

于兰芳, 吴 晓, 毕乃双, 等. 长江口叶绿素 a 年际变化及其对三峡大坝的响应[J]. 海洋地质前沿, 2020, 36(7): 56-63.

长江口叶绿素 a 年际变化及其对三峡大坝的响应

于兰芳¹, 吴 晓¹, 毕乃双¹, 刘京鹏², 王厚杰^{1*}

(1 中国海洋大学海洋地球科学学院, 海底科学与探测技术教育部重点实验室, 青岛 266100;

2 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266071)

摘 要:通过 SeaWiFS 和 MODIS 卫星数据获得 1997—2012 年长江口区域年均、月均叶绿素 a 浓度, 结合长江入海水沙资料, 研究长江口叶绿素 a 浓度变化与长江来水来沙的关系及对三峡建坝的响应。结果显示, 研究区在年均与月均尺度上, 长江口叶绿素 a 浓度与长江径流量均存在较好的线性关系 (判定系数分别为 0.72 和 0.89), 而与输沙关系较差, 说明径流携带溶解态营养盐对浮游植物的贡献大于泥沙颗粒吸附的颗粒态营养盐贡献; 三峡建坝后, 研究区年均叶绿素 a 浓度出现下降趋势, 月均叶绿素 a 浓度变化显示, 原本的春、夏季峰值出现了一个月左右的滞后期, 分析主要与建坝后较多枯水年份导致的春旱和三峡防洪前的排水以及夏季对洪峰的拦截有关; 虽然蓄洪排枯增加了枯水月份径流量, 但由于枯水月大多温度低、透光性差, 不利于浮游植物生长, 蓄洪排枯对枯水月份叶绿素影响不大, 洪水季由于削峰导致叶绿素浓度较建坝前降低, 因此, 三峡大坝建成后研究区总体年际叶绿素 a 浓度呈降低趋势。

关键词:长江口; 叶绿素 a; 长江入海水沙; 输沙量; 三峡大坝

中图分类号: P736.21

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2019.124

0 引言

河流是陆源物质 (如淡水、沉积物及营养物质等) 向海洋输送的主要途径^[1-2], 全球河流每年输入海洋的陆源物质约 200 亿 t^[3], 而其中的 N、P、Si 营养盐和其他无机碎屑、有机质等是海洋生态系统的物质能量来源^[4], 在全球生物地球化学循环中起着重要的作用^[5]。海水中的叶绿素 a 浓度是浮游植物现存量的重要指标, 实际可见于所有能进行光合作用的生物体, 叶绿素 a 浓度对于研究海洋生态系统初级生产力至关重要, 反映了水域初级生产者通过光合作用生产有机碳的能力, 是海洋生态系统研

究的重要内容^[6-7]。在海岸带生态系统中, 初级生产力受到河流输入、风、光及生物竞争等物理和生物地球化学因素混合作用的强烈影响, 且在全球范围内, 海岸带初级生产力对这些环境因素的响应存在巨大的差别^[8-10]。

长江是世界第 3 长河, 全长 6 300 km, 径流量、输沙量分别居世界第 5、第 4 位^[11], 是全球陆源物质重要的供应端元之一。近半个世纪以来, 以拦河筑坝、蓄洪排枯为典型的人类活动在流域内显著增强, 长江流域内主要支流上已修建了超过 50 000 个不同容量的大坝和水库, 在干流上更是有被称为世界第一大坝的三峡大坝于 2003 年正式开始蓄水, 此外还有水土保持、河道采砂等人为工程对不同时空尺度下的水文循环产生了强烈影响^[5]。已有许多学者深入研究了有关人类活动及三峡大坝投入运行后对下游径流、泥沙过程变化的影响^[3, 12-15], 但这些变化进而导致河口及毗邻近海生物地球化学循环和生态系统的调整, 仍需进一步的研究。

长江口位于北亚热带, 受控于亚洲季风, 四季分明且降水有明显的季节变化, 8 月、10 月至次年 2 月

收稿日期: 2019-05-22

资助项目: 国家自然科学基金 (41525021); 中国地质调查局项目 (DD20160137)

作者简介: 于兰芳 (1993—), 女, 在读硕士, 主要从事海洋地质方面的研究工作。E-mail: yulanfang@stu.ouc.edu.cn

* 通讯作者: 王厚杰 (1972—), 男, 博士, 教授, 主要从事海洋沉积动力学方面的研究工作。E-mail: hjwang@ouc.edu.cn

降水量少,而其他月份则形成春雨期、梅雨期和秋雨期 3 个雨季^[10,13]。降水量直接影响长江径流量及长江冲淡水在长江口及邻域的扩散,从而影响营养盐和盐度的分布,进一步对浮游植物的种类组成和分布产生影响^[16],目前,长江口仍然是磷(P)限制河口,硅藻类是长江口及邻近海域最重要的浮游植物^[16]。除营养盐外,温度、光照的强度以及海岸水动力环境都将对浮游植物的生长产生影响^[10]。长江口营养盐

