

三峡水库水动力分区及总磷标准研究

谢培¹, 孙宁¹, 方源², 王丽婧¹, 李虹¹, 乔飞^{1*} (1. 中国环境科学研究院, 环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012; 2. 湖北大学资源环境学院, 湖北 武汉 430062)

摘要: 采用 EFDC 模型计算 2010~2018 年三峡水库流域水龄. 结果表明, 三峡水库水龄由上游库尾至下游库首愈来愈大, 尤其坝前水龄高达 100 余天, 湖泊属性增强, 坝前支流受库区影响大, 大坝调度对水龄影响较大, 高水位运行期水龄将增长至 2~4 倍. 基于水龄空间分布将三峡水库及其 17 条主要支流划分为河流水型、河湖过渡型和湖泊型. 水龄影响因素定量分析表明, 水龄与水位呈正相关, 与流量呈负相关, 泄水期变化速率较蓄水期明显, 单位流量与水位内水龄变化幅度高达 6~7d, 变化区间介于 30~100d 之间. 最后, 提出基于水龄权重法的河湖过渡区总磷评价标准, 该标准可揭示库区水体总磷的时空变化特征.

关键词: EFDC 模型; 水龄; 总磷标准; 三峡水库

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2022)10-4752-06

Study on hydrodynamic partition and total phosphorus standard in the Three Gorges Reservoir. XIE Pei¹, SUN Ning¹, FANG Yuan², WANG Li-jing¹, LI Hong¹, QIAO Fei^{1*} (1. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. Faculty of Resources and Environmental Science, Hubei University, Wuhan 430062, China). *China Environment Science*, 2022, 42(10): 4752~4757

Abstract: The EFDC model was used to calculate water age in the Three Gorges Reservoir from 2010 to 2018. Result shows water age increased from the end to the head of the dam, especially in Baqian where water age over 100 days. With the lake attributes increased, tributaries nearby the dam were greatly affected. Dam operation has great influence on the water age, it will increase to 2~4 times during the high water level period. Based on the spatial distribution of water age, the Three Gorges Reservoir and its 17 tributaries were divided into riverine, intermediate and lacustrine zones. Quantitative analysis of factors affecting water age showed that water age is positively correlated with water level, negatively correlated with discharge, and the change rate of drainage period is more obvious than that of impoundment period. Water age varies up to 6 to 7 days within unit flow and water level, and the variation range is between 30 and 100 days. Finally, the evaluation standard of total phosphorus in intermediate zone based on the weight method of water age was put forward, which revealed the temporal and spatial variation characteristics of total phosphorus, and provide scientific basis for the management and early warning of phosphorus pollution in the Three Gorges Reservoir.

Key words: EFDC model; water age; total phosphorus standard; Three Gorges Reservoir

水动力条件是决定污染物运输和分布的主要因素, 尤其水库地区, 与开放水域的水交换非常有限, 极易受到营养物或有毒物质的影响^[1-2]. 国际湖泊环境委员会根据水体停留时间将地表水分为 3 大类, 小于 20d 定义为河流区, 20~300d 之间定义为河湖过渡区, 大于 300d 定义为湖泊区, 该分类也可用于表征水体富营养化的敏感性^[3]. 水库地区人为大坝调节是控制水体和污染物运输的主要过程^[4], 闸坝建设对河道水文情势产生显著影响, 河流流速减缓, 滞留时间增长, 氮、磷营养物质的输送能力受阻. 研究表明闸坝建设较多的河流, 水体富营养化时有发生^[5-7], 三峡水库、丹江口水库等建成后, 曾发生过多次规模较大的硅藻水华^[8-9].

