#### DOI: 10.5846/stxb202104120950

梁胜,陈存友,胡希军,张伟,刘路云.高密度建成区湖滨建筑空间形态对湖泊热缓释效应的影响情景模拟.生态学报,2022,42(9):3759-3770. Liang S, Chen C Y, Hu X J, Zhang W, Liu L Y.Scenario simulation of the influence of lakeside buildings spatial forms on lake thermal release effect in high-density built-up area.Acta Ecologica Sinica,2022,42(9):3759-3770.

# 高密度建成区湖滨建筑空间形态对湖泊热缓释效应的 影响情景模拟

梁 胜<sup>1,2,3,4</sup>,陈存友<sup>1,2,3</sup>,胡希军<sup>1,2,3</sup>,张 伟<sup>1,2,3</sup>,刘路云<sup>1,2,3</sup>

1 中南林业科技大学风景园林学院,长沙 410004

2 湖南省自然保护地风景资源大数据工程技术研究中心,长沙 410004

3 中南林业科技大学城乡景观生态研究所,长沙 410004

4 佛山建投置地有限公司,佛山 528000

摘要:城市湖泊对于缓解调节城市热岛效应具有重要意义,目前湖滨建筑空间形态对城市湖泊的降温潜力影响作用仍不明晰。 以长沙市梅溪湖及周边区域为研究对象,采用实测与 CFD(Computational Fluid Dynamics)数值模拟相结合的方式验证了湖泊的 热缓释效应规律,重点探讨了建筑后退湖岸距离、环湖建筑围合程度、临湖建筑高度对高密度建成区湖泊热缓释效应的影响。 结果表明:(1)研究所用 CFD 计算模型对再现高密度建成区湖泊缓释效应的强度和影响范围具有较强的拟合优度,可以有效地 作为湖泊水体降温潜力的评价工具,梅溪湖对其下风向 550 m 范围内的热缓释作用显著。(2)优化湖滨建筑空间形态对于湖 泊下风向区域的热缓释作用影响最为明显,最大降温幅度达 1.86℃,对湖泊下风向的最大缓释距离可达 622 m 范围内。(3)不 同湖滨建筑空间形态下的湖泊热缓释效能存在差异,其中降低建筑高度和缩小环湖建筑围合程度对湖泊热缓释的积极影响强 于增大建筑后退湖岸距离。结论能够加深对城市湖泊水体热缓释效应的认识,有助于规划设计者从整体热环境感知的角度规 划建设城市湖滨空间,使得城市湖泊水体的生态效益得到最大优化。

关键词:高密度建成区;湖滨建筑;湖泊热缓释;CFD 情景模拟;长沙梅溪湖

## Scenario simulation of the influence of lakeside buildings spatial forms on lake thermal release effect in high-density built-up area

LIANG Sheng<sup>1,2,3,4</sup>, CHEN Cunyou<sup>1,2,3</sup>, HU Xijun<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Wei<sup>1,2,3</sup>, LIU Luyun<sup>1,2,3</sup>

1 College of Landscape Architecture, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China

2 Hunan Big Data Engineering Technology Research Center of Natural Protected Areas Landscape Resources, Changsha 410004, China

3 Institute of Urban and Rural Landscape Ecology, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China

4 Foshan Construction Investment Land Company Limited, Foshan 528000, China

**Abstract**: Urban lakes play an important role in mitigating and regulating the urban heat island effect. At present, the effect of lakeside architecture spatial form on the cooling potential of urban lakes is still unclear. The area considered in this study was the Meixi Lake, located in Changsha downtown. This paper verified the spatial law of the thermal slow-release effect of the lake by combining field measurement and Computational Fluid Dynamics (CFD) scenario simulation. The influence of the distance between the receded lakeshore, the enclosure degree of the buildings surrounding the lake, and the height of the buildings adjacent to the lake on the thermal slow-release effect of the lake in the high-density built-up area were discussed. The results showed that: (1) The CFD model used in this study had a good degree of fit for the reconstruction of

**基金项目:**湖南省自然科学基金(2019JJ50990);国家自然科学基金项目(31901363);湖南省"双一流"培育学科(湘教通[2018]469号);中南林 业科技大学研究生科技创新基金项目(CX20192007)

收稿日期:2021-04-12; 网络出版日期:2022-01-07

\* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: chencunyou@163.com

http://www.ecologica.cn

the intensity and influence range of the slow-release effect of lakes in high-density built-up areas, which could be used as an effective tool to evaluate the cooling potential of lakes. The simulation results showed that the slow-release effect of Meixi Lake existed in the range of 550 m downwind. (2) Optimizing the spatial form of lakeside buildings had the most obvious effect on the thermal sustained-release in the downwind area of the lake, with the maximum cooling range reaching 1.86  $^{\circ}$ C and the maximum sustained-release distance to the downwind area of the lake reaching 622 m. (3) The thermal release efficiency of lakes varied with the spatial forms of lakeside buildings. The positive effects of reducing building height and reducing the degree of surrounding buildings on the thermal release of lakes were stronger than those of increasing the distance between buildings to the recedes lakeside. This conclusion can deepen the understanding of the thermal slow-release effect of urban lake water body, and help urban planners to plan and construct urban lakeside space from the perspective of overall thermal environment perception, so as to maximize the ecological benefits of urban lake water body.

