的用户需要与《全球变化数据学报（中英文）》编辑部签署书面协议，获得许可；（4）摘取“数据”中的部分记录创作新数据的作者需要遵循 10%引用原则，即从本数据集中摘取的数据记录少于新数据集总记录量的 10%，同时需要对摘取的数据记录标注数据来源 ^[14]
数据和论文检索系统	DOI, CSTR, Crossref, DCI, CSCD, CNKI, SciEngine, WDS/ISC, GEOSS

由于海洋初级生产力具有明显的季节变动（如图 3 所示），且这种季节性的周期模式

主要受太阳辐射驱动，且掩盖了海洋初级生产力的异常变化模式，因此，研究异常变化的 MNPP 数据集，必须剔除这种季节模式。本文采用标准化距平方法——Z-score 剔除海洋初级生产力季节变化模式^[17]，对 1–12 月的任意月份，如 1 月，获取每年 1 月的数值，构成时间序列，计算其平均值和标准差，并通过其均值和标准差，离散化所有年份 1 月的数值，如式(1)所示^[18]。

$$X'_{i,j} = \frac{X_{i,j} - \bar{X}_j}{\delta_j} \quad (j=1,2,\dots,12) \tag{1}$$

式中， i 为年， j 为月， \bar{X}_j 和 δ_j 分别为平均值和标准差， $X'_{i,j}$ 和 $X_{i,j}$ 分别为长时间序列影像的原值和转换值。

为验证 MNPPAD 数据集的适用性，论文选取典型的 MNPP 的聚簇演变模式，并分析这种演变模式与 ENSO 事件之间的关系，从而间接的证明该数据集的科学性。MNPPAD 数据集的算法流程如图 1 所示。

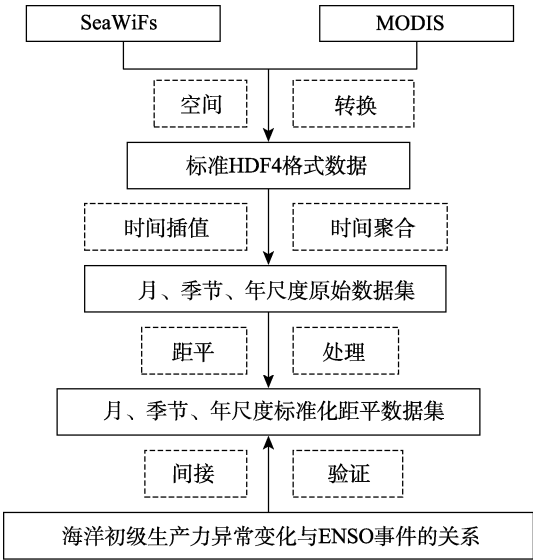


图 1 数据集研发技术路线图

4 数据结果

4.1 数据集组成

《全球海洋初级生产力数据集（1998–2019）》包括原始数据和结果数据，数据格式均为 HDF4，其数据结构为课题组自定义的数据结构，如图 2 所示，数据描述模块说明如表 1，数据要素及属性说明如表 2。

HDF4 数据格式介绍如图 2 所示：

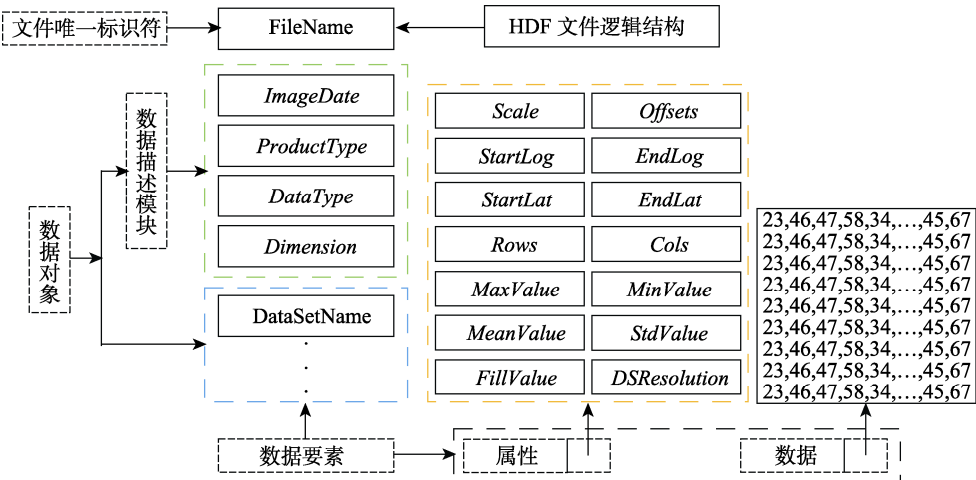


图 2 HDF4 数据结构图

HDF4 数据描述模块表如表 1 所示：

表 1 HDF4 数据描述模块表

名称	定义	注释
ImageDate	DFNT_CHAR8	遥感影像的成像时间
ProductType	DFNT_CHAR8	产品类型，默认为 Product
DataType	DFNT_CHAR8	数据类型，默认为 0
Dimension	DFNT_CHAR8	数据维度，默认为二维