三峡水库作为特大的河道型水库, 人为调度运

行导致库区呈现枯水期高水位与洪水期低水位水动力特征, 水库成为干流河流型、支流湖泊型或河湖过渡型的多型水体. 对于河湖过渡型水体水动力学特征介于河流与湖泊之间, 我国地表水环境管理主要依据地表水环境质量标准(GB3838-2002)^[10]实施, 在区分河流和湖泊总磷方面存在 2~4 倍的较大差异, 不适宜采用河流或湖泊的任意一种营养状态标准进行评价. 考虑到三峡水库为典型的多型水库, 其水动力影响因素及总磷标准研究对我国水库管理具有重要意义. 因此, 本文以三峡水库及其主要支流为研究对象, 对其水动力影响因素和河湖过渡型水体

收稿日期: 2022-03-21

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC040470002)

* 责任作者, 研究员, qiaofei@craes.org.cn

总磷标准制定的思路和方法进行了探讨,以期为我国水库保护和管理提供科学依据。

1 研究区域与方法

1.1 研究区域

三峡水库位于 $31^{\circ}04'N \sim 31^{\circ}34'N, 110^{\circ}25'E \sim 111^{\circ}06'E$, 库容 393 亿 m^3 , 流域面积 $1080 km^2$ 。作为一个由大坝和支流组成的复杂人工网络,自建成以来,对长江流域的水文产生了重大影响。按照调度方式,全年划分为泄水期(4~5月)、低水位期(6~9月)、蓄水期(9~10月)、高水位期(11~翌年3月)。水库管理的水位和流量变化与自然季节变化相反^[1],导致库区水体形态、水文情势发生巨大变化并伴生水环境演变的深远影响。

2003 年蓄水期间,大宁河首次出现水华,随后其他支流也出现了水华呈上升趋势的报道,而且随着水位上升,受水华影响的区域逐渐延伸至三峡库区上游^[12]。近年来,由于水动力影响支流藻华逐渐成为突出问题,而大坝和蓄水对库区及其支流水动力的影响仍然知之甚少。因此,本文模拟了 2010~2018 年库区和 17 条支流的水文循环过程,以探索库区及支流水动力的时空变化规律。研究区域为从重庆朱沱到三峡大坝 800km 长江干流河段,以及主要支流 R.1~R.17(图 1)。在干流中设置了 9 个采样点,以监测水位、流速、水温和水质变量。

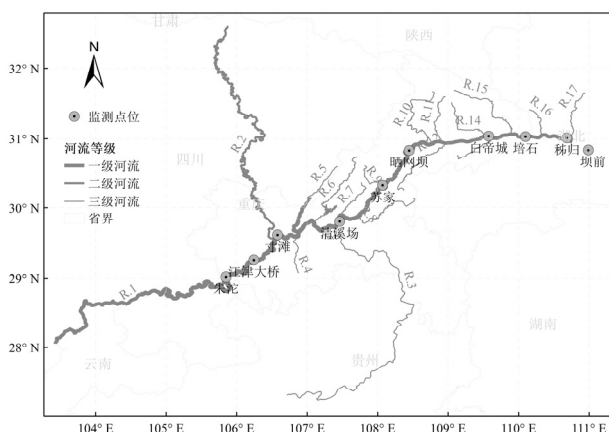


图 1 研究区域示意

Fig.1 The map of the study area

1.2 研究方法

1.2.1 模型简介 本文利用 Hamrick^[13]开发的 EFDC 模型模拟库区及支流的水动力。EFDC 的水动力模型由连续性方程、动量方程、状态方程和 Mellor-

Yamada-2.5 湍流闭合方案组成^[14-15],用于计算垂直湍流粘度和扩散率。本研究模拟期为 2010 年 1 月~2018 年 12 月,模型时间步长设置为动态步长,范围为 5~90s。计算域总共被划分为 2384 个网格单元,垂直方向上在大坝附近部署 2 层,如图 2。模型在东部设置开边界为水位边界,年内波动显著,最小值为 145m,最大值为 175m。此外,中国气象局提供的气象数据和不同深度观测的温度数据被用作上游边界条件。

