

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2012.02.002

引江济太调水工程对太湖水动力的调控效果

郝文彬^{1,2},唐春燕^{1,2},滑磊^{1,2},ACHARYA Kumud³

(1.河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,江苏 南京 210098;
2.河海大学环境学院,江苏 南京 210098;3. Desert Research Institute, Las Vegas, USA 89119)

摘要:为研究引江济太调水工程对太湖水动力调控所产生的效果,采用数学模型对其水动力进行模拟.利用环境流体动力学模型(EFDC 模型),以湖体水龄(描述湖泊水体交换速率的参数)为研究对象,系统地研究引江济太调水工程对太湖水动力的调控情况.结果表明:(a)引江济太调水工程对太湖湖体水动力过程的作用效果很大程度上取决于风速、风向以及出入湖的流量;(b)太湖湖体水龄的分布具有很强的时空异质性,夏天的平均水龄约为 130 d,其他季节的平均水龄约为 230 d;(c)太湖地区夏天的主导风向——东南风能够促进东部湖区(无锡、苏州水源地所在地)和梅梁湾湖区(太湖重污染区)的水交换,改善水体运动条件;(d)望虞河入湖的最经济调水流量为 $100 \text{ m}^3/\text{s}$.

关键词:引江济太调水工程 湖体水龄 数学模型 EFDC 模型 太湖 长江

中图分类号:TV68 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2012)02-0129-05

Effects of water diversion from Yangtze River to Taihu Lake on hydrodynamic regulation of Taihu Lake

HAO Wen-bin^{1,2}, TANG Chun-yan^{1,2}, HUA Lei^{1,2}, ACHARYA Kumud³

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering,
Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China;
3. Desert Research Institute, Las Vegas, 89119, USA)

Abstract: To study the effects of a water diversion project from the Yangtze River to Taihu Lake on the hydrodynamic regulation of Taihu Lake, mathematical models were used to simulate the hydrodynamic process. With the water age of the lake being the research focus, the hydrodynamic regulation of Taihu Lake by the project was systematically studied using the environmental fluid dynamics code (EFDC) model. The results show the following: (a) The effects of water diversion from the Yangtze River to Taihu Lake on the hydrodynamic process in Taihu Lake were mainly determined by wind velocity, wind direction, and inflow of the lake. (b) The water age of Taihu Lake presented significant spatial and temporal heterogeneity, with a mean water age of approximately 130 days in the summer and 230 days in other seasons. (c) The dominant southeastly wind of the summer greatly enhanced the transport of the transferred water into the eastern lake area (the drinking water source area of Wuxi and Suzhou cities) and Meiliang Bay (a seriously polluted area of Taihu Lake), and improved water movement conditions in these areas. (d) The most efficient discharge of the water transferred from the Wangyu River into the lake, with consideration of costs and benefits, would be $100 \text{ m}^3/\text{s}$.

Key words: water diversion from Yangtze River to Taihu Lake; water age of lake; mathematical model; EFDC model; Taihu Lake; Yangtze River

引江济太调水工程利用初步建成的治理太湖骨干水利工程体系,调整枢纽工程运行方式,通过长江口常

收稿日期:2011-03-02

基金项目:国家自然科学基金(51009049) 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室开放研究基金(2010940211)

作者简介:郝文彬(1986—),男,山西晋中人,硕士研究生,主要从事水环境数学模型研究. E-mail: wenbin_hao928@gmail.com

通讯作者:唐春燕(1987—),女,江苏南通人,硕士研究生,主要从事水环境数学模型研究. E-mail: chyt_06141208@126.com

熟水利枢纽和望亭立交水利枢纽工程调度,经望虞河将长江水引入太湖,并通过太浦河由太湖向上海等下游地区供水,以期由此带动流域内其他诸多水利工程的优化调度,加快水体流动,缩短太湖换水周期,缓解地区用水紧张状况^[1-2]。目前,关于引江济太调水工程对太湖及其周边地区水环境的改善效果存在很大的争议。为了定量地描述其改善效果,运用美国环保局开发的三维水质模型-环境流体动力学模型(EFDC模型),利用三维水量模拟技术来模拟和研究引江济太调水工程中望虞河引水和太湖水体的交换速度和交换程度。利用水龄的概念,一方面描述通过望虞河入湖水与太湖水体的交换速度与交换程度,从而分析引江济太调水工程对太湖水动力过程的改善情况;另一方面,可描述可溶解性污染物在入湖后的迁移特征。

