

引用格式: 洪恬林, 李云梅, 吕恒, 等. 基于MODIS数据的太湖浮游植物物候变化及其对水表面温度的响应[J]. 地球信息科学学报, 2020, 22(10): 1935-1945. [Hong T L, Li Y M, Lv H, et al. Patterns of phytoplankton phenology and its response to temperature of water surface in Lake Taihu based on MODIS data[J]. Journal of Geo-information Science, 2020, 22(10): 1935-1945.] DOI: 10.12082/dqxxkx.2020.200206

基于MODIS数据的太湖浮游植物物候变化及其对水表面温度的响应

洪恬林¹, 李云梅^{1*}, 吕恒¹, 孟斌², 毕顺¹, 周玲¹

1. 南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室, 南京 210023; 2. 生态环境部卫星环境应用中心, 北京 100094

Patterns of Phytoplankton Phenology and Its Response to Temperature of Water Surface in Lake Taihu based on MODIS Data

HONG Tianlin¹, LI Yunmei^{1*}, LV Heng¹, MENG Bin², BI Sun¹, ZHOU Ling¹

1. Key Laboratory of Virtual Geographic Environment of Education Ministry, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China

2. Ministry of Ecology and Environment Center of Satellite Application on Ecology and Environment, Beijing 100094, China

Abstract: Due to the influence of water temperature and nutrient concentration, phytoplankton phenology can reflect the growth of phytoplankton and the changes of lake ecosystem. Because of the serious eutrophication in Lake Taihu, the effect of water temperature on phytoplankton growth is more and more significant. Thus, it is of great significance to study the relationship between phenology and water temperature for understanding, controlling and improving the ecosystem of Lake Taihu. This study firstly calculated the phytoplankton phenology metrics and the Temperature of Water Surface (LSWT) by MODIS data from 2003 to 2018, and then explored the phenological characteristics of different regions by analyzing the temporal-spatial distribution variation of phytoplankton phenology. At last, the response of phytoplankton phenology to LSWT change was revealed by combining the LSTW and the phenological characteristics. The results showed that: ① Different phytoplankton phenological indexes had different spatial distribution characteristics. The number of blooms, the peak value of Chlorophyll a (Chla) concentration and the total duration of algal blooms showed a decreasing trend from the western coast to the center of lake; the dates when the phytoplankton began to grow and the Chla peak appeared were complex in the lake. However, the date was relatively early in the coastal area; ② Lake Taihu could be divided into four types of areas with different phenological characteristics. The Type I area was mainly located in Gonghu Bay, eastern coast and the central part of Lake Taihu, where the fluctuation of Chla concentration (50~60 $\mu\text{g/L}$) was gentle, the number of blooms was the lowest, the start date was the latest, and the duration was the shortest. Type II area was mainly distributed along the western coast, with the violently fluctuating Chla concentration (50~90 $\mu\text{g/L}$), the most frequent blooms, the earliest onset, and the longest duration. Types III and IV were the transition areas. The former was mainly distributed in Meiliang Bay, Zhushan Bay and their exits, while the latter was mainly located in the southern coast and central lake. ③ The response of phytoplankton phenology to LSWT changes was affected by the level of nutrients. When the nutrient

收稿日期: 2020-04-28; 修回日期: 2020-08-12.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB0503902)。 [**Foundation item:** National Key Research and Development Program of China, No.2017YFB0503902.]

作者简介: 洪恬林(1995—), 女, 江苏无锡人, 硕士生, 主要从事水环境遥感研究。E-mail: hestia945@foxmail.com

*通讯作者: 李云梅(1966—), 女, 云南澄江县人, 教授, 主要从事水环境遥感研究。E-mail: liyunmei@njnu.edu.cn

level was high, the promotion effect of LSWT on phytoplankton growth was more significant. The increasing trend of inter-annual LSWT had obvious influence on the advance of phytoplankton phenology and the increase of biomass. On the contrary, the effect of LSWT on the growth of phytoplankton was weakened.

Key words: Lake Taihu; MODIS image; phytoplankton; phenology; temperature of water surface; characteristics; temporal-spatial variation; response

***Corresponding author:** LI Yunmei, E-mail: liyunmei@nynu.edu.cn

摘要:浮游植物物候能够反映浮游植物的生长变化与湖泊生态系统的变化,水温、营养盐浓度等因素对物候有重要影响。太湖富营养化程度较高,水温的影响作用日趋显著,物候与水温关系的研究对理解、控制和改善太湖生态系统具有重要意义。本研究利用2003—2018年MODIS遥感数据计算浮游植物物候指标和湖泊水表温度(Temperature of Water Surface, LSWT),通过分析太湖浮游植物物候时空变化特点探究了不同区域的物候特征,并结合LSWT揭示了浮游植物物候对LSWT变化的响应关系。结果表明:①不同浮游植物物候指标具有不同空间分布特点,水华发生次数、峰值叶绿素a(Chla)浓度和水华总持续时间呈现由西部沿岸向湖心区递减的趋势;浮游植物生长开始时间和峰值Chla发生时间分布复杂但在沿岸区域相对较早;②太湖可被划分为4种具有不同物候特征的区域,Ⅰ类区域主要位于贡湖湾、东部沿岸以及太湖中部开阔水域,该区Chla浓度范围为50~60 $\mu\text{g/L}$,且波动平缓,水华发生次数最少、开始最晚、持续时间最短;Ⅱ类区域主要分布于太湖西部沿岸,Chla浓度范围为50~90 $\mu\text{g/L}$ 且变化剧烈,该区水华发生次数最多、开始最早、持续时间最长;Ⅲ和Ⅳ类属于过渡区域,前者主要分布于梅梁湾、竺山湾及入湾口,后者主要位于南部沿岸以及太湖中部;③浮游植物物候对LSWT变化的响应受营养水平影响,当营养水平较高时,浮游植物的生长受LSWT的促进作用显著,LSWT年际变化的升高趋势对浮游植生长物候提前、生物量增加的影响明显,反之,则LSWT变化对浮游植物生长的影响减弱。

关键词:太湖;MODIS影像;浮游植物;物候;水表温度;特征;时空变化;响应

1 引言

随着全球变暖的加剧和人类活动的影响,我国许多内陆湖泊富营养化进程加快,水华频繁发生,导致湖泊生态系统退化、水质恶化,严重影响了湖泊水资源利用、湖泊生态环境发展和社会经济发展^[1-4]。浮游植物作为湖泊生态系统的初级生产者,生长周期快,生物量和群落结构对环境变化敏感^[5],其物候呈现了在季节性环境变化下浮游植物生长繁殖的规律性变化,能够有效地反映浮游植物的生长和湖泊的生态条件,是湖泊生态系统对气候变化响应的重要参数,物候监测对理解、控制和改善湖泊生态系统具有重要意义。

浮游植物物候受到温度、养分、降水、风速等因素的影响,无论是物候变化还是影响因素都存在较大的时空异质性,传统监测方法样点有限,难以用于空间差异的分析,遥感数据则为物候时空变化的研究提供了重要的数据支撑。2009年以来,浮游植物物候遥感监测受到了学者的广泛关注,许多学者利用卫星反演的叶绿素a(Chla)浓度数据提取了浮游植物物候指标,实现了物候的遥感监测。常用方法有生长率法、阈值法、累积和法^[6]。学者们基于这些方法对许多区域的物候进行了研究。例如,Platt等^[7]

