基于奇异谱分析的深圳近海净初级生产力时间序列研究

张彦南[1, 2], 王久娟[1, 2], 段广拓[1, 2], 陈劲松[1, 2], 易 琳[1, 2]

(1. 中国科学院深圳先进技术研究院 数字所空间信息中心, 广东 深圳 518055; 2. 深圳海洋环境大数据应用与分析工程实验室, 广东 深圳 518055)

摘要: 海洋净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)长时间序列分析可获取 NPP 多年变化趋势、季节变化等动态信息, 对海洋环境的监测与预报具有重要意义。本文以 2003~2013 年月际尺度净初级生产力卫星遥感产品为数据源, 通过奇异谱分析提取标准化净初级生产力时间序列的长期趋势和周期振荡特征。研究表明, ①浮标监测数据的叶绿素 *a* 浓度、海表温度与 MODIS 的叶绿素 *a* 浓度、海表温度产品变化趋势基本一致, NPP 时间序列产品可用于分析深圳近岸海域净初级生产力的变化趋势。②空间分布上, 深圳西部海域的 NPP 和叶绿素 *a* 浓度远高于大鹏湾和大亚湾, 大鹏湾和大亚湾的 NPP 和叶绿素 *a* 浓度均值及变化趋势非常接近。三个海区 NPP、叶绿素 *a* 浓度、海表温度和光合有效辐射在季风转换期变化剧烈。③长期趋势上, 深圳西部海域呈现 2 a 周期波动趋势, 在均值附近以年为周期上下波动。大鹏湾和大亚湾 2003~2006 年 NPP 低于平均水平, 2008 年后 NPP 开始以年为周期围绕平均值上下波动, 2012 年后 NPP 整体与均值持平。④周期特征上, 深圳西部海域、大鹏湾和大亚湾的 NPP 呈“W”或“M”型周年变化, 存在夏季主高峰(6~7 月)和冬季次高峰(12~1 月)。

关键词: 海洋净初级生产力; 奇异谱分析; 时间序列; 深圳近海

中图分类号: P76 **文献标识码**: A **文章编号**: 1000-3096(2018)11-0013-11

DOI: 10.11759/hykx20170926002

海洋净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)是海洋中可供各类异养生物直接或间接利用的有机物质(或能量)的总和。海洋生态系统的碳固定主要通过生物泵这一过程实现, 浮游植物的初级生产力是这一过程的起始环节和关键环节[1]。由于地理环境和浮游植物的种群结构以及生态特点存在差异, 不同海区海洋初级生产力的时空分布并不均匀, 且多数河口、海湾受大陆径流影响, 呈现出高生产力和周期性变化明显等特征[2]。已有关于河口海湾净初级生产力的研究多依赖走航或实地观测等不连续观测数据, 采用长时间序列遥感产品分析海洋 NPP 变化规律的较少。目前遥感观测数据生成的海洋 NPP 已经积累成一个长时间序列, 通过对 NPP 长时间序列的分析, 可获取 NPP 多年变化的趋势、季节变化等动态信息, 对于海洋环境的监测与预报具有重要意义。

目前遥感产品长时间序列分析已被应用于农作物生产判断与分类、地表覆盖变化与监测和作物产量和生物量预测等方面, 时间序列分析方法主要分为时间域分析和频率域分析。时间域分析方法较多采用一元线性回归识别时间序列的长期趋势, 但该方法规避误差能力较弱, 也无法度量时间序列变化趋势的显著程度。频率域分析方法主要为谐波分析和小波分析方法等。谐波分析是采用三角函数对时间序列进行拟合获取其振幅、周期和位相等反映植被物候的信息, 已应用于去云处理[3]、物候信息提取[4]、复种指数监测[5]和作物识别[6]等方面, 但该算法易因泄漏效应无法获取准确的谐波参数值。小波分析多用于识别时间序列的振荡成分, 被广泛用于水文要素的趋势分析[7-8], 但其得到的局部位相无法完全解释气象或生物数据的波形变化。而奇异谱分析(Singular Spectrum Analysis, SSA)提取的趋势信息和周期成分不受线性变化和固定波形的约束, 是分解时间序列

收稿日期: 2017-09-26; 修回日期: 2017-12-07

基金项目: 深圳市未来产业专项资金资助项目(JSGG20150512145714247); 深圳市科技创新委员会基础研究项目(JCYJ20170307170456535); 深圳市知识创新计划资助项目(JCYJ20150831194835299)

[Foundation: Future Industry Special Fund Project of Shenzhen, No. JSGG 20150512145714247; The Fundamental Research Foundation of Shenzhen Technology and Innovation Council, No.JCYJ20170307170456535; Knowledge Innovation Program of Shenzhen, No. JCYJ20150831194835299]

作者简介: 张彦南(1990-), 女, 河南濮阳人, 研究实习员, 硕士, 研究方向为海洋遥感, E-mail: xiafei106@163.com; 陈劲松, 通信作者, 研究员, 主要从事微波遥感研究, E-mail: js.chen@siat.ac.cn

提取其长期趋势和季节变动的有效方法，曾用于分析预测气候变化[9]、径流变化[10]、植被生长状况[11]等。袁林旺等[12]在 SSA 去噪序列的基础上，采用均值生成函数模型(Mean Generation Function, MGF)对海面变化进行预测。贾铎等[11]采用 SSA 重建了草原露天矿区 MODIS NDVI 时间序列的趋势和周期振荡信号，并通过 Mann Kendall 检测对趋势成分的显著程度和突变状况进行定量化。本文主要探讨了奇异谱分析在海洋生态方面的应用，提取了 NPP 时间序列的长期趋势和季节变动等信息，对比深圳西部海域、大鹏湾和大亚湾的空间差异。该方法较以往研究中实地观测或统计分析方法，具有较强的可操作性和客观性。

1 研究区概况与研究数据

1.1 研究区概况

深圳市地处广东省南部沿海，属亚热带海洋性季风气候。海域连接南海与太平洋，海岸线全长 257 km，海域面积 1 145 km^2，主要划分为珠江口、深圳湾、大鹏湾和大亚湾四个近岸海区(图 1)，为典型二类水体。珠江口水文环境复杂，终年受内陆冲淡水和南海表层咸水的交替影响，兼具河流与海洋动力的双重特征，沿岸工业发达，居民区众多，受人类活动严重干扰；深圳湾为珠江口伶仃洋东侧中部的一个内宽外窄的半封闭型浅水海湾，主要靠潮流量维持其生态，生态环境比较脆弱；大鹏湾位于珠江口东北部，是一个半封闭型海湾，常有赤潮发生；大亚湾是南海北部较大的半封闭性海湾，近年沿岸工业与养殖业发展迅速，受人类活动干扰较重。

1.2 研究数据

本文选取俄勒冈州立大学提供的全球海洋净初级生产力的月平均产品构建NPP时间序列(数据来源 http: //www.science.oregonstate.edu/ocean.productivity/index.php)，全年 12 景，2003~2013 年共计 132 景影像，空间分辨率均为 1/12°。该产品是使用 Behrenfeld 于 1997 年提出的 VGPM 模型反演得到，VGPM 模型是考虑到光照、水温、营养盐等对 NPP 产生直接或间接影响的因素，同时考虑叶绿素和温度在垂直剖面差异的生理过程模型[1]。模型主要输入数据为 MODIS 叶绿素表面浓度产品、MODIS SST4 算法的海表温度产品和 MODIS 云校正的光合有效辐射产品。真光层深度是从 MODIS 叶绿素浓度产品中反演得到，具体算法参考文献[13]。