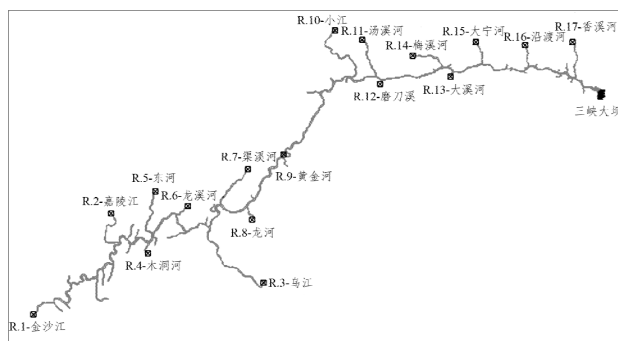


图 2 模型网格与边界设置

Fig.2 Unstructured grid and the boundary conditions setting

1.2.2 水龄计算 库区水动力特征通过建立水龄模型进行表征,水龄量化了水包进入研究区域后经过的时间,提供了特定水源在给定时间和位置下的所有水包的代数年龄^[16]。基于示踪剂的水龄建模方法已被广泛应用^[17-18]。根据 Delhez 等^[19]和 Deleersnijder 等^[20]提出的理论,示踪剂的平均年龄 $a(t, x)$ 位置 x 和时间 t 下的平均年龄计算如下:

$$a(t, x) = \frac{\alpha(t, x)}{C(t, x)} \quad (1)$$

式中: $C(t, x)$ 为示踪剂的浓度; $\alpha(t, x)$ 为年龄浓度,计算如下:

$$\alpha(t, x) = \int_0^\infty \tau c(t, x, \tau) d\tau \quad (2)$$

式中: $c(t, x, \tau)$ 为水龄 τ 在 t 时间和 $x=(x, y, z)$ 位置处的数值;水龄 $c(t, x, \tau)$ 和示踪剂的浓度 $C(t, x)$ 关系如下:

$$C(t, x) = \int_0^\infty c(t, x, \tau) d\tau \quad (3)$$

根据这一理论, $C(t, x)$ 和 $\alpha(t, x)$ 均受对流扩散方程控制:

$$\frac{\partial C(t, x)}{\partial t} + \nabla(VC(t, x) - K\nabla C(t, x)) = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial \alpha(t, x)}{\partial t} + \nabla(V\alpha(t, x) - K\nabla \alpha(t, x)) = C(t, x) \quad (5)$$

式中: $V=(u, v, w)$ 是 x, y 和 z 方向上的水流速度分量; K

是水平和垂直方向上的扩散张量.

1.2.3 率定与验证 参数率定:本研究选择 2010 年 1~12 月作为率定期,水动力参数率定包括水平弥散系数(AHO)和粗糙高度(ROUGHNESS).AHO 采用 Smagorinsky 公式计算得到,采用 $AHO=1.0\text{m}^2/\text{s}$. ROUGHNESS 为空间分布变量,根据模拟结果进行调整,分布范围为 0.12~0.25m.本研究选用水位数据对模型进行率定,各断面模拟值和实测值相关性高于 0.9,且均值相对误差小于 0.2%.

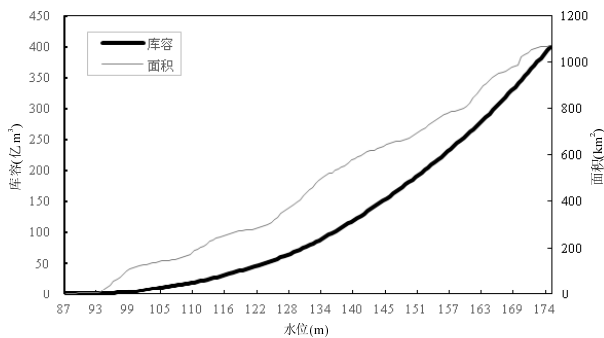


图 3 三峡库区水位-面积-容量曲线
Fig.3 The elevation-volume-area curve

表 1 水位和水温模拟误差分析

Table 1 Error Analysis of water level and temperature simulation

监测点	水位		水温	
	NSE	RMSE(%)	NSE	RMSE(%)
江津大桥	0.84	11	0.82	12
朱沱	0.73	15	0.79	14
寸滩	0.94	9	0.92	07
清溪场	0.96	6	0.93	5
苏家	0.9	12	0.87	12
晒网坝	0.89	12	0.9	10
白帝城	0.91	10	0.93	5
秭归	0.98	3	0.95	4
坝前	0.97	4	0.93	6