利用10年的Chla浓度时间序列数据研究了西北大西洋浮游植物生长的物候特征。Racault等^[8]利用遥传感测数据分析了全球海洋浮游植物物候在1998—2007年的变化。这些研究均表明物候在不同空间位置具有差异性,而适当的区域划分有助于空间分布特征的研究。

物候是环境综合作用的结果,国内外许多学者对浮游植物物候变化以及相应环境条件的作用也进行了探讨。例如,Lilian等^[9]研究了伊比利亚半岛沿岸水域浮游植物的各种物候指标的变化与水表温度、风速、混合层深度等参数的关系。Shi等^[10]探究了空气温度、风速、氮磷比等对浮游植物生长开始时间的影响。

太湖水域宽广,空间异质性强,是我国典型富营养化湖泊,徐祎凡等^[11]研究表明2010年太湖整体呈中营养状态,部分呈轻度富营养化状态,黄君等^[12]研究表明2010—2013年太湖整体处于轻度富营养化状态。在富营养化状态下,浮游植物异常增殖,极易发生水华,国内许多学者也对太湖水华进行了探究。例如,孔繁翔等^[13]探讨了太湖蓝藻水华的预防、预测和预警,张艳会等^[14]研究了太湖水华的时空分布特征。富营养化状态下营养盐对浮游植物生长的影响趋于饱和,水温的影响作用逐渐突出,研

究太湖浮游植物物候变化及其对温度的响应特征有助于理解气候变化对湖泊生态系统的作用,同时对湖泊生态灾害防治具有一定意义。

本文拟通过利用2003—2018年长时间序列MODIS遥感影像,提取太湖浮游植物的物候指标并反演湖泊水表温度(Temperature of Water Surface, LSWT),基于各物候指标的空间分布划分太湖湖区并分析不同区域物候特征,结合时间变化趋势分析LSWT对浮游植物物候的作用,从而揭示太湖不同区域浮游植物生长情况以及对LSWT的响应特征。

2 研究区概况、数据来源与研究方法

2.1 研究区概况

太湖(30°55'40" N—31°32'58" N, 119°52'32" E—120°36'10" E)是我国的第三大淡水湖,湖泊面积达到2427.8 km²,水深平均1.9 m,属于典型大型浅水湖泊。太湖由8块水域构成(图1),北部的3个大型湖湾:竺山湾、梅梁湾和贡湖湾,东部的典型湖湾东太湖,除此之外还包括东部沿岸、西部沿岸、南部沿岸和湖心区。竺山湾和西部沿岸区域从流入的河流中获取了大量养分,富营养程度较高;梅梁湾半封闭、风速低、水流缓慢,也呈现富营养化状态;贡湖湾连接着最大的湖泊出水口,且一半的水域被漂浮的植物和大型植被覆盖;东部沿岸以沉水植物为主;南部沿岸是浮游植物与大型植物的过渡区域;东太湖以沉水植物和水产养殖为主;而湖心区的光合作用则相对较弱^[15]。

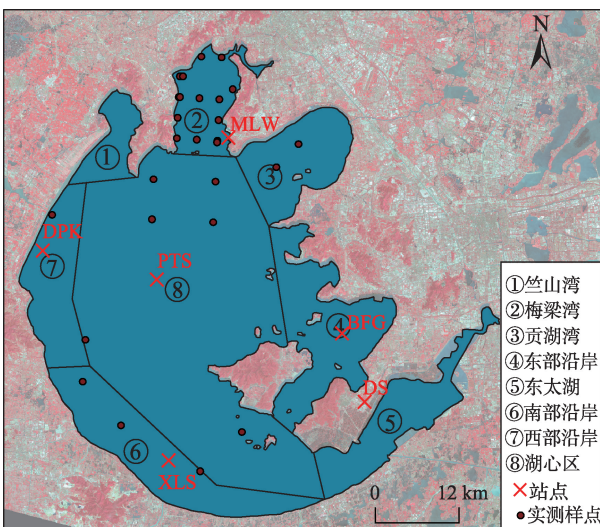


图1 太湖地理位置与样点分布

Fig. 1 Geographical location and in-situ samples of Lake Taihu

2.2 MODIS数据及预处理

本研究从NASA (National Aeronautics and Space Administration)的OceanColor数据网站(<https://oceancolor.gsfc.nasa.gov>)下载了太湖区域2003—2018年Aqua-MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) 5000多景0级原始数据,从中挑选了1150景少云、清晰的影像,并在SeaDAS v7.5 (SeaWiFS Data Analysis System version v 7.5)软件中处理为1级亮度温度产品和2级大气校正产品。

2.3 长时间序列Chla浓度和LSWT的计算

利用MODIS数据的645 nm和859 nm波段进行Chla浓度遥感估算,本研究直接采用Shi K等^[16]提出的模型系数,并利用29个与影像获取时间同步的野外实测样点(如图1所示,采样时间为2010-08-07和2016-07-22)进行模型验证,平均绝对误差百分比和均方根误差分别为22.24%和13.40 μg/L。LSWT的遥感估算采用覃志豪等^[17]提出的劈窗算法,利用太湖气象自动观测系统^[15]获得的站点水温数据对估算结果进行评价,站点分布如图1所示。用于验证的数据采样时间为2017-07-30, 2017-09-29, 2017-11-03, 2017-12-21, 2018-01-06, 2018-02-23, 2018-03-11和2018-04-28,平均绝对误差为0.916 K。

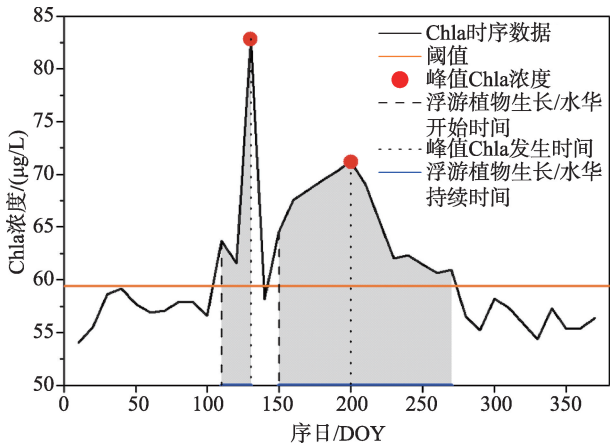
2个模型的验证结果精度较高,说明均适用于太湖区域。将2个模型通过IDL编程进行1150景MODIS影像的批量计算,为了后续匹配分析,Chla反演结果重采样至LSWT的1000 m。由于影像数量和云层覆盖影响,时序数据存在缺失值,因而需要进行平滑插值处理。首先以10 d为单位计算平均值,若10 d内存在缺失值,则忽略缺失值计算平均,若10 d均为缺失值则该10 d的平均值即为缺失状态。然后在Timesat软件中利用Roerink等^[18]提出的谐波插值方法补全缺失值,进而得到太湖长时间序列Chla浓度和LSWT数据。

2.4 浮游植物物候指标的提取

浮游植物的生长被定义为浮游植物生物量较正常水平大量增长的现象,因而物候指标能够通过Chla浓度的时序变化进行提取。本研究基于处理后的Chla浓度时序数据,采用阈值法计算浮游植物物候指标。

