

直湖港、武进港关闸对太湖竺山湖水环境影响^{*}

胡开明¹, 逢 勇^{1,2}, 谢 飞³, 蒋 哟⁴, 杨树滩⁴

(1:河海大学环境学院,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,南京 210098)

(3:江苏省环境科学研究院,南京 210036)

(4:江苏省水资源服务中心,南京 210029)

摘要:建立了太湖风生流水质数学模型,并结合该地区的水文特征和实测数据,对流场和浓度场进行了模拟和对比。以竺山湖为研究区域,定量分析了直湖港、武进港关闸情况下不同风向以及不同污染物排放量对竺山湖水环境的影响,并计算了各种治理措施的改善效果。结果表明:采用太湖水量水质数学模型得到的太湖流场、浓度场计算值与实测值均相差不大,水量是污染物对竺山湖水环境影响的主要因素,而风向作用不明显;从雅浦港引水需约 16d 使竺山湖水质逐渐得到改善并最终稳定,同理从太滆运河引水需约 25d。

关键词:直湖港;武进港;竺山湖;关闸;水环境;太湖

Effects of Zhihugang and Wujingang closing sluices on water environment of Lake Zhushan, Lake Taihu

HU Kaiming¹, PANG Yong^{1,2}, XIE Fei³, JIANG Yong⁴ & YANG Shutian⁴

(1:College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, P. R. China)

(2:Key Laboratory for Integrated Regulation and Resources Exploitation on Shallow Lakes, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, P. R. China)

(3:Jiangsu Provincial Academy of Environmental Science, Nanjing 210036, P. R. China)

(4:Water Resources Service Center of Jiangsu Province, Nanjing 210029, P. R. China)

Abstract: A 2-D unstable-state model of water quantity and quality on wind-driven current in Lake Taihu was established. By using the measured hydrological data the flow and concentration fields were numerically simulated, and the simulations were inter-compared. Lake Zhushan was taken as a case of research area to analyze the impacts of its water environment by Zhihugang and Wujingang closing sluices, which either different wind directions or different pollutant emissions were quantificationally estimated, and the improving effects of several treatment measures were also calculated. The data showed that using 2-D unstable-state model of water quantity and quality equations to calculate showed a small measured difference for the flow and concentration fields. For the effect on water environment of Lake Zhushan, water quantity played a better role than wind directions. It would require 16 days to improve the water quality of Lake Zhushan diverting water from Yapugang River, while 25 days from Taige Canal.

Keywords: Zhihugang; Wujingang; Lake Zhushan; closing sluices; water environment; Late Taihu

竺山湖位于梅梁湖的西面、太湖的西北角^[1],2007 年无锡饮用水污染事件发生后,江苏省委省政府为确保梅梁湖水质,关闭了直湖港、武进港入湖闸门,闸门关闭后,直湖港、武进港两条河流中的污染物大部分被逼至雅浦港及太滆运河。因此,原先由直湖港、武进港两条河流汇入梅梁湖的污染物大部分直接或间接地汇入竺山湖,使竺山湖的水环境受到更大影响。而太湖潮流主要是风生流,风力是其流场形成的动力因子,在

* 国家水体污染防治与治理科技重大专项项目(2008ZX07101-001-02, 2008ZX07101-002, 2008ZX07101-006, 2009ZX07528-005-03-02)资助。2010-01-22 收稿;2010-04-28 收修改稿。胡开明,男,1985 年生,博士研究生;E-mail:hukaiming@hhu.edu.cn。

常风向(东南风及西北风)作用下,形成湖湾内回流场,全年流速在1~10m/s量级,竺山湖是属于太湖口袋形湖湾之一,水流在竺山湖内形成一个逆时针环流,并且在竺山湖外部有两个明显的环流,流向刚好相反,一个为顺时针环流,一个为逆时针环流,环流的流速都不是很大^[2],使得竺山湖与大太湖流场相对封闭,不利于物质运输交换,竺山湖内的污染物质难以通过潮流的迁移、扩散到大太湖中去,从而降低了竺山湖水体的水环境容量,导致竺山湖成为整个太湖湖体中水污染最为严重、湖泛和蓝藻发生频率最高、湖泊生态系统退化最严重的湖区之一。因此,分析直湖港、武进港关闸对竺山湖水环境的影响十分重要。

