

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2018.01.08

汉丰湖水体富营养化控制水量调度方案

陈焰¹, 胡林², 黄宏¹, 冯健³

(1. 上海海洋大学海洋生态与环境学院, 上海 201306; 2. 重庆市开县水利局, 重庆 405400;
3. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

摘要:为探究汉丰湖水量调度对库区水动力及水体富营养化的影响,基于2014年汉丰湖实测流量、水位和水质数据构建了MIKE21二维水动力和对流扩散模型,以实测流速、TN和TP浓度验证了模型的准确性,利用该模型模拟了7种调度方案下库区流速、TN和TP浓度分布情况,并对各模拟方案的运行情况进行了比较。结果表明,大流量的水量调度方式能有效提高库区水体流速,在较短时间内降低调节坝断面的TN、TP浓度,但实现整个库区营养盐浓度的降低需要保证一定的调度时间。

关键词:水量调度;富营养化;调度方案;MIKE21;流速;总氮;总磷;汉丰湖

中图分类号:X524 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2018)01-0042-08

Research on water scheduling schemes for water eutrophication control in Hanfeng Lake

CHEN Yan¹, HU Lin², HUANG Hong¹, FENG Jian³

(1. College of Marine Ecology and Environment, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;
2. Kai County Water Conservancy Bureau, Chongqing 405400, China;
3. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: In order to study the influence of water dispatching of Hanfeng Lake regulating dam on the hydrodynamic and water eutrophication in reservoir area, MIKE21 two-dimensional hydrodynamic and convective diffusion model were constructed based on the data of actual measured flow, water level and water quality of Hanfeng Lake in 2014, and the accuracy of the model was verified by the measured data of flow velocity, concentration of TN and TP. In addition, the distribution of flow velocity, concentration of TN and TP in the 7 different schemes were simulated by this model. The operation conditions of all schemes were compared. The results showed that the large flow of water scheduling mode can effectively improve the water flow velocity in the reservoir area, and reduce the concentration of TN and TP in the regulating dam section in a short time. However, the decrease of nutrient concentration in the whole reservoir requires a certain scheduling time.

Key words: water scheduling; eutrophication; scheduling scheme; MIKE21; flow velocity; TN; TP; Hanfeng Lake

三峡汉丰湖调节坝的建立改变了调节坝上游的水文特性,原来的小江河道变成了现在的汉丰湖,水体从原来的河流型转变成了湖泊型。城市的土地开

发利用、人口集中都给汉丰湖的水生态系统带来了一定的影响。近年来由于南河、东河营养物质的输入^[1],汉丰湖水体呈现不同程度的富营养化,引起

基金项目:国家水体污染控制与治理重大专项(2013ZX07104-004)

作者简介:陈焰(1992—),男,硕士研究生,研究方向为水质模拟。E-mail: 1070064260@qq.com

通信作者:黄宏,副教授。E-mail: hhuang@shou.edu.cn

了国内学者的广泛关注,但研究多限于水体营养状态的时空分布^[1-2]及浮游植物群落、底栖动物与环境因子的相关关系^[3-4]等方面,关于汉丰湖调节坝的调度方式对水体富营养化控制的研究鲜有报道。

MIKE21 水动力模型因其友好的操作界面、非结构网格以及能够处理复杂的边界等特点在许多领域得到广泛应用。张虎等^[5]利用 MIKE21FM 模型建立了巢湖二维水动力水质模型,模拟了引江济巢菜子湖和白荡湖方案对巢湖水质的改善效果;余成等^[6]应用 MIKE21 软件模拟武汉东湖引水工程 4 种引水工况下 TN、TP 的浓度分布情况;王哲等^[7]应用 MIKE21 软件模拟了金仓湖流场并对金仓湖水水质变化规律进行了预测与分析^[8]。已有研究表明,大流量有利于降低水体中污染物浓度^[9],增大流速可以抑制藻细胞生长,延缓水华发生^[10],因此,本文依托“三峡库区小江汉丰湖流域环境综合防治与示范课题”,利用 MIKE 21 水动力模型模拟不同下泄流量对汉丰湖水动力条件和营养盐浓度分布的影响,确定防止汉丰湖水体发生富营养化的水量调度方案,以期对汉丰湖调节坝的管理提供一定的理论支撑。

1 流域概况及研究方法

1.1 流域概况

汉丰湖是为减小三峡水库蓄水造成的 55 km² 消落区对开州生态环境的不良影响而建的,也是拦河而形成的三峡库区最大的库中湖。汉丰湖位于开州城区东河与南河交汇处,范围东起乌杨桥水位调节坝,西至南河大邱坝,南以新城防护堤高程 180 m 为界,北到老县城所在的汉丰坝—乌杨坝一线。汉丰湖库区周长为 36.4 km,湖泊东西跨度为 12.51 km,南北跨度为 5.86 km,西段狭窄,东段开阔,呈“Y”字形沿县城东西延展,蓄水量 8000 万 m³,常年水面面积为 14.8 km²,多年平均径流量约为 24 亿 m³,其中,37% 来自于东河,28% 来自于桃溪河,28% 来自于南河,7% 来自于其他,是我国西部内陆最大的城市人工湖。图 1 为汉丰湖及调节坝的位置示意图。

1.2 模型控制方程

MIKE21 是丹麦水利研究所开发的模拟水动力以及各种水质变化的软件,主要应用于河口、海洋、湖泊以及大型流域。本研究选择 MIKE21 水动力模块和对流扩散模块对汉丰湖水量调度进行数值模拟。

1.2.1 水动力控制方程

MIKE21 二维水动力控制方程为 Navier-Stokes 方程:

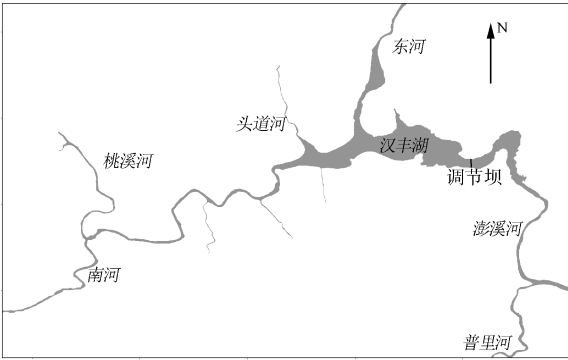


图 1 汉丰湖及调节坝位置示意图

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}}{\partial y} = hS \tag{1}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial h\bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}\bar{u}}{\partial y} = & f\bar{v}h - gh\frac{\partial n}{\partial x} - \frac{h\partial p_a}{\rho_0\partial x} - \\ & \frac{gh^2\partial p}{2\rho_0\partial x} + \frac{\tau_{ax}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho(\partial S_{xx}/\partial x + \partial S_{xy}/\partial x)} + \\ & \frac{\partial(hT_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(hT_{xy})}{\partial x} + hu_sS \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial h\bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{v}\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}^2}{\partial y} = & f\bar{v}h - gh\frac{\partial n}{\partial y} - \frac{h\partial p_a}{\rho_0\partial y} - \frac{gh^2\partial p}{2\rho_0\partial y} + \\ & \frac{\tau_{ay}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho(\partial S_{yx}/\partial y + \partial S_{yy}/\partial y)} + \frac{\partial(hT_{yx})}{\partial x} + \\ & \frac{\partial(hT_{yy})}{\partial y} + hv_sS \end{aligned} \tag{3}$$

$$f = 2\Omega\sin\varphi \tag{4}$$

式中: h 为静止水深; t 为时间; u 、 v 为流速在 x 、 y 方向上的分量; x 、 y 、 z 为右手 Cartesian 坐标系坐标; S 为源汇项; f 为 Coriolis 参量; Ω 为地球自转角速率,取 Ω 为 $0.729\times10^{-4}\text{s}$; φ 为地理纬度; $\bar{u}$ 、 $\bar{v}$ 分别为 x 、 y 方向的平均流速; g 为重力加速度; η 为水面相对于未扰动基面的高度,即水位; ρ 为水密度; ρ_0 为参考水密度; P_a 为当地气压; S_{xx} 、 S_{xy} 、 S_{yx} 、 S_{yy} 为辐射应力分量; T_{xx} 、 T_{xy} 、 T_{yx} 、 T_{yy} 为水平黏滞应力; τ_{ax} 、 τ_{ay} 、 τ_{bx} 、 τ_{by} 为水面与河床边界水流切应力在 x 、 y 方向上的分量; u_s 、 v_s 为源汇项水流流速。

1.2.2 对流扩散方程

对流扩散方程式为

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(hc) + \frac{\partial}{\partial x}(uhc) + \frac{\partial}{\partial x}(vhc) = \\ \frac{\partial}{\partial x}hD_x\frac{c}{x} + \frac{\partial}{\partial y}hD_y\frac{c}{y} + Fhc + S \end{aligned} \tag{5}$$

其中

$$S = Q_s(C_s - C)$$

式中: C 为复合浓度(常量); h 为水深; D_x 、 D_y 为 x 、 y 方向上的扩散系数; F 为线性衰减系数; Q_s 为源汇项流量; C_s 为源汇项处物质的浓度。

1.2.3 计算方法

以湖泊水动力学的理论方法为基础,采用非结

构网格,建立汉丰湖二维水动力水质模型,通过求解模型的连续方程、动量方程以及污染物的迁移扩散方程,得到汉丰湖水体运动的流场以及营养盐的浓度分布,分析不同的调水方案对汉丰湖水质影响,确定能够改善汉丰湖水体富营养化状况的水量调度方案。

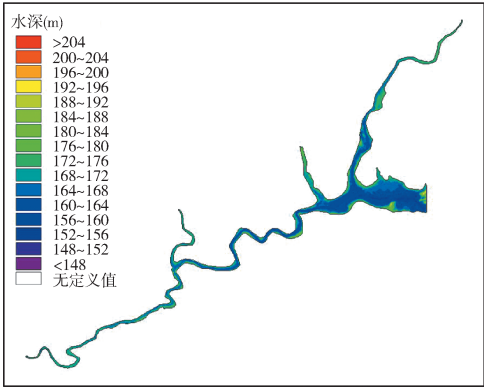
2 二维汉丰湖水质模型构建

2.1 模拟区域地形

汉丰湖入湖支流主要有南河、桃溪河、头道河、东河,出流为澎溪河(小江)。利用 Arcgis 将汉丰湖边界矢量化,生成 .xyz 文件,然后导入 MIKE21 水动力模型生成汉丰湖边界,即为陆地边界,再用网格生成器生成非结构三角形网格即可得到模拟区域的计算网格(图 2(a))。模型计算网格 6 563 个,节点为 6 434 个,导入 2014 年水深数据,采用自然单元法中的自然邻接点插值方法进行插值得到汉丰湖水下地形(图 2(b))。