HDF4 数据集属性描述如表 2 所示：

表 2 HDF4 数据要素及属性说明表

名称	定义	注释
DataSetName	DFNT_INT32	数据集名称
Scale	DFNT_FLOAT64	比例系数，默认为 0.001
Offsets	DFNT_FLOAT64	比例截距，默认为 0
StartLog	DFNT_FLOAT64	遥感影像起始经度
EndLog	DFNT_FLOAT64	遥感影像终止经度
StartLat	DFNT_FLOAT64	遥感影像起始纬度
EndLat	DFNT_FLOAT64	遥感影像终止纬度
Rows	DFNT_UINT16	遥感影像行数
Cols	DFNT_UINT16	遥感影像列数
Max Value	DFNT_FLOAT64	遥感影像像元最大值
Min Value	DFNT_FLOAT64	遥感影像像元最小值
Mean Value	DFNT_FLOAT64	遥感影像像元值均值
Std Value	DFNT_FLOAT64	遥感影像像元值标准差
Fill Value	DFNT_INT32	遥感影像填充值，默认为-9999
DSResolution	DFNT_FLOAT64	遥感影像空间分辨率

4.2 数据预处理

图 3 为全球海域 1998 年 1 月至 2019 年 12 月的海洋初级生产力原始数据与距平数据时间序列对比图。通过分析图 3 可知，进行标准化距平处理，去除原始数据的季节性成分后，更能够表现出海洋初级生产力在时间序列上的波动性。

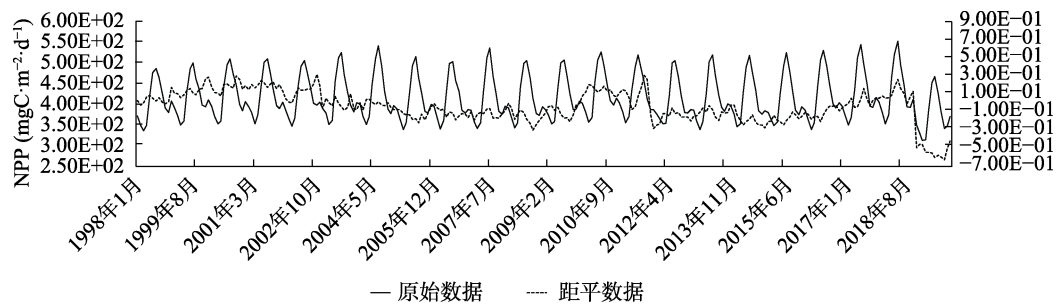


图 3 海洋初级生产力原始数据与距平数据时间序列对比图（1998 年 1 月至 2019 年 12 月）

经过标准化距平处理后，在图 4(b) MNPP 月均距平的空间分布图中，可以清晰地看到异常升高区域和异常降低区域。

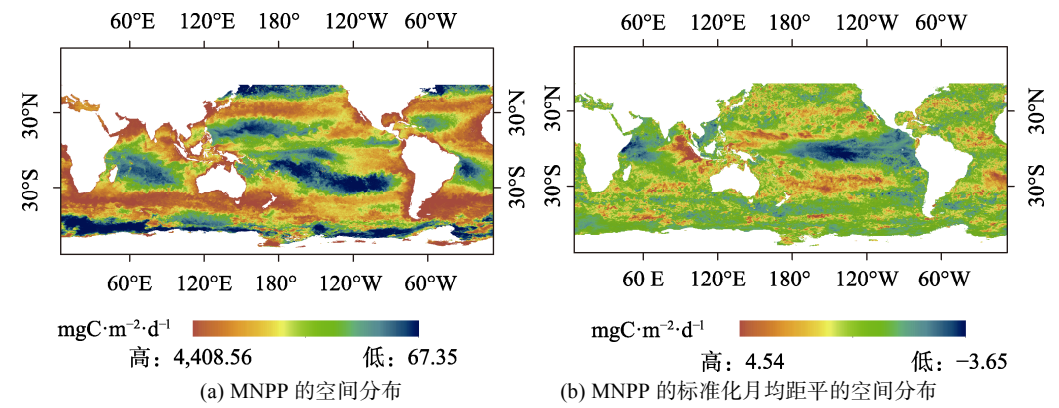


图 4 1998 年 1 月原始 MNPP 数据和月均标准化距平数据图

4.3 结果数据

结果数据包括：（1）全球海洋初级生产力年标准化距平数据集；（2）全球海洋初级生产力季节标准化距平数据集；（3）全球海洋初级生产力月标准化距平数据集。

全球海洋初级生产力年均距平数据如图 5 所示，全球海洋初级生产力季均距平数据如图 6 所示，全球海洋初级生产力月均距平数据如图 7 所示。

4.4 数据集适用性验证

本文利用 ENSO 表征指数 MEI (Multivariate ENSO Index) 与海洋初级生产力异常变化模式之间的耦合关系，来间接验证 MNPPAD 数据集的适用性。本文利用课题开发的双约束

