

DOI:10.12170/20190226004

杨金艳, 徐勇, 周杰, 等. 基于水龄抑制蓝藻水华的供水水库取水方案优选 [J]. 水利水运工程学报, 2020(2): 85-90. (YANG Jinyan, XU Yong, ZHOU Jie, et al. Optimization of reservoir cycling water scheme based on water age to reduce algal bloom risk[J]. Hydro-Science and Engineering, 2020(2): 85-90. (in Chinese))

# 基于水龄抑制蓝藻水华的供水水库取水方案优选

杨金艳<sup>1</sup>, 徐勇<sup>1</sup>, 周杰<sup>2</sup>, 吴时强<sup>2</sup>

(1. 江苏省水文水资源勘测局苏州分局, 江苏 苏州 215129; 2. 南京水利科学研究院 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029)

**摘要:** 水体交换年龄称为水龄。水龄长是水库富营养导致蓝藻水华的重要因子。水龄也是环境水体混合过程分析中最佳的示踪指标, 可描述水团的混合和更新、污染物的混合和消解等, 故常用于研究湖库水体被外源水置换的能力。采用基于染色模拟的水龄模拟方法, 改进了 EFDC 模型, 以优选太仓二水厂供水水库取水水泵房位置为例, 建立了三维数学模型, 模拟了不同布置方案对供水水库环流结构和水龄的影响, 从而优化供水水库的水龄分布, 抑制蓝藻水华。由于水库的氮磷营养盐输入量、水深、气温等自然条件难以控制, 通过优化取水水泵房位置可以改变水库环流特性, 改善水库水体水龄分布, 减少水龄、抑制蓝藻生长, 从而降低水库富营养化的风险。

**关键词:** 水库; 富营养化; 水龄; 数值模拟; 环流; 风生流

中图分类号: TV131

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2020)02-0085-06

近年来, 我国水库水体富营养化现象日益加剧, 其污染源极其复杂, 潜在的危害很大, 已成为水环境保护中最突出的环境问题。三峡水库蓄水后, 水库支流经常出现藻华, 对当地水环境和生态构成了巨大挑战<sup>[1]</sup>。根据我国近几年的调查显示, 一些大中型水库水体处于中度营养化到富营养化的过渡状态<sup>[2]</sup>。多个供水水库出现富营养化, 其中包括上海重要饮用水水库——青草沙水库<sup>[3]</sup>。以往供水水库取水口设计主要考虑防沙、防浪、避咸、水质、温度分层、工程造价等因素<sup>[4-9]</sup>, 尚未考虑从抑制蓝藻水华方面优化取水口位置。

水库富营养化控制除了减少氮磷营养盐输入、投放鲮鲢生物控藻、生态浮岛等措施外, 缩短水库水体的水龄也是一项非常重要的措施。水龄可以定量反映水体的运动和交换程度及滞留情况, 对评估水质变化具有重要意义。

水龄的概念来自于恒定流。假设一个与外界存在物质交换的容器, 并假设物质交换过程是平衡态的, 即物质的总质量和统计分布不随时间而变。Bolin 等<sup>[10]</sup>在此基础上, 将某种物质的水龄定义为该物质进入容器后所经历的时间。水龄的研究一般通过数学模型来实现。现有数学模型方法分为直接跟踪法和间接跟踪法两种。直接跟踪法采用拉格朗日法直接跟踪记录生命的水团运动过程<sup>[11-13]</sup>。该方法的缺点是计算量大, 且跟踪多源水体时计算困难。在实际水体中, 往往存在多个源和汇, 有时还对不同水源进入的水体进行跟踪。为此, Deleersnijder 等<sup>[14]</sup>提出了染色模拟计算水龄的通用理论, 从而完善了间接跟踪的基本理论。

## 1 水体水龄模拟方法及其改进

邵军荣曾基于染色模拟计算水龄的通用理论研发了无结构网格二维水龄计算模型<sup>[15]</sup>。美国环境保护

收稿日期: 2019-02-26

基金项目: 水体污染控制与治理专项(2017ZX07203); 江苏省水利科技项目(2018006); 苏州市水利科技项目(2018001); 国家自然科学基金资助项目(51479121, 51479120)

