暴雨灾害
Torrential Rain and Disasters
中国科技核心期刊
中国科技论文统计源期刊

武汉市后官湖局地气候效应的数值模拟研究

杨培强 陈炜 艾泽 王祉苏

Numerical simulation study on local climate effects of Houguan Lake in Wuhan

YANG Peiqiang，CHEN Wei，AI Ze，WANG Zhisu

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2023-272

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

盛夏苏北地区一次飑线过程的数值模拟研究

Numerical simulation and study of a squall in the north of Jiangsu in midsummer

暴雨灾害. 2022, 41(1): 15-23 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2022.01.002

基于有效降雨的武汉市地质灾害易发性动态评估方法及其应用

A dynamic assessment method of geological disaster susceptibility and its application based on effective rainfall in Wuhan City

暴雨灾害. 2024, 43(5): 572-579 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-059

武汉市暴雨的雨峰和历时及其排水防涝的分析

Analysis of rainfall peak and duration of rainstorm for drainage and waterlogging prevention in Wuhan

暴雨灾害. 2020, 39(5): 532-538 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2020.05.012

雷达资料同化对一次飑线过程的次公里尺度数值模拟影响研究

Impact of radar data assimilation on sub-kilometer-scale numerical simulation of a squall line

暴雨灾害. 2023, 42(2): 188-199 https://doi.org/10.12406/byzh.2022-084

大气冰核浓度对华北一次大范围强降水影响的模拟分析

A numerical study of the effects of varing ice nuclei concentration on severe precipitation of a large area in north China

暴雨灾害. 2022, 41(4): 413-425 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2022.04.006

湖北一次梅雨期暴雨过程的数值模拟及云微物理特征分析

Numerical simulation and analysis on cloud microphysical characteristics during a Meiyu heavy rainfall event in Hubei province

暴雨灾害. 2023, 42(4): 372-383 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-062

关注微信公众号，获得更多资讯信息

杨培强,陈炜,艾泽,等.2025.武汉市后官湖局地气候效应的数值模拟研究[J].暴雨灾害,44(1):82−92. YANG Peiqiang, CHEN Wei, AI Ze, et al. 2025. Numerical simulation study on local climate effects of Houguan Lake in Wuhan [J]. Torrential Rain and Disasters,44(1):82−92 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023−272

武汉市后官湖局地气候效应的数值模拟研究

杨培强[1], 陈炜[2], 艾泽[3], 王祉苏[4]

(1. 武汉市蔡甸区气象局, 武汉 430100; 2. 中国民用航空中南地区空中交通管理局湖北分局, 武汉 430300;
3. 湖北省气象服务中心, 武汉 430074; 4. 湖北省黄冈市气象局, 黄冈 438000)

摘　要: 城市内湖对城市生态和人居环境作用显著, 为研究武汉市内湖泊的局地气候效应, 基于武汉市后官湖周边国家站 2013—2022 年观测资料和 NCEP/FNL 再分析资料, 利用 WRF 数值模式开展冬、夏季典型月 (2013 年 1 月、7 月) 后官湖水体对湖区及周边地区地面要素的敏感实验并分析了可能影响机制。结果表明: (1) 冬季典型月后官湖增温作用显著, 夏季典型月则呈现弱增温作用。白天后官湖表现为冷湖效应, 夜间表现为暖湖效应, 日高温的降低和日低温的升高导致昼夜温差减小。(2) 后官湖对湖区的平均风速和平均日极大风速均有增大作用, 冬季典型月后官湖对湖区与下风向区域平均风速和平均日极大风速的增大量和增大区域明显大于夏季典型月。(3) 后官湖在冬、夏两季典型月均有一定的“湿岛效应”, 相对湿度随湖泊边界距离的增加而下降。而后官湖对湖区及周边地区降水量的影响很小。(4) 湖泊与陆地的气温差异导致湖区风向发生昼夜转变。后官湖东南部湖体更大, 对温度、风速、相对湿度影响的强度和范围更大。冬季典型月后官湖受偏北气流作用, 对湖体南岸的气温、相对湿度的影响更显著, 夏季典型月该特征反之。

关键词: 局地气候效应; 数值模拟; 武汉市; 后官湖

中图法分类号: P461^{+}.5　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2023−272

Numerical simulation study on local climate effects of Houguan Lake in Wuhan

YANG Peiqiang[1], CHEN Wei[2], AI Ze[3], WANG Zhisu[4]

(1. *Caidian Meteorological Service*, *Wuhan* 430100; 2. *Hubei Branch*, *Air Traffic Management Bureau of Middle & Southern Region*, *CAAC*, *Wuhan* 430300; 3. *Hubei Provincial Meteorological Service Center*, *Wuhan* 430074;
4. *Huanggang Meteorological Service of Hubei Province*, *Huanggang* 438000)

Abstract: The roles of urban inner lakes in changing the urban ecology and human living environment are significant. To study the local climate effects of lakes in Wuhan, the routine observation data of national stations around Wuhan Houguan Lake and the NCEP/FNL reanalysis data during 2013 to 2022 were used in this study. The WRF numerical model was applied to investigate the possible mechanisms of the impact of Houguan Lake on the surface meteorological elements in the lake area and the surrounding areas during the typical winter and summer months (January and July 2013) separately. The results are as follows. (1) In the typical winter month, the warming effect of Houguan Lake is significant, while in the typical summer month, the warming effect is weak. The Houguan Lake shows a cold lake effect during the daytime while a warm lake effect at night. The decrease in the daily highest temperature and the increase in the daily lowest temperature leads to a decrease in the diurnal temperature difference. (2) Both the average wind speed and average daily maximum wind speed in the lake area are increased by Houguan Lake. In the typical winter month, the region and magnitude of the average wind speed and daily maximum wind speed in the Houguan Lake area and downwind area increase significantly more than that in the typical summer month. (3) There is a limited "wet island effect" in Houguan Lake in both the typical winter and summer months. The relative humidity decreases with the increasing distance from the lake boundary. Houguan Lake has a small impact on precipitation in the lake area and surrounding areas. (4) The temperature difference between the lake and the land leads to the diurnal shift of the wind direction in the lake area. The southeastern part of the lake is relatively larger and has a greater intensity and range of impact on temperature, wind speed, and relative humidity. In the typical winter month, Houguan Lake is affected by northerly airflow, which has a more significant impact on the temperature and relative humidity on the south shore of the lake. However, this feature is reversed in the

收稿日期: 2023−12−18; **定稿日期**: 2024−05−16

资助项目: 湖北省气象局科技发展基金青年项目 (2022Q13); 武汉城市圈气象联合科技创新基金重点项目 (WHCSQZ202310)

第一作者: 杨培强, 主要从事区域气候变化研究。E-mail: 924272982@qq.com

通信作者: 陈炜, 主要从事民用航空气象服务和研究。E-mail: 547514525@qq.com

© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY−NC−ND 4.0

typical summer month.

Key words: local climate effect; numerical simulation; Wuhan; Houguan Lake

引　言

局地气候变化直接影响人居环境的适宜性 (邢佩等, 2023)。在局地气候中, 由于湖泊水热性质与周围陆面有明显不同 (方楠等, 2017), 导致湖泊、陆面与大气的相互作用存在显著差异, 从而使湖泊能有效调节局地气候 (黄菊梅等, 2024), 因此, 湖泊是影响局地和区域气候的重要因素 (闫立娟等, 2016; 任晓倩等, 2013), 研究湖泊的局地气候效应对应对局地气候变化和生态保护与建设具有重要意义。

