

基于物理环境模拟优化的多尺度城市设计方法探索——以钱塘江滨水区为例

Exploration of Multi-scale Urban Design Method Based on Physical Environment Simulation and Optimization—Taking Qiantang River Waterfront as an Example

朱 晓
杨俊宴*
石 邢
闵鹤群

ZHU Xiao
YANG Junyan
SHI Xing
MIN Hequn

摘 要: 在国土空间治理背景下, 解决城乡发展不协调、生态系统不健康等问题, 实现健康可持续的城市物理环境, 已成为城市发展的核心议题。风环境、热环境、声环境的数据综合分析及城市物理环境与空间形态的耦合优化研究, 为城市空间品质提升提供了技术方法支撑。从城市物理环境量化模拟入手, 结合多尺度城市设计整体性实践, 构建物理环境现状模拟-耦合优化-设计提升的方法框架, 并通过钱塘江滨水区的实证研究, 探索了城市设计过程中基于城市物理环境模拟优化的城市空间形态布局及多尺度优化策略, 以期将精细化的城市设计思维融入空间规划全过程。

关 键 词: 风景园林; 物理环境; 生态设计技术; 城市设计

文章编号: 1000-6664(2023)07-0071-06
DOI: 10.19775/j.cla.2023.07.0071
中图分类号: TU 986
文献标志码: A
收稿日期: 2021-03-31
修回日期: 2023-03-01
基金项目: 国家自然科学基金重点项目(编号51838002)和国家自然科学基金面上项目(编号51578128)共同资助

Abstract: In the context of land and space governance in the new era of ecological civilization, solving the problems of uncoordinated urban and rural development and unhealthy ecosystem, and creating a high-quality urban physical environment has become an important theme of urban development. The comprehensive analysis of the data of wind environment, thermal environment and acoustic environment and the coupling optimization of urban physical environment and spatial form have become one of the keys to the improvement of urban quality. Starting with the quantitative simulation of multi-scale urban physical environment, combined with the integrated practice of multi-scale urban design, this paper constructs a methodological framework of physical environment status simulation coupling optimization design improvement, and through the empirical exploration of Qiantang River waterfront, explores the urban spatial form layout and multi-scale optimization strategy based on the simulation and optimization of urban physical environment in the process of urban design, in order to integrate the refined and digital urban design thinking into the spatial planning process.

Keywords: landscape architecture; physical environment; ecological design technology; urban design

在生态文明空间治理背景下, 需要对城市空间进行全域全要素的科学引导与管控^[1]。中国城市正进入城镇化快速发展中后期, 城市人口扩张和城市用地蔓延引发城市空间形态剧烈变化, 随之带来城市热岛、雾霾、噪声污染、生态环境破坏等问题, 直接导致城市人居环境品质降低。在高强度的城市建设和公共活动影响下, 如何通过城市设计技术手段^[2], 在不同层次与尺度下通过不同空间治理方式^[3], 合理创建高品质的城市物理环境, 也随之成为城市发展的核心议题。

城市空间形态是城市实体环境及各类城市活动的空间结构与形式, 城市物理环境则与城市

空间形态关系密切^[4]。国际上对城市物理环境与城市空间关系的耦合研究可以追溯到19世纪初 Luke Howard的《伦敦气候》^[5], 通过对伦敦10年(1807—1816年)气候变化的分析, 观测到热岛现象等城市所特有的物理环境问题, 从此开始了系统化的城市物理环境研究。国际上应对气候变化健康风险的适应性设计经验包括制定政策与计划、提供技术支持和实施信息监测等^[6]。有关城市物理环境的研究方法经历了从实地监测、实验室仿真到计算机模拟的演进过程, 其中, 针对热、风、声等单一要素特征规律的研究较多。在热环境要素研究中, Hamoodi结合实地测量

和遥感数据研究城市土地利用类型与土地覆盖面间的热环境关系^[7]; Areti等结合2 313份调查问卷和雅典城市小气候数据, 研究了基本气象因素与季节性热舒适度对市民的影响^[8]。在风环境要素研究中, 刘滨谊等提出风环境自适应的住区绿地布局优化策略^[9-10]; 甘月朗等针对板式住区空间形态与风环境相关性分析, 提出将“孔隙率”与“有效皱褶率”等作为板式住区空间形态控制指标^[11]。在声环境要素研究中, 佟欢等针对城市噪声污染区, 利用GIS技术统计分析, 总结出不同尺度下城市空间形态与声环境的耦合关系^[12]。

