

“引江济淮”工程对安徽菜子湖水龄分布的影响^{*}

王 钟^{1,2}, 范中亚^{2,3**}, 杨忠勇^{1**}, 王文才², 张恒军², 曾凡棠²

(1: 三峡大学水利与环境学院, 宜昌 443000)

(2: 环境保护部华南环境科学研究所, 水环境研究中心, 广州 510655)

(3: 河海大学环境学院, 南京 210098)

摘 要: 菜子湖是“引江济淮”工程的重要输水通道, 其水体输运和物质交换将因输水工程发生改变。本文基于环境流体水动力学模型(EFDC)建立了菜子湖水龄模型, 在将模型与实测水文数据验证满足精度的前提下, 设计 14 种方案计算菜子湖在季风影响下的水龄, 工程实施期间菜子湖在丰、平、枯季的水龄与流场, 以及枯水季调水情景下同风速 8 种风向和强风向 3 种风速时的水龄。数值试验的模拟结果表明: 菜子湖湖体水龄分布具有时空差异性, 无风条件下, 春、夏、秋、冬季的湖体的平均水龄分别为 120.93、33.19、92.92、101.48 d, 而在季风影响下, 春、夏、秋、冬季平均水龄分别为 75.23、32.45、81.80、66.16 d; 西部 L2 湖水龄较长, 东部 L1 湖和南部 L3 湖水龄较短; 输水工程将改变 L1 和 L3 湖的流场, 对 L2 湖流场几乎无影响; 输水工程实施后, 菜子湖水龄分布主要受风场及输水影响, 不同风向对菜子湖各湖区影响不同, 西南风有助于 L1 湖水体交换, 北风有助于 L2 湖水体交换, 东风有助于 L3 湖水体交换, 而当风向为东北风时, 3 个湖区水龄均较小; 枯水季调水有利于 L1 湖和 L3 湖水体交换, 但对 L2 湖水体交换作用不明显。

关键词: “引江济淮”工程; 菜子湖; EFDC 模型; 水龄

Effects of Water Diversion Project from the Yangtze River to Huaihe River on the water age distribution of Lake Caizi, Anhui Province

WANG Zhong^{1,2}, FAN Zhongya^{2,3**}, YANG Zhongyong^{1**}, WANG Wencai², ZHANG Hengjun² & ZENG Fantang²

(1: College of Water Conservancy and Environment, China Three Gorges University, Yichang 443000, P.R.China)

(2: Research Center of Water Environment, South China Institute of Environmental Science, Ministry of Environment Protection of PRC, Guangzhou 510655, P.R. China)

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

Abstract: Lake Caizi is an extremely important channel of Water Diversion Project from the Yangtze River to Huaihe River. The transportation and exchange of water bodies of Lake Caizi will be changed significantly due to the water conveyance project. Based on the Environmental Fluid Hydrodynamic Model (EFDC), the water age model of Lake Caizi was established in this paper. On the premise of validating the simulated and measured hydrological data, 14 schemes were designed to calculate the water ages of Lake Caizi under the influence of the monsoon, the water ages and flow field of Lake Caizi in the flood season, the normal season, and the dry season during the implementation period, along with the water ages under the eight wind directions with the same wind speed and the three wind speeds with the strong wind direction under the waterdiversion scenario of the dry season. Numerical simulation results show that: the distribution of the water ages in Lake Caizi has the space-time characteristics. In the absence of wind conditions, the average ages of Lake Caizi in spring, summer, autumn and winter were 120.93, 33.19, 92.92 and 101.48 d, respectively. Rather, under the influence of monsoon, the average water ages in spring, summer, autumn, and winter were 75.23, 32.45, 81.80 and 66.16 d, respectively. The water ages of Lake L2 in the west is long, while that of Lake L1 in the east and Lake

^{*} 中央级公益性科研院所基本科研业务专项(PM-zx703-201701-005)和东江流域饮用水源型河流水质安全保障技术集成与综合示范项目(2014ZX07206005)联合资助。2018-02-01 收稿;2018-03-29 收修改稿。王钟(1994~),男,硕士研究生;E-mail:Romeo1202@163.com.

^{**} 通信作者;E-mail:fanzhongya@scies.org;E-mail:ayong0710@163.com.

L3 in the south shorter; The water diversion project will change the flow field of Lake L1 and Lake L3 and have little effect on the flow field of Lake L2; After the water diversion project is implemented, the water ages distribution of Lake Caizi is mainly affected by wind field and water conveyance. Different wind directions may have different impacts on the different lake districts of Lake Caizi. The southwest wind helps exchange water body of the Lake L1, the north wind helps to exchange the water body of the Lake L2, and the east wind aids the exchange of the water of the Lake L3. When the wind direction is northeast wind, the water ages of three lake regions are all relatively small. The water diversion during the dry season is beneficial to the exchange of water between the Lake L1 and the Lake L3, but the water exchange effect on Lake L2 is not obvious.

Keywords: Water Diversion Project from the Yangtze River to Huaihe River; Lake Caizi; EFDC model; water age

菜子湖是长江中下游典型的通江浅水湖泊,近年来,随着社会经济的快速发展,该湖泊水质逐渐下降^[1-3],水生态系统有退化趋势,如水生植被覆盖度显著下降,鸟类多样性减少^[4-5]. 安徽省2016年启动“引江济淮”工程,预计2020年试运营,该工程是以城乡供水、发展江淮航运为主,结合农业灌溉补水,兼顾改善巢湖及淮河水生态环境等综合利用的大型跨流域调水工程. 工程自南向北分为“引江济巢”、“江淮运河”和“淮水北调”三段,“引江济巢”段将长江水经枞阳闸穿越菜子湖,北出孔城河,输送至巢湖流域. 菜子湖是“引江济淮”工程的重要输水通道,输水工程运行后,将影响菜子湖的水动力特征,湖泊生态系统也将随之调整.

