

风场和吞吐流对洪泽湖流场的影响分析

刘翊竣, 徐国宾

(天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300354)

摘要: 采用 MIKE21 建立洪泽湖二维水动力数学模型, 通过对模型参数的率定, 使得模型的计算结果能较好地与实测值相符合, 进而研究了不同风场和吞吐流条件下的洪泽湖水动力特性, 比较了 2013 年洪泽湖在 5、10 m/s 风速和无风条件下的流场。结果表明: 风速会改变流场强度的大小而不会改变流场结构; 同时, 风场的作用会影响洪泽湖的出流能力, 湖区流速随风速的增加呈减小的趋势。吞吐流是影响洪泽湖流场的主要因素, 采用 2007 洪水年进行模拟时, 进出口湖区流场会发生明显改变。洪泽湖的溧河洼区和成子湖区流场结构主要由风场决定, 而南部湖区和东部湖区流场结构由风场和吞吐流共同决定, 且以吞吐流为主。研究结果可以为洪泽湖物质输移规律研究提供理论基础。

关键词: 水动力特性; MIKE21; 风场; 吞吐流; 流场; 洪泽湖

中图分类号: TV131.2; P343.3

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2020)02-0174-05

Effects of wind field and throughput flow on the flow field of Hongze Lake

LIU Yijun, XU Guobin

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300354, China)

Abstract: MIKE21 was used to establish a two-dimensional hydrodynamic mathematical model of Hongze Lake. By calibrating the model parameters, the calculated results of the model agreed well with the measured values, and then the hydrodynamic characteristics of Hongze Lake under different wind fields and throughput flow conditions were studied. We compared the flow field of Hongze Lake in 2013 under the wind speed of 0 m/s, 5 m/s and 10 m/s, respectively. The results showed that the wind speed would change the intensity of the flow field but not the structure of the flow field. In addition, the effect of wind field would affect the outflow capacity of Hongze Lake, and the flow velocity of the lake area decreased with the increase of the wind speed. The throughput flow was the main factor affecting the flow field of Hongze Lake. The flow field of the inlet and outlet lakes changed significantly when the 2007 flood was used for simulation. The flow field structures in the Li River Basin and Chengzi Lake area of Hongze Lake were mainly determined by the wind field, whereas the flow field structures in the southern and eastern lakes were determined by both the wind field and the throughput flow, with the latter as the dominant factor. The results can provide a theoretical basis for the study of the material transport law in Hongze Lake.

Key words: hydrodynamic characteristics; MIKE21; wind field; throughput flow; flow field; Hongze Lake

1 研究背景

大中型天然湖泊水动力过程是湖体内污染物迁移、转化和生态环境演变的关键因素, 它与湖泊本身的几何特征、风场、吞吐流等物理参数有关。其中, 风

场决定着湖泊的湖流形态、环流结构及湖流流速大小^[1-4]。吞吐流是指由河湖水量交换造成水面倾斜作用而产生的湖流现象, 会对湖泊污染物质扩散、迁移、泥沙冲刷变化产生影响^[5-6]。本文将探究不同强度风场和吞吐流作用对洪泽湖流场的影响。

收稿日期: 2019-10-11; 修回日期: 2019-12-18

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFC0405602)

作者简介: 刘翊竣 (1994-), 男, 天津人, 硕士研究生, 研究方向为河流动力学及河床演变。

通讯作者: 徐国宾 (1956-), 男, 河北石家庄人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为河流动力学及河床演变。

