

文章编号: 1674-5566(2017)06-0909-12

DOI:10.12024/jso.20171002153

三峡工程调蓄水对长江口外海浮游植物生态动力过程影响的数值模拟

林 军¹, 吴星辰¹, 刘 莲², 徐丽丽³, 闫 庆¹

(1. 上海海洋大学 海洋生态与环境学院, 上海 201306; 2. 国家海洋局宁波海洋监测中心站, 浙江 宁波 315012; 3. 国家海洋局东海预报中心, 上海 200081)

摘 要: 基于海洋模式 ECOM-si, 建立长江口外海包含环流场、温盐、泥沙和 NPZD 型生态模型的物理-生态耦合数值模式。利用历次定点、断面观测资料对模拟结果进行验证, 表明模型具有一定的模拟精度, 且稳定性良好, 可用于研究长江口外浮游植物生物量的季节变化规律, 以及长江入海径流量受三峡工程调蓄前后, 不同月份下泄水量的增减分别在丰水年、平水年和枯水年对长江口外营养盐和浮游植物月平均生物量的影响。模拟结果表明: 长江口外营养盐增减的绝对量由近河口区向远河口区递减; 且调蓄引起的营养盐增减峰值时间上自西向东推迟、峰值滞后。枯水年受径流调蓄的影响最大, 径流调蓄导致的营养盐增量在各区均是枯水年明显大于丰水年和平水年, 而在过渡区和远河口区 10 月后因蓄水导致的减量则相反。浮游植物生物量的情势与营养盐较为一致, 枯水年影响最大, 且自西向东峰值滞后; 此外, 由于硅藻和甲藻的竞争作用, 硅藻在流量增加季节的生物量增幅大于流量减少季节的生物量减幅, 而甲藻则相反。三峡工程的径流调蓄有利于增加长江口外海域的年均浮游植物生物量, 但年平均增幅较小。

关键词: 长江口外; 数值模式; 三峡工程; 营养盐; 浮游植物生物量

中图分类号: X 171.1 **文献标志码:** A

长江是我国第一大河, 长江巨大径流带来的丰富营养盐使长江口附近海域成为高生产力海区, 历史上是著名的渔场^[1]。随着我国经济的迅猛发展和城市化进程的加快, 工农业废水和生活污水不断增加, 富营养化加剧, 导致长江口外海区赤潮频发、规模扩大、危害程度加重。环境的破坏加之过度捕捞等因素, 使长江口外海区的生态严重失衡, 海洋经济生物个体小型化、低值化现象严重, 昔日千帆云集的大渔场迅速衰落, 甚至到了几乎无鱼可捕的地步。此外, 长江口外海区受复杂底形(如水下河谷)、巨量径流、季风、陆架环流的影响, 动力过程十分复杂^[2], 使长江口外海域成为最为复杂、研究最多的区域之一。

在长江干流上兴建巨大的水利工程, 其环境效应不但影响库区及中、下游地区, 必然也会对河口及邻近海域产生影响。三峡水利枢纽是长

江干流最大的水利工程, 其调蓄作业对长江径流的人海径流量^[3-4]、入海泥沙量^[5-6]以及入海营养盐通量^[7]及不同营养盐成分的比值^[8-11]等都有显著影响, 也对长江口外海域浮游植物的变化产生了影响^[12-13]。研究三峡工程径流调蓄对长江口外海浮游植物生物量的影响, 对于研究评估世界上最大的水利枢纽对河口及近海环境的影响效应具有重要的科学意义。

ECOM-si (Estuarine Coastal Ocean Model-semi-implicit)^[14-15]是发展成熟、应用广泛的海洋数值模式之一, 经过前人的一系列改进^[16], 在海洋生态动力学研究中展示了广阔的应用前景。目前关于三峡工程对长江河口的影响, 已经有较多的研究^[17-20], 但这些研究很少从整体上探讨三峡工程调蓄前后对长江口外的影响, 而长江口外的生态数值模型运用也不多^[21-22]。本文基于改

收稿日期: 2017-10-16 修回日期: 2017-11-13

基金项目: 上海市教育委员会科研创新项目(12YZ127); 上海市自然科学基金(10ZR1414100); 海洋赤潮灾害立体监测技术与应用国家海洋局重点实验室开放研究基金资助课题(MATHAB20120210)

作者简介: 林 军(1977—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为海洋环境与生态动力学, 生物海洋学。E-mail: jlin@shou.edu.cn

进的 ECOM-si 模式,建立了长江口外海包含环流场、温盐、泥沙和 NPZD 生态模型的物理-生态耦合数值模型,研究长江入海径流量受三峡工程调蓄后,不同月份下泄水量的增减分别在丰水年、平水年和枯水年对本海域浮游植物月平均生物量的影响,从而也为了了解长江口及邻近海域生态系统的演变提供依据。

1 材料与方 法

1.1 调查海域及采样方法

观测海区为 29.5°N ~ 32.5°N、122.5°E ~ 124.0°E(图 1),将长江口海域分为 A、B、C 三个分区,分别表示近河口区、过渡区与远河口区^[1]。因径流主要影响表层 20 m 以内的水质,且本海域的浮游植物生物量主要集中在 20 m 以内的浅水层,因此,以每个网格点的面积为权重,加权平均求每个分区 20m 以内浅水层的参量用于比较。观测仪器主要为多探头的 CTD (SBE 19plus),观测内容包括盐度、温度、溶氧(DO)、叶绿素 a、光合有效辐射(PAR)等。CTD 多探头仪器由电动绞车从海表面缓慢下降到海底,随后缓慢地提升至海表面,采样的时间间隔设置为 0.1 s。营养盐等环境指标在实验室进行测定。数据收集于多次出海进行的调查和观测,包括:2012 年 7 月沿北纬 30°50'东西向断面的叶绿素 a、DO、温盐、PAR、浊度和营养盐浓度等一系列数据;2006 年赤潮高发区长时间序列定点(st1 和 st2)观测的资料;以及 2006 年、2009 年夏季长江口外大面积海域的调查资料。

1.2 三峡大坝概况

三峡库区正常蓄水位为 175 m,每年 1—5 月,库区因前一年的蓄水而增加下泄流量为 1 000 ~

2 000 m³/s,5 月末至 6 月初,为迎接汛期来临,水库增加下泄量至防汛水位 145 m,6—9 月下泄量基本不变,10 月水库开始蓄水,成为一年中下泄径流减少最多的月份,而 5 月份是一年中径流量增加最多的月份。根据茅志昌^[23]、谭培论等^[24]文献整理的大通站月平均流量(表 1),收集了历年观测期间长江大通站的径流量数据,调整了三峡大坝建成前后的丰平枯水年月平均径流量的方案,分析得到 5 月份和 10 月份三峡工程径流调蓄前后的月平均流量差分别最大和最小。模型分别模拟计算了三峡工程径流调蓄前后长江口外海域的盐度、浊度和浮游植物生物量,重点评估了 5 月和 10 月最大的径流调蓄量对长江口外海域浮游植物的影响。