1 研究区域

太湖具有主要环湖河道 219 条,本研究将环湖河道概化为 30 条河道(图 1),包括主河道、天然河道和人工河道。

河道编号如图 1 所示。将太湖划分为 8 个子区域:竺山湖、梅梁湾、贡湖、西北湖区、西南湖区、湖心区、东部湖区、东太湖湾^[3]。另外,以太湖北部的直湖港(图 1 中编号 9)和南部的鼓楼港(图 1 中编号 20)为界将太湖流域分为上游和下游^[4]。太湖水体流向是自西向东、自北向南。上游主要入湖河流有从西苕溪水系流入的陈东港(图 1 中编号 2)、太运河(图 1 中编号 7)和长兜港(图 1 中编号 25),它们的入湖流量占太湖入湖流量的 80%^[5]。下游的主要出湖河流有位于东南部的太浦河(图 1 中编号 15)和胥江(图 1 中编号 18)。每年通过望虞河直接向太湖调入的总水量为 0.8 亿 m³(相当于太湖总水量的 1/6),平均调水流量为 20 ~ 240 m³/s^[1,6]。太湖流域夏天的主导风向是东南风,平均风速为 3.5 ~ 5.0 m/s。

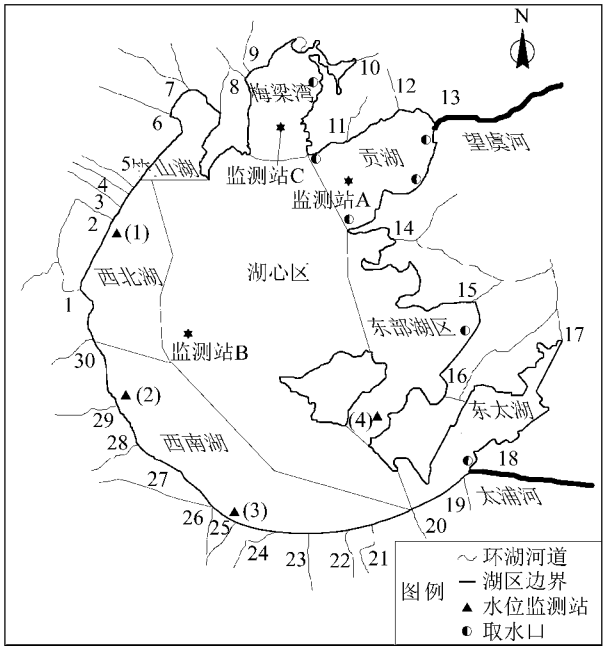


图 1 计算区域概化图

Fig. 1 Schematic map of computational area

2 研究方法

2.1 数学模型

秦伯强^[7]进行太湖水动力模型研究后指出,太湖表面流场与风向一致,而底层流场与表面流场的方向完全相反,表现为明显的补偿流,而且在风场作用下可产生垂直环流系统,所以使用简单的二维模型来研究太湖水动力是不够精确的,应当采用垂向分层的三维数学模型来模拟太湖水体的水动力情况。笔者用 EFDC 模型来模拟水位、流量、水龄。EFDC 模型可以模拟河流、湖泊、河口、水库、湿地和沿海地区表层水体的三维流量、营养盐输送和生化过程。该模型基于笛卡尔正交曲线和垂直 σ 坐标系统的有限差分对方程进行求解^[8-9]。水龄定义为颗粒物从入口传输到指定点的时间(往往入口的水龄设为零)。水龄越大,说明水体运动越慢,水体被交换程度越弱;反之亦然。水龄计算公式见文献^[5]。

2.2 模型的建立

用笛卡尔直角坐标网格建立太湖水动力模型,水平面总计 4 465 个网格,每个网格单元边长相当于实际长度 750 m。为了较好地模拟湖底地形,垂直方向采用 σ 坐标,分为 3 层。用湖底和表层水体厚度来定义垂向网格的高度。每个网格的初始平均水深从岸边的 0.5 m 到湖中心地区的 2.5 m。根据流体静力学连续性和避免产生 σ 坐标带来的压力梯度错误,应使湖底坡度小于 0.33 m^[5]。EFDC 模型以大气、表面风力和出入湖流量为动力边界条件。出入湖河流边界条件为 30 条河流(图 1),将剩余的小河就近并入邻近主河道。日降雨量数据是太湖附近 8 个监测站获取的数据平均值。每日风速风向数据从中国科学院南京地理与湖泊研究所太湖站的气象中心(靠近图 1 中监测点 C)获得。