作者简介: 杨金艳(1977—), 女, 江苏启东人, 高级工程师, 硕士, 主要从事水资源方向的研究。E-mail: 184459173@qq.com  
通信作者: 徐勇(E-mail: 43336967@qq.com); 周杰(E-mail: jzhou@nhri.cn)

署 EPA 研发的 EFDC 模型, 适用面广, 对湖库三维流动模拟精度高, 多次应用于模拟水体水龄<sup>[16-19]</sup>。该模型代码编写模块化设计, 改编非常方便, 为适应三维分层计算, 本文基于上述染色模拟计算水龄的原理, 改进了 EFDC 模型。

Deleersnijder 等定义  $c(t, \mathbf{x}, \tau)$  为与时间  $t$ 、空间位置  $\mathbf{x}$  和水龄  $\tau$  相关的水龄谱, 且在水体中符合守恒物质输运规律<sup>[4]</sup>。

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -\nabla(\mathbf{u}c - k\nabla c) \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{u}$  为流速矢量场(m/s);  $k$  为扩散系数(m<sup>2</sup>/s);  $c$  为  $c(t, \mathbf{x}, \tau)$  函数。

定义水体中示踪物质含量  $C$  和水龄密度  $\alpha$ :

$$C(t, \mathbf{x}) = \int_0^{\infty} c(t, \mathbf{x}, \tau) d\tau \quad (2)$$

$$\alpha(t, \tau) = \int_0^{\infty} \tau c(t, \mathbf{x}, \tau) d\tau \quad (3)$$

基于以上定义, 在  $t$  时刻、空间位置  $\mathbf{x}$  处的平均水龄  $a(t, \tau)$  可定义为:

$$a(t, \tau) = \frac{\int_0^{\infty} \tau c(t, \mathbf{x}, \tau) d\tau}{\int_0^{\infty} c(t, \mathbf{x}, \tau) d\tau} = \frac{\alpha}{C} \quad (4)$$

则有示踪物质浓度控制方程与水龄密度控制方程:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \mathbf{u}\nabla C - k\nabla^2 C = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \mathbf{u}\nabla \alpha - k\nabla^2 \alpha = C \quad (6)$$

方程(5)和(6)解决了染色模拟与水龄模拟相关的理论。方程(6)为改进 EFDC 模型的关键方程, 即在 EFDC 模型中添加一个水龄密度方程, 该方程需要添加一个与示踪物质含量相关的源项。

为计算方便, 示踪物质浓度在进入计算水域的边界上设为 1.0 mg/L, 故模型边界条件为:  $C = 1; \alpha = 0$ 。

## 2 浏河水库取水泵站位置优化

### 2.1 各方案水流模拟

太仓市第三水厂位于二水厂东南方向 16 km 处, 水源地位于长江浏河口上游边滩浏河水库, 现状布置如图 1 所示。水库总库容 1 742 万 m<sup>3</sup>, 有效库容 1 427 万 m<sup>3</sup>, 应急库容 242 万 m<sup>3</sup>, 死库容 315 万 m<sup>3</sup>。最高蓄水位 5.5 m, 死水位 -1.2 m, 应急水位 0 m, 夏季运行水位 0~1.5 m, 水库库底标高 -2.80 m, 水面面积 220 万 m<sup>2</sup>。三水厂取水时采用远期规划建设 60 万 m<sup>3</sup>。

浏河水库运行以来, 实际日供水不到 20 万 m<sup>3</sup>, 与设计供水能力差距较大。太仓三水厂为了缩短供水水库换水周期, 将平均蓄水水位降至约 1.0 m, 对应库容约 760 万 m<sup>3</sup>, 换水周期约为 38 d。由于换水周期较长, 夏季高温期间水库水体富营养化程度加剧, 水厂实测最高藻细胞数达到每升 514 万个。