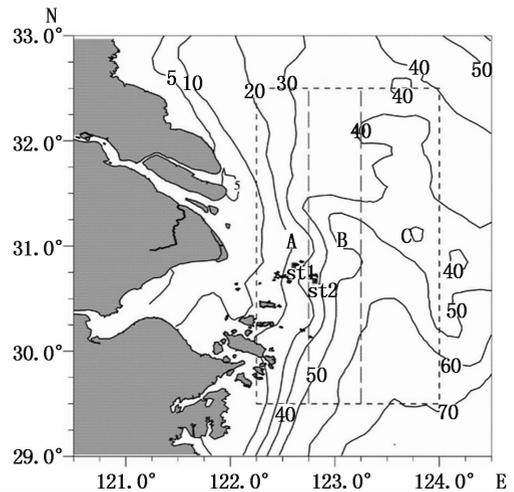


图 1 生态模型验证站位与海域分区
(A:近河口区;B:过渡区;C:远河口区)

Fig. 1 Ecological model validation stations and sea area partition (A: near estuary; B: transition zone; C: far estuary)

表 1 三峡工程调蓄前后大通站流量变化(m³/s)

Tab. 1 Changes of discharge before and after TGP's regulation at Datong hydrological station(m³/s)

典型年	蓄水	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
丰水年	前	11 400	11 600	13 800	24 500	24 500	41 500	53 700	51 900	49 000	51 600	35 700	18 600
	后	12 018	12 678	15 106	24 971	29 169	41 500	53 700	51 900	49 000	43 237	35 700	18 600
平水年	前	11 600	11 000	13 900	17 200	24 400	49 600	38 400	25 900	28 600	38 500	23 100	17 800
	后	12 316	11 857	15 211	16 126	30 570	49 600	38 400	25 900	28 600	31 240	21 973	17 800
枯水年	前	9 200	8 090	14 300	20 700	31 000	32 900	42 200	41 600	35 600	16 800	16 300	11 800
	后	10 735	10 010	16 051	21 700	33 177	32 900	42 200	41 600	35 600	11 385	13 332	11 800

1.3 数值模式的设置

基于改进的 ECOM-si 模式建立了长江口外海包含环流场、温盐、泥沙和 NPZD 模型的物理-生态耦合数值模型。模式的计算网格范围覆盖了整个东中国海海域,背景环流的开边界条件改进为法向流速(流量)边界,同时在垂向精度上从 20 个 sigma 层增加为 30 层,大大提高了背景环流场的模拟精度及营养盐和热盐通量水平输运的模拟精度,也提高了垂向温度、盐度和生态变量的模拟精度。数值模式的水动力、太阳辐射及海面热通量计算模块详情参见文献[15]。模式的驱动条件由月平均的风场和气象条件改进为具有 6hr 时间分辨率的 NCEP/NCAR Reanalysis 1 的数据,包括风速风向、湿度、气温、气压等。云量资料也有常年月平均改进为采用 Terra 卫星的 MODIS 观测数据,数据具有 8 天的时间精度,并可根据需要提供时间精度为 1 天的云量数据(局部可能数据缺失)。模式的营养盐边界条件采用了 WOA09 (World Ocean Atlas)的月平均资料。

生态模块以本海域典型的硅藻种中肋骨藻和典型甲藻种东海原甲藻的生物生态学研究成果为基础^[25],采用不同的生态参数来进行硅藻和甲藻类的设置。DIN、PO₄-P、DIA、FLA、ZOO 和 DET 分别表示氮营养盐、磷酸盐、硅藻(耐高温、不耐低营养盐的浮游植物类别代表)、甲藻(不耐高温、耐低营养盐的代表)、浮游动物和碎屑,此外,用 PHY 表示总浮游植物生物量。径流中 DIN 和 PO₄-P 的浓度分别设为 45 mmol N/m³ 和 1.2

mmol P/m³,随着径流量的变化,入海营养盐通量实现变化。本文所用的浮游生态数值模式已在长江口外海域得到成功运用,其他生态过程及其参数设置不再此详述,生态变量之间的关系以及具体的生态过程及其参数设置详见文献[1]。

2 结果与讨论

2.1 数值模式的验证

本文利用历次定点、断面观测资料(图 2)和大面观测资料验证所建立浮游植物生态动力学模式的数值模拟结果,包括潮汐潮流、海洋环流、温度和盐度场、以叶绿素 a 计量的浮游植物生物量和营养盐的时间序列等。在断面观测中,发现东经 122°30' 以东的长江口外海域,水深大于 30 m 处在夏秋季易发生底层水低氧的现象。长江口外海域盛行的上升流更使低氧水的影响范围从底层向中层发展^[26],严重威胁本海域海洋生物的生存和养殖生态安全。耗氧物质的直接入海排放、富营养化、赤潮爆发后的生物沉降和夏秋季的水体高度层化是底层水发生低氧的主要原因^[27]。为说明模式对深层水温 and 背景环流模拟的精度,模型模拟了东中国海夏季的 10 m 和 50 m 层水温与陆架环流,结果显示数值模式很好地再现了东中国海的水温和环流场,主要的背景环流如黑潮、台湾暖流、对马暖流等均与文献资料符合良好,具有较高精度,可用于长江口外浮游生态系统等的应用研究。

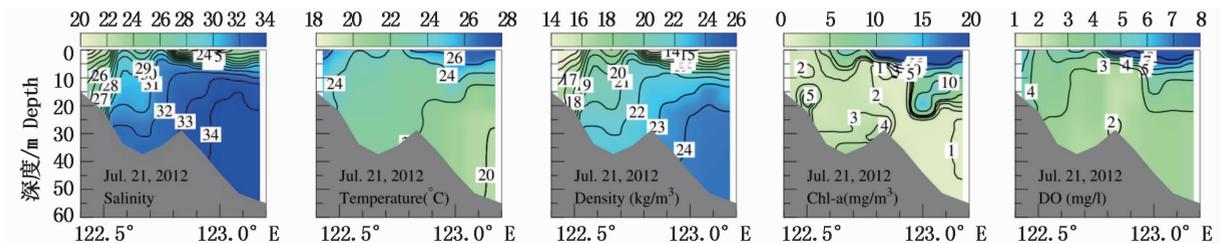


图 2 2012 年 7 月北纬 30°50' 断面的观测资料

Fig. 2 The observation data of north latitude 30°50' section in July, 2012

在验证良好的水动力场和温盐场基础上,为浮游植物生态动力学模型提供了完整的光照、营养盐和水温条件,生态模型结果很好地再现了2005—2006年多点的浮游植物生物量和营养盐浓度的季节变化。因篇幅限制,6个验证站点中仅给出了最西侧 st1 和最东侧 st2 站(图3和图4)的验证结果。模型在模拟浮游植物生物量陡

增陡降的赤潮发生过程时还有所欠缺,除此之外的浮游植物生物量变化过程均与观测结果符合良好。此外,营养盐的浓度变化很好地体现了大小潮东西向移动的半月周期性,氮营养盐的模拟精度优于磷酸盐。综上所述,该数值生态模式具有较高精度,可用于三峡大坝径流调蓄前后对长江口外海浮游植物生物量影响的比较研究。

