

DOI: 10.3969/j.issn.1004-6933.2011.02.001

太湖湖流、波浪、沉积物的三维数值模拟

汤露露^{1,2}, 王 鹏¹, 姚 琪¹

(1. 河海大学环境学院, 江苏 南京 210098; 2. 环境保护部南京环境科学研究所, 江苏 南京 210042)

摘要 运用 ECOMSED 模拟风速为 6.5 m/s 定常东南风作用下太湖流场及波浪场, 对模型的适用性及可靠性进行验证; 在此基础上进行波流共同作用下沉积物再悬浮数值模拟, 得出沉积物-水界面切应力及水体中悬浮物浓度分布。结果表明: 太湖有效波高范围在 9 ~ 29 cm 之间, 有效波高的空间分布与风速、风向和水深有很大的关系, 同时波浪对切应力会产生很大影响, 而切应力的分布决定了悬浮物浓度的分布, 风浪及地形要素是导致太湖悬浮物浓度变化的重要因子。模拟结果与现有实验成果较吻合, 说明运用该模型模拟太湖沉积物再悬浮的结果可靠。

关键词 ECOMSED 模式; 湖流; 波浪; 沉积物; 数值模拟; 太湖

中图分类号 X143 **文献标识码** A **文章编号** 1004-6933(2011)02-0001-05

Three-dimensional numerical simulation of current, waves and sediment transport in Taihu Lake

TANG Lu-lu^{1, 2}, WANG Peng¹, YAO Qi¹

(1. Environmental College, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Nanjing Institute of Environmental Science, Ministry of Environmental Protection, Nanjing 210042, China)

Abstract: The Estuary Coastal Ocean Model incorporated with Sediment (ECOMSED) model was used to simulate the flow and wave field under a steady southeast wind of 6.5 m/s in Taihu Lake, and the suitability and reliability of the model was verified. Based on this, numerical simulation of sediment re-suspension was carried out with the joint action of waves and currents, and the distributions of shear stress and suspended matter concentration on the water-sediment interface were obtained. The results show that significant wave height was in the range of 9 to 29 cm, and the spatial distribution of significant wave height had a strong relationship with wind speed, wind direction, and water depth. Meanwhile, waves had a significant impact on shear stress, and the shear stress distribution determined the distribution of suspended matter concentration. Therefore, wind and topography are two important factors leading to changes of the concentration of suspended matter in Taihu Lake. The simulation results agreed with existing experimental results, proving that this model can reliably simulate sediment re-suspension.

Key words: ECOMSED model; lake current; wave; sediment; numerical simulation; Taihu Lake

太湖是大型浅水湖泊, 水面面积 2 338 km², 南北长 68.5 km, 东西宽 34 km, 多年平均水深 1.89 m。湖面开阔、水浅底平。在风浪作用下湖底沉积物极易再悬浮, 使湖水中悬浮物增加。湖水中悬浮物含量影响水体的透明度, 决定浮游植物对光照的利用, 对

水体生态系统产生巨大的影响。同时, 风浪作用下湖水中悬浮物浓度的增加会导致底泥中营养盐的释放, 与湖泊的内源污染息息相关^[1]。

太湖沉积物的悬浮成为众多研究者关注的焦点^[2-5], 但前人的研究多从实验方向研究太湖沉积物

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2008CB418202), 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07101-001), 河海大学自然科学基金(2008427711)

作者简介: 汤露露(1985—), 女, 江苏南京人, 硕士研究生, 研究方向为水环境数值模拟。E-mail: 574365189@qq.com

的悬浮特性。关于太湖沉积物再悬浮数值模拟至今没有专门的报道。笔者运用 ECOMSED(河口海岸海草泥沙模式)进行太湖沉积物再悬浮数值模拟。ECOMSED 为目前国际上先进的三维水流、波浪、沉积物和水质综合模式^[6],其源代码开放。本文模拟风速为 6.5 m/s 定常东南风,在湖流和波浪共同作用下太湖沉积物的再悬浮,得出了沉积物-水界面切应力及悬浮物浓度的分布情况。模拟结果与现有实验成果较吻合,说明运用该模型模拟的结果可靠,为研究太湖富营养化奠定了基础。