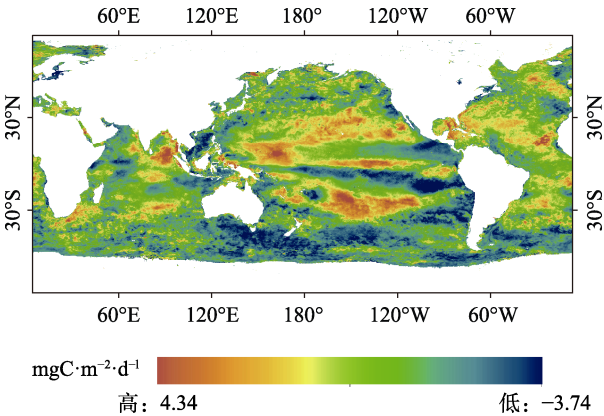


图 5 全球海洋初级生产力年均距平图（1998–2019）

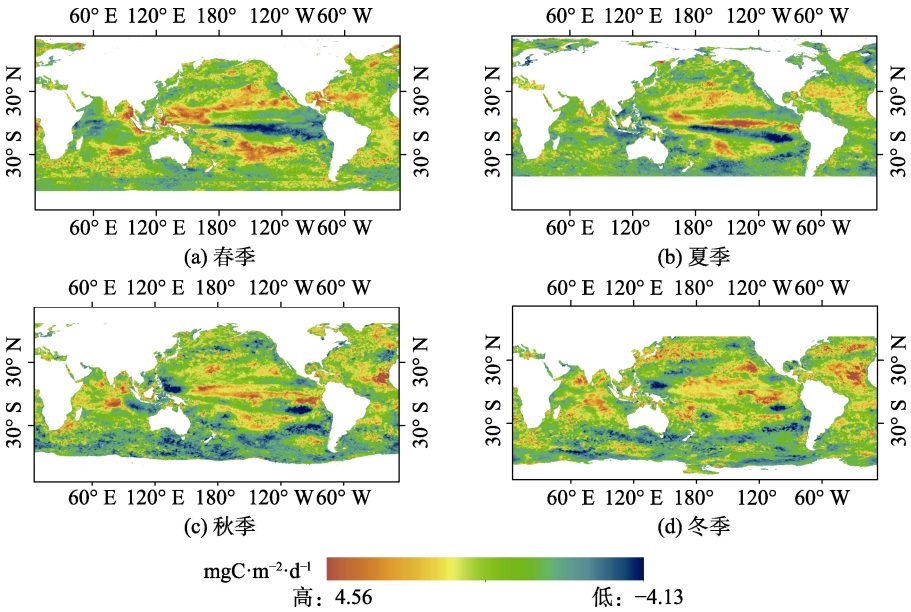


图 6 全球海洋初级生产力季均距平数据图（1998–2019）

聚类方法^[19]提取太平洋海洋初级生产力异常时空簇模式，分析了 1998 年 1 月至 1998 年 7 月的 El Niño 事件、1998 年 12 月至 1999 年 8 月的 La Niña 事件，2006 年 8 月至 2007 年 2 月的 El Niño 事件和 2010 年 6 月至 2011 年 3 月的 La Niña 事件期间印度洋区域、赤道太平洋区域、大西洋区域的海洋初级生产力异常时空簇模式，主要结果如图 8–15 所示。

图 8 为 1998 年 1 月至 1998 年 7 月印度洋西部海域海洋初级生产力异常低值时空簇的空间变化。随着时间的推移，该时空簇的位置基本无变化，覆盖面积逐渐减小，直至消失。图 9 为该时空簇面积与 MEI 相关关系图。可以看到，在 El Niño 事件中，该时空演变簇与 MEI 指数存在响应关系，相关系数达 0.97。

图 10 为 1998 年 12 月至 1999 年 8 月赤道太平洋中东部海域海洋初级生产力异常高值时空簇的空间变化。随着时间的推移，该时空异常高值簇逐渐向东部移动，且覆盖面积逐