Key Words: high-density urban built-up area; lakeside buildings; lake thermal release; CFD scenario simulation; Changsha Meixi Lake

城市湖泊作为城市生态空间重要的组成部分由于具有较大的热容量和蒸发能力,热缓释效应明显,能显 著改善湖滨区域热环境<sup>[1-2]</sup>。城市化进程的加快使得自然地表热力性质不断发送改变,加上人口的不断聚集 以及人为热的大量产生,城市热岛效应逐渐加剧<sup>[3-4]</sup>。由于城市湖滨区域坐拥较好的区位优势,目前临湖空 间开发逐渐失控,城市"湖泊盆地"空间特征明显<sup>[5]</sup>。这不但影响着城市水域景观的美感度,还进一步导致 "湖陆气流"交换不畅,削弱了湖泊水体改善城市小气候的作用。如何在城市有限的湖泊资源下使得其生态 效益最大化,成为了众多学者关注的重点<sup>[6-8]</sup>。

目前大多学者研究城市水体冷岛效应所采用的方法主要为:(1)实地测量研究,通过对水体周边热环境进行定点监测<sup>[9]</sup>,采用数理统计的方法分析水体周边温度的时空变化规律以及影响因素<sup>[10-11]</sup>;(2)遥感地温反演研究,通过遥感技术反演水体周边地表温度或大气温度数据<sup>[12]</sup>,借助 GIS 操作平台分析城市水体的降温强度与其周边环境特征之间的定量关系<sup>[13]</sup>;(3)数值仿真模拟研究,借助计算机流体动力学模型 CFD 或三维微气候模型 ENVI-met 等,对多情景下的水体降温应进行模拟比较,分析不同影响因素的作用机制<sup>[14-15]</sup>。当前研究以遥感技术居多,随着计算机计算能力的增强以及仿真模拟能力的提升,数值模拟与实测交互验证研究已逐渐成为城市水体冷岛研究的主要技术手段之—<sup>[16-17]</sup>。

水体的降温机制研究及其影响因素研究已成为研究城市水体冷岛效应的两大主体内容<sup>[18-20]</sup>,水体通过 促进与周边环境的对流换热带来降温效应,其影响因素研究也得到进一步扩展<sup>[21-22]</sup>。研究表明湖泊热缓释 效应受到湖泊自身景观特征以及周边景观配置的影响<sup>[23-25]</sup>,但目前涉及建筑因素的研究探讨中大多分析建 设用地面积指标与湖泊水体降温的相关性,缺乏对建筑三维形态空间的进一步研究。而已有研究发现城市建 筑的三维形态由于影响城市能量收支平衡和空气流动<sup>[26-27]</sup>,对于城市热环境有较大的影响<sup>[28]</sup>。湖滨不同的 建筑布局等会形成不同的风影区分布(风影区湍流情况复杂,风向不稳定,不利于建筑周边的空气流通)<sup>[29]</sup>, 这很大程度上会限制城市水体的气候调节能力。目前城市建筑空间形态与城市水体热行为间的相互影响研 究较为缺乏,大多数研究仅基于实测数据与周边建筑环境进行定性分析,缺少相应的定量研究。由于有关热 力耦合模型计算的复杂性,同类型仿真模拟研究中缺少对辐射模型、水分蒸发模型做出详细设定,导致模拟结 果的适用性需要进一步论证。为此本文基于平行定点实测数据,以长沙市梅溪湖为例,采用流体模型与热力 耦合的方法,通过 CFD 情景模拟的方式探究高密度建成区湖滨建筑空间形态对城市湖泊热缓释效应的影响, 目的在于探索:(1)高密度建成区城市内湖水体热缓释效应特征(缓释幅度和缓释范围);(2)高密度建成区 湖滨建筑形态对湖泊水体热缓释的影响机制。以期为深入了解高密度建成区城市湖泊热缓释效应的影响因 素提供理论基础,指导城市湖滨规划建设、优化城市湖泊生态效益。

## 1 研究区概况

长沙梅溪湖位于湖南省长沙市湘江新区梅溪湖路,整个水域呈"小提琴"形状,是一个集防洪调蓄、生态

旅游为一体的综合性湖泊。长沙市属亚热带季风气候,夏季以东南风为主,冬季以西北风为主。梅溪湖水域 面积约为1.75 km<sup>2</sup>,岸线长度为9 km。梅溪湖水域位于长沙主城区内且周边建筑密度较大,临湖建筑界面以 高密度住区为主,具有高密度建成区型城市内湖的典型性,建筑因素层面对于水体生态的效益正常发挥干扰 性大。根据实地勘察并结合《民用建筑设计统一标准》(GB 50352—2019)中建筑分类对样本湖泊周边建筑进 行了划分统计(图1),研究区域中共有建筑935 栋,其中低层建筑91 栋,多层建筑469 栋,高层建筑295 栋, 超高层建筑80 栋。