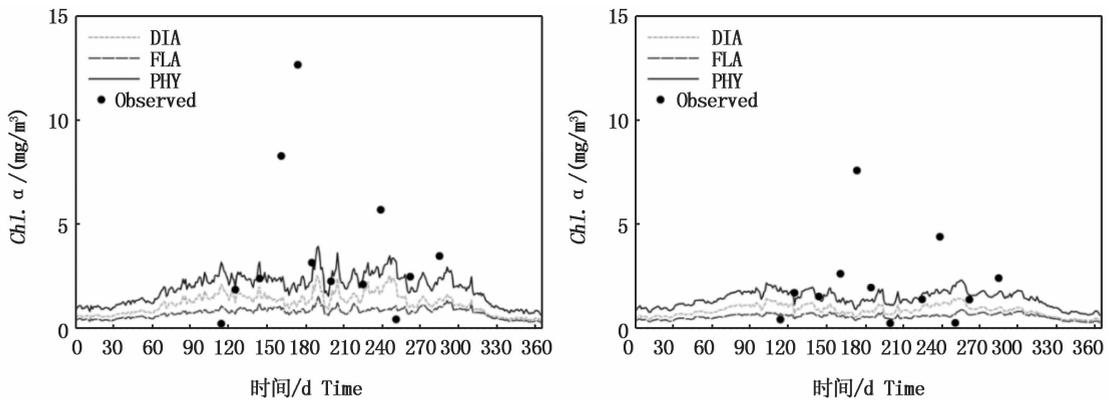


图3 2006年st1站点浮游植物生物量验证(左:表层;右:底层)

Fig.3 The validation of phytoplankton biomass at st1 station in 2006 (Left:surface; Right:bottom)

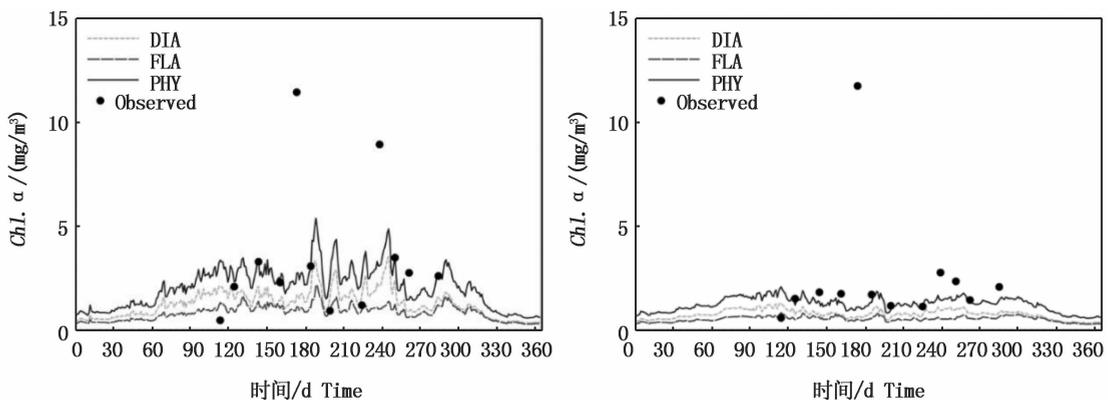


图4 2006年st2站点浮游植物生物量验证(左:表层;右:底层)

Fig.4 The validation of phytoplankton biomass at st2 station in 2006 (Left:surface;Right:bottom)

2.2 三峡径流调蓄对长江口外海域浮游植物生物量的影响

本文利用已建立的数值生态模型定量研究三峡径流调蓄对长江口外海域浮游植物生物量的影响,阐明调蓄前后浮游植物生物量变化的时空变化规律及其成因。三峡工程的径流调蓄对长江口外海域的影响主要体现在营养盐输入的

差异上,其次是输沙量和水温。由于水面热通量的作用,海陆水温差异可以忽略不计,模式中考虑的悬沙量差异较小,且仅在近河口区有影响。因此,本文主要关注营养盐输入对浮游植物生物量的影响。盐度值差异可认为是营养盐输入通量变化的指示,在径流量调蓄最大的5月和10月,盐度的增减在2个盐度单位之内(图5)。

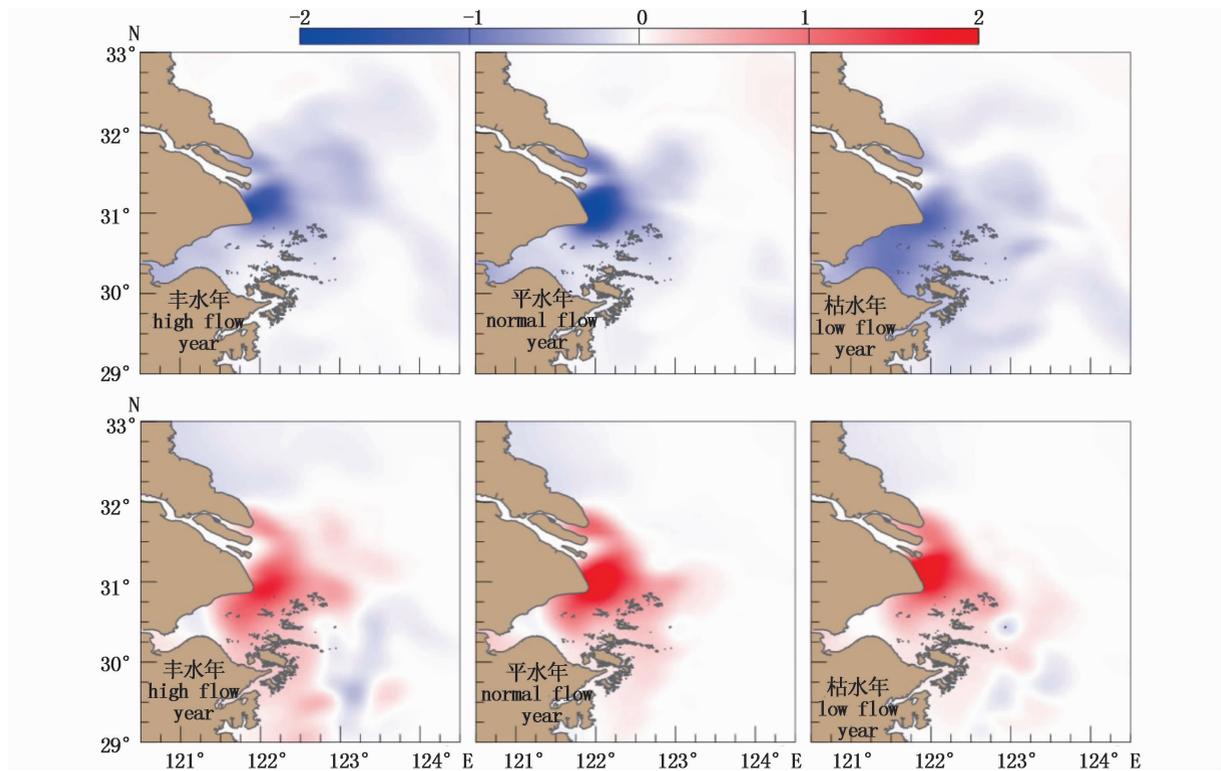


图5 三峡工程调蓄前后的盐度差异(上:5月;下:10月)

Fig. 5 Difference of salinity before and after TGP's regulation (Aboverow: May; Belowrow: October)