目前对于大中型湖泊的水动力特性和流场分布已有大量的研究成果,潘思怡^[7]、吴青^[8]、林玉茹^[9]对鄱阳湖水流特性进行了系统研究,认为枯水时期对湖区水流流速和流向影响最大,平水时期次之,丰水时期影响最小;高峰^[10]对浅水湖泊水动力特性进行了研究,认为风的作用与湖流流速有着密切连系,能改变湖泊环流结构,而吞吐流对环流结构影响不大,仅仅对进出水口附近区域的水流流态有一定影响;张华杰^[11]对太湖流场及水动力特性进行了研究,通过大量数值模拟试验,模拟了不同风力、不同湖泊水位的湖泊水动力学特性,分析了湖泊在自然风力因素与人为因素下的流场分布规律。到目前为止,对于洪泽湖流场的分析和模拟比较少,只有姜加虎等^[12-14]对洪泽湖的混合流和风生流进行了模拟,他指出洪泽湖南部湖区是受其吞吐流影响最大的湖区;成子湖湾是受风生流作用最强的湖区,吞吐流作用初期,以河口扩散流形式进入开敞湖区,进入速度取决于出入湖流量的大小。有关洪泽湖不同风速和吞吐流强度下的流场分布的研究更少。随着数值模拟技术的发展,许多计算软件在研究水动力特性方面得到了广泛的应用。朱世云等^[15]基于 MIKE21 FM 模型对洞庭湖区平原城市洪水演进进行了模拟;路洪涛等^[16]基于 MIKE21 对城市湖泊人工水循环流场数值模拟做了研究;赵正文等^[17]、韩红娟等^[18]对不同湖泊的流场结构进行了数值模拟。

本文基于 MIKE21 建立洪泽湖水动力模型,首先对洪泽湖二维水动力模型进行了参数的校准与验证,其次对不同风场下的流场结构和流速进行了对比分析,最后改变出入湖流量进而研究吞吐流对洪泽湖流场的影响。

2 洪泽湖水动力模型计算条件及验证

洪泽湖位于淮河中游、江苏省洪泽区西部,是我国五大淡水湖之一,是“南水北调”工程东线过水通道组成部分。在正常湖水位 12.5 m 时,水面面积为 1 597 km²,平均水深 1.9 m。淮河是其最大的入湖河流,是洪泽湖水量补给的主要来源,占总入湖水量的 80% 以上。出湖通道中入江水道为主要的泄洪道,湖水 60% ~ 70% 由入江水道的三河闸下泄。湖区汛期盛行 SE 风。湖区分分为溧河洼区、南部湖区、东部湖区和成子湖区。洪泽湖区间构成及空间区域分布见图 1。

2.1 模型的计算范围及参数的选取

2.1.1 模型范围选定 洪泽湖主要有 7 条入湖通

道,以淮河干流为主,同时有新濉河、老濉河、徐洪河、新汴河、怀洪新河、池河 6 条支流分布在淮河两侧。主要有 4 条出湖通道,包括淮河入江水道、入海水道、苏北灌溉总渠和分淮入沂工程^[19]。

模型计算范围由淮河干流和 6 条支流以及整个洪泽湖区间构成,如图 1 所示。对于洪泽湖的模拟选取淮河干流为主要入湖进口,设置为开边界并给定龟山实测流量过程,其他支流包括怀洪新河、新汴河、新濉河、老濉河和徐洪河以集中旁侧入流方式作为源项给定实测流量过程;选取三河闸作为洪泽湖出口,设置成开边界并给定三河闸实测水位过程,其他出口包括入海水道、苏北总灌渠、分淮入沂以旁侧出流方式作为汇项给定实测流量过程。

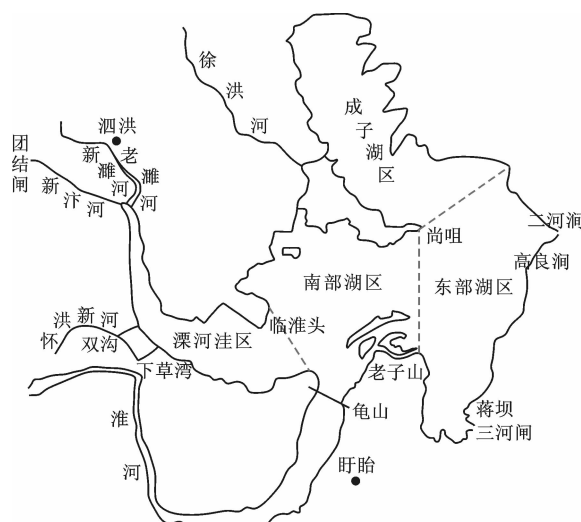


图1 洪泽湖区间构成及空间区域分布图

2.1.2 计算水文条件 由于所采用的洪泽湖地形资料是 2013 年实测地形,因此选取 2013 年汛期作为计算时段,计算期为 2013 年 6 月 29 日 08:00:00 - 2013 年 8 月 24 日 08:00:00。