来源主要为长江冲淡水,黄海沿岸流的影响微弱,黑潮及其分支台湾暖流对该区几乎没有影响^[17]。本研究区域(图 1)根据长江冲淡水扩散范围选择^[17-19],研究区叶绿素浓度数据反演自 SeaWiFS 和 MODIS 卫星数据(1997—2012 年),结合长江入海水沙通量,研究长江口叶绿素浓度在长时间序列上的变化与长江来水来沙的关系,探讨流域内最大的人为工程三峡大坝对长江口叶绿素 a 浓度产生的影响。

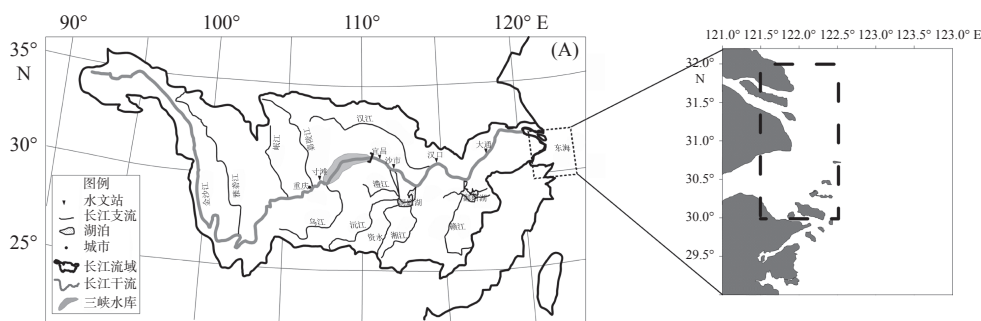


图 1 长江流域干流主要水文站与三峡库区 (A) 及研究区 (B) (据文献 [19] 修改)

Fig.1 The main hydrological stations in the Yangtze River Basin and the Three Gorges Reservoir area(A) and the study area(B)(modified from reference [19])

1 数据与方法

1.1 叶绿素浓度数据

本文使用的年际和月均叶绿素 a 数据(1997—2012 年)反演自 SeaWiFS 和 MODIS 卫星(<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov>)。叶绿素 a 浓度计算采用

O'Reilly 等^[20]1998 年提出的基本算法。此算法中通过对 919 个站点上 7 年的叶绿素浓度范围为 $0.02 \sim 32.79 \text{ mg/m}^3$ 的数据进行验证,得到了卫星数据和实测数据之间的良好判定系数($R^2=0.85$)。尽管沿海水域高悬沙导致的复杂光学特性会使遥感算法获得的叶绿素浓度偏高,但在中国海岸卫星数据与实测数据间的均方根(RMS)仍在可接受范围内^[21](图 2)。

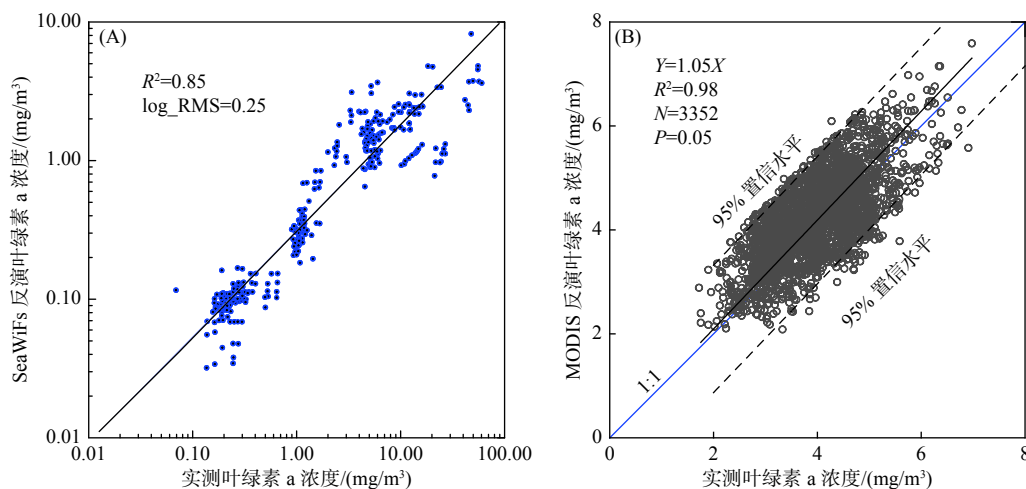


图 2 实测与卫星数据获取叶绿素浓度^[20] (A) 及 SeaWiFS 和 MODIS 卫星反演叶绿素 a 浓度^[10] (B) 的对比

Fig.2 Comparison between satellite-derived data and in-situ observed chlorophyll-a data^[20](A); Inter-comparison of chlorophyll-a datasets derived from SeaWiFS and MODIS^[10](B)