阈值法以高于浮游植物Chla浓度年中值的1%~30%作为阈值来计算物候指标,许多学者以5%为阈值^[19]。本研究中,若采用5%会出现阈值超出

Chla浓度范围的情况,经过对比,最终选择2%作为阈值,逐年逐像元地提取6种物候指标,分别为浮游植物生长开始时间、峰值Chla浓度、峰值Chla发生时间、水华发生次数、水华平均持续时间以及水华总持续时间,计算过程如图2所示。阈值线将年Chla时序数据折线划分为若干峰,每个峰即为一次浮游植物生长事件,峰的个数即为事件的次数,每个峰的起始即为该次事件开始的时间,每个峰的最高值即为该次事件的峰值Chla浓度,每个峰最高值所在的时间即为该次事件峰值Chla的发生时间,每个峰的长度即为该次事件的持续时间,平均持续时间和总持续时间即为所有事件持续时间的平均和总和。某次生长事件是否为水华事件则通过计算该次生长事件峰值Chla发生时间对应的NDVI是否大于0来判断。由于每次生长事件都会有对应的开始时间、峰值浓度以及峰值发生时间,按照每次生长事件峰值Chla浓度的高低对事件进行分级,浓度越高级别越高^[9],本研究计算的开始时间、峰值浓度以及峰值发生时间均为级别最高的生长事件所对应的值。



注:图中灰色区域表示浮游植物生长或水华持续的时间跨度。

图2 浮游植物物候指标的计算

Fig. 2 Calculation of phytoplankton phenology metrics

2.5 基于物候指标的太湖湖区划分方法

浮游植物的生长具有生态相关性,且物候指标能够反映浮游植物季节性循环状态,若以其为基础通过一定的规则将太湖分为具有独立特征的不同区域,则能够得到客观的具有生物学意义的太湖分区,这有助于理清浮游植物与多种环境因素之间的相互作用。本研究以上述6种物候指标作为基础利用聚类算法进行太湖湖区划分。由于每个像元每年有6个物候指标值,2003—2018共16年,因而每个像元有96个参数,数据维度即为96维。为了降低数据维度

并保证数据信息,利用主成分分析(PCA)方法将数据降至30维,然后将其结果作为输入参数利用Hard C-Means(HCM)聚类算法对输入数据集进行聚类分析^[20]。聚类时选择欧式距离的平方作为距离度量,聚类数量设为4,最后将太湖划分为4个区域。

3 结果及分析

3.1 太湖浮游植物物候指标的空间分布

图3—图8为2003—2018年太湖区域6种浮游植物物候指标的空间分布特征,图中的斜线阴影区域为植被和水产养殖区域,呈植被光谱,不属于本文研究范畴。图3为水华发生次数空间分布图,整体来看当全湖水华爆发面积较小时,水华爆发频次相对较低,如2003、2004、2009年。若某年水华爆发范围较大,则对应的水华爆发次数也较多,如2007、2008、2017年。空间上水华发生次数由沿岸向湖心递减。竺山湾、梅梁湾、西部沿岸和南部沿岸是水华的多发区域,其中西部沿岸最高达到5~6次,而贡湖湾以及湖心区域则较少发生水华。

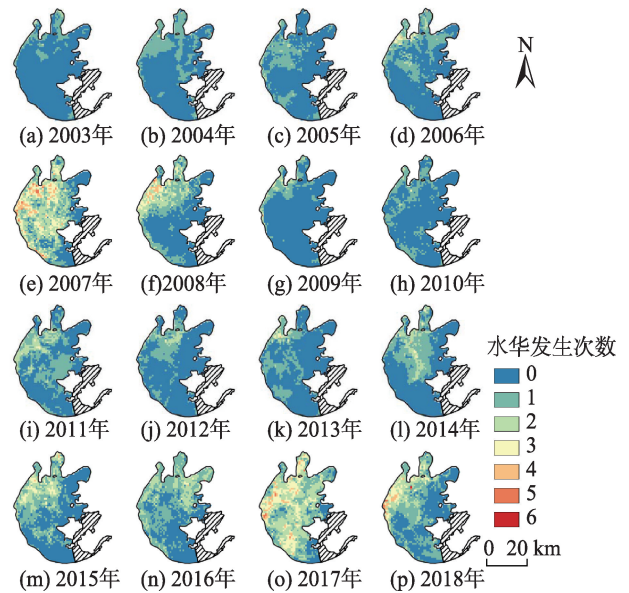


图3 2003—2018年太湖水华发生次数空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of the number of blooms in Lake Taihu from 2003 to 2018

图4展示了浮游植物生长开始时间的空间分布,为了便于直观分析,将其中的水华事件分离出,形成水华发生时间的空间分布(图5)。对于全湖来说,2008年和2016年水华开始时间较前几年出现了明显的提前。对于水华高发的太湖西岸区域,其水华开始时间相对较早,越往湖心水华开始时间越

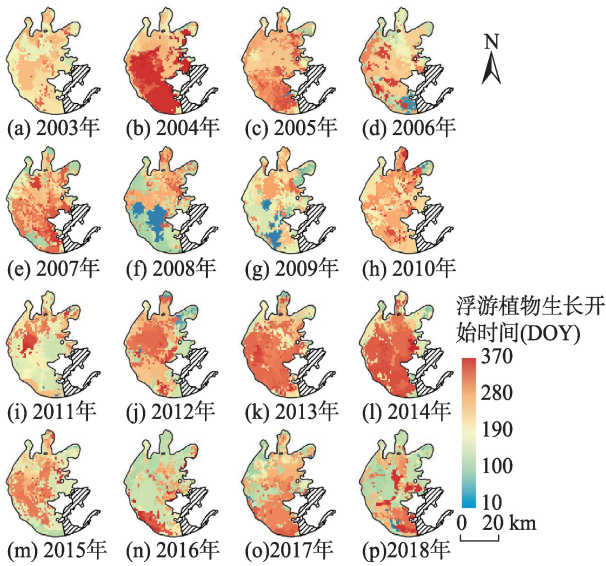


图4 2003—2018年太湖浮游植物生长开始时间空间分布
Fig. 4 Spatial distribution of phytoplankton growth start date in Lake Taihu from 2003 to 2018

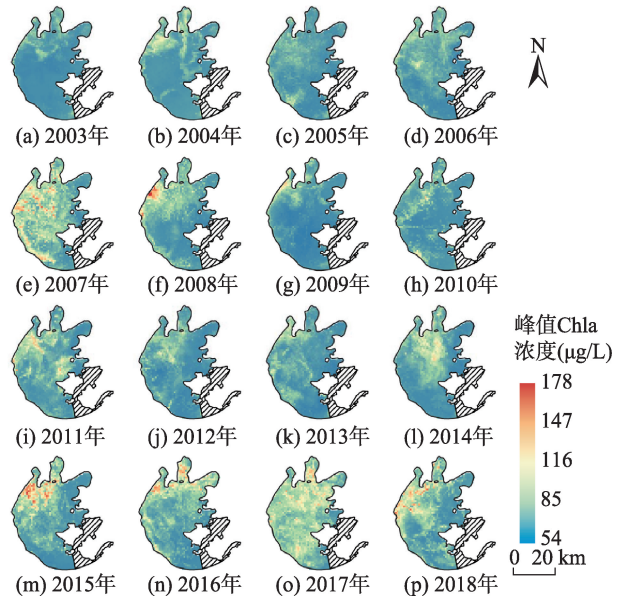


图6 2003—2018年太湖峰值Chla浓度空间分布
Fig. 6 Spatial distribution of chl a concentration peak in Lake Taihu from 2003 to 2018