2.1.3 风场资料 经查阅相关资料可知,洪泽湖区汛期盛行风为东南风,风级一般在 2 ~ 4 级,相当于风速 1 ~ 3 m/s。由于洪泽湖湖区范围较大,实测风场资料难以收集,因而本次计算采用定常风速 2 m/s,风向为东南。

2.2 模型参数选取

2.2.1 计算时空步长 洪泽湖二维模型采用非结构三角形网格,空间步长一般取 300 ~ 500 m,在淮河干流入湖口和三河闸出口地区进行局部加密,加密地区空间步长取 100 ~ 200 m;模型共有 25 974 个网格节点,50 643 个计算单元,网格布置如图 2 所示。为满足模型稳定性和计算精度的要求,同时受限于柯朗条件该模型计算时间步长选取 60 s。

2.2.2 糙率、涡黏系数和风阻力系数 洪泽湖湖区糙率一般取 0.020 ~ 0.022, 本文计算选取糙率为 0.020。涡黏系数根据 Smagorinsky 公式确定, 该模型计算取 0.28。该模型风阻力系数 c_d 由经验公式 (1) 得到^[20]。

$$c_d = \begin{cases} c_a & (w_{10} < w_a) \\ \frac{c_b - c_a}{w_b - w_a}(w_{10} - w_a) & (w_a \leq w_{10} \leq w_b) \\ c_b & (w_{10} > w_b) \end{cases} \quad (1)$$

式中: w_{10} 为距地 10 m 高程处的实测风速, m/s; w_a 、

w_b 为界限风速值, $w_a = 7$ m/s, $w_b = 25$ m/s; c_a 、 c_b 为界限风速所对应的风阻力系数值, $c_a = 1.255 \times 10^{-3}$, $c_b = 2.425 \times 10^{-3}$ 。

2.3 模型的验证

利用 2013 年临淮头和高良涧测站的实测水位资料作为校准资料, 将模型计算出的各测站水位值和实测值进行对比, 如图 3 所示。从图 3 中可以看出, 临淮头和高良涧测站的计算水位过程线与实测水位过程线符合较好, 说明该模型可以用于洪泽湖的水动力模拟。