初始条件设置了水位、流量和水龄。在假设湖面水平条件下,初始水位设置为模拟时段第 1 天的平均值。

水深是根据水位和湖底高程得出的,并且设置初始流速为 0 m/s. 在入湖河流入口处连续释放的示踪剂在任意单元格的质量浓度设为单位 1. 水龄主要取决于调入的净水量和湖面的风场. 为了确定调水量对水龄的影响,设计了一系列方案(15 个,表 1)进行计算. 方案 1 是对 2005 年水体流速和风场的分析,方案 2 依然采用 2005 年水体流量数据并假设没有调水和风场的情况. 方案 3~6 系考虑望虞河在没有其他出入湖河流的理想状态,根据 2005 年观测值,流量 50 m³/s,100 m³/s,150 m³/s 和 200 m³/s 分别代表望虞河低、中、高和极高流量;方案 7~14 通过设置 8 个不同风向来模拟风向对湖体水龄的影响,方案 8~15 计算了在夏季主导风向——东南风情况下风速对水龄的影响. 所有方案所采用的模型及参数都是一致的,时间步长取为 100 s,共计算 365 d.

3 模型率定

对于数值模型,通过对模型进行灵敏性分析来阐明模型参数取值对模型结果的影响十分重要. 由于水流运动的物理特性已经十分成熟,在 EFDC 模型的应用中,模型中大部分物理参数都未作改变. 例如, Mellor-Yamada 紊流模型^[10]中有关的参数与其他水力模型(如普林斯顿海洋模型^[11]与河口海岸海洋模型^[12])中所设置的参数是一致的. 类似地, Smagorinsky 公式^[8]中的量纲黏度系数是恒定的,取 0.2^[13]. 本模型确定 100 s 的时间步长来保证模型运行的稳定性.

在水位率定过程中,经常需要调整的参数是底部粗糙高度 Z_0 ,该系数一般取 0.02 m^[9,12]. 本模型中该参数的默认值也设为 0.02 m. 研究表明,粗糙高度的明显变化对模型运行结果中的水深和流速所造成的影响很小. 水面高程和流速的均方根误差小于 1%. 湖泊的水深主要受风场、降雨和支流影响. 运用以上参数计算 2005 年太湖的水位和流速,模拟结果与太湖 4 个监测站(大浦口、夹浦、小梅口和西山)的实测值吻合较好. 灵敏度分析结果显示,支流的入流和出流对湖泊的纵向流速影响不大,风场对流速分布有较大影响. 进行流场率定使用 2001 年 4 月 12—14 日和 8 月 15—19 日的湖区流场监测结果,率定结果表明模型模拟结果整体上反映了太湖风生湖流的特点.

4 讨 论

4.1 环湖河道对太湖水龄的影响

为了研究环湖河道对太湖水龄的影响,模型假设风速为零,在其他条件与方案 1 相同的情况下进行模拟,219 d 和 365 d 的水龄用于代表夏天大流速和冬天小流速的情况. 冬季和夏季的模拟结果表明:(a)西北湖区、竺山湾、梅梁湾和贡湖等水龄较小,这些湖区都与主要入流河流相连接,并且水龄从入口到湖心依次增大.(b)湖心区、东部湖区和东太湖湾的部分区域水龄较大.(c)模拟区最小的水龄小于 10 d,最大的水龄超过 350 d,表明入流支流对水龄分布具有很大影响,尤其是在河道的入湖口处. 同时也说明湖体水龄存在很大的时空差异,不同湖区的水龄存在很大的差别,这种差别主要与入湖河道的位置以及风场等因素密切相关.