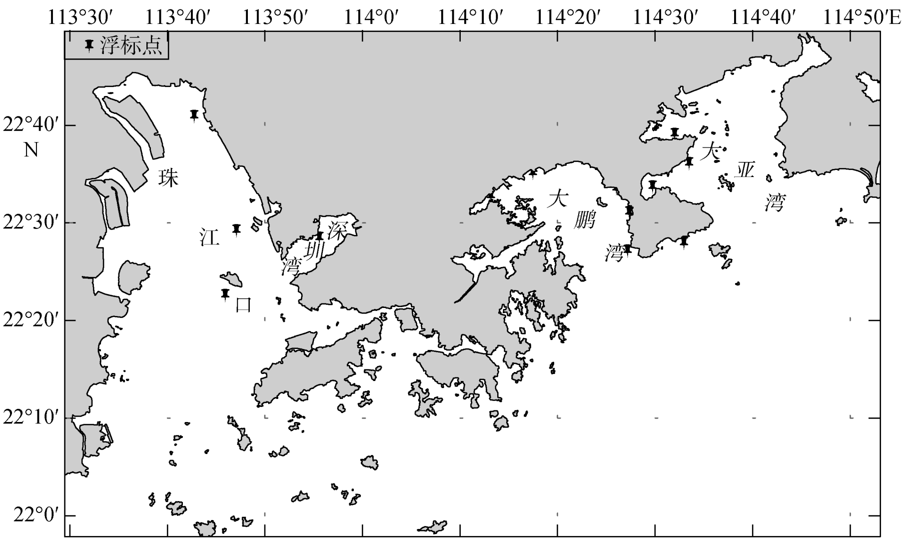

图 1 研究区示意图

Fig. 1 Location of the study area

VGPM 模型具有很强的适用性，能适应不同海区长时间序列的海洋净初级生产力的估算要求。李小斌等[14]、贾艳红等[15]、李国胜等[16]使用 VGPM 模型分别对东海、黄海和南海一类水体反演初级生产力。檀赛春等[17]对最大光合速率修正后估算中国近海二类水体初级生产力。殷燕等[18]对真光层深度进行修正后使用 VGPM 模型估算光学特性复杂多变的太湖梅梁湾水域的初级生产力。Zhang 等[19]对比太湖梅梁湾的 VGPM 模型和经验模型估算的初级生产力，认为基于 VGPM 模型得到的初级生产力更能反映年

内变化。因此 VGPM 模型用于估算研究区二类水体的初级生产力, 可更好反映其年际与年内变化趋势。

2 研究方法

2.1 NPP 时间序列产品的预处理

2.1.1 时间序列产品的可用性

为说明 MODIS 长时间序列产品可以代表深圳近岸海域的长期变化趋势, 本文采用 2014~2016 年深圳近海浮标自动监测系统测定的叶绿素 *a* 浓度、海表温度数据与 MODIS 叶绿素 *a* 浓度、海表温度月平均产品进行对比。因不同浮标站点的起始监测时间不同, 因此, 本文将深圳近岸海域划分为深圳西部海域、大鹏湾和大亚湾后统一监测时间, 其中深圳西部海域的 4 个浮标监测数据自 2014 年 12 月 1 日~2016 年 9 月 30 日, 大鹏湾的 6 个浮标监测数据自 2014 年 9 月 1 日~2016 年 9 月 30 日, 大亚湾的 4 个浮标监测数据自 2014 年 1 月 1 日~2016 年 9 月 30 日。其后统计各浮标监测站点的日平均和月平均, 再算出该区域日平均和月平均值。

2.1.2 时间序列产品的标准化

为提取三个海区的 NPP 变化趋势, 需对原时间序列 T 进行标准差标准化处理:

$$T^* = \frac{T-\mu}{\sigma}, \tag{1}$$

式中, T^*为时间序列标准值, μ 为时间序列均值, σ 为时间序列标准差。标准 NPP 值的正负表示高于或者低于 NPP 平均水平。

2.2 NPP 时间序列的奇异谱分析

一定时期内的海洋净初级生产力序列可看作以时间为自变量的时间序列, 其变化趋势可能存在准周期振荡规律。非平稳时间序列可能包含长期趋势、季节变动、循环变动和不规则变动。通过分解时间序列提取其长期趋势和季节变动的方法很多, 如广义线性函数、移动平均、状态空间、小波变换、贝叶斯方法、动态谐波回归[3]等。而奇异谱分析将一维时间序列植入高维欧式空间, 通过对时间序列构造出的轨迹矩阵进行奇异值分解得到包含时间序列趋势和周期信息的主分量, 重构并提取出代表原时间序列的长期趋势信号、周期信号和噪声信号等。本文采用奇异谱分析提取时间序列的长期趋势和周期振荡规律, 算法实现是基于 Matlab 平台开发的 Auto SSA 软件包, 该软件包由德国 Bremen University 的 Theodore Alexandrov 设计开发(http: //www.pdmi.ras.ru/~theo/autossa/english/index.html)。

2.2.1 分解

(1) 设长度为 132 的 NPP 时间序列为 $\boldsymbol{F}=(f_0, f_1, f_2, \cdots, f_{N-1})$, 对 $\boldsymbol{F}$ 以窗宽 L 进行拆分构造 $L\times K$ 的轨迹矩阵 $\boldsymbol{X}$, $K=N-L+1$, 则有 $\boldsymbol{X}_j=(f_{j-1}, \cdots, f_{j+L-2})^T$, $j=1, 2, \cdots, K$

$$\begin{aligned}\boldsymbol{F}&=(f_0,f_1,f_2,\cdots,f_{N-1})\to \boldsymbol{X}=(f_{i+j-2})_{i,j=1}^{L,K}\\&=[X_1:\cdots:X_K]\end{aligned}, \tag{2}$$

矩阵 $\boldsymbol{X}$ 为 Hankel 矩阵, 即矩阵副对角线上元素相等。

(2) 构造 $L\times L$ 矩阵 $\boldsymbol{S}=\boldsymbol{XXT}$, 获取矩阵 $\boldsymbol{S}$ 的特征值 λ_j 和特征向量 $\boldsymbol{U}_j$, 并对 $\boldsymbol{X}$ 进行 SVD 分解, 则 $X=\sum_{j=1}^{d}\sqrt{\lambda_j}\boldsymbol{U}_j\boldsymbol{V}_j^T$, $\boldsymbol{V}_j=\boldsymbol{X}^T\boldsymbol{U}_j/\sqrt{\lambda_j}$, $d=\max\{j:\lambda_j>0\}$ $(d\leqslant L)$。

(3) 其后将奇异值 $\boldsymbol{I}=\{1, \cdots, d\}$分组为 $\boldsymbol{I}_1,\cdots, \boldsymbol{I}_m$, 则有 $\boldsymbol{X}=\sum_{k=1}^{m}X_{I_k}, X_{I_k}=\sum_{i\in I_k}X_i$。

(4) 求取矩阵 $\boldsymbol{X}_{I_k}$ 的对角平均, 则有时间序列 $\boldsymbol{F}$ 的分量集合 $f_n=\sum_{k=1}^{m}f_n^{(k)}, n=0,\cdots,N-1$, 其中每个 k 序列 $f_n^{(k)}$ 都是 $\boldsymbol{X}_{I_k}$ 的对角平均, 即时间序列趋势分量。

2.2.2 重构

(1) 选择 SVD 分解的趋势分量;

(2) 利用趋势分量重构 $\boldsymbol{X}$ 矩阵;