近些年, 湖泊对局地气候的影响成为大气科学领域的研究热点 (Dugas et al., 2012; Stockdale et al., 2012), 国内也有诸多利用 WRF 模式和其他模型开展不同区域湖泊的局地气候特征及效应的研究。田宇 (2023) 通过 WRF 数值模式研究了夏季静稳天气下东湖水体对局地气温和相对湿度的影响, 结果表明, 东湖湖区在白天存在冷湖现象, 在夜间存在暖湖现象、湿岛现象。苏东生等 (2019) 通过 WRF 模式研究了青海湖水体对局地气温和降水的影响发现, 青海湖在 1—6 月引起局地温度下降, 而在 7—12 月引起局地温度升高, 2—6 月青海湖局地降水略有减少, 7—12 月局地降水显著增加。任侠 (2017) 通过 WRF 数值模式研究了太湖对局地气象环境影响, 发现 2015 年 4、8 月昼间太湖对周边及下风向地区近地层降温最高达 0.5~0.7 ℃,夜间升温最高可达 0.3~0.5 ℃。唐滢等 (2016) 利用 WRF 模式研究发现, 在局地尺度上, 夏季太湖造成地表温度和降水的减少, 影响强度由湖区向周边逐步减弱。曹渐华等 (2015) 利用浅水波模型研究鄱阳湖湖陆风机制, 发现鄱阳湖水体作为热源 (汇), 昼夜风向互逆, 白天为湖风, 夜间为陆风。许鲁君等 (2014) 通过 WRF 模式研究大理苍山与洱海的局地环流, 发现高山地形及洱海湖面对局地环流有显著作用, 苍山谷风形成早于洱海湖风, 夜间山风和陆风大于白天谷风和湖风。此类研究更多关注郊外大型湖泊的局地气候特征及效应, 城市内湖的局地气候效应仅有少量研究, 例如张伟等 (2022) 通过计算机流体力学模拟长沙市同生湖“湿岛效应”, 发现湖泊水体的增湿作用与距湖岸距离呈显著负相关, 对下风向区域的增湿效果最显著。李江林等 (2009) 通过假设在兰州城东建一个人工湖, 并采用 RAMS 模式模拟其局地气候效应, 发现加入湖泊后, 湖体夜间有增温作用, 增温作用随着离湖泊的距离渐远而减弱。与城市外部的大型湖泊相比, 城市内湖与城市热岛环流之间的相互关系更为紧密, 城市内湖湖陆风环流会与热岛环流耦合, 使局地流场更为复杂 (谢婧, 2022), 对城市生态和人居环境作用更加显著, 故研究城市内湖的局地气候效应有其必要性。

武汉市作为超大城市和国家中心城市, 随着城市化进程的加快, 城市发展与生态保护协调共进的问题愈发凸显 (谢慧和曾伟, 2021)。武汉因水而兴, 有“百湖之市”的称号。在武汉市诸多湖泊中, 后官湖位于武汉市蔡甸区境内, 主要由天鹅湖 (东南部)、南湖 (东北部)、高湖 (西南部) 和白莲湖 (西北部) 等 4 个湖体组成, 其水域面积 34.1 km^2, 为武汉西南部面积最大的湖泊, 对武汉市的发展极为重要, 也是重要的战略水源地 (杨水化等, 2020)。本文基于武汉市后官湖周边国家站 2013—2022 年观测和 NCEP/FNL 再分析资料, 采用 WRF 模式开展冬、夏两季典型月 (2013 年 1 月、7 月) 后官湖水体对湖区及周边地面要素的数值模拟并分析了可能影响机制, 为武汉市科学保护、合理利用湖泊资源提供科学依据。

1　资料与方法

1.1　资料介绍与时间选择

本文用于评估模式的观测资料来源于蔡甸国家基本气象观测站 (以下简称蔡甸站) 和武汉国家基本气象观测站 (以下简称武汉站) 观测数据, 包括逐小时 2 m 气温、10 m 风速和 2 m 相对湿度及降水量。其中蔡甸站 (114°00′E, 30°31′N) 海拔 23.6 m, 距离后官湖西南部子湖体约 0.3 km, 武汉站 (114°03′E, 30°36′N) 海拔 23.6 m, 距离后官湖西北部子湖体约 4.4 km。

参考《夏热冬冷地区居住建筑节能设计标准》(中华人民共和国住房和城乡建设部, 2010) 中典型气象年的选取方法, 综合比较蔡甸站近 10 a (2013—2022 年, 下同) 2 m 气温、10 m 风速等要素的逐年观测资料, 由于 2013 年各月观测数据较为接近蔡甸区近 10 a 的月平均值, 选择其作为研究年份。为了比较冬季和夏季局地气候效应的异同, 分别选取 2013 年 1 月 1 日 08 时 (北京时, 下同)—2 月 1 日 08 时及 7 月 1 日 08 时—8 月 1 日 08 时作为冬、夏两季典型月的研究时段。

模拟使用的资料包括逐 6 h 分辨率 1°×1°的 NCEP/FNL 再分析资料作为驱动 WRF 数值模式的初始场

和边界条件。土地利用、地形高度等静态数据来源于 WRF(V4.1) 自带的 MODIS 卫星遥感数据集。

1.2 检验方法

利用平均误差 ME(记为 E_M)、均方根误差 RMSE(记为 E_{RMS}) 和相关系数 (R) 检验模式的模拟结果，其计算公式分别如下

$$E_M = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - y_i) \tag{1}$$

$$E_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - y_i)^2} \tag{2}$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2}} \tag{3}$$

其中，x_i (i=1, 2, ⋯, n) 为站点逐小时气象要素模拟值数列，y_i (j=1, 2, ⋯, n) 为对应站点逐小时气象要素观测值数列，排在第 n 位的数为 x_i 和 y_i 的第 n 项，$\bar{x}$和$\bar{y}$分别为 x_i 和 y_i 的均值。

2 模式介绍及试验方案

2.1 模式介绍

本文使用 WRF 模式研究后官湖局地气候效应，参考相关研究采用的参数化方案 (朱娟等, 2022; 熊洁等, 2023; 周志敏等, 2023)，本次用于模拟的参数化方案参见表 1。采用三层双向嵌套网格，模拟中心点位于 (114.0°E, 30.0°N)，最外层 d01 区域至最内层 d03 区域水平网格分辨率依次为 15 km、5 km、1 km，水平格点数依次为 70×70、70×70、51×51，d03 区域覆盖后官湖及其周边区域 (图 1，涉及中国国界和行政区划的地图均基于中国科学院资源环境数据云平台 2015 年中国省级行政边界 shape 矢量数据绘制，底图无修改，数据下载链接为 https://www.resdc.cn/Default.aspx)。模式垂直方向设置 30 层，其中 1 km 以下 7 层。

表 1 参数化方案

Table 1 Parameterization schemes

物理过程	参数化方案
微物理(mp_physics)	WRF Single-Moment 5-class(WSM5)
长波辐射(ra_lw_physics)	RRTM
短波辐射(ra_sw_physics)	Dudhia
近地面层(sf_sfclay_physics)	MM5
陆面层(sf_surface_physics)	Noah
行星边界层(bl_pbl_physics)	YSU
积云参数化(cu_physics)	Kain-Fritsch

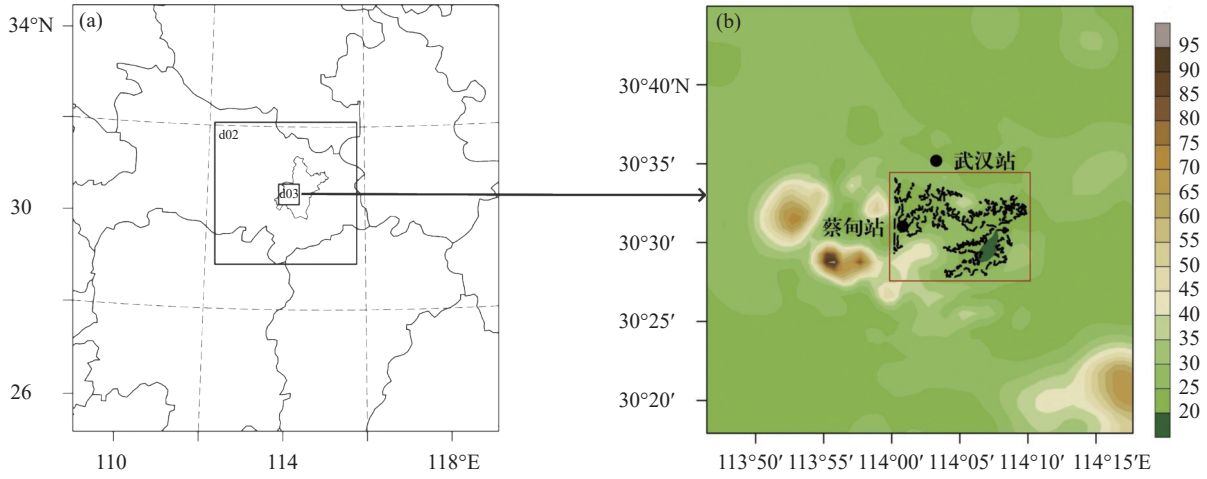


图 1 模式嵌套区域 (a) 和最内层模拟区域的海拔高度 (填色，单位：m) 与站点 (黑点) 分布 (b) (红框内为后官湖湖体所在区域)