图 1 湖泊周边建筑类型 Fig.1 Type of building around the lake

#### 2 研究方法

- 2.1 平行定点实测
- 2.1.1 样线测点设置

以长沙梅溪湖及距湖 750 m 范围内周边区域作为研究样本,面积约 8.95 km<sup>2</sup>。根据梅溪湖周边建筑交通 及植被绿化等情况分别在梅溪湖相对城市主导风的上风向、下风向及垂直向区域筛选出三条样线(图 2),分 别位于近湖路(样线 1)、麓云路(样线 2)、近湖八路(样线 3)。研究表明 100—150 m 范围内小气候的尺度效 应明显<sup>[30]</sup>,故各样线按临湖 0 m、150 m、300 m、450 m、600 m 布置 5 个测点(共计 15 个测点),该距离范围内 可以有效反映各测点周边的热环境特征<sup>[31]</sup>。

2.1.2 测量仪器与方法

平行定点实测采用的仪器(图3)有:德国 TESTO08H1 温湿度计(分辨率:0.11 ℃,0.1% RH),用于平行定 点实测湖泊周边环境的温湿度;GM890 数字风速仪(测量范围:0—45 m/s),用于评估实测时测点周边风环 境,以保证实测数据的科学有效性。为了避免测量条件的一致性,所有仪器使用均在遮阳条件下进行,在测量 过程中避免长时间的裸露暴晒,每次测量数据读取三次。

### 2.1.3 测量时间与内容

为准确获取梅溪湖周边热环境状况,研究小组于2019年6月至8月选取天气状况良好(晴朗少云、微风)的9d时间(6月20日、6月25日、6月26日、7月1日、7月2日、7月3日、8月23日、8月24日、8月31日) 对研究区域样线上15个测点进行全天候小气候跟踪测量(测量时间为早上8:00至晚上19:00),主要测量内 容为距离地面1.5m高度处的大气温度、相对湿度、风速风向,测点数据每隔1h采集一次。



图 2 测点布置图 Fig.2 Layout of measuring points

## 2.2 CFD 情景模拟

2.2.1 模拟计算过程

计算机流体动力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)的基本思想是用一系列有限的离散点上的值的集 合来代替原来空间和时间坐标中连续的物理场(如温 度场、湿度场、速度场等),通过对模拟对象建立起的物 理湍流模型进行数值计算,得出模拟对象周边区域的气 流分布情况,从而为城市热环境的研究提供精准的可视 化数据<sup>[32]</sup>。本研究 CFD 模拟研究主要通过图形设计 辅助工具 AUTO CAD2015、ANSYS 2020R2 计算平台以 及惠普 Z840 台式工作站完成。



图 3 实地测量图 Fig.3 Field measurement pictures

立起研究区域的三维实体模型,然后再导入 Fluent 软件中的 Design Modeler 中进行简化清理,以保证模拟软件的顺利运行。

(2)确定计算域。参考 Franke 等<sup>[33]</sup>的模拟计算原则,在几何物理模型的基础上扩展得到模拟计算域:长(东西方向)×宽(南北方向)×高(设地面高度为0)= 3880 m×5280 m×260 m,这样可以保证模型来流均匀、 去流与研究对象作用完全。

(1)创建几何模型。在 AUTO CAD2015 软件中建

(3) 划分计算网格。在 ANSYS MESHING 中采用 非结构型网格对计算区域进行划分(图4),有利于提升 局部区域的计算精度<sup>[34]</sup>,同时对建筑底部、湖泊水体边 缘网格进行局部加密,最终所划分网格的体积均为正 值,网格数量约为1827万,节点数量约为347万,其中



Fig.4 Mesh generation for study area

约90%网格的偏移度小于0.5,网格质量良好。

(4)选取计算模型。在遵循三大控制方程的基础上(动量方程、能量方程、连续性方程)对湍流模型、热辐射方程、组分运输模型进行控制设定。湍流模型主要采用 RNG k-ε 二方程模型,该模型在滨水环境的模拟预测中具有较好的适应性<sup>[35]</sup>。在辐射模型中主要对于建筑表皮及硬质地面的辐射给予一定的控制方程,采用 Fluent 中自带的太阳加载模型<sup>[36]</sup>。对于湖泊蒸发产生的水蒸气(H<sub>2</sub>O)以及空气当中主要的组成成分氮气(N<sub>2</sub>)、氧气(O<sub>2</sub>)的扩散输运采用组分运输模型进行模拟。

(5)设置边界条件。参考《城市居住区热环境设计标准》中长沙夏季典型气象日气象数据并且结合平行 定点实测值的气候条件作为原始算例的初始条件,设定长沙市夏季典型风向夏季主导风向为 SE,夏日室外平 均风速取 1.8 m/s,温度为 35.47 ℃,其他模拟参数如表 1 所示。