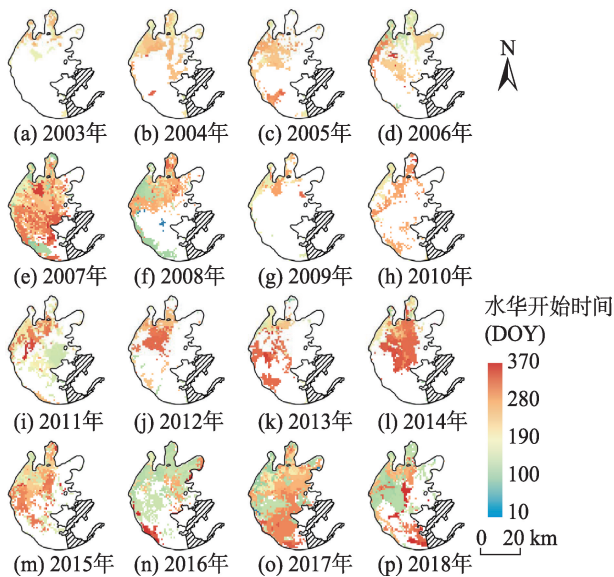


图5 2003—2018年太湖水华开始时间空间分布
Fig. 5 Spatial distribution of bloom start date in Lake Taihu from 2003 to 2018

晚。非水华事件的开始时间与水华事件的开始时间一般在空间上没有明显的界限,也没有明显的时间差。峰值Chla发生时间的空间分布与生长开始时间的分布类似,时间整体有所延后。

太湖峰值Chla浓度空间分布的高值区和低值区(图6)与水华发生频次高低的分布(图3)相似。水华发生次数较多的区域其对应的峰值Chla浓度也较高,峰值Chla浓度高值一般出现在沿岸、梅梁湾或竺山湾。从沿岸向湖心,峰值Chla浓度呈降低趋势。

图7和图8分别为水华平均和总持续时间空间分布图。总持续时间呈明显的西部沿岸水域值较高,越往湖心值越低的分布趋势,而平均持续时间的空间异质性较弱,高值的分布不局限于沿岸区域。

3.2 太湖不同湖区浮游植物物候特征

图9为基于2003—2018年浮游植物物候指标的太湖湖区划分结果以及各区域平均年Chla浓度分布

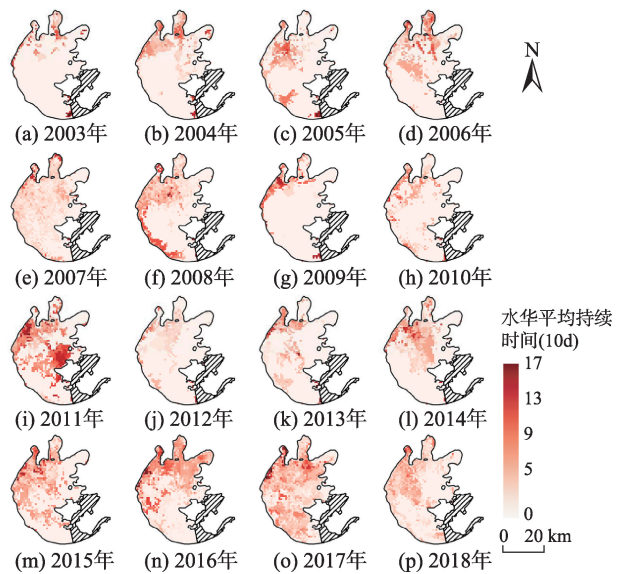


图7 2003—2018年太湖水华平均持续时间空间分布
Fig. 7 Spatial distribution of average bloom duration in Lake Taihu from 2003 to 2018

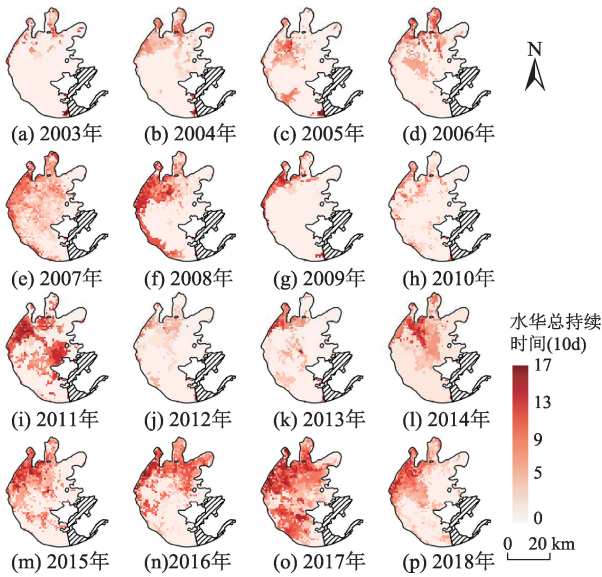
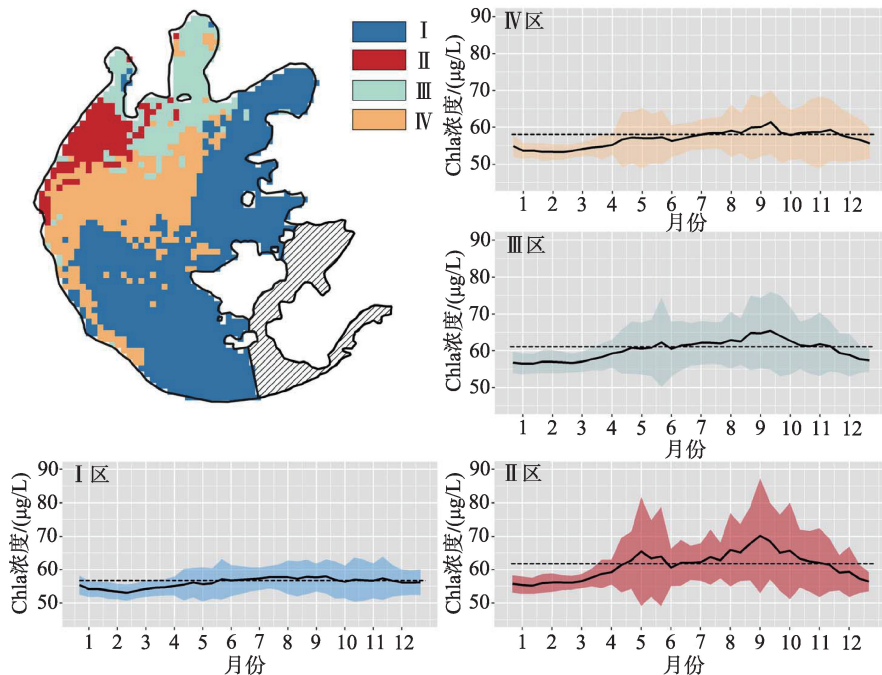


图8 2003—2018年太湖水华总持续时间空间分布
Fig. 8 Spatial distribution of total bloom duration in Lake Taihu from 2003 to 2018

结果, Chla 浓度大小表征了不同区域的营养水平状态, 其中的黑色实线为平均年 Chla 浓度, 黑色虚线为阈值, 彩色阴影区域为正负一个标准差的范围。从图9可以看出, 太湖共分为4类区域, 分别表示为 I、II、III 和 IV。第 I 类区域主要位于贡湖湾、东部沿岸

以及太湖中部开阔水域, 该区域整体 Chla 浓度较低, 浓度范围在 50~60 $\mu\text{g/L}$, 且波动平缓; 第 II 类区域主要分布于太湖西部沿岸, 该区域年 Chla 浓度范围变化剧烈, 浓度范围在 50~90 $\mu\text{g/L}$, 且呈现明显的双峰分布, 峰值位于 5 月和 9 月; 第 III 类区域主要分布于梅梁湾、竺山湾及入湾口, 第 IV 类区域主要位于南部沿岸以及太湖中部, 第 III 类区域整体 Chla 浓度略高于第 IV 类, 但 2 类区域年 Chla 浓度变化趋势较为类似, 且二者与第 I 类相比 9 月存在较为明显的 Chla 峰, 与第 II 类相比 5—6 月则没有明显的 Chla 峰。