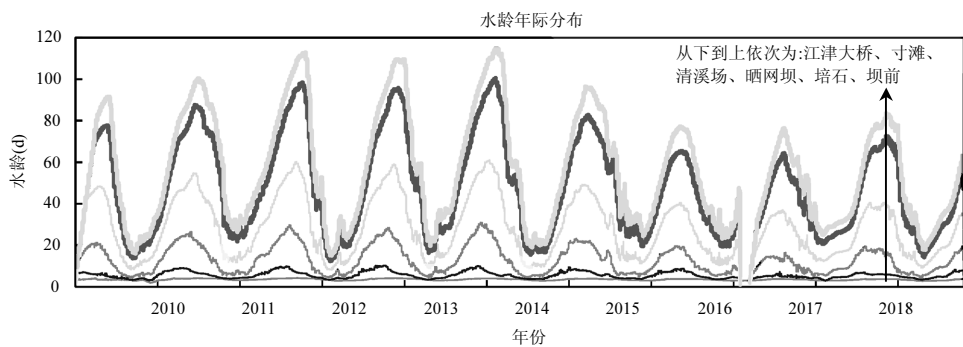
模型验证:三峡库区水动力特征存在空间异质

性,主要表现为干流和支流的流量和流速差异.金沙江(长江干流)的年平均流速达为 0.72m/s,嘉陵江为 0.39m/s,乌江为 0.05m/s,而其他支流的年平均流速仅为 0.01~0.03m/s.三峡水库的蓄水量和流域面积可由模拟得到的水位-面积-容量曲线表示,由图 3 可知水位 175m 时,库区蓄水量为 400 亿 m^3 ,流域面积为 1073km^2 ,与库区实际情况表现较为一致.模型验证选取 2010~2014 年水位和水温数据,采用纳什效率系数(NSE)和均方根误差(RMSE)对各监测点的水位和水温的模拟值与观测值进行比较(表 1),误差均在可接受的范围内,模型能够高精度地模拟库区水动力情况.

2 结果分析

2.1 水龄分布及分区结果

2.1.1 水龄分布特征 水龄由上游库尾至下游库首总体呈上升趋势,在枯水期和平水期尤为明显(图 4(a)),图 4(b)显示水龄大小与水团流经的距离(距零点朱沱的距离)密切相关($r>0.9$),即距离库首愈近,水龄愈大,靠近库首的坝前断面水龄高达 112d.众所周知,三峡大坝和周期性蓄水对船舶、水力发电、洪水操纵和灌溉都有很大的贡献,但富营养化和水华的风险经常在支流中出现^[21-22].由水龄分布规律可知,上游库尾至下游库首水体的水动力受库区影响逐渐增大,水体流速逐渐减缓,湖泊属性逐渐增强,坝前支流相较于上游支流更易于出现富营养化现象.图 4(c)揭示了水龄年内变化曲线,高水位期下水龄呈上升趋势.具体表现为 9~翌年 4 月逐渐增加,于 4 月达到最大值,继而从 4~9 月逐渐降低,于 9 月达到最小值,结合三峡大坝调度规律可知,4~9 月为三峡水库下泄和蓄水期,水体更新交换能力大,水龄可下降至高水位期下水龄的 1/2~1/4.