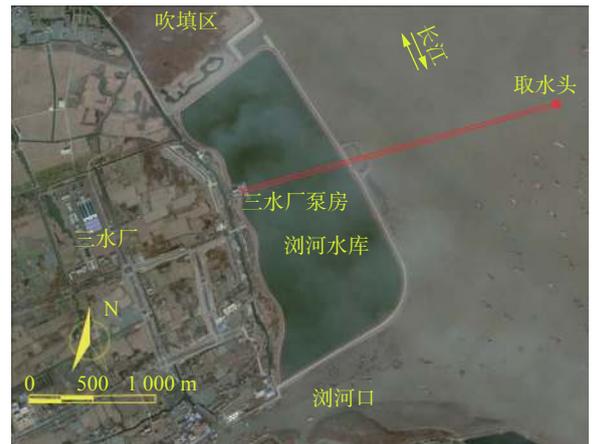


图 1 浏河水库现状布置

Fig. 1 Layout of Liuhe Reservoir

太仓第二水厂水源地拟搬迁至本水库, 可以提高水库的原水利用率, 降低运行管理成本, 缩短水库的换水周期。二水厂现状实际日供水量为 20 万  $m^3$ , 按照现行的水库运行管理方式, 按实际供水量计算换水周期将缩短到约 15 d。

浏河水库由于库容较大、用水量较小, 导致水库原水流动性不高, 加之水深较浅, 水库内藻类易于繁殖。通过新建二水厂浏河取水及换水泵站, 可与现有三水厂浏河取水泵站形成多点取水、统一换水的格局, 有效提高水库原水的流动性, 一定程度上可提高原水水质。同时, 本工程取水及换水泵站还具有换水功能, 当浏河水库需要换水改善水质时, 可就近排出水库原水至长江, 提高浏河水库原水水质。为了更科学地布置二水厂取水泵房和取水头的位置, 充分利用取水产生的环流改善库区的流动特性, 减轻水体富营养化, 特进行取水方案优化研究。

水库水流往往受到风切应力、热浮力、取排水水量(源、汇项)等因素的控制。由于本工程所在水库水深较浅, 最高蓄水位时水深仅 8 m, 夏季平均蓄水水深仅 4 m, 故热浮力作用甚微。由于水库面积较大, 达到 220 万  $m^2$ , 影响水流的主要因素为风, 其次是取水形成的汇。由于浅水湖泊风生流会在湖泊平面及垂面上产生环流, 表层水流方向与底层水流方向往往相反, 所以对于风生流的模拟宜采用分层三维模型进行研究。

浏河水库形状基本规则, 整个水库剖分成 20 m $\times$ 20 m 的正方形网格, 共布置 5 504 个网格单元。计算分成 6 层, 每层厚度相等。计算时间步长 10 s, 水库地形采用清淤后的标高, 基本为 -2.80 m。计算初始水位采用夏季平均运行水位 1.0 m。计算风速为太仓夏季平均风速 3.6 m/s, 风向为夏季主导风向 SSE 和 SE。

本工程泵站取用浏河水库原水, 应靠近浏河水库选址。由于现状第三水厂取水泵房位于浏河西侧中间区域, 因此本工程新建取水泵站选址主要有 3 个方案。方案 1~3 泵站选址分别位于浏河水库东北角、西南角和西北角。

由于水库内水体流动性差, 库区内水体的水龄也存在差异性。计算分析做了如下假定: (1)长期受 SE 向风或 SSE 向风影响, 风速 3.6 m/s; (2)水库初始运行水位为 0 m, 长江补充水库流量 33.5  $m^3/s$ , 补充长江水的同时, 从水库取水供水, 1.5 d 后停止补充长江水; (3)水库供水流量为 40 万 t/d, 二水厂、三水厂各供水 20 万 t/d; (4)每运行 10 d 补充长江水 1 次, 每次补水持续时间 1.5 d。