本文从不同风向及不同污染物排放量两个方面着手,并考虑水流从雅浦港和太滆运河进入竺山湖两种情况,计算分析了风向和水量这两因子对污染物影响竺山湖水环境的权重关系,同时估算了引水对竺山湖的改善效果和该区域水质达到稳定所需引水的时间,为环境主管部门对太湖流域入湖河流污染物实施总量控制规划提供科学依据,也为太湖流域入湖污染物实施总量控制管理奠定基础。

1 直湖港、武进港关闸前后竺山湖水质变化

通常情况下,京杭运河以南直武地区(直湖港和武进港小流域范围)水流流向是:京杭运河水流入直武地区后,大部分水流直接入梅梁湖,只有一小部分通过武宜运河、锡溧漕河等河道辗转由雅浦港、太滆运河等入竺山湖。直湖港、武进港关闸后,水流进不了梅梁湖,只能被逼至武宜运河、锡溧漕河等河道再进入雅浦港、太滆运河最终将汇入竺山湖,明显增加了竺山湖的水环境压力(图1)。



图1 研究区域及监测点位示意

Fig. 1 General view of research area and water quality monitoring points

对比2007年4月和6月直湖港、武进港入湖闸口关闭前后情况,竺山湖水质变化较为明显,具体见表1(两次监测时天气均晴好,太湖湖面基本无风浪)。对比结果表明,竺山湖百渎口监测点高锰酸盐指数、总磷和总氮水质数据在直湖港、武进港关闸后浓度超过关闸前浓度的16.7%、155.3%和40.9%;沙塘港监测点高锰酸盐指数、总磷和总氮水质数据在直湖港、武进港关闸后浓度超过关闸前浓度的46.8%、151.6%和100.3%,监测点位置见图1。

水质对比结果表明,在直湖港、武进港入湖口实行闸控之后大量污染物被逼入竺山湖,使竺山湖水质明显恶化。

表1 关闸前后竺山湖水质变化

Tab. 1 Water quality variation of Lake Zhushan between opening sluices and closing sluices

断面	工况	高锰酸盐指数(mg/L)	总磷(mg/L)	总氮(mg/L)
百渎口	关闸前	5.4	0.123	6.99
	关闸后	6.3	0.314	9.85
	变幅(%)	16.7	155.3	40.9
沙塘港	关闸前	6.2	0.126	6.99
	关闸后	9.1	0.317	14.00
	变幅(%)	46.8	151.6	100.3

从上述分析可知,直湖港、武进港关闸前后竺山湖水质明显恶化,由于关闸梅梁湖水质得到改善,保障了小湾里水厂、贡湖水厂水源地的水质,但这样一来,等于把污染物转移到了竺山湖,没有从根本上解决水体污染问题,竺山湖水质达标压力明显增大,蓝藻在竺山湖大规模暴发的可能性也明显增加。

2 模型建立及参数选取

2.1 水量方程

假设湖水为均匀不可压的流体,垂直方向上服从静水压力分布。采用笛卡尔左手直角坐标系,x轴和y

轴位于湖水的平均水平面上, x 轴向东为正, y 轴向北为正, z 轴向下为正, 得其流体动力学方程^[3-4]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} &= fv - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + A_h \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right] + A_z \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} &= -fu - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + A_h \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right] + A_z \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} &= 0 \\ p &= \rho_w g(\eta + z) \end{aligned} \quad (1)$$

式中, u, v, w 分别为 x, y, z 轴方向上的流速分量, η 为垂直方向上湖面相对于平均水平面的高度, ρ_w 为水体密度, A_z, A_h 分别为垂直和水平涡动粘滞系数, f 为柯氏参数 ($f = 7.23 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$), g 为重力加速度, p 为水的压强. 其初始条件、边界条件以及收敛条件的确定见参考文献[5-6].

2.2 水质方程

水质方程是以质量平衡方程为基础的, 由于三维水质输移方程包涵很多不可确定的参数, 在现有条件下, 模型的验证存在困难, 考虑到资料及模型计算工作量等因素, 采用二维水质模型, 其输移方程为:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + U \frac{\partial C_i}{\partial x} + V \frac{\partial C_i}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(E_x \frac{\partial C_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(E_y \frac{\partial C_i}{\partial y} \right) - K_i C_i + S_i \quad (2)$$

式中, C_i 为污染物(高锰酸盐指数、总磷、总氮)垂线平均浓度; U, V 分别为 x, y 方向上的流速分量; E_x, E_y 为 x, y 方向扩散系数; K_i 为污染物降解系数; S_i 为污染物源汇项, 根据大型浅水湖泊生境特性, 污染物源汇项主要是底质起悬引起的污染物释放^[7]. 其定解条件和边界条件见文献[8-9].