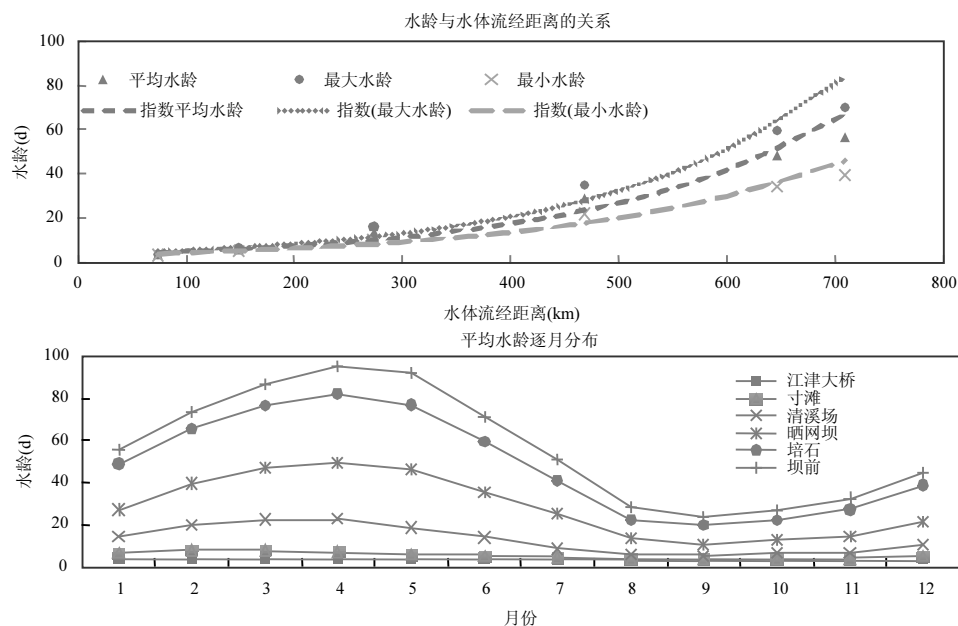


图4 水龄时空分布特征及其与水体流经距离的关系

Fig.4 The temporal and spatial distribution characteristics of water age and its relationship with the flowing distance

2.1.2 分区结果 采用 EFDC 模型模拟 2010~2018 年三峡水库流域水龄过程,基于年际和年内不同水期的水龄分区结果基本一致,整个水库流域被划分为 3 部分,如图 5 所示,干流以清溪场为界的上游河流区和清溪场至三峡大坝的河湖过渡区;金沙江、嘉陵江和乌江被划分为河流区和河湖过渡区;剩余 14 条支流被划分为河湖过渡区和湖泊区。

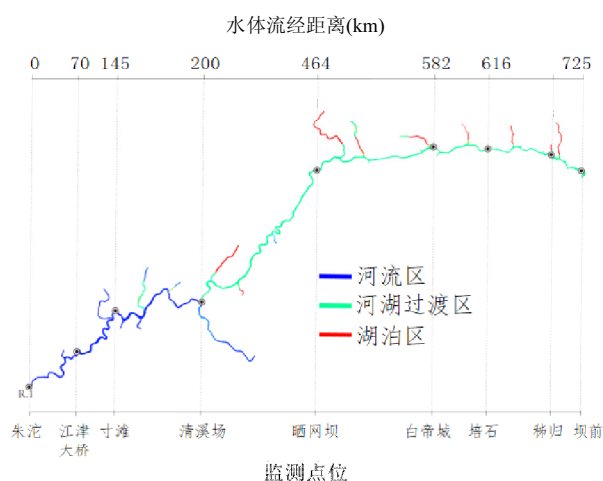


图5 基于水龄的分区结果

Fig.5 The cluster analysis based on water age

2.2 水龄的应用

2.2.1 水龄影响因素的确定 水量与闸坝调度时影响库区水动力情势的重要基础变量,开展水动力影响研究,可定量理解水库演变的人文作用机

理^[24-25].本文以水龄表征水动力特征,分析水龄与流量和水位的关系.结果表明,水龄与流量呈负相关趋势.具体表现为蓄水期时流量由 $10000\text{m}^3/\text{s}$ 上升为 $22000\text{m}^3/\text{s}$,水龄随水流量的增大缓慢下降,由 60d 下降为 30d 左右,减小速率为约 $2\text{d}/(10^3\text{m}^3/\text{s})$,表达式为 $y=71.327e^{-0.00005x}$.泄水期时流量由 $10000\text{m}^3/\text{s}$ 降低为 $3000\text{m}^3/\text{s}$ 左右时水龄随流量的减小急剧增大,由 30 余天上升为 100d 左右,增大速率约为 $7\text{d}/(10^3\text{m}^3/\text{s})$,表达式为 $y=132.09e^{-0.0001x}$,变化速率较蓄水期大。