1.2 长江水沙数据

大通水文站(图1)是长江流域最下游的水文监测站,是海洋潮汐上涨所能达到的河流上界^[22],通常将大通站作为长江进入河口的控制站^[19]。1997—2012 大通站月均和年均径流量、输沙量及中值粒径数据取自中华人民共和国水利部编制的《中国河流泥沙公报》^[23](<http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/zghlnsgb/>)。

1.3 数据预处理

为补充由于云覆盖造成的数据缺失,本研究中 1997—2012 年的叶绿素 a 浓度是由 SeaWiFS 和 MODIS 卫星数据组成的数据集。SeaWiFS 和 MODIS 卫星测得叶绿素 a 浓度数据之间存在细小差异^[24],2 组卫星数据获得的月均叶绿素 a 浓度数据的散点图显示其具有很好一致性,判定系数 $R^2=0.98$ ^[10](图 2B)。所以,MODIS 卫星数据可以与 SeaWiFS 叶绿素浓度数据相结合来扩充研究的时间序列,并在前人的研究中得到了验证^[24]。从 MODIS

反演出的叶绿素 a 浓度(Y)与从 SeaWiFS 反演的浓度(X)拟合关系为 $Y=1.05X$ ^[10](图 2B)。

此外,在统一数据的基础上,对研究区(图 1B)叶绿素 a 数据进行空间平均,研究长江口叶绿素 a 浓度的年际变化和月际变化。

2 结果

2.1 长江口叶绿素 a 浓度年际变化与长江水沙变化关系

大通站观测数据(1997—2012 年)显示长江入海水沙通量整体呈逐渐降低趋势(图 3A),输沙量自 2003 年发生锐减,建坝前(1997—2002 年)年均输沙量为 3.18 亿 t,建坝后(2003—2012 年)年均输沙量只有 1.38 亿 t,下降 56.7%;而径流量在研究时间序列内大致可以分为 3 个阶段:1997—2002 年,维持在较高水平,平均年径流量为 9 792 亿 m^3 ,高于多年平均值(1950—2000 年)9 051 亿 m^3 ;2003—2009 年,平均年径流量为 8 025 亿 m^3 ,远低于多年平均