Fig. 1 (a) The model nested region, (b) the altitude (shaded, unit: m) and stations (black dots) distribution of the innermost simulation region (The red box represents the Houguan Lake area)

2.2 试验方案

本文设置两组试验，一组为控制试验 (Control Test, CT)，使用 WRF 模式对后官湖进行正常模拟，第二组试验为无湖试验 (No Lake Test, NL)，将后官湖区域为水体的格点修改为周围格点所具有的下垫面类型 (草地)，表征为无湖体情况的环境特征。在模式积分方案设计上，参考其他学者的研究 (许鲁君等, 2014; 许鲁君和刘辉志, 2015; 唐滢等, 2016)，采取整时间段连续积分的方式，当研究时段不连续时，采取分段模拟的方式。本次模拟时段积分方案如表 2 所示，在研究时段内 (2013 年 1 月及 7 月)，模拟结果的前 24 h 作为模式开始 (spin-up) 时间，每 6 d 冷启动一次 WRF 模式，每次连续积分 7 d (其中 2013 年 1 月及 7 月最后一次模拟积分 2 d)，前一次模拟的

表 2 2013 年冬、夏季典型月 WRF 模式积分时间方案

Table 2 Integration time scheme of WRF model for the typical winter and summer months in 2013

方案序号	模拟时段	
	冬季	夏季
1	2012年12月31日08时—2013年1月7日08时	2013年6月30日08时—2013年7月7日08时
2	2013年1月6日08时—2013年1月13日08时	2013年7月6日08时—2013年7月13日08时
3	2013年1月12日08时—2013年1月19日08时	2013年7月12日08时—2013年7月19日08时
4	2013年1月18日08时—2013年1月25日08时	2013年7月18日08时—2013年7月25日08时
5	2013年1月24日08时—2013年1月31日08时	2013年7月24日08时—2013年7月31日08时
6	2013年1月30日08时—2013年2月1日08时	2013年7月30日08时—2013年8月1日08时

最后 1 d 与后一次模拟的第 1 d 重叠, 即保留每次模拟的后 6 d (1 d) 结果, 循环完成典型月模拟。

3 结果分析

本节首先验证数值模式控制试验的有效性, 然后研究后官湖对湖区及周边地区气温、风速和相对湿度及降水的影响, 最后对后官湖影响局地气候的可能机制进行分析。

3.1 控制实验结果验证

为验证本次 WRF 模式控制实验的有效性, 利用蔡甸站和武汉站 2013 年 1 月 1 日 08 时—2 月 1 日 08 时及 7 月 1 日 08 时—8 月 1 日 08 时逐小时气温、风速、相对湿度和降水量等观测资料, 对控制试验下的模拟结果进行检验, 结果如表 3 所示。气温的模拟效果最好, 蔡甸站和武汉站逐小时气温模拟值与观测值相关系数分别为 0.95、0.94, 且通过了 0.01 的显著性水平检验, 平均误差分别为 0.66 ℃、0.20 ℃, 均方根误差分别为 1.70 ℃、1.95 ℃。风速的模拟效果次之, 蔡甸站和武汉站逐小时风速模拟值与观测值的相关系数分别为 0.72、0.76, 且均通过了 0.01 的显著性水平检验, 平均误差分别为 1.83 $m\cdot s^{-1}$、1.03 $m\cdot s^{-1}$, 均方根误差分别为 2.16 $m\cdot s^{-1}$、1.19 $m\cdot s^{-1}$。相对湿度模拟结果检验显示, 蔡甸站的逐小时相对湿度模拟值与观测值存在 12.28% 的平均误差以及 16.76% 的均方根误差, 相关系数 0.61, 且通过了 0.01 的显著性水平检验; 武汉站的逐小时相对湿度模拟值与观测值存在 14.20% 的平均误差以及 16.82% 的均方根误差, 相关系数 0.73, 也通过了 0.01 的显著性水平检验。在降水量的模拟结果检验中, 蔡甸站和武汉站的逐小时降水量模拟值与观测值的平均误差 (−0.04 mm、0.09 mm) 和均方根误差 (2.09 mm、2.68 mm) 较小, 相关系数分别为 0.48、0.49, 均通过了 0.01 的显著性水平检验。总体来看, 模式能反映出气象要素变化的趋势, 模式的模拟结果可以用于后续内容的研究。

3.2 后官湖对局地气候的影响

3.2.1 后官湖对气温的影响

后官湖对气温存在较显著影响, 从平均气温来看, 冬季典型月后官湖湖区及下风向区域平均气温增幅 0.2~1.7 ℃ (图 2a), 东南部湖体水域面积大, 温度增幅更显著, 有明显的“暖湖”特征, 与冬季湖泊为“热源”的特征 (何学敏, 2012) 一致; 夏季典型月后官湖湖区则呈现弱增温作用, 平均气温增幅 0.2~0.8 ℃ (图 2d), 和城市外部大型湖泊呈现的夏季降温特征 (唐滢等, 2016; 吴阳, 2018) 不同。从冬、夏季典型月平均逐时气温日变化来看, 冬季典型月后官湖 08—20 时控制试验 (CT) 的平均逐小时温度总体低于无湖试验 (NL) (图 3a), 且后官湖湖区平均日最高气温下降, 降温范围 0.2~0.6 ℃ (图 2b), 即在白天, 后官湖水体有使气温降低的作用, 表现为“冷湖效应”。冬季典型月后官湖 20 时至次日 07 时控制试验 (CT) 的平均逐小时温度总体高于无湖试验 (NL) (图 3a), 且后官湖湖区平均日最低气温升高, 增温范围 0.2~2.0 ℃

表 3 冬、夏季典型月 WRF 模式控制试验模拟蔡甸站和武汉站气温、风速、相对湿度和降水量结果评估

Table 3 The evaluation result of the temperature, wind speed, relative humidity and precipitation simulated by CT of WRF model at Caidian Station and Wuhan Station in typical months of winter and summer

站名	气温/℃			风速/$m\cdot s^{-1}$			相对湿度/%			降水量/mm		
	平均误差	均方根误差	相关系数	平均误差	均方根误差	相关系数	平均误差	均方根误差	相关系数	平均误差	均方根误差	相关系数
蔡甸站	−0.66	1.70	0.95**	1.83	2.16	0.72**	12.28	16.76	0.61**	−0.04	2.09	0.48**
武汉站	−0.20	1.95	0.94**	1.03	1.19	0.76**	14.20	16.82	0.73**	0.09	2.68	0.49**

**表示通过了0.01的显著性水平检验

(图 2c), 即在夜间, 后官湖有使气温升高的趋势, 表现为“暖湖效应”。夏季典型月后官湖也有类似规律, 即在 08—16 时表现为冷湖效应 (图 3b), 使得湖区平均日最高气温下降, 降温范围 0.2~1.0 ℃ (图 2e), 在 16 时至次日 08 时表现为暖湖效应 (图 3b), 湖区及下风向区域平均日最低气温升高, 增温范围 0.2~2.0 ℃ (图 2f)。日最高气温的降低和日最低气温的升高, 使得湖体及周边区域昼夜温差减小。

