

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2020.03.007

太湖水龄与水力停留时间关系及参数敏感性

胥瑞晨^{1,2}, 逢勇^{1,2}, 胡祉冰^{1,2}, 朱天依^{1,2}

(1. 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;

2. 河海大学环境学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 为了确定太湖水龄与水力停留时间的关系及各主要影响因素的权重, 从水龄和水力停留时间的概念出发, 耦合对流扩散与一阶降解方程, 构建了一种改进的湖体水龄数学模型, 并对模型进行了参数率定与验证, 同时采用标准化多元逐步回归方法对太湖的出入湖流量、风向、风速和初始水位进行了敏感性分析。结果表明: 水龄的概念可以认为是理想化情况下物质质量浓度因物质降解而下降至0所需的时间, 与水力停留时间之间存在63%的比例关系; 出入湖流量、风向、风速和初始水位4个影响因素的权重分别为64.41%、8.56%、9.57%和17.46%, 出入湖流量与初始水位是影响水龄的决定性因素。

关键词: 太湖; 水龄; 水力停留时间; 敏感性分析

中图分类号: TV882.9 文献标志码: A 文章编号: 1004-6933(2020)03-0034-06

Relationship between water age and hydraulic residence time in Taihu Lake and parameter sensitivity // XU Ruichen^{1,2}, PANG Yong^{1,2}, HU Zhibing^{1,2}, ZHU Tianyi^{1,2} (1. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development on Shallow Lakes, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to define the relationship between water age and hydraulic retention time of Taihu Lake, and the weights of the main influencing factors. This research combined the concepts about water age and hydraulic retention time, coupling convection diffusion and first-order degradation equation, An improved mathematical model of lake water age is established. Moreover, the parameters of the model are calibrated and verified. The sensitivity analysis of lake volume, wind direction, wind speed and initial water level was carried out with the method of standardized multiple stepwise regression. The results showed that: The concept of water age can be considered as the time required for 100% degradation of material concentration under ideal circumstances, which has a proportional relationship of 63% with hydraulic retention time. The weight of the four influencing factors are 64.41%, 8.56%, 9.57% and 17.46%, respectively, that is, the amount of water entering and leaving the lake and the initial water level can explain more than 80% of the phenomenon, which is the decisive factor affecting the water age.

Key words: Taihu Lake; water age; hydraulic retention time; sensitivity analysis

太湖2007年暴发的大面积蓝藻水华^[1], 给太湖流域的人民生命财产安全造成了巨大的危害。藻类的运动和生长与水动力之间存在极其密切的关系, 水龄作为水动力的主要表现形式之一, 一直以来被广泛关注^[2]。水龄的概念被定义为一个水包(一种不具有扩散降解能力的理想水团或者水质点)离开其规定年龄为0的区域后到达某一位置所需要的时间^[3-4]。水龄模型最早是由Bolin等^[5]提出的, 主要

体现了水质点由一点运动到另一指定位置所需的时间。此后根据不同计算精度及应用范围的相关需求, 发展了很多关于水龄计算的水环境数学模型, 其中箱式模型最早由Kashiwai^[6]提出, 具有计算简单的优点, 但同时存在假设条件和计算区域的限制, 应用范围受到了很大的限制; 质点跟踪模型^[7]虽然可以实时跟踪水质点的移动轨迹, 但缺乏扩散功能; 随机游动模型^[8]是质点模型的优化, 加入了湍流扩散

基金项目: 国家自然科学基金(51879070)

作者简介: 胥瑞晨(1990—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为环境数学模拟。E-mail: 1349439798@qq.com

模块,但计算结果不够准确;时间尺度和年龄模型效果很好,缺点是计算复杂,很多模型方法不具备求解功能,限制了模型方法之间的参考与应用^[5];对流扩散模型^[9]的应用范围较为广泛,是一种基础的水龄研究模型,可以统计出水质点的驻留时间和交换矩阵等,但由于假设条件的限制,存在一定的数值震荡和耗散情况,需要根据特殊情况进行后期改进。

