

太湖风生流水动力时空差异特征研究

周媛媛¹, 刘晓东¹⁻³, 华祖林¹⁻³, 胡功宇⁴, 顾莉¹⁻³, 陈立强¹

(1.河海大学环境学院, 江苏 南京 210098; 2.河海大学浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 3.河海大学水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心, 江苏 南京 210098; 4.长江水利委员会荆江水文水资源勘测局, 湖北 荆州 434002)

摘要: 为研究太湖的流场结构,更好实施引清调水方案改善太湖水质。在确定太湖四季主导风向及其平均风速的基础上,采用有限体积Godunov型通量差分裂(FDS)格式构建太湖水动力模型,并得到了实测流场的良好验证。并进一步研究各季节各湖区的流动规律,确定太湖风生流水动力时空差异特征。结果表明:太湖风生流流态特征主要与风向、风速有关;不同季节平均流速由大到小分别为:冬季、春季、秋季、夏季;从不同的湖区看,湖岸区最大、湖湾区次之、湖心区最小。由此可选择冬季、湖岸区实施调水方案改善太湖水质。

关键词: 太湖; 水动力特征; 风生流; 数值模拟; 时空差异

中图分类号: TV213.3

文献标志码: A

Study of the Temporal and Spatial Differences of Hydrodynamic Characteristics of Wind-induced Current in Taihu Lake

Zhou Yuanyuan¹, Liu Xiaodong¹⁻³, Hua Zulin¹⁻³, Hu Gongyu⁴, Gu Li¹⁻³, Chen Liqiang¹

(1.School of the Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2.Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development of Shallow Lakes (Ministry of Education), Hohai University, Nanjing 210098, China; 3.National Engineering Research Center of Water Resources Efficient Utilization and Engineering Safety, Hohai University, Nanjing 210098, China; 4.Jingjiang Hydrology and Water Resources Surveying Bureau of Changjiang Water Resources Commission, Jingzhou 434002, China)

Abstract: In this paper, to study the flow structure of Taihu Lake and implement the clean water diversion program for better improvement of the water quality, the average wind speed and dominant wind direction in four seasons of Taihu Lake is first identified. Then, flux difference splitting (FDS) format of finite volume Godunov-type is used to build up a hydrodynamic model with smooth verification. Furthermore, seasonal flow patterns of each lake area are studied, and temporal and spatial differences of hydrodynamic characteristics of wind-induced current in Taihu Lake are determined. The results show that the flow patterns and characteristics of wind-induced current in Taihu Lake are mainly influenced by wind direction and velocity. The maximal average velocity is in winter followed by that in spring, fall and summer in a descending order. From a view of different lake areas, the maximal velocity in the lakeshore area is the largest, followed by that in the bay area. The velocity in the middle of the lake is the smallest. Therefore, it is suggested that the lakeshore area should be chosen for implementation of the diversion program in winter to improve the water quality.

Keywords: Taihu Lake; Hydrodynamic Characteristics; Wind-induced Current; Numerical Simulation; Temporal and Spatial Differences

CLC number: TV213.3

收稿日期: 2014-07-13

基金项目: 国家科技支撑计划课题(2012BAB03B04); 国家自然科学基金资助项目(51179052,51379060,51379058); 水利部公益性行业科研专项经费(201001028); 江苏高校优势学科建设工程项目基金资助

作者简介: 周媛媛(1989-), 女, 硕士研究生。研究方向: 环境水力学。E-mail: zhouyuanyuanQ@163.com

通信作者: 华祖林(1965-), 男, 教授、博导。研究方向: 环境水力学、水动力与水质模型。E-mail: zulinhua@hhu.edu.cn

太湖是我国第三大淡水湖,位于长江三角洲的南翼坦荡的太湖平原上,湖泊面积2 338 km²,平均水深1.89 m。太湖承担着周边城市水源地供水及灌溉、养殖、蓄洪等任务。但随着太湖周边地区经济的发展,工农业大量废水的排入,同时由于太湖水体流速缓慢、置换周期长,自净能力差等原因,导致太湖水质富营养化严重,危及人民饮用水安全^[1]。湖流是湖泊中污染及悬移物质迁移的主要水动力学要素,因此研究太湖的流场结构,从而进一步研究太湖各季节湖流的流态特征及各湖区之间水流交换关系具有重要的科学意义和实际应用价值。