经数值模拟, 得到了如图 2 所示的水库环流结构以及如图 3 所示的库区水龄分布情况。水库平均水龄及取水水域水龄统计如表 1 所示。

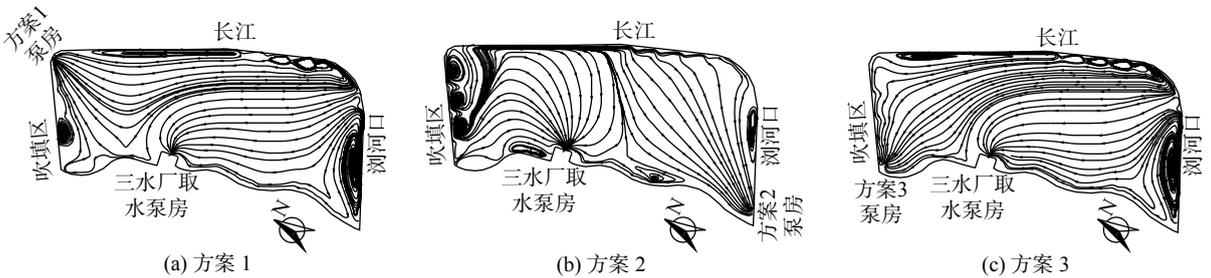


图 2 SE 风 3.6 m/s 作用下库区环流

Fig. 2 Currents in the reservoir in a southeast wind with speed of 3.6 m/s

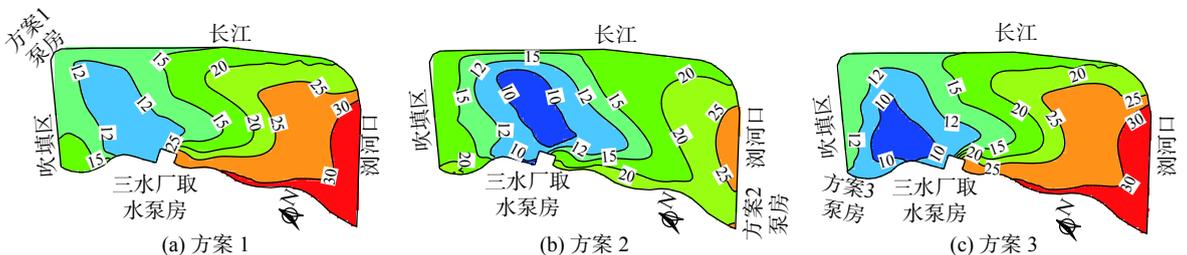


图 3 SE 风 3.6 m/s 作用下库区水龄分布(单位: d)

Fig. 3 Water age distribution in a southeast wind with speed of 3.6 m/s (unit: d)

以上计算成果表明:

(1)二水厂泵房方案 2 有利于长江补充水与水库水体的充分混合,库区平均水龄由布置方案 1 和 3 的 20 d 缩短到 16 d;方案 1 和 3 的 2 个布置方案对水库整体水龄和三水厂取水泵房以南库区水龄的影响很小,而对三水厂以北库区水龄的影响较大,主要表现在小于 12 d 的短水龄区分布差异较大。

(2)二水厂泵房采用方案 1 和方案 3 在水库的南部水域均形成较大面积的难换水区,水龄达到 25 d 以上的区域将达到约 1/4 库区面积。而采用布置方案 2 可以大大降低水库南部水域的水龄,与方案 1 和 3 相比,南部水域水龄基本可以缩短 5 d。

## 2.2 取水泵站位置比较

下面综合分析 3 个取水泵站位置方案的优劣。

(1)夏季盛行风条件下,无论采用哪个布置方案,水库表层水体的流动方向均为从南往北方向流动,方案 2 布置在浏河水库西南角处于盛行风的上风口,上层水体的蓝藻不容易在取水水域聚集。

(2)二水厂泵房布置在浏河水库东北角或西北角时,取水主要来自库区东北角和东半部水库的水,这部分水体基本是新补入的长江水,而三水厂取水主要来自泵房附近的西半部水库的水体,这样水库的西南角水体很难得到新补入的长江水的混合,造成大量新水被取走而大量旧水得不到新水掺混。而采用方案 2 将泵房布置在浏河水库西南角时,二水厂取水主要来自三水厂泵房以南库区,三水厂取水主要来自三水厂泵房以北库区,有利于长江水在水库中整体掺混均匀后供水,库区平均水龄由方案 1 的 20 d 缩短到 17 d。

(3)二水厂泵房布置在浏河水库东北角或西北角时,优点是取水水域离补充水出口较近,水龄为 13 d;当二水厂取水头部发生藻华灾害时,立刻补入长江水,长江水只需 2 d 就能到达二水厂取水水域;换水泵通过穿堤暗管向长江排放,影响较小;缺点是取水水域处于下风口,不利于缩短库区的整体水龄,水库的西南角存在换水死角,水龄大于 30 d。