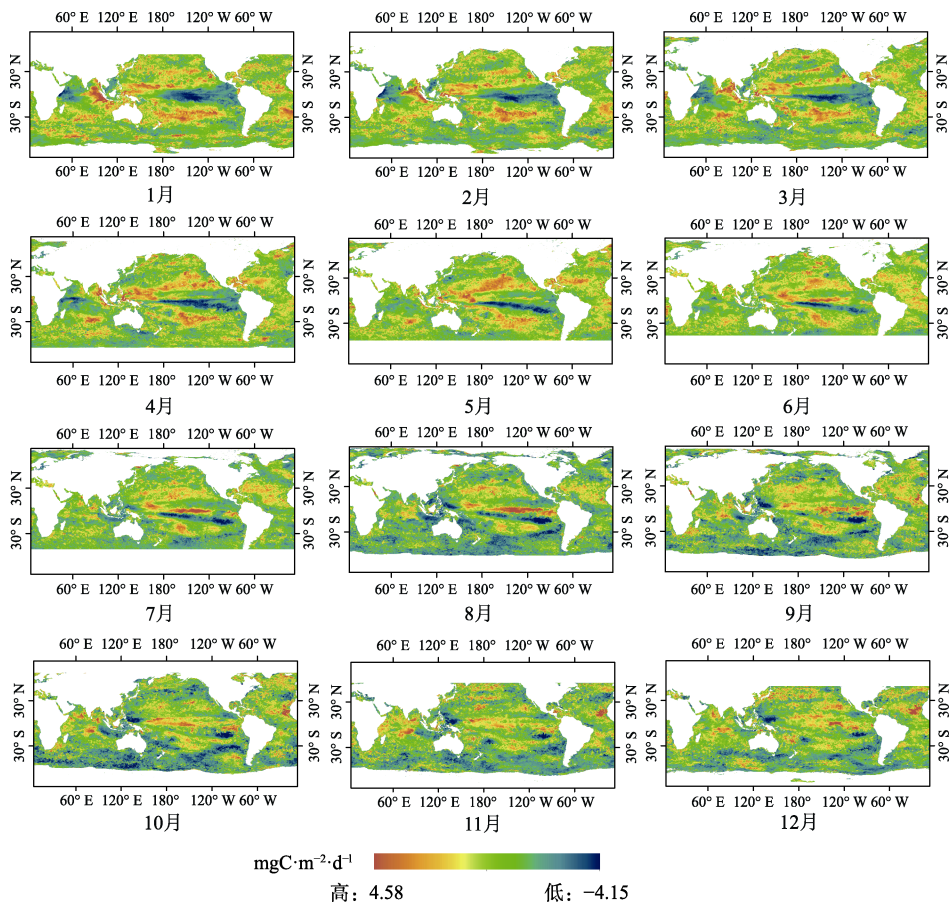


图 7 全球海洋初级生产力月均距平数据图 (1998–2019)