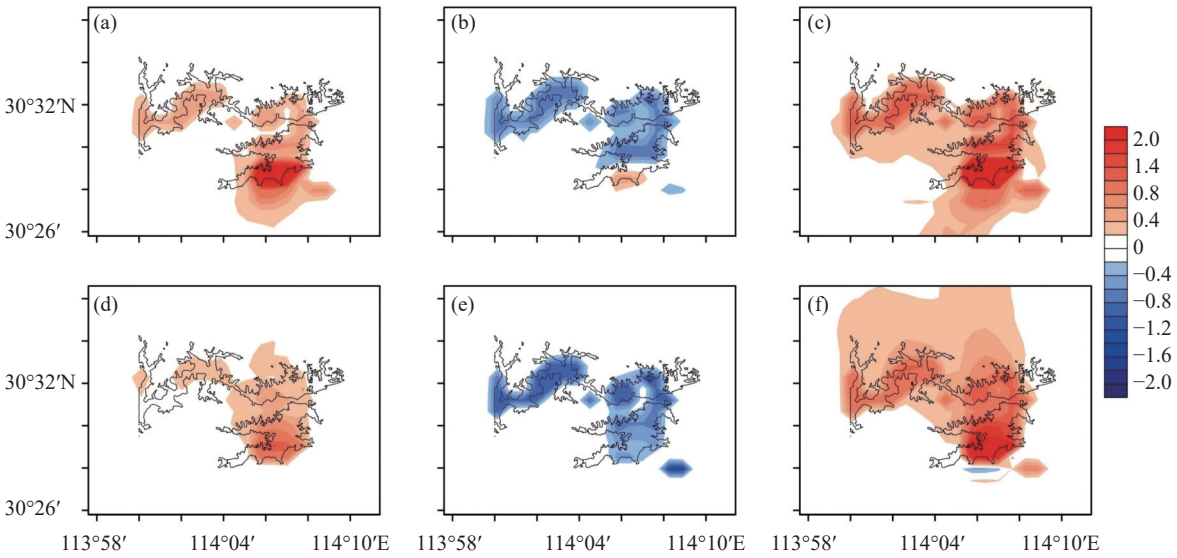


图 2 后官湖控制试验 (CT) 与无湖试验 (NL) 冬 (a、b、c)、夏 (d、e、f)) 季典型月的平均 (a、d)、平均日最高 (b、e) 和平均日最低 (c、f) 气温差 (填色, 单位: ℃)

Fig. 2 The difference of the (a, d) average, (b, e) average daily highest and (c, f) average daily lowest temperature (shaded, unit: ℃) in the typical (a, b, c) winter and (d, e, f) summer months between the Houguan Lake Control Test (CT) and the No Lake Test (NL)

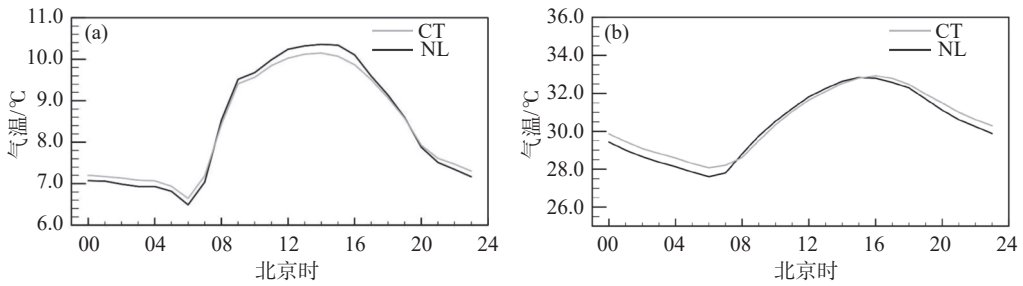


图 3 后官湖控制试验 (CT) 与无湖试验 (NL) 冬季 (a)、夏季 (b) 典型月的逐时气温平均日变化

Fig. 3 The daily variation of average hourly temperature in typical (a) winter and (b) summer months of the Houguan Lake Control Test (CT) and the No Lake Test (NL)

3.2.2 后官湖对风速的影响

后官湖对风速的影响如图 4 所示, 冬季典型月湖区与下风向区域平均风速和平均日极大风速的增幅分别为 0.2~1.6 $m\cdot s^{-1}$ 和 0.2~1.8 $m\cdot s^{-1}$ (图 4a、b), 夏季典型月增幅 0.2~0.4 $m\cdot s^{-1}$ (图 4c、d), 后官湖水体对湖区的平均风速和平均日极大风速均有增大作用。从不同季节的风速影响来看, 冬季典型月后官湖水体对湖区与下风向区域平均风速和极大风速的增大量和增大区域明显大于夏季典型月, 这是因为冬季湖体增温作用较强, 使得上方湍流作用增强, 导致湖体上方及周边风速较大 (邱阳阳等, 2013)。从不同种类的风速影响来看, 冬季典型月后官湖对湖区与下风向区域的平均日极大风速的增大区域稍大于平均风速。从不同区域的风速的影响来看, 后官湖湖体形状较为狭长分散, 水域形状破碎度较高, 相较之下东南部湖体更大, 对风速的增大作用和影响范围更加显著, 原因是湖体面积越大的湖泊越易产生湖风 (Crosman and Horel, 2012; Zhang et al., 2019)。

3.2.3 后官湖对相对湿度和降水量的影响

后官湖对相对湿度的影响如图 5 所示, 冬季典型月后官湖湖区与下风向区域平均相对湿度增幅 1%~6% (图 5a), 平均日最大相对湿度增幅 1%~2% (图 5b), 平均日最小相对湿度增幅在 1%~5% (图 5c), 夏季典型月后官湖湖区与下风向区域平均相对湿度增幅 1%~5% (图 5d), 平均日最大相对湿度增幅 1%~5% (图 5e), 平均日最小相对湿度增幅 1%~6% (图 5f), 说

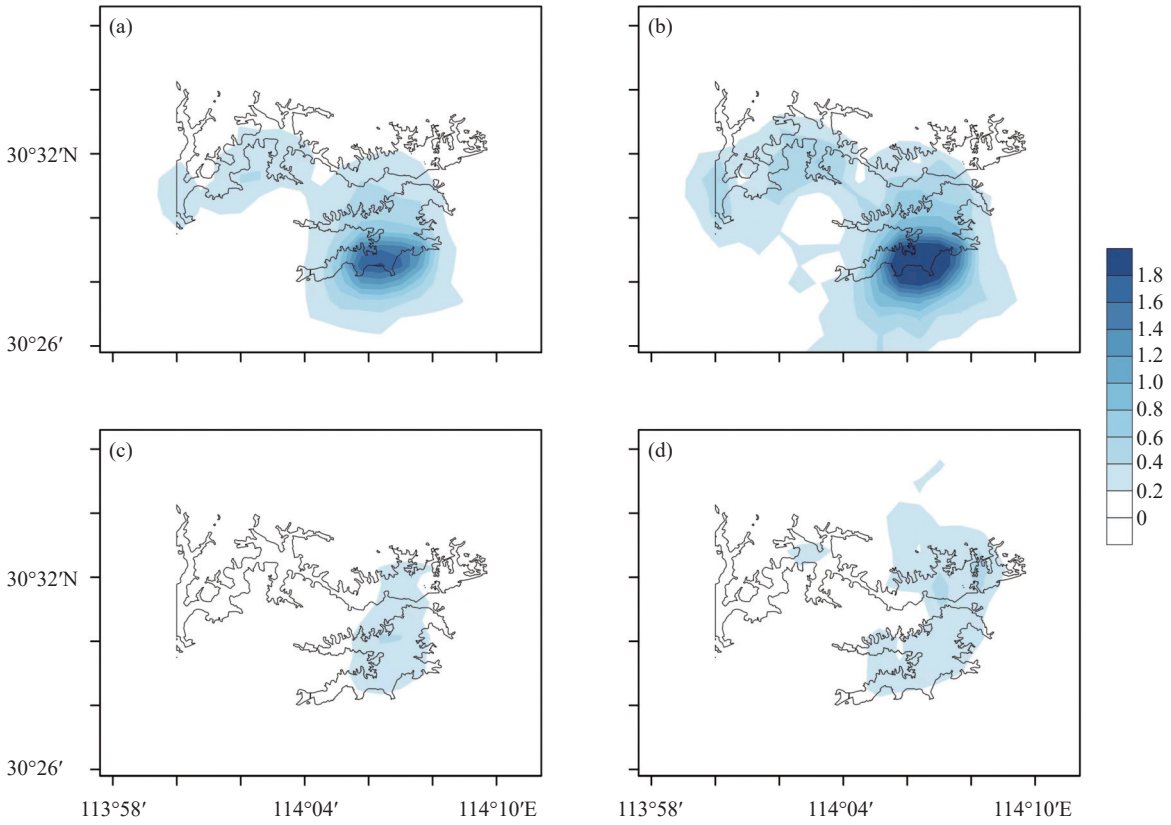


图 4 后官湖控制试验 (CT) 与无湖试验 (NL) 冬 (a、b)、夏 (c、d) 季典型月的平均 (a、c) 和平均日极大 (b、d) 风速差 (填色, 单位: $m \cdot s^{-1}$)