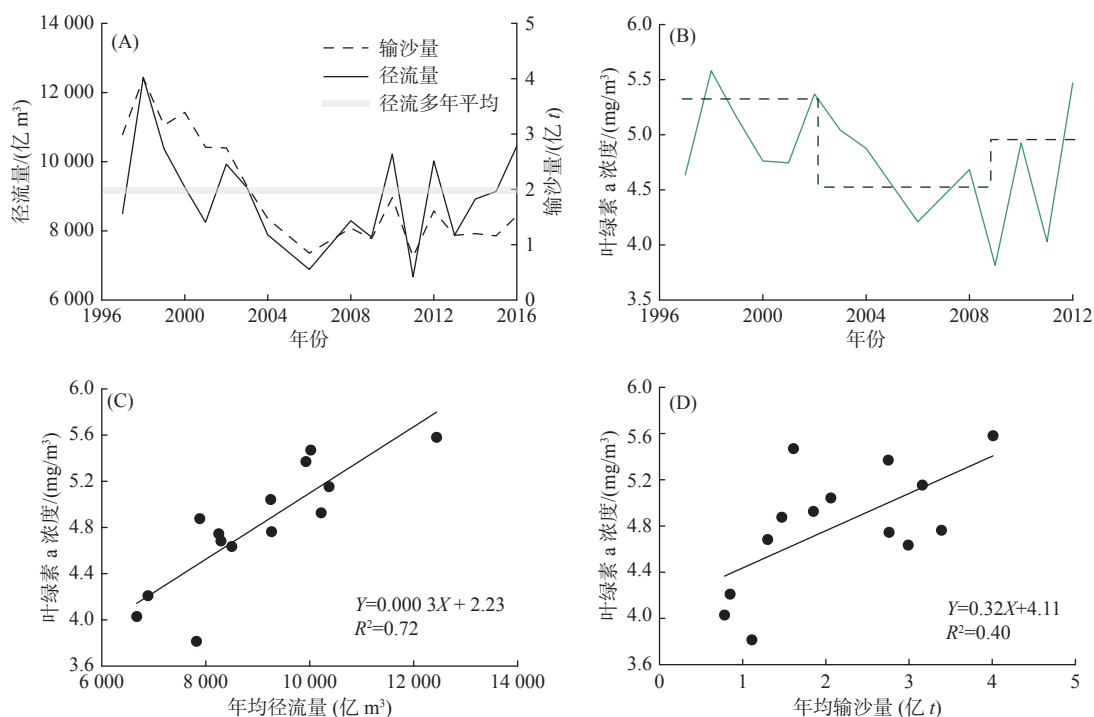


图3 大通站年径流与输沙年际变化(A)、研究区1997—2012年Chl-a浓度年际变化(B)以及Chl-a浓度与径流量(C)和输沙量(D)的线性相关性

Fig.3 The annual water discharge and sediment load recorded at station Datong(A)from 1997 to 2012, and the inter-annual variations of satellite-derived chlorophyll-a concentration of the study area(B), and the correlations of chlorophyll-a concentration with water discharge(C)and sediment discharge(D)

值;2010—2012 年,入海径流量有所回升,平均值为 8 970 亿 m^3 ,稍低于多年平均值,输沙量变化趋势与径流一致(图 3A)。研究区(图 1B)年均叶绿素 a 浓度变化与径流呈现相似的阶段性变化(图 3B),在三峡建坝前(1997—2002 年)的第 1 阶段年均叶绿素 a 浓度为 5.04 mg/m^3 ,第 2 阶段(2003—2009 年)年均叶绿素 a 浓度为 4.53 mg/m^3 ,而第 3 阶段(2010—2012 年)年均叶绿素 a 浓度为 4.81 mg/m^3 。

此外,研究区(图 1B)叶绿素 a 浓度年际变化与长江入海径流之间的存在较好的相关性, $R^2=0.72$ (图 3C)。相较于径流,年均叶绿素 a 浓度与输沙量的相关性较弱, $R^2=0.40$ (图 3D),而研究期内大通站泥沙的中值粒径只发生微弱波动并无明显变化趋势,平均值维持在 $10 \mu\text{m}$ 。

2.2 三峡建坝对长江口叶绿素 a 月均浓度的影响

三峡大坝的运行方式大致是每年的 5 月末至 6 月初,坝前水位降至汛期防洪限制水位 145 m;

6—9 月水库一般一直维持在 145 m 运行,径流接近自然状态,但是在某些洪峰来临时,为了防洪需要会拦蓄上游来水,过后下泄量增加,水位依然维持在 145 m;10 月水库蓄水,下泄量下降,水库水位上升到 175 m,蓄水时间大致为 2 个月;12 月至来年 4 月,根据发电需要下泄大量库区蓄水,但依然保持不低于 145 m 的最低水位^[25]。三峡工程前后大通站的月均径流量确实产生了一定的变化(图 4A),也改变了长江入海径流量的月均分配:对洪季(5—9 月)水沙有一定的拦截作用,对泥沙的拦截更甚;在蓄水期间(10—11 月)对水沙的拦截十分明显,大通站在这 2 个月的径流减少最大幅度可达 29%;而在枯季(12 月—次年 4 月),为了满足供电需求而增加库下流量,从而实现对径流的年内调控(图 4A)。大坝运行对长江入海水沙的改变进一步影响了长江口生物地球化学过程,通过建坝前后研究区(图 1B)月均叶绿素 a 浓度的变化率(图 4B)可以看出,叶绿素 a 浓度的月均分配产生了一定变化,