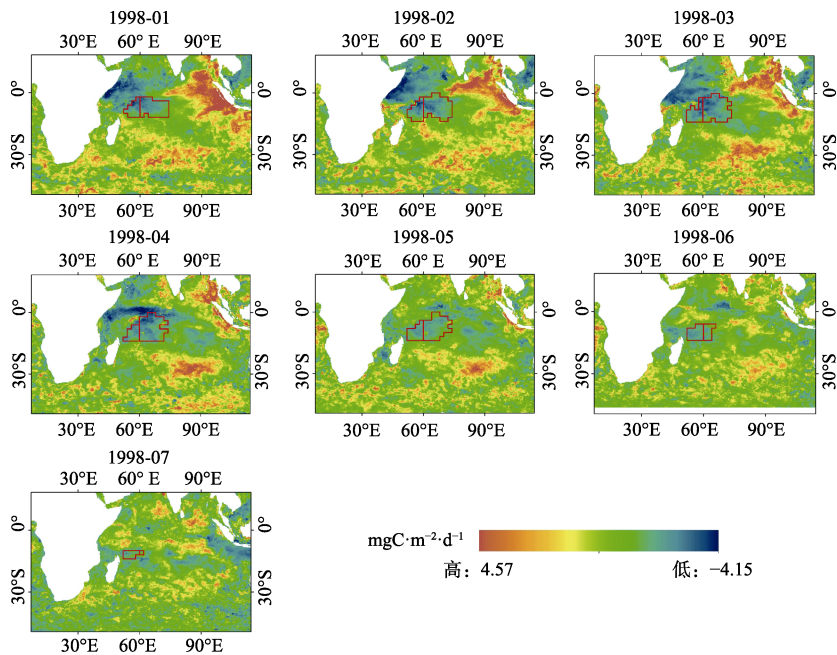


图 8 印度洋西部异常低值时空簇的空间移动

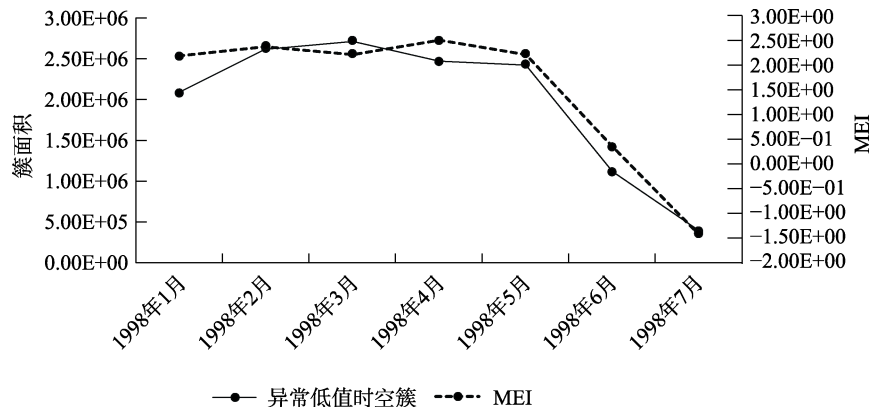


图 9 时空簇面积与 MEI 相关关系

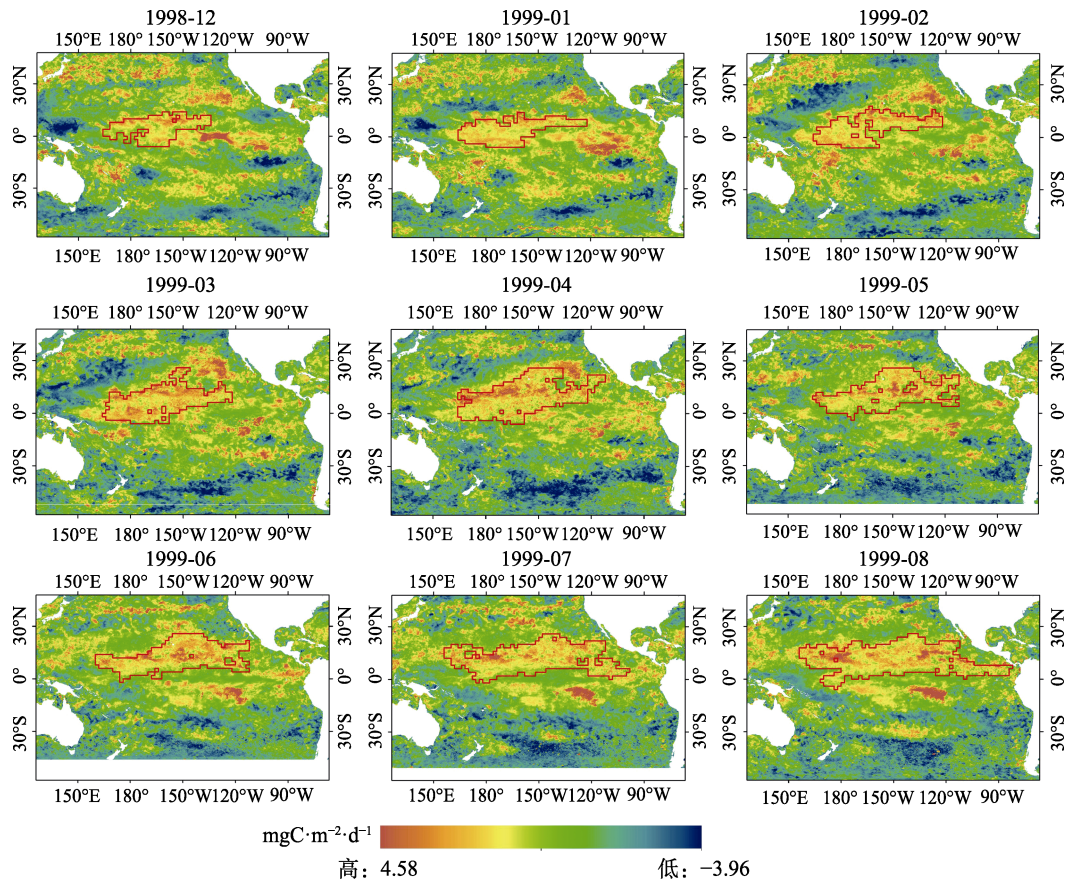


图 10 赤道中东太平洋异常高值时空簇的空间移动

渐变变大。图 11 为该时空演变簇面积与 MEI 相关关系图。可以看到在 La Niña 事件中，该时空演变簇与 MEI 指数具有响应关系，相关系数达到 0.79。

图 12 为 2006 年 6 月至 2007 年 2 月赤道太平洋中南部海域海洋初级生产力异常低值时空簇的空间变化。随着时间的推移，该时空异常低值簇逐渐向东南移动，且覆盖面积逐渐

变大，2007 年 1 月开始面积逐渐变小，并慢慢消亡。图 13 为该时空演变簇面积与 MEI 相关关系图，可以看到在 El Niño 事件中，该时空演变簇与 MEI 指数具有响应关系，相关系数达到 0.75。