(a) 计算网格



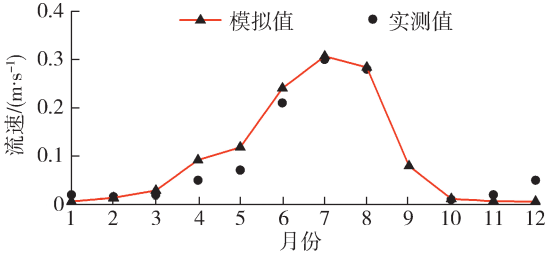
(b) 水下地形

图 2 汉丰湖模拟区域计算网格剖分和水下地形插值

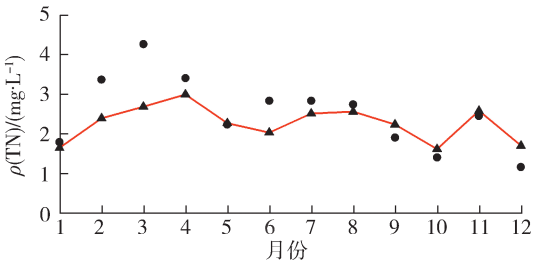
2.2 模型率定

利用 MIKE21 水动力模块和对流扩散模块模拟汉丰湖水动力变化和营养盐的迁移扩散,采用 2014 年水位、流量和水质数据生成水位、流量、水质序列文件,将其作为模型需要的边界条件,其中南河、桃溪河、头道河以及东河都用流量边界,乌扬大坝处采用水位边界,并设定湖泊参数和初始条件,模拟时间

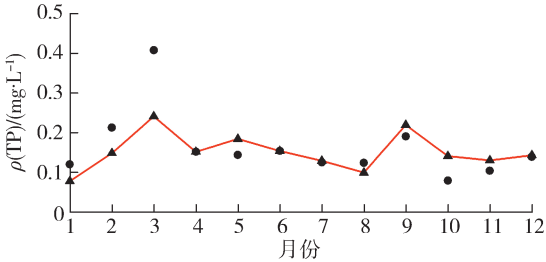
为 2014 年 1—12 月。选取汉丰湖东南河交汇处每月 1 次的监测流速对比同一时间模型计算流速,平均误差为 0.2% (图 3(a)),对流扩散模块的率定选取东南河交汇的 TN、TP 浓度数据,均采用同一时间实测值和计算值,平均误差分别为 3.8% 和 2.2% (图 3(b)、(c)),流速、TN 和 TP 浓度的模拟结果在可接受范围之内。由于底部糙率是表征河渠底部和岸壁影响水流阻力的综合因素的系数,也是衡量河道边壁粗糙程度对水流运动影响并进行相应水文分析的一个重要参数^[11],在 MIKE21 数值模拟过程中,考虑水深的相关变量时,通过水力半径、近似地表坡度以及水流速度的计算得到的曼宁数侧面反映底床的粗糙程度,其取值是 MIKE21 数值模拟的关键。



(a) 流速



(b) TN



(c) TP

图 3 汉丰湖流速、TN 和 TP 模型率定与观测结果的比较

2.3 汉丰湖调度模拟方案

根据 SL395—2007《地表水资源质量评价技术规程》^[12],地表水体在 TN、TP 质量浓度分别为 2.0 mg/L 与 0.2 mg/L 时达到中度富营养,因此本文设计汉丰湖库区中水质指标 TN、TP 初始质量浓度分别为 2.0 mg/L 与 0.2 mg/L,上游各边界设计入流水质指标 TN、TP 质量浓度根据 2014 年水质监测结果,分别设定为 0.73 mg/L 与 0.03 mg/L,结合 MIKE21 水动力模型的计算,设计 7 种调度方案。

表 1 列出了一次调度过程中 7 种调度方案对应的不同流量、历时。其中方案 1 以起始水位 168.5 m(汉丰湖正常蓄水位)运行 24 h,开闸以 100 m³/s 流量下泄 75 h 到 165.5 m 水位(完成一次泄水之后的水位),以 2014 年平均来水流量 116 m³/s 补水 64 h 至 168.5 m 水位(完成一次蓄水之后的水位);重复上述过程 3 次,最后以 168.5 m 水位持续运行。方案 2 到方案 7 分别以 500、1000、1500、2000、2500、3000 m³/s 的下泄流量完成同方案 1 的过程。各方案一次调度过程中的预设计水位见图 4。

表 1 7 种调度方案对应的水位、流量和时间

方案	泄水流量/(m ³ ·s ⁻¹)	历时/h
1	100	75
2	500	15
3	1000	7
4	1500	5
5	2000	4
6	2500	3
7	3000	2

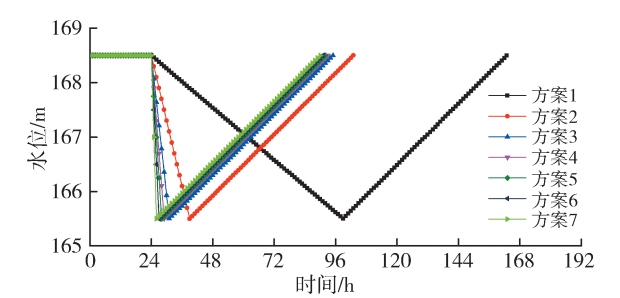


图 4 7 种调度方案预设水位

2.4 边界设置

对流扩散模块中,共有 5 个边界条件:设置南河入口处流量为 33 m³/s,东河入口处流量为 43 m³/s,桃溪河入口处流量为 33 m³/s,头道河入口处流量为 8 m³/s,各边界入流水质指标 TN、TP 质量浓度根据全年最小质量浓度分别设置为 0.73 mg/L 和 0.03 mg/L。出口为汉丰湖调节坝,分别以各方案的预设计水位作为边界。