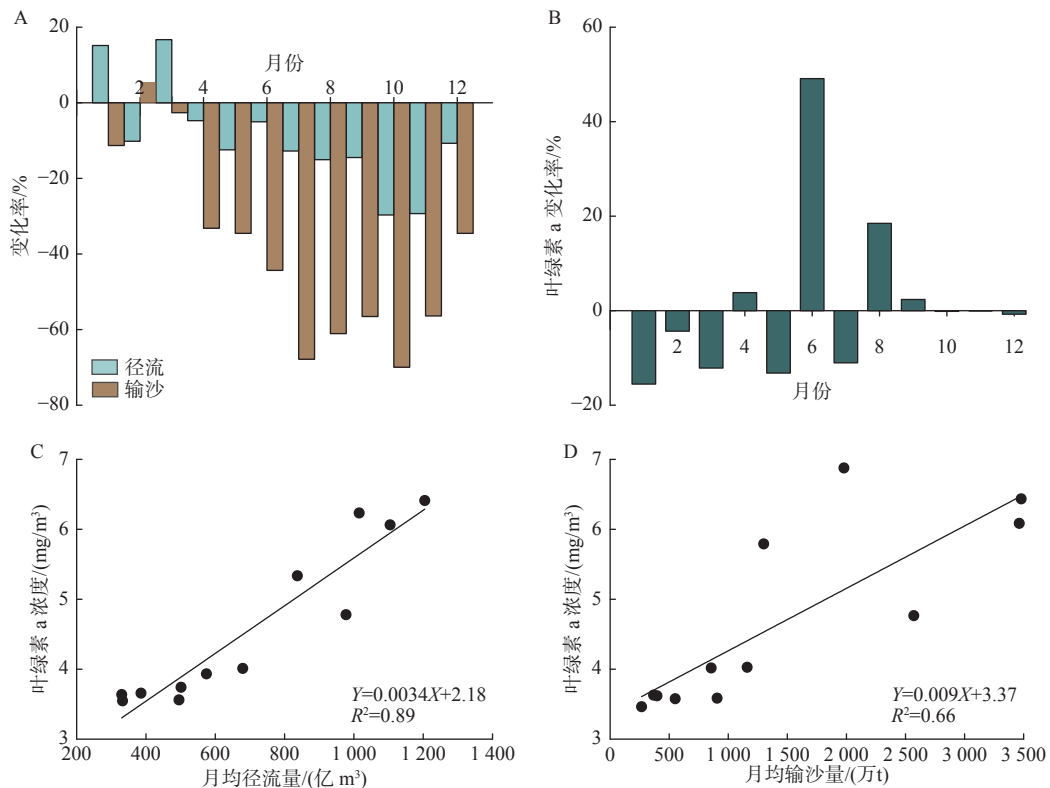


图 4 三峡建坝后大通站月均水沙变化率^[26-27] (A) 和 Chl-a 月均浓度变化率 (B) 以及月均径流量 (C) 和月均输沙量 (D) 与 Chl-a 月均浓度的线性关系

Fig.4 The change rate of monthly average water discharge^[26-27] (A) and monthly average chlorophyll-a concentration (B) at Datong station, the correlation of monthly average water discharge (C) and monthly average sediment discharge (D) with monthly average chlorophyll-a concentration

其中4、6、8、9月变化率为正值,其他月份则为不同程度的负变化率。

在研究时间序列内,大通站月均径流量与长江口月均叶绿素a浓度存在较好的线性关系 $R^2=0.89$ (图4C),较月均输沙量与叶绿素a浓度的相关性 ($R^2=0.66$)高(图4D),表明径流携带的营养物质更加显著影响了长江口浮游植物的发育程度。此外,叶绿素a高值也由建坝前5、7月出现峰值(分别为5.78、6.88 mg/m^3)变为6、8月出现峰值(分别为7.14、6.45 mg/m^3)(图5)。

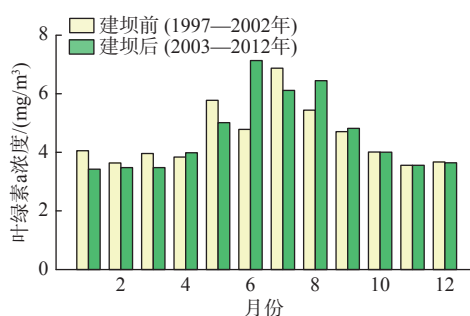


图5 三峡建坝前后月均叶绿素a浓度

Fig.5 The monthly average chlorophyll-a concentration before and after the Three Gorges Dam

3 讨论

3.1 入海水沙对长江口叶绿素a浓度的影响

海水中的营养盐主要指N、P、Si等元素的盐类,是浮游植物进行生命活动的物质基础。在近岸的浅海和河口地区,海水营养盐的含量与大陆径流的变化、温跃层的消长等有很大的关系^[16]。径流对磷营养盐的输送方式主要包括对溶解态磷(包括络合、整合溶解态)的输运以及径流携带悬浮细粒泥沙对颗粒态磷吸附解吸,其中部分溶解无机态营养盐可供浮游植物直接利用。由于三峡蓄水后对硅酸盐类拦截效应明显,而下游城镇居民区对磷有一定的补充,所以长江口N/P比增加了2倍以上,Si/N比降低了20%左右,虽然长江口海域浮游植物群落已经呈现出由硅藻向甲藻群落演变趋势^[28],但尚未出现潜在Si限制,且原本的P限制有所增强^[29],所以长江径流对P输送的研究仍是关键的。虽然长江水体中总磷(PP)以颗粒态为主,但长江径流可携带大量的溶解态磷酸盐入海,DIP输送通量约为

$529.1 \times 10^6 \text{ mol/a}$ ^[30],在不同季节的实测数据表明,研究区(图1B)溶解态总磷(DTP)是磷的主要存在形态,平均值可达62%~70%以上,PP只占约30%^[17]。DIP占DTP的比例因不同季节浮游植物的消耗程度不同而存在差异,通常介于13%~51%,但总体为表层出现最大值^[17,31],其分布及浓度特征受径流影响较大,体现为各形态磷在表层分布上与长江冲淡水呈双舌扩散的趋势大体相同^[17-18],且DIP浓度与盐度有很好的负相关性($R^2=0.61 \sim 0.80$)^[32]。