跨流域调水工程是解决地区间水资源分配不均的途径之一^[6],这些工程在取得显著的经济效益、社会效益和环境效益的同时,也会影响湖泊水动力特征及生态环境效益,近年来很多学者围绕调水工程的生态环境影响开展了诸多有意义的研究. Li等^[7]建立EFDC三维水动力模型,研究了“引江济太”工程引水量对太湖水动力的调控效果,研究显示,“引江济太”工程对太湖湖体水动力过程的作用效果很大程度上取决于风速风向以及出入湖的流量. 黄春琳等^[8]通过建立染色剂模型和水龄模型,分析了太湖水龄季节性分布特征以及望虞河调水运行和新沟河工程对太湖水龄分布的影响. 熊鸿斌等^[9]提出MIKE11模型结合稀释流量比m值法计算了“引江济淮”工程涡河段水环境容量. 杨倩倩等^[10]通过对太湖贡湖湾一次夏季短期调水前后水环境的分析研究,发现调水对贡湖湾水质影响显著,调水后受水区pH略降,总氮、总磷及高锰酸盐指数等理化指标浓度较调水前升高,蓝藻种属比例有所下降,绿藻和硅藻等非蓝藻种属比例则有所上升.

迄今为止,对菜子湖的研究主要集中于生物多样性及其结构特征分析^[5,11-13],而关于菜子湖水动力的研究却鲜有报道,因此在菜子湖水动力特征及环境效应等方面还需深入研究. 风场是浅水湖泊的重要驱动因素,对于湖泊的流场影响较大^[14],此外,“引江济淮”工程在解决水资源短缺和改善受水地区水质的同时,也会对沿线湖泊的生态环境产生影响. 鉴此,本文基于EFDC建立了菜子湖水动力模型,引用水龄的概念^[15-16],分析“引江济淮”工程和风场对菜子湖水龄分布特征的影响,可为输水工程方案的实施管理提供科学依据.

1 研究区概况

菜子湖(30°43'~30°58'N,117°01'~117°10'E)位于安徽省安庆市,地处北亚热带湿润气候区,气候四季分明. 多年平均气温为16.5℃,全年主导风向为东北风,夏季为西南风,春、秋、冬季均为东北风,年平均风速为1.6~5.0 m/s^[17]. 流域内降水受季风气候的影响较为明显,夏季明显多于冬季,多年平均降雨量为1389.1 mm. 菜子湖面积全年变化极大,丰水期水域总面积为242.9 km²(相应水位为15.1 m),总容积为16.1亿m³,而枯水期水域总面积为145.2 km²(相应水位8.1 m),总容积为2.87亿m³.

菜子湖由东部L1湖、西部L2湖和南部L3湖3个彼此连通的湖泊组成,上游主要入湖河流有孔城河、龙眠河、挂车河和大沙河,其中大沙河的入湖流量占菜子湖入湖总流量的47.3%. 下游的主要出湖河流为位于东南部的长河,水体流向是自西向东、自北向南. 菜子湖的地理位置见图1.

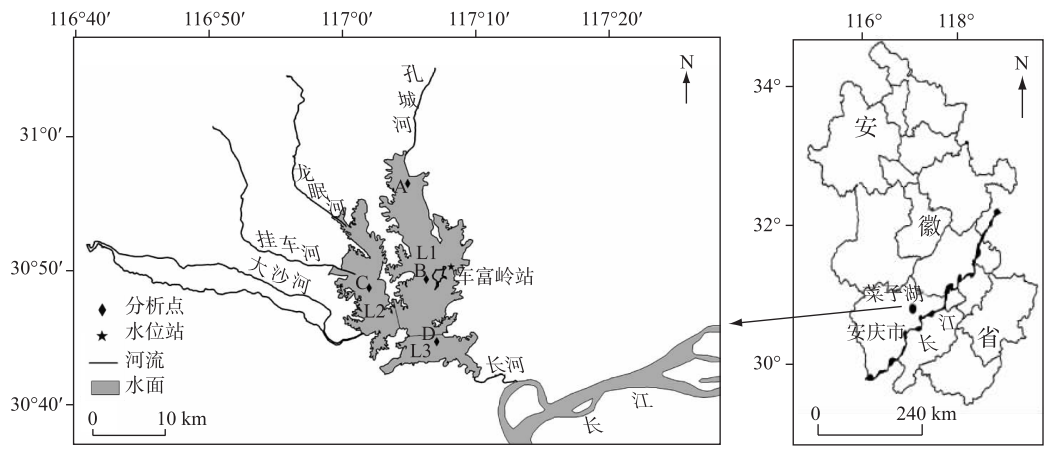


图1 菜子湖地理位置
Fig.1 The location of Lake Caizi

2 研究方法

2.1 模型的建立

EFDC 模型最早由美国弗吉尼亚大学和海洋科学研究所开发^[18],应用笛卡尔坐标或曲线正交坐标系,可广泛用于解决三维水动力以及污染物运移与扩散的环境问题,本文用笛卡尔直角坐标网格建立菜子湖水动力模型,水平面总计 6021 个网格,网格空间分辨率为 200 m,垂直分为 3 层,每层的厚度用湖底地形以及水面高程来决定. EFDC 模型以风力和入湖流量、出湖水位为动力边界条件(数据来源:<http://60.171.153.178:9000/shw/Query/RiverQueryConfig>). 入湖河流边界条件为 4 条河流流量:孔城河、龙眠河、挂车河和大沙河,出湖水位边界为枞阳闸上水位序列,水深根据水位和湖底高程得出,并且设置初始流速为 0 m/s.

初始条件:提取菜子湖枯水期遥感影像的湖泊边界线在 EFDC 中插值当做底高程,初始水位为 2015 年 4 月 1 日车富岭水位站的水位(9.13 m). 四季风速数据采用 1981—2010 年的多年月均值(数据来源:<http://data.cma.cn/>),风向设置为春、秋、冬季为东北向,夏季为西南向(图 2). 在假设湖面水平条件下,初始水位设置为模拟时段第 1 天的平均值. 模拟时间为 2015 年 4 月 1 日—2016 年 4 月 1 日,时间步长取为 10 s,共计算 365 d.