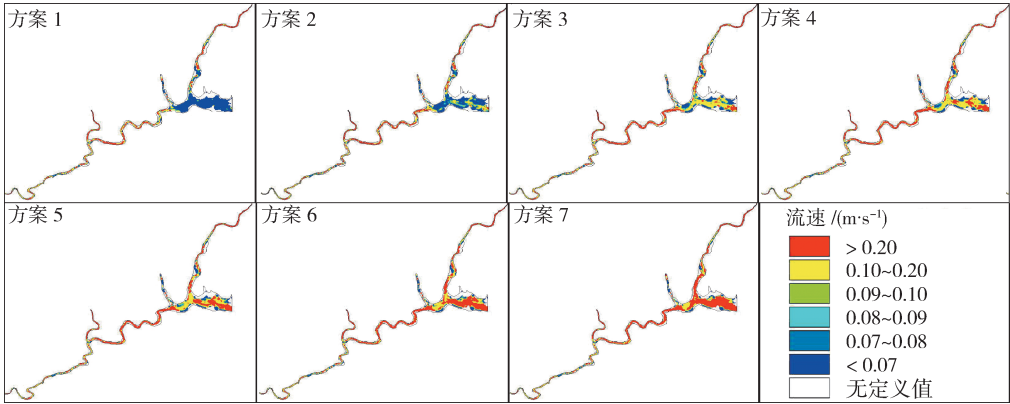


图 5 7 种调度方案高于 0.2 m/s 流速的面积分布

3 结果与讨论

3.1 流速模拟结果

国外有研究指出,水体中的水动力条件流速^[13-14]、流量^[15]等与藻类的生长繁殖有着密切的关系,它们不仅能直接作用于藻类,还对水体中营养盐状况与水温层结构有明显的影响,从而间接作用于水体引起富营养化。“十一五”期间“基于人工水力调控的小江藻类生长原位试验”表明,不同的水动力条件对于藻类生长具有不同程度的抑制作用,并确定将 0.2 m/s 的流速作为控制小江流域藻类生长的条件。根据本文设计的 7 个方案模拟结果,得到整个库区高于 0.2 m/s 流速的面积分布(图 5)。由图 5 知,方案 1~7 高流速控制面积随着下泄流量的增大而扩大。在完成第一次泄水之后,方案 1 情形下 0.2 m/s 的流速仅在汉丰湖支流东河、南河有较多分布,方案 2 情形下 0.2 m/s 的流速开始在调节坝有较少分布,方案 3 情形下库区中只有零星分布的流速高于 0.2 m/s,当下泄流量达到 1500 m³/s(方案 4)时,汉丰湖库区中 0.2 m/s 流速有较为明显的分布,相较于 2000 m³/s(方案 5)下泄流量时分布较为分散,当下泄流量超过 2000 m³/s(方案 6、7)以上,0.2 m/s 的流速分布自东河与南河交汇处一直延伸到调节坝,控制面积越来越大,控制区域也渐渐由库区的主槽延伸至滩地。因此,从提取的流速模拟结果可见,方案 1 与 2 仅有利于控制汉丰湖支流的富营养化状况,由于水流在较短时间内不能进入库区,因而对库区中水动力条件改善效果不明显;方案 3、4 能够缓解汉丰湖支流以及调节坝因水流缓慢而造成的水体富营养化;大流量调度方案 5~7 产生的水动力条件可以有效抑制汉丰湖库区中藻类大量繁殖,有助于控制因水动力条件较差而引发的水体富营养化。

3.2 TN、TP 模拟结果

调节坝作为汉丰湖库尾,其营养盐浓度变化对

于整个库区具有指示意义,且模型运行 18 d 后基本稳定,因此分别提取 7 种调度方案下模拟 18 d 后汉丰湖调节坝断面的 TN、TP 质量浓度变化曲线(图 6)。对比模拟结果发现,各方案在调节坝断面的 TN、TP 质量浓度变化趋势基本一致。汉丰湖库区中 TN、TP 初始质量浓度分别为 2.0 mg/L 和 0.2 mg/L,模型运行 7 d 后,方案 5~7 调节坝断面 TN、TP 质量浓度分别低于上游边界入流中 TN、TP 的设计质量浓度(0.73 mg/L、0.03 mg/L),方案 1~4 该断面 TN、TP 质量浓度降低到入流设计质量浓度则需要运行 8 d。