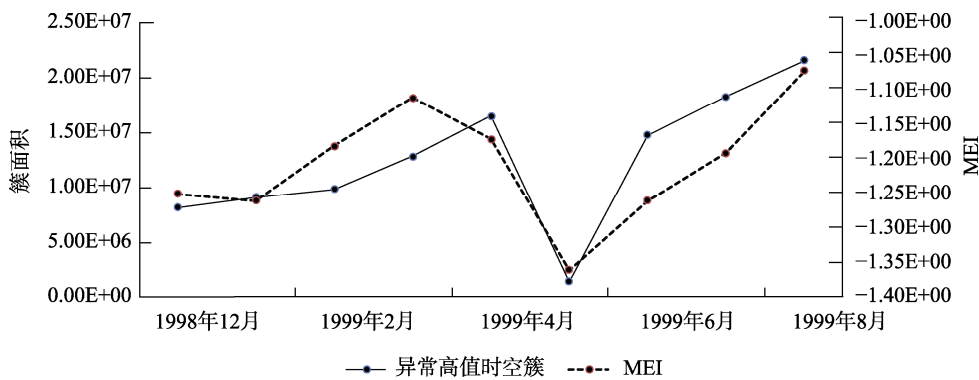


图 11 时空簇面积与 MEI 相关关系

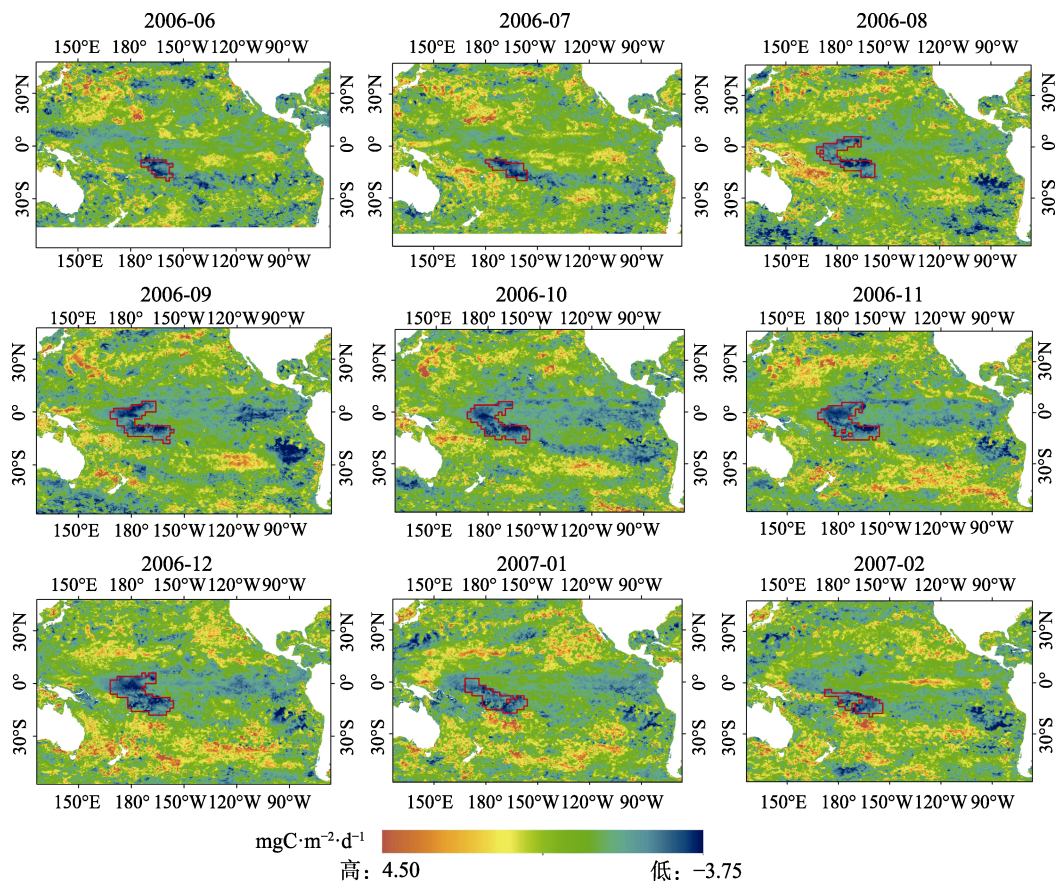


图 12 赤道中南太平洋异常低值时空簇的空间移动

图 14 为 2010 年 6 月至 2011 年 3 月大西洋中部海域海洋初级生产力异常低值时空簇的空间变化。随着时间的推移，该时空异常低值簇基本没有位置变化，覆盖面积逐渐变小，