2.2 模型率定和验证

EFDC 模型中,水动力包含水位、流量、流速、温度和盐度,本文利用车富岭站 2015 年 4 月 1 日—2016 年 4 月 1 日的实测水位数据和模型计算结果进行对比验证(图 3). 2015 年 8 月拟合效果稍差,其余月份水位的模拟值和实测值拟合情况良好. 通过 MAE(平均绝对误差)、RMSE(均方根误差)和 RE(相对误差)可以直观地反映模型精度^[19],误差分析结果见表 1,模拟结果偏差最大的时段出现在 2015 年 8 月,可能与此段水位快速下落有关,其余时间模型偏差较小,MAE 和 RMSE 均小于 0.5 m,相对误差均小于 5%,表明模型结果可以比较准确地模拟湖区水量平衡.

表 1 车富岭站实测水位与模拟水位 MAE、RMSE 和 RE

Tab.1 MAE, RMSE and RE between measured and simulated water levels in Chefuling Station

	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	1 月	2 月	3 月
MAE/m	0.40	0.09	0.08	0.17	0.55	0.16	0.23	0.11	0.19	0.02	0.02	0.06
RMSE/m	0.49	0.11	0.09	0.24	0.65	0.16	0.28	0.14	0.27	0.04	0.02	0.06
RE/%	3.92	0.99	0.69	1.25	4.53	1.42	2.22	1.20	1.92	0.21	0.19	0.61

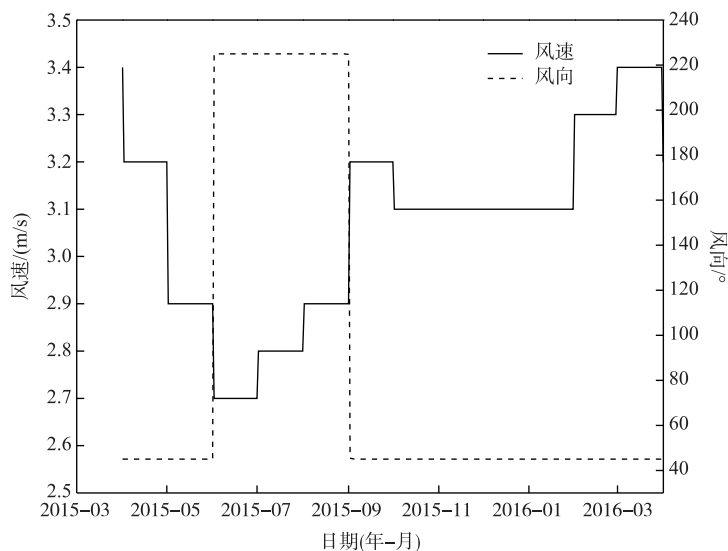


图2 菜子湖四季风场变化

Fig.2 Variation of wind field during four seasons in Lake Caizi

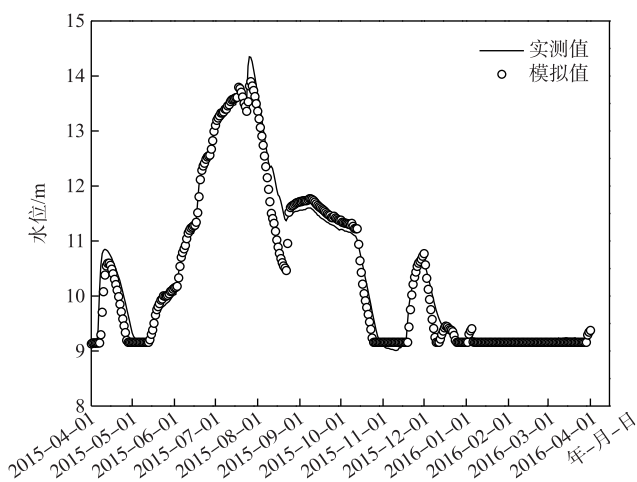


图3 车富岭站计算水位和实测水位的对比验证(2015 春季至2016 春季,黄海基面)

Fig.3 Comparison of water levels between measured and simulated results in Chefuling Station
(from spring of 2015 to spring of 2016, National 85 Yellow Sea Datum)

2.3 水龄的定义

水龄是指某一区域水体被交换所需要的时间,可根据示踪剂来计算^[15],假设系统中只有一种示踪剂,那么示踪剂浓度和水龄浓度满足以下两个控制方程^[20]:

$$\frac{\partial c(t, \vec{x})}{\partial t} + \nabla(\vec{u}c(t, \vec{x}) - \vec{K} \nabla c(t, \vec{x})) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \alpha(t, \vec{x})}{\partial t} + \nabla(\vec{u}\alpha(t, \vec{x})) - \vec{K} \nabla \alpha(t, \vec{x}) = c(t, \vec{x}) \quad (2)$$

式中, t 为时间, c 为示踪剂浓度, \vec{u} 为速度场, \vec{K} 为扩散张量, \vec{x} 为空间坐标, α 为水龄浓度. 平均水龄计算公

式为:

$$a(t, \vec{x}) = \frac{\alpha(t, \vec{x})}{c(t, \vec{x})} \tag{3}$$

2.4 计算方案

本文的计算将菜子湖视为一个封闭的区域,为了确定调水量及风场对水龄的影响,设计了 14 个方案(表 2)进行计算. 菜子湖是长江中下游典型的浅水湖泊,风场对湖泊的水龄影响甚大,故方案 S1 和 S2 分别讨论现状条件下有风和无风时的水龄分布的差异,模型计算时长为 365 d;菜子湖是“引江济淮”工程的重要输水通道,方案 S3~S5 考虑的是调水工程实施期间丰、平、枯季孔城河不同输水能力下菜子湖的水龄分布,根据孔城河丰、平、枯季不同输水能力^[21],以及大沙河、挂车河和龙眼河在丰、平、枯季的平均入湖流量,分别设置-43.5、-3.6 和 50.1 m³/s,代表长河丰、平、枯季流量,模型计算时长为 200 d;结合调水工程和风场,方案 S6~S13 讨论的是枯水季 8 种风向下的水龄影响;方案 S5, S7 和 S14 则讨论的是枯水季强风向下风速分别为 0.5 和 2.5 m/s 时的水龄,模型计算时长为 200 d. 所有方案所采用的模型及参数都是一致的.