对于风生流的模拟,近年来许多学者已进行了广泛的研究。乌景秀等^[2]建立二维浅水湖泊风生流数值模型,分析地形、风向、补水流量等对浅水湖泊风生流的影响,并由此提出改善湖泊水环境的调控方案。王谦谦^[3]、许旭峰^[4]等分别建立了太湖风生流二维整层积分模式;为研究太湖风生流垂直向的差异,胡维平^[5]、王惠中^[6]、刘兴盛^[7]、周杰^[8]等分别设计了太湖风生流三维数值模式模拟太湖湖体中的动力过程和泥沙传输过程;由于太湖局部水域各湖区的流场模拟受空间剖分尺度的限制,骆辉煌^[9]、黄群^[10]、胡开明^[11]等分别对贡湖、梅梁湾、竺山湖风生流及其水环境影响进行数值模拟研究,揭示了各湖区流场的精细结构。另外,在研究太湖风生流时构建不同的模型,如黄群等^[12]应用嵌套模式进行数值模拟。WU^[12]为研究短期强风造成的太湖沉积物悬浮运动规律建立了太湖水域风生流浊度模型。邱辉^[13]通过分析发现风场驱动下流场的辐合和下沉运动与太湖底泥的空间分布有密切关系,并依此为基础研究不同气象条件下太湖底泥再悬浮情况。目前太湖二维水动力特征的研究较为成熟,但针对不同季节盛行风场下对各湖区湖流形态影响及季节与太湖水动力特征关系的研究较少^[14]。

本文根据太湖实测气象资料,以各季节的主导风向为研究风向,风速按同风向的平均值计算。应用无结构的任意四边形网格,构建有限体积Godunov型通量差分裂(FDS)格式水动力模

型,对太湖风生流场在不同季节盛行风场下的基本形态进行比较分析,同时综合分析不同湖区水流的流动规律,确定达到最大水交换量的季节及湖区。

1 基本方程及定解条件

1.1 基本方程

二维浅水方程组的守恒形式可表达为

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial f(q)}{\partial x} + \frac{\partial g(q)}{\partial y} = b(q) \quad (1)$$

式中, $q=[h, hu, hv]^T$ 为守恒物理量; $f(q)=[hu, hu^2 + gh^2/2, huv]^T$, 为x向通量; $g(q)=[hv, huv, hv^2 + gh^2/2]^T$, 为y向通量; $b(q)=[b_1, b_2, b_3]^T$ 为源项, 其中 $b_1=0$, $b_2=gh(S_{0x}-S_{fx})$, $b_3=bh(S_{0y}-S_{fy})$; x 、 y 、 t 分别为空间及时间坐标系; h 为水深; u 和 v 分别为 x 和 y 向沿水深积分平均流速分量; g 是重力加速度; S_{0x} 和 S_{fx} 分别是 x 向的水底底坡和摩阻坡度; S_{0y} 和 S_{fy} 分别是 y 向的水底底坡和摩阻坡度; $\nabla \cdot \nabla$ 为 Laplace 算子。

1.2 边界条件

(1) 入流边界: 对于入流边界 Γ_0 , 须给定水位或流速随时间的变化值:

$$\xi(x, y, t)|_{\Gamma_0} = \xi_i(t) \text{ 或 } u(x, y, t)|_{\Gamma_0} = u_i(t), \\ v(x, y, t)|_{\Gamma_0} = v_i(t).$$

(2) 出流边界: 采用自由出流边界, 即:

$$\xi(x, y, t)|_{\Gamma} = \xi_i(t), \frac{\partial u}{\partial s} = \frac{\partial v}{\partial s} = \frac{\partial \xi}{\partial s} = 0 \text{ (} s \text{ 为流线方向)}.$$

(3) 固壁边界: 在江岸等固壁边界采用不可入条件即可滑移条件, 即: $v_\eta = 0$ (η 为边界法线方向)。

(4) 边界处理: 在潮流计算中, 滩地和潜洲时没时出, 本文采用“干湿法”模拟动边界。当单元水深小于某一较小值时, 视为干单元, 不参与计算, 反之则参与计算。