Takeoka^[10]早在1984年便对水力停留时间、水龄、过境时间和周转时间等概念进行了讨论和研究。对于稳定的大型湖泊而言,湖泊的水力停留时间通常被定义为一种描述水动力能力的参数,通过水力停留时间的概念,可以准确地描述湖体内物质的交换时间,其计算方法为湖体容积除以入湖流量^[11],但它一般只能表现一个湖体中水体交换的平均能力和周期,在湖体各个区域或者点位上,无法给出具体的变化规律。对于大型湖泊来说,各个区域的水力停留时间存在很大的差异,Feng等^[12]采用Matlab编程的方法对太湖水体的水力停留时间进行了初步的推算,得到了湖体具体点位的水力停留时间。

目前,水力停留时间和水龄之间具体的关系尚不明确,且研究较少。当前水龄的模拟主要是采用EFDC模型,模拟出来的水龄仍需要通过试验实测进行验证,存在很大的不确定性。本研究基于水龄和水力停留时间的概念推导得到了两者之间的具体关系,并探讨了影响太湖水龄的决定性因素。

1 研究区域概况

太湖(119°8'E~122°55'E,30°5'N~32°8'N)为中国第三大淡水湖泊,流域总面积为3.69万km²,湖泊总面积2427.8km²,水域面积为2338km²。太湖平均水深1.9m,最大水深不超过3m,是典型的大型浅水湖泊,2008年太湖实际年均水龄为300d左右^[13]。太湖区域夏季以东南风为主导风向,冬季以西北风为主导风向,风速平均在3.5~5.0m/s。平均年降水量1100~1500mm^[14]。贡湾(120°13'E~120°24'E,31°19'N~31°28'N)为太湖东北的一个湖湾,水域面积为163.8km²,平均水深为1.82m,近年来水生态环境由于周边经济发展而恶化,作为苏锡两地的金墅港、石帆港、锡东、南泉四大水厂的水源地,保证贡湾的水质稳定达标极为重要^[15]。目前,贡湾是“引江济太”的第一站,贡湾水龄的影响研究对后期湖体的系统治理和维护起着至关重要的作用。

水利部太湖流域管理局提供的数据资料(图1)显示,太湖入湖水量2007—2017年总体呈现上升的态势,其中2017年比2007年多出22.25亿m³,这

和“引江济太”工程有着密不可分的联系。由于太湖水位主要仍为人工控制,为了确保防洪安全,水位常年主要保持在3.10~3.40m之间^[16],与2007—2017年太湖实测水位数据基本一致(图1),这意味着出湖水量几乎也是同比增加的。近年来太湖实施了退渔还湖等措施,使得太湖水面面积增大,总体蓄水量也有逐渐增大的趋势^[17]。

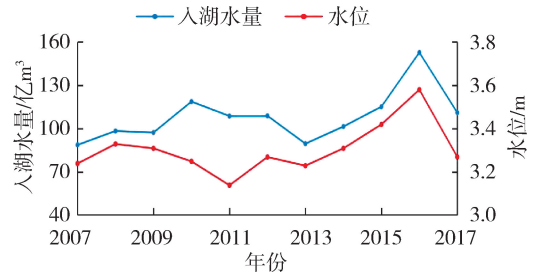


图1 太湖2007—2017年入湖水量和水位变化
Fig. 1 Inflow discharge and water level of Taihu Lake from 2007 to 2017

2 研究方法

2.1 水龄与水力停留时间的关系确定及模型构建
对流扩散模型计算水力停留时间的残余方程组^[18]为

$$\begin{cases} r_t = \frac{M_t}{M_0} = \frac{\rho_t}{\rho_0} \\ \tau_t = \int_0^t r_t dt \\ \rho_t = \rho_0 e^{-t/\tau_t} \end{cases} \quad (1)$$

式中: r_t 为某一时刻某点的物质质量与初始质量之比或质量浓度与初始质量浓度之比; M_0 为初始物质质量; M_t 为某一时刻物质质量; ρ_0 为初始物质质量浓度; ρ_t 为某一时刻物质质量浓度; τ_t 为湖体的平均水力停留时间。由于现实中物质质量浓度不可能因物质降解而下降至0,因此按照模型方程设定当质量浓度降低到 e^{-1} 时,记为水力停留时间,也可称为E-folding时刻^[19]。