(3) 利用矩阵 $\boldsymbol{X}$ 重构长度为 N 的时间序列 $\boldsymbol{G}=(g_0, g_1, \cdots, g_{N-1})$。该过程可概括为将 $\boldsymbol{X}$ 重构为 $\boldsymbol{G}$, 具体过程借助矩阵 $\boldsymbol{Y}=\{y_{ij}\}_{i,j=1}^{i=L,j=K}$ 实现, 定义 $L^*=\min\{L, K\}$, $K^*=\max\{L, K\}$, 则当 $L\leqslant K$ 时, $\boldsymbol{Y}^*=\boldsymbol{Y}$; 当 $L>K$ 时, $\boldsymbol{Y}^*=\boldsymbol{Y}^T$; 则

$$g_n=\begin{cases}\dfrac{1}{n+1}\sum_{m=1}^{n+1}y_{m,n-m+2}^*, & 0\leqslant n<L^*-1\\ \dfrac{1}{L^*}\sum_{m=1}^{L^*}y_{m,n-m+2}^*, & L^*-1\leqslant n<K^*\\ \dfrac{1}{N-n}\sum_{m=n-K^*+2}^{N-K^*+1}y_{m,n-m+2}^*, & K^*\leqslant n<N\end{cases}, \tag{3}$$

窗宽 L 的大小和 SVD 分解子集选择决定了重构时间序列 $\boldsymbol{G}$。窗宽 L 越大, SVD 分解的奇异值越多, 第一主分量承载的趋势信息也相对减少, 因此为更好分离趋势信息和噪声信息, 设定窗宽 L 接近 $L/2$ 且能被可能的振荡周期整除, 即 $L=60$。实验中 $N=132$, $L=60$, $K=N-L+1=63$, 因此 $L<K$, $L^*=L$, $K^*=K$, $Y^*=Y$。

3 结果与分析

3.1 原始 NPP 时间序列分析

如图 2 和图 3 所示，浮标监测数据与 MODIS 影像的叶绿素 *a* 浓度、海表温度变化趋势基本一致，表明 MODIS 叶绿素 *a* 浓度、海表温度产品可用于分析深圳近海的变化趋势，则在 MODIS 叶绿素 *a* 浓度、海表温度产品基础上，通过 VGPM 模型得到的 NPP 时间序列产品可用于分析深圳近岸海域净初级生产力的变化趋势。

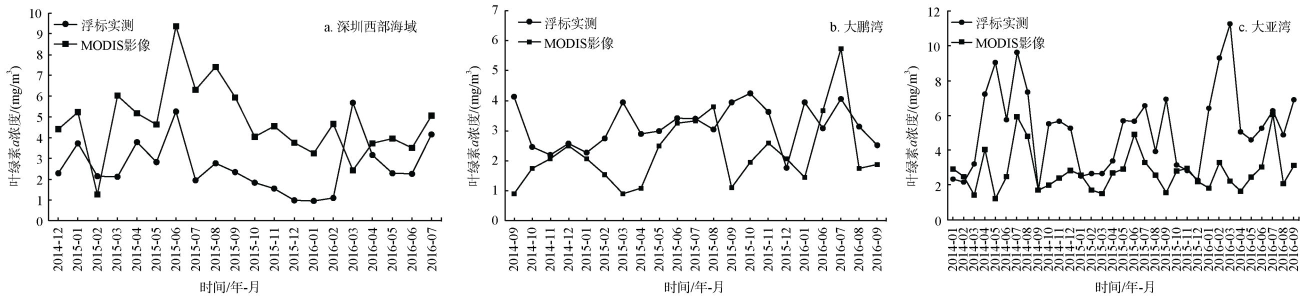

图 2 三个海域的浮标与 MODIS 影像叶绿素 *a* 浓度月均值对比图

Fig. 2 Comparison of the monthly mean value of chlorophyll *a* concentration between the drifts and the MODIS images

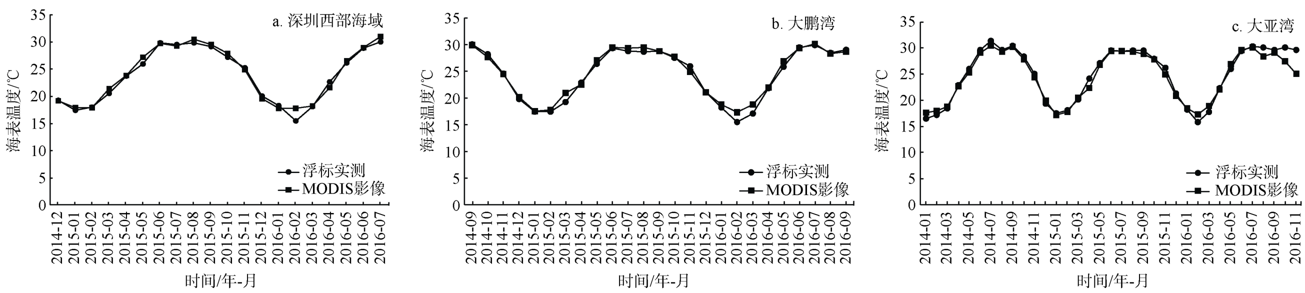

图 3 三个海域的浮标与 MODIS 影像海表温度月均值对比图

Fig. 3 Comparison of the monthly mean value of sea surface temperature between the drifts and the MODIS images

统计三个海区的海洋净初级生产力、叶绿素 *a* 浓度、海表温度和光合有效辐射的月均值和变异系数，由图 4 和图 5 可知净初级生产力的均值和变异系数的整体变化趋势与叶绿素 *a* 浓度较为一致，说明 NPP 受叶绿素 *a* 浓度的影响比海表温度和光合有效辐射多。南海光照充足，光照不是净初级生产力的决定性因子，而营养盐可能是海洋净初级生产力的限制性因子，大气环流、上升流等通过营养盐影响 NPP 的时空分布[20]。丘耀文等[21]认为营养盐可增加所有浮游植物数量或有选择地促进某些浮游植物生长，进而改变浮游植物生物量、水体叶绿素 *a* 浓度和 NPP。

空间分布上，深圳西部海域的净初级生产力和叶绿素 *a* 浓度远高于大鹏湾和大亚湾，大鹏湾和大亚湾的均值及变化趋势非常接近。桓清柳[22]指出深圳近岸海域氮磷营养盐污染状况为东优西劣，西部海域水体表现出一定程度富营养化，大鹏湾和大亚湾均未达到富营养化水平。这与大鹏湾和大亚湾地理条件有关，二者均为半封闭性海湾，且河流短小，地表径流少，主要受沿岸流和陆源排放物影响，整体营养盐水平较低。深圳西部海域有珠江径流和深圳河注入，受陆源污染物排放与航运影响，无机氮与活性磷酸盐含量较高。营养盐的空间分布差异导致深圳西部海域的净初级生产力和叶绿素 *a* 浓度远高于大鹏湾和大亚湾。

季节分布上，三个海区的 NPP 与叶绿素 *a* 浓度呈“W”或“M”型周年变化，存在夏季主高峰和冬季次高峰。海表温度和光合有效辐射均值极为接近，以年为周期存在明显夏季高峰。三个海区海洋参数的变异系数总体呈现春季波动剧烈的趋势。王卫强等[23]发现在气候态意义下，南海表层海温在 5 月份存在明显增温，为季风转换期间南海对大气强迫的响应。Wu 等[24]指出 4~6 月为南海春夏季风转换时期，期间海气相互作用过程会引起降水和海温的异常变化。