1.3 基本方程的有限体积法离散

常用的无结构网格有三角形网格和四边形网格, 对于不同的网格, 采用相同的离散方法计算, 网格生成后各物理量的布置方式见图1, 采用单元中心形式, 图中箭头表示各控制体沿各边法向的输入及输出。

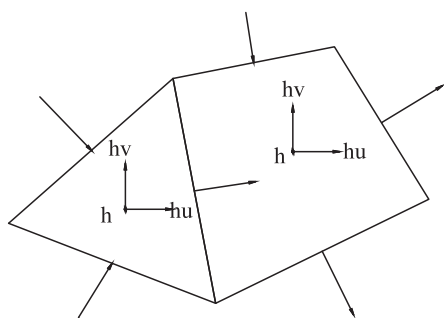


图1 控制体积上变量布置

对于任意单元 Ω ，其边界为 $\partial\Omega$ ，通过积分方程(1)并利用散度定理可得到有限体积法的基本方程

$$\iint_{\Omega} q_i d\omega = - \int_{\partial\Omega} F(q) \cdot n dL + \iint_{\Omega} b(q) d\omega \quad (2)$$

式中， n 为单元边界 $\partial\Omega$ 的外法向单位向量， $d\omega$ 和 dL 为面积分和线积分微元， $F(q) \cdot n$ 为法向数值通量， $F(q)=[f(q), g(q)]^T$ 。采用一阶精度离散和 f 和 q 具有的旋转不变性，得到式(2)的等价公式：

$$A \frac{\Delta q}{\Delta t} = - \sum_{j=1}^m T(\Phi)^{-1} f(\bar{q}) L^j + b^*(q) \quad (3)$$

式中， $T(\varphi)$ 为坐标轴旋转角度 φ 的变换矩阵， m 为单元边总数（对于三角形网格 $m=3$ ，四边形网格 $m=4$ ）， L^j 为单元边 j 的长度， A 为单元面积， $b^*(q)=(A \cdot b_1, A \cdot b_2, A \cdot b_3)$ 。在单元每一边两侧的值不同，问题归结为如何确定法向通量，这可通过解局部一维黎曼问题求得。

1.4 跨单元法向数值通量的计算

本文采用Godunov型通量差分裂（FDS）格式近似求解局部一维黎曼问题计算法向通量^[10]。通量差分裂格式对通量差按特征值进行分解，利用通量差分裂的一维结果，跨单元界面的法向数值通量 $f(q)$ 可分解为：

$$f(\bar{q}) = \frac{1}{2} [f_L(\bar{q}) + f_R(\bar{q})] - \sum_{k=1}^3 [\bar{\lambda}_k | \cdot \bar{\alpha}_k \cdot \bar{R}_k] \quad (4)$$

式中通量 $f(q)$ 的雅可比阵的特征值 $\bar{\lambda}_k$ 、特征强度 $\bar{\alpha}_k(q)$ 和特征向量 $\bar{R}_k(q)$ 分别为：

$$\bar{\lambda}_1 = \bar{u} + \bar{c} \quad \bar{\lambda}_2 = \bar{u} \quad \bar{\lambda}_3 = \bar{u} - \bar{c}$$

$$\bar{\alpha}_1 = \frac{1}{2c} [(hu)_L - (hu)_R - \bar{\lambda}_3(h_L - h_R)]$$

$$\bar{\alpha}_2 = (hv)_L - (hv)_R - \bar{v}(h_L - h_R)$$

$$\bar{\alpha}_3 = (h_L - h_R) - \bar{\alpha}_1$$

$$\bar{R} = (\bar{R}_1, \bar{R}_2, \bar{R}_3) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ \bar{u} + \bar{c} & 0 & \bar{u} - \bar{c} \\ \bar{v} & 1 & \bar{v} \end{bmatrix}$$