对比水力停留时间和水龄的概念,水龄的含义即为某水团到达并完全替代原有水团所用的时间。因此,在对流扩散模型中的水龄其实就是理想状态下粒子质量浓度降解到0或者物质质量浓度上升到粒子质量浓度所需的时间,相当于一个100%的转换关系(图2)。综上可知水龄与水力停留时间的关系为

$$a_{tx} = \tau_{tx} / (1 - e^{-1}) = \tau_{tx} / 0.63 \quad (2)$$

式中: a_{tx} 为 t 时刻 x 点的水龄; τ_{tx} 为 t 时刻 x 点的水力停留时间。

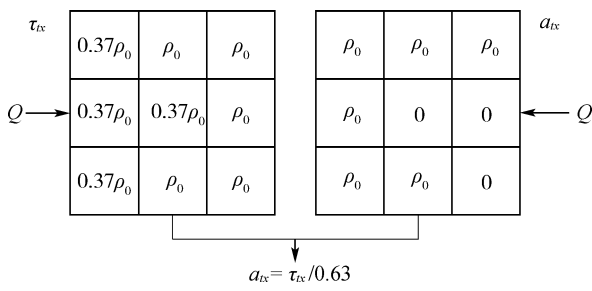


图2 水龄与水力停留时间的关系

Fig. 2 The relationship between water age and retention time

为了验证两者的关系,本文采用同种示踪剂,输入初始质量浓度为 360 mg/L,扩散系数为 $1 \text{ m}^2/\text{s}$,降解系数为 $1.57 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$,保证出入湖流量平衡,根据模型计算得到湖体容积。基于水龄与水力停留时间的关系,根据湖体容积与入湖流量计算出全湖的年平均水龄,使用 Origin8.5 的非线性拟合工具箱,率定出一阶降解方程具体参数取值,湖体每个网格的瞬时水龄便可以通过不同网格内物质的质量浓度反演确定,其中模拟的平均水龄以最后一天的网格水龄与网格体积的加权平均得到^[20]。具体数学模型构建如下:

$$\frac{\partial(h\rho)}{\partial t} + \frac{\partial(uh\rho)}{\partial x} + \frac{\partial(vh\rho)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x}\left(E_x h \frac{\partial\rho}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(E_y h \frac{\partial\rho}{\partial y}\right) + S \quad (3)$$

$$\bar{a}_t = \frac{V}{0.63Q} = -\frac{1}{K} \ln \frac{\bar{\rho}}{A} \quad (4)$$

$$a_{tx} = -\frac{1}{K} \ln \frac{\rho_{tx}}{A} \quad (5)$$

式中: ρ 为湖体污染物质量浓度; u 、 v 分别为 x 、 y 方向上的流速分量; E_x 、 E_y 分别为 x 、 y 向上的扩散系数; S 为源汇项; \bar{a}_t 为平均水龄; V 为湖体蓄水量; Q 为入湖水量; $\bar{\rho}$ 为湖体污染物的平均质量浓度; ρ_{tx} 为 t 时刻 x 点的湖体污染物的质量浓度; A 为振幅系数; K 为反应速率常数。

2.2 敏感性分析方法

由于实际影响参数较少,本文采用多元线性逐步回归方法进行敏感性分析。为了更快更好地分析参数的敏感性,即参数对结果方差的贡献率,对所有的数据提前进行标准化处理。在供选择的各自变量中,依各自变量对因变量作用的大小,即偏回归平方和的大小,由大到小把自变量依次逐个引入。对每一个变量进行逐步回归检验,得到具体的响应关系^[21]。回归结束后所得方程组即为所求得的最优回归方程^[22]:

$$\hat{y}_i = b_0 + \sum_{j=1}^m b_j x_{ij} + \varepsilon_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

$$R^2 = \frac{\left[\frac{(\hat{y}_i - \bar{y}) / \hat{S}}{\sum_{j=1}^m (x_j - \bar{x}_j) / \hat{S}_j} \right]^2}{\left[\sum_{j=1}^m (x_j - \bar{x}_j) / \hat{S}_j \right]^2} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (7)$$