从时间序列上来看,营养盐增减(图6和7)的绝对量自西向东、由近河口区向远河口区递减。近河口区DIN的最大差异超过 0.5 mmol N/m^3 , $\text{PO}_4\text{-P}$ 差异超过 0.01 mmol P/m^3 。近河口区的营养盐呈现明显的半月潮周期波动性质,表明了陆源输入的高浓度营养盐锋面随潮流东西向摆动。DIN的相对增减(%)在3个区最高都可达10%,略微呈现西高东低的态势。 $\text{PO}_4\text{-P}$ 的相对增减(%)仍呈明显的西高东低态势,从近河口区最高近5%降至远河口区1.5%左右。以上特征均符合长江口外海域氮营养盐更多受长江径流补给,磷酸盐更多受外海底层水补给的特性^[28]。时间序列上,调蓄引起的营养盐增减峰值自西向东推迟、峰值滞后,由近河口区的5月推迟至远河口区的6月上中旬。由于枯水年本底流量小,径流调蓄导致的增加值在各区均是枯水年明显大于丰水年和平水年,而10月后的下降值在过渡区和远河口区则枯水年明显小于丰水

年和平水年。

浮游植物生物量在调蓄后入海径流(营养输入)更为均匀的条件下,除了10月和11月的蓄水期减少了径流排放外,其他月份的浮游植物生物量均高于调蓄前。对浮游植物生物量、尤其是硅藻生物量,其情势与营养盐比较一致,体现了营养盐增减的生态效应,也是对枯水年的影响最大,且自西向东峰值滞后。由于近河口区透明度较低,过渡区浮游植物生物量受到影响最大,5月增量在枯水年可达5%,10月浮游植物生物量下降幅度要略小于5月的增量。由于甲藻一般更耐低营养盐,硅藻和甲藻之间的营养竞争下,硅藻在流量增加季节的生物量增幅大于流量减少季节的生物量减幅,而甲藻在流量减少季节的生物量减幅大于流量增加季节的生物量增幅。总体上,三峡工程的径流调蓄有利于增加年均浮游植物生物量,但年平均增幅较小,仅为0.5%~1%。

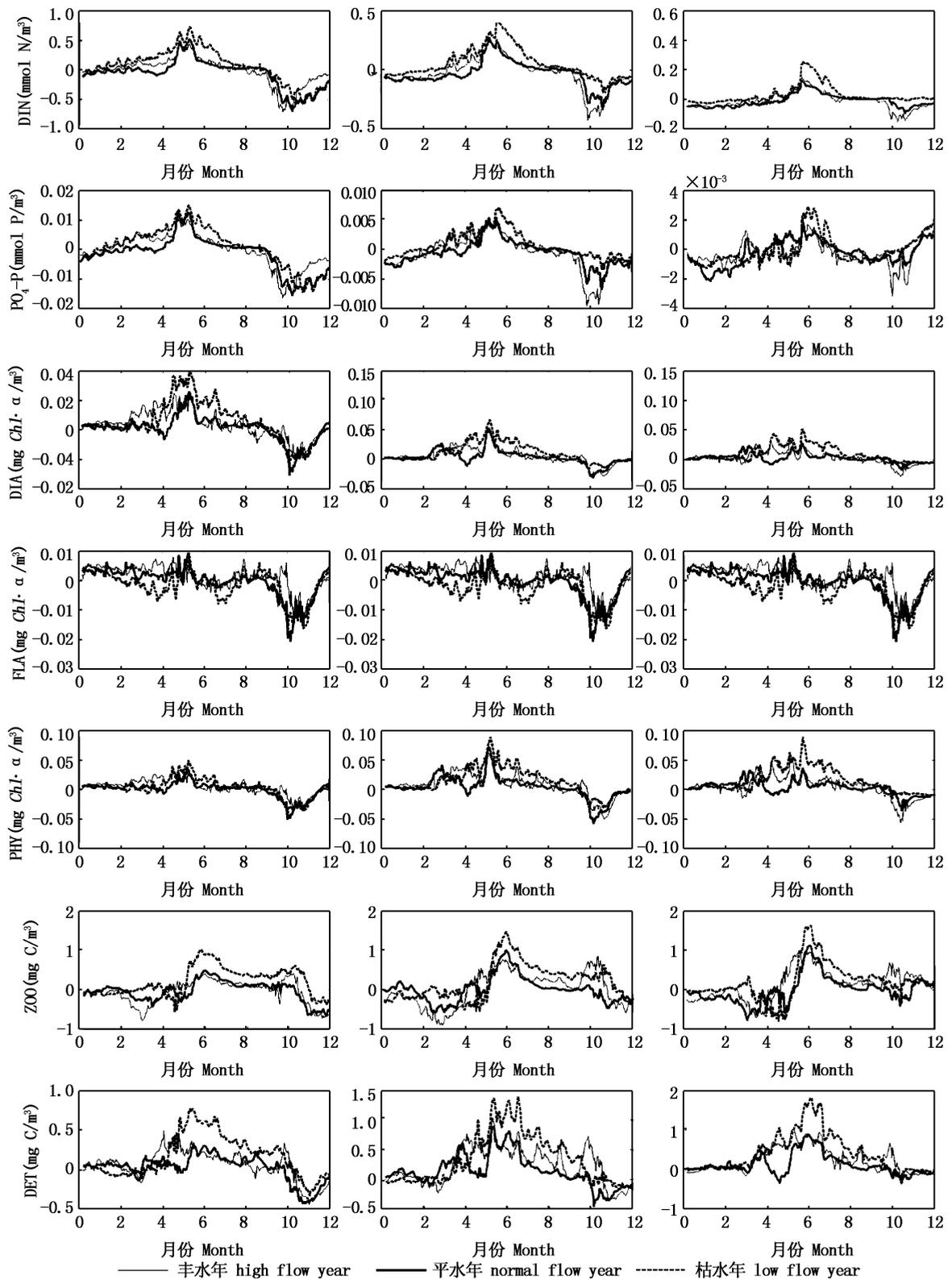


图 6 三峡工程调蓄前后生态变量各月的绝对量变化 (左中右分别为近河口区、过渡区和远河口区; 自上而下分别为氮营养盐、磷营养盐、硅藻、甲藻、总浮游植物量、浮游动物和碎屑)
 Fig. 6 Changes of absolute ecological parameters of each month before and after TGP's regulation (The Left, center and right respectively represent near estuary, transition zone and far estuary; From top to bottom respectively represent nitrogen nutrients, phosphorus nutrients, diatoms, dinoflagellates, total phytoplankton biomass and detritus)