2.3 参数率定验证

2.3.1 湖体流场模拟及分析 太湖环湖进出河道约有 219 条, 受潮汐影响, 大部分为吞吐流, 然而相对于太湖 2338 km^2 的面积, $4.48 \times 10^9 \text{ m}^3$ 的蓄水量, 环湖吞吐流对整体湖流运动的影响比较小, 湖流运动主要还是受风生流的影响较多, 一年内随着不同季节主导风向的变化, 受风场影响的湖泊环流也呈现出不同的环流方向和形式. 故模型中未考虑吞吐流对太湖湖流的影响, 环湖河道只作为边界条件引入.

将太湖划分为 81×81 个网格, 选取 2001 年 3 月中旬作为模拟对象, 因为根据实测资料, 2001 年 3 月风场相对比较稳定, 风向变化不是很大, 并且持续时间相对较长, 为太湖稳定风生流的形成创造了较好的条件. 在模型计算时, 假定初始时刻湖面是静止的, 没有扰动, 取 $A_z = 4 \text{ cm}^2/\text{s}, A_h = 0.5 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{s}$, 空间步长 $\Delta x = \Delta y = 1 \text{ km}$, 时间步长 $\Delta t = 120 \text{ s}$. 边界条件为概化后的环湖河道, 流量、水位等水文资料取 2001 年 3 月的实测值. 风速取 2001 年 3 月中旬 10m 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, 模拟与实测流场见图 2.

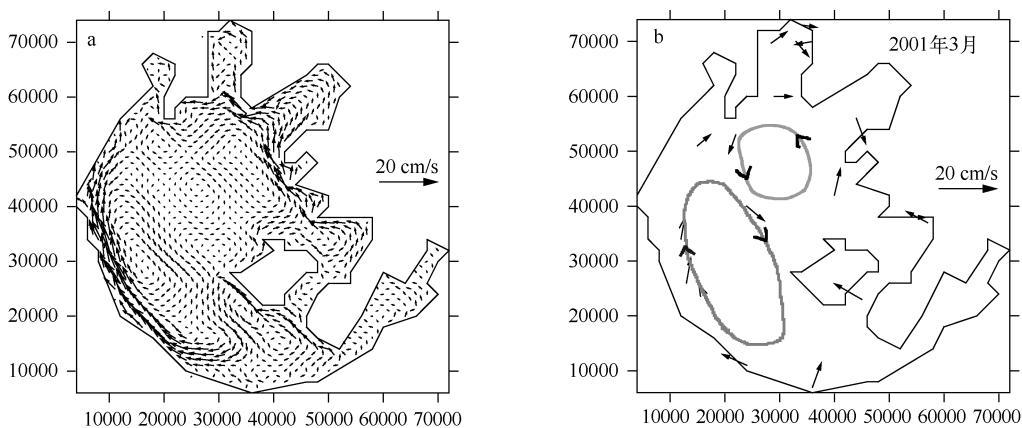


图 2 太湖模拟(a)和实测(b)流场

Fig. 2 Simulated(a) and measured(b) flow field of Lake Taihu

由实测流场(图2b)可得,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。在模拟流场(图2a)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,表明所建立的太湖水流模型能较好地仿真模拟太湖水流运动特性。模型基本参数率定成果为曼宁系数(湖底糙率): $n=0.025$;风应力系数: $\gamma_a^2=0.0013$ 。

2.3.2 湖体浓度场模拟及分析 采用2007年4月和6月直湖港、武进港入湖闸口关闭前后情况,竺山湖的百渎口和沙塘港及梅梁湖的小湾水厂(位置见图1)3个监测点实测的资料对水质模型进行了模拟,判别要素分别为高锰酸盐指数、总磷和总氮3项,由率定结果可知:模型的计算值与实测值无论是在分布趋势上,还是在具体的数值上都比较接近,说明所建立的数学模型和通过模型率定所得的参数是合理的,可以用来预测太湖各排污口排放量对该湖体水域的影响(表2)。 x 、 y 方向扩散系数均为 $2.0\text{m}^2/\text{s}$,高锰酸盐指数、总磷和总氮的降解系数分别为 0.06d^{-1} 、 0.02d^{-1} 和 0.04d^{-1} 。另外采用2009年6月竺山湖及湖西区实测数据又对模型进行了验证,误差均在10%以内^①。