式中: \hat{y}_i 、 \bar{y} 分别为输出结果 y_i 的估计值和平均值; x_{ij} 为第 i 个参数组第 j 个输入参数的值; b_0 、 b_j 为回归系数; ε_i 为误差; R^2 为参数组对输出结果的解释程度; \hat{S} 为输出结果的标准差; \bar{x}_j 、 \hat{S}_j 分别为输入参数 x_j 的平均值和标准差; n 为模拟参数组个数; m 为选取的参数个数。

3 结果与讨论

3.1 模型参数率定与验证

基于水龄与水力停留时间的概念,最终确定了两者之间存在 63% 的比例关系,采用一阶指数衰减的方式拟合,其 R^2 可达到 1.000 的拟合精度。为了再次验证其正确性,结合 2013 年出入湖流量、风场、平均水位与库容基础数据,计算出平均水龄为 308 d,按照本文模型算法,最终率定得到了模型关键参数 $K = 4.399 \times 10^{-3}$, $A = 361.58705$,其全年半降解时间为 157.58 d。

采用望虞河引水的边界流量 $100 \text{ m}^3/\text{s}$ 为模型输入条件进行验证,对太湖总体的水龄分布特征进行模拟,结果如图 3 所示。由于太湖边界和岛屿的基础地形构建略有不同而对水龄模拟计算产生了一定的影响,但总体时空分布特征和水龄等值线与郝文彬等^[23-24]研究成果基本一致,平均水龄误差不超过 10%,可以认为此模型参数用于太湖地区的模拟研究基本可行。根据设定的水龄率定点位,模拟结果分别为 196 d(东南风)和 308 d(北风),与 Li 等^[25]在 2011 年采用 EFDC 模型模拟的 200 d(东南风)和 310 d(北风)、黄春琳等^[26]在 2014 年采用 EFDC 模型模拟的 194 d(东南风)和 308 d(北风)研究结果基本一致。

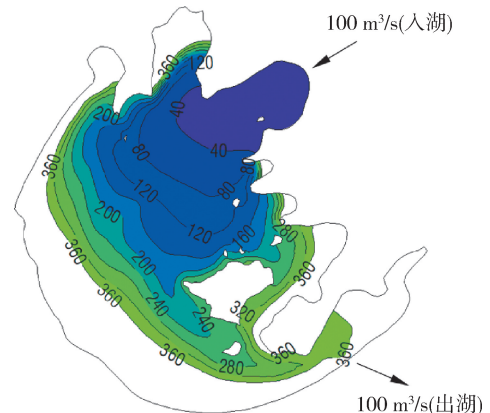


图3 太湖水龄特征模拟结果(单位:d)

Fig. 3 Simulation results of water age in Taihu Lake(unit: d)

根据本文模型模拟得到太湖 2007—2017 年水龄变化如图 4 所示,可以看出太湖水龄并不是一成不变的,2013 年模拟值与实际计算值之间的差距为 2%,总体最大误差不超过 5%,属于模型误差可接受范围。模拟结果表明,年均水龄从 2007 年的 315 d 降低到 2017 年的 257 d,下降了 18.41%。由于近年来太湖周边的水利工程与人工调度,使得太湖年均水龄发生了很大的变化,其中 2017 年太湖水龄实际计算值为 255 d,模拟误差为 0.8%,再次验证了本文模型的正确性。同时证明了利用一阶指数衰减函数换算出来的水龄模型是可行的,并且相较于原有的复杂水龄模型来说,在以对流扩散为主的浅水湖泊中,这种模型具有更广泛的普适性。