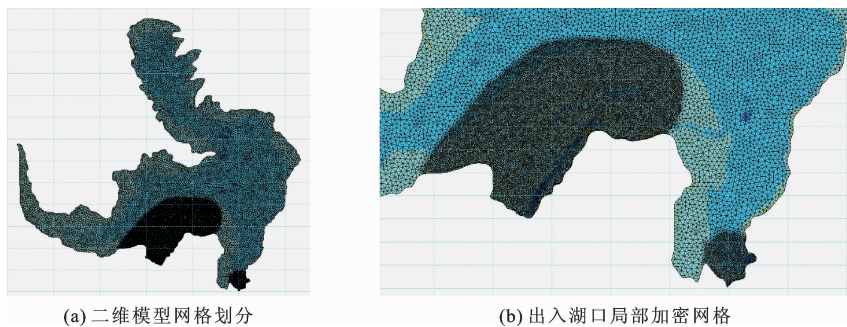


图 2 洪泽湖水动力二维模型网格划分

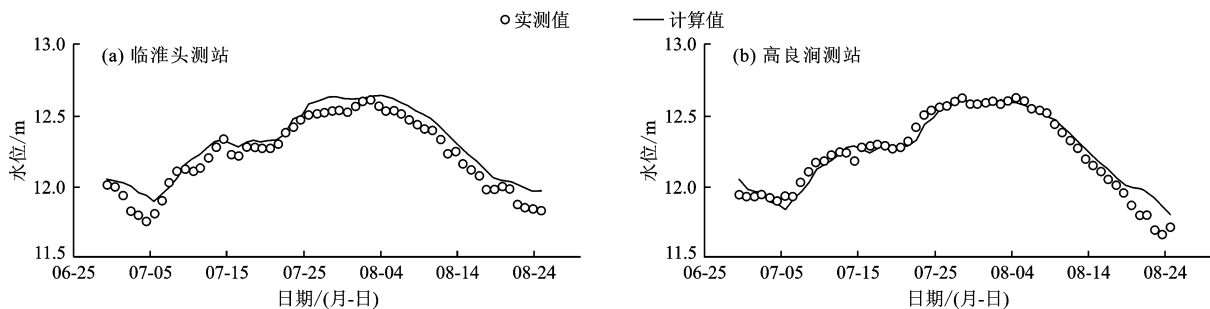


图 3 2013 年临淮头和高良涧测站水位实测值与计算值对比

3 风场和吞吐流对洪泽湖流场的影响

3.1 风场对洪泽湖流场的影响

大中型天然湖泊具有湖水浅、湖面大的特征, 导致水动力过程复杂多变。风是湖流运动的主要驱动力, 环流形态和方向以及湖流流速大小由湖区风速及风向共同决定。洪泽湖汛期盛行风为东南风, 本文基于上述模型, 以淮河入湖口为开边界并给定 2013 年实测流量过程, 以三河闸出口为开边界并给定 2013 年实测水位过程, 其余出入口均以源汇给定实测流量过程, 模拟了 5、10 m/s 风速和无风作用下洪泽湖流场分布。

洪泽湖各湖区在 5、10 m/s 风速和无风作用下的流场分布分别如图 4 ~ 7 所示。由图 4 ~ 7 的数值模拟结果中可以看出, 在 5 m/s 风速作用下溧河洼湖区水流运动比较微弱, 其中 A 区域有逆向环流存

在, 而南部湖区水流运动显著, 在 B 区域同样有逆向环流存在, A、B 两处距淮河入湖口较远且无支流汇入, 湖区的东南风是形成逆向环流的主要因素, 且环流主要位于湖边凸岸; 东部湖区水流运动显著, 湖区内 C 区域有明显的逆向环流存在, 此环流是在吞吐流和风场作用下共同形成的; 成子湖区水流运动也较为显著, 其中 D 区域有逆向环流存在, 该区域靠近湖岸, 受风场作用明显, 而 E 区域有带状环流存在, 靠近湖区两岸的水流流向为西北向而湖区中央水流流向为东南向, 即湖区两岸和中央的水流流向呈相反趋势, 成子湖区只有徐洪河一条支流汇入, 可知风场是决定该区域流场结构的主导因素。在 10 m/s 的风场作用下各个湖区的流场结构与 5 m/s 风场作用下的流场结构相似, 在环流强度上有所增加, 而在无风条件下整个湖区的流场结构以吞吐流

的形式为主,各个湖区的环流结构变得很微弱,尤其是成子湖的E区域,几乎为静止的水面。湖区的流场分布决定了水流运动形式,从而影响到污染物的迁移,尤其是在环流结构显著和流速较小的区域容易聚集污染物。

在流速方面,当无风时湖区流速约为 $0.15 \sim 0.3 \text{ m/s}$, 5 m/s 风速时湖区流速约为 $0 \sim 0.15 \text{ m/s}$, 10 m/s 风速时湖区流速约为 $0 \sim 0.1 \text{ m/s}$,可以看到

随着风速的增加,各个湖区的流速呈现减小的趋势,这是因为汛期洪泽湖湖区盛行风为东南向与出入湖水流流向呈相反的方向,风场作用抑制了洪泽湖的出流。通过对比分析,可知风场是影响洪泽湖湖区流场结构的重要因素,各个湖区存在的逆向环流大部分是在风的作用下而形成,而且风速大小决定了环流强度。除此之外,盛行风会抑制洪泽湖的出流,且风速越大抑制作用越明显。