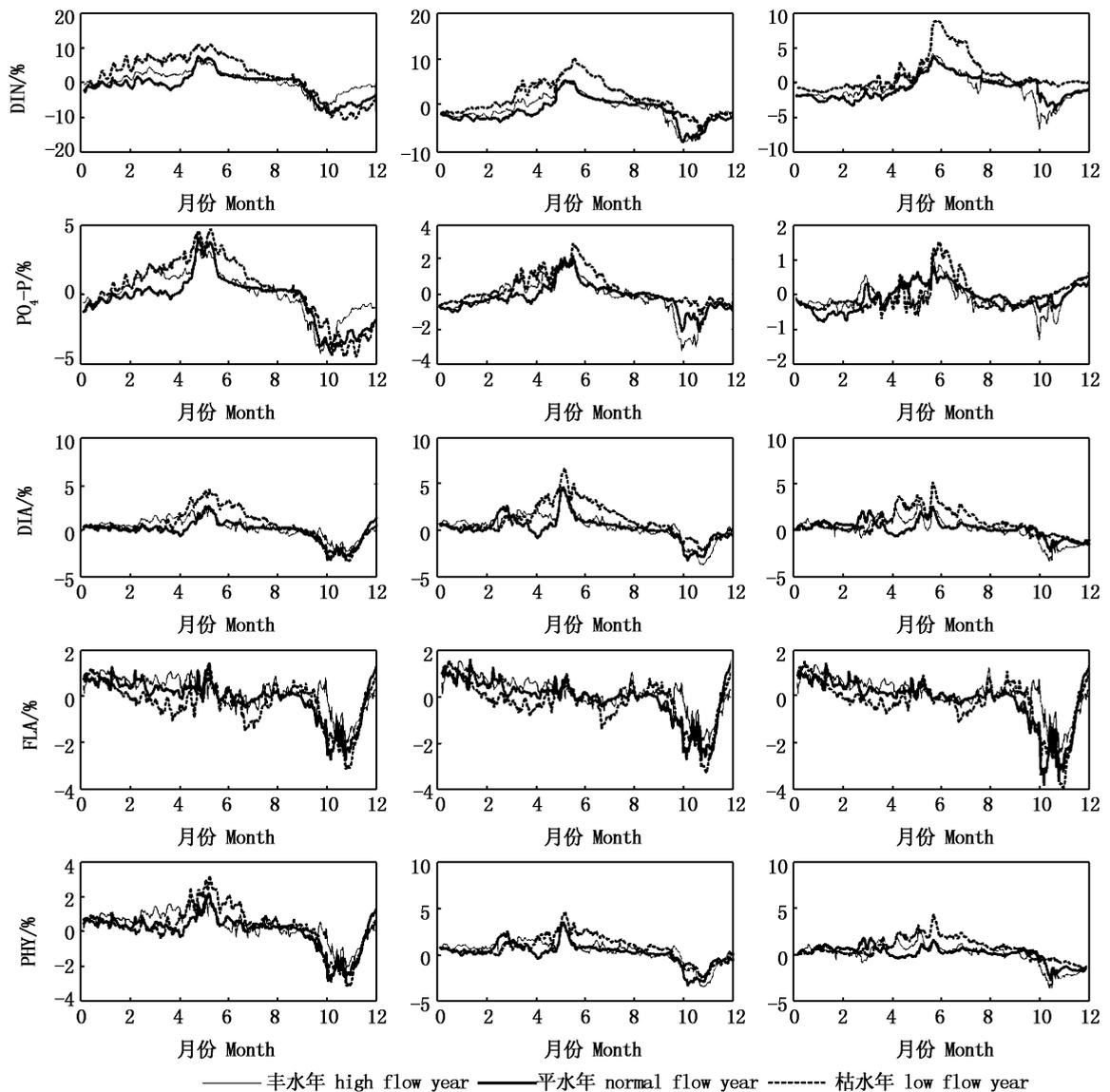


图7 三峡工程调蓄前后生态变量各月的相对量(%)变化(左中右分别为近河口区、过渡区和远河口区;自上而下分别为氮营养盐、磷营养盐、硅藻、甲藻、总浮游植物量)

Fig.7 Changes of relative ecological parameters of each month before and after TGP's regulation (The Left, center and right respectively represent near estuary, transition zone and far estuary; From top to bottom respectively represent nitrogen nutrients, phosphorus nutrients, diatoms, dinoflagellates, total phytoplankton biomass)

长江口外营养盐的扩散形态与长江冲淡水的扩散形态一致,高浓度营养盐的舌状锋随三峡工程调控的长江径流总量的变化而变化^[29]。5月和10月调蓄前后营养盐(图8、图9)、总浮游植物生物量(图10)差异的空间分布也表明了枯水年受径流调蓄的影响最大。营养盐浓度差异主要呈舌状分布,较高区域多集中在122°E左右,往东急剧减少,32°N以南海域营养盐浓度差较高,且在杭州湾内有一高值区;氮营养盐浓度

差异明显较磷营养盐浓度差异大。总浮游植物生物量浓度的差异完全不同于营养盐,主要呈点片状分布,高值区主要在长江口内。5月清库增加排放量时,高浓度营养盐向长江口外扩散,浮游生物量增加,往往易发生赤潮。张传松等^[30]研究发现长江口与杭州湾营养盐浓度较高的区域并没有发生赤潮,而发生在营养盐浓度较低的桃花岛与普陀山外部,这说明营养盐浓度的高低并不是决定赤潮发生的唯一要素,而光照条件也是

发生赤潮的关键要素之一。由于三峡工程的调蓄,长江口附近悬浮物浓度较高,光照条件较差,

因此,近河口区赤潮发生概率较小,导致5—6月过渡区和远河口区的赤潮发生概率增大。

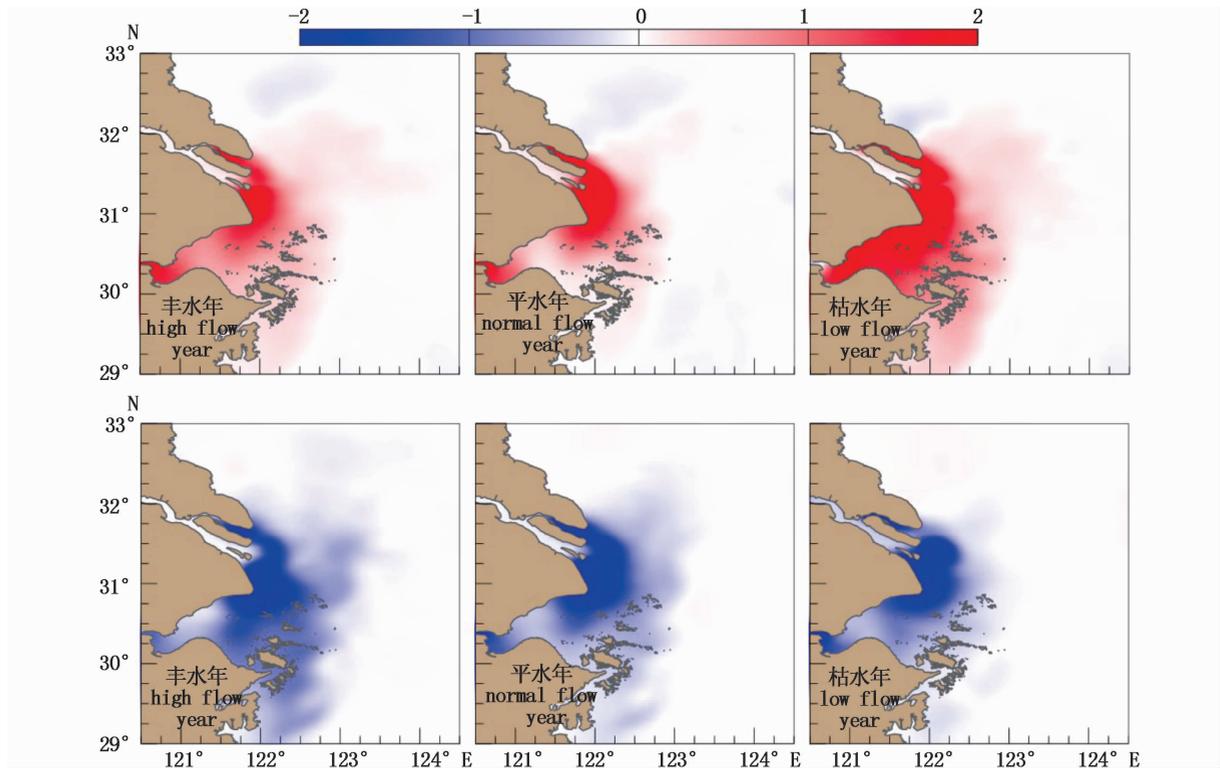


图8 三峡工程调蓄前后的氮营养盐浓度差异(mmol N/m^3 ,上:5月;下:10月)