在上述公式中，“-”表示变量取Roe区间平均。对算出的 $f(q)$ 作逆旋转变换即可得到原始坐标系下的法向数值通量。

2 风生流数值模拟

2.1 太湖水动力驱动因素分析

环太湖水流大部分为吞吐流，水流进出河道受潮汐作用影响。然而，相对于太湖2 338 km²的湖泊面积，4.48 × 10⁹ m³的蓄水量，如太湖这类封闭水体，其整体的潮流运动受环湖吞吐流的影响较小，主要受风作用力的影响。由于太湖独特的地形地貌条件，不同的风向下形成特征不同的潮流环流运动。因而风作用力是太湖水动力分布的主要驱动因子。本次研究统计分析收集的2000年风速资料。2000年全年各风向的平均风速为3.3~6.6 m/s，全年平均风速为5.1 m/s，最大风速为12.9 m/s，年主导风向为东北风，风向频率为12.3%。

根据太湖实测气象资料，风向考虑每季度的主导风向，风速按该主导风向的平均值考虑。不同季度主导风向及其平均风速见表1。春季和冬季主导风向的平均风速明显大于夏季和秋季，春季的主导风向为E向，夏季的主导风向为

表1 四季主导风统计

季节	主导风向	平均风速/m · s ⁻¹	出现时间/d	风频/%
春季(3、4、5)	E(东)	6.028	11	11.96
夏季(6、7、8)	SSW(南西南)	4.033	13	14.13
秋季(9、10、11)	NE(东北)	4.530	15	16.48
冬季(12、1、2)	NE(东北)	7.851	17	18.89

2.2 计算区域网格的布置

由于太湖流域岛屿众多造成湖区边界特征复杂,故文章采用无结构的任意四边形网格,能较好的贴合自然边界。形成的四边形网格变幅范围为 $100\text{ m} \times 150\text{ m} \sim 800\text{ m} \times 750\text{ m}$,尺度变幅不大。模型共布置网格单元9 274个,节点数为9 699个,见图2。太湖湖体平均水深1.89 m,其三维水下地形图见图3。图中单位:m。



图2 太湖计算网格

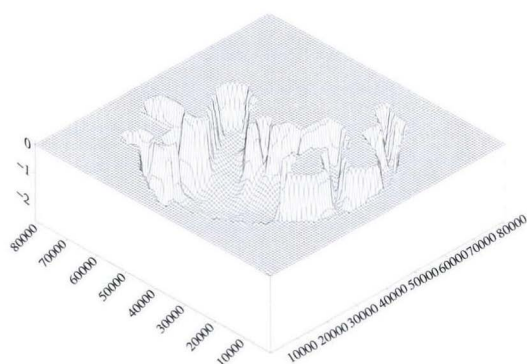


图3 太湖水下地形图

2.3 模型验证

该风生流数值模拟模型采用FORTRAN程序语言编制,以2001年3月中旬太湖风生流情况作为模拟验证的对象,根据实测资料,2001年3月中旬太湖盛行东南风,平均风速在 3.5 m/s 左右,风场相对比较稳定,风向变化小,且持续时间长,为太湖稳定风生流的形成创造较好的条件。其他的水文、气象资料也均选用2001年3月中旬的实测值,实测流场见图4。

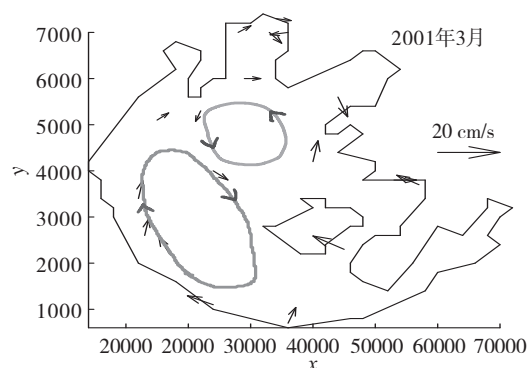


图4 2001年3月实测流场图

在模型模拟计算时,假定初始时刻湖面静止,没有扰动。边界条件为概化后的环湖河道,流量、水位等水文资料均取2001年3月中旬的实测值。风速取2001年3月中旬太湖10 m高程的平均风速 3.5 m/s ,风向取其平均风向东南风。计算总时长为80 h,此时太湖流场已达到充分稳定状态,模拟流场见图5。