Fig. 4 The difference of (a, c) the months average and (b, d) the average daily maximum wind speed (shaded, unit:$m \cdot s^{-1}$) in typical (a, b) winter and (c, d) summer months between the Houguan Lake Control Test (CT) and the No Lake Test (NL)

明后官湖在冬、夏两季典型月均有一定的“湿岛效应”。冬、夏季典型月模拟结果均表明城市内湖对于城市局部范围有一定增湿作用, 东南部湖区因水域面积较大, 增湿作用极为显著, 而其他部位湖区增湿作用很弱。从图 5 还可发现, 相对湿度随湖泊边界距离的增加而下降, 湖区的下风向区域增湿效果相

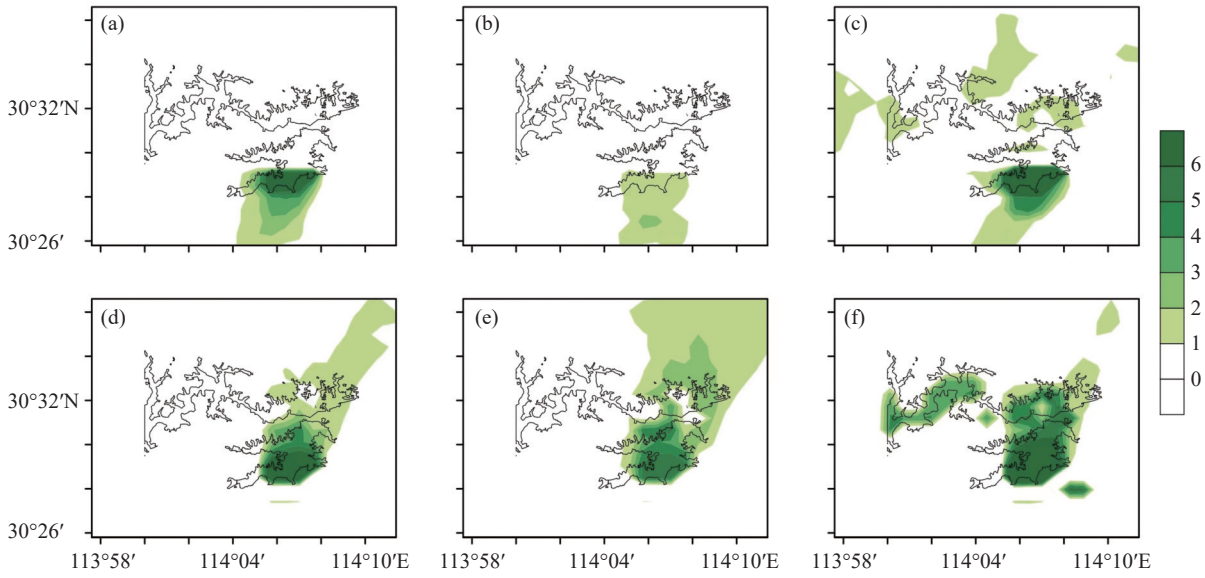


图 5 后官湖控制试验 (CT) 与无湖试验 (NL) 冬 (a、b、c)、夏 (d、e、f) 季典型月平均 (a、d)、平均日最大 (b、e) 和平均日最小 (c、f) 相对湿度差 (填色, 单位: %)

Fig. 5 The difference of (a, d) the month average, (b, e) the average daily maximum and (c, f) the average daily minimum relative humidity (shaded, unit: %) in typical (a, b, c) winter and (d, e, f) summer months between the Houguan Lake Control Test (CT) and the No Lake Test (NL)

对更明显，上述特征与李婷婷等 (2021) 和张伟等 (2022) 的研究结论一致。

此外，本文还分析了控制试验 (CT) 和无湖试验 (NL) 降水量的模拟结果以对比后官湖对降水量的影响，相比城市外部大型湖泊的降水量贡献率 (唐滢等, 2016; 苏东生等, 2019)，后官湖对湖区及周边地区降水量的影响很小，其降水量贡献率最大为 0.5%，这可能与后官湖水体面积较小有关。

综上可知，后官湖水体的存在，增大了湖区及下风向区域的气温、风速和相对湿度。冬季典型月后官湖有显著增温作用，夏季典型月呈现弱增温作用，白天后官湖表现为冷湖效应，夜间表现为暖湖效应。后官湖对湖区的平均风速和平均日极大风速均有增大作用，冬季典型月后官湖对湖区与下风向区域平均风速和平均日极大风速的增大量和增大区域均大于夏季典型月。后官湖在冬、夏两季典型月均有一定的“湿岛效应”，相对湿度随湖泊边界距离的增加而下降。而后官湖对湖区及周边地区降水量的影响很小。

3.3 后官湖影响局地气候的可能机制

本节通过分析后官湖地区控制试验 (CT) 与无湖试验 (NL) 0—6 km 垂直风场和 2 m 水平水汽通量散度差来研究影响后官湖局地气候效应的可能机制。

白天湖泊水体因比热容较大，相较于陆地升温慢，湖区气温低于陆地，冬、夏两季典型月后官湖分别在 08—20 时和 08—16 时表现为冷湖效应 (图 3a、b)，冬季典型月 14 时湖区平均水平风场有辐散特征 (图 6a)，夏季典型月 14 时北部湖区平均水平风场也有较弱辐散特征 (图 6c)，整体而言白天风由湖区吹向陆地。夜间湖泊相较于陆地降温慢，湖区气温高于陆地，冬、夏季典型月后官湖分别在 20 时至次日 07 时和 16 时至次日 08 时表现为暖湖效应 (图 3a、b)，由于夜间湖泊的增温作用相较于白天降温作用大，湖泊与陆地热力差异增大，且与冬、夏两季典型月环境风场 (图 7a、b) 相互作用，最终导致冬季典型月 02 时东南部湖区及湖岸的水平风场和夏季典型月 02 时东北部湖区的水平风场均有显著辐合特征 (图 6b、d)，由白天湖风转为夜间陆风。

冬季典型月 (图 7a) 和夏季典型月 (图 7b) 后官湖湖体均增强了湖区及下风向区域平均风场的辐合作用，且冬季典型月 (图 8a)、夏季典型月 (图 8b) 平

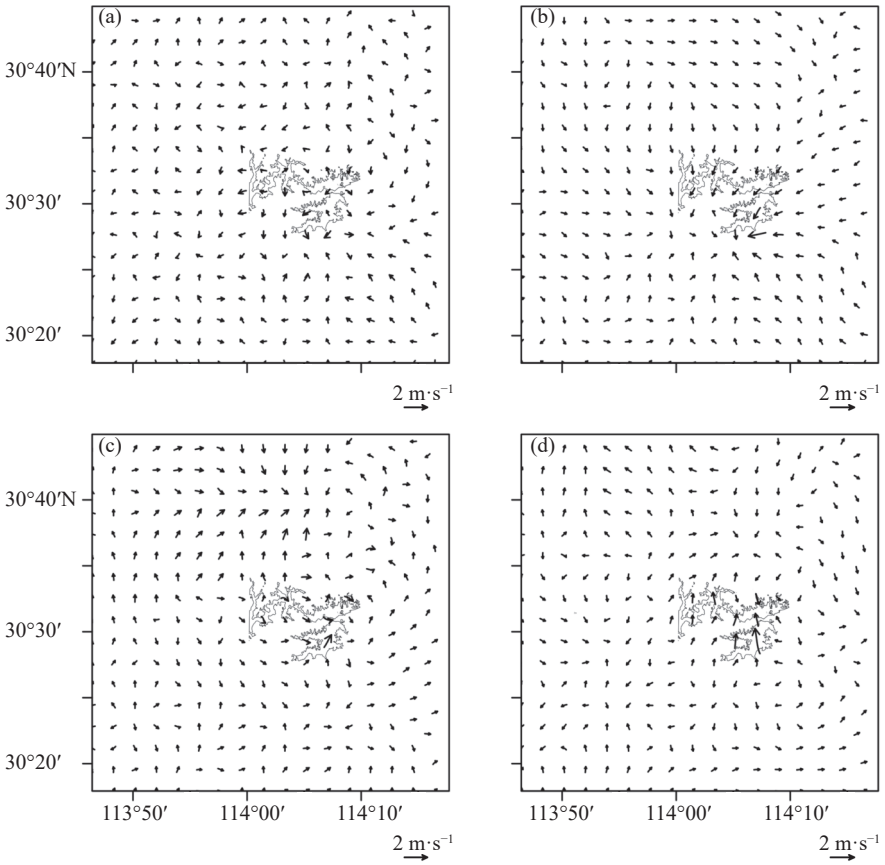


图 6 后官湖控制试验 (CT) 与无湖试验 (NL) 冬季 (a、b)、夏季 (c、d) 典型月的平均 14 时 (a、c) 和 02 时 (b、d) 水平风场差 (矢量)