水龄与水位呈正相关趋势.具体表现为蓄水期时水位由 157m 上升为 175m 时,水龄随水位的上升而缓慢上升,由 30d 逐渐上升为 50 余天,增加速率为 $2\text{d}/\text{m}$,表达式为 $y=0.0349e^{0.0417x}$.泄水期水位由 157m 下降为 145m 时,水龄随水位的降低而急剧减小,由 100d 下降为 30d 左右,减小速率为 $6\text{d}/\text{m}$,表达式为 $y=3\times 10^{-5}e^{0.0961x}$,变化速率较蓄水期大。

2.2.2 总磷标准计算方法 河流和湖泊的总磷评价标准存在很大差异,准确评价多型水库的水质尤为重要.本研究中河湖过渡区总磷标准采用基于水龄的权重法,计算公式如下:

$$S_{\text{mix}} = S_R \cdot \frac{WA_i - WA_L}{WA_L - WA_R} + S_L \cdot \frac{WA_i - WA_R}{WA_L - WA_R}$$

式中: S_R 是地表水Ⅲ类水体的总磷标准, $0.2\text{mg}/\text{L}$; S_L 为湖泊Ⅲ类水体的总磷标准, $0.05\text{mg}/\text{L}$; WA_i 是位于 i 位置的水龄值; WA_R 和 WA_L 分别是河流区和湖泊区

的水龄值,分别为 20d 和 300d.

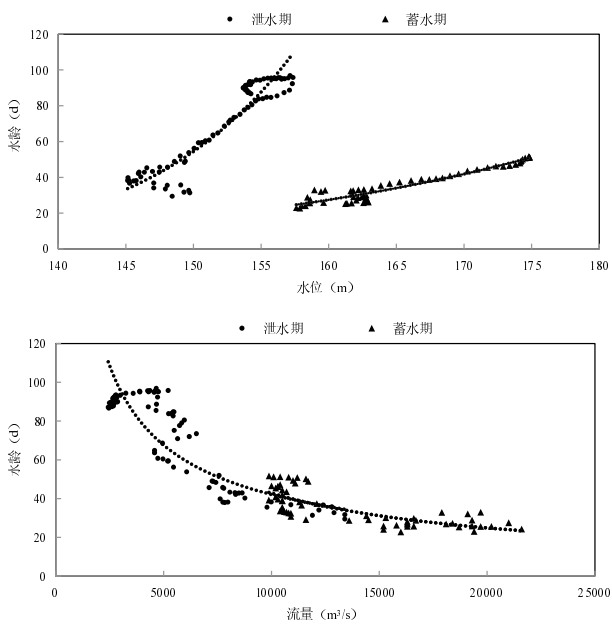


图 6 水龄与流量河水位定量变化曲线
Fig.6 Quantitative curve of water age with flow and water level

考虑到同一位置各月水龄存在较大差异,总磷标准按月尺度计算,同时,为进一步验证该标准的科学性与合理性,选择库区干流 4 个河流区断面和 6 个河湖过渡区断面进行标准值计算.如表 4 所示,计算得总磷标准分布范围为 0.16~0.20mg/L,其中河流区断面朱沱、江津大桥、寸滩和清溪场总磷标准计算值为 0.2mg/L,同《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)^[10] III类水体的总磷标准;苏家 11 月~翌年 4 月,晒网坝 12 月~翌年 5 月,白帝城 10 月~翌年 7 月以及培石、秭归和坝前断面的总磷标准为水龄权重法的计算值.由表 2 标准值大小分布可知,晒网坝下游断面总磷标准略低于其上游,这是由于磷的变化特征在很大程度上取决于自然过程^[23],在不考虑区间来沙的情况下,2017 年三峡库区淤积泥沙主要集中在涪陵至云阳段(对应本文清溪场至晒网坝段),大量磷随泥沙淤积至沉积物中,导致晒网坝下游断面总磷标准计算值略低.因此,该标准计算值具有科学性和合理性,同时能反映出库区水体总磷时空变化特征.