1 沉积物输运模块

1.1 沉积物对流扩散方程及定解条件

沉积物输运的三维对流扩散方程为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\alpha(U\rho)}{\partial x} + \frac{\alpha(V\rho)}{\partial y} + \frac{\alpha(W - W_s)\rho}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(A_H \frac{\partial \rho}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_H \frac{\partial \rho}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_H \frac{\partial \rho}{\partial z} \right) \quad (1)$$

边界条件为:

$$K_H \frac{\partial \rho}{\partial z} = 0, z \rightarrow \eta \quad (2)$$

$$K_H \frac{\partial \rho}{\partial z} = E - D, z \rightarrow -H \quad (3)$$

式中: ρ 为悬浮沉积物质量浓度; U 、 V 、 W 分别为 x 、 y 、 z 方向的速度; W_s 为沉积物的沉降速度; A_H 为水平扩散系数; K_H 为垂向扩散系数; η 为水位; H 为水深; E 、 D 分别为沉积物的再悬浮通量和沉降通量(由于太湖泥沙粒径基本在 75 μm 以下,因此以下所指沉积物都为黏性类别)。

1.2 黏性沉积物再悬浮及沉降模型

Gailani 悬浮潜力公式:

$$\varepsilon = \frac{a_0}{T_d^m} \left(\frac{\tau_b - \tau_c}{\tau_c} \right)^n \quad (4)$$

式中: ε 为再悬浮潜力; a_0 为取决于底质特性的常数; T_d 为沉降时间; τ_b 为底应力; τ_c 为临界应力; m 、 n 为取决于沉积环境的常数。

再悬浮通量

$$E = \frac{\varepsilon}{3600} \quad (5)$$

沉降通量 D 使用 Krone 方程求解:

$$D = -10^6 \alpha \left(\rho' K_M \left[\left(\frac{\partial U}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial z} \right)^2 \right]^{1/2} \right)^\beta \rho P \quad (6)$$

式中: ρ' 为悬浮介质的密度; K_M 为垂向紊动扩散系数; P 为沉降概率; α 和 β 为沉降性质常数,在淡水环境下, α 和 β 分别取值为 3.024 和 0.14^[7]。

其中沉降概率 P 利用 Partheniades(1992)经验公式:

$$P = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^Y e^{-\frac{\omega^2}{2}} d\omega \quad (7)$$

$$\text{而 } Y = 2.04 \lg \left[0.25 \left(\frac{\tau_b}{\tau_{b,\min}} \right) e^{1.27\tau_{b,\min}} \right] \quad (8)$$

式中: $\tau_{b,\min}$ 为在 $P = 1$ 时的底应力。

2 模型参数的确定

数值计算的空间步长为 800 m \times 800 m,网格单元数为 89 \times 89 个,垂向采用 σ 坐标,平均分为 5 层。内模式时间步长为 15 s,外模式时间步长为 0.5 s。模拟时间为 80 h。水平扩散系数取 500 cm^2/s ,垂向湍流扩散系数取 4.0 cm^2/s 。风应力拖拽系数取 0.0025。湖底粗糙高度取 1.0 cm ^[8]。

太湖不同湖区悬浮物质量浓度差异很大,其多年平均值为 15.01 ~ 65.56 mg/L ^[9]。本次模拟设置太湖悬浮物初始质量浓度为 20 mg/L 。因未掌握沉积物的实际初始厚度分布,本次模拟取初始厚度为 1 m。

为确定太湖沉积物再悬浮的临界切应力,进行了太湖沉积物原状样再悬浮特性模拟试验^[10],泥样取自太湖竺山湖佰渎口、宜兴大浦口、湖州 4 号灯标、梅梁湖渎山口,在沉积物再悬浮振荡器中进行。据实验结果分析计算,太湖表层沉积物中值粒径约为 0.023 mm,干密度为 0.9 g/cm^3 ,底质特性常数 a_0 约 11,沉积环境常数 m 为 0.5, n 为 2.46。临界启动应力 τ_c 的平均值约为 0.1 Pa,本次临界启动应力 τ_c 的实验结果与罗淑葱等^[11]得出的结论一致。