Fig. 6 The difference of the average horizontal wind field (vector) at (a, c) 14:00 BT and (b, d) 02:00 BT in the typical (a, b) winter and (c, d) summer months between the Houguan Lake Control Test (CT) and the No Lake Test (NL)

均垂直风场剖面表明, 湖体的存在使得湖面的上升气流增强, 印证了冬、夏两季典型月后官湖均呈现增温的现象。同时谢婧 (2022) 的研究发现, 夏季后官湖在日间作为“冷源”的降温作用与武汉市内其他湖泊相比较弱, 而夜间增温作用大致相当, 进一步确证了其夏季典型月的增温特征。冬季典型月后官湖湖区受偏北气流影响 (图 7a), 湖体南岸增温幅度和范围显著大于北岸 (图 2a、c), 夏季典型月后官湖湖区受偏南气流影响 (图 7b), 增温强度不如冬季典型月, 但湖体北岸增温范围大于南岸 (图 2d、f), 表明后官湖水体的调温效应与环境风场有密切关系。

冬季典型月后官湖水体对湖区的水汽通量散度增幅 (0.4~2.4)×10^{-5} g·cm^{-2}·hPa^{-1}·s^{-1}, 水汽通量辐散中心位于东南部湖区, 湖体还影响了东南部湖岸的水汽通量散度, 其变化量为 (−0.4~−2.4)×10^{-5} g·cm^{-2}·hPa^{-1}·s^{-1}, 水汽通量辐合中心位于东南部湖岸 (图 9a), 表明冬季典型月湖区受偏北风的影响 (图 7a), 以东南部湖区为水汽源地, 不断向其下风向区域输送, 形成了冬季典型月东南部湖岸显著增湿的特征 (图 5a)。夏季典型月水汽通量辐散中心也位于东南部湖区, 其水汽通量散度变化幅度 (0.6~3.6)×10^{-5} g·cm^{-2}·hPa^{-1}·s^{-1}, 辐合中心位于东北部湖体及湖岸, 其水汽通量散度变化幅度为 (−0.6~−3.6)×10^{-5} g·cm^{-2}·hPa^{-1}·s^{-1} (图 9b), 表明夏季典型月湖区受偏南风的影响 (图 7b), 水汽主要从东南部湖体向其下风向区域输送, 造成夏季典型月东北部湖岸增湿的现象 (图 5d)。

综合来看, 白天后官湖表现为冷湖效应, 使得风由湖区吹向陆地, 夜间后官湖表现为暖湖效应, 使得

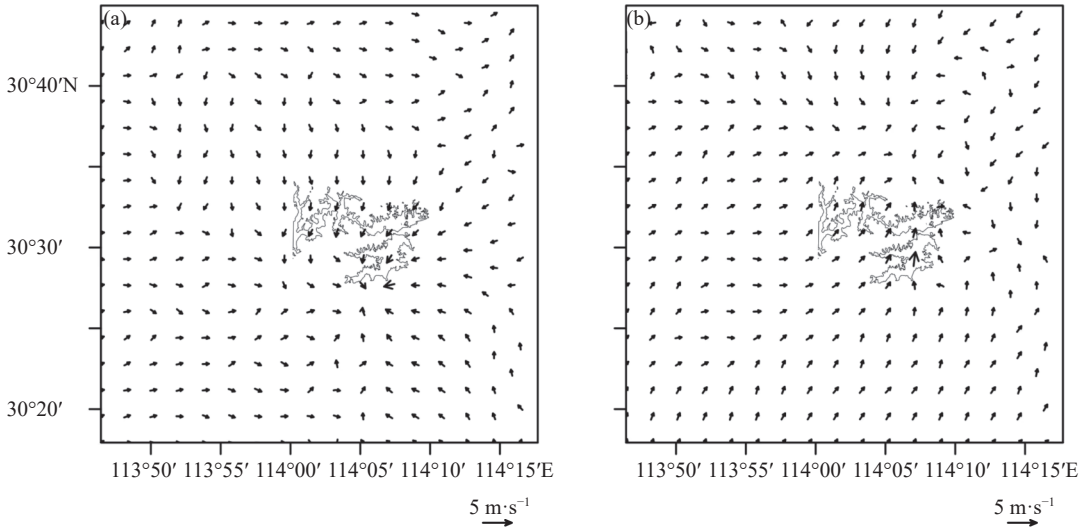


图 7 后官湖控制试验 (CT) 与无湖试验 (NL) 冬季 (a)、夏季 (b) 典型月的平均水平风场差 (矢量)

Fig. 7 The difference of average horizontal wind field (vector) in the typical (a) winter and (b) summer months between the Houguan Lake Control Test (CT) and the No Lake Test (NL)

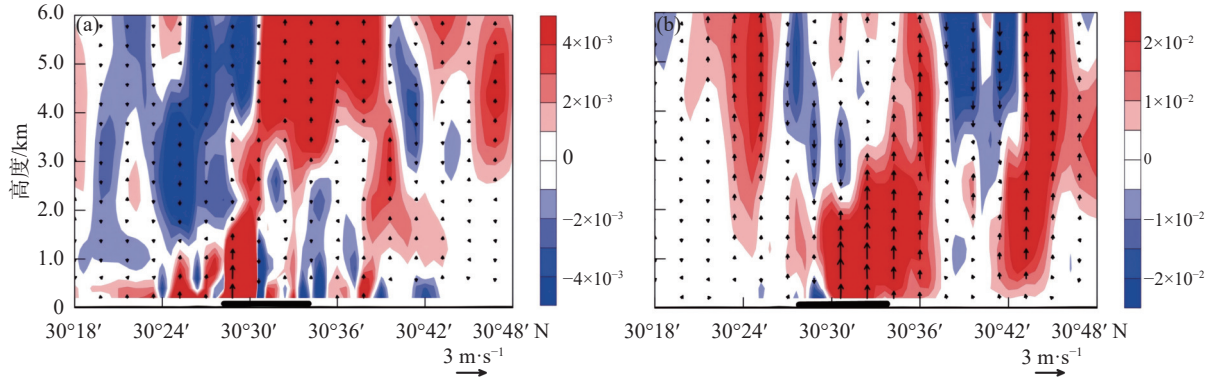


图 8 后官湖控制试验 (CT) 冬季 (a)、夏季 (b) 典型月沿 114°7′ E 平均垂直风场 (矢量) 及控制试验 (CT) 与无湖试验 (NL) 冬季 (a)、夏季 (b) 典型月沿 114°7′ E 月平均垂直风场差 (填色) 的纬度—高度剖面图 (粗实线为后官湖湖体所在区域)

Fig. 8 The latitude-altitude profile of the average vertical wind field (vector) along 114°7'E in the typical (a) winter and (b) summer months in Control test (CT) and the difference in average vertical wind field (shaded) along 114°7'E in the typical (a) winter and (b) summer months between the Houguan Lake Control Test (CT) and the No Lake Test (NL) (The bold and solid line is the Houguan Lake area)