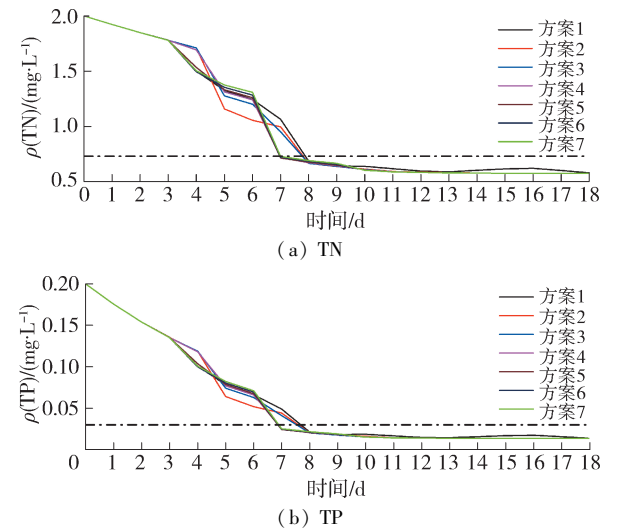


图 6 汉丰湖调节坝 TN、TP 质量浓度变化曲线

由图 6 可见,第 1~3 天各方案浓度均呈现线性降低趋势,分析得知,这是由于上游来水尚未达到调节坝,水动力条件较差,营养盐浓度降低主要依靠水

体自净能力;第 3~8 天 TN、TP 浓度因不同下泄流量引起水动力条件变化开始出现波动,第 5 天波动最大,差异比较明显;当运行 8 d 后水动力条件又开始减弱,TN、TP 浓度变化趋缓,且与上游来水设计浓度接近,模型运行趋于稳定。依据模拟结果提取了第 1、5、8 天 TN、TP 空间分布(图 7 与图 8)。经过 1 d 的泄水蓄水,7 种调度方案 TN、TP 降低都只在东河与南河较为明显,而汉丰湖库区内及调节坝断面 TN、TP 基本未变,可见若要通过水量调度降低汉丰湖库区中 TN、TP 浓度,1 d 的调度时间明显不够;当泄水蓄水过程持续到第 5 天时,7 种调度方案随着下泄流量的增大,汉丰湖支流东河、南河、桃溪河、头道河以及东河与南河交汇处的 TN、TP 浓度均降低到上游来水中 TN、TP 的设计浓度,同时库区内 TN、TP 浓度也明显降低,但是从库中到调节坝 TN、TP 浓度依然很高,此时坝前 TN、TP 质量浓度分别为 1.3 mg/L 和 0.85 mg/L。当经过 8 d 的调度后,汉丰湖各支流、库区内以及调节坝的 TN、TP 浓度都降到预设浓度以下,与上游来水中 TN、TP 的设计浓度接近。可见利用汉丰湖调节坝进行水量调度降低营养盐浓度,控制水体富营养化的发生不仅与调度水量大小有关,调度时间也是影响水质改善效果的主要因素。

3.3 讨论

通过模拟汉丰湖流速和 TN、TP 浓度变化,探索能够降低库区中营养盐浓度、控制水体富营养化的适宜水动力条件,并分析相应条件对于抑制藻类生长、降低营养盐浓度和防止水体富营养化暴发的作用。