Fig. 8 Difference of nitrogen nutrient concentration before and after

TGP's regulation(mmol N/m^3 ; Upper panels: May; Lower panels: October)

3 结论

本文依据建立的生态数值模型对长江口外浮游植物发生的时空机制及浮游植物生物量变化的季节规律进行研究,以及评估丰水年、平水年和枯水年三峡工程调蓄前后径流量变化对本海域营养盐和浮游植物生物量的影响。结果表明,长江口外营养盐增减的绝对量自西向东、由近河口区向远河口区递减;且调蓄引起的营养盐增减峰值自西向东推迟、峰值滞后。枯水年受径流调蓄的影响最大,径流调蓄导致的营养盐增加值在各区均是枯水年明显大于丰水年和平水年,而在过渡区和远河口区10月后的下降值则相反。浮游植物生物量的情势与营养盐比较一致,枯水年影响最大,且自西向东峰值滞后;此外,由于硅藻和甲藻的竞争作用,硅藻在流量增加季节的生物量增幅大于流量减少季节的生物量减幅,

而甲藻正好相反。总体上,三峡工程的径流调蓄有利于增加年均浮游植物生物量,但年平均增幅较小,仅为0.5%~1%。

本文所用生态模式通过引入改进的高精度TVD格式计算平流项、外海开边界改为流量边界条件、增加数值模式垂向分层等措施提高了背景环流、热量和营养盐平流的计算精度;此外模式综合考虑了潮流和海域背景环流的作用,在水动力学上保证了模式动力场的精度;但因缺乏详细的气象和海洋观测数据,以及浮游生物生物学研究基础资料(关系到每个生态参数的设定)的完整性和可靠性,故本文的数值生态模型还需大量的工作进行发展、改进和完善。除了广泛收集现有观测数据外,提高观测频率,建设能提供连续时间序列自动记录的海洋观测站和气象观测站是重点的基础工作。

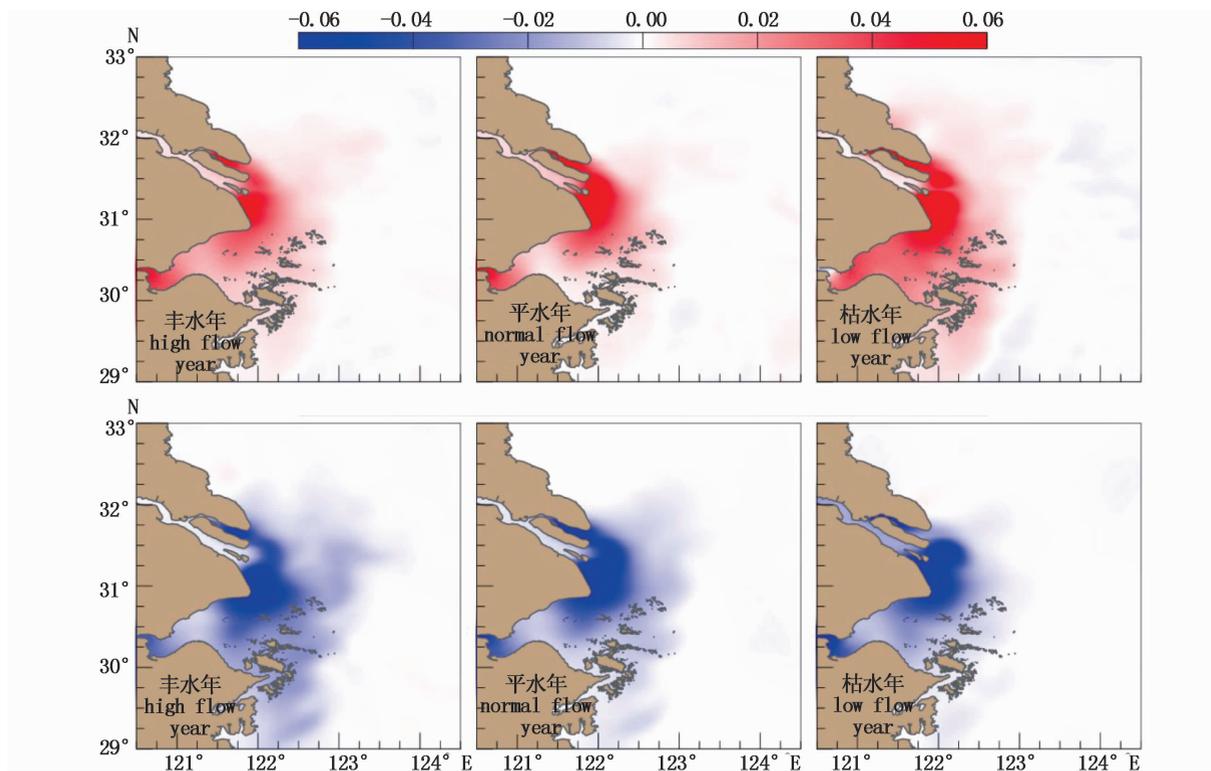


图 9 三峡工程调蓄前后的磷营养盐浓度差异 (mmol P/m^3 , 上:5 月;下:10 月)
 Fig. 9 Difference of phosphorus nutrient concentration before and after TGP's regulation (mmol P/m^3 ; Upper panels: May; Lower panels: October)