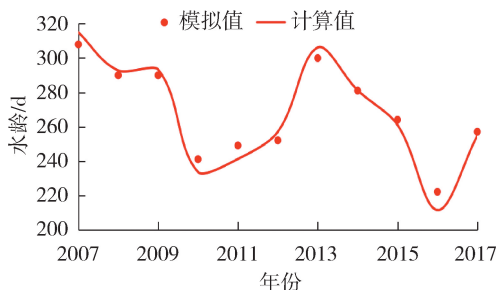


图 4 太湖 2007—2017 年水龄变化

Fig. 4 Water age of Taihu Lake from 2007 to 2017

3.2 参数敏感性分析

为了确定出入湖流量、风向、风速和初始水位 4 个主要边界条件对水龄影响的具体权重,基于均匀分布限制条件,根据实际边界条件取值范围,随机取值组成了 200 组边界数据,并对其进行水龄模拟。标准化处理模拟结果后,采用多元线性逐步回归方法进行水龄敏感性分析,得到 $R^2 = 0.951 > 0.7$,可认为回归结果可信,验证了出入湖流量、风向、风速和初始水位均为影响水龄的主要因素,其影响权重分别为 64.41%、8.56%、9.57% 和 17.46%。以年均水龄较大的 2013 年作为研究基础年,发现不同风

向对太湖水龄的影响较为稳定(表 1),平均水龄在 300 d 左右,东风对平均水龄的影响程度达到了 5.3%。当外加出入湖流量从 $0 \text{ m}^3/\text{s}$ 上升到 $400 \text{ m}^3/\text{s}$ 时(图 5(a)),西北风时的入湖流量对平均水龄影响最为显著,为 35.3%,西南风对平均水龄影响最小,为 27.6%。

表 1 不同风向下的太湖平均水龄及不同水龄占比

Table 1 The proportion of mean water age in Taihu Lake under different wind directions

风向	平均水龄/d	不同水龄占比/%			
		≤100 d	>100 ~ 200 d	>200 ~ 300 d	>300 d
N	301	6.1	12.0	21.5	60.4
NE	292	6.7	10.8	24.7	57.8
E	284	6.7	10.0	16.9	66.4
SE	288	5.7	9.5	31.5	53.4
S	297	6.5	12.7	25.4	55.5
SW	300	7.5	12.3	20.8	59.4
W	298	7.9	13.5	16.9	61.7
NW	303	6.9	10.0	18.0	65.1

为了进一步对同等水位下的其他 3 个因素做具体的敏感性解释,分别对太湖与贡湾做了模拟研究,发现贡湾的水龄随风向变化较整体湖区来说更为明显(图 5(b)),西北风时的水龄在 4 种流量下的变化率最大,能达到 45.5%,南风时由于大流场强烈抑制了贡湾的水体流动,降低了流量对贡湾的水龄影响程度。这说明周边地形对区域小流场的形成具有很大的影响,风向对于区域性水体流动的影响要大于整体湖区,后期对于贡湾的望虞河引水应尽量选在刮西风和西北风为主的时间段,以增加引水的环境效益。通过出入湖流量的变化比较,也能明显看出在出入湖流量与初始水位不变的情况下,风向的改变对湖体水质的影响会低于外部条件同时变化的时间段,证明风场与出入湖流量对于水动力的改变有一定的协同作用。

由于太湖蓝藻暴发期主要集中在夏季,主导风向为东南风,通过图 6(a)可以发现当风向不变时,

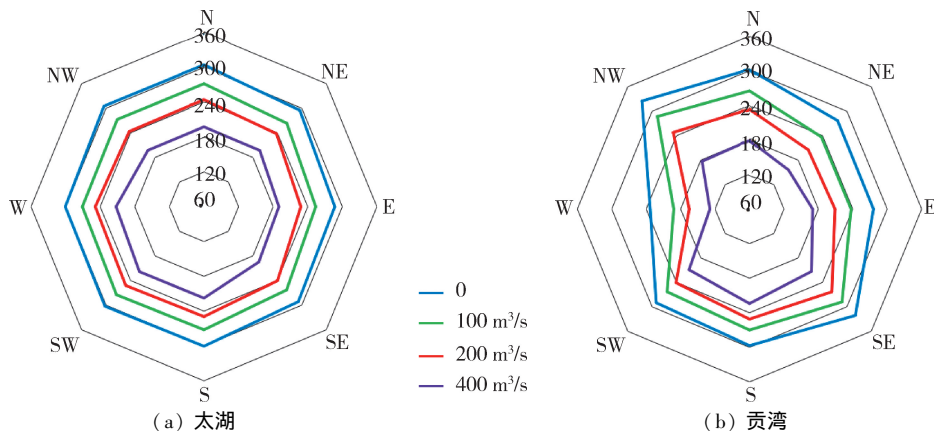


图 5 太湖与贡湾在不同风向和流量下的水龄(单位:d)