表2 关闸前后各监测点水质率定

Tab. 2 Comparison of calculated and measured water quality concentration of each monitoring point between opening sluices and closing sluices

断面	工况	高锰酸盐指数			总磷			总氮		
		实测值 (mg/L)	计算值 (mg/L)	误差 (%)	实测值 (mg/L)	计算值 (mg/L)	误差 (%)	实测值 (mg/L)	计算值 (mg/L)	误差 (%)
百渎口	关闸前	5.4	5.5	1.85	0.123	0.130	5.69	6.99	6.81	2.58
	关闸后	6.3	6.2	1.59	0.314	0.310	1.27	9.85	10.20	3.55
沙塘港	关闸前	6.2	6.3	1.61	0.126	0.131	3.97	6.99	6.62	5.29
	关闸后	9.1	8.7	4.40	0.317	0.290	8.52	14.00	13.20	5.71
小湾水厂	关闸前	8.1	8.5	4.94	0.193	0.198	2.59	3.77	3.80	0.80
	关闸后	7.4	7.5	1.35	0.154	0.159	3.25	2.84	2.91	2.46

3 直湖港、武进港关闸对竺山湖水环境影响分析

3.1 计算方案

直湖港、武进港关闸时,水流可能主要通过雅浦港下泄。若雅浦港开闸,则水流直接进入竺山湖;若雅浦港关闸,则水流辗转通过太滆运河进入竺山湖。本文主要论证直湖港、武进港关闸时水流方向两种方案对竺山湖的影响:(1)直湖港、武进港关闸时水流从雅浦港进入竺山湖的情况下,对湖体水环境的影响;(2)直湖港、武进港关闸时水流从太滆运河进入竺山湖的情况下,对湖体水环境的影响。

表3 关闸对竺山湖水环境影响计算方案

Tab. 3 Calculation schemes of water environment impact in Lake Zhushan with the sluices closed

下泄通道	水期	流量 (m^3/s)	高锰酸盐指 数(mg/L)	总磷 (mg/L)	总氮 (mg/L)
雅浦港	丰水期	30.29	7.44	0.36	7.63
	平水期	17.95	8.84	0.43	9.06
	枯水期	8.78	11.58	0.56	11.86
太滆运河	丰水期	69.19	6.74	0.33	6.91
	平水期	45.19	7.54	0.36	7.72
	枯水期	22.89	9.28	0.45	9.51

由于竺山湖区域入湖河道较多,根据太湖河网模型^[10]计算出丰、平、枯水期竺山湖各主要入湖河道水量值,丰水期水量较大、水质较好,平、枯水期水量减小,但水质相应变差。考虑污染物入湖通量在三期差别较大,分别模拟了最不利条件(即入湖通量最大)时这三期水流从雅浦港和从太滆运河进入竺山湖情况下污染物排放在竺山湖形成的浓度场,具体初始条件选取见表3。

① 余辉等.中国环境科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务专项——基于太湖入湖污染物总量控制的湖泊水体分区研究(2007KYYW29),2009.

3.2 计算结果及分析

3.2.1 不同风向下污染物排放对竺山湖水环境影响分析 实际计算时考虑了很多不同风向风速的组合方案,这里仅描述在现状排污量情况下,3.5m/s 平均风速(可以代表大多数)^[11-12]时代表风向^[13]下水流从雅浦港进入竺山湖情况下高锰酸盐指数的污染带分布,见图3,太滆运河情况图略.