在研究区的研究时间序列内,年均叶绿素a浓度与大通站径流量相关性可达 $R^2=0.72$ (图3C),而与输沙量的相关性较差(图3D),说明了径流携带溶解态营养盐对浮游植物的贡献远大于泥沙颗粒吸附营养盐(PP)在河口通过固液界面作用释放所提供的部分。泥沙吸附颗粒态营养盐的影响因素主要有悬沙浓度、泥沙粒径以及温盐等。前人研究指出悬浮泥沙吸附溶解态磷(DP)的阈值浓度为0.2~1 g/L,当悬沙浓度>1 g/L时,对溶解态磷具有较强的吸附能力;而<1 g/L时,泥沙吸附的颗粒态磷会发生解吸^[33]。大通站观测数据显示多年悬沙浓度平均值仅为0.23 g/L,吸附能力较弱;且大通站泥沙中值粒径平均值为10 μm ,大于实验^[34]得出的吸附能力最佳粒径(<4 μm)。根据实验以及泥沙对磷吸附能力随粒径减小而增加可知,大通站泥沙吸附能力远<4 μm 泥沙的吸附能力^[34];且在研究时间序列内,三峡建坝拦截了大量泥沙,大通站观测到的悬沙浓度持续减小;除此之外,也与长江口是河流控制河口有关,泥沙在河口停留时间短,不利于营养物质释放,且河口絮凝作用使约50%的悬沙在口门附近淤落,在强大的潮流、河口余环流作用下底泥再悬浮,与上游悬沙形成最大浑浊带^[26,34]。

3.2 三峡大坝对长江口叶绿素a浓度的影响

年均叶绿素a浓度变化趋势,尤其是自2003年起,下降趋势与三峡大坝启用后径流变化趋势相近,也与长江口DIP下降趋势相符^[35]。而在特殊年份,三峡大坝对径流的拦截作用更明显,如2006年的枯水年份,在上游来水下降的情况下,为完成蓄水任务需延长蓄水时间(9月20日—10月28日)。2009年、2011年是次于2006年的枯水年份,蓄水时间分别为9月15日—11月24日、9月10日—10月

30 日,这将加剧减少径流向河口的营养盐输送。此外,实测营养盐浓度显示,2007 年长江口附近由于当年近岸排海及海水养殖输入导致磷酸盐营养过剩,秋冬季海水中 $\text{PO}_4\text{-P}$ 浓度可达 $0.6 \mu\text{mol/L}$,远大于往年的浓度范围 ($0.1 \sim 0.3 \mu\text{mol/L}$)^[27],夏季表、底层 DIP 浓度可达 $1.60 \mu\text{mol/L}$ ^[28],这是导致 2007 年出现叶绿素 a 高值的原因。

从建坝前后月均径流量变化率(图 4A)可以看出,12 月—次年 4 月径流量变化率平均值为 1.2%,5—9 月、10—11 月径流下降明显,变化率分别平均为 -11.9%、-29.5%,然而这样的变化并不完全是对三峡大坝的响应,径流受流域内降水影响很大。实际上,2003 年以来大部分年份长江流域降水量低于常年水平,平均比三峡工程前低 10% 左右^[36]。如此看来,5—9 月径流减少受降水减少影响较大,而 9—11 月则体现了大坝蓄水效应,正常年份三峡秋季蓄水对枯季的补给是十分可观的。三峡大坝运行时,为了汛期防洪,每年的 5 月末至 6 月初会排水以达到限制水位 145 m ^[25],相较于 5 月,6 月径流其实并没有减少(图 4A),加上较多枯水年份造成的春旱^[36],所以可能是导致春季叶绿素 a 峰值推后到 6 月的原因(图 5);而在 6—9 月虽然运行方式使径流近似天然状态,但常需要在下游防洪要求下蓄水,待洪峰过后再下泄,对 7 月洪峰拦截较多,而 8 月长江流域本就降水量少,所以相较于 7 月,8 月的径流减少更少,可能导致夏季叶绿素 a 在 7 月的峰值减小(图 5)。排枯月份(12 月—次年 4 月)虽然一定程度增加了径流,但由于温度较低、冬季水动力较强导致再悬浮降低透光性等原因,叶绿素 a 浓度并无增加趋势(图 4B)。

4 结论

本文主要通过 SeaWiFS 和 MODIS 卫星数据获得 1997—2012 年长江口区域年均、月均叶绿素 a 浓度,结合长江入海水沙资料,研究长江口叶绿素 a 浓度变化与长江来水来沙的关系及对三峡建坝的响应。

结果显示,研究区在年均与月均尺度上,长江口叶绿素 a 浓度与长江径流量均存在较好的线性关系(判定系数分别为 0.72 和 0.89),而与输沙关系较差,说明径流携带溶解态营养盐对浮游植物的贡