相较于城市空间形态和单一城市物理环境要

* 通信作者(Author for correspondence) E-mail: yjy-2@163.com

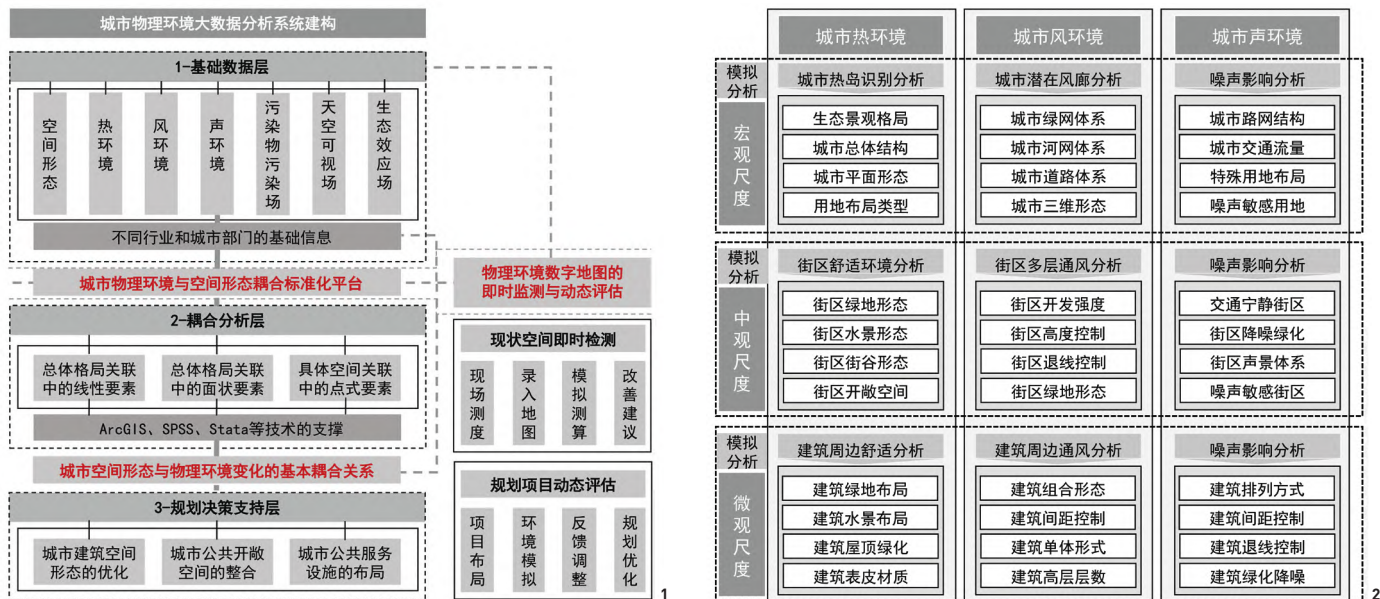


图1 城市物理环境数据分析系统建构框架

图2 物理环境模拟分析与城市设计多尺度交互逐级优化过程

素的量化研究，当前风热等城市物理环境与城市空间形态耦合的研究主要集中在城市街区等中小尺度层面。刘滨谊等^[13]以城市街道为研究对象，建立街道空间与风热等要素的舒适度作用关系；洪波等^[14]基于冬季风热物理环境实测模拟，提出改善住区室外环境的植被优化设计方法；李辰琦等^[15]则通过微气候模拟分析改善住区风光热环境的舒适度，避免高层风及永久日影等不利影响。

随着计算机技术和数据分析技术的进步，物理环境分析技术迅速发展起来，以其突出的计算、模拟和数据处理能力^[16]，以及更为科学缜密和灵活高效的特点，被广泛应用于城市设计领域，实现了由“生态化”向“数字化”的转型^[17]。本文在既有物理环境与城市形态耦合研究的基础上，重点探讨了城市物理环境模拟分析与多尺度城市设计方法的结合过程，对基于物理环境模拟优化的城市设计方法进行探索。