4.2 引江济太调水工程对太湖水龄的影响

为了评估引江济太调水工程对太湖水动力改善所起的作用,结合目前的实际调水流量,考虑望虞河 4 种不同流量入湖的情况,即 50 m³/s,100 m³/s,150 m³/s 和 200 m³/s(方案 3~6,表 1),并假定没有风场的影响,假定除了望虞河和太浦河外没有其他支流影响. 为保持湖泊水位变化幅度不大,各方案中太浦河的流量与望虞河保持一致. 模型除了表 1 所示的望虞河、太浦河流量,以及风速、风向等驱动条件不同之外,其他条件和参数设置与方案 1 相同,模拟时长均为 365 d.

第 365 天的模拟结果(模型模拟的最后一天结果)表明(图 2),望虞河流量分别为 50 m³/s,100 m³/s,150 m³/s 和 200 m³/s 时湖区水龄平均值小于 360 d 所占的比例分别为 26%,53%,71%,78%. 该比例随着望虞河引水流量的增加而升高,说明水量越大则交换越快. 然而,比例变化的幅度在不同的方案下不尽相同. 从图

表 1 模型计算方案

Table 1 Model simulation scenarios

方案	流量/(m ³ ·s ⁻¹)			风速/ (m·s ⁻¹)	风向
	望虞河	太浦河	其他支流		
3	50	50	0	0	
4	100	100	0	0	
5	150	150	0	0	
6	200	200	0	0	
7~14	100	100	0	5	E,SE,S,SW, W,NW,N,NE
15	100	100	0	2.5	SE

注 方案 1 和方案 2 的流量、风速、风向均为 2005 年的观测值.

2 可以看出,当望虞河入湖流量从 $50\text{ m}^3/\text{s}$ 增加到 $200\text{ m}^3/\text{s}$,以 $50\text{ m}^3/\text{s}$ 的幅度增加时,水龄小于 360 d 的区域所占比例分别增加了 27%,18% 和 7% .可见当望虞河引水量从 $50\text{ m}^3/\text{s}$ 增加到 $100\text{ m}^3/\text{s}$ 时水龄获得了最大的变化率,而入湖流量从 $150\text{ m}^3/\text{s}$ 增加到 $200\text{ m}^3/\text{s}$ 时水龄变化率最小. 结果表明,考虑到投入产出比,引水工程对改善湖体水动力及水循环效果最佳的流量为 $100\text{ m}^3/\text{s}$. 另外,从空间分布来看,水龄较小的区域从贡湖蔓延到附近的区域(水龄小于 30 d),再到整个湖心区(直至水龄等于 360 d). 然而,梅梁湾、竺山湾和西南湖区水龄保持不变(水龄最大的为 365 d). 说明引江济太调水工程对于改善贡湖、湖心区及东部湖区的水循环有很大的促进作用. 然而,对于改善梅梁湖、竺山湖及太湖西岸的帮助不大,而这几个湖区刚好是太湖水体的重污染区. 综上所述,引江济太调水工程能够改善太湖部分湖区的水动力特征,而不是整个太湖的水动力特征.