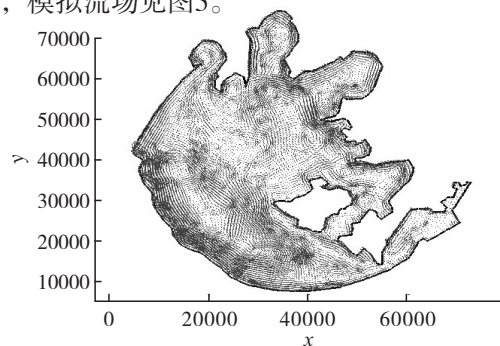


图5 2001年3月模拟流场图

由图3实测流场可知,在太湖西岸有一个比较明显的大顺时针环流,在平台山和乌龟山之间有一个稍小一点的逆时针环流,且顺时针环流的流速要大于逆时针环流流速。在图5所示模拟流场中,也形成了相同形状的环流,环流的大小和方向与实测结果比较一致,两者流速大小也比较接近。由此可见,模拟结果与实测结果吻合的较好,说明模型的建立是合理的。

2.4 不同季节风生环流模拟

利用基于任意四边形的非结构网格浅水湖泊模型,对不同季节下的盛行风场(主导风向、平均风速)下的太湖湖流进行了数值模拟,模拟流场图分别见图6~9。

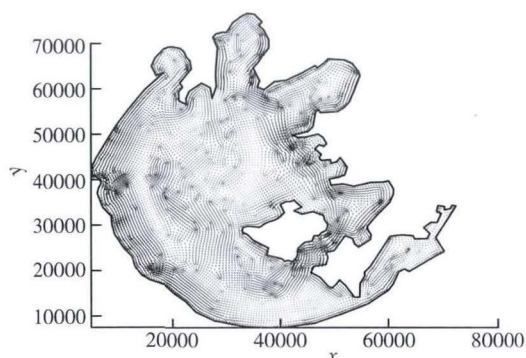


图6 春季主导风 (E向、6.0 m/s)

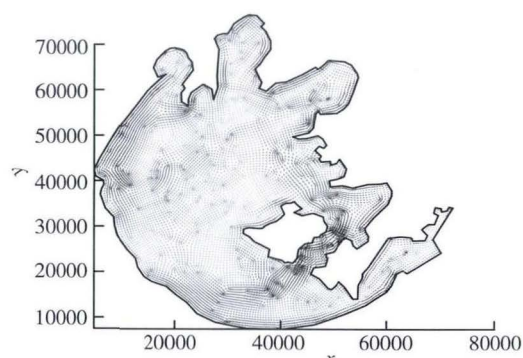


图7 夏季主导风 (SSW向、4.0 m/s)

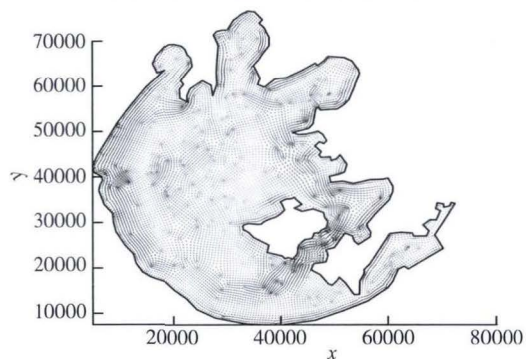


图8 秋季主导风 (NE向、4.5 m/s)

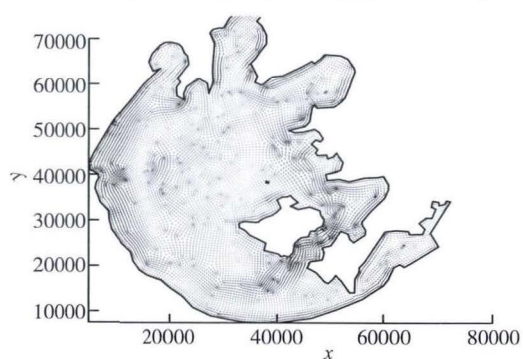


图9 冬季主导风 (NE向、7.9 m/s)