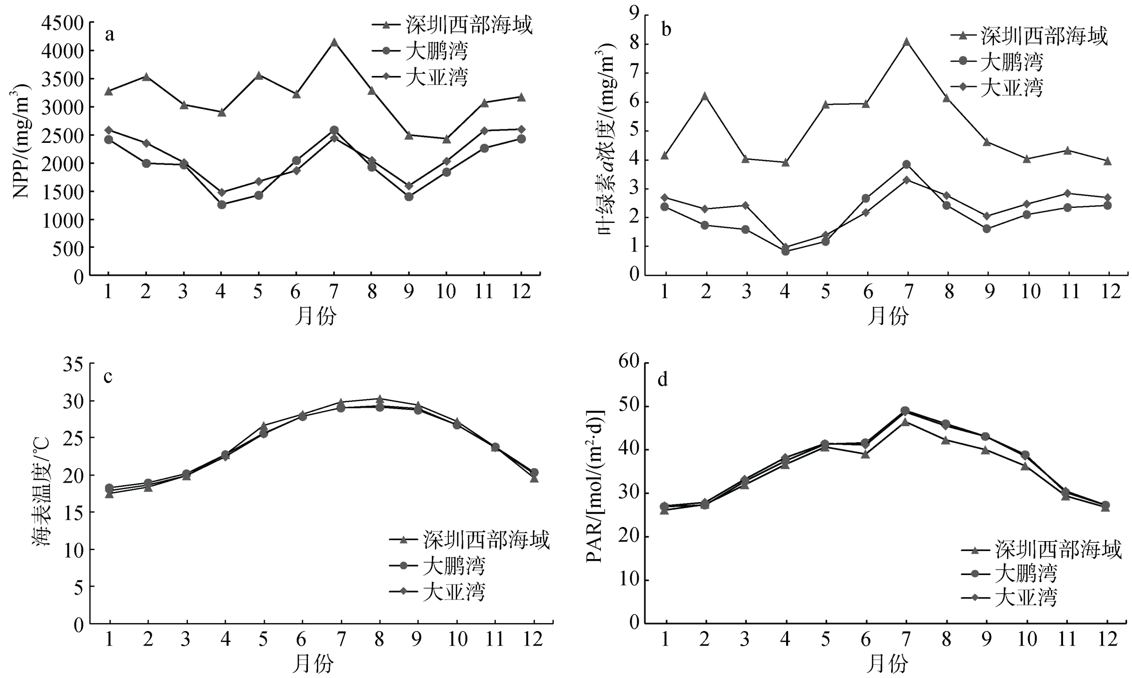

图 4　2003~2013 年各海洋参数的月均值

Fig. 4　Monthly mean of the ocean parameters from 2003 to 2013

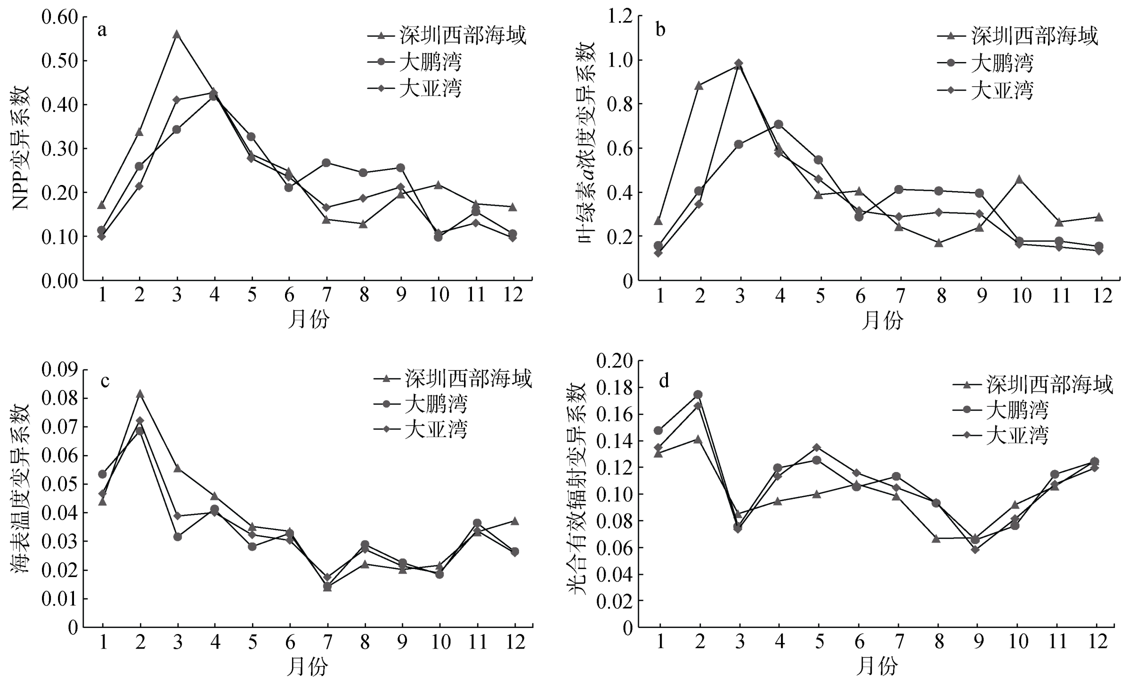

图 5　2003~2013 年各海洋参数的变异系数

Fig. 5　Monthly variation coefficient of the ocean parameters from 2003 to 2013

3.2　标准化 NPP 时间序列的长期变化趋势

深圳西部海域整体呈现 2 a 周期波动趋势(图 6), 在 2003、2005、2007、2009、2011、2013 年 3 月左右 NPP 均值达到正峰值, 高于历年平均水平; 在 2004、2006、2008、2010、2012 年 3 月左右 NPP 均值达到负峰值, 低于历年平均水平。

大鹏湾的长期趋势较为平稳, 大亚湾长期趋势的波动变化呈现阶段性特征(图 7), 2003~2006 年

NPP低于平均水平, 2008年后NPP开始以年为单位在平均值上下波动。其中, 趋势成分9显示2003~2006年NPP低于平均水平, 2008年后NPP以14个月为周期在均值附近波动。趋势成分12和13叠加显示, 2003~2006年NPP低于平均水平, 2007年NPP以16个月为周期波动, 在2、7、9月份易出现峰值。趋势成分18、19和20叠加显示NPP以30个月为周期波动。

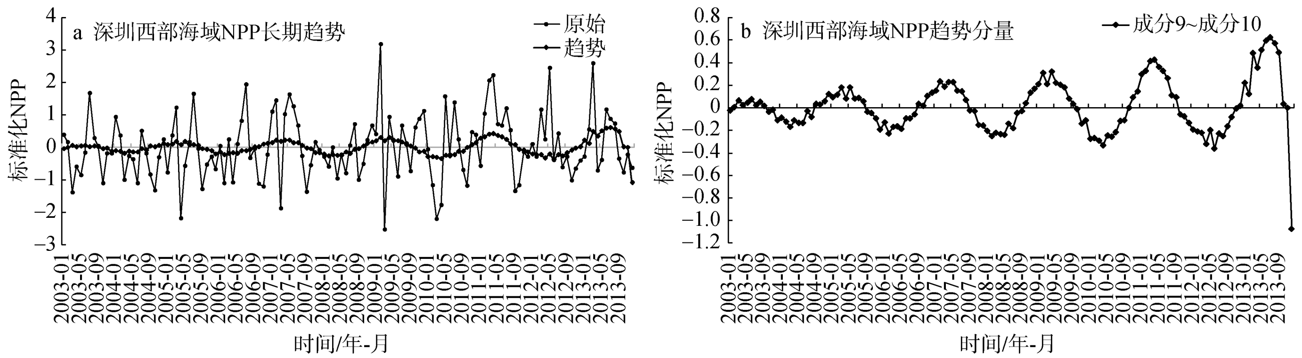

图6 深圳西部海域NPP长期趋势(a)与趋势成分(b)