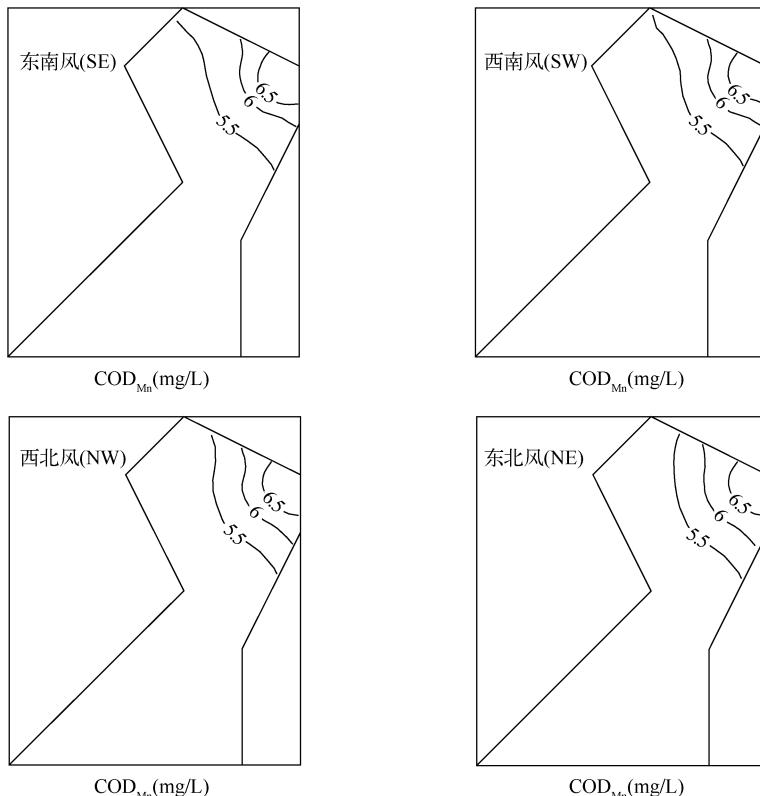


图3 典型风向作用下高锰酸盐指数污染带分布

Fig. 3 Pollution zone distributions of COD_{Mn} in Lake Zhushan under the effect of typical wind directions

在不同风向下,高锰酸盐指数的污染带主要受排污口周边的流场影响而呈现不同形状,但影响的面积变化不大(污染带外包络线浓度为Ⅲ类水时的面积基本在5.2~5.4km²之间)(图3),说明风向作用不是污染物对竺山湖水环境影响的主导因素.

3.2.2 不同排放量对竺山湖水环境影响分析 鉴于风场对污染带的影响,在相同污染带面积控制标准下,污染物通量随风向风速条件的不同而有所差异.故需考虑各风向风速联合频率对设计水文条件进行联合订正^[13].太湖流场计算所取的N、NE、E、SE、S、SW、W、NW风向频率分别为7.085%、13.930%、23.240%、17.850%、13.815%、9.495%、7.790%、6.795%,合计100%^[14],平均风速为3.5m/s.

设计水流条件为不同风向风速联合频率下的综合水流条件,根据该水流条件计算得到入湖河道排污量与污染带长度的关系,从而计算得到不同污染物排放量对研究区域水环境的影响程度.具体为:首先计算得到不同风向下的太湖流场,在此基础上,计算出污染带的分布,以太湖风向频率作为权重,得到太湖风向风速联合频率订正后的污染带分布,从而计算得到太湖湖体的污染物浓度场分布.本文只给出丰、枯两期的浓度场图,具体见图4.

水流从雅浦港进入竺山湖情况下,丰、平、枯水期形成污染带长度为3km时的高锰酸盐指数浓度分别为6.96、6.19、5.54mg/L,总磷浓度分别为0.19、0.16、0.12mg/L,总氮浓度分别为4.60、3.81、3.14mg/L;水流从太滆运河进入竺山湖情况下,丰、平、枯水期形成污染带长度为3km时的高锰酸盐指数浓度分别为9.72、

8.28、5.81mg/L, 总磷浓度分别为0.33、0.25、0.19mg/L, 总氮浓度分别为7.43、5.95、4.44mg/L(图4). 最不利条件下污染物入湖通量随枯、平、丰水期依次增大, 相同污染带长度位置处的水质浓度也相应的呈正比, 即为: $C_{\text{丰}} > C_{\text{平}} > C_{\text{枯}}$; 由此可以断定, 虽然河道水质随丰、平、枯水期依次变差, 但入湖流量也随之减小, 综合两者的影响得知, 水量的影响较大, 故水量是污染物对竺山湖水环境影响的主要因素, 并且水流从太滆运河进入竺山湖时水质更差.