Table 1       CFD simulation parameter settings					
设置部分 Setting part	分类 Classification	参数设置 Parameter settings			
模型选择 Model selection	湍流模型	Stardard k-epsilon[2 eqn]			
	能量模型	Energy Equation 模型			
计算区域 Calculation region	外部区域	3880 m×5280 m×260 m			
近壁面处理 Near wall treatment	壁面处理	General Log Law 壁面方程			
计算网格 Computational grid	网格数量	18277159			
	网格分析	非结构网格			
边界条件 Boundary condition	入口边界	速度入口,T=35.47 ℃,v=1.8 m/s			
	出口边界	压力出口,出口表压=0 KPa			
	地面边界	光滑无滑移壁面			
	顶面边界	对称边界			
	建筑表面边界	光滑无滑移壁面			
残差收敛标准 Residual convergence criteria	能量方程的残差	小于10—6			
	连续性方程、各速度分量	小于10—3			

表 1 模拟参数设置 able 1 CFD simulation parameter setti

## 2.2.2 模拟方法验证

通过在 CFD-Post 里面建立高 1.5 m(z=1.5 m)的截面生成研究区域温度云图,选点读取测点模拟结果,各 测点 14:00 时实测平均温度与模拟温度对比见图 5。7 月份各测点实测平均温度为 35.47 ℃,模拟平均温度 为 36.25 ℃,两者温差为 0.77 ℃,由于计算机的计算承载能力有限,对研究场地物理模型构建时进行了简化处 理(未考虑植物模型),使得模拟温度略高于实测温度。通过实测结果与模拟结果的拟合曲线图(图 6)可知, *R*<sup>2</sup> 为 0.7182,CFD 模拟结果与实测结果吻合程度较高,可见 CFD 能够很好的再现高密度建成区湖泊水域周 边整体热环境,模拟结果已具备科学研究的合理性,可以有效的开展后续的模拟研究。

## 2.2.3 情景模拟设置

临湖建筑的高度聚集使得湖滨区域"湖泊盆地"空间特征明显,湖岸周边建设围合程度增加阻碍湖泊与周边环境的气流交换,且由于高层建筑对于来流的风挡作用比较明显,对于湖泊上方水汽的流动干扰较大,阻隔了湖泊水气的水陆交换过程,影响湖泊的热缓释效能,研究采用减法原则通过改变建筑后退湖岸距离(去掉临湖 100 m、200 m 内建筑)(图 7)、改变环湖建筑围合程度(去掉每相邻 1 个、2 个建筑)(图 8)、降低临湖建筑高度(临湖建筑高度降低 10 m、20 m)(图 9)模拟分析研究区域温度场特征,其他参数设置与实际算例保持一致。

## 3 模拟结果与分析

## 3.1 实际算例

图 10 为实际算例温度云图、风场云图,表 2、表 3 为实际算例温度场、风场读取结果,整个区域温度值分

布在 29.78—39.36 ℃间,风速值分布在 0.06—3.59 m/s 间。通过对实际算例梅溪湖水体周边夏季 14:00 时 1. 5 m 处风热环境的模拟表明:



0 <u>500</u> m 图 8 改变环湖建筑围合程度

Fig.8 Change the distance between the building and the lake shore

(1) 梅溪湖周边风场复杂多样,受周边建筑影响较大。由于建筑高度不一,对气流的扰动性较大,气流湍动性增强,上下风向风速值差异明显,下风向区域速度高于上风向区域,差值可达 0.03—1.73 m/s。上风向由于存在大量的联排建筑群,通风间距有限,风阻作用明显,易形成大面积的静风区,速度为 0.23—0.27 m/s。下方向建筑多为行列式布局,"狭管效应"明显,易出现较大值风速区,最高值可达 3.09—3.13 m/s。(2) 湖泊



图 9 降低临湖建筑高度 Fig.9 Change the distance between the building and the lake shore

上下风向区域温度差明显,与风场关系密切。下风向区域的热缓释强度明显强于其他明显区域,整体差异可 达0.82—2.76 ℃,这进一步说明了湖泊热缓释效应空间规律明显。由于梅溪湖上风向高密度的高层建筑组 团造成通风不畅,使得上风向带来的热空气在建筑底部堆积,造成局部热量的不断积累,形成低速高温区,而 在下风向区域由于湖泊上方水汽扩散受平流作用形成低温高速区。(3)湖泊水体通过将冷空气扩散到附近 周边区域来产生一定范围的热缓释作用距离,由于主导风的加速助推作用促进湖泊水体对流换热作用,湖泊 在下风向的最远热缓释距离可达 550 m。