(4)二水厂泵房布置在浏河水库西南角时,优点正好是布置在东北角的缺点。缺点是取水水域水龄较长,达到 23 d,长江向水库补水后 5~6 d 才能影响取水水域,但是由于位于夏季盛行风的上风口,上层水体中的藻类不容易在取水水域聚集。总体而言,方案 2 有利于改善二水厂取水水质。

(5)二水厂采用方案 2 时增设换水泵效果明显,而采用方案 1 和 3 时,换水泵对南部水域水龄的缩短效果不明显。采用方案 2 时,二水厂增设换水泵流量达到  $1.7 \text{ m}^3/\text{s}$ (即  $15 \text{ 万 m}^3/\text{d}$ )时,在夏季盛行风条件下,库区平均水龄由 17 d 缩短到 12 d,南部水域水龄将缩短到 13 d。考虑到夏季风向不可能恒定,实际南部水域水龄比计算结果要短,故换水泵流量达到  $15 \text{ 万 m}^3/\text{d}$  时,基本可以达到库区水龄小于 15 d 的要求。采用方案 1 和 3 时,增设换水泵在夏季特殊时期持续运行以期缩短库区水龄的措施是不经济的,建议采取应急补充长江水的方式抑制水华,然后择机运行至死水位,三水厂取用长江水继续供水,二水厂停止供水,利用排空泵排空水库进行彻底换水。

综上所述,从库区环流及水龄等环境水力学角度出发,方案 2(二水厂泵房位于浏河水库西南角)明显优于方案 1 和 3。

## 3 结 语

水库的氮磷营养盐输入量、水深、气温等自然条件难以控制,通过优化取水泵房位置可以改变水库环流特性,缩短水库水龄;通过长江水抑制蓝藻的生长,从而降低水库富营养化的风险,这是比较现实的措

表 1 水库平均水龄及取水水域水龄统计

布置方案	库区平均水龄/d	二水厂取水水域水龄/d	三水厂取水水域水龄/d
方案1	20.0	13.5	11.9
方案2	16.3	23.2	10.1
方案3	20.4	11.8	11.9

施。基于染色模拟的水龄模拟方法能较少地改动成熟模型的代码,有效模拟库区、湖泊水龄,是一种基于水龄优化水库进排水设计抑制蓝藻水华的有效方法。

## 参 考 文 献:

- [1] GAO Q F, HE G J, FANG H W, 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 Hydrology*, 2018, 566: 484-499.
- [2] 生态环境部. 2017年中国生态环境状况公报[R]. 北京: 生态环境部, 2018. (Ministry of Ecology and Environment. Report on China ecological and environmental condition in 2017[R]. Beijing: Ministry of Ecology and Environment, 2018. (in Chinese))
- [3] CHEN Y Z, ZHU J R. Reducing eutrophication risk of a reservoir by water replacement: a case study of the Qingcaosha reservoir in the Changjiang Estuary[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2018, 37(6): 23-29.
- [4] 张小帅, 张耀哲, 刘伟峰. 某取水工程防沙设计及试验验证[J]. *水利水电工程学报*, 2014(1): 85-91. (ZHANG Xiaoshuai, ZHANG Yaozhe, LIU Weifeng. Sediment control design and experimental verification for a water intake project[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2014(1): 85-91. (in Chinese))
- [5] 岳永魁, 潘军宁, 王登婷. LNG项目取水结构波浪压力物理模型试验[J]. *水利水电工程学报*, 2012(3): 87-91. (YUE Yongkui, PAN Junning, WANG Dengting. Model tests of wave pressures on water intake structure of LNG project[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2012(3): 87-91. (in Chinese))
- [6] 丁磊, 陈黎明, 高祥宇, 等. 长江口水源地取水口盐度对径潮动力的响应[J]. *水利水电工程学报*, 2018(5): 14-23. (DING Lei, CHEN Liming, GAO Xiangyu, et al. Response of salinity at water source intakes to runoff and tidal dynamics of Yangtze River estuary[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2018(5): 14-23. (in Chinese))
- [7] 卢金锁, 汪利德. 湖库水源选择性取水水质模型及应用[J]. *给水排水*, 2012, 38(12): 113-118. (LU Jinsuo, WANG Lide. Application of water quality model for selective water intaking in reservoir[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2012, 38(12): 113-118. (in Chinese))
- [8] 李广宁. 大型水库水温结构及取水口前流场研究[D]. 天津: 天津大学, 2015. (LI Guangning. Study on the flow field near the intake and thermal structures in large reservoirs[D]. Tianjin: Tianjin University, 2015. (in Chinese))
- [9] 肖敏杰, 高志强, 马永恒. 某水厂取水口迁建工程设计案例[J]. *给水排水*, 2019, 45(4): 24-29. (XIAO Minjie, GAO Zhiqiang, MA Yongheng. Design case for relocation project of water intake of a water treatment plant[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2019, 45(4): 24-29. (in Chinese))
- [10] 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.
- [11] CORNATON F J. Transient water age distributions in environmental flow systems: the time-marching Laplace transform solution technique[J]. *Water Resources Research*, 2012, 48(3): W03524.
- [12] LIU H F, DING Y, WANG H D, et al. Lattice Boltzmann method for the age concentration equation in shallow water[J]. *Journal of Computational Physics*, 2015, 299: 613-629.
- [13] DING Y, LIU H F, YI Y J. A Lagrangian model for the age of tracer in surface water[J]. *International Journal of Modern Physics C*, 2018, 29(2): 1850013.
- [14] DELEERSNIJDER E, CAMPIN J M, DELHEZ E J M. The concept of age in marine modelling: I. Theory and preliminary model results[J]. *Journal of Marine Systems*, 2001, 28(3/4): 229-267.
- [15] 邵军荣, 吴时强, 周杰, 等. 水体交换年龄模型研究[J]. *水科学进展*, 2014, 25(5): 695-703. (SHAO Junrong, WU Shiqiang, ZHOU Jie, et al. An age model for water transfer[J]. *Advances in Water Science*, 2014, 25(5): 695-703. (in Chinese))
- [16] LI Y P, ACHARYA K, CHEN D, et al. Modeling water ages and thermal structure of Lake Mead under changing water levels[J]. *Lake and Reservoir Management*, 2010, 26(4): 258-272.
- [17] LI Y P, ACHARYA K, 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.
- [18] 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))