表 2 模型计算方案
Tab.2 Model calculation scenarios

方案	水位/m		流量/(m ³ /s)					风速/ (m/s)	风向
	长河	孔城河	孔城河	长河	大沙河	挂车河	龙眼河		
S1	7.3~13.8 ¹⁾	/	2.3~517.1 ²⁾	/	5.6~1252.1 ³⁾	1.3~294.2 ⁴⁾	1.3~283.0 ⁵⁾	2.7~3.4 ⁶⁾	NE ⁷⁾ , SW ⁸⁾
S2	7.3~13.8 ¹⁾	/	2.3~517.1 ²⁾	/	5.6~1252.1 ³⁾	1.3~294.2 ⁴⁾	1.3~283.0 ⁵⁾	2.7~3.4 ⁶⁾	无风
S3	/	11.2 ⁹⁾	/	-43.5 ⁹⁾	46.2 ⁹⁾	10.9 ⁹⁾	10.4 ⁹⁾	0.0	无风
S4	/	8.7 ¹⁰⁾	/	-3.6 ¹⁰⁾	30.2 ¹⁰⁾	7.1 ¹⁰⁾	6.8 ¹⁰⁾	0.0	无风
S5	/	8.1 ¹¹⁾	/	50.1 ¹¹⁾	9.0 ¹¹⁾	2.1 ¹¹⁾	2.0 ¹¹⁾	0.0	无风
S6~S13	/	8.1	/	50.1	9.0	2.1	2.0	5.0	风向 ¹²⁾
S14	/	8.1	/	50.1	9.0	2.1	2.0	2.5	NE

1) 2014-4-1—2015-4-1 时间段枞阳闸上实测水位值;2) 2014-4-1—2015-4-1 时间段估算值;3) 2014-4-1—2015-4-1 时间段实测值;4) 2014-4-1—2015-4-1 时间段估算值;5) 2014-4-1—2015-4-1 时间段估算值;6) 1980—2010 年月均值;7) 春、秋、冬季为东北风;8) 夏季为西南风;9) 丰水期孔城河与菜子湖断面平均水位,长河、大沙河、挂车河和龙眼河为丰水期平均流量;10) 平水期孔城河与菜子湖断面平均水位,长河、大沙河、挂车河和龙眼河为平水期平均流量;11) 枯水期孔城河与菜子湖断面平均水位,长河、大沙河、挂车河和龙眼河为枯水期平均流量;12) 风向分别为: N, NE, E, SE, S, SW, W, NW; /表示没有对应的数据.

3 结果与讨论

3.1 菜子湖水龄季节性分布特征

季风作用下的菜子湖流场和水龄空间分布见图 4(方案 S1 结果),方案 S1 和方案 S2 的湖体水龄分布统计见表 3,从时间上看,有风条件下,春、夏、秋、冬季湖体的平均水龄分别为 75.23、32.45、81.80、66.16 d,四季出湖水龄从小到大依次为夏季>冬季>春季>秋季,而无风条件下,春、夏、秋、冬季的湖体的平均水龄分别为 120.93、33.19、92.92、101.48 d,在无风条件下,春、夏、秋、冬季的湖体的平均水龄比有风条件下的水龄分别大 45.70、0.74、11.12、35.32 d,夏季水龄在有风和无风条件下相差不大,是因为夏季四河入湖流量较大,湖泊水体交换速度较快,风场对水体交换较弱,而春、秋、冬季水龄相差较大,原因在于此三季湖泊水位较低,为了保持最低蓄水位,枞阳闸一般保持关闭状态,风场会显著加速水体交换. 从空间上看,夏季在偏南向季风作用下, L1 湖、L2 湖大部分湖区以及 L3 湖的水龄较小, 50 d 等水龄线分布范围较大;春、秋、冬季在偏北风作用下, L3 湖、L2 湖南部以及 L1 湖北部的的水龄较小, 50 d 等水龄线分布范围较小. 靠近湖流入口处的地方水龄较小,远离入口的地方水龄较大;水流流向与风向一致时水龄减小,水循环加快,反之则减慢. L3 湖是湖体水龄最小的湖区, L1 湖则是湖体水龄最大的湖区.

表 3 不同水龄区间(天数)所占湖区面积
Tab.3 The area covered by different water ages(days)

季节	面积/km ²								平均水龄/d	
	0~100 d 水龄		100~200 d 水龄		200~300 d 水龄		300 d 及以上水龄			
	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2
春季	117.04	105.92	46.72	29.36	9.68	26.72	0.40	24.40	75.23	120.93
夏季	240.72	240.72	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	32.45	33.19
秋季	167.32	131.88	73.40	108.84	0.00	0.00	0.00	0.00	81.80	92.92
冬季	205.64	133.92	16.16	60.20	2.00	34.76	0.00	0.00	66.16	101.48

3.2 “引江济淮”工程对菜子湖流场的影响

“引江济淮”工程自长江引水经枞阳闸入菜子湖,再经孔城河往北输送,工程运行会改变菜子湖的流场,经模型计算,典型位置变化的流速见表 4,流场空间分布见图 5. 从表 2 方案 S2~S5 可得出,丰水季时,A、B、C 点的流速均有提高,而 D 点流速略有下降;平水季时,A 点流速大幅提升,D 点流速大幅下降,B、C 点为原来的 2~3 倍;枯水季时,A 点流速急速提升,B、C、D 点的流速也分别得到了不同幅度的升高. 由此可知,随着孔城河在丰、平、枯季输水能力的增加(枯水季调水),菜子湖流场在不同区域受到的影响也随之变化,L2 湖流速方向未变,流速大小在枯水季得到小幅升高,而 L1 湖和 L3 湖流速方向由原先的从北流向南转变为从南流向北,与孔城河相连的 L1 湖区在平水季和枯水季流速均有较大幅度的提升,L3 湖在丰、平季流速均下降,在枯水季时流速加快. 因此,枯水季调水可以使 L1 湖和 L3 湖的水动力条件得到明显改善,而对 L2 湖作用不明显.