Fig. 5 Water age of Taihu Lake and Gong Bay under different wind direction and discharge(unit: d)

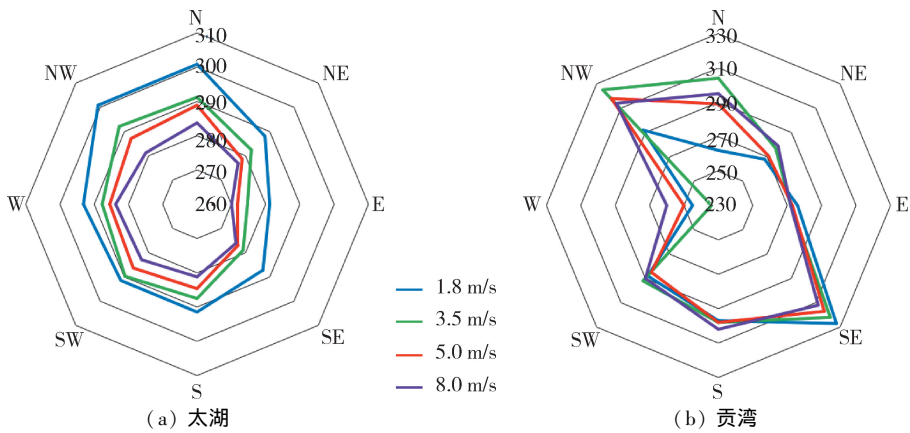


图 6 太湖与贡湾在不同风向和风速下的水龄 (单位: d)

Fig. 6 Water age of Taihu Lake and Gong Bay under different wind direction and speed (unit: d)

风速对太湖水龄的影响随速度增大而降低, 根据不同风向, 风速会在一定的大小之前起决定性作用, 之后则是出入湖流量成为了主导因素, 这是由于风场前期对水流的作用较大, 促进了水循环导致的, 当风速到达一定程度时, 整个流场由于出入湖流量不变形成了一个固定的结构, 水动力变化的主要因素则变成了出入湖流量。而对于贡湾来说, 风速对局部区域产生的影响并不都是稳定上升或者下降的(图 6(b) 与图 7), 而是具有一定的波动性, 在东南风 5 m/s 情况下, 贡湾的小流场会与太湖大流场发生一定程度的抵消, 导致偏南部分的流速减缓, 同时使得局部形成小流场, 抑制了水体交换, 导致区域水龄升高, 同理也能解释梅梁湾在夏季水体交换能力不足的原因。

水龄进行数值转化, 模拟得到每一个网格的水龄反演结果, 能真实反映太湖具体点位的水龄变化情况。太湖每年的水龄不完全相同, 由于“引江济太”工程的实施, 2017 年太湖年均水龄降低至 257 d, 2007—2017 年的水龄模拟值与实际计算值之间的误差不超过 5%, 表明本文改进后的模型在太湖水龄研究方面具有可行性。

b. 多元线性逐步回归法分析表明, 出入湖流量、风向、风速和初始水位为影响水龄的主要因素, 其权重分别占到了 64.41%、8.56%、9.57% 和 17.46%。大型浅水湖泊的水动力在地形不变的前提下, 出入湖流量对水龄的影响最大, 并且风场对于具有小流场的贡湾和梅梁湾来说, 存在很大的不确定性, 在后期工程引水期间应结合具体气象预报来确定引水的时间。