Fig. 6 Long-term trend (a) and components (b) of the NPP in the Shenzhen west sea area

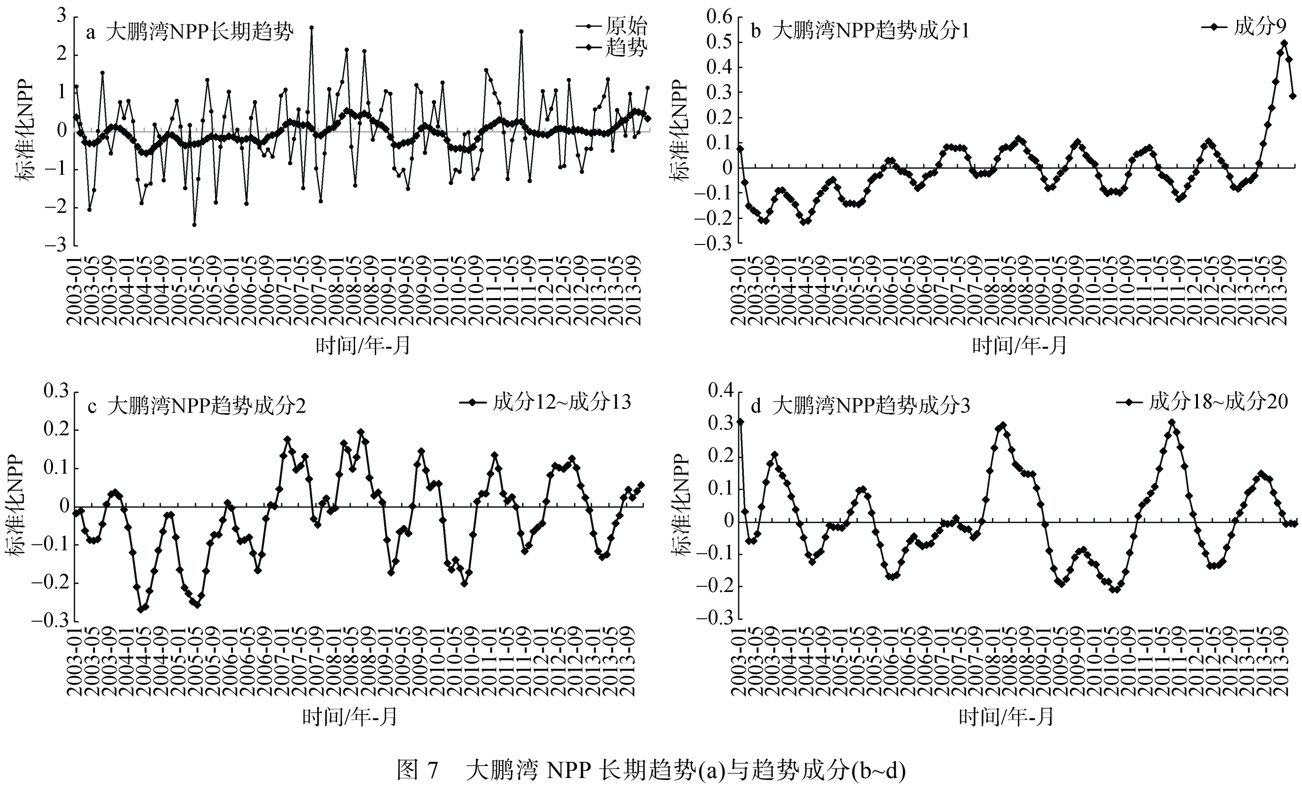

图7 大鹏湾NPP长期趋势(a)与趋势成分(b~d)

Fig. 7 Long-term trend (a) and components (b~d) of the NPP in Dapeng Bay

大亚湾长期趋势的波动变化与大鹏湾接近, 2003~2006年NPP低于平均水平, 2008年NPP在均值附近波动, 2012年始趋势几乎平直。如图8所示, 趋势成分7~成分11叠加显示的趋势更贴近整体趋势, 趋势成分14显示波动周期约28个月, 趋势成分25显示自2004年6月始波动周期约15个月。

3.3 标准化NPP时间序列的周期振荡特征

深圳西部海域NPP呈现明显双周期变化, 存在夏季(6~7月)和冬季(12~1月)两个季节高峰(图9)。2003年1月~2007年6月, 其季节高峰为7月和1月, 自2007年6月开始季节高峰波动转换为6月和12月。如图10所示, 大鹏湾NPP的周年变化呈“W”

型波动变化存在夏季主高峰(7 月)和冬季次高峰(12 月)。周期成分 1~成分 4 显示 NPP 以年为周期存在夏季高峰和冬季次高峰，每年 7 月达到 NPP 最大值。大亚湾也呈现稳定振幅的“W”型的周年变化，每年 1 月和 7 月达到正峰值(图 11)。周期成分 5 和成分 6 显示每年 1 月和 7 月达到峰值。因 SSA 识别出周期振荡成分一般为一对相邻重建成分之和，且二者特征值接近相等，频率接近，能解释原序列中频率为 1/12 时振荡方差的 2/3[11]。故周期成分 5~成分 6 已满足要求，在此不讨论周期成分 17。

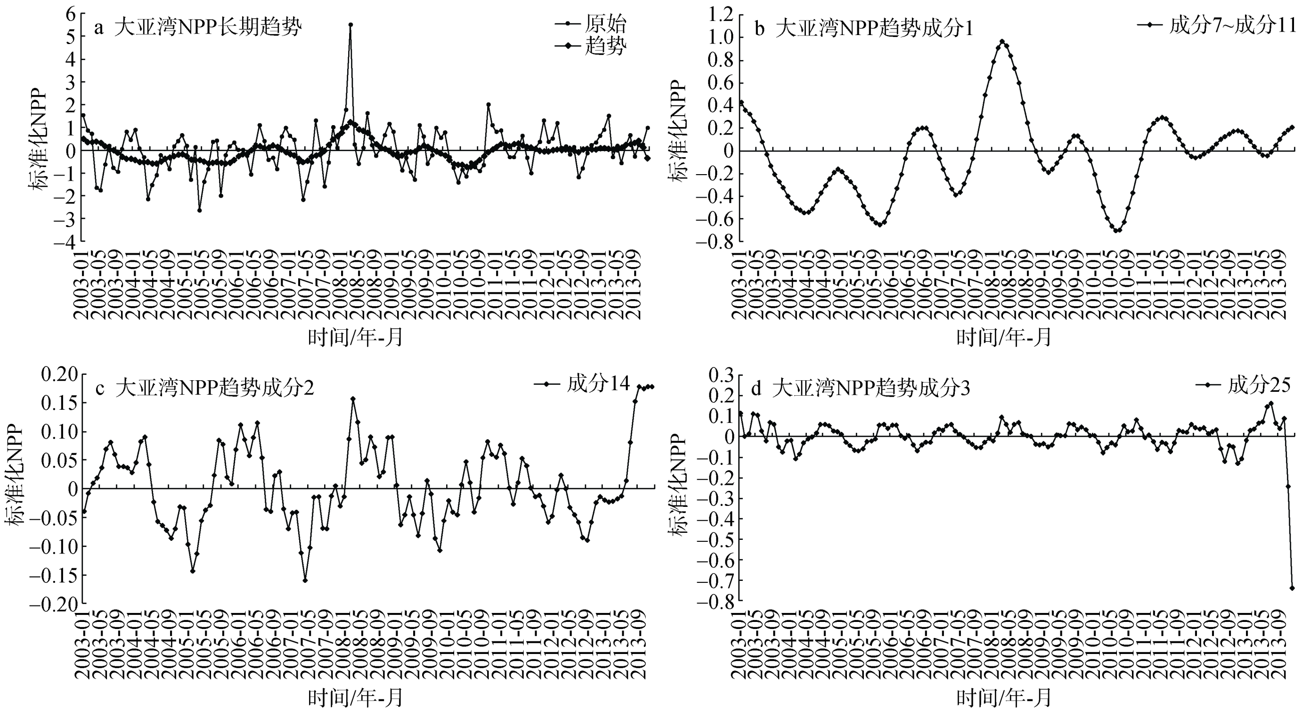

图 8　大亚湾 NPP 长期趋势(a)与趋势成分(b~d)