图 10 实际算例风场、温度场模拟结果

Fig.10 Actual simulation results of wind field and temperature field

表 2	实际算例风场分布一览表/(	m/s	)
-----	---------------	-----	---

Table 2	List of the	wind field	distribution in	actual	calculation	example

风速大小 Wind speed	上风向 Upwind	下风向 Downwind	垂直向(东北) Vertical (Northeast)	垂直向(西南) Vertical (Southwest)
最高值 Maximum value	1.36—1.40	2.49—2.53	1.93—1.96	2.91-2.95
最低值 Minimum value	0.23—0.27	0.21-0.25	1.47—1.50	1.36—1.40

#### 表 3 实际算例温度场分布一览表/℃

	Table 3 List of the tem	perature field distribution	in actual calculation example	
温度大小 Femperature	上风向 Upwind	下风向 Downwind	垂直向(东北) Vertical (Northeast)	垂直向(西南) Vertical (Southwest)
最高值 Maximum value	37.07—37.17	36.24—36.35	36.97—37.04	36.66—36.76
最低值 Minimum value	36.86—36.97	34.13—34.21	36.55—36.66	36.14—36.24

## 3.2 改变建筑后退距离

由于湖泊热缓释效应在上风向、垂直向并不明显,为使得数据差异性分析更为明显,在情景模拟对比分析

时实际算例下方向温度选用最高值,上风向、垂直向选用最低值。增大临湖建筑后退距离的模拟结果(图 11、 表 4)表明:

(1)整体上,增大临湖建筑后退距离使得临湖范围内大量高层建筑消失,有效地扩展了水气的传输途径, 改善了湖滨风环境,强化了湖泊的缓释效应,且对下方向的缓释效应最为明显,最大降温幅度分别为0.50℃、 1.36℃,对上风向的最大降温幅度分别为0.23℃、0.59℃,对垂直向的最大降温幅度分别为0.33℃、0.37℃。 (2)在影响差异方面,建筑后退200m(共清退140栋建筑)可以很大程度上强化湖泊热缓释效果,相比建筑后 退100m(共清退建筑52栋),建筑后退200m的对下风向的最大降温幅度增加0.82℃,对上风向的最大降温 幅度增加0.36℃。但在垂直向由于建筑后退200m使得原有建筑下垫面均被设为硬质铺面,受地面辐射热 增强以及缺少建筑遮阴作用等因素影响,降温幅度明显小于建筑后退100m。(3)在缓释距离方面,增大建筑 后退距离使得缓释距离不断向下风向扩展,建筑后退100m最远缓释距离为552m,由于建筑后退200m后 使得下风向区域的超高层以及高层建筑被清除,高层建筑风挡作用减弱,湿冷气流向建筑内部渗透形成多处 临湖低温区,下风向临湖区域的低温区不断外扩,湖泊对下方向区域的热缓释范围达到602m范围内,缓释距 离向外扩展了50m。



0 500 m

图 11 改变建筑后退距离研究区域温度场模拟结果

Fig.11 Simulation results of temperature field with changing the building retreat distance

表 4	改变建筑后退距离情景模拟下温度场分布	一览表/℃
-----	--------------------	-------

Table 4	Temperature fie	d distribution	under scenari	o simulation o	f changing	the building	retreat di	istance
	1							

模拟情景 Simulated scenario	上风向 Upwind	下风向 Downwind	垂直向(东北) Vertical (Northeast)	垂直向(西南) Vertical (Southwest)
实际算例 Actual simulation	36.86—36.97	36.24—36.35	36.55—36.66	36.14—36.24
建筑后退 100 m Building setback 100 m	36.65—36.74	35.76—35.85	36.88—36.97	36.50—36.61
温度变化 Temperature variation	0.21-0.23	0.48—0.50	0.31—0.33	0.36—0.37
建筑后退 200 m Building setback 200 m	36.28—36.38	34.89—34.99	36.48—36.58	36.19—36.28
温度变化 Temperature variation	0.58—0.59	1.35—1.36	0.07—0.08	0.04—0.05

#### 3.3 改变环湖建筑围合程度

由于湖泊周边建筑排布并不均一,建筑形式复杂多样,准确控制改变环湖建筑围合程度难度较大,研究通 过去掉每相邻建筑数量对改变环湖建筑围合程度进行表征。改变环湖建筑围合程度模拟结果(图 12、表 5) 表明:

(1)整体上,去掉相邻建筑数量由于可以一定程度优化建筑群内部风环境,提高临湖空间界面的引风属

性,对于提高湖泊的缓释效能具有积极作用。去掉每相邻1个建筑和去掉每相邻2个建筑最大降温幅度分别 为 1.18 ℃、1.73 ℃,对于上风向的最大降温幅度分别为 0.35 ℃、0.46 ℃,上下风向的缓释程度存在很大差异, 达 0.83—1.27 ℃。(2)在影响差异方面,去掉每相邻 2 个建筑和掉每相邻 1 个建筑带来的缓释效能差异不明 显,两者对下风向的降温幅度温度差为0.55℃,对上风向的降温幅度温度差仅为0.11℃。(3)在缓释范围方 面,改变环湖建筑围合程度使得研究区域形成畅通的通风廊道,湖泊对下方向区域的最远热缓释作用范围扩 大到 582 m 范围,去掉每相邻 2 个建筑间距后,湿冷来流不断向西南向渗透,临湖低温区向西南向偏移,缓释 效应显著。