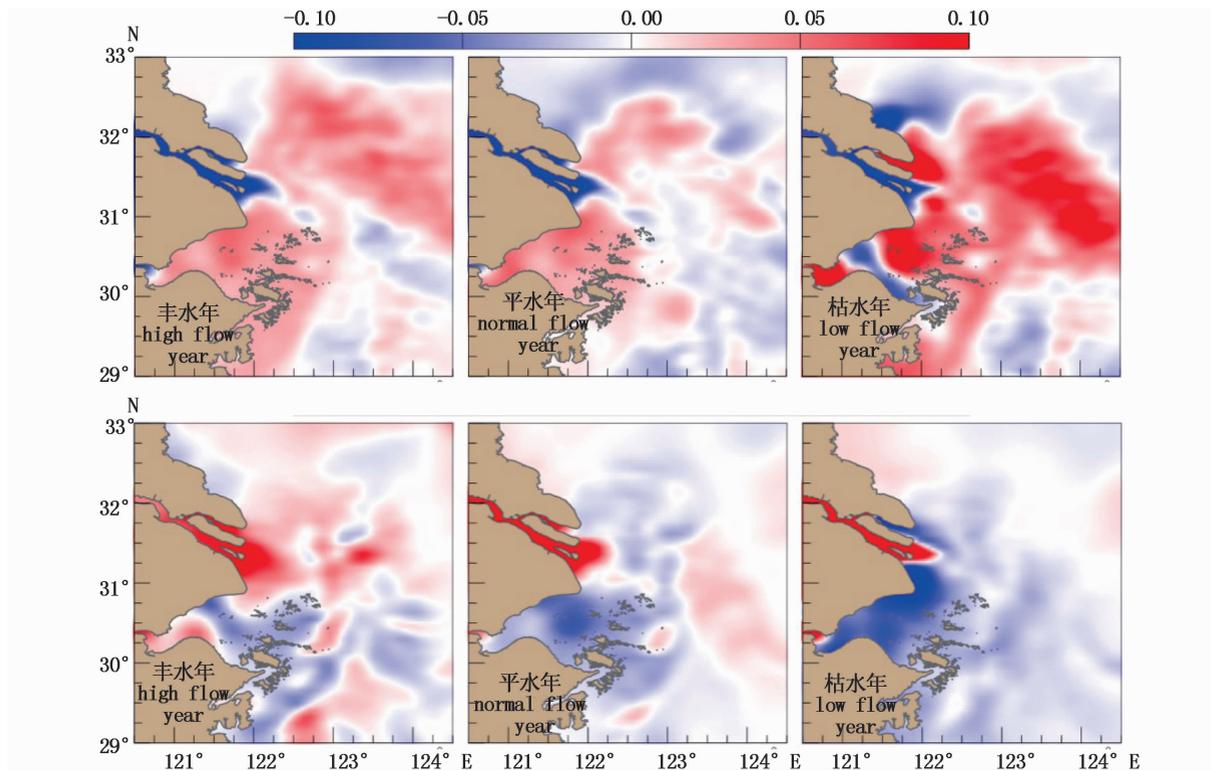


图 10 三峡工程调蓄前后的总浮游植物生物量差异 (mg Chl. a/m^3 , 上:5 月;下:10 月)
 Fig. 10 Difference of total phytoplankton biomass before and after TGP's regulation (mg Chl. a/m^3 ; Upper panels: May; Lower panels: October)

参考文献:

- [1] 林军. 长江口外海域浮游植物生态动力学模型研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2011.
LIN J. A modeling study of the phytoplankton dynamics of the Changjiang estuary [D]. Shanghai: East China Normal University, 2011.
- [2] 朱建荣, 丁平兴, 胡敦欣. 2000年8月长江口外海区冲淡水 and 羽状锋的观测[J]. 海洋与湖沼, 2003, 34(3): 249-255.
ZHU J R, DING P X, HU D X. Observation of the diluted water and plume front off the Changjiang River estuary during august 2000[J]. *Oceanologia Et Limnologia Sinica*, 2003, 34(3): 249-255.
- [3] 黄悦, 姚仕明, 卢金友. 三峡水库运用对坝下游干流河道水文情势的影响研究[J]. 长江科学院院报, 2011, 28(7): 76-81.
HUANG Y, YAO S M, LU J Y. Impact of TGP Operation on the Hydrologic Regime in the Downstream Main Channel of the Dam[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2011, 28(7): 76-81.
- [4] 李琼芳, 白雪, 陆国宾, 等. 三峡水库不同蓄水方案对于下游生态径流的影响[J]. 水力发电学报, 2011, 30(4): 124-128.
LI Q F, BAI X, LU G B, et al. Impact of the Three Gorges reservoir operation with different schemes on the downstream ecological water use [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2011, 30(4): 124-128.
- [5] 褚忠信. 三峡水库一期蓄水对长江泥沙的影响[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2006.
CHU Z X. Effects of the Three Gorges Reservoir (TGR) Phase-I water storage on the Yangtze River sediment [D]. Qingdao: China Ocean University, 2006.
- [6] 陈立, 吴门伍, 张俊勇. 三峡工程蓄水运用对长江口径流来沙的影响[J]. 长江流域资源与环境, 2003, 12(1): 50-54.
CHEN L, WU M W, ZHANG J Y. Effect of the Three Gorges project on sediment transportation of the yangtze estuary[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2003, 12(1): 50-54.
- [7] 沈志良. 长江干流营养盐通量的初步研究[J]. 海洋与湖沼, 1997, 28(5): 522-528.
SHEN Z L. Preliminary study on the Changjiang River mainstream nutrients fluxes [J]. *Oceanologia Et Limnologia Sinica*, 1997, 28(5): 522-528.
- [8] 余立华, 李道季, 方涛, 等. 三峡水库蓄水前后长江口水域夏季硅酸盐、溶解无机氮分布及硅氮比的变化[J]. 生态学报, 2006, 26(9): 2817-2826.
YU L H, LI D J, FANG T, et al. Distributions of DSi, DIN and changes of Si: N ratio on summer in Changjiang Estuary before and after storage of Three Gorges Reservoir [J]. *Acta Ecologica Sinica*. 2006, 26(9): 2817-2826.
- [9] 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.
CHAI C, YU Z M, SONG X X, et al. Characteristics of nutrient structures and limitation in the Yangtze River Estuary before and after water storage of the Three Gorges Project [J]. *Environmental Science*, 2007, 28(1): 64-69.
- [10] 沈志良. 三峡工程对长江口海区营养盐分布变化影响的研究[J]. 海洋与湖沼, 1991(6): 540-546.
SHEN Z L. A syudy on the effectes of the Three Gorge project on the nutrients in the Changjiang River estuary [J]. *Oceanologia Et Limnologia Sinica*, 1991(6): 540-546.
- [11] CHAI C, YU Z, SHEN Z, et al. Nutrient characteristics in the Yangtze River Estuary and the adjacent East China Sea before and after impoundment of the Three Gorges Dam [J]. *Science of The Total Environment*, 2009, 407(16): 4687-4695.
- [12] 王俊, 陈瑞盛, 左涛. 三峡工程截流后长江口邻近海域的网采浮游植物群落结构特征[J]. 水生态学杂志, 2009, 2(2): 80-87.
WANG J, CHEN R S, ZUO T. Characteristics of Phytoplankton Community Structure in the Adjacent Water of Yangtze River Estuary after Sluice of the Three Gorges Dam [J]. *Journal of Hydroecology*, 2009, 2(2): 80-87.
- [13] 贾海波, 邵君波, 胡颖琰, 等. 三峡水库蓄水前后长江口及其邻近海域浮游植物群落结构的变化及原因分析[J]. 海洋通报, 2014, 33(3): 305-314.
JIA H B, SHAO J B, HU H Y, et al. Changes and reason analysis of phytoplankton community structure in the Yangtze estuary and adjacent sea before and after the impoundment of the Three Gorges Dam [J]. *Marine Science Bulletin*. 2014, 33(3): 305-314.
- [14] 朱建荣. 长江口外海区叶绿素 a 浓度分布及其动力成因分析[J]. 中国科学 D 辑地球科学, 2004, 34(8): 757-762.
ZHU J R. The concentration distribution of chlorophyll-a of sea on Changjiang port and its causation analysis [J]. *Science in China, Ser. D*, 2004, 34(8): 757-762.
- [15] 林军, 章守宇, 龚甫贤. 象山港海洋牧场规划区选址评估的数值模拟研究: 滨海电厂温排水温升的影响[J]. 上海海洋大学学报, 2012, 21(5): 816-824.
LIN J, ZHANG S Y, GONG P X. Numerical simulation study on site selection evaluation of marine ranching zone in Xiangshan Bay: Effects of thermal water discharged from coastal power plants [J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2012, 21(5): 816-824.
- [16] WU H, ZHU J R, SHEN J, et al. Tidal modulation on the Changjiang River plume in summer [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011.
- [17] YANG S L, LIU Z, DAI S B, et al. Temporal variations in water resources in the Yangtze River (Changjiang) over the Industrial Period based on reconstruction of missing monthly