表 2 断面总磷评价标准参考值(mg/L)
Table 2 Reference value of total phosphorus evaluation standard for each section in reservoir area(mg/L)

月份	朱沱	江津大桥	寸滩	清溪场	苏家	晒网坝	白帝城	培石	秭归	坝前
1	0.200	0.200	0.200	0.200	0.195	0.190	0.183	0.180	0.176	0.173
2	0.200	0.200	0.200	0.200	0.194	0.189	0.179	0.175	0.170	0.166
3	0.200	0.200	0.200	0.199	0.192	0.187	0.176	0.173	0.167	0.163
4	0.200	0.200	0.200	0.200	0.195	0.189	0.177	0.172	0.166	0.162
5	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.197	0.187	0.183	0.176	0.171
6	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.193	0.191	0.187	0.183
7	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.198	0.196	0.193	0.189
8	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.199	0.201	0.198
9	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.199	0.198	0.196
10	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.199	0.197	0.194	0.192
11	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.196	0.194	0.191	0.189
12	0.200	0.200	0.200	0.200	0.199	0.195	0.189	0.187	0.184	0.181

3 结论

3.1 水体流经上游库尾至下游库首过程中水龄愈来愈大,水动力受库区影响也愈来愈大,湖泊属性逐渐增强,坝前支流相较于上游支流更易于出现富营养化.大坝调度对水龄变化影响显著,高水位运行期的水龄高达泄水、蓄水期的 2~4 倍.

3.2 选取以水龄为代表的水动力学特征指标,依据其分级标准,对三峡水库流域及 17 条主要支流进行区划,将其划分为河流区、河湖过渡区和湖泊区.

3.3 水龄与水位呈正相关趋势,与流量呈负相关趋势,泄水期水龄变化速率较蓄水期明显,变化区间介于 30~100d 之间,当流量减小时,水龄以 7d/(10³m³/s)的速率增大,当水位的降低时,水龄以 6d/m 的速率减小.

3.4 采用水龄权重法计算河湖过渡区水体总磷标准,能够反映库区水体总磷时空变化特征.