3 计算结果

3.1 三维水动力模拟结果验证

为验证三维水动力模型,笔者在文献[12]中对运用 ECOMSED 模拟太湖流场的适用性进行了研究,并得出结论:ECOMSED 可计算出不同风场作用下的垂向分层流场,计算结果能够很明显地反映出各层流场的内部结构及层与层之间变化情况,并且揭示出太湖流场内部为补偿流的特性。同时在流态与流量量级上均与前人用三维模型计算结果相似。说明用 ECOMSED 计算太湖水动力的可靠性,为进一步研究奠定基础。

3.2 模拟结果

3.2.1 湖流的模拟

风速 6.5 m/s 的定常东南风作用 20 h 后流场趋于稳定,模拟结果见图 1。图 1(a)为第 1 层(表层)分流场,可以看出除了湖东岸和西山周围流向与风向发生顺时针 20°左右的偏角,其余湖区的水流流向与风向基本一致,流速基本在 5 ~ 15 cm/s 。第 2 层、第 3 层流场为过渡层,流态较为复杂。第 2 层(次表

层)在湖心形成顺时针、逆时针两个环流,同时在西山南侧也形成一个逆时针环流。第3层流场湖心环流基本消失,流向指向东南方向。湖西岸形成较大的逆时针环流,整个湖区存在3个流速较大的带状区,其中两个靠近西岸、东岸,第3个在湖中间。第4层(次底层)湖西岸的逆时针环流范围大大缩小,趋于消失,其余湖区流向基本指向西北,开阔水域流速大小分布均匀,较第3层增大。第5层(底层)流向与表层完全相反,流场均匀分布,流速约 $3 \sim 8 \text{ cm/s}$,小于次底层。由上述结论可以看出,第3层往下的湖流为表层的补偿流,上升区主要位于东南部,下沉区位于西北部,形成闭合环流。

3.2.2 波浪的模拟

根据 ECOMSED,在风速 6.5 m/s 定常东南风作用下,对太湖的有效波高、有效波周期等波浪要素进行模拟,波浪场趋于稳定的时间与流场较一致,稳定后的波浪场的分布情况见图2。图2(a)为有效波高分布图,有效波高的范围在 $9 \sim 29 \text{ cm}$ 之间。有效波高的空间分布与风速风向和水深有很大的关系,波高最大值主要分布在风区长度较大和水深相对较深处。比较有效波高分布图和太湖底地形图(图2(a)(c))可见,水深最大区域和有效波高最大值区域十分相似,均位于湖心西北部;有效波高最小值分布在水深较小的湖域及岸边带,并且西北部岸边带