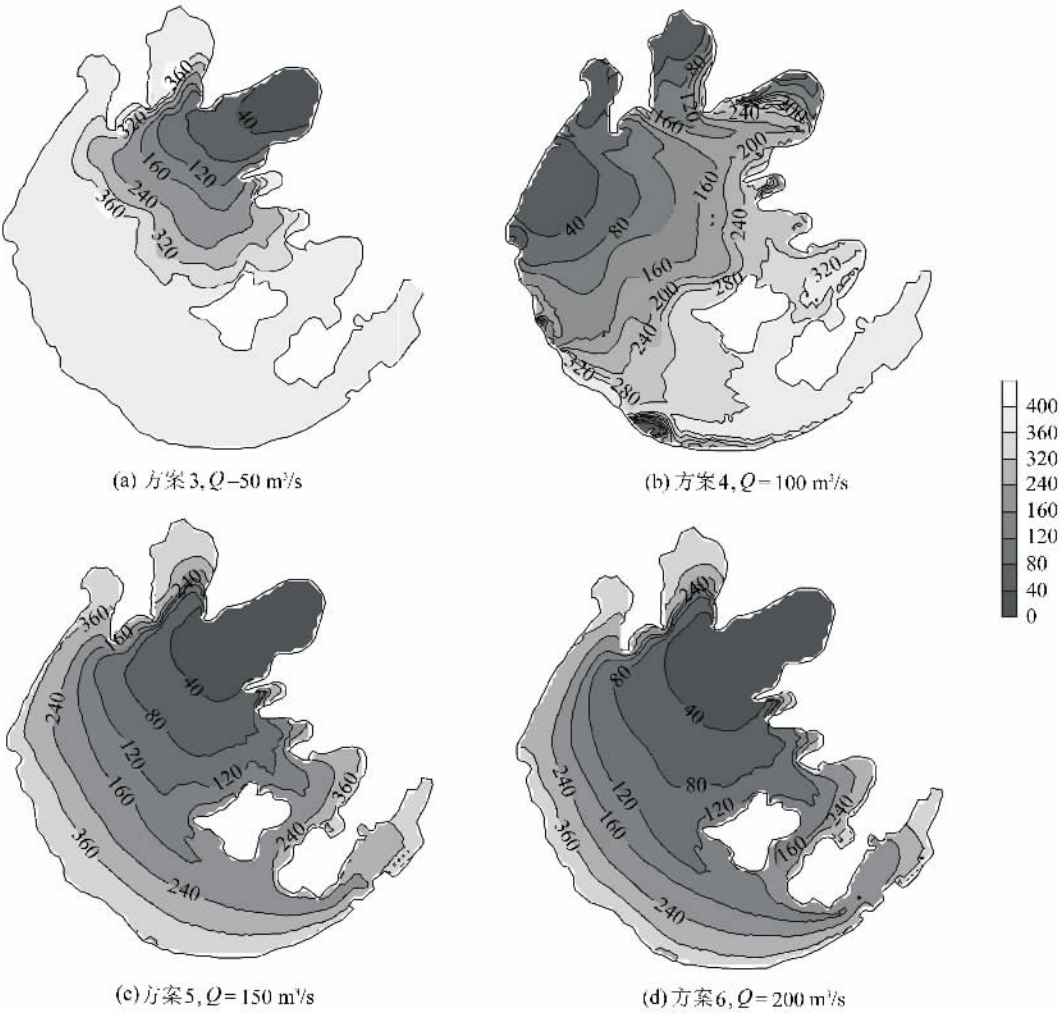


图 2 模型模拟第 365 天时望虞河在不同入湖流量条件下的水龄分布(单位 d)
Fig. 2 Distributions of water age for different discharges from Wangyu River into Taihu Lake on 365th day simulated by model(Unit d)

4.3 风场对太湖湖体水龄的影响

太湖是典型的风生流湖泊,所以评估其风场对水龄的影响十分重要. 笔者模拟了恒定风速 5 m/s 时 8 种不同风向下(表 1 中方案 7~14)太湖湖体水龄的分布情况. 位于梅梁湾内的监测点 C 和位于湖心区的监测点 B(位置见图 1)分别用来代表半封闭湖区和开放湖区. 模拟结果表明 在相同风速、不同风向下 2 个监测点的水龄差别较大. 对于监测点 B,水龄最大达到 335 d(西北风状况)和 305 d(东南风状况),最小为 207 d(西南风状况)和 254 d(西北风状况). 而对于监测点 C,最大的水龄为 305 d(东北风状况)和 300 d(西南风状况),最小为 169 d(西北风状况)和 174 d(东南风状况). 对同一监测点,由于风向引起的水龄差别超过 100 d,而在空间分布上不同监测点的水龄变化超过了 150 d,因此风向对水龄的时间和空间分布均具有重要影响. 由于在太湖东部湖区有 7 个水厂取水口(图 1),故笔者研究了风场对该饮用水源区域水龄的影响. 研究结果表明西

北风和东南风有助于梅梁湾的水体交换.在东南风时,梅梁湾、竺山湾和湖心区北部的区域水龄较小(小于200 d),西北湖区、西南湖区和东部湖区的水龄较大(250 ~ 365 d).西北风时,东南湖区的水龄较小(小于220 d),西南湖区的水龄较大(365 d).湖区水龄较小的区域均接近7座水厂的取水口,表明西北风是引江济太调水工程对饮水水质改善最有效的风向.