图4 最不利条件下竺山湖污染带分布

Fig. 4 Distributions of pollution zone in Lake Zhushan under the most adverse conditions

4 结论与建议

(1) 以竺山湖为研究区域, 针对受风生流影响明显的大型浅水湖泊, 考虑入湖河道进入湖区后产生的污染带受风场影响而形成不同分布, 分析了直湖港、武进港关闸情况下不同风向以及不同污染物排放量对竺山湖水环境的影响, 得到水量是污染物对竺山湖水环境影响的主要因素, 而风向作用不明显.

(2) 现状条件下考虑对下泄通道入竺山湖的污染物进行削减, 可以一定程度上改善竺山湖的水环境质量, 削减率为5%、10%、15%时, 雅浦港作为下泄通道的情况下, 污染带长度为3km位置的高锰酸盐指数浓度由5.68mg/L分别下降到5.62、5.55、5.49mg/L, 总磷浓度由0.103mg/L分别下降到0.102、0.100、0.098mg/L, 总氮浓度由2.55mg/L分别下降到2.52、2.49、2.46mg/L; 太滆运河作为下泄通道的情况下, 污染带长度为3km位置的高锰酸盐指数浓度由6.15mg/L分别下降到6.07、5.98、5.89mg/L, 总磷浓度由0.111mg/L分别下降到0.109、0.107、0.105mg/L, 总氮浓度由3.40mg/L分别下降到3.32、3.25、3.18mg/L.

(3) 从上游引清水可以改善竺山湖的水环境,假设引水(Ⅱ类水,按分流比其中 $80\text{m}^3/\text{s}$ 进入雅浦港)与雅浦港自身混合后再进入到竺山湖,则可以使竺山湖的水环境质量得到一定程度上的改善。随着不断地引水,水质较好的河道水逐渐向竺山湖湖体渗透,从而使竺山湖水质逐渐得到改善并最终稳定。经计算,从雅浦港引水需约16d后达到此效果;同理按分流比引Ⅱ类水 $50\text{m}^3/\text{s}$ 进入太滆运河,25d后达到稳定。

(4) 除此之外,要改善区域水环境,应继续加大直湖港、武进港及雅浦港的水环境综合整治力度,加快新沟河、新孟河延伸拓浚工程进度,促进竺山湖水体的有序流动,形成湖体新循环,增加流域“引江济太”的入湖水量,缩短湖体换水周期,提高湖体水环境容量,这样在太湖水源地出现突发水污染事件情况下,也能够应急调引长江水,保障饮用水源地安全。

5 参考文献

- [1] 刘国锋,钟继承,何俊等.太湖竺山湾藻华黑水团区沉积物中Fe、S、P的含量及其形态变化.环境科学,2009,**30**(9):2520-2526.
- [2] 李一平.太湖水体透明度影响因子实验及模型研究[学位论文].南京:河海大学,2006:93-94.
- [3] 李一平,逢勇,陈克森等.水动力作用下太湖底泥起动规律研究.水科学进展,2004,**15**(6):770-774.
- [4] 吴旭光.分裂特征线法及收敛稳定性分析.河海大学学报(自然科学版),1992,**20**(6):71-79.
- [5] 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.中国环境科学,2002,**22**(2):150-153.
- [6] 逢勇,濮培民.太湖风生流三维数值模拟试验.地理学报,1996,**51**(4):322-328.
- [7] 李一平,逢勇,吕俊等.水动力条件下底泥中氮磷释放通量.湖泊科学,2004,**16**(4):318-323.
- [8] 逢勇,姚琪,濮培民.太湖地区大气-水环境的综合数值研究.北京:气象出版社,1998:48-70.
- [9] 朱维斌,张逢甲,卓诚翔.河流混合带污染物质二维浓度分布的计算.河海大学学报(自然科学版),1989,**17**(4):108-113.
- [10] 张利民,刘洋,孙卫红等.太湖流域漕桥河小流域水环境容量估算及污染物削减分配.湖泊科学,2009,**21**(4):502-508.
- [11] 逢勇,颜润润,余钟波等.风浪作用下的底泥悬浮沉降及内源释放量研究.环境科学,2008,**29**(9):2456-2464.
- [12] 范成新,张路,秦伯强等.风浪作用下太湖悬浮颗粒物中磷的动态释放估算.中国科学(D辑),2003,**33**(8):760-768.
- [13] 范丽丽.平原区域水环境容量计算体系研究[学位论文].南京:河海大学,2008:38-107.
- [14] 秦伯强,胡维平,陈伟民等.太湖水环境演化过程与机理.北京:科学出版社,2004:108.