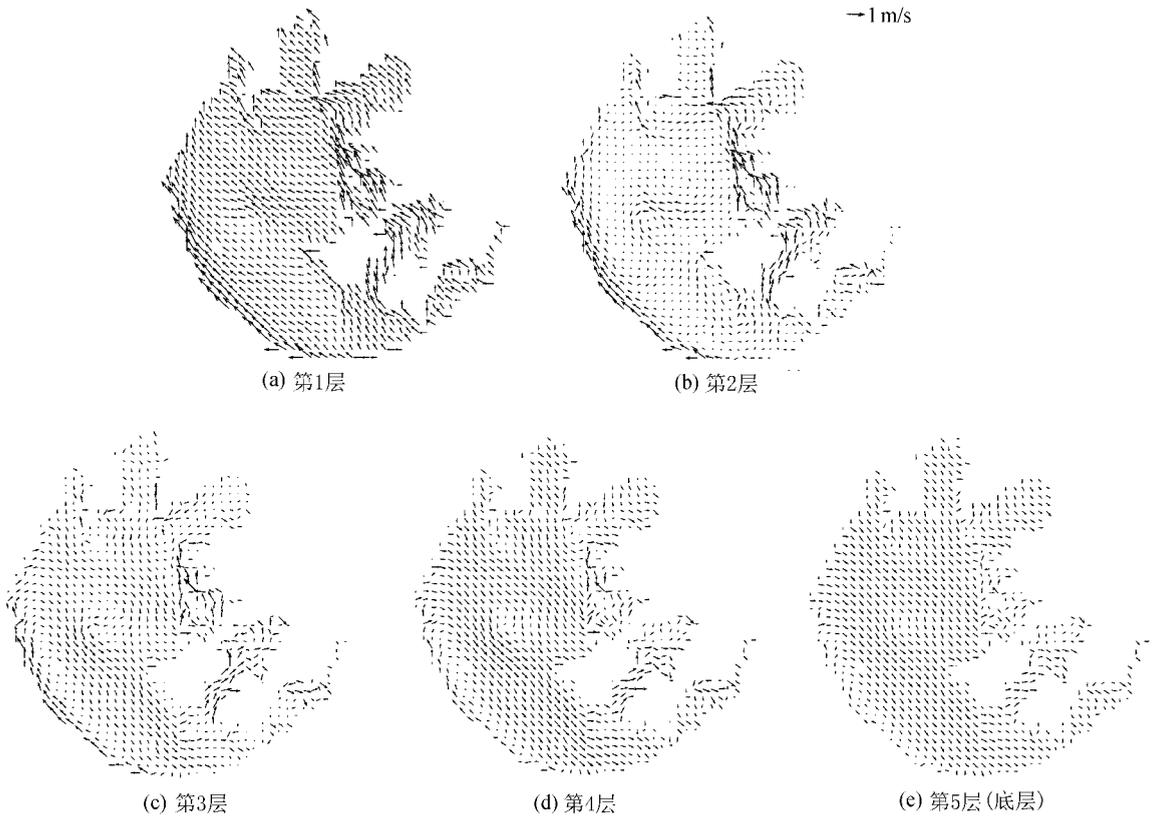


图1 6.5 m/s 东南风作用分层流场

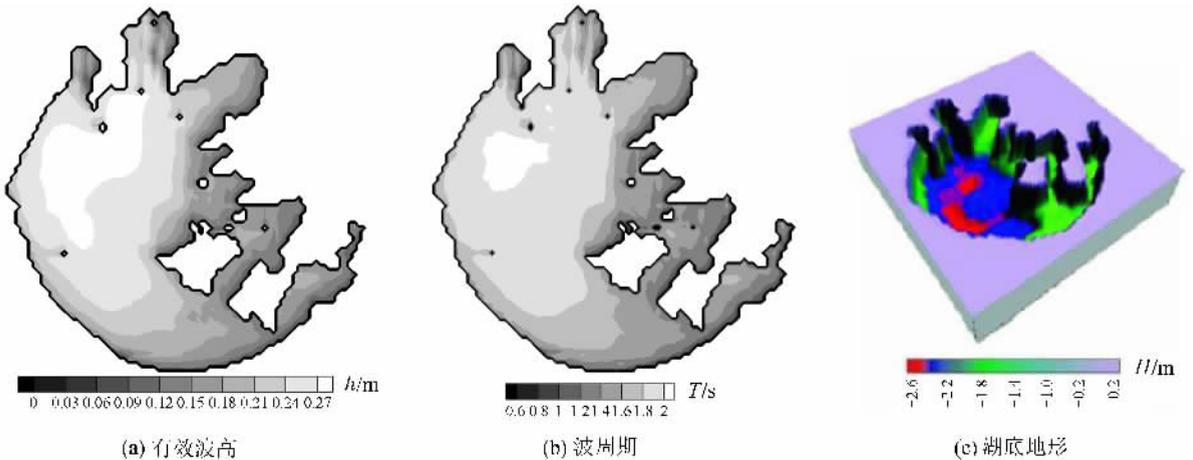


图2 6.5 m/s 东南风作用下有效波高、波周期及湖底地形图

的有效波高大于东南部岸边带。因为在东南风作用下,西北部湖域风区长度要大于东南部湖域,说明风区长度也是影响有效波高的一个重要因素。以上结论均与刘兴平^[13]利用 SWAM 模型模拟的结果较一致,说明用 ECOMSED 模拟太湖波浪的结果可靠。