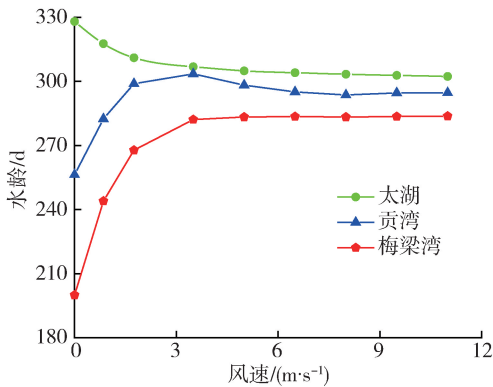


图 7 区域水龄在东南风不同风速下的变化关系
Fig. 7 Relationship of regional water age under different wind speed (SE)

参考文献:

- [1] 刘美玲, 石高平. 流域水污染的协作治理研究[J]. 水利经济, 2018, 36(2): 54-58. (LIU Meiling, SHI Gaoping. Collaborative governance of water pollution in basins[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2018, 36(2): 54-58. (in Chinese))
- [2] 庄巍, 王晓, 逢勇, 等. 太湖流域跨界区域水污染物通量数值模型构建与应用[J]. 水资源保护, 2016, 32(1): 36-41. (ZHUANG Wei, WANG Xiao, PANG Yong, et al. Establishment and application of numerical model of water pollutants flux for trans-boundary regions of Taihu Lake Basin[J]. Water Resources Protection, 2016, 32(1): 36-41. (in Chinese))
- [3] DELHEZ E J M, CAMPIN J M, HIRST A C, et al. Toward a general theory of the age in ocean modelling[J]. Ocean Modelling, 1999, 1(1): 17-27.
- [4] GAO Q, HE G, FANG H, et al. Numerical simulation of water age and its potential effects on the water quality in Xiangxi Bay of Three Gorges Reservoir[J]. Journal of

4 结论

a. 构建了水龄与水力停留时间之间的转换模型, 率定验证了相关参数, 确认了水力停留时间与水龄之间存在 63% 的比例关系。采用一阶指数衰减的方式拟合, 其 R^2 达到了 1.000, 进而将质量浓度与