#### 图 12 改变环湖建筑围合程度研究区域温度场模拟结果

#### Fig.12 Simulation results of temperature field with changing lake bank enclosure degree

Table 5 Temperature field distribution under scenario simulation of changing lake bank enclosure degree							
模拟情景 Simulated scenario	上风向 Upwind	下风向 Downwind	垂直向(东北) Vertical (Northeast)	垂直向(西南) Vertical (Southwest)			
实际算例 Actual simulation	36.86—36.97	36.24—36.35	36.55—36.66	36.14—36.24			
去掉每相邻 1 个建筑 Remove one adjacent building	36.53—36.62	35.08—35.17	36.62—36.71	36.71—36.80			
温度变化 Temperature variation	0.33—0.35	1.16-1.18	0.05-0.07	0.56—0.57			
去掉每相邻 2 个建筑 Remove two adjacent buildings	36.42—36.51	34.53—34.62	36.87—36.96	35.88—35.97			
温度变化 Temperature variation	0.44—0.46	1.71-1.73	0.30-0.32	0.26-0.27			

表 5	改变环湖建筑围合程度情景模拟下温度场分布一览表/ ${}^{ extsf{C}}$
Tomporatura field	distribution under sconario simulation of changing lake bank analogurg

## 3.4 改变临湖建筑高度

降低临湖建筑高度模拟结果(图13、表6)表明:

(1)整体上,降低临湖建筑一定程度上减小了来自高层建筑的风挡作用,临湖建筑高度降低 10 m、20 m 能使得梅溪湖周边低层建筑或高层建筑消失,建筑的阻隔风挡作用被减弱,对下方向的最大降温幅度分别为 0.80 ℃、1.86 ℃,对于上风向的最大降温幅度分别为0.51 ℃、0.66 ℃。(2)在影响差异方面,临湖建筑高度的 不断降低对于下方向的温度影响较为明显,临湖建筑降低10m时对下风向的降温幅度为0.78—0.80℃,临湖 建筑降低 20 m 时对下风向的降温幅度为 1.86 ℃,临湖建筑的进一步降低使得下风向区域降温幅度提高 1.06—1.08 ℃, 而降低建筑使得垂直向大量建筑被清退, 硬质铺面的增加使得垂直向增温明显, 垂直向受湖泊 热缓释作用有限。(3)在缓释范围方面,临湖建筑高度降低10m对下方向区域的最远热缓释作用范围与实 际算例差异不大,最远热缓释距离为559 m。临湖建筑高度降低 20 m 对下方向区域的最远热缓释距离 575 m,并逐渐扩展到垂直向区域,温度达35.49—35.60 ℃。



#### 图 13 改变临湖建筑高度研究区域温度场模拟结果

Fig.13 Simulation results of temperature field with changing building height near the lake

Table 6 Temperature field d	istribution under scena	rio simulation of chan	iging building neight near	the lake
模拟情景 Simulated scenario	上风向 Upwind	下风向 Downwind	垂直向(东北) Vertical (Northeast)	垂直向(西南) Vertical (Southwest)
实际算例 Actual simulation	36.86—36.97	36.24—36.35	36.55—36.66	36.14—36.24
临湖建筑高度降低 10 m Decrease the building height by 10 m	36.37—36.46	35.46-35.55	36.56—36.65	36.65—36.74
温度变化 Temperature variation	0.49-0.51	0.78-0.80	0.01	0.50-0.51
临湖建筑高度降低 20 m Decrease the building height by 20 m	36.20—36.33	34.38—34.49	37.14—37.25	36.92—37.03
温度变化 Temperature variation	0.64—0.66	1.86	0.59	0.78—0.79

#### 表 6 改变临湖建筑高度情景模拟下温度场分布一览表/℃

#### 4 结论与展望

## 4.1 研究结论

本文聚焦于高密度建成区湖泊水体,试图将城市湖泊水体热缓释影响机制的基础性研究逐步扩展至湖滨 区域的应用研究中,通过 CFD 情景模拟方式重点探讨了高密度建成区 3 组湖滨建筑空间形态对湖泊热缓释 效应的影响。主要结论如下:

(1)由于梅溪湖周边受到高强度建设区的"围堵",水体与周边区域的空气流通受阻,水体在夏季的缓释 效能未能充分体现。本文所用计算模型能够很好的表征出高密度建成区湖湖滨风热环境特征,可以有效地作 为城市环境中湖泊水体热缓释效能评价工具。

(2)高密度建成区建筑空间形态在一定程度上对湖泊的热缓释效能产生了消极影响,增大建筑后退距 离、降低临湖建筑高度、缩小环湖建筑围合程度均能够强化湖泊的热缓释作用,其中增大建筑后退距离的强化 作用最弱。