- [19] 戚文, 李一平, 王莹, 等. 基于EFDC模型的天镜湖水动力优化调控方案研究[J]. 水电能源科学, 2015, 33(1): 47-51. (QI Wen, LI Yiping, WANG Ying, et al. Control and optimization scheme of Tianjing Lake hydrodynamics based on EFDC model[J]. Water Resources and Power, 2015, 33(1): 47-51. (in Chinese))

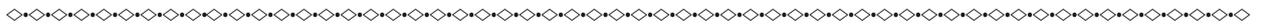
## Optimization of reservoir cycling water scheme based on water age to reduce algal bloom risk

YANG Jinyan<sup>1</sup>, XU Yong<sup>1</sup>, ZHOU Jie<sup>2</sup>, WU Shiqiang<sup>2</sup>

(1. Suzhou Sub Bureau, Jiangsu Province Hydrology and Water Resources Investigation Bureau, Suzhou 215129, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** Water age is the time for water replaced by that from outside. Water age plays an important role in algal bloom in reservoirs and is taken as an ideal tracer which can describe water mixing rate and process. It can yield very effective diagnoses, for example the characterization of the mixing and renewal of water masses, of the fate and mixing of contaminants. In the research, an age simulation method based on dyeing simulation was developed to improve EFDC model. Taking Taicang Second Water Plant reservoir pump house location optimization as an example, reservoir circulating currents and water age were modeled to reduce the water age in order to reduce algal bloom risk. Since the air temperature, water depth and nitrogen and phosphor input are hard to control, to optimize the water age and the cycling currents of reservoir by water intake pump house location optimization is one of the most useful ways to control the risk of algal bloom in reservoir by changing growth inhibition.

**Key words:** reservoir; eutrophication; water age; numerical simulation; circulating current; wind driven currents



### 著作权使用声明

本刊已许可中国知网、维普资讯、万方数据、博看网、超星数据、中教数据库、中邮阅读网等以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。本刊支付的稿酬已包含中国知网、维普资讯、万方数据、博看网、超星数据、中教数据库、中邮阅读网等著作权使用费,所有署名作者向本刊提交文章发表之行为视为同意上述声明。如有异议,请在投稿时说明,本刊将按作者说明处理。

《水利水运工程学报》编辑部

2020-03-20