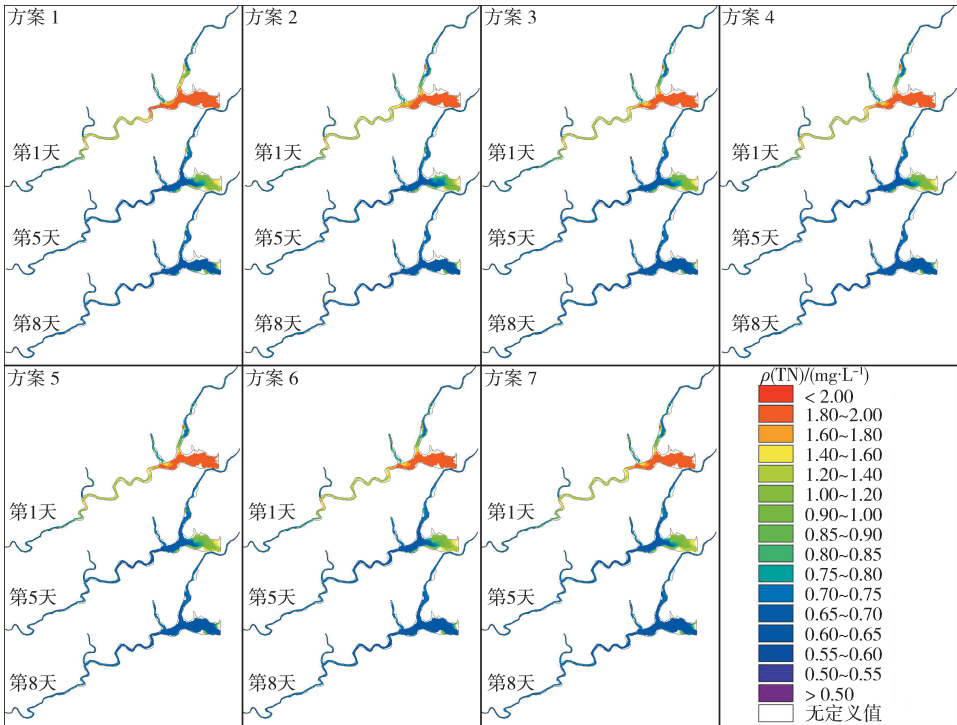


图 7 7 种调度方案第 1、5、8 天 TN 质量浓度空间分布

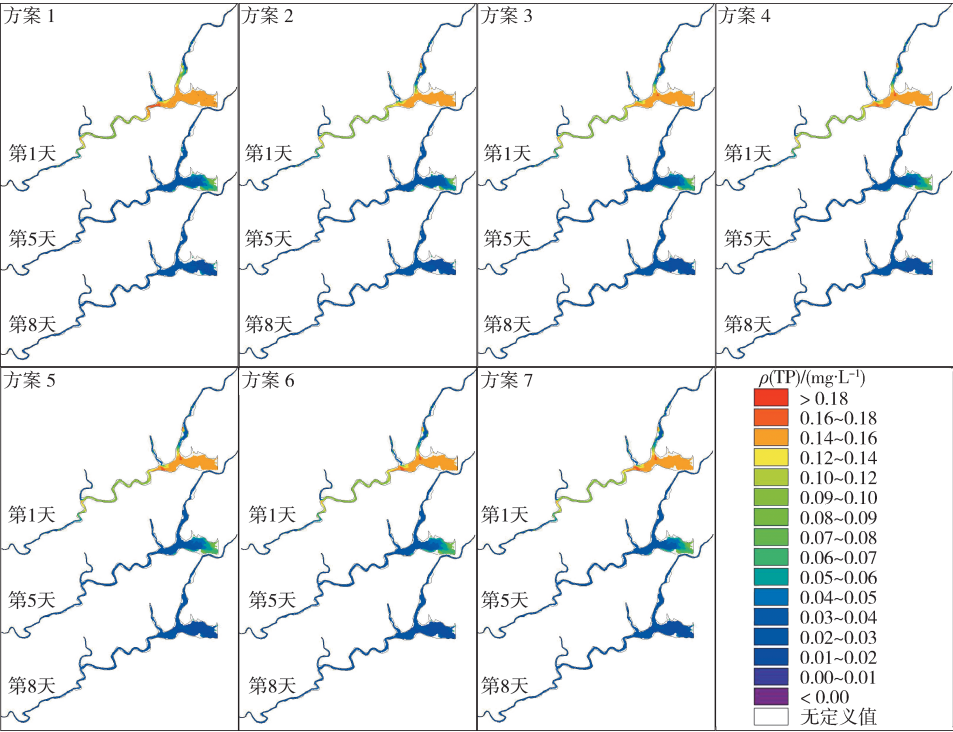


图8 7种调度方案第1、5、8天TP质量浓度空间分布

流速面积分布表明,在方案5~7($>2000\text{ m}^3/\text{s}$)下,高于 0.2 m/s 流速的分布面积较方案1~4($100\sim2000\text{ m}^3/\text{s}$)大,抑制藻类生长的水动力条件较好。营养盐浓度的时空变化结果表明,7种方案均能在一定的时间内降低汉丰湖库区水体中TN、TP浓度。通过选取断面进行差异比较得出,与方案1~4相比,方案5~7能在较短的时间内降低TN、TP浓度,说明增大流量可以增加汉丰湖水体中污染物的迁移扩散速度。因此,控制汉丰湖水体富营养化发生的适宜水动力条件需要同时考虑流量、流速和时间等因素。

当汉丰湖调度水量低于 $2000\text{ m}^3/\text{s}$ 时,高于 0.2 m/s 的流速多分布在各支流,库区分布较少;当调度水量达到 $2000\text{ m}^3/\text{s}$ 以上时,库区内流速显著增大,高于 0.2 m/s 的流速分布范围基本覆盖汉丰湖的主槽区域,下泄流量的增大,能够在较短时间内有效增大库区中高于 0.2 m/s 流速的分布面积。在天然河流中,即使其营养条件已达富营养化状态,若有一定的水流运动($>0.2\text{ m/s}$),也很少出现水华暴发,因为较高的流速会形成较大的剪应力与切变速率,从而破坏藻类细胞的结构,抑制藻类增殖。但也有研究^[16]指出,小于 0.40 m/s 的流速反而有利于藻类的生长与水华暴发,认为水动力条件(流量、流速以及水体扰动强度)不是影响水体富营养化的唯一因素,光照、透明度、营养盐浓度、水温和pH等可能与水动力条件相互作用、相互影响,导致在不同的流域抑制藻类生长的流速存在明显差异。本研究中 $2000\text{ m}^3/\text{s}$ 以上的流量、可使藻类细胞结构破坏

的流速($>0.2\text{ m/s}$)在汉丰湖这种河流型湖泊整个库区中呈大面积的分布。

对比调节坝断面TN、TP浓度变化曲线可见,与低于 $2000\text{ m}^3/\text{s}$ 流量的方案1~4相比, $2000\text{ m}^3/\text{s}$ 以上的流量能够在较短时间内降低营养盐浓度,其主要原因在于流量对水体有稀释作用,随着汉丰湖调度下泄流量的增大,减少水体滞留时间,加强了水体中营养盐相互交换,从而降低了库区水体中TN、TP的浓度。张秀菊等^[17]在分析不同引水方案对新江海河各断面COD和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度变化的影响中也认为,大流量的引水方案更有利于增强水动力条件,改善水质,戴魁等^[9]在引江济太水质水量联合调度研究中亦有此结论。从时间的角度观察各方案下TN、TP空间分布不难发现,仅仅考虑调度水量大小对于降低营养盐浓度的影响过于片面。陈志和等^[18]对河网地区水环境引水调控研究结果表明,在枯水期引水调控36h、汛期引水调控12h后,中山市河能达到水功能区的水质目标,因此以实现汉丰湖水水质改善为目的的水量调度需同时考虑时间的影响。

综合以上分析,以控制汉丰湖水体富营养化的发生为目的的调节坝水量调度,需创造有利于缓解或消除水体富营养的水动力条件,即从流速的角度考虑抑制藻类,从调度流量、时间的角度考虑降低TN、TP浓度。当库区中由于营养物质含量过高导致藻类剧烈生长繁殖暴发水华时,可利用汉丰湖调节坝的调度功能,将下泄流量控制在 $2000\text{ m}^3/\text{s}$ 以上,达到破坏藻类细胞结构的流速,并利用往复泄水

蓄水的水量调度方式运行一定的时间,降低整个库区中营养盐浓度,从而在一定程度上缓解因水动力条件差和营养盐浓度较高造成的富营养化问题。

4 结 论

a. 利用 MIKE21 建立的汉丰湖二维水动力水质模型,经过率定和验证在一定程度上较真实地反映了汉丰湖水动力和水质变化情况。

b. 大流量($>2000\text{ m}^3/\text{s}$)的调度方案有利于改善汉丰湖水动力条件,增大抑制藻类的流速($\geq 0.2\text{ m/s}$)分布面积,可有效降低营养盐浓度,防止汉丰湖水体富营养化发生。

参考文献:

[1] 黄祺,何丙辉,赵秀兰,等. 三峡蓄水期间汉丰湖消落区营养状态时间变化[J]. 环境科学,2015,36(3):928-935. (HUANG Qi, HE Binghui, ZHAO Xiulan, et al. Temporal variation of trophic status in drawdown area of Hanfeng Lake in the storage period of Three Gorges Reservoir in China[J]. Environmental Science, 2015, 36(3):928-935. (in Chinese))

[2] 郑志伟,胡莲,邹曦,等. 汉丰湖富营养化综合评价与 water 环境容量分析[J]. 水生态学杂志,2014,35(5):22-27. (ZHENG Zhiwei, HU Lian, ZOU Xi, et al. Eutrophication assessment and analysis of nutrient loading in Hanfeng Lake[J]. Journal of Hydroecology, 2014, 35(5):22-27. (in Chinese))

[3] 王宇飞,赵秀兰,何丙辉,等. 汉丰湖夏季浮游植物群落与环境因子的典范对应分析[J]. 环境科学,2015,36(3):922-927. (WANG Yufei, ZHAO Xiulan, HE Binghui, et al. Canonical correspondence analysis of summer phytoplankton community and its environment factors in Hanfeng Lake[J]. Environmental Science, 2015, 36(3):922-927. (in Chinese))

[4] 朱苏葛,刘凌,罗娟,等. 里下河地区典型湖泊大型底栖动物与环境因子的相关性分析[J]. 水资源保护,2016,32(3):99-104. (ZHU Suge, LIU Ling, LUO Juan, et al. Correlation analysis between macrozoobenthos and environmental factors in lakes of Lixia River Area[J]. Water Resources Protection, 2016, 32(3):99-104. (in Chinese))

[5] 张虎,徐学军,代涛. MIKE21 FM 在引江济巢工程规划中的应用[J]. 水电能源科学,2016(9):103-106. (ZHANG Hu, XU Xuejun, DAI Tao. Application of MIKE21 FM in water diversion project from Yangtze River to Chaohu Lake[J]. Water Resource and Power, 2016(9):103-106. (in Chinese))

[6] 余成,任宪友,班璇,等. 二维水质模型在武汉东湖引水工程中的应用[J]. 湖泊科学,2012,24(1):43-50. (YU Cheng, REN Xianyou, BAN Xuan, et al. Application of two-dimension water quality model in the project of the water diversion in East Lake, Wuhan[J]. Journal of Lake

Sciences, 2012, 24(1):43-50. (in Chinese))

[7] 王哲,刘凌,宋兰兰. MIKE21 在人工湖生态设计中的应用[J]. 水电能源科学,2008,26(5):124-127. (WANG Zhe, LIU Ling, SONG Lanlan. Application of Mike 21 in ecological design of artificial lake[J]. Water Resource and Power, 2008, 26(5):124-127. (in Chinese))

[8] 龚春生,姚琪,赵棣华,等. 浅水湖泊平面二维水流-水质-底泥污染模型研究[J]. 水科学进展,2006,17(4):496-501. (GONG Chunsheng, YAO Qi, ZHAO Dihua, et al. Plane 2D flow-water quality-sediment pollution couple model in shallow lake[J]. Advances in Water Science, 2006, 17(4):496-501. (in Chinese))

[9] 戴甦,王船海,金科. 引江济太水量水质联合调度研究[J]. 中国水利,2008(1):15-17. (DAI Su, WANG Chuanhai, JIN Ke. Studies on joint regulation of quantity and quality of Yangtze-Taihu Water Diversion[J]. China Water Resource, 2008(1):15-17. (in Chinese))

[10] 廖平安,胡秀琳. 流速对藻类生长影响的试验研究[J]. 北京水利,2005(2):12-14. (LIAO Ping'an, HU Xiulin. Experimental study on the effect of flow velocity on algal growth[J]. Beijing Water Resource, 2005(2):12-14. (in Chinese))

[11] 张靖,拾兵,薛旂云. 糙率变化对明渠水深影响的探讨[J]. 人民黄河,2012,34(9):121-123. (ZHANG Jing, SHI Bing, XUE Yiyun. Discussions on influence of roughness variation to the open channel flows[J]. Yellow River, 2012, 34(9):121-123. (in Chinese))

[12] 中华人民共和国水利部. SL395 — 2007 地表水资源质量评价技术规程[S]. 北京:中国标准出版社,2007.

[13] MARSHALL H G, BURCHARDT L. Phytoplankton composition within the tidal freshwater region of the James River, Virginia[J]. Proceedings of the Biological Society of Washington, 1998(111):720-730.

[14] HA K, CHO E A, KIM H W, et al. Microcystis bloom formation in the lower Nakdong River, South Korea: importance of hydrodynamics and nutrient loading[J]. Marine & Freshwater Research, 1999, 50(1):89-94.

[15] LUNG W S, PAERL H W. Modeling blue-green algal blooms in the lower neuse river[J]. Water Research, 1988, 22(7):895-905.