但是在 2010 年 11 月面积又开始逐渐增大, 并慢慢消亡。图 15 为该时空演变簇面积与 MEI

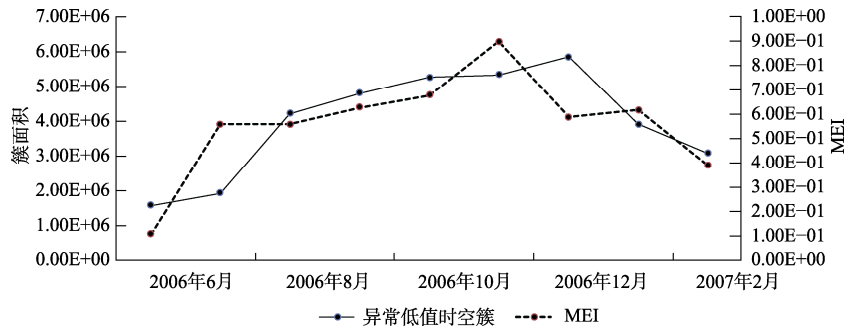


图 13 时空簇面积与 MEI 相关关系

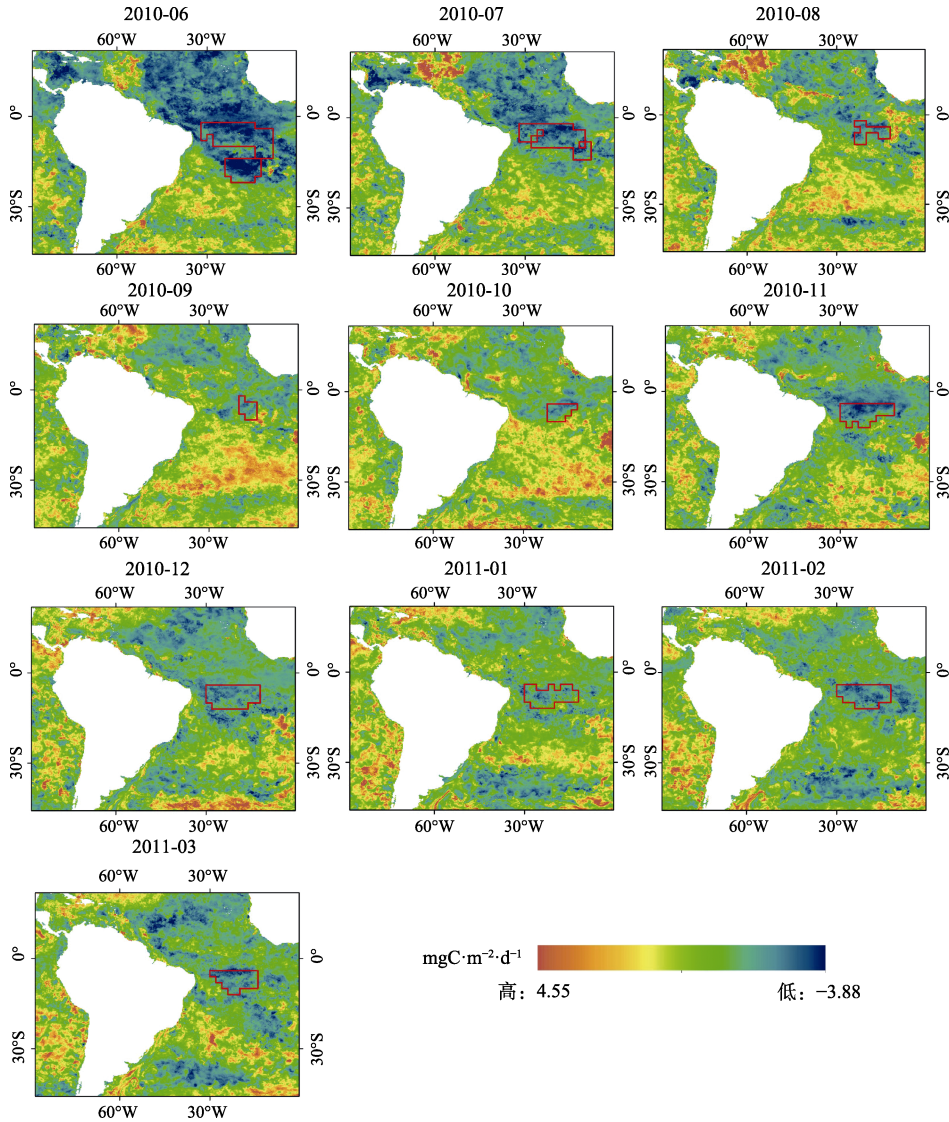


图 14 大西洋中部异常低值时空簇的空间移动

相关关系图，可以看到在 El Niño 事件中，该时空演变簇与 MEI 指数具有响应关系，相关系数达到 0.63。

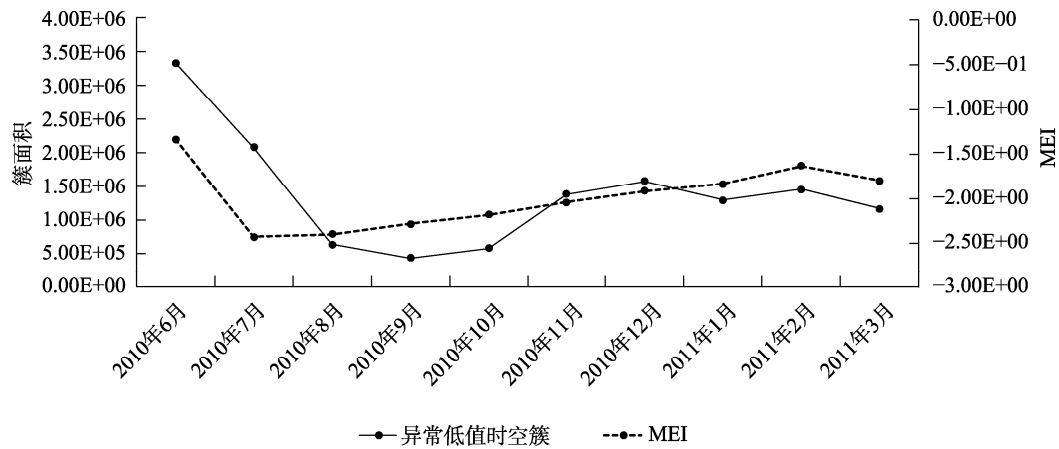


图 15 时空簇面积与 MEI 相关关系

5 讨论和总结

本文基于 SeaWiFS 和 MODIS 海洋初级生产力原始数据集，采用地理时空统计方法，生产了 1998–2019 年期间的月、季节、年三种时间尺度的海洋初级生产力标准化距平数据集，数据量为 16.82 GB（压缩后 4.81GB）。利用海洋初级生产力异常变化模式与 ENSO 事件之间的耦合关系，对 MNPPAD 数据集的适用性进行验证，在全球海域，海洋初级生产力异常演变簇与 ENSO 表征指数 MEI 存在较强的相关性，结果表明：海洋初级生产力的异常变化模式与 ENSO 事件存在密切联系，可以为全球气候变化研究提供重要的数据基础，但是还需要增加样本量，深入挖掘海洋初级生产力异常变化模式与 ENSO 事件之间的关系，这也是今后进一步研究的重点和方向。