Fig. 8　Long-term trend (a) and components (b–d) of the NPP in Daya Bay

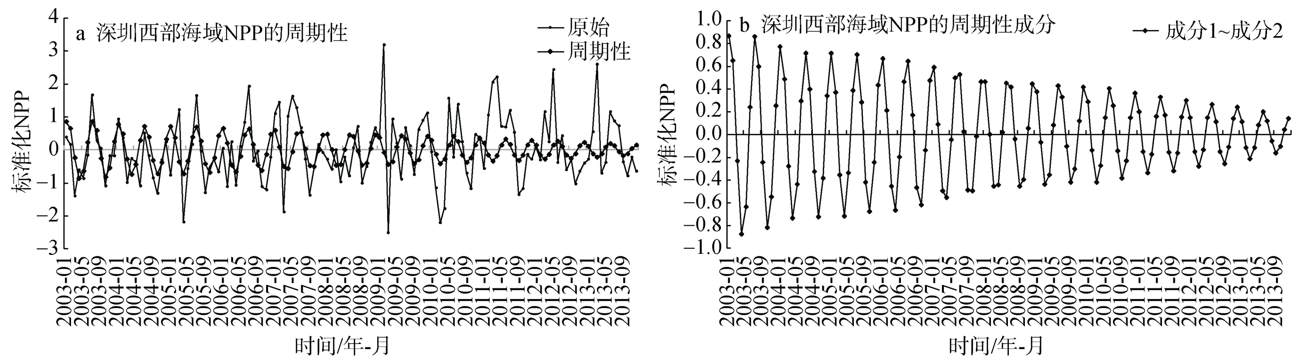

图 9　深圳西部海域 NPP 标准化时间序列的周期振荡特征

Fig. 9　Periodicity and components of the NPP in the Shenzhen west sea area

蔡昱明等[25]发现珠江口的叶绿素 *a* 浓度和 NPP 均是夏季高于冬季。蒋万祥等[26]认为珠江口表层叶绿素 *a* 浓度夏春季高于秋冬季，受光照与营养盐影响, NPP 夏秋季高于春冬季。宋星宇等[27]发现近年大亚湾大鹏澳水域氮磷比值不断升高，营养盐含量的变化可引起浮游植物群落结构的改变。丘耀文等[21]指出大亚湾夏秋冬季营养盐高于春季。于锡军等[28]认为大亚湾大辣甲水域叶绿素 *a* 浓度呈现夏、春、冬季高于秋季的特征。李敏[29]也发现南海表层叶绿素 *a* 浓度夏冬季高于春秋季。以往研究证实受营养盐限制，深圳近海叶绿素 *a* 浓度和初级生产力夏季和冬季高于其他季节。