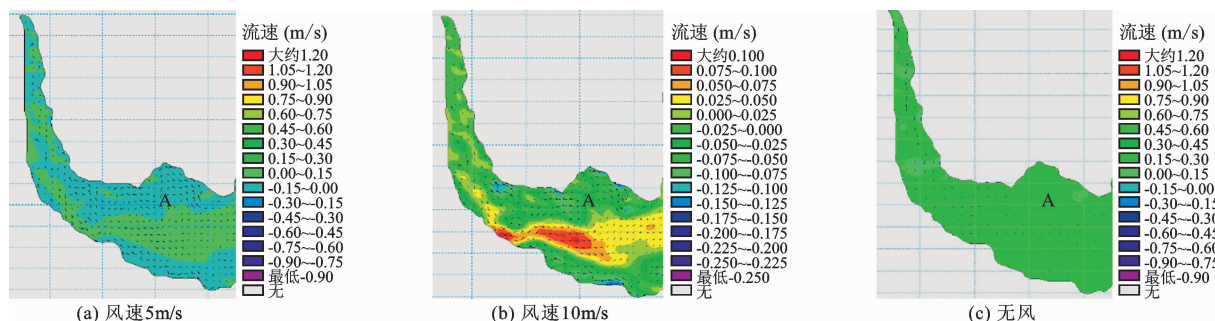


图4 不同风速下洪泽湖溧河洼区水流场分布图

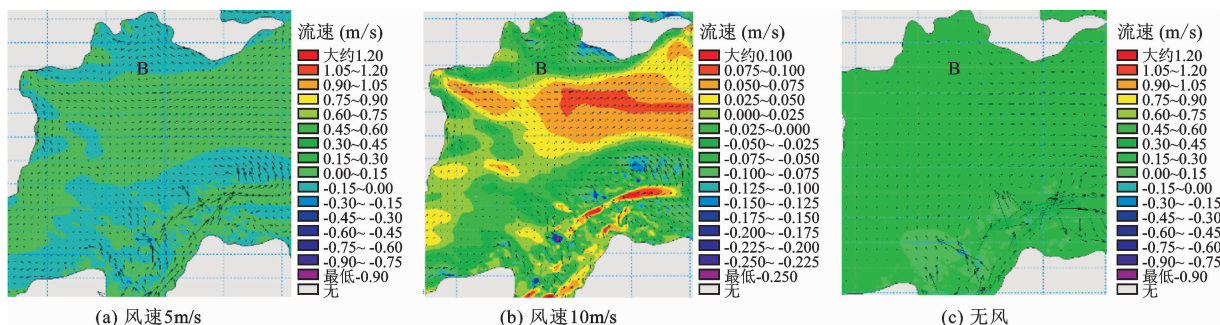


图5 不同风速下洪泽湖南部湖区水流场分布图

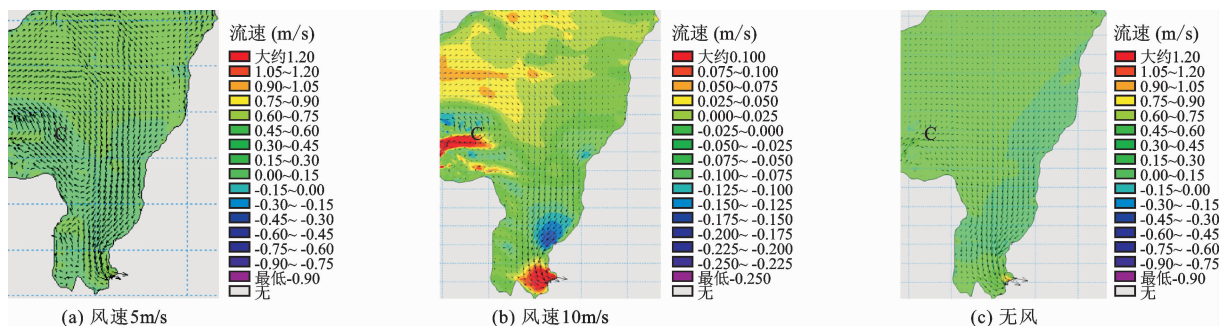


图6 不同风速下洪泽湖东部湖区水流场分布图

3.2 吞吐流对流场的影响

吞吐流是湖泊中湖水运动的主要形式之一^[8-10]。为了研究吞吐流对洪泽湖流场结构的影响,选取淮河流域2007年洪水年的水文资料作为模型的出入湖边界,在淮河入湖口给定2007年实测流量过程,三河闸出口给定2007年实测水位过程,其余各出入口均以源汇项给定2007年实测流量过程,