由图 10 可知, 当发生水华时, 除了峰值 Chla 发生时间(4 类区域大致均在 9 月附近)外, 其余 5 种物候指标在 4 类区域间均有较为显著的差异。水华发生次数一般为 1~2 次, 其中 II 类区域最高, 该区域水体交换较慢, 营养盐易堆积, 容易形成水华, 水华发生次数不止一次。II 类区域相较于其他 3 类, 水华开始时间较早, 且集中于夏季(6—9 月), III、IV 类区域水华开始时间略迟于 II 类, I 类区域水华开始时间变化最大(6—11 月), 同时也是 4 类中最迟的。II 类区域水体营养盐最为充足, 在其他同等条件下更适宜藻类大量繁殖, 容易较早发生水华。水华发生时的峰值 Chla 浓度在 II 类区域最高, 大致为 80~105 $\mu\text{g/L}$, 其次为 III、IV 类区域, 浓度范围集中在 75~95 $\mu\text{g/L}$, I 类



注: 图中的斜线阴影区域为植被和水产养殖区域, 呈植被光谱, 不属于本文研究范畴。虚线表示阈值浓度即超过 Chla 浓度年中值 2%。

图9 基于 2003—2018 年浮游植物物候指标的太湖区域划分
Fig. 9 Regional division of Lake Taihu based on phytoplankton phenology metrics from 2003 to 2018

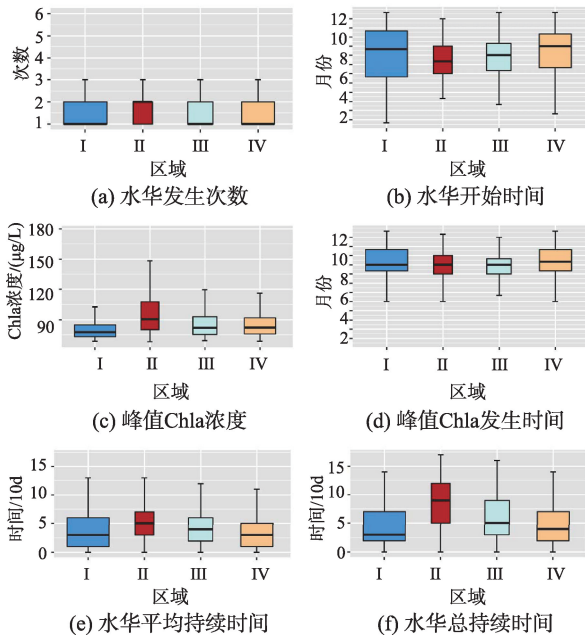


图10 太湖各区域不同浮游植物物候指标箱型图(水华事件)

Fig. 10 Box plots of different phytoplankton phenology metrics in various regions of Lake Taihu (blooming events)

区域浓度最低, 约在 75~85 $\mu\text{g/L}$ 范围内。水华平均持续时间和水华总持续时间这两个物候指标呈现与峰值 Chla 浓度类似的规律, 同样为 II 类区域持续时间最长, III、IV 类区域其次, I 类区域持续时间最短。由此可知, 水华的开始、爆发和消亡过程为藻类生物量累积到一定程度并自然减少的过程, 并非一蹴而就, 峰值 Chla 浓度越高, 需要积累的过程越长, 自然消亡的过程也越长, 对应的持续时间则越长。当不发生水华时(图 11), 各区域的峰值 Chla 浓度显著低于发生水华时的浓度, 区域间浮游植物生长开始时间和峰值 Chla 发生时间的差异相对减弱。

3.3 不同湖区浮游植物物候对 LSWT 变化的响应

通过比较太湖各区域物候指标与 LSWT 在时间上的趋势变化特征, 来分析不同湖区物候对 LSWT 变化的响应特点。图 12 展示了浮游植物生长开始时

间、峰值 Chla 发生时间和峰值 Chla 浓度 3 种物候指标与 LSWT 年际变化的关系, 其中实线和虚线分别表示水华事件和非水华事件。整体来看, LSWT 的年际变化在不同区域趋势相似, 数值高低不同, I 区值最高, II 区值最低, III 和 IV 区较为接近; II、III 区水华事件和非水华事件下浮游植物生长开始时间和峰值 Chla 浓度发生时间变化趋势较为一致, I、IV 区非水华事件的物候时间则波动更为明显; 水华事件的峰值 Chla 浓度显著高于非水华事件, 虽然二者变化趋势相近, 但水华事件下的变化幅度更剧烈。

从全湖来看, 浮游植物生长开始时间和峰值 Chla 发生时间的变化趋势与 LSWT 年际变化大致呈负相关, 表现为温度升高时间提前, 这是由于温度的升高会加速浮游植物的生理过程, 促进其营养吸收和呼吸作用, 加快浮游植物生长, 从而导致其物候提前^[21]。峰值 Chla 浓度与 LSWT 的变化几乎一致, 2003—2018 年整体呈增长趋势, 二者在 2007 年和 2017 年均出现了小范围的极值。全湖平均物候指标与 LSWT 的关系体现了 4 个区域共性的变化特点, 同时不同区域也呈现出个性的特征。对 I 区来说, 该区域的物候时间与 LSWT 年际变化趋势的负相关性最弱, 峰值 Chla 浓度的变化幅度最平缓; II 区则呈现与 I 区相反的规律, 物候时间与 LSWT 的负相关性最强且浓度的波动性最强; III 区和 IV 区则处于二者之间。总结来说, LSWT 的升高趋势会导致浮游植生长物候提前、生物量增加, 该规律在 II 区这种营养水平较高的湖区表现显著, 在 I 区这种营养盐水平相对较低的湖区表现较不显著。

LSWT 的年际变化会对浮游植物物候趋势产生作用, 同时每年的物候又是该年环境变化的综合体现, 以下通过分析浮游植物物候指标与 LSWT 年度变化的关系(图 13 和图 14), 进一步分析物候对 LSWT 的响应特点。图 13 和图 14 分别直观地展示了不同区域水华事件和非水华事件的 LSWT 年度变化情况以及每年 LSWT 最高值出现的时间, 同时

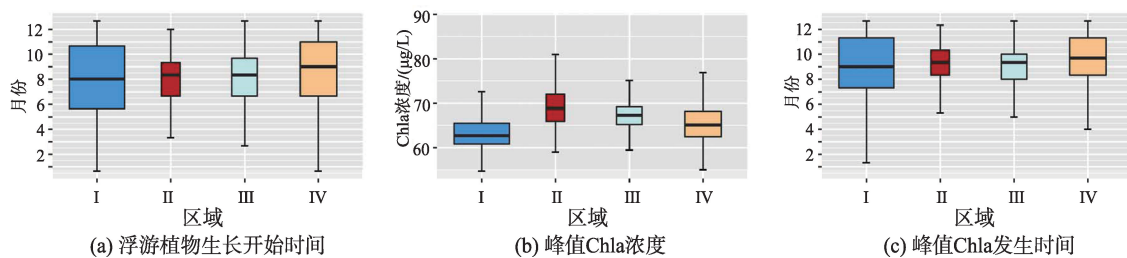


图11 太湖各区域不同浮游植物物候指标箱型图(非水华事件)