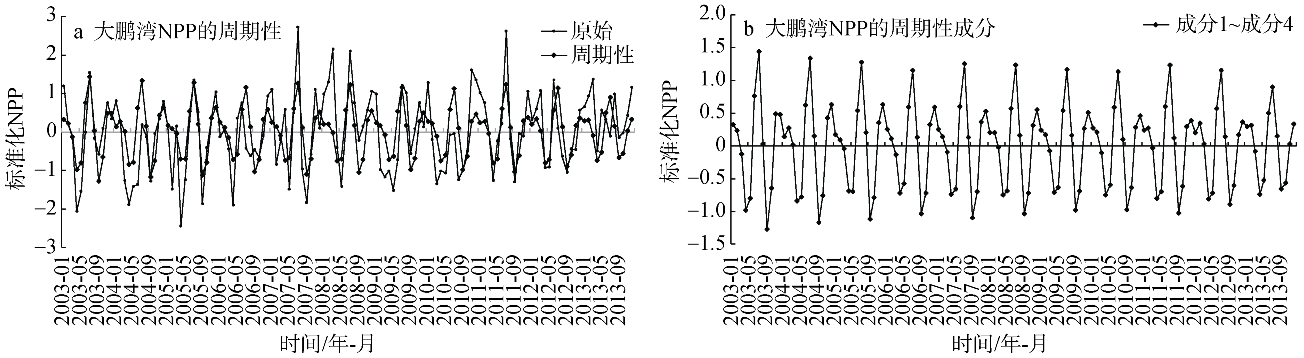

图 10　大鹏湾 NPP 标准化时间序列的周期振荡特征

Fig. 10　Periodicity and components of the NPP in Dapeng Bay

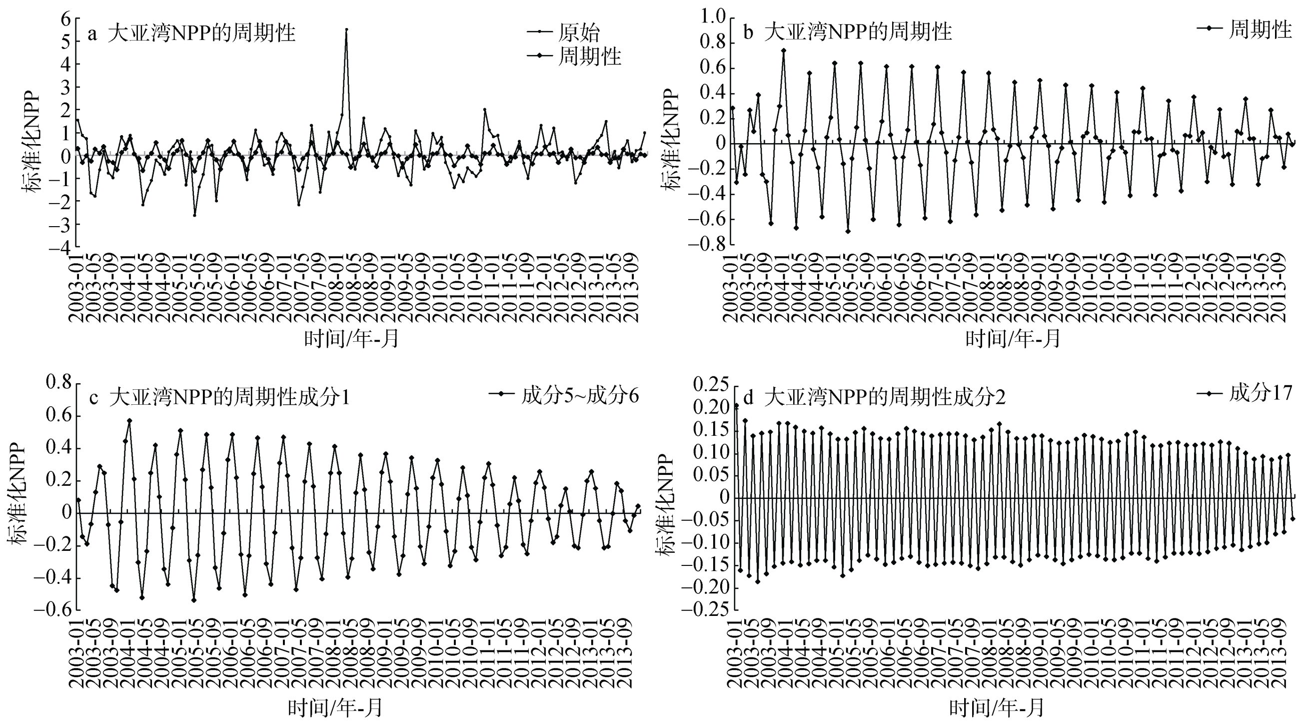

图 11　大亚湾 NPP 标准化时间序列的周期振荡特征

Fig. 11　Periodicity and components of the NPP in Daya Bay

深圳近海存在夏冬季节 NPP 高峰与次高峰的季节变化现象，从海表温度和营养盐角度看，冬季海表温度最低，上层水温度的降低会导致上层水的增密效应，导致上层水体不稳定[30]。且受冬季东北季风和气旋式环流的影响，使下层含丰富营养盐海水涌升，利于浮游植物生长，达到 NPP 次高峰。春季温度迅速升高，使海水层化稳定，风速减小亦不利于海水垂直混合，NPP 迅速降低。夏季海表温度达到极大值，海水层化稳定，但强西南季风和南海北部的上升流会加强海水垂直混合，且夏季陆表径流携丰富营养盐入海，浮游植物种类和数量增加，导致夏季 NPP 达到极大值。秋季东北季风控制下 SST 逐渐降低，利于海水垂直混合，NPP 先降后升。因此，海表温度会通过营养盐对叶绿素 *a* 浓度产生影响，进而影响 NPP 的时空分布。

4　结论

本文以 2003~2013 年月际尺度净初级生产力卫星遥感产品为数据源，对比了遥感产品和实测数据的整体变化趋势，并采用奇异谱分析提取标准化净初级生产力时间序列的长期趋势和周期振荡特征。

(1) 浮标监测数据与 MODIS 影像的叶绿素 *a* 浓

度、海表温度变化趋势基本一致，则在MODIS叶绿素 *a* 浓度、海表温度产品基础上通过VGPM模型得到的NPP时间序列产品可用于分析深圳近岸海域净初级生产力的变化趋势。

(2) 空间分布上，深圳西部海域的NPP和叶绿素 *a* 浓度远高于大鹏湾和大亚湾，大鹏湾和大亚湾的NPP和叶绿素 *a* 浓度均值及变化趋势非常接近。三个海区海洋参数在季风转换期变化剧烈。

(3) 长期趋势上，深圳西部海域整体呈现2 a周期波动趋势，在平均值附近以年为周期上下波动。大鹏湾和大亚湾2003~2006年NPP低于平均水平，2008年后NPP开始以年为周期在平均值上下波动，2012年后NPP整体与均值持平。

(4) 周期特征上，深圳西部海域、大鹏湾和大亚湾的NPP呈“W”或“M”型周年变化，存在夏季主高峰(6~7月)和冬季次高峰(12~1月)。三个海区的海表温度和光合有效辐射均值极为接近，以年为周期存在明显夏季高峰。

参考文献:

[1] 石洪华，王晓丽，郑伟，等. 海洋生态系统固碳能力估算方法研究进展[J]. 生态学报, 2014, 34(1): 12-22.
Shi Honghua, Wang Xiaoli, Zheng Wei, et al. Review of carbon sequestration assessment method in the marine ecosystem[J]. Acta Ecologica sinica, 2014, 34(1): 12-22.

[2] 黄良民. 珠江口水域叶绿素 *a* 和类胡萝卜素的周年分布[J]. 海洋环境科学, 1992, 2: 15-20.
Huang Liangmin. The yearly distribution of chlorophyll *a* and carotenoids in Pearl River Estuary[J]. Merine environmental science, 1992, 2: 15-20.

[3] Zhang X, Sun R, Zhang B, et al. Land cover classification of the North China Plain using MODIS_EVI time series[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2008, 63(4): 476-484.

[4] Canisius F, Turral H, Molden D. Fourier analysis of historical NOAA time series data to estimate bimodal agriculture[J]. International Journal of Remote Sensing, 2007, 28(24): 5503-5522.

[5] 范锦龙，吴炳方. 复种指数遥感监测方法[J]. 遥感学报, 2004, 8(6): 628-636.
Fan Jinlong, Wu Bingfang. A methodology for retrieving cropping index from NDVI profile[J].Journal of remote sensing, 2004, 8(6): 628-636.

[6] Jakubauskas M E, Legates D R, Kastens J H. Crop identification using harmonic analysis of time-series AVHRR NDVI data[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2002, 37(1-3): 127-139.

[7] 姜晓艳，刘树华，马明敏，等. 东北地区近百年降水时间序列变化规律的小波分析[J]. 地理研究，2009, 28(2): 354-362.
Jiang Xiaoyan, Liu Shuhua, Ma Mingmin, et al. A wavelet analysis of the precipitation time series in Northeast China during the last 100 years[J]. Geographical research, 2009, 28(2): 354-362.

[8] 邵晓梅，许月卿，严昌荣. 黄河流域降水序列变化的小波分析[J]. 北京大学学报：自然科学版，2006, 42(4): 503-509.
Shao Xiaomei, Xu Yueqing, Yan Changrong.Wavelet analysis of rainfall variation in the Yellow River Basin[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2006, 42(4): 503-509.

[9] 刘玉莲，吴洪宝，李栋梁，等. 哈尔滨气温增暖倾向和季节循环的年代际差异[J]. 冰川冻土, 2005, 27(5): 660-665.
Liu Yulian, Wu Hongbao, Li Dongliang, et al .The warming trend and interdecadal differentia of seasonal cycle of air temperature in Harbin[J]. Journal of Glaciology and geocryology, 2005, 27(5): 660-665.

[10] Shaban A, Telesca L, Darwich T, et al. Analysis of long-term fluctuations in stream flow time series: An application to Litani River, Lebanon[J]. Acta Geophysica, 2014, 62(1): 164-179.

[11] 贾铎，牟守国，赵华. 基于SSA-Mann Kendall的草原露天矿区NDVI时间序列分析[J]. 地球信息科学学报, 2016, 18(8): 1110-1122.
Jia Duo, Mu Shouguo, Zhao Hua. Analysis of NDVI time series in grassland open-cast coal mines based on SSA-Mann Kendall. Journal of Geo-information Science, 2016, 18(8): 1110-1122.

[12] 袁林旺，谢志仁，俞肇元. 基于SSA和MGF的海面变化长期预测及对比[J]. 地理研究, 2008, 27(2): 305-313.
Yuan Linwang, Xie Zhiren, Yu Zhaoyuan. Long-term prediction and comparison of sea-level change based on the SSA and MGF model. Geographical research, 2008, 27(2): 305-313.

[13] Morel A, Eacute, Berthon J F. Surface pigments, algal biomass profiles, and potential production of the Euphotic layer: relationships reinvestigated in view of remote-sensing applications[J]. Limnology & Oceanography, 1989, 34(8): 1545-1562.

[14] 李小斌，陈楚群，施平，等. 南海1998-2002年初级生产力的遥感估算及其时空演化机制[J]. 热带海洋学报, 2006, 25(3): 57-62.
Li Xiaobin, Chen Chuqun, Shi Ping, et al. Eatimation od primary production of South China sea from 1998 to 2002 by remote sensing and its spatio-temporal varia-

tion mechanism[J]. Journal of tropical oceanography, 2006, 25(3): 57-62.