表 4 不同方案下典型位置流速统计
Tab.4 The statistics of flow velocities over typical locations under different scenarios

计算方案	分析点位流速/(m/s)			
	A	B	C	D
S2 丰水季	0.000920	0.001786	0.001235	0.003662
S3	0.002854	0.002604	0.002141	0.002898
S2 平水季	0.000216	0.005635	0.001768	0.006602
S4	0.014490	0.016750	0.003957	0.000066
S2 枯水季	0.000122	0.009057	0.001737	0.007807
S5	0.032140	0.035720	0.001772	0.010160

3.3 “引江济淮”工程对菜子湖水龄分布的影响

为了评估“引江济淮”工程对菜子湖水动力改善所起的作用,结合丰、平、枯季孔城河的输水能力,考虑长河 3 种不同流量出(入)湖的情况,即丰水季-43.45 m³/s,平水季-3.57 m³/s 和枯水季 50.09 m³/s(方案 3~5,表 2),并假定:①没有风场的影响;②除了长河和孔城河外其他支流都按丰、平、枯季平均流量考虑. 模型除了表 2 所示的入、出湖边界条件,以及风速、风向等驱动条件不同之外,其他条件和参数设置与方案 1 相同,模拟时长为 200 d.

第 200 天的模拟结果(模型模拟的最后一天,见图 6)表明,长河流量分别为-43.45、-3.57 和 50.09 m³/s 时,菜子湖的平均水龄分别为 122.56、83.42 和 90.46 d. 空间分布来看,丰水季未调水时,L2 湖和 L3 湖整体水龄较 L1 湖更小,平水季未调水时,L1 湖和 L2 湖整体水龄较 L3 湖更小,枯水季引水时,L1 湖和 L3 湖整体水龄较 L2 湖更小,水龄较小的区域从南边的 L3 湖蔓延到 L1 湖(水龄等于 50 d),然而,L2 湖、L1 湖的西部湖汊和东部湖汊水龄基本保持不变(水龄最大的为 236 d). 说明“引江济淮”工程对于改善 L3 湖及 L1 湖湖区的水循环有很大的促进作用. 然而,对于改善 L2 湖的帮助不大,而该湖区刚好是菜子湖水体的水质较差区域.

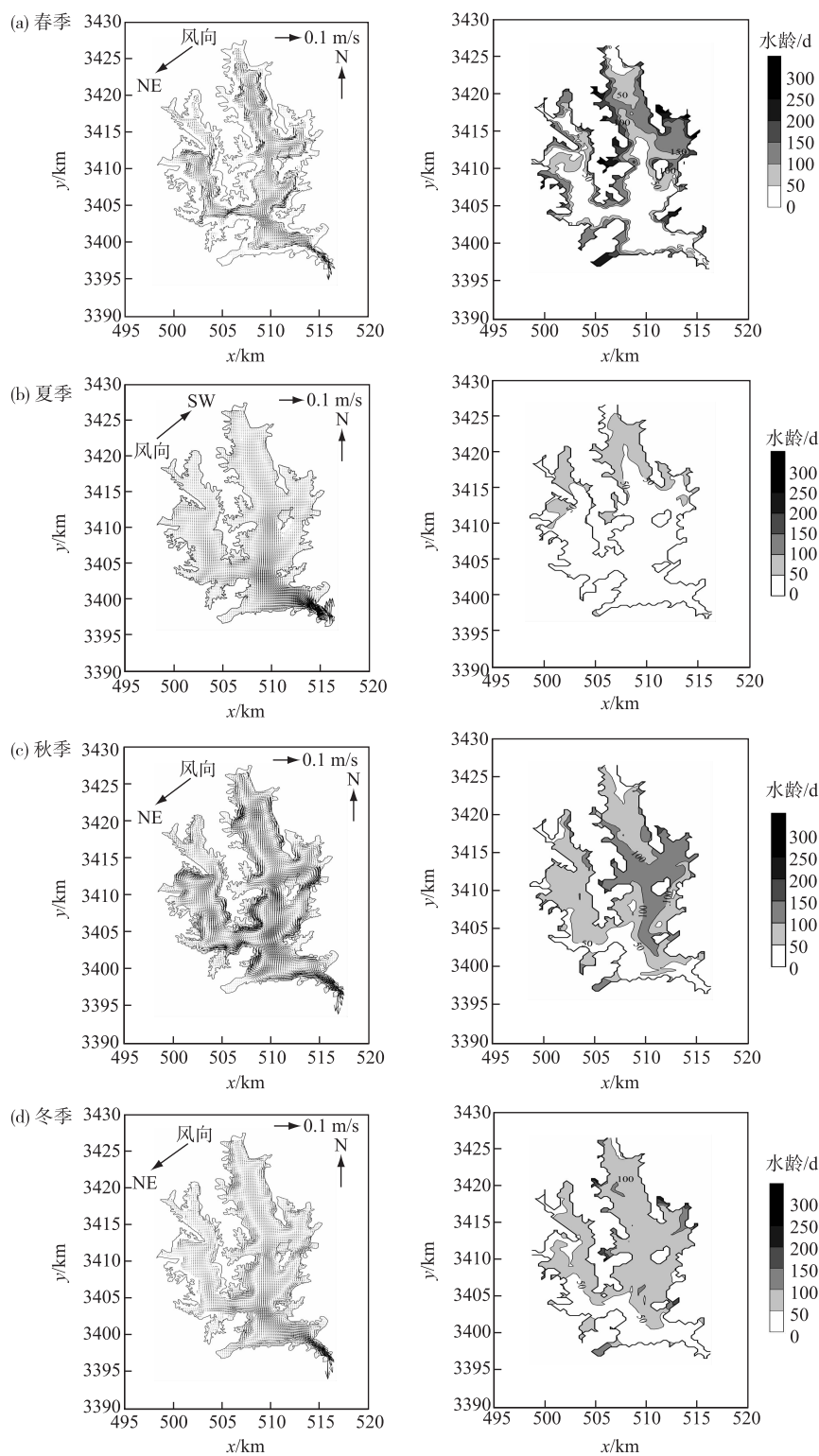


图4 季风影响下菜子湖4个季节流场和水龄分布

Fig.4 Distributions of flow field and water ages of Lake Caizi in response to monsoons