参考文献:
[1] Risse-buhl U, Anlanger C, Kalla K, et al. The role of hydrodynamics

- in shaping the composition and architecture of epilithic biofilms in fluvial ecosystems [J]. *Water Research*, 2017,127:211–222.
- [2] Zhang S, Xiao Y, Li Z, et al. Turbulence exerts nutrients uptake and assimilation of bloom-forming *dolichospermum* through modulating morphological traits: field and chemostat culture studies [J]. *Science of Total Environment*, 2019,671:329–338.
- [3] Thornton K W, Kennedy R H, Carrol J H, et al. Reservoir sedimentation and water quality—An heuristic model [J]. *Water Science and Technology*, 1981,1:654–661.
- [4] Grill G, Lehner B, Lumsdon A E, et al. An index-based framework for assessing patterns and trends in river fragmentation and flow regulation by global dams at multiple scales [J]. *Environmental Research Letter*, 2015,10,015001.
- [5] 李慧玲,陈 菁,金 秋,等.水闸规模对河道水动力水环境的影响研究 [J]. *人民长江*, 2019,50(2):181–185,196.
- Li H L, Chen Q, Jin Q, et al. Energy consumption evaluation of high-speed and long-distance landslide in accelerated motion [J]. *Yangtze River*, 2019,50(2):181–185,196.
- [6] Dong J, Xia X, Zhang Z, et al. Variations in concentrations and bioavailability of heavy metals in rivers caused by water conservancy projects: Insights from water regulation of the Xiaolangdi Reservoir in the Yellow River [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2018,74(12):79–87.
- [7] 刘荣霞.南水北调中线丹江口水库调度水质影响模拟 [J]. *应用基础与工程科学学报*, 2011,19(S1):193–200.
- Liu R X. Simulation of wate transferring impact on the water quality in Danjiangkou reservoir of the south to north water diversion middle line project [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2011, 19(S1):193–200.
- [8] 李林娟,邓鹏鑫.三峡工程运行前后长江中游河段水质变化模拟 [J]. *人民长江*, 2018,49(22):51–56.
- Li L J and Deng P X. Simulation of water quality variation in middle reaches of Yangtze River before and after operation of Three Gorges Project [J]. *Yangtze River*, 2018,49(22):51–56.
- [9] 胡小阳,徐 源,王红萍,等.沙颍河重要闸控断面水质变化及影响因素分析 [J]. *水力发电*, 2018,44(11):1–5.
- Hu X Y, Xu Y, Wang H P, et al. Analysis of water quality change and influencing factors in important gate sections of Shaying River [J]. *Water Power*, 2018,44(11):1–5.
- [10] GB/T3838–2002 地表水环境质量标准 [S].
- GB/T3838–2002 Environmental quality standards for surface water [S].
- [11] Dai Z, Liu J. Impacts of large dams on downstream fluvial sedimentation: an example of the Three Gorges Dam on the Changjiang (Yangtze River) [J]. *Journal of Hydrology*, 2013,480:10–18.
- [12] 刘明坤,童 俊,胡 波,等.金泽水库上游来水及库区水质变化时空分布特征 [J]. *环境科学*, 2019,40(10):4461–4468.
- Liu M K, Tong J, Hu B, et al. Spatial-temporal distribution characteristics of the water quality in the Jinze Reservoir and its inflow [J]. *Environmental Science*, 2019,40(10):4461–4468.
- [13] Hamrick J M. A three-dimensional environmental fluid dynamics computer code: theoretical and computational aspect Virginia Institute of Marine Science [Z]. College of William and Mary, Virginia, 1992.
- [14] Smagorinsky J. General circulation experiments with the primitive equations: I. The basic experiment [Z]. *Monthly Weather Review*, 1962.
- [15] Mellor G L, Yamada T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems [Z]. 1982.
- [16] Bolin B, Rodhe H. A note on the concepts of age distribution and transit time in natural reservoirs [J]. *Tellus*, 1973,25:58–62.
- [17] 范宏翔,徐力刚,朱 华,等.气候变化和人类活动对鄱阳湖水龄影响的定量区分 [J]. *湖泊科学*, 2021,33(4):1175–1187.
- Fan H X, Xu L G, Zhu H, et al. Distinguishing the relative impacts of climate change and anthropogenic activities on variation of water age in the Lake Poyang [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2021,33(4): 1175–1187.
- [18] 张素香,许新发,徐 兴,等.鄱阳湖水龄季节性变化特征 [J]. *湖泊科学*, 2018,30(1):199–210.
- Zhang S X, Xu X F, Xu X, et al. Seasonal variations of water ahe in Lake Poyang [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2018,30(1):199–210.
- [19] Delhez E J M, Campin J M, Hirst A C, et al. Toward a general theory of the age in ocean modeling [J]. *Ocean Model*, 1999,1:17–27.
- [20] 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 System*, 2001,28:229–267.
- [21] Ouyang W, Li Z, Yang J, et al. Spatio-temporal variations in phytoplankton communities in sediment and surface water as reservoir drawdown—A case study of Pengxi River in Three Gorges Reservoir, China [J]. *Water*, 2021,13:340–340.
- [22] Xiang R, Wang L, Li H, et al. Water quality variation in tributaries of Three Gorges Reservoir from 2000 to 2015 [J]. *Water Research*, 2021,195:116993.
- [23] 赖格英,王 鹏,黄小兰,等.鄱阳湖水利枢纽工程对鄱阳湖水文水动力影响的模拟 [J]. *湖泊科学*, 2015,27(1):128–140.
- Lai Y G, Wang P, Huang X L, et al. A simulation research of impacts of the Lake Poyang hydraulic project on hydrology and hydrodynamics [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2015,27(1):128–140.
- [24] Humborg C, Ittekkot V, Cociasu A, et al. Effect of Danube River dam on black sea biogeochemistry and ecosystem structure [J]. *Nature*, 1997, 386(6626):385–388.
- [25] 娄保锋,卓海华,周 正,等.近 18 年长江干流水质和污染物通量变化趋势分析 [J]. *环境科学研究*, 2020,33(5):1150–1162.
- Lou B F, Zhuo H, Zhou Z, et al. Analysis on alteration of water quality and pollutant fluxes in the Yangtze mainstream during recently 18years [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020,33(5):1150–1162.

作者简介: 谢 培(1992-),女,河北保定人,助理研究员,硕士,主要研究方向为水环境模拟.发表论文 20 余篇.