3.2.3 波流共同作用下沉积物-水界面切应力模拟

考虑波动切应力和水流切应力共同作用,列出 6.5 m/s 东南风持续作用 1 h、3 h、20 h 的沉积物-水界面切应力场,见图 3。由图 3(a)可以看出,1 h 时,除了湖心区和湖周边水深极浅地区切应力小于 0.1 Pa 外,其余地区切应力都达到或超过临界切应力,漫山湖和胥湖部分地区切应力较高,达到 0.4 ~ 0.5 Pa;风持续作用到 3 h 时,湖体切应力趋于稳定,湖体大部分地区切应力达 0.4 ~ 0.7 Pa,见图 3(b);风持续作用 20 h 时,流场与波浪场达到稳定状态,切应力分布也达到稳定状态。切应力最大值约为 1.1 Pa,见图 3(c),出现最大值的地区主要有湖西北部地区,这与有效波高最大值出现的地区一致,说明波浪作用对切应力产生很大影响。

3.2.4 沉积物运输的模拟

6.5 m/s 东南风持续作用下沉积物发生再悬浮和沉积,导致水中悬浮物浓度发生变化,笔者列出持续

1 h、3 h、20 h 水体底层质量浓度场模拟结果并对其进行分析,由图 4(a)可见,1 h 时切应力达到 1 Pa 的湖区沉积物发生悬浮,悬浮物质量浓度范围为 100 ~ 1500 mg/L。到 3 h 时,除东南岸质量浓度一直保持较低外,其余部分悬浮物质量浓度均达到最大值,高质量浓度位置出现在太湖西北近岸,约 8500 mg/L,普遍的质量浓度值在 1500 ~ 2500 mg/L,见图 4(b)。到 20 h 时悬浮物质量浓度最大值为 5500 mg/L,湖体大部分地区质量浓度在 1000 ~ 2000 mg/L,见图 4(c)。

将切应力分布图(图 3)与底层浓度场分布图(图 4)进行对照可见,同一时刻切应力大的位置,悬浮物浓度也较大,说明切应力的分布决定了悬浮物的分布,即悬浮物浓度值平面分布的差别是由切应力平面分布的不同导致的,而切应力分布又是由波浪和水流共同作用导致的,故悬浮物浓度平面分布差别的间接诱因是风、浪、流等动力因素的共同作用。悬浮物浓度总体趋势随时间先增大后逐渐减小。随着切应力的增加悬浮物浓度增大,切应力达最大值后保持恒定,悬浮物浓度也同时达到最大值,悬浮物浓度达到最大值后开始逐渐减小,原因是由于水流与波浪的共同作用,将水体中的悬浮物输运至太湖东南岸,发生堆积,见图 5。东南岸附近沉积