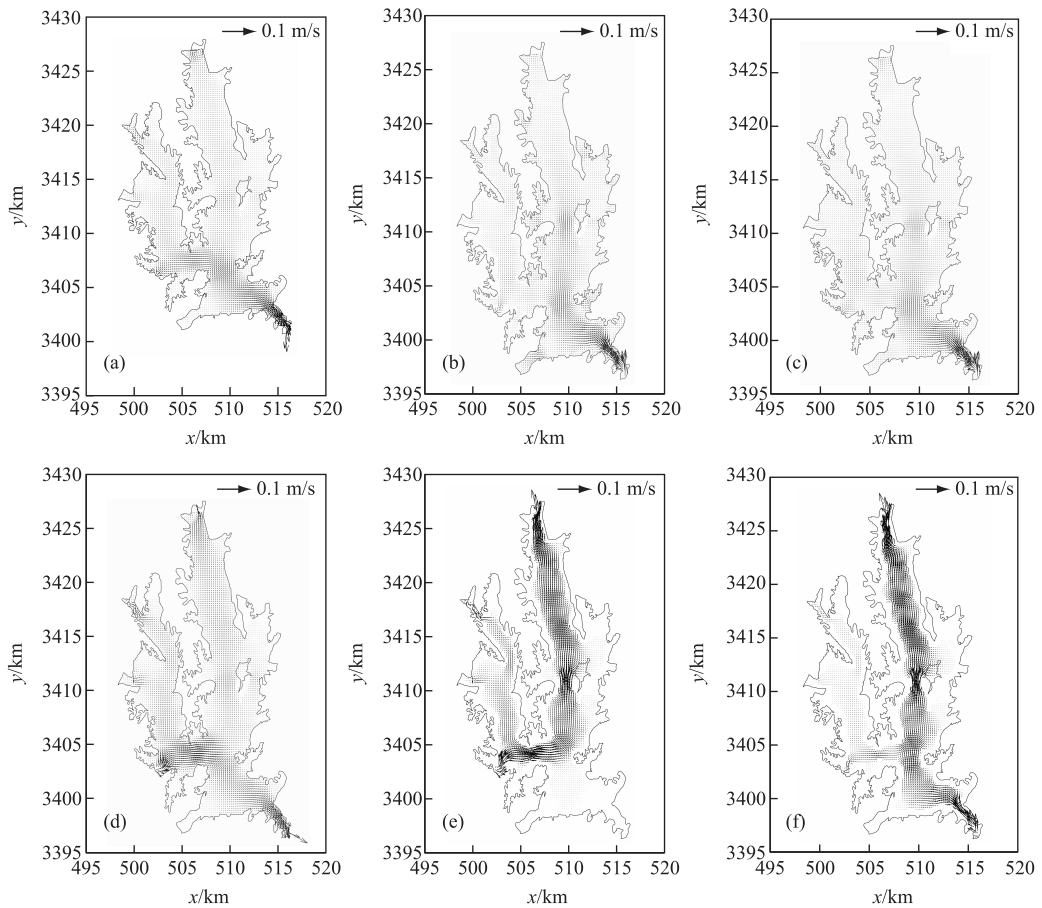


图5 方案S2丰水季(a)、S2平水季(b)、S2枯水季(c)、S3(d)、S4(e)和S5(f)下的流场
 Fig.5 The flow field under the flood season of Scenario2(a), the normal season of Scenario2(b), the dry season of Scenario2(c), Scenario3(d), Scenario4(e) and Scenario5(f)

3.4 风场对菜子湖水体水龄的影响

风应力是浅水湖泊形成环流的主要驱动力,通过对水龄的分析能更好地论证调水工程对湖泊的水质改善效应. 研究中模拟了恒定风速 5 m/s 时 8 种不同风向下(表 2 中方案 6~13)、以及强风向(东北风)下不同风速(表 2 中方案 5(0 m/s ,即无风时)、方案 7(5 m/s ,即 NE)和方案 14(2.5 m/s ,即 NE2))时菜子湖水体水龄的分布情况,计算位于 L1 湖的分析点 A 和 B、L2 湖的分析点 C 以及位于 L3 湖的分析点 D 的水龄(位置见图 1),计算结果见图 7. 模拟结果表明:在相同风速、不同方向下,东北风对整个菜子湖的水体改善最明显(湖区平均水龄为 74.26 d),西风对水体交换影响最弱(湖区平均水龄为 82.92 d),不同点位,影响效果也有差异,D 点是水龄最小的点位,且受风场影响不大(8 个风向下水龄在 $3.90\sim 4.91\text{ d}$ 之间),这表明靠近引水点区域的水体最先得到交换. 其他点位根据风场变化呈现不同差异,对于分析点 A,最大水龄为 33.25 d (东风状况),最小为 24.59 d (西风状况);对于分析点 B,最大水龄为 13.13 d (东南风状况),最小为 12.32 d (西南风状况);对于分析点 C,最大水龄为 92.10 d (东风状况),最小为 41.97 d (南风状况). 在东北风(强风向) 0.25 和 5 m/s 的风速下,菜子湖平均水龄分别为 90.46 、 83.72 和 74.26 d ,对于同一分析点,由于风向引起的水龄差值最大为 50.13 d (C 点),最小为 0.81 d (B 点),由于风速引起的水龄差别在不同湖区有不同表现,B 点、C 点和 D 点最大水龄和最小水龄相差分别为 1.47 、 13.97 和 0.17 d ;而相同风向在空间分布上不同分析点的水龄差值变化在 37.84 d (北风)~ 88.20 d (东风)之间,因此风场对水龄的时间和空间分布均具有