- Hydrology, 2018, 566:484-499.
- [5] BOLIN B, RODHE H. A note on the concepts of age distribution and transit time in natural reservoirs [J]. *Tellus*, 1973, 25(1) : 58-62.
- [6] KASHIWAI M. The concept of tidal exchange and the tidal exchange ratio [J]. *Journal of the Oceanographical Society of Japan*, 1984, 40(2) : 135-147.
- [7] 李小宝, 袁德奎, 陶建华, 等. 大型海湾水交换计算中随机游动方法的应用研究 [J]. *应用数学和力学*, 2011, 32(5) : 587-598. (LI Xiaobao, YUAN Dekui, TAO Jianhua, et al. Study on application of random walk method to water exchange in large-scale bay [J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2011, 32(5) : 587-598. (in Chinese))
- [8] GAO J, ZHANG X, LIU J, et al. Numerical and experimental assessment of thermal performance of vertical energy piles: an application [J]. *Applied Energy*, 2008, 85(10) : 901-910.
- [9] ELDER J W. The dispersion of marked fluid in turbulent shear flow [J]. *Journal of fluid mechanics*, 1959, 5 (4) : 544-560.
- [10] TAKEOKA H. Fundamental concepts of exchange and transport time scales in a coastal sea [J]. *Continental Shelf Research*, 1984, 3(3) : 311-326.
- [11] WETZEL R G. *Limnology: lake and river ecosystems* [M]. Oxford: Gulf Professional Publishing, 2001 : 77.
- [12] FENG T, WANG C, WANG P, et al. How physiological and physical processes contribute to the phenology of cyanobacterial blooms in large shallow lakes: a new Euler-Lagrangian coupled model [J]. *Water Research*, 2018, 140 : 34-43.
- [13] 武旭跃. 基于改进模糊层次分析法的贡湖水源地水质安全风险评估 [D]. 无锡: 江南大学, 2017.
- [14] 李一平, 邱利, 唐春燕, 等. 湖泊水动力模型外部输入条件不确定性和敏感性分析 [J]. *中国环境科学*, 2014, 34(2) : 410-416. (LI Yiping, QIU Li, TANG Chunyan, et al. Uncertainty and sensitivity analysis of input conditions in large shallow lake hydrodynamic model [J]. *China Environmental Science*, 2014, 34 (2) : 410-416. (in Chinese))
- [15] YANG Q, WU S, DAI J, et al. Effects of short-term water diversion in summer on water quality and algae in Gonghu Bay, Lake Taihu [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2018, 30 : 34-43.
- [16] 王磊之, 胡庆芳, 胡艳, 等. 1954—2013 年太湖水位特征要素变化及成因分析 [J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2016, 44(1) : 13-19. (WANG Leizhi, HU Qingfang, HU Yan, et al. Changes and cause analysis of water level characteristic factors in Taihu Lake during period from 1954 to 2013 [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2016, 44(1) : 13-19. (in Chinese))
- [17] 岳辉, 刘英. 基于 Landsat 及 ICESat 和 Hydroweb 的太湖容积变化监测 [J]. *水利水电技术*, 2017, 48(9) : 77-83. (YUE Hui, LIU Ying. ICESat/Hydroweb and Landsat data-based monitoring on volume variation of Taihu Lake [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2017, 48(9) : 77-83. (in Chinese))
- [18] HAN H K, GOMEZ N. The impact of water loading on postglacial decay times in Hudson Bay [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2018, 489 : 156-165.
- [19] VINNIKOV K Y, DICKERSON R R, KROTKOV N A, et al. The net decay time of anomalies in concentrations of atmospheric pollutants [J]. *Atmospheric Environment*, 2017, 160 : 19-26.
- [20] 唐昌新, 张晓航, 邬年华, 等. 拟建鄱阳湖水利枢纽工程对水龄的影响模拟分析 [J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2018, 16 (3) : 195-206. (TANG Changxin, ZHANG Xiaohang, WU Nianhua, et al. Simulation analysis on the influence of poyang lake water control project on water age [J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2018, 16(3) : 195-206. (in Chinese))
- [21] 华祖林, 韩爱秋. 基于非参数回归改进的太湖总磷压力-响应模型 [J]. *水资源保护*, 2019, 35 (1) : 20-24. (HUA Zulin, HAN Aiqiu. Improved stressor-response model of total phosphorus in Taihu Lake based on nonparametric regression [J]. *Water Resources Protection*, 2019, 35(1) : 20-24. (in Chinese))
- [22] PAN F, ZHU J, YE M, et al. Sensitivity analysis of unsaturated flow and contaminant transport with correlated parameters [J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 397 (3/4) : 238-249.
- [23] 郝文彬, 唐春燕, 滑磊, 等. 引江济太调水工程对太湖水动力的调控效果 [J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2012, 40(2) : 129-133. (HAO Wenbin, TANG Chunyan, HUA Lei, et al. Effects of water diversion from Yangtze River to Taihu Lake on hydrodynamic regulation of Taihu Lake [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2012, 40(2) : 129-133. (in Chinese))
- [24] LI Y P, TANG C Y, WANG C, et al. Assessing and modeling impacts of different inter-basin water transfer routes on Lake Taihu and the Yangtze River, China [J]. *Ecological Engineering*, 2013, 60(1) : 399-413.
- [25] LI Y P, KUMUD A, YU Z B. Modeling impacts of Yangtze River water transfer on water ages in Lake Taihu, China [J]. *Ecological Engineering*, 2011, 37(2) : 325-334.
- [26] 黄春琳, 李熙, 孙永远. 太湖水龄分布特征及“引江济太”工程对其的影响 [J]. *湖泊科学*, 2017, 29(1) : 22-31. (HUANG Chunlin, LI Xi, SUN Yongyuan. Water age distribution of the Lake Taihu and impact of the Yangtze River to Lake Taihu Water Transfer Project on the water age [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2017, 29 (1) : 22-31. (in Chinese))

(收稿日期: 2019-04-25 编辑: 熊水斌)