作者分工：薛存金、洪娅岚对数据集的开发做了总体设计；孙雨琦、徐洋峰采集和处理了海洋初级生产力原始数据；刘敬一设计了海洋异常变化时空聚簇挖掘方法；洪娅岚、孙雨琦做了数据验证；孙雨琦撰写了数据论文等。

利益冲突声明：本研究不存在研究者以及与公开研究成果有关的利益冲突。

参考文献

[1] 李国胜, 王芳, 梁强等. 东海初级生产力遥感反演及其时空演化机制[J]. 地理学报, 2003(4): 483–493.

[2] 吴培中. 海洋初级生产力的卫星探测[J]. 国土资源遥感, 2000(3): 7–15.

[3] 刘敬一, 薛存金, 樊彦国等. 一种面向栅格的空间-属性双重约束聚类方法[J]. 地球信息科学学报, 2016, 19(4): 447–456. DOI: 10.3724/SP.J.1047.2017.0447.

[4] 孙强, 薛存金, 刘敬一等. 全球海洋初级生产力与海洋环境要素时空关联模式挖掘分析[J]. 海洋环境科学, 2020, 39(3): 340–352. DOI: 10.13634/j.cnki.mes.2020.03.003.

- [5] Behrenfeld, M. J., O'Malley, R. T., Siegel, D. A., *et al.* Climate-driven trends in contemporary ocean productivity [J]. *Nature*, 2006, 444: 752–755.
- [6] Behrenfeld, M., Falkowski, P. A consumer's guide to phytoplankton primary productivity models [J]. *Limnology & Oceanography*, 1997, 42(7): 1479–1491.
- [7] Bastos, A., Steven, W., Gouveia, C., *et al.* The global NPP dependence on ENSO: La Niña and the extraordinary year of 2011[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2013(118): 1247–1255. DOI: 10.1002/jgrg.20100.
- [8] Chavez, F. P., Messie, M., Pennington, J. T. Marine primary production in relation to climate variability and change [J]. *Annual Review of Marine Science*, 2011, 3: 227–260.
- [9] Messié, M., Chavez, F. A global analysis of ENSO synchrony: the oceans' biological response to physical forcing [J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 2012, 117: C09001.
- [10] 陶醉, 周翔, 马胜. 基于 ABPM 模型的全球海洋初级生产力遥感监测 9-km 分辨率月度数据集 (2003–2012) [J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2014. <https://doi.org/10.3974/geodb.2014.02.03.V1>.
- [11] 王卷乐, 张永杰, 杨飞等. 鄱阳湖叶绿素 a 浓度数据集(2009–2012)[J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2014. <https://doi.org/10.3974/geodb.2014.02.08.V1>.
- [12] 高帅, 柳钦火, 康峻等. 中国与东盟地区 2013 年 1 km 分辨率植被净初级生产力数据集[DB/OL]. 全球变化数据仓储, 2015. <https://doi.org/10.3974/geodb.2015.01.15.V1>.
- [13] 孙雨琦, 薛存金, 洪娅岚等. 全球海洋初级生产力标准化距平数据集 (1998–2019) [J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2020. <https://doi.org/10.3974/geodb.2020.07.13.V1>. <https://cstr.esi.cn/CSTR:20146.11.2020.07.13.V1>.
- [14] 全球变化科学研究数据出版系统. 全球变化科学研究数据共享政策 [OL]. <https://doi.org/10.3974/dp.policy.2014.05> (2017 年更新).
- [15] Behrenfeld, M. J., Falkowski, P. G. Photosynthetic rates derived from satellite-based chlorophyll concentration [J]. *Limnology and Oceanography*, 1997, 42(1): 1–20.
- [16] Couto, A., Holbrook, N., Maharaj, M. Unravelling eastern Pacific and central Pacific ENSO contributions in south Pacific chlorophyll-a variability through remote sensing [J]. *Remote Sensing*, 2013, 5(8): 4067–4087.
- [17] Zhang, P., Steinbach, M., Kumar, V., *et al.* Discovery of Patterns of Earth Science Data Using Data Mining [M]. In *New Generation of Data Mining Applications* (Zurada, J., Kantardzic, M., eds), New Jersey: John Wiley & Sons Inc., 2005.
- [18] Xue, C., Song, W., Qin, L., *et al.* A spatiotemporal mining framework for abnormal association patterns in marine environments with a time series of remote sensing images [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2015, 38: 105–114.
- [19] Liu, J., Xue, C., He, Y., *et al.* Dual-constraint spatiotemporal clustering approach for exploring marine anomaly patterns using remote sensing products [J]. *IEEE J-STARS*, 2018, 11(11): 3963–3976.