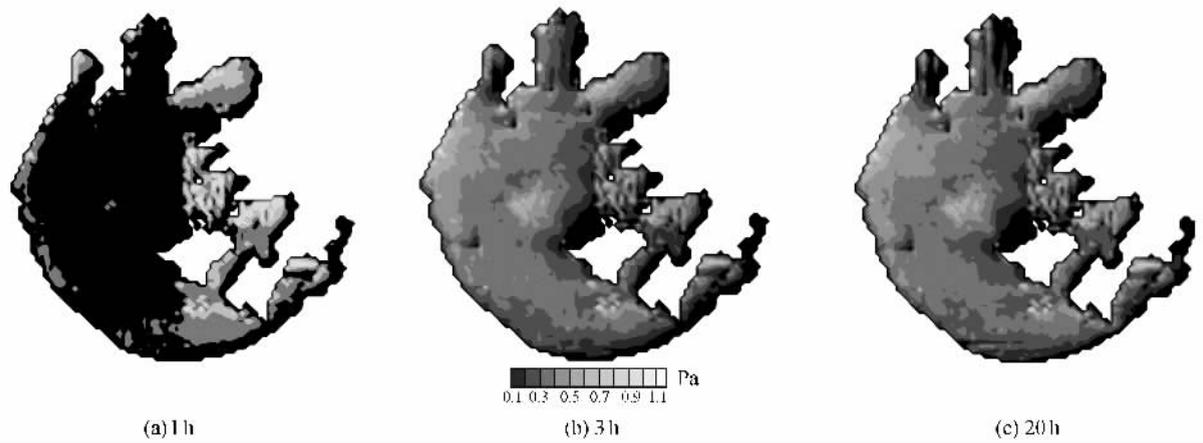


图 3 6.5 m/s 东南风持续作用下不同时间切应力分布

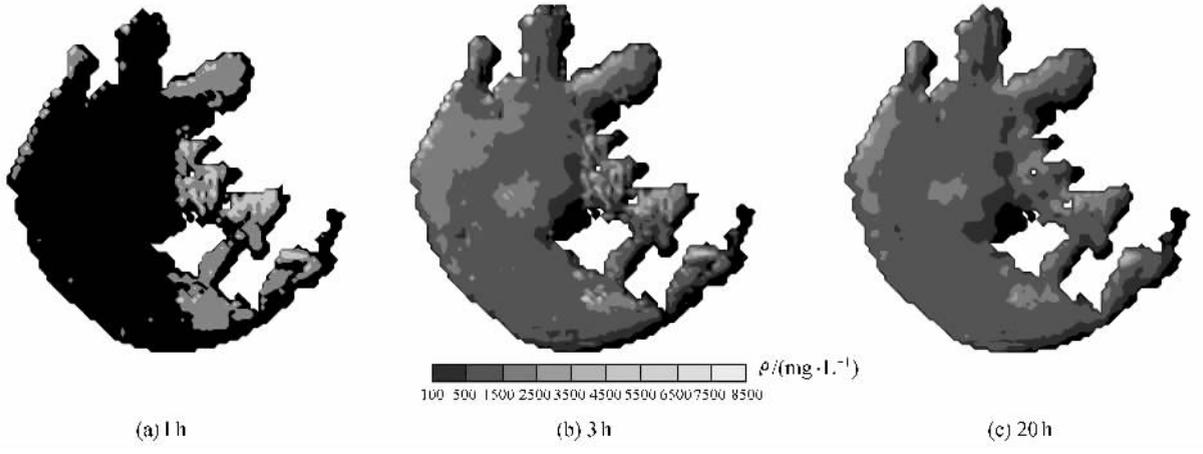


图 4 6.5 m/s 东南风持续作用下不同时间底层浓度场分布

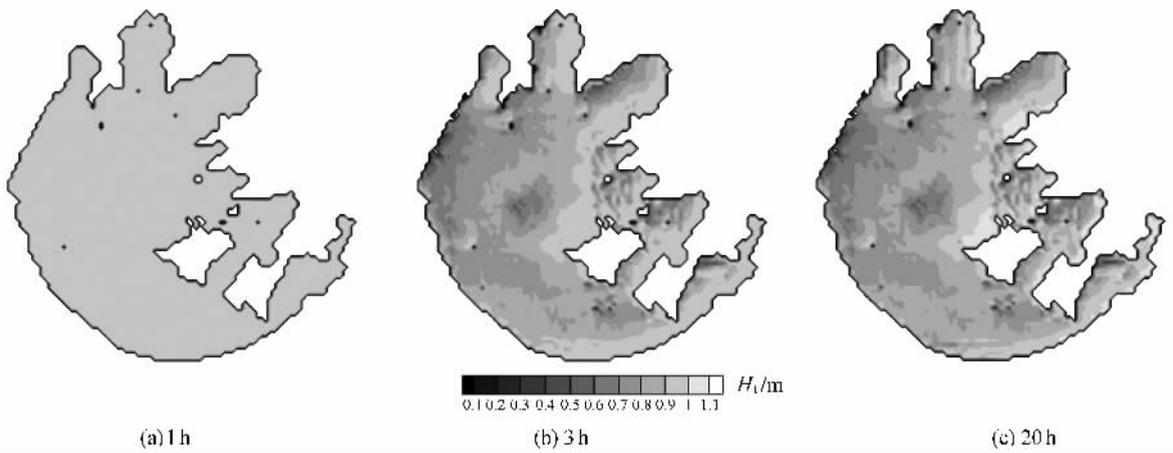


图5 6.5m/s东南风持续作用1h、3h、20h沉积物厚度分布

物厚度渐渐增大,而其他区域沉积物厚度逐渐减小,所以湖体大部分地区浓度慢慢降低。在实际风场作用下,太湖沉积物也是往岸边堆积,可见本模型模拟结果与悬浮物和沉积物实际变化情况相符,说明用ECOMSED模式模拟太湖浓度场结果的可靠性。