由图6可以看出,在春季盛行风东风的作用下,除太湖西南部及东北部流速较大外,其他区域流速大小的水平分布较为均匀,太湖西南部表层水体向西北偏西方向运动,湖心区水体沿风向向西方向运动;在夏季盛行风作用下,太湖西北部及东南部流速较大,其他区域流速大小分布水平较为均匀;在秋冬盛行风东南风的作用下,太湖东北部水体向西北偏东方向运动,西南部水体向西北偏西方向运动,湖心区水体沿风向向西北方向运动。通过对同风向(NE),不同风速(4.5 m/s、7.9 m/s)条件下产生流场效果的对比可以看出,风速大则水体流速大,风速小则水体流速也相对较小,表明风速决定水体流速。在流态方面,同风向不同风速条件所形成的环流形态基本相同,表明流态与风向有关,与风速大小关系不大(如图8、9)。由图6~9可知,春、秋、冬季以顺时针环流为主,夏季以逆时针环流为主,环流形态特征相似,只是方向不同。

由于太湖湖盆地势由东向西倾斜,且湖心区为深水区,在西山与东山间有一狭长水道,此处相对于其他区域流速较大。在盛行风场作用下,狭长水道区会形成较强的湖流,促进围绕洞

庭西山环流的形成。尤其在秋冬两季,此时风向平行于狭长水道,形成的沿岸流最强。

2.5 不同湖区水动力差异分析

在盛行风场作用下,风速按季节由大到小的排序分别为:冬季、春季、秋季、夏季,相互关系的比较见图10,四季平均流速大小与风速的排序基本一致,可见风速的大小决定湖区平均流速的大小。

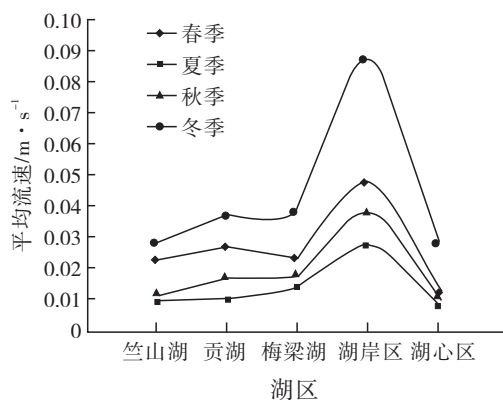


图10 各湖区四季平均流速

根据水动力差异特征,将太湖分为湖心区、湖湾区和湖岸区。由图6~10可以看出,太湖各湖区水域流速差异很大。首先,湖岸区水体流速最大,其中近岸区域的流速大于远岸区域,西

山及东山间狭长水道区尤为明显；湖湾区其次，湖心区最小，一般均小于5 cm/s。就湖湾区而言，竺山湖因其相对封闭，流速较梅梁湖、贡湖的流速小些，但相差不大。

3 结论

文章采用二维水流水质模型，用实测资料进行率定和验证，从流场计算结果验证可以看出，模型精度较高。文中以每季度的主导风向为研究风向，研究太湖风生流水动力在季节上的差异特征。太湖风生流风速按季节由大到小的排序分别为：冬季、春季、秋季、夏季。风速大小决定湖流流速的大小，从不同的湖区看，湖岸区的平均流速在0.027~0.087 m/s之间。湖湾区其次，湖心区最小，均小于5 cm/s。就湖湾区而言，竺山湖流速较小。在实际运用中，可选择风速较大季节及湖区实施调水方案改善太湖水质。

参考文献

[1]秦伯强,胡伟平,陈伟明.太湖水环境演化过程与机理[M].北京:科

学出版社,2004: 1-28.

[2]乌景秀,范子武,张 铭,等.浅水湖泊风生流强度数值模拟及工程应用[J].水电能源科学,2014,32(9): 119-122.

[3]王谦谦,姜加虎,濮伟民.太湖和大浦河口风成流、风涌水的数值模拟及单站验证[J].湖泊科学,1992,4(4):1-7.

[4]许旭峰,刘青泉.太湖风生流特征的数值模拟研究[J].水动力学研究与进展,2009,24(4):512-518.

[5]胡维平,濮培民,秦伯强.太湖水动力学三维数值试验研究—2.典型风场风生流的数值计算[J].湖泊科学,1998,10(4): 26-34.

[6]王惠中,宋志尧,薛鸿超.考虑垂直涡系数非均匀分布的太湖风生流准三维数值模型[J].湖泊科学,2001,13(3): 233-239.

[7]刘兴盛.太湖风生流及物质输运三维数值模拟[D].南京:河海大学,2005.

[8]周 杰,周 锋,江兴南,等.太湖风生环流及黏性泥沙输运的三维数值模拟[J].河海大学学报:自然科学版,2010,38(5): 489-493.