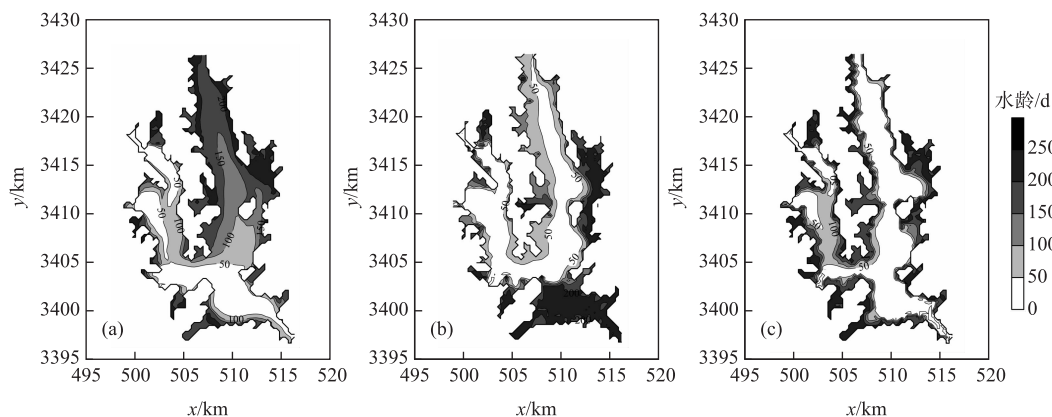


图6 菜子湖在孔城河丰水季(a)、平水季(b)和枯水季(c)模式第200天的水龄分布模拟结果

Fig.6 Simulation results (the 200th day) of water ages distributions in Lake Caizi under the scenarios of the flood season (a), the normal season (b) and the dry season (c) in Kongcheng River

重要影响. 研究表明:不同风向对菜子湖群的改善条件不同,西南风有助于 L1 湖水体交换,北风有助于 L2 湖水体交换,东风有助于 L3 湖水体交换,而当风向为东北风时,3 个湖区水龄均较小,这表明东北风是“引江济淮”工程对菜子湖水质改善最有效的风向.

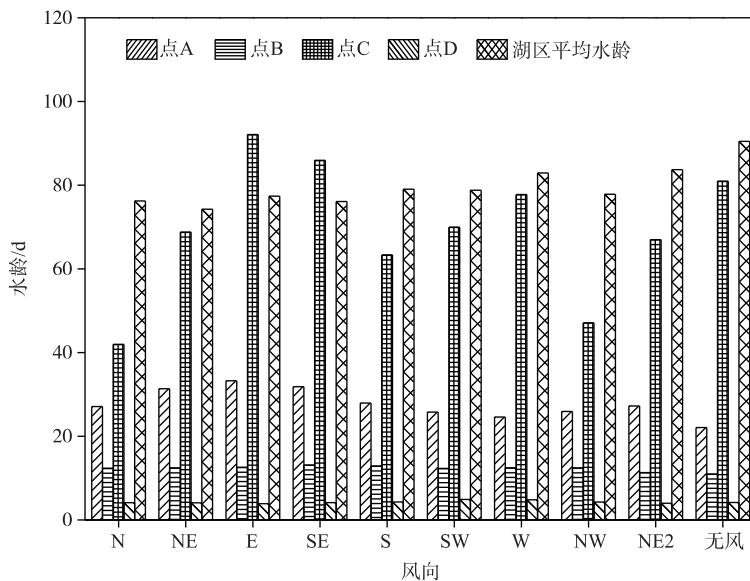


图7 菜子湖4个分析点在不同风向下的水龄对比

Fig.7 Comparison of water ages over four analysis points in Lake Caizi in response to wind directions

4 结论

基于 EFDC 数值模型,本文建立了菜子湖水动力水龄模型,研究了菜子湖水龄的季节性分布特征以及“引江济淮”工程和风场对湖泊水龄分布的影响. 菜子湖的水龄模型既反映了“四河”来水在湖区的更新速率,也反映了调入的长江水与湖体的交换程度. 模拟结果表明,风场和输水工程对菜子湖水龄的时空分布产生重要的影响:

1)菜子湖水龄有明显的季节差异. 在无风条件下,春、夏、秋、冬季的平均水龄分别为 120.93、33.19、92.92、101.48 d,而在季风作用下,春、夏、秋、冬季的平均水龄分别为 75.23、32.45、81.80、66.16 d. 水龄计算显示,夏季的水龄小于春、秋、冬季,表明夏季的水体交换速率相对较快,而春、秋、冬季的水体交换速率相对较慢,且风场在春、秋、冬季对水体交换的影响较夏季更显著.

2)“引江济淮”工程实施后,可加速 L1 湖和 L3 湖的水体交换速率,但对 L2 湖水体交换作用不明显. 此外,调水工程将显著改变 L1 湖和 L3 湖的流场,流向转变为由南向北,流速变大,L2 湖流向不变,流速略有提升.

3)“引江济淮”工程实施后,东北风可加速湖泊水体交换,湖区平均水龄为 74.26 d,西风影响较弱,湖区平均水龄为 82.92 d;同风向不同风速下,菜子湖平均水龄在 74.26~90.46 d 之间.