4 结论与展望

4.1 结论

a. 根据再悬浮模拟装置实验结果,总结了各种扰动强度下太湖底泥的启动、悬浮规律,模型计算运用实验所得参数值,大大提高了模拟结果的准确性。

b. 6.5 m/s定常东南风作用下,太湖有效波高的范围为9~29 cm,有效波高的空间分布与风速风向和水深有很大的关系,波高最大值主要分布在风区长度较大和水深相对较深处。与前人计算结果一致,说明波浪计算结果的可靠性。

c. 考虑波动切应力和水流切应力共同作用,到20h流场与波浪场达到稳定状态时,切应力分布也达到稳定状态。切应力最大值约1.1 Pa,出现最大值的地区主要有湖西北部地区,这与有效波高最大值出现的地区一致,说明波浪作用对切应力产生很大的影响。

d. 太湖西北片悬浮物浓度较高,东南沿岸浓度较低,悬浮物浓度值平面分布的差别是由切应力平面分布的不同导致的,而切应力分布又是由波浪和水流共同作用导致的,故悬浮物浓度值平面分布差别的间接诱因是风、浪、流等动力因素的共同作用。

e. 悬浮物浓度总体趋势随时间先增大后逐渐减小。随着切应力的增加悬浮物浓度增大,切应力达最大值后保持恒定,悬浮物也同时达到最大值,然后悬浮物浓度又受“湖流输沙”的影响逐渐降低。

综上所述,有效波高的空间分布与风速风向和水深有很大的关系,同时波浪对切应力会产生很大

影响,而切应力的分布决定了悬浮物浓度的分布,由此可见风浪及地形要素是导致太湖悬浮物浓度变化的重要因子。笔者模拟结果与现有实验成果较吻合,说明运用本模型模拟太湖沉积物再悬浮结果的可靠性。

4.2 展望

a. 由于未掌握实测风场及流场数据,笔者没有更具体详细的数据验证模型,因此有待于用太湖实测数据来对ECOMSED做进一步验证,为运用ECOMSED模型研究太湖的泥沙输移、藻类富集等提供可靠基础。

b. 由于未掌握太湖湖底沉积物厚度的实测数据,笔者没有考虑沉积物厚度的变化,对悬浮物浓度的预测结果会产生一些影响,因此有待于用实测太湖湖底沉积物厚度来对悬浮物浓度作更为精确的模拟计算。

参考文献:

- [1] 秦伯强,范成新.大型浅水湖泊内源营养盐释放的概念性模式探讨[J].中国环境科学,2002,22(2):150-153.
- [2] MATTHAI C, BIRCH G F, JENKINSON A, et al. Physical resuspension and vertical mixing of sediment on a high energy continental margin (Sydney, Australia)[J]. J Environ Radioactivity, 2001, 52: 67-89.
- [3] MIHELICIC G, SURIJA B, JURACIC M et al. History of the accumulation of trace metal in sediments of the saline Rogoznica Lake (Croatia)[J]. The Science of the Total Environment, 1996, 182: 105-115.
- [4] PEJRUP M, VALEUR J, JENSEN A. Vertical flux of particulate matter in Aarhus Bight[J]. Continental Shelf Research, 1996, 16(8): 1047-1064.
- [5] RUTGERS Van Der LOEFF M M, BOUDREAU B P. The effect of resuspension on chemical exchanges at the sediment-water interface in the deep sea: a modeling and natural radiotracer approach[J]. J Marine Systems, 1997, 11: 305-342.

(下转第12页)

鱼类自然资源、保存本土鱼类种质 维护生态平衡。

针对库区水生生物结构失衡的现状,为有效改善水体环境,可进行针对性的水生生物调控,针对性地放养鲴类等底层鱼类以改善库区底泥,放养青鱼等鱼类以吃食异常爆发的底栖动物,投放一定量的肉食性鱼类清除过多的小型鱼类,改善水生态环境及水域生物结构。

通过水域初级生产力及渔产力的正确估算,采用生物操控技术,合理放养鲢、鳙鱼以减缓和调控富营养化进程,将营养物质以鱼产品的形式出库。

合理利用营养物生物吸收技术解决区域营养盐过剩问题,降低水体中浮游植物量和氮、磷含量。对于已经富营养化的水体,可通过增殖沉水植物,加强根际系统的净化,消耗水体的营养物质,降低水中的营养水平,提高水环境质量。

致谢:本研究得到广西壮族自治区水产研究所资源环境首席专家周解研究员的指导和帮助,在此深表感谢!对参加红水河流域水生生物自然资源调查研究的何安尤、龚竹林、杨家坚、梁雪松、吴祥庆、庞燕飞、朱瑜、张益峰、雷建军、施军等同志及多年来长期进行红水河流域水生生物自然资源调查及保护研究的同志也深表感谢!