相比2013年加大了吞吐流的流量,同时给定 5 m/s 风场,其计算结果如图8所示,与2013年流场模拟图(图4~7)对比发现:溧河洼A区域和成子湖D、E区域的流场结构与2013年基本相同,仍存在相似的逆向环流;而在南部湖区的B区域逆向环流减弱,仅在湖岸周边有微弱的流场存在;东部湖区的C区域逆向环流基本消失,但是吞吐流作用加强。由此

可知溧河洼湖区和成子湖区的流场结构主要受风场影响,南部湖区和东部湖区的流场结构受风场和吞吐流共同影响,且吞吐流为主导因素。加大吞吐流

量后,流速也随之增大,由原来的 $0 \sim 0.15 \text{ m/s}$ 增至 $0 \sim 0.6 \text{ m/s}$,尤其是三河闸出口处流速增长最大,流速峰值可达到 1.8 m/s 。

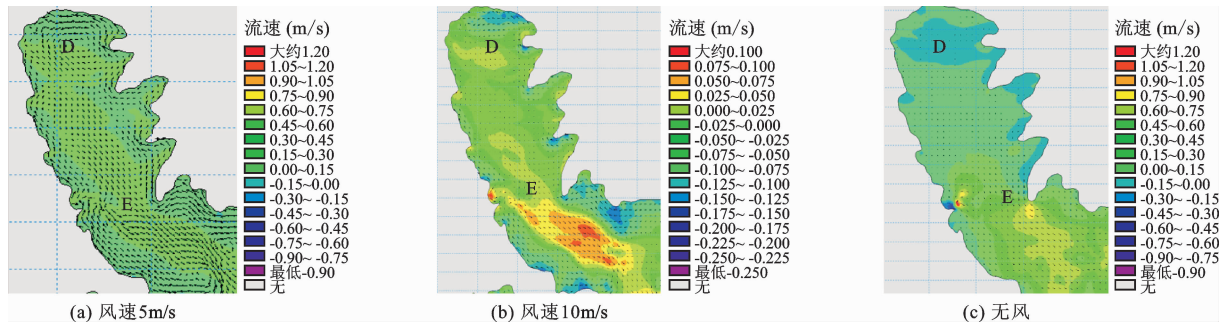


图7 不同风速下洪泽湖成子湖区水流流场分布图

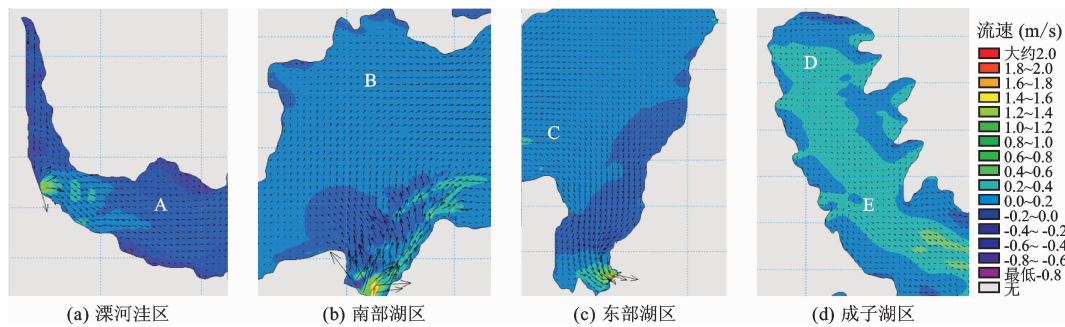


图8 2007年5 m/s 风速下洪泽湖各湖区流场分布图

4 结 论

本文采用 MIKE21 建立了洪泽湖二维水动力模型,通过对模型参数进行校准,模型可以较好地对洪泽湖进行数值模拟,进而借助该模型展开了不同强度风场和吞吐流作用下的洪泽湖流场变化分析,得到以下主要结论:

(1) 大型浅水湖泊的流场结构是决定污染物迁移过程、水体交换频率和水环境质量的重要条件,本文所展开的研究可以为洪泽湖水生态环境提供相应流场分布情况。

(2) 风是影响洪泽湖流场结构的重要因素,风速的大小对洪泽湖区的环流结构影响较小,但对环流强度影响较大,即风速越大,则环流强度越大,而且由风形成的逆向环流多存在于凸岸。同时,风场的作用会影响洪泽湖的出流能力,湖区流速随风速的增加呈减小的趋势。

(3) 吞吐流是影响洪泽湖流场结构的主要因素,吞吐流是湖泊水流的主要驱动力且吞吐流对出入口局部水域水流流态有较大影响。

(4) 洪泽湖的溧河洼区和成子湖区的流场结构主要由风场决定,而南部湖区和东部湖区的流场结

构由风场和吞吐流共同决定且以吞吐流为主。

参考文献:

- [1] 李一平,唐春燕,余钟波,等. 大型浅水湖泊水动力模型不确定性和敏感性分析[J]. 水科学进展, 2012, 23(2): 271-277.
- [2] 张小稳,刘国庆,范子武. 基于水动力-水质同步原型观测的城市生态补水方案研究[J]. 水资源开发与管理, 2019(4): 31-36.
- [3] 胡开明,逢勇,王华,等. 大型浅水湖泊水环境容量计算研究[J]. 水力发电学报, 2011, 30(4): 135-141.
- [4] 龚然,徐进,徐力刚,等. 基于 EFDC 城市景观湖泊水动力模拟研究[J]. 环境工程, 2015, 33(4): 58-62+91.
- [5] 姜恒志,崔雷,石峰,等. 风场、地形和吞吐流对太湖流场影响的研究[J]. 水力发电学报, 2013, 32(6): 165-171.
- [6] 姜恒志. 近海与湖泊三维水动力及物质运输的数值模拟研究和应用[D]. 大连:大连理工大学, 2011.
- [7] 潘思怡. 基于 EFDC 模型的鄱阳湖水利枢纽工程对湖泊流场的影响分析[D]. 南昌:江西师范大学, 2017.
- [8] 吴青. 鄱阳湖水利枢纽工程对湖泊水面的影响研究[D]. 南昌:江西师范大学, 2017.
- [9] 林玉茹. 鄱阳湖水流特性与水环境特征研究[D]. 武汉:武汉大学, 2014.

(下转第 184 页)