(3)受城市主导风影响,无论改变哪种空间形态,湖泊水体对下风向的热缓释强度始终强于垂直向和上风向区域,湖区规划建设需充分考虑城市通风廊道建设与水体生态效益间的相互影响关系。

(4)扩大建筑后退湖岸距离使得来自高层建筑消极的阻隔作用减小,有利于湿冷空气流通,建筑后退 100 m 和建筑后退 200 m 分别能使梅溪湖周边温度下降 0.50 ℃、1.36 ℃,建筑后退 200 m 后湖泊水体的热缓释强度得到显著提升。

(5) 增强临湖空间界面的多孔性及引风属性有利于湖泊建筑内部的散热及水气交换,去掉每相邻1个建筑和去掉每相邻2个建筑有效扩展了水气的传送途径,梅溪湖的缓释温度分别可达1.18 ℃、1.73 ℃。

(6) 增大滨水界面的梯度性以及加强湖泊与建筑的互动性可使得湖泊的热缓释效能得到进一步优化, 建

筑高度降低 10 m 和建筑高度降低 20 m 分别能使温度下降 0.78 ℃、1.86 ℃,梅溪湖的最远热缓释距离达 575 m,并逐渐扩展到垂直向区域。

4.2 研究展望

目前,在湖滨空间风热环境的研究中仍存在很大程度的模拟不确定性。由于考虑到计算机的计算承载能力,为了便于网格划分,大部分同类型研究均对实际场地物理模型进行了优化处理,缺少对场地植物进行建模 模拟等使得城市蓝绿基础设施的协同冷却作用<sup>[37]</sup>并未在仿真模拟中得到很好的体现。同时,由于计算机硬 件条件的限制以及模拟场地较大,本文在计算模型处理上较前人的研究虽有一定优化但仍存在局限和不足, 如未考虑到人为热、土壤传热以及植被的蒸腾作用等,这在一定程度上会影响模拟结果的精度,需要在今后的 研究中对计算模型进行进一步优化以及对 CFD 模拟进行全局的不确定性量化分析。

在将来的湖滨规划建设中应更为重视城市湖泊水域这类生态冷源对城市热环境的缓释调节能力以及城 市空间形态对湖泊热缓释效应的影响,不断开展多软件交互验证、多时段并行监测、多空间尺度比对的综合研 究,不断完善计算模型,充分论证城市空间形态指标与湖泊小气候的关联性,协同考虑城市蓝绿空间的降温潜 力,以至于能充分利用自然力(湖泊等水体资源)。同时,不断完善建设以风热环境适宜度为优化目标的规划 设计应用平台,构建湖滨小气候要素评价体系,兼顾城市发展与城市热量的收支平衡,营造出宜人的湖滨小气 候条件,并在城市规划设计阶段进行校验评估,逐步运用于政府管理部门决策过程中,不断突出城市蓝色空间 的多元服务供给功能。

#### 参考文献(References):

- [1] 岳文泽, 徐丽华. 城市典型水域景观的热环境效应. 生态学报, 2013, 33(6): 1852-1859.
- [2] 杨丽, 史泽道, 刘晓东, 李瑜. 夏季水体对于建筑周围环境的影响研究. 建筑科学, 2019, 35(6): 98-107.
- [3] 朱春阳. 城市湖泊湿地温湿效应——以武汉市为例. 生态学报, 2015, 35(16): 5518-5527.
- [4] Ma L, Wang Y Y, Liang Z, Ding J Q, Shen J S, Wei F L, Li S C. Changing effect of urban form on the seasonal and diurnal variations of surface urban heat island intensities (SUHIIs) in more than 3000 cities in China. Sustainability, 2021, 13(5): 2877.
- [5] 陈存友, 胡希军, 郑霞. 城市湖泊景观保护利用规划研究——以益阳市梓山湖为例. 中国园林, 2014, 30(9): 42-45.
- [6] 庄晓林,段玉侠,金荷仙.城市风景园林小气候研究进展.中国园林,2017,33(4):23-28.
- [7] 王甫园, 王开泳, 陈田, 李萍. 城市生态空间研究进展与展望. 地理科学进展, 2017, 36(2): 207-218.
- [8] 卞晴, 赵晓龙, 刘笑冰. 水体景观气候调节性研究进展与展望. 风景园林, 2020, 27(6): 88-94.
- [9] Hathway E A, Sharples S. The interaction of rivers and urban form in mitigating the urban heat island effect: a UK case study. Building and Environment, 2012, 58: 14-22.
- [10] 吕鸣杨,金荷仙,王亚男.城市公园小型水体夏季小气候效应实测分析——以杭州太子湾公园为例.中国城市林业,2019,17(4): 18-24.
- [11] 曾素平, 时琢, 赵梅芳, 刘发林, 王光军, 林杨, 李沁园, 向枝远, 陈小伟, Ogbodo U S. 城市水体对热岛的缓冲性能沿河岸距离的变化 规律. 生态学报, 2020, 40(15): 5190-5202.
- [12] 花利忠, 孙凤琴, 陈娇娜, 唐立娜. 基于 Landsat-8 影像的沿海城市公园冷岛效应——以厦门为例. 生态学报, 2020, 40(22): 8147-8157.
- [13] 张伟,蒋锦刚,朱玉碧.杭州典型城市湿地温度效应的季节和类型差异.华东师范大学学报:自然科学版,2015,(4):123-131.
- [14] 聂冲,杨军,黄从红.北京城区地表水体对城市热环境的调节作用分析.应用基础与工程科学学报,2019,27(6);1258-1268.
- [15] 苏东生, 文莉娟, 赵林, 李照国, 杜娟. 青海湖夏秋季局地气候效应数值模拟研究. 高原气象, 2019, 38(5): 944-958.
- [16] 戴茜,陈存友,胡希军,胡颖炫.建筑因子对城市湖泊温度效应的模拟研究——以湖南烈士公园湖泊为例.生态环境学报,2019,28(1): 106-116.
- [17] 梁胜, 陈存友, 胡希军, 胡颖炫, 赵荻. 基于 CFD 的建筑对城市湖泊湿度效应的影响模拟. 生态科学, 2020, 39(2): 191-198.
- [18] 任侠, 王咏薇, 张圳, 杨亦辰, 胡诚, 康汉青. 太湖对周边城市热环境影响的模拟. 气象学报, 2017, 75(4): 645-660.
- [19] Li C, Yu C W. Mitigation of urban heat development by cool island effect of green space and water body. Lecture Notes in Electrical Engineering, 2014, 261: 551-561.
- [20] 奉智慧,刘雅婷,袁磊,谭明艳.城市公园冷岛效应影响机制研究方法进展.中国园林,2016,32(9):113-115.
- [21] 纪鹏,朱春阳,盛云燕.不同形状城市湿地对周边环境温湿度的影响.应用生态学报, 2017, 28(10): 3385-3392.