参考文献:

- [1]广西壮族自治区水产研究所.广西壮族自治区内陆水域渔业自然资源调查研究报告[R].南宁:广西壮族自治区水产研究所,1984.
- [2]广西壮族自治区水产研究所.岩滩水库水生生物自然资源调查报告[R].南宁:广西壮族自治区水产研究所,1998.
- [3]广西壮族自治区水产研究所.岩滩水电站库区水生生物资源调查及回顾评价报告[R].南宁:广西壮族自治区水产研究所,2004.
- [4]广西壮族自治区水产研究所.红水河来宾段珍稀鱼类自治区级自然保护区科学考察报告[R].南宁:广西壮族自治区水产研究所,2005.
- [5]广西壮族自治区水产研究所.大唐桂冠合山发电有限公司2×600MW级机组上大压小工程温排水对排水区域水生生物影响预测及评价报告[R].南宁:广西壮族自治区水产研究所,2007.
- [6]张觉民,何志辉.内陆水域渔业自然资源调查手册[M].北京:农业出版社,1991.
- [7]广西壮族自治区水产研究所.广西淡水鱼类志[M].南宁:广西人民出版社,1984.
- [8]广西壮族自治区水产研究所.广西淡水鱼类志[M].南宁:广西人民出版社,2007.

(收稿日期 2010-03-16 编辑 徐娟)

(上接第5页)

- [6] MASHWASH N J. ECOMSED manual[M]. Lethbridge: HYDROQUAL Inc,2002:1-188.
- [7] BURBAN MCNEIL J, LICK W. Settling speeds of flocs in fresh and sea water[J]. Journal of Geophysical Research,1990,95(C10):18213-18220.
- [8] 胡维平,濮培民,秦伯强.太湖水动力学三维数值试验研究-1:风生流和风涌增减水的三维数值模拟[J].湖泊科学,1998,10(4):17-25.
- [9] 张运林,秦伯强.太湖水体中悬浮物研究[J].长江流域资源与环境,2004,10(3):266-271.

- [10] 王鹏.水动力作用下太湖沉积物再悬浮的模拟实验研究[C]//中国环境科学学会.第十三届世界湖泊大会论文集.北京:中国环境科学出版社,2009.
- [11] 罗淑葱,秦伯强.太湖波浪与湖流对沉积物再悬浮不同影响的研究[J].水文,2003,23(3):1-4.
- [12] 汤露露.基于 ECOMSED 模式的太湖风生流三维数值模拟[C]//中国环境科学学会.第十三届世界湖泊大会论文集.北京:中国环境科学出版社,2009.
- [13] 刘兴平.太湖波浪过程的数值模拟[J].江苏大学学报,2009,30(1):80-85.

(收稿日期 2010-05-20 编辑 徐娟)

(上接第8页)

- [10] 李剑超,朱光灿,刘伟生,等.沉积时间和温度对底泥间隙水有机污染物的影响[J].农业环境科学学报,2004,23(4):723-726.
- [11] 范成新,张路,王建军,等.湖泊底泥疏浚对底泥释放影响的过程与机理[J].科学通报,2004,23(4):1523-1528.
- [12] 杨龙元,蔡启铭,秦伯强,等.太湖梅梁湾沉积物-水界面

- 氮迁移特征初步研究[J].湖泊科学,1998,10(4):41-47.
- [13] 范成新,张路,杨龙元,等.湖泊沉积物氮磷内源负荷模拟[J].海洋与湖沼,2002,33(4):371-378.
- [14] 李文红,陈英旭,孙建平.疏浚对影响底泥向上覆水体释放污染物的研究[J].农业环境科学学报,2003,22(4):446-448.

(收稿日期 2010-01-10 编辑 徐娟)