献大于泥沙颗粒吸附的颗粒态营养盐贡献;三峡建坝后,研究区年均叶绿素 a 浓度出现下降趋势,月均叶绿素 a 浓度变化显示,原本的春、夏季峰值出现了一个月左右的滞后期,分析主要与建坝后较多枯水年份导致的春旱和三峡防洪前的排水以及夏季对洪峰的拦截有关;虽然蓄洪排枯增加了枯水月份径流量,但由于枯水月大多温度低、透光性差,不利于浮游植物生长,蓄洪排枯对枯水月份叶绿素影响不大,洪水季由于削峰导致叶绿素浓度较建坝前降低,因此,三峡大坝建坝后研究区总体年际叶绿素 a 浓度呈降低趋势。

参考文献:

- [1] Walling D E, Fang D. Recent trends in the suspended sediment loads of the world's rivers[J]. *Global and Planetary Change*, 2003, 39(1/2): 111-126.
- [2] Meybeck M, Vörösmarty C. Fluvial filtering of land-to-ocean fluxes: from natural Holocene variations to Anthropocene[J]. *Comptes Rendus Geoscience*, 2005, 337(1/2): 107-123.
- [3] Milliman J D, Syvitski J P M. Geomorphic/tectonic control of sediment discharge to the ocean: the importance of small mountainous rivers[J]. *Journal of Geology*, 1992, 100(5): 525-544.
- [4] Gong G C, Chang J, Chiang K P, et al. Reduction of primary production and changing of nutrient ratio in the East China Sea: effect of the three Gorges Dam[J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(7): 684-696.
- [5] Wang H, Saito Y, Zhang Y, et al. Recent changes of sediment flux to the western Pacific Ocean from major rivers in East and South-east Asia[J]. *Earth-Science Reviews*, 2011, 108(1/2): 80-100.
- [6] 周伟华,袁翔城,霍文毅,等.长江口邻域叶绿素 a 和初级生产力的分布[J]. *海洋学报(中文版)*, 2004, 26(3): 143-150.
- [7] 洪官林.长江口及邻近海域叶绿素的光学特性及其遥感应用[D].上海:华东师范大学,2011.
- [8] Corine G, Amo Y D, Sautour B, et al. Variability of nutrients and phytoplankton primary production in a shallow macrotidal coastal ecosystem (Arcachon Bay, France)[J]. *Estuarine Coastal & Shelf Science*, 2008, 76(3): 642-656.
- [9] Cloern J E. Our evolving conceptual model of the coastal eutrophication problem[J]. *Marine Ecology Progress*, 2001, 210: 223-253.
- [10] Wu X, Duan H Bi N, Yuan P, et al. Interannual and seasonal variation of chlorophyll-a off the Yellow River Mouth (1997—2012): dominance of river inputs and coastal dynamics[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2016, 183: 402-412.
- [11] 马颖,李琼芳,王鸿杰,等.人类活动对长江干流水沙关系的影响的分析[J]. *水文*, 2008, 28(2): 38-42.
- [12] 朱鉴远.长江沙量变化和减沙途径探讨[J]. *水力发电学报*,