5 参考文献

- [1] Li FS, Han C, Lin DS *et al.* Pollution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in the sediments from lakes of Anqing City and Anqing section of Yangtze River. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, **36**(2):574-582. DOI:10.11654/jaes.2016-1325. [李法松, 韩铖, 林大松等. 安庆沿江湖泊及长江安庆段沉积物重金属污染特性及生态风险评价. 农业环境科学学报, 2017, **36**(2):574-582.]
- [2] Gu Y, Li FS, Li CX *et al.* Comprehensive evaluation of Anqing Yangtze River wetland eutrophication of lakes. *Journal of Anqing Normal University: Natural Science Edition*, 2014, **20**(4):121-124. [谷宇, 李法松, 李长霞等. 安庆沿江湿地湖泊水体富营养化综合评. 安庆师范学院学报:自然科学版, 2014, **20**(4):121-124.]
- [3] Wu DY, Zhou LZ. Genetic toxicity of *Procambarus clarkii* in two shallow eutrophic lakes along the Yangtze River in Anhui Province. *J Lake Sci*, 2012, **24**(1): 129-136. DOI: 10.18307/2012.0118. [吴东艳, 周立志. 安徽沿江两个富营养化浅水湖泊克氏原螯虾(*Procambarus clarkii*)遗传毒性比较. 湖泊科学, 2012, **24**(1):129-136.]
- [4] Gao P, Zhou ZZ, Ma SY. Vegetation distribution patten and community succession in the transition from macrophyte to phytoplankton-dominated state in shallow lakes, a case study of Lake Caizi in Anhui Province. *J Lake Sci*, 2011, **23**(1): 13-20. DOI: 10.18307/2011.0103. [高攀, 周忠泽, 马淑勇. 浅水湖泊植被分布格局及草-藻型生态系统转化过程中植物群落演替特征:安徽菜子湖案例. 湖泊科学, 2011, **23**(1):13-20.]
- [5] Gong L, Zhang LL, Zhou LZ *et al.* Bird diversity in summer in Anqing floodplain wetlands, middle-lower reaches of the Yangtze River. *J Lake Sci*, 2013, **25**(6): 872-882. DOI: 10.18307/2013.0611. [宫蕾, 张黎黎, 周立志等. 长江中下游安庆沿江湖泊湿地夏季鸟类多样性调查. 湖泊科学, 2013, **25**(6):872-882.]
- [6] Chen J, Huang W. Risk and countermeasures of across river basins and long distance water transfer project. *China Water Resources*, 2006, (14): 11-14. [陈进, 黄薇. 跨流域长距离调水工程的风险及对策. 中国水利, 2006, (14): 11-14.]
- [7] Li YP, Acharya K, Yu ZB. Modeling impacts of Yangze River water transfer on water ages in Lake Taihu, China. *Ecological Engineering*, 2011, **37**(2): 325-334. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2010.11.024.
- [8] Huang CL, Li X, Sun YY. Water age distribution of the Lake Taihu and impact of the Yangtze River to Lake Taihu Water Transfer Project on the water age. *J Lake Sci*, 2017, **29**(1): 22-31. DOI: 10.18307/2017.0103. [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. 湖泊科学, 2017, **29**(1): 22-31.]
- [9] Xiong HB, Zhang SS, Kuang W *et al.* Environment capacity of the Guohe River in the Water Transfer Project from Yangtze River to Huaihe River based on a MIKE 11 model. *Journal of Natural Resources*, 2017, **32**(8): 1422-1432. DOI: 10.11849/zrzyxb.20160781. [熊鸿斌, 张斯思, 匡武等. 基于 MIKE11 模型的引江济淮工程涡河段动态水环境容量研究. 自然资源学报, 2017, **32**(8):1422-1432.]
- [10] Yang QQ, Wu SQ, Dai JY *et al.* Effects of short-term water diversion in summer on water quality and algae in Gonghu Bay, Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2018, **30**(1): 34-43. DOI: 10.18307/2018.0104. [杨倩倩, 吴时强, 戴江玉等. 夏季短期调水对太湖贡湾湖区水质及藻类的影响. 湖泊科学, 2018, **30**(1):34-43.]
- [11] Liu XH, Zhao XX, Gao P *et al.* Annual dynamics of phytoplankton abundance and community structure (2010) in Lake Caizi, Anhui Province. *J Lake Sci*, 2012, **24**(5): 771-779. DOI: 10.18307/2012.0519. [刘雪花, 赵秀侠, 高攀等. 安徽菜子湖浮游植物群落结构的周年变化(2010 年). 湖泊科学, 2012, **24**(5):771-779.]
- [12] Xu XX, Zhou LZ, Zhu WZ *et al.* Community structure of macrozoobenthos in Caizi Lake, China. *Acta Ecologica Sinica*,

- 2011, **31**(4): 943-953. [徐小雨, 周立志, 朱文中等. 安徽菜子湖大型底栖动物的群落结构特征. 生态学报, 2011, **31**(4): 943-953.]
- [13] Gao P. Plant community structure and ecological adaptation of dominant species in wetland of Caizi lake in Anhui Province [Dissertation]. Hefei: Anhui University, 2011. [高攀. 安徽菜子湖湿地植物群落结构特征及优势种生态适应性研究 [学位论文]. 合肥: 安徽大学, 2011.]
- [14] Qin BQ, Hu WP, Gao G *et al.* Dynamic mechanism of suspended sediment in Lake Taihu and conceptual model of endogenous release. *Chinese Science Bulletin*, 2003, **48**(17): 1822-1831. [秦伯强, 胡维平, 高光等. 太湖沉积物悬浮的动力机制及内源释放的概念性模式. 科学通报, 2003, **48**(17): 1822-1831.]
- [15] Bolin B, Rodhe H. A note on the concepts of age distribution and transit time in natural reservoirs. *Tellus*, 1973, **25**(1): 58-62.
- [16] Takeoka H. Fundamental concepts of exchange and transport time scales in a coastal sea. *Continental Shelf Research*, 1984, **3**(3): 311-326.
- [17] Pan J. Study on air environment capacity in Anqing City [Dissertation]. Hefei: Hefei University of Technology, 2008. [潘静. 安庆市大气环境容量研究 [学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2008.]
- [18] Hamrick JM ed. A Three-dimensional environmental fluid dynamics computer code; theoretical and computational aspects. Virginia: Virginia Institute of Marine Science, College of William and Mary, 1992: 63-64.
- [19] Ji ZG ed. Hydrodynamics and water quality. Beijing: Ocean Press, 2012: 321-323. [季振刚. 水动力学和水质. 北京: 海洋出版社, 2012: 321-323.]
- [20] Li XW, Shen YM. Numerical simulation of the impacts of water level variation on water age in Dahuofang Reservoir. *Frontiers in Earth Science*, 2015, **9**(2): 209-224.
- [21] Yangtze River Water Resources Protection Institute. The environmental impacts report of Water Diversion Project from Yangtze River to Huai River. 2016: 1070. [长江水资源保护科学研究所. 引江济淮工程环境影响报告书. 2016: 1070.]