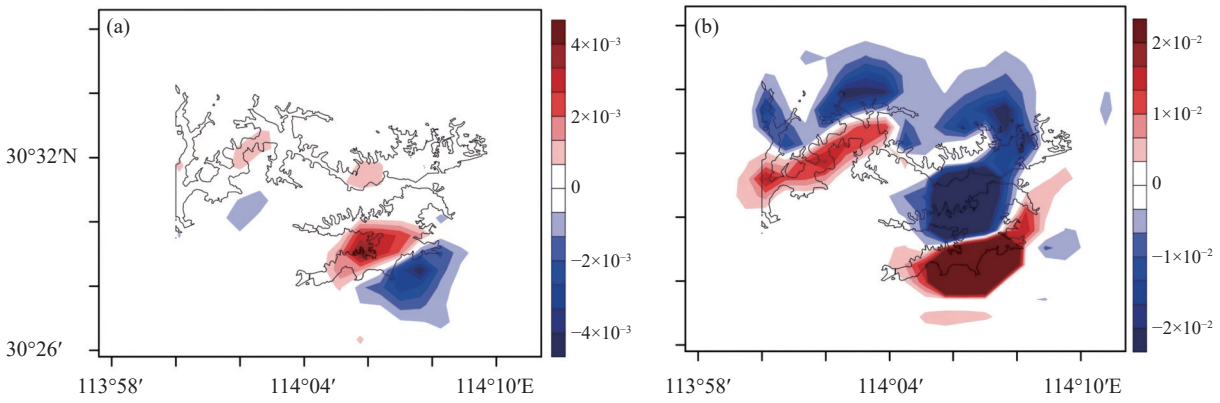


图 9 后官湖控制试验 (CT) 与无湖试验 (NL) 冬季 (a)、夏季 (b) 典型月的平均水汽通量散度差 (填色, 单位: g·cm^{-2}·hPa^{-1}·s^{-1})

Fig. 9 The difference of average water vapor flux divergence (shaded, unit:g·cm^{-2}·hPa^{-1}·s^{-1}) in the typical (a) winter and (b) summer months between the Houguan Lake Control Test (CT) and the No Lake Test (NL)

风由陆地吹向湖区。冬、夏两季典型月后官湖湖体均增强了湖区及下风向区域风场的辐合作用, 且使得湖面的上升气流增强, 印证了冬、夏两季典型月后官湖均呈现增温的现象。冬季后官湖受偏北气流作用, 对湖体南岸的气温、相对湿度的影响更显著, 夏季湖体受偏南气流作用, 该特征反之。

4 结论与讨论

本文利用武汉市后官湖周边国家站 2013—2022 年地面观测和 NCEP/FNL 再分析资料, 基于 WRF 模式开展后官湖局地气候效应的数值模拟研究, 对比了冬、夏季典型月 (2013 年 1 月、7 月) 后官湖对湖区及周边地区气温、风速、相对湿度及降水的影响, 并探讨了湖体影响局地气候的可能机制, 得出以下结论:

(1) 冬季典型月后官湖有明显增温作用, 湖区及下风向区域平均气温增幅 0.2~1.7 ℃, 夏季典型月后官湖则呈现出弱增温作用。冬季后官湖 08—20 时表现为冷湖效应, 湖区平均日最高气温降温 0.2~0.6 ℃, 20 时至次日 07 时表现为暖湖效应, 湖区平均日最低气温增温 0.2~2.0 ℃。夏季后官湖 08—16 时表现为冷湖效应, 湖区平均日最高气温降温 0.2~1.0 ℃, 16 时至次日 08 时表现为暖湖效应, 湖区平均日最低气温升高, 升温范围 0.2~2.0 ℃。日高温的降低和日低温的升高导致昼夜温差减小。

(2) 后官湖水体对湖区的平均风速和平均日极大风速均有增大作用, 其中冬季典型月湖区平均风速和平均日极大风速的增大幅度分别为 0.2~1.6 m·s^{-1} 和 0.2~1.8 m·s^{-1}, 夏季典型月增幅为 0.2~0.4 m·s^{-1}。冬季典型月后官湖水体对湖区与下风向区域平均风速和平均日极大风速的增大量和增大区域明显大于夏季典型月。

(3) 后官湖在冬、夏两季典型月均有 “湿岛效应”。冬季典型月湖区与下风向区域平均相对湿度增幅 1%~6%, 平均日最大相对湿度增幅 1%~2%, 平均日最小相对湿度增幅 1%~5%, 夏季典型月湖区与下风向区域平均相对湿度增幅 1%~5%, 平均日最大相对湿度增幅 1%~5%, 平均日最小相对湿度增幅 1%~6%。相对湿度随湖泊边界距离的增加而下降, 湖区的下风向区域增湿效果相对更明显。相比城市外部大型湖泊的降水量贡献率, 后官湖对湖区及周边地区降水量的影响很小, 其降水量贡献率最大为 0.5%。

(4) 湖泊与陆地的气温差异, 导致湖区风向发生昼夜转变。后官湖湖体形状较为狭长分散, 水域形状破碎度较高, 相较之下东南部湖体更大, 对温度、风速、相对湿度影响的强度和范围更大。冬季典型月后官湖受偏北气流作用, 对东南部湖岸的气温、相对湿度的影响更显著, 夏季典型月该特征反之。

本文以武汉后官湖为例, 开展了城市内部湖泊的局地气候效应研究, 而武汉市内湖泊众多, 湖泊之间相互作用对局地气候的影响尚未研究, 下一步将更多的湖泊纳入研究范围, 更系统性的开展研究, 在计算条件许可的情况下, 以更高的模式精度、更短的循环同化周期以及更长时间的模拟数据进行研究, 以提高城市内湖泊对局地气候影响的认识。

致谢: 湖北省气象服务中心陈正洪正研级高工为本文提供了局地气候分析的指导, 中国气象局武汉暴雨研究所李俊研究员为本文提供了数值模式设计和运行的指导, 谨致谢忱!

参考文献 (References):

曹渐华,刘熙明,李国平,等.2015.鄱阳湖地区湖陆风特征及成因分析

[J].高原气象,34(2):426−435. Cao J H, Liu X M, Li G P, et al. 2015. Analysis of the phenomenon of lake-land breeze in Poyang lake area [J]. Plateau Meteorology,34(2):426−435 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000−0534.2013.00197

方楠,阳坤,拉珠,等.2017. WRF 湖泊模型对青藏高原纳木错湖的适用性研究[J].高原气象,36(3):610−618. Fang N, Yang K, La Z, et al. 2017. Research on the application of WRF-lake modeling at Nam Co lake on the Qinghai-Tibetan plateau [J]. Plateau Meteorology,36(3):610−618 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000−0534.2016.00038

何学敏.2012.艾比湖地区非生长季碳通量监测及响应机制初探[D]. 乌鲁木齐:新疆大学. He X M.2012. Preliminary study on monitoring carbon fluxes and its response mechanisms during non-growing season in Ebinur Lake area [D]. Urumqi:Xinjiang University (in Chinese)

黄菊梅,覃鸿,袁泉,等.2024. 湖陆风对滨湖夏季气温和岳阳市城市热岛强度的影响[J].沙漠与绿洲气象,18(3):114−120. Huang J M, Qin H, Yuan Q, et al. 2024. The influence of lake-land breeze on summer temperature in lake side area and the intensity of urban heat island in Yueyang city [J]. Desert and Oasis Meteorology,18(3):114−120 (in Chinese). doi:10.12057/i.issn.1002−0799.2024.03.015

李江林,陈玉春,吕世华,等.2009.利用 RAMS 模式对山谷城市兰州冬季湖泊效应的数值模拟[J].高原气象,28(5):955−965. Li J L, Chen Y C, Lü S H, et al. 2009. Numerical simulation of winter lake effect in valley city of Lanzhou using RAMS model [J]. Plateau Meteorology, 28(5):955−965 (in Chinese)

李婷婷,赵聆言,关艺蕾,等.2021.城市湖泊湿地周边建成环境温湿效应的时空分布特征-以武汉 16 个湖泊湿地为例[J].中国园林,37(3):106−111. Li T T, Zhao L Y, Guan Y L, et al. 2021. Temporal and spatial characteristics of cooling and humidifying effect of urban lake wetlands on the surroundings-a case study of 16 urban lake wetlands in Wuhan [J]. Chinese Landscape Architecture,37(3):106−111 (in Chinese). doi:10.19775/j.cla.2021.03.0106