[16] 黄钰铃,刘德富,陈明曦. 不同流速下水华生消的模拟[J]. 应用生态学报, 2008, 19(10):2293-2298. (HUANG Yuling, LIU Defu, CHEN Mingxi. Simulation of algae bloom under different flow velocity[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(10):2293-2298. (in Chinese))

[17] 张秀菊,丁凯森,杨凯. 新江海河河网地区水量水质联合调度模拟及引水方案[J]. 水电能源科学,2017,35(1):31-34. (ZHANG Xiujia, DING Kaisen, YANG Kai. Water quantity-quality joint regulation model and water diversion scheme in Xinjianghaihe River network region[J]. Water Resource and Power, 2017, 35(1):31-34. (in Chinese))

[18] 陈志和,陈晓宏,杜建,等. 河网地区水环境引水调控及

其效果预测[J]. 水资源保护,2012,28(3):16-21.
(CHEN Zhihe, CHEN Xiaohong, DU Jian, et al. Water
diversion and regulation of water environment and effect

forecast in river network region[J]. Water Resources
Protection,2012,28(3):16-21. (in Chinese))
(收稿日期:2017-04-14 编辑:徐 娟)

(上接第 41 页)

[5] 廖朝轩,高爱国,黄恩浩. 国外雨水管理对我国海绵城市建设的启示[J]. 水资源保护,2016,32(1):42-45.
(LIAW Chaohsien, GAO Aiguo, HUANG Enhao. Enlightenment of rainwater management in foreign countries to sponge city construction in China[J]. Water Resources Protection,2016,32(1):42-45. (in Chinese))

[6] 张伟,车伍,王建龙,等. 利用绿色基础设施控制城市雨水径流[J]. 中国给水排水,2011,27(4):22-27.
(ZHANG Wei, CHE Wu, WANG Jianlong, et al. Management of urban stormwater runoff by green infrastructures[J]. China Water & Wastewater,2011,27(4):22-27. (in Chinese))

[7] 唐双成,罗纨,贾忠华,等. 填料及降雨特征对雨水花园削减径流及实现海绵城市建设目标的影响[J]. 水土保持学报,2016,30(1):73-78. (TANG Shuangcheng, LUO Wan, JIA Zhonghua, et al. Effects of filler and rainfall characteristics on runoff reduction of rain garden and achieving the goal of sponge city construction[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2016,30(1):73-78. (in Chinese))

[8] 向璐璐,李俊奇,卞诺,等. 雨水花园设计方法探析[J]. 给水排水,2008,34(6):47-51. (XIANG Lulu, LI Junqi, KUANG Nuo, et al. Discussion on the design methods of rainwater[J]. Water & Wastewater,2008,34(6):47-51. (in Chinese))

[9] ROGER Bannerman, ELLEN Considine. Rain gardens: a

how to manual for homeowners [M]. Wisconsin:University of Wisconsin Extension,2003:3-4.

[10] 郑克白,孙敏生,彭鹏. 北京奥林匹克公园中心区下沉花园雨水利用及防洪排水设计[J]. 给水排水,2008,34(7):97-101. (ZHENG Kebai, SUN Minsheng, PENG Peng. Rainwater utilization and flood control drainage design of sinking garden in the central area of Beijing Olympic Park [J]. Water & Wastewater Engineering,2008,34(7):97-101. (in Chinese))

[11] 唐宁远,车伍,潘国庆. 城市雨洪控制利用的雨水径流系数分析[J]. 中国给水排水,2009,25(22):4-8. (TANG Ningyuan, CHE Wu, PAN Guoqing. Runoff coefficient analysis for urban stormwater and flood control and utilization[J]. China Water & Wastewater,2009,26(22):4-8. (in Chinese))

[12] 张乔松. 海绵城市的园林解读[J]. 园林,2015(7):12-15. (ZHANG Qiaosong. Garden interpretation of sponge city[J]. Garden,2015(7):12-15. (in Chinese))

[13] 朱木兰,廖杰,陈国元,等. 针对 LID 型道路绿化带土壤渗透性能的改良[J]. 水资源保护,2013,29(3):25-28. (ZHU Mulan, LIAO Jie, CHEN Guoyuan, et al. Soil permeability improvement for LID-type road greenbelt [J]. Water Resources Protection,2013,29(3):25-28. (in Chinese))

(收稿日期:2017-03-23 编辑:王 芳)

欢迎订阅《水资源保护》杂志

中国科学引文数据库来源期刊 中国科技核心期刊 RCCSE 中国核心学术期刊
中国高校优秀科技期刊 江苏十佳精品科技期刊 华东地区优秀期刊

ISSN 1004-6933 CN 32-1356/TV

《水资源保护》是由河海大学和中国水利学会环境水利专业委员会联合主办的科技期刊。本刊针对我国水资源短缺、水环境污染、水生态恶化等突出问题,探讨水资源管理、水环境治理、水生态修复等理论和技术,主要栏目有“水资源”“水环境”“水生态”,并根据需要开设“特约专家论坛”“水事观察”等栏目。

《水资源保护》是中国科学引文数据库(CSCD)来源期刊、中国科技核心期刊、RCCSE 中国核心学术期刊,已被美国化学文摘(CA)数据库、美国《剑桥科学文摘》(CSA)数据库、波兰哥白尼索引(IC)数据库等收录和引用,长期以来一直都是水利界和环保部门备受关注的重点期刊,2012 年、2014 年连续被教育部科技司授予“中国高校特色科技期刊”称号;2016 年被中国高校科技期刊研究会评为“中国高校优秀科技期刊”,被江苏省科技期刊学会评为“十佳精品期刊”;2017 年被评为华东地区优秀期刊。

《水资源保护》主要读者对象为全国从事与水资源保护工作有关的工程技术人员、科研人员、管理人员以及大专院校师生,邮发代号:28-298,双月刊,96 页,20 元/期,全年共计 120 元,每逢单月 20 日出版。可向当地邮局订阅,若无法从邮局订阅,亦可在本刊网站下载征订单。

编辑部地址:南京市西康路 1 号 邮政编码:210098 电话/传真:(025)83786642
E-mail:bh1985@vip.163.com; bh@hhu.edu.cn http://www.hehaiqikan.cn/szybh/ch/index.aspx