#### http://www.ecologica.cn

- [22] Perini K, Magliocco A. Effects of vegetation, urban density, building height, and atmospheric conditions on local temperatures and thermal comfort. Urban Forestry & Urban Greening, 2014, 13(3): 495-506.
- [23] 王豫,赵小艳,李艳春,王咏薇,朱婷婷.宁夏平原湿地面积动态演变对局地气候效应的影响.生态环境学报,2018,27(7):1251-1259.
- [24] 赵芮, 申鑫杰, 田国行, 郭煜琛, 何瑞珍. 郑州市公园绿地景观特征对公园冷岛效应的影响. 生态学报, 2020, 40(9): 2886-2894.
- [25] 张棋斐, 文雅, 吴志峰, 陈颖彪. 高密度建成区湖泊水体的热缓释效应及其季相差异——以广州市中心城区为例. 生态环境学报, 2018, 27(7): 1323-1334.
- [26] 刘丹,于成龙.城市扩张对热环境时空演变的影响——以哈尔滨为例.生态环境学报,2018,27(3):509-517.
- [27] 周伟奇,田韫钰.城市三维空间形态的热环境效应研究进展.生态学报,2020,40(2):416-427.
- [28] 孙喆. 高密度城区形态要素对热环境的影响作用——以北京市五环内区域为例. 生态环境学报, 2020, 29(10): 2020-2027.
- [29] An K, Fung J C H, Yim S H L. Sensitivity of inflow boundary conditions on downstream wind and turbulence profiles through building obstacles using a CFD approach. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2013, 115: 137-149.
- [30] 栾庆祖, 叶彩华, 刘勇洪, 李书严, 高燕虎. 城市绿地对周边热环境影响遥感研究——以北京为例. 生态环境学报, 2014, 23(2): 252-261.
- [31] Davis A Y, Jung J, Pijanowski B C, Minor E S. Combined vegetation volume and "greenness" affect urban air temperature. Applied Geography, 2016, 71: 106-114.
- [32] 孙武, 沈子桐, 乔志强, 孙靓, 张佳滨, 张坤, 许伟. 城市主城区立体模型的构建与风环境模拟——以广州主城区为例. 生态学报, 2021, 41(7): 2632-2641.
- [33] Franke J, Hellsten A, Schlunzen H, Carissimo B. The COST 732 Best Practice Guideline for CFD simulation of flows in the urban environment: a summary. International Journal of Environment and Pollution, 2011, 44(1/4): 419-427.
- [34] Yang L, Liu X D, Qian F. Research on water thermal effect on surrounding environment in summer. Energy and Buildings, 2020, 207: 109613.
- [35] 宋晓程, 刘京, 赵宇. 北方滨水区街区形态对城市微气候的影响. 建筑科学, 2019, 35(10): 191-198.
- [36] 宋晓程, 刘京, 叶祖达, 郭亮. 城市水体对局地热湿气候影响的 CFD 初步模拟研究. 建筑科学, 2011, 27(8): 90-94.
- [37] 苏王新,常青,刘筱,张刘宽.城市蓝绿基础设施降温效应研究综述.生态学报,2021,41(7):2902-2917.