- discharges[J]. *Water Resources Research*, 2010,46(10).
- [18] 邵和宾, 范德江, 张晶, 等. 三峡大坝启用后长江口及邻近海域秋季悬浮体、叶绿素分布特征及影响因素[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2012,42(5):94-104.
SHAO H B, FAN D J, ZHANG J, et al. Distribution and influencing factors of suspended matters and Chlorophyll in autumn in Yangtze River Estuary post-three gorges dam[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2012,42(5):94-104.
- [19] QIU C, ZHU J R. Influence of seasonal runoff regulation by the Three Gorges Reservoir on saltwater intrusion in the Changjiang River Estuary[J]. *Continental Shelf Research*, 2013(71):16-26.
- [20] TIAN R C, HU F X, MARTIN J M. Summer Nutrient Fronts in the Changjiang (Yantze River) Estuary[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1993(37):27-41.
- [21] 林卫青, 卢士强, 矫吉珍. 长江口及毗邻海域水质和生态动力学模型与应用研究[J]. *水动力学研究与进展*. 2008,23(5):522-531.
LIN W Q, LU S Q, JIAO J Z. Water quality and ecological modelling for Yangtze Estuary and Its adjacent sea [J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2008,23(5):522-531.
- [22] 杨扬, 吴晓燕, 管卫兵. 长江口及邻近海域枯季水质生态模拟研究[J]. *海洋学研究*, 2012,30(3):16-28.
YANG Y, WU X Y, GUAN W B. Modeling study on water quality ecology in Changjiang River Estuary and its adjacent areas during dry season [J]. *Journal of Marine Sciences*, 2012,30(3):16-28.
- [23] 茅志昌. 21 世纪初长江入海流量变化及其对长江口水质、生态环境的影响[J]. *海洋科学*, 2001(4):31-34.
MAO Z C. Change of river discharge into sea early in 21th century and its effects on water quality and ecosystem in the Changjiang River estuary [J]. *Marine Sciences*, 2001(4):31-34.
- [24] 谭培论, 汪红英. 三峡工程对改善长江口咸潮入侵形势的分析[J]. *中国三峡建设*, 2004(5):29-31.
TAN P L, WANG H Y. Function of Three Gorges Project against salty-tide invasion in Yangtze mouth [J]. *China Three Gorges Construction*, 2004(5):29-31.
- [25] 张秀芳, 刘永健. 东海原甲藻 *Prorocentrum donghaiense* Lu 生物学研究进展[J]. *生态环境*, 2007,16(3):1053-1057.
ZHANG X F, LIU Y J. Advances in the biological study of *Dinoflagellate Prorocentrum donghaiense* Lu [J]. *Ecology and Environment*, 2007,16(3):1053-1057.
- [26] 韦钦胜, 王保栋, 陈建芳, 等. 长江口外缺氧区生消过程和机制的再认知[J]. *中国科学:地球科学*, 2015,45(2):187-206.
WEI Q S, WANG B D, CHEN J F, et al. Recognition on the forming-vanishing process and underlying mechanisms of the hypoxia off the Yangtze River estuary [J]. *Science China: Earth Sciences*, 2015,45(2):187-206.
- [27] 林军, 闫庆, 朱建荣, 等. 长江口外海域夏末温跃层与底层水低氧现象研究[J]. *水产学报*, 2014,38(10):1747-1757.
LIN J, YAN Q, ZHU J R, et al. Analysis of thermocline and hypoxia off the Changjiang Estuary in late summer [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2014,38(10):1747-1757.
- [28] 王奎, 陈建芳, 金海燕, 等. 长江口及邻近海区营养盐结构与限制[J]. *海洋学报(中文版)*, 2013,35(3):128-136.
WANG K, CHEN J F, JIN H Y, et al. Nutrient structure and limitation in Changjiang River Estuary and adjacent East China Sea [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2013,35(3):128-136.
- [29] 王保栋, 战闰, 藏家业. 长江口及其邻近海域营养盐的分布特征和输送途径[J]. *海洋学报*, 2002,24(1):53-58.
WANG B D, ZHAN R, ZANG J Y. Distributions and transportation of nutrients in Changjiang River Estuary and its adjacent sea areas [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2002,24(1):53-58.
- [30] 张传松, 王修林, 石晓勇, 等. 东海赤潮高发区营养盐时空分布特征及其与赤潮的关系[J]. *环境科学*, 2007,28(11):2416-2424.
ZHANG C S, WANG X L, SHI X Y, et al. Seasonal Variation and Spatial Distribution of Nutrients and Their Relationships with Harmful Algal Blooms in Coastal Area of the East China Sea [J]. *Environmental Science*, 2007,28(11):2416-2424.

Numerical study of the effect of the Three Gorges Project on the ecological dynamics of phytoplankton off the Changjiang Estuary

LIN Jun¹, WU Xingchen¹, LIU Lian², XU Lili³, YAN Qing¹

(1. College of Marine Ecology and Environment, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Marine Environmental Monitoring Centre of Ningbo, State Oceanic Administration, Ningbo 315012, Zhejiang, China; 3. East China Sea Forecast Center, State Oceanic Administration, Shanghai 200081, China)

Abstract: Based on the ECOM-si, a physical-ecological coupled numerical ocean model off the Changjiang Estuary with modules of circulation, thermohaline, sediment simulation and NPZD type of ecological model was established. The model was validated by observed data of several sites and sections, and the simulated results show a certain precision and stability. Therefore, the model can be applied to seasonal variation study of the phytoplankton biomass off the Changjiang Estuary, and the influences of increase-decrease of water discharge in different months and during high, normal and low flow years, on the nutrients and the monthly mean biomass of the phytoplankton, after the runoff of Changjiang regulated by Three Gorges Project (TGP). The modeling results showed that, the absolute value of nutrients variation was decreased from the nearly estuary to the far estuary, and the peak value of nutrients variation occurred successively from west to east. Low flow year was influenced greatly by runoff regulation, and the nutrients increment during low flow year was significantly greater than during high and mean years caused by runoff regulation in the estuary, while the nutrients decrement was on the contrary in the transition area and the far estuary after October. The distribution of phytoplankton biomass was relatively consist with that of nutrients, with a greatest effect during the low flow year and the peak value also occurred successively from west to east. In addition, due to the competition between diatoms and dinoflagellates, the increased absolute amplitude of diatom biomass in flow increased season was higher than the decreased amplitude of diatom biomass in flow reduced season, while dinoflagellates was on the contrary. Runoff regulation of TGP was beneficial to the growth of phytoplankton off the Changjiang Estuary, but the annual mean increased biomass was small.

Key words: off the Changjiang Estuary; numerical model; Three Gorges Project; nutrients; phytoplankton biomass