邱阳阳,刘寿东,王咏薇,等.2013.湖体对风、湿环境影响的数值模拟[J].科学技术与工程,13(14):3839−3845. Qiu Y Y, Liu S D, Wang Y W, et al. 2013. Numerical simulation of lake body effect on wind speed and humidity environment [J]. Science Technology and Engineering,13(14):3839−3845 (in Chinese)

任晓倩,孙菽芬,陈文,等.2013.湖泊数值模拟研究现状综述[J].地球科学进展,28(3):347−356. Ren X Q, Sun S F, Chen W, et al. 2013. A review of researches on the lake numerical modeling [J]. Advances In Earth Science,28(3):347−356 (in Chinese). doi:10.11867/j.issn.1001−8166.2013.03.0347

任侠.2017.太湖对局地气象环境影响的模拟研究[D].南京:南京信息工程大学. Ren X. 2017. Simulation studies for Lake Taihu effect on local meteorological environment [D]. Nanjing:Nanjing University of Information Science & Technology (in Chinese)

苏东生,文莉娟,赵林,等.2019.青海湖夏秋季局地气候效应数值模拟研究[J].高原气象,38(5):944−958. Su D S, Wen L J, Zhao L, et al. 2019. Numerical simulation of seasonal local climate effect in Qinghai Lake [J]. Plateau Meteorology,38(5):944−958 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000−0534.2018.00125

唐滢,黄安宁,田栗嵘,等.2016.夏季太湖局地气候效应的数值模拟研究[J].气象科学,36(5):647−654. Tang Y, Huang A N, Tian L R, et al. 2016. Numerical study on summer local climatic effect over Taihu Lake [J]. Journal of the Meteorological Sciences,36(5):647−654 (in Chinese). doi:10.3969/2015jms.0081

田宇.2023.夏季静稳天气下大型城中湖气候调节服务功能模拟研究-以武汉东湖为例[D].武汉:华中农业大学. Tian Y. 2023. Simulation study on cuimate regulation service function of large urban lakes in summer stable weather: A case study of East lake in wuhan [D]. Wuhan:Huazhong Agricultural University (in Chinese). doi:10.27158/d.cnki.ghznu.2023.002190

吴阳. 2018. 夏季青藏高原湖泊群区域气候效应及其作用机理的数值模拟研究[D]. 南京:南京大学. Wu Y. 2018. Numerical study of the regional climate effect of lake clusters in Tibetan Plateau and its working mechanisms during summer [D]. Nanjing:Nanjing University (in Chinese). doi:10.27235/d.cnki.gnjiu.2018.000072

谢慧,曾伟.2021.武汉市城镇化与生态环境耦合协调发展研究[J].湖北农业科学,60(4):86−91. Xie H, Zeng W. 2021. Study on the coupling and coordinating development of urbanization and ecological environment in Wuhan city [J]. Hubei Agricultural Sciences,60(4):86−91 (in Chinese). doi:10.14088/j.cnki.issn0439−8114.2021.04.018

谢婧. 2022. 基于“源-流-汇”综合分析的武汉市湖泊局地气候效应研究[D]. 武汉:华中农业大学. Xie J. 2022. Research on local climate effect of lakes in Wuhan based on "Source-Flow-Sink" analysis [D]. Wuhan:Huazhong Agricultural University (in Chinese)

邢佩,杨若子,杜吴鹏,等.2023. 1961-2017 年华北地区温度相关高影响天气气候事件变化特征分析[J].沙漠与绿洲气象,17(4):61−68. Xing P, Yang R Z, Du W P, et al. 2023. Characteristics of temperature-related high-impact weather and climate events in North China from 1961 to 2017 [J]. Desert and Oasis Meteorology,17(4):61−68 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002−0799.2023.04.009

熊洁,李俊,王明欢.2023. WRF 模式中不同随机扰动方案在暴雨对流尺度集合预报中的对比评估[J].暴雨灾害,42(3):241-251. Xiong J, Li J, Wang M H.2023. Comparative evaluation of different stochastic perturbation schemes within the convection-allowing ensemble forecast of rainstorm in WRF model [J]. Torrential Rain and Disasters,42(3):241-251 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2022−191

许鲁君,刘辉志.2015.云贵高原洱海湖泊效应的数值模拟[J].气象学报,73(4):789−802. Xu L J, Liu H Z. 2015. Numerical simulation of the lake effect of Erhai in the Yunnan-Guizhou plateau area [J]. Acta Meteorologica Sinica,73(4):789−802 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2015.047

许鲁君,刘辉志,曹杰.2014.大理苍山-洱海局地环流的数值模拟[J].大气科学,38(6):1198−1210. Xu L J, Liu H Z, Cao J. 2014. Numerial simulation of local circulation over the Cangshan mountain- Erhai Lake area in Dali, Southwest China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,38(6):1198−1210 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.1401.13293

闫立娟,郑绵平,魏乐军.2016.近 40 年来青藏高原湖泊变迁及其对气候变化的响应[J].地学前缘,23(4):310−323. Yan L J, Zheng M P, Wei L J. 2016. Change of the lakes in Tibetan plateau and its response to

climate in the past forty years [J]. Earth Science Frontiers,23(4): 310−323 (in Chinese). doi:10.13745/j.esf.2016.04.027

杨水化,彭正洪,焦洪赞,等.2020.城市富营养化湖泊的外源污染负荷与贡献解析-以武汉市后官湖为例[J].湖泊科学,32(4):941−951. Yang S H, Peng Z H, Jiao H Z, et al. 2020. External pollution source load and contribution of urban eutrophic lakes-Taking Houguan Lake of Wuhan as an example [J]. Journal of Lake Sciences,32(4):941−951 (in Chinese). doi:10.18307/2020.0404

张伟,陈存友,胡希军,等.2022.基于计算机流体力学的城市近郊湖泊“湿岛效应”情景模拟研究: 以长沙市同升湖为例[J].生态与农村环境学报,38(5):670−680. Zhang W, Chen C Y, Hu X J, et al. 2022. Study on the “wet island effect” scenario simulation of lakes in suburbs based on computer fluid mechanics: A case study of Tongsheng Lake in Changsha city [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 38(5):670−680 (in Chinese). doi:10.19741/j.issn.1673−4831.2021.0287

中华人民共和国住房和城乡建设部. 2010. JGJ 134-2010 夏热冬冷地区居住建筑节能设计标准[S]. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. 2010. JGJ 134-2010 Design standard for energy effciency of residential buildingsin hot summer and cold winter zone [S] (in Chinese)

周志敏,王斌,郭英莲,等.2023.湖北一次梅雨期暴雨过程的数值模拟及云微物理特征分析[J].暴雨灾害,42(4):372−383. Zhou Z M, Wang B, Guo Y L, et al. 2023. Numerical simulation and analysis on cloud microphysical characteristics during a Meiyu heavy rainfall event in Hubei province [J]. Torrential Rain and Disasters,42(4):372−383 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023−062

朱娟,张立凤,张铭.2022.盛夏苏北地区一次飑线过程的数值模拟研究[J].暴雨灾害,41(1):15−23. Zhu J, Zhang L F, Zhang M. 2022. Numerical simulation and study of a squall in the north of Jiangsu in midsummer [J]. Torrential Rain and Disasters,41(1):15−23 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2022.01.002

Crosman T E, Horel D J. 2012. Idealized large-eddy simulations of sea and lake breezes: Sensitivity to lake diameter, heat flux and stability [J]. Boundary-Layer Meteorology,44:309−328. doi:10.1007/s10546−012−9721−x

Dugas B, Winger K, Laprise R, et al. 2012. Interactive lakes in the Canadian Regional Climate Model, version 5: the role of lakes in the regional climate of North America [J]. Tellus: Series A, Dynamic Meteorology and Oceanography,64(1):1-22. doi:10.3402/tellusa.v64i0.16226

Stockdale T, Potes M, Boussetta S, et al. 2012. On the contribution of lakes in predicting near-surface temperature in a global weather forecasting model [J]. Tellus: Series A, Dynamic Meteorology and Oceanography,64(1):1-12. doi:10.3402/tellusa.v64i0.15829

Zhang X Y, Huang J P, Li G, et al. 2019. Improving lake-breeze simulation with WRF nested LES and lake model over a large shallow lake [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 58:1689−1708. doi:10.1175/jamc−d−18−0282.1

(责任编辑 张 文)