Fig. 11 Box plots of different phytoplankton phenology metrics in various regions of Lake Taihu (non-blooming events)

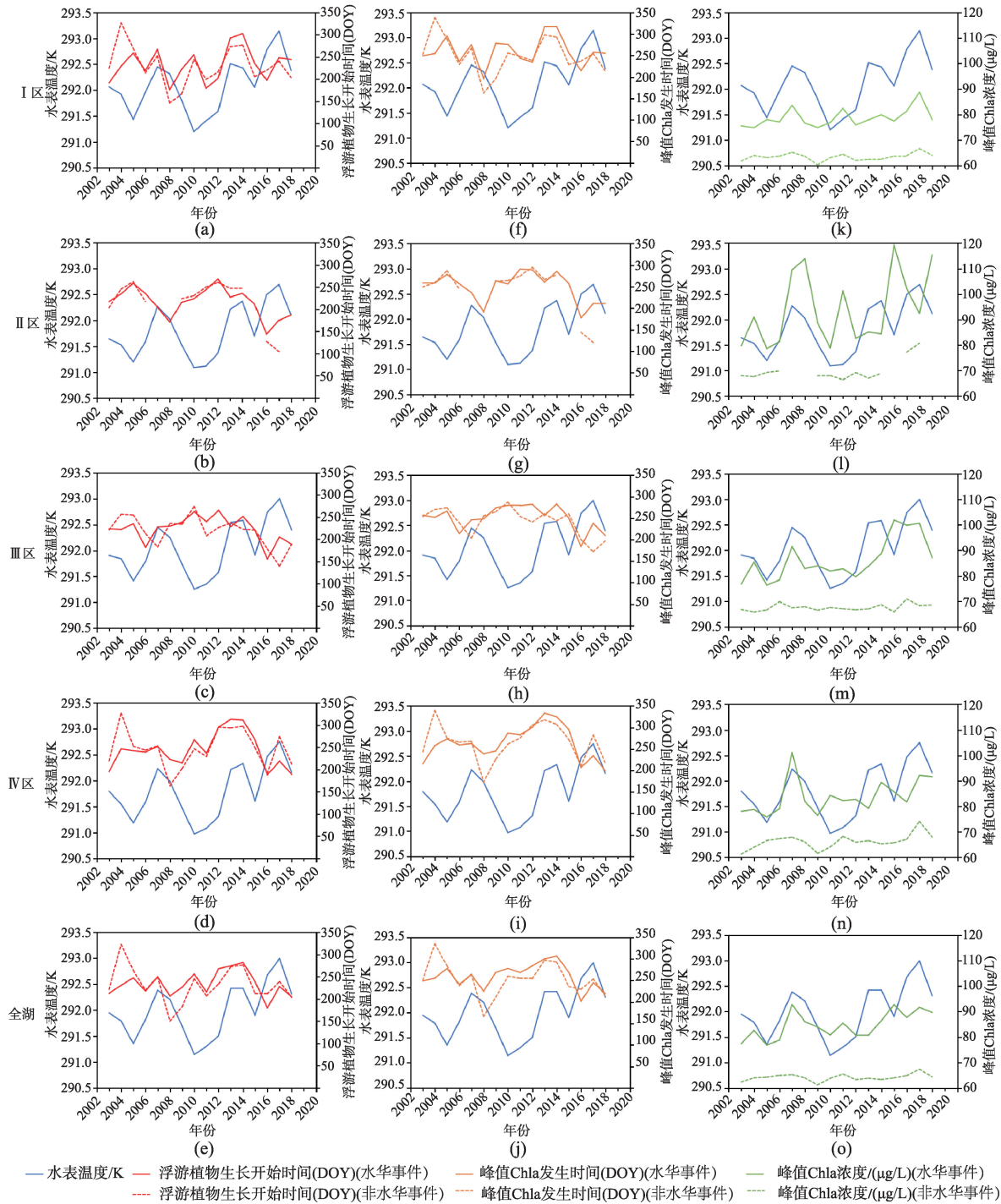


图 12 2003—2018年3种物候指标(浮游植物生长开始时间、峰值Chla发生时间、峰值Chla浓度)及对应LSWT均值变化
 Fig. 12 Line chart of three phenology metrics (phytoplankton growth start date, peak Chla occurrence date, Chla concentration peak) and corresponding mean LSWT from 2003 to 2018

均叠加了与时间相关的物候指标(浮游植物生长开始时间和峰值Chla发生时间)。

整体来看,LSWT的高值一般稳定在每年第210~230 d(7月、8月),不同区域每年出现最高温的时间略有差别,这体现了LSWT的空间异质性。浮

游植物生长开始时间与峰值温度时间有所交错,而峰值Chla发生时间一般迟于峰值温度。

当发生水华时,I区水华开始时间在峰值温度时间前后波动较大,I区位于太湖的开阔湖心区,即使温度达到浮游植物适宜生长的情况,营养盐等

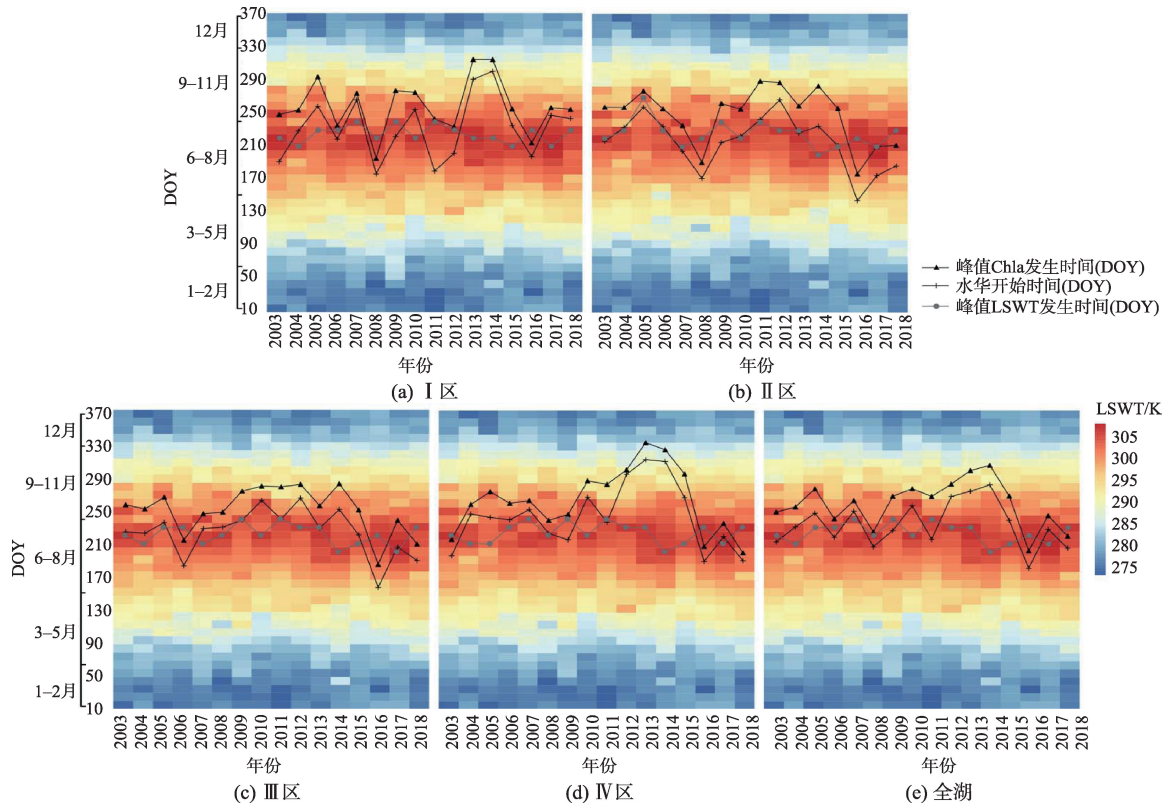


图 13 2003—2018年LSWT下的水华开始时间和峰值Chla发生时间(水华事件)