- 2000(3): 38-48.
- [13] Yang S L, Zhao Q Y, Belkin M. Temporal variation in the sediment load of the Yangtze River and the influences of the human activities[J]. *Journal of Hydrology*, 2002, 263(1/4): 56-71.
- [14] 张德兵, 何素萍, 胡国祥, 等. 三峡水库蓄水后长江中游干流来水量变化分析[J]. *人民长江*, 2013, 44(1): 1-3, 17.
- [15] 陈吉余. 21 世纪的长江河口初探 [M]. 北京: 海洋出版社, 2009.
- [16] 孔凡洲. 长江口赤潮区浮游植物的粒级结构、种类组成和色素分析 [D]. 青岛: 中国科学院研究生院 (海洋研究所), 2012.
- [17] 李玲玲, 于志刚, 姚庆祺, 等. 长江口海域营养盐的形态和分布特征[J]. *水生生态学杂志*, 2009, 30(2): 15-20.
- [18] 王保栋. 长江冲淡水的扩展及其营养盐的输送[J]. *黄渤海海洋学报*, 1998, 16(2): 41-47.
- [19] 褚忠信, 翟世奎, 章 磊, 等. 三峡水库 2003 年蓄水对长江悬沙中值粒径的影响[J]. *海洋湖沼通报*, 2007(3): 23-28.
- [20] O'Reilly J E, Maritorena S, Siegel D A, et al. Ocean color chlorophyll-a algorithms for SeaWiFS, OC2 and OC4: version 4[C]//Hooker S B, Firestone E R. NASA Technical Memorandum. Greenbelt, Maryland: NASA-GSFC(Chapter 2), 2000, 11: 9-23.
- [21] Zhang C Y, Hu C M, Shang S L, et al. Bridging between SeaWiFS and MODIS for continuity of chlorophyll-a concentration assessments off Southeastern China[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 102(3/4): 250-263.
- [22] 张 瑞, 汪亚平, 潘少明. 长江大通水文站径流量的时间系列分析[J]. *南京大学学报 (自然科学版)*, 2006, 42(4): 423-434.
- [23] 中华人民共和国水利部. 中国河流泥沙公报 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1997—2012.
- [24] Liu D Y, Wang Y Q. Trends of satellite derived chlorophyll-a (1997—2011) in the Bohai and Yellow Seas, China: effects of bathymetry on seasonal and inter-annual patterns[J]. *Progress in Oceanography*, 2013, 116: 154-166.
- [25] 张 珍. 三峡工程对长江水位和水沙通量影响的定量估算 [D]. 上海: 华东师范大学, 2011.
- [26] 沈焕庭, 贺松林, 潘定安, 等. 长江河口最大浑浊带研究[J]. *地理学报*, 1992, 59(5): 472-478.
- [27] 黄江婵. 近 50 年东海海水中营养盐时空分布特征[J]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.
- [28] 李 磊, 王云龙, 蒋 玫, 等. 三峡工程蓄水后长江口溶解硅酸盐 (DSi)、营养盐结构的变化特征及其生态影响分析[J]. *环境化学*, 2014, 33(1): 135-141.
- [29] 柴 超, 俞志明, 宋秀贤, 等. 三峡工程蓄水前后长江口水域营养盐结构及限制特征[J]. *环境科学*, 2007, 28(1): 64-69.
- [30] Zhang J. Nutrient elements in large Chinese estuaries[J]. *Continental Shelf Research*, 1996, 16(8): 1023-1045.
- [31] 周俊丽, 刘征涛, 孟 伟, 等. 长江口营养盐浓度变化及分布特征[J]. *环境科学研究*, 2006, 19(6): 139-144.
- [32] 戚晓红. 中国近海部分典型海域磷的生物地球化学研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2005.
- [33] Pan G, Krom M D, Zhang M Y, et al. Impact of suspended inorganic particles on Phosphorus cycling in the Yellow River (China)[J]. *Environmental Science and Technology*, 2013: 9685-9692.
- [34] 徐 皓. 长江口营养盐的收支平衡及迁移模式 [D]. 上海: 华东师范大学, 2013.
- [35] 时 俊, 刘鹏霞. 三峡蓄水前后长江口水域营养盐浓度变化特征和通量估算[J]. *海洋环境科学*, 2009, 28(S1): 16-20.
- [36] 顾圣华. 年春末夏初枯水期间长江河口盐水入侵[J]. *华东师范大学学报 (自然科学版)*, 2014, 4: 154-162.

TEMPORAL VARIATIONS OF THE CHLOROPHYLL-a CONCENTRATION OFF THE CHANGJIANG (YANGTZE) RIVER MOUTH AND RESPONSE TO THE THREE GORGES DAM

YU Lanfang¹, WU Xiao¹, BI Naishuang¹, LIU Jingpeng², WANG Houjie^{1*}

(1 College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Key Laboratory of Submarine Geosciences and Prospecting Technique, Ministry of Education, Qingdao 266100, China; 2 Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266071, China)

Abstract: Temporal variations of sea surface chlorophyll-a concentration off the Changjiang (Yangtze) River mouth were investigated using SeaWiFS and MODIS data over the period of 1997-2012. The datasets of water and sediment discharge at Datong Station were also collected in order to examine the relationship between chlorophyll-a concentration in Yangtze River estuary and the river water and sediment discharge, as well as to clarify its response to the TGD Project. The results showed that both the average annual chlorophyll-a concentration with the annual water discharge, and the average monthly chlorophyll-a concentration with the monthly water discharge showed a good linear relationship ($R^2=0.72$; $R^2=0.89$). But the chlorophyll-a concentration has a poorer relationship with the sediment discharge from Yangtze River, which showed that the contribution of water discharge carrying dissolved nutrients to phytoplankton is greater than the part provided by sediment. Besides, the annual chlorophyll-a concentration in the study area has a decrease tendency after the TGD, the monthly average chlorophyll-a concentration also showed a delay of the spring and summer peak. It may be related to the spring drought caused by more dry years after TGD, and the reservoir operation mechanism. Although the TGD operation mechanism increased the water discharge in the dry season, the chlorophyll-a concentration showed a decrease tendency because of the lower temperature and lower transparency caused by the strong sediment resuspension in the coastal area in winter time.

Key words: Changjiang (Yangtze) River Mouth; chlorophyll-a concentration; sediment discharge; sediment discharge; Three Gorges Dam