[15] 贾艳红, 孙莹, 牛博颖, 等. 基于RS和GIS的黄海海区海洋初级生产力估算[J]. 淮海工学院学报(自然科学版), 2010, 4: 87-91.
Jia Yanhong, Sun Ying, Niu Boying, et al.Estimation of ocean primary productivity in the Yellow Sea based on remote sensing and GIS[J].Journal of huaihai institude of technology(natural and science edition) , 2010, 4: 87-91.

[16] 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, 58(4): 483-493.
Li Guosheng, Wang Fang, Liang Qiang, et al. Estimation of ocean primary productivity by remote sensing and introduction to spatio-temporal variation mechanism for the East China Sea[J]. Acta Geographica Sinica, 2003, 58(4): 483-493.

[17] 檀赛春, 石广玉. 中国近海初级生产力的遥感研究及其时空演化[J]. 地理学报, 2006, 66(11): 1189-1199.
Tan Saichun, Shi Guangyu. Remote sensing for ocean primary productivity and its spatio-temporal variability in the China Seas. Acta Geographica Sinica, 2006, 61(11): 1189-1199.

[18] 殷燕, 张运林, 时志强, 等. 基于 VGPM 模型和MODIS 数据估算梅梁湾浮游植物初级生产力[J]. 生态学报, 2012, 32(11): 3528-3537.
Yin Yan, Zhang Yunlin, Shi Zhiqiang, et al. Estimation of spatial and seasonal changes in phytoplankton primary production in Meiliang Bay, Lake Taihu, based on the Vertically Generalized Production Model and MODIS data[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(11): 3528-3537.

[19] Zhang Y L, Qin B Q, Liu M L. Temporal–spatial variations of chlorophyll a and primary production in Meiliang Bay, Lake Taihu, China from 1995 to 2003[J]. Journal of Plankton Research, 2007, 29(8): 707-719.

[20] 檀赛春. 真光层辐射特性及其对海洋初级生产力遥感的影响[D]. 北京: 中国科学院大气物理研究所, 2007.
Tan Saichun. Radiative properties of euphotic layer and their impacts on satellite remote sensing of ocean primary productivity [D].Beijing: Institute of Atmosphric Physics, Chinese academy of sciences, 2007.

[21] 丘耀文, 王肇鼎, 朱良生. 大亚湾海域营养盐与叶绿素含量的变化趋势及其对生态环境的影响[J]. 应用海洋学学报, 2005, 24(2): 131-139.
Qiu Yaowen, Wang Zhaoding, Zhu Liangsheng. Variation trend of nutrient and chlorophyll contents and their effects on ecological environment in Daya Bay[J]. Journal of oceanography in Taiwan Strait, 2005, 24(2): 131-139.

[22] 桓清柳, 庞仁松, 周秋伶, 等. 深圳近岸海域氮、磷营养盐变化趋势及其与赤潮发生的关系[J]. 海洋环境科学, 2016, 35(6): 908-914.
Huan Qingliu, Pang Rensong, Zhou Qiuling, et al. Variation trends of nitrogen and phosphorus and the relationship with HABs in Shenzhen coastal waters[J]. Marine Environmental Science, 2016, 35(6): 908-914.

[23] 王卫强, 朱秀华, 侯一筠. 气候态意义下的南海春季暖池[J]. 大气科学, 2005, 29(4): 565-572.
Wang Weiqiang, Zhu Xiuhua, Hou Yijun. The role of ocean dynamics in Spring Warm Pool of the South China Sea[J].Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 2005, 29(4): 565-572.

[24] Wu R, Hu W. Air-Sea Relationship Associated with Precipitation Anomaly Changes and Mean Precipitation Anomaly over the South China Sea and the Arabian Sea during the Spring to Summer Transition[J]. Journal of Climate, 2015, 28(18): 7161-7181.

[25] 蔡昱明, 宁修仁. 珠江口初级生产力和新生产力研究[J]. 海洋学报, 2002, 24(3): 101-111.
Cai Yuming, Ning Xiuren. Studies on primary production and new production of the Zhujiang Estuary, China[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2002, 24(3): 101-111.

[26] 蒋万祥, 赖子尼, 庞世勋, 等. 珠江口叶绿素 *a* 时空分布及初级生产力[J]. 生态与农村环境学报, 2010, 26(2): 132-136.
Jiang Wanxiang, Lai Zini, Pang Shixun, et al. Spatio-temporal distribution of chlorophyll a and primary productivity in the Pearl River Estuary. Journal of Ecology and Rural Environment, 2010, 26(2): 132-136.

[27] 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.
Song Xingyu, Wang Shengfu, Li Kaizhi, et al. Basic biological production and potential fishery production in Daya Bay[J]. Ecological Science, 2012, 31(1): 13-17.

[28] 于锡军, 黄道建, 郭振仁, 等. 大亚湾大辣甲水域叶绿素 *a* 及营养盐的垂直分布与季节变化[J]. 生态科学, 2013, 32(1): 78-83.
Yu Xijun, Huang Daojian, Guo Zhenren, et al. The vertical distribution and seasonal variations of chlorophyll a and nutrients content in Dalajia waters in Daya Bay[J]. Ecological Science, 2013, 32(1): 78-83.

[29] 李敏. 南海海洋叶绿素 *a* 时空分布及对季风变动响应的研究[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2009.
Li Min. A study on the spatial and temporal Chl-*a* distribution in the South China Sea and a response to the South China Sea monsoon[D]. Beijing: Chinese academy of meteorological sciences, 2009.

[30] 赵辉, 张淑平. 中国近海浮游植物叶绿素、初级生产力时空变化及其影响机制研究进展[J]. 广东海洋大

学学报, 2014, 1: 98-104.
Zhao Hui, Zhang Shuping. Review on spatial-temporal variation of china's offshore phytoplankton chlorophyll and primary productivity and their variation mechanism[J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2014, 1: 98-104.

Study of the time series of net primary productivity in Shenzhen coastal waters based on singular spectrum analysis

ZHANG Yan-nan[1, 2], WANG Jiu-juan[1, 2], DUAN Guang-tuo[1, 2], CHEN Jin-song[1, 2], YI Lin[1, 2]

(1. Center for Geospatial Information, Shenzhen Institution of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China; 2. Shenzhen Engineering Laboratory for Big Data Analysis and Application of Ocean Environment, Shenzhen 518055, China)

Received: Sep. 26, 2017
Key words: net primary productivity; singular spectrum analysis; time series; Shenzhen coastal waters

Abstract: Taking the monthly satellite remote sensing standard products of net primary productivity (NPP) as data source, we extracted the long-term trend and periodicity through automatic singular spectrum analysis. We determined that the chlorophyll *a* concentration and sea surface temperature of buoy data were consistent with that of the MODIS images. Moreover, the time series images of the MODIS NPP could be used for the analysis of the NPP in Shenzhen coastal waters. Spatially, the NPP and chlorophyll *a* concentration in Shenzhen coastal waters were higher than that in Dapeng Bay and Daya Bay, and the mean value and variation trend of the NPP and chlorophyll *a* concentration were closer between Dapeng Bay and Daya Bay. The marine parameters of the three sea areas significantly changed during the monsoon transition. In the long-term trend, a two-year periodic fluctuation around the mean value was detected in the Shenzhen west sea area. Meanwhile, the NPP was lower than the mean value from 2003 to 2006 in Dapeng Bay and Daya Bay. Moreover, the NPP fluctuated by a one-year period around the mean value after 2008 and almost equaled the mean value after 2012. In terms of the periodic characteristic, a double periodic oscillation with a summer peak in June and July and a winter peak in December and January was identified in the Shenzhen west sea area, Dapeng Bay, and Daya Bay.

(本文编辑: 李晓燕)