Fig. 13 Bloom start date and peak Chla occurrence time under LSWT from 2003 to 2018 (blooming events)

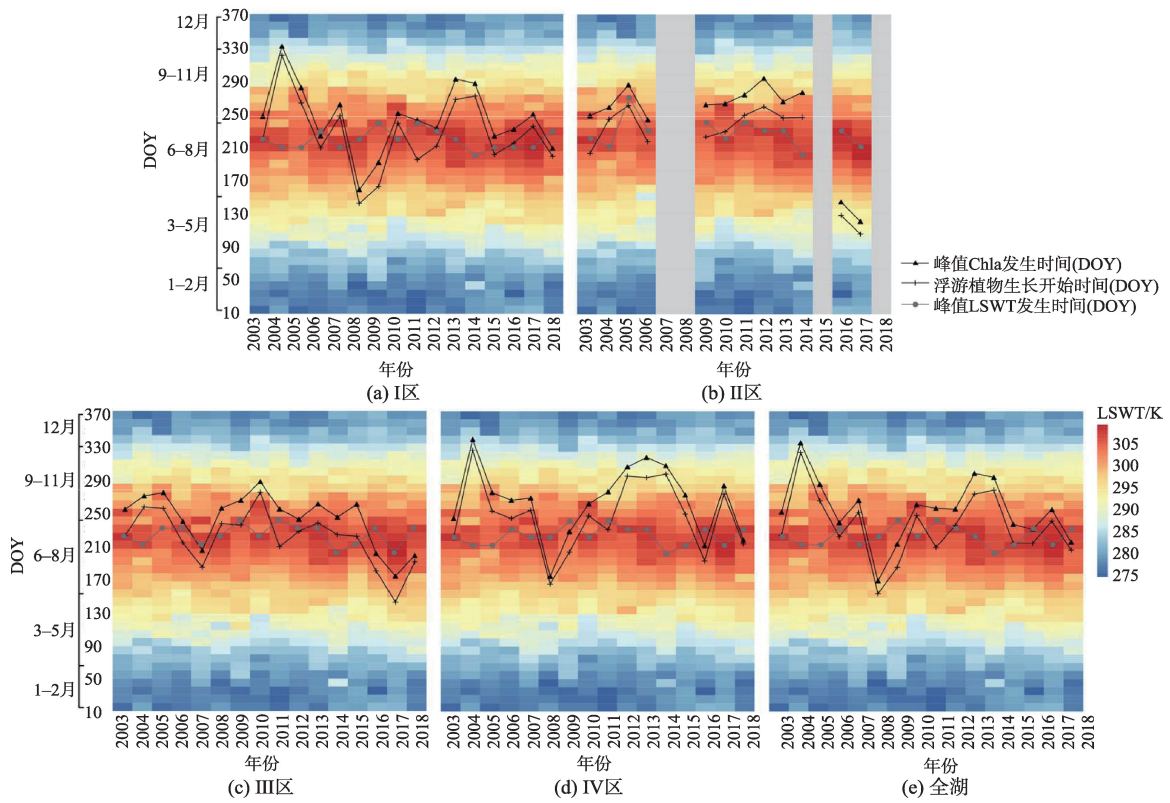


图 14 2003—2018年LSWT下的浮游植物生长开始时间和峰值Chla发生时间(非水华事件)

Fig. 14 Phytoplankton growth start time and peak Chla occurrence time under LSWT from 2003 to 2018 (non-blooming events)

条件的限制依旧会阻碍浮游植物的生长。Ⅱ区水华开始时间一般都处于该年LSWT峰值的附近,其中2008、2016、2017和2018年由于营养盐大量输入导致水华频发,水华开始时间明显早于温度的峰值时间。Ⅱ区营养水平最高,浮游植物的生长受温度的主导作用加强,但营养盐异常增加同样会导致浮游植物提前大量繁殖。Ⅲ区和Ⅳ区作为过渡区域,变化特点分别与Ⅱ区和Ⅰ区类似。

非水华事件相较于水华事件,不同湖区LSWT的差异较小,但每个湖区物候时间相对于LSWT峰值时间的上下波动幅度更大,说明当没有水华发生时,温度对浮游植物的生长作用有限,主要还是受到营养盐、风速等因素的影响,风速通过影响浮游植物的上浮聚集增加了整体的变异性。总的来说,当营养盐充足的情况下,LSWT是浮游植物生长的重要因素,但当温度适宜,营养盐则成为主导因素,二者相辅相成,共同作用。

4 讨论

在浮游植物生长及物候研究方面,Shi等^[10]计算了2003—2017年太湖水华开始时间且研究指出其具有提前趋势,并通过与气温数据的线性拟合发现两者呈负相关关系,吴攀等^[21]通过室内实验研究,认为较高水温能够促进浮游植物对营养盐的吸收利用,从而促进其生长,这些研究的结论与本研究相似,在此基础上,本研究计算了包括水华开始时间的多种物候指标,从多角度表征了浮游植物生长情况,结合遥感反演的逐像元温度,探讨了不同湖区温度对浮游植物生长促进作用的区域差异性,更加准确地刻画了在不同营养水平湖区,浮游植物物候对温度变化的响应关系。研究成果所揭示的物候指标与水表温度的关联关系,可以为湖泊浮游植物生长趋势预测提供参考,结合气象预报,可以对水华可能发生的区域、时间等进行预测。

本研究涉及到多种数据与方法,以下因素有可能会对结果造成一定影响。①太湖水域光学特性复杂,单一Chla反演算法的计算结果可能存在一定的偏差。②物候指标的计算阈值是基于时序数据制定的,但是由于MODIS时序数据存在缺失,平滑的过程可能导致物候信息的提取存在偏差,未来可在缺失数据插补方面进行更深入的研究。③目前的研究将太湖划分为4种物候类型的湖区,随着水生态环境的变化,湖区数量和类型可能随之发生变化。

5 结论

基于MODIS遥感影像分析了太湖浮游植物物候时空变化特点,探究了不同区域的物候特征,并结合LSWT分析了浮游植物物候对LSWT变化的响应关系,主要得到以下结论:

(1)不同浮游植物物候指标的空间变化特点表现为:水华发生次数、峰值Chla浓度和水华总持续时间的高值一般分布于西部沿岸区域,梅梁湾与竺山湾次之,越往湖心区值越低;浮游植物生长开始时间和峰值Chla发生时间空间分布较为复杂,沿岸区域相对较早。

(2)基于浮游植物物候特征,太湖可以被分为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ和Ⅳ4类区域。第Ⅰ类区域主要位于贡湖湾、东部沿岸以及太湖中部开阔水域,该区年Chla浓度较低,波动平缓,浓度范围在50~60 μg/L,且水华发生次数最少、开始最晚、持续时间最短;第Ⅱ类区域主要分布于太湖西部沿岸,该区域年Chla浓度范围变化剧烈,浓度范围在50~90 μg/L,且水华发生次数最多、开始最早、持续时间最长;第Ⅲ类区域主要分布于梅梁湾、竺山湾及入湾口,第Ⅳ类区域主要位于南部沿岸以及太湖中部,这两类区域年Chla浓度范围分别为50~75 μg/L和50~70 μg/L,二者水华发生的次数、开始时间和持续时间都处于Ⅰ和Ⅱ之间。