[9]骆辉煌,李 种,蒋 艳,等.南四湖风生流数值模拟研究[J].南水北调与水利科技,2011,9(3): 133-141.

[10]黄 群,姜加虎.应用嵌套模式研究梅梁湖区风生流[J].水科学进展,1998,9(1): 65-69.

[11]胡开明,逢 勇,谢 飞,等.直湖港、武进港关闸对太湖竺山湖水环境影响[J].湖泊科学,2010,22(6): 923-929.

[12]Wu Ting-feng, Qin Bo-qiang, Zhu Guang-wei, et al. Modeling of turbidity dynamics caused by wind-induced waves and current in the Taihu Lake[J]. International Journal of Sediment Research, 2013, 28(2):139-148.

[13]邱 辉.不同气象条件下太湖底泥再悬浮和水温的模拟研究[D].南京:南京信息工程大学,2012.

[14]Zhao D H, Shen H W, Lai J S, et al. Approximate Riemann solvers in FVM for 2D hydraulic shock wave modeling[J]. J Hydr Engrg, ASCE, 1996, 122(12):692-702.

(上接第33页)

一的水质管理向流域综合管理转变，为流域周围人民的的生活和健康提供水环境安全保障。

参考文献

[1]辽宁省环境保护.2007年辽宁省环境状况公报[R].沈阳: 辽宁省环境保护厅,2008.

[2]孟 伟.辽河流域水污染治理和水环境管理技术体系构建—国家重大水专项在辽河流域的探索与实践[J].中国工程科学,2013,15(3):4-10.

[3]辽宁省环境保护.2008年辽宁省环境状况公报[R]. 沈阳: 辽宁省环境保护厅,2009.

[4]钟玉秀,刘宝勤.对流域水环境管理体制改革的思考[J].水利发展研究,2008(7):10-15

[5]仇伟光,李艳红,邵姗姗.辽河流域水环境管理对策研究[J].环境与可持续发展,2013(3):89-91

[6]孟 伟,张 楠,张 远,等.流域水质目标管理技术研究(Ⅰ)—控制单元的总量控制技术[J].环境科学研究,2007,20(4):1-8

[7]梁 博,王晓燕.我国水环境污染物总量控制研究的现状与展望[J].首都师范大学学报:自然科学版,2005,26(1): 93-98.

[8]孟 伟,刘征涛,张 楠,等.流域水质目标管理技术研究[J].环境基准、标准与总量控制[J].环境科学研究,2008,21(1): 1-8.

[9]邓红兵,王庆礼,蔡庆华.流域生态系统管理研究[J].中国人口资源与环境,2002,12(6): 20-22.

[10]张宁红.太湖流域生态安全监测体系的构建[J].环境监测管理与技术,2008,20(3):1-5.

[11]孟 伟,秦延文,郑丙辉.流域水质目标管理技术研究(Ⅲ)—水环境流域监控技术研究[J].环境科学研究,2008,21(01):9-16.

[12]孟 伟.中国流域水环境污染综合防治战略[J].中国环境科学,2007,27(5):712-716.

[13]孟 伟,张 远,张 楠.流域水生态功能分区与质量目标管理技术研究的若干问题[J].环境科学学报,2011,21(7):1345-1351.

[14]王秉杰.现代流域管理体系研究[J].环境科学研究,2013,26(4):457-464.

[15]李 蕾.推进排污许可证制度逐步实现“三个过渡”[J].环境保护,2009,36(07):10-12.

[16]李宇斌,胡 成,李 璇.论流域污染物总量控制[A]/中国环境科学学会.中国环境科学学会学术年会论文集[C].北京: 中国环境科学出版社,2010:2163-2168.

[17]王秉杰.流域管理的形成、特征及发展趋势[J].环境科学研究,2013,26(4):452-456.

[18]梁 博,王晓燕.我国水环境污染物总量控制研究的现状与展望[J].首都师范大学学报:自然科学版,2005,30(1):93-98.

[19]孟 伟,王海燕,王业耀.流域水质目标管理技术研究(Ⅳ)—控制单元的水污染物排放限值与削减技术评估[J].环境科学研究,2008,21(2):1-9.