5 结 论

引江济太调水工程对太湖所产生的影响可通过水龄的时空分布来反映.总体来说,风场和环湖河道对太湖水龄的时空分布产生重要的影响,水龄在时空分布上具有很强的异质性.引水工程实施后,能有效地改善贡湖、湖心区及东部湖区的水动力特征,促进湖体的水循环.然而,其对改善梅梁湖、竺山湖及太湖西岸的水动力状况帮助不大.综上所述,引江济太调水工程能够改善太湖部分湖区的水动力状况,而不是整个太湖的水动力状况.当太湖湖面风向为东南风——夏季主导风向时,重污染湖区梅梁湾能够有效地与引入的水流进行交换,说明就风场条件而言,最佳的引水时机为夏季.另外,考虑到投入产出比,引水工程对改善湖体水动力及水循环效果的最佳调水流量为 $100 \text{ m}^3/\text{s}$.总之,引江济太调水工程仅能改善局部湖区的水循环特征,而不是整个太湖.因此,引江济太调水工程可当作紧急情况下的应急措施,而不是解决太湖水体污染的根本措施.另外,在实施引江济太调水措施时,要控制入湖水质,保证其优于太湖水体水质,否则将达不到预期的效果.

参考文献:

- [1] 高怡,毛新伟,徐卫东. 引江济太对太湖及周边地区的影响分析[J]. 水文,2006,26(1): 92-94. (GAO Yi, MAO Xin-wei, XU Wei-dong. Analysis of the influence on the Taihu Lake and the area around :diversion from the Yangtze River to the Taihu Lake[J]. Journal of China Hydrology,2006,26(1): 92-94. (in Chinese))
- [2] 吴浩云. 引江济太调水试验关键技术研究 and 应用[J]. 中国水利,2008(1): 6-8. (WU Hao-yun. Study on key technologies of Yangtze-Taihu Water Diversion[J]. China Water Resources,2008(1): 6-8. (in Chinese))
- [3] HU Wei-ping, ZHAI Shui-jing, HAN Hong-juan, et al. Impacts of the Yangtze River water transfer on the restoration of Lake Taihu[J]. Ecological Engineering,2008,34(1): 30-49.
- [4] XU Ha, YANG Lin-zhang, ZHAO Geng-mao, et al. Anthropogenic impact on surface water quality in Taihu Lake region, China[J]. Pedosphere,2009,19(6): 765-778.
- [5] LI Yi-ping, ACHARYA K, YU Zhong-bo. Modeling impacts of Yangze River water transfer on water ages in Lake Taihu, China[J]. Ecological Engineering,2010,37(2): 325-334.
- [6] 贾锁宝,尤迎华,王嵘. 引江济太对不同水域氮磷浓度的影响[J]. 水资源保护,2008,24(3): 53-56. (JIA Suo-bao, YOU Ying-hua, WANG Rong. Influence of water diversion from Yangtze River to Taihu Lake on nitrogen and phosphorus concentrations in different water areas[J]. Water Resources Protection,2008,24(3): 53-56. (in Chinese))
- [7] 秦伯强. 中国太湖水动力学研究[J]. AMBIO-人类环境杂志,1999(8): 6-7. (QIN Bo-qiang. Hydrodynamics of Lake Taihu, China [J]. AMBIO-A Journal of the Human Environment,1999(8): 6-7. (in Chinese))
- [8] SMAGORINSKY J. General circulation experiments with the primitive equations[J]. Mon Weather Rev,1963,91: 99-164.
- [9] HAMRICK J M. A Three-dimensional environmental fluid dynamics computer code : theoretical and computational aspects[M]. Virginia : Virginia Institute of Marine Science, College of William and Mary, 1992: 63-64.
- [10] MELLOR G L, YAMADA T. Development of a turbulence closure-model for geophysical fluid problems[J]. Reviews of Geophysics, 1982,20(4): 851-875.
- [11] YIN Xun-qiang, QIAO Fang-li, TANG Yong-zeng, et al. An ensemble adjustment Kalman filter study for Argo data[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology,2010,28(3): 626-635.
- [12] 堵盘军,胡克林,孔亚珍,等. ECOMSED 模式在杭州湾海域流场模拟中的应用[J]. 海洋学报,2007,29(1): 7-16. (DU Pan-jun, HU Ke-lin, KONG Ya-zhen, et al. Application of ECOMSED model to the simulation of Hangzhou Bay tide current [J]. Acta Oceanologica Sinica,2007,29(1): 7-16. (in Chinese))
- [13] BERNTSEN J. Internal pressure errors in sigma-coordinate ocean models[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology,2002,19(9): 1403-1414.