(3)浮游植物物候对LSWT变化的响应表现为:在营养水平较高的Ⅱ类湖区,浮游植物的生长受LSWT的促进作用显著,LSWT年际变化的升高趋势对浮游植生长物候提前、生物量增加的影响更为明显;而在营养水平相对较低的Ⅰ类湖区,浮游植物的生长受LSWT的促进作用下降,LSWT年际变化的升高趋势对浮游植生长物候提前、生物量增加的影响减弱。浮游植物生长开始时间与峰值温度时间有所交错,而峰值Chla发生时间一般迟于峰值温度。

太湖是中国五大淡水湖之一,湖泊生态监测管控尤为重要,本研究利用MODIS遥感数据对太湖浮游植物物候进行持续16年的遥感监测,揭示了其时空规律及其与温度的响应关系,有利于发挥卫星遥感宏观性、周期性的优势,研究成果可为湖泊生态环境监管提供决策参考。

参考文献(References):

- [1] 成小英,李世杰.长江中下游典型湖泊富营养化演变过程及其特征分析[J].科学通报,2006(7):848-855. [Cheng X Y, Li S J. Eutrophication evolution process and character-

- istic analysis of typical lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. Chinese Science Bulletin, 2006(7):848-855.]
- [2] 秦伯强.我国湖泊富营养化及其水环境安全[J].科学对社会的影响,2007(3):17-23. [Qin B Q. Eutrophication of lakes in China and water environment safety[J]. Impact of Science on Society, 2007(3):17-23.]
- [3] 项文华,张玉超,林珊,等.湖泊水面温度遥感定量反演研究综述[J].四川环境,2011,30(6):116-122. [Xiang W H, Zhang Y C, Lin S, et al. Reviews on quantitative reconstruction of lake surface temperature using Remote sensing data[J]. Sichuan Environment, 2011,30(6):116-122.]
- [4] 王志强,崔爱花,缪建群,等.淡水湖泊生态系统退化驱动因子及修复技术研究进展[J].生态学报,2017,37(18): 6253-6264. [Wang Z Q, Cui Ai H, Miao J Q, et al. Research progress on the driving factors of freshwater lake ecosystem degradation and associated restoration techniques[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017,37(18):6253-6264.]
- [5] 邓建明,秦伯强.全球变暖对淡水湖泊浮游植物影响研究进展[J].湖泊科学,2015,27(1):1-10. [Deng J M, Qin B Q. A review on studies of effects of climate change on phytoplankton in freshwater systems[J]. Journal of Lake Sciences, 2015,27(1):1-10.]
- [6] Brody S R, Lozier M S, Dunne J P. A comparison of methods to determine phytoplankton bloom initiation[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2013,118(5):2345-2357.
- [7] Platt T, White Iii G N, Zhai L, et al. The phenology of phytoplankton blooms: Ecosystem indicators from remote sensing[J]. Ecological Modelling, 2009,220(21): 3057-3069.
- [8] Racault M-F, Le Quéré C, Buitenhuis E, et al. Phytoplankton phenology in the global ocean[J]. Ecological Indicators, 2012,14(1):152-163.
- [9] Krug L A, Platt T, Sathyendranath S, et al. Patterns and drivers of phytoplankton phenology off SW Iberia: A phenoregion based perspective[J]. Progress in Oceanography, 2018,165:233-256.
- [10] Shi K, Zhang Y, Zhang Y, et al. Phenology of phytoplankton blooms in a trophic lake observed from long-term MODIS data[J]. Environmental science & technology, 2019,53(5):2324-2331.
- [11] 徐祎凡,施勇,李云梅.基于环境一号卫星高光谱数据的大湖富营养化遥感评价模型[J].长江流域资源与环境, 2014,23(8):1111-1118. [Xu Y F, Shi Y, Li Y M. Eutrophication evaluation model of lake Taihu using hyperspectral data of HJ 1 satellite[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2014,23(8):1111-1118.]
- [12] 黄君,庄严,宋挺,等. 3S技术在太湖富营养化和蓝藻水华分布规律中的应用研究[J].环境污染与防治,2014,36(12):31-37,42. [Huang J, Zhuang Y, Song T, et al. Research on application of 3S technologies to analysis eutrophication and distribution of cyanobacteria blooms in Tai Lake[J]. Environmental Pollution & Control, 2014,36(12): 31-37,42.]
- [13] 孔繁翔,马荣华,高俊峰,等.太湖蓝藻水华的预防、预测和预警的理论与实践[J].湖泊科学,2009,21(3):314-328. [Kong F X, Ma R H, Gao J F, et al. The theory and practice of prevention, forecast and warning on cyanobacteria bloom in Lake Taihu[J]. Journal of Lake Sciences, 2009, 21(3):314-328.]
- [14] 张艳会,李伟峰,陈求稳.太湖水华程度及其生态环境因子的时空分布特征[J].生态学报,2016,36(14):4337-4345. [Zhang Y H, Li W F, Chen Q W. Spatial-temporal variance of the intensity of algal bloom and related environmental and ecological factors in Lake Taihu[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016,36(14):4337-4345.]
- [15] Lee X, Liu S, Xiao W, et al. The Taihu eddy flux network: an observational program on energy, water, and greenhouse gas fluxes of a large freshwater lake[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2014,95(10):1583-1594.
- [16] Shi K, Zhang Y, Zhou Y, et al. Long-term MODIS observations of cyanobacterial dynamics in Lake Taihu: Responses to nutrient enrichment and meteorological factors [J]. Scientific Reports, 2017,7:40326.
- [17] 覃志豪,高懋芳,秦晓敏,等.农业旱灾监测中的地表温度遥感反演方法——以MODIS数据为例[J].自然灾害学报,2005,14(4):64-71. [Qin Z H, Gao M F, Qin X M, et al. Methodology to retrieve land surface temperature from MODIS data for agricultural drought monitoring in China [J]. Journal of Natural Disasters, 2005,14(4):64-71.]
- [18] Roerink G, Menenti M, Verhoef W. Reconstructing cloud-free NDVI composites using Fourier analysis of time series[J]. International Journal of Remote Sensing, 2000,21(9):1911-1917.
- [19] Siegel D, Doney S, Yoder J. The North Atlantic spring phytoplankton bloom and Sverdrup's critical depth hypothesis[J]. Science, 2002,296(5568):730-733.
- [20] Macqueen J. Some methods for classification and analysis of multivariate observations[C]. Proceedings of the fifth Berkeley symposium on mathematical statistics and probability, 1967:281-297.
- [21] 张晨,来世玉,高学平,等.气候变化对湖库水环境的潜在影响研究进展[J].湖泊科学,2016,28(4):691-700. [Zhang C, Lai S Y, Gao X P, et al. A review of the potential impacts of climate change on water environment in lakes and reservoirs[J]. Journal of Lake Sciences, 2016,28(4):691-700.]
- [22] 吴攀,邓建明,秦伯强,等.水温和营养盐增加对太湖冬、春季节藻类生长的影响[J].环境科学研究,2013,26(10): 1064-1071. [Wu P, Deng J M, Qin B Q, et al. Effects of enhanced water temperature and nutrient concentration on algal growth in winter and spring season in Lake Taihu, China[J]. Research of Environmental Sciences, 2013, 26(10):1064-1071.]