- 热可行性研究[J]. 中外公路, 2013, 33(3): 237-239.
- [5] 习安, 刘湘龙, 姚佳良. 钢纤维混凝土劈裂强度与弯拉强度之间的回归分析[J]. 公路工程, 2013, 38(5): 112-114.
- [6] 饶志鹏, 何亮, 李冠男, 等. 沥青材料电磁感应加热自修复技术研究[J]. 公路, 2019, 64(6): 203-213.
- [7] 康爱红, 肖鹏, 马爱群. 微波辐射废胶粉改性沥青及混合料性能研究[J]. 公路, 2007(2): 138-142.
- [8] 汤寄予, 高丹盈, 赵军. 钢纤维沥青混凝土裂缝自愈能力试验研究[J]. 公路, 2015, 60(12): 221-227.
- [9] GALLEGO J, VAL M A D, CONTRERAS V, et al. Heating asphalt mixtures with microwaves to promote self-healing[J]. Construction and Building Materials, 2013, 42, 1-4.
- [10] GONZÁLEZ A, VALDERRAMA J, NORAMBUENA-CONTRERAS J. Microwave crack healing on conventional and modified asphalt mixtures with different additives: An experimental approach[J]. Road Materials and Pavement Design, 2019, 20: 149-162.
- [11] LIU Wei, WANG Shengyue, GU Xingyu. Improving microwave heating efficiency of asphalt concrete by increasing surface magnetic loss of aggregates[J]. Road Materials and Pavement Design, 2018: 1-15.
- [12] GAO Jie, SHA Aimin, WANG Zhenjun, et al. Utilization of steel slag as aggregate in asphalt mixtures for microwave deicing[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 152: 429-442.
- [13] NORAMBUENA-CONTRERAS J, GONZALEZ A, CONCHA J L, et al. Effect of metallic waste addition on the electrical, thermophysical and microwave crack-healing properties of asphalt mixtures[J]. Construction and Building Materials, 2018, 187(30): 1039-1050.
- [14] WANG Zhenjun, PENG Zhao, AI Tao, et al. Microwave absorbing characteristics of asphalt mixes with carbonyl iron powder[J]. Progress in Electromagnetics Research M, 2011, 19: 197-208.
- [15] 高海涛, 王建江, 赵志宁, 等. 铁氧体吸波材料吸波性能影响因素研究进展[J]. 磁性材料及器件, 2014, 45(1): 68-73.
- [16] YOSHIKAWA N. Fundamentals and applications of microwave heating of metals[J]. Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy, 2010, 44(1): 4-13.
- [17] FRANESQUI M A, YEPES J, GARCÍA-GONZÁLEZ C. Top-down cracking self-healing of asphalt pavements with steel filler from industrial waste applying microwaves[J]. Construction and Building Materials, 2017, 149: 612-620.
- [18] 孙建勋. 不同类型废金属纤维沥青混合料的性能[J]. 筑路机械与施工机械化, 2018, 35(10): 60-63.
- [19] 周朝刚, 艾立群, 吕岩, 等. 微波加热对钢渣升温特性的影响[J]. 河北理工大学学报(自然科学版), 2011, 33(3): 25-30.
- [20] 何亮, 赵龙, 凌天清, 等. 密实型沥青混合料裂缝感应热自愈合性能研究[J]. 中国公路学报, 2017, 30(1): 17-24.
- [21] 孙吉书, 许宁乾, 李猛. 掺钢渣 SBS 改性沥青混凝土自修复性能研究[J]. 公路工程, 2018, 43(3): 202-206+251.
- [22] 何振晖. 微波加热对沥青混合料性能影响分析[J]. 淮南职业技术学院学报, 2019, 4(19): 4-6.

(上接第 178 页)

- [10] 高峰. 浅水湖泊水动力特性与富营养化机理及调控措施研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2017.
- [11] 张华杰. 湖泊流场数学模型及水动力特性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2014.
- [12] 姜加虎, 黄群. 洪泽湖吞吐流二维数值模拟[J]. 湖泊科学, 1997, 9(1): 9-14.
- [13] 姜加虎, 黄群. 洪泽湖混合流数值模拟[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 1998, 13(2): 147-151.
- [14] 姜加虎. 贡湖及其相关水域风生流模拟研究[J]. 海洋湖沼通报, 1997(4): 1-7.
- [15] 朱世云, 于永强, 俞芳琴, 等. 基于 MIKE21 FM 模型的洞庭湖区平原城市洪水演进模拟[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(2): 132-138.
- [16] 路洪涛, 路洪波, 刘金光. 基于 MIKE21 的城市湖泊人工水循环流场数值模拟[J]. 环保科技, 2013, 19(2): 44-48.
- [17] 赵正文, 冯民权, 高峰. 风场和吞吐流对狭长型雁鸣湖流场的影响[J]. 水电能源科学, 2018, 36(12): 9-12.
- [18] 韩红娟, 胡维平, 晋义泉. 吞吐流量对湖泊流场结构影响的数值试验[J]. 海洋湖沼通报, 2007(S1): 37-46.
- [19] 虞邦义, 倪晋, 杨兴菊, 等. 淮河干流浮山至洪泽湖出口段水动力数学模型研究[J]. 水利水电技术, 2011, 42(8): 38-42.
- [20] WU Jin. Wind-stress coefficients over sea surface and near-neutral condition - A revisit[J]. Journal of Physical Oceanography, 1980, 10(5): 727-740.