1 基于物理环境模拟优化的多尺度城市设计框架

1.1 多尺度城市设计的整体性特征

具体包括以下3个层面。1)整体的设计思维。将“三境三场”(热环境、风环境、声环境、天空可视场、大气污染物扩散场、生态效应场)的理念融入设计全过程。2)整体的技术手段。结合空间形态与物理环境数字化耦合分析技术，搭建城市空间形态与“三境三场”等物理环境的关系模型，形成物理环境综合分析技术簇

群。3)整体的优化层次。通过城市物理环境数据综合分析，对不同尺度城市设计中的不同空间要素进行优化。

1.2 城市设计中的物理环境数据分析系统

1)城市物理环境数据的空间化转译与分层建构。将物理环境数据转译成能直观反映城市物理环境状况的数字地图，包含“空间形态-热环境-风环境-声环境-污染物污染场-天空可视场-生态效应场”多个数据维度，以及“基础数据层、耦合分析层、规划决策支持层”。2)叠合关联性识别建构物理环境数字地图，进而分析耦合逻辑关系。不同维度的数据进行交叉耦合分析构成耦合分析层，并结合分析结论运用到规划实践中，构成规划决策层，如建筑形体布局 and 空间形态优化的决策，以及公共开敞空间的整合等。3)物理环境数字地图的即时监测与动态评估。依托城市物理环境数字地图对城市进行即时监测和动态评估：即时监测城市物理环境；对于新设计项目进行定时定点的环境影响评估(图1)。

1.3 物理环境模拟分析与多尺度城市设计逐级优化

明确物理环境在多尺度城市设计过程中的模拟分析要点，并结合城市形态耦合研究，建立宏观-中观-微观尺度的城市设计逐级优化框架(图2)。1)宏观尺度城市设计优化：结合现状物理环境模拟，较精确地识别出城市片区范围内的通风廊道及城市热岛点，从而优化山水骨架、水绿廊道和路网形态等，并充分利用舒适宜居的

区域布置公共空间或居住用地，从而实现城市虚实骨架的整体形态结构优化。2)中观尺度城市设计优化：在宏观尺度优化的基础上，通过对优化街区设计前后的物理环境模拟分析对比，提出街区尺度容积率、三维形态控制高度、路网布局、水绿空间布局和噪声敏感用地布局等优化建议。3)微观尺度城市设计优化：针对建筑群落及其外部空间，物理环境的模拟往往会结合实测，更加关注建筑形态与建筑布局方式，从而提出实施性较强的建筑景观布局、建筑围合及朝向方式、植物配置等建议。

2 钱塘江滨水区物理环境现状模拟

2.1 钱塘江案例选择与数据分析

选取杭州市钱塘江滨水区作为研究对象(图3)。研究范围包括钱塘江及其两侧的纵深地带，上游起于富阳区与桐庐交界的新桐区块(渚渚江富春江口)，下游止于下沙及萧山大江东东界，全长约135km(图4)。将周边市域范围热、风等物理环境进行整体模拟，从而更好地得出滨水片区现状问题与设计优化策略。

通过对研究区热、风、声环境与城市空间叠合分析，研究宏观尺度下城市物理环境中的矛盾冲突区域，例如城市热岛冷岛、城市静风区涡流区、城市声污染区等，从而在后续设计中进行形态控制与优化。进一步在中微观尺度对现状已有的潜力风廊道与声景观资源及风热舒适区等进行深化设计，以营造舒适宜居的城市环境。

表1 城市热舒适度特征分区

温度标/℃	特征
$T < 30$	热环境舒适区, 适宜人们正常活动
$30 \leq T < 35$	热环境可接受区, 热舒适性尚可
$35 \leq T < 40$	热环境恶劣区, 较低热舒适性, 可以忍受
$T \geq 40$	热环境危险区, 热舒适性极差, 无法忍受

2.2 钱塘江滨水区物理环境现状模拟方法

1)热环境现状模拟方法。针对多尺度热环境影响要素的复杂特征, 采用大气校正法及Landsat 8反演地表温度, 以GIS为数据处理平台, 先后获取了1984、1991、2003、2015年的杭州市卫星遥感数据并导入ENVI 5.1分析平台, 分别计算出亮度温度和地表比辐射率(ϵ), 最终反演得到研究区域内的地表温度。

2)风环境现状模拟方法。基于杭州夏季风向、风速和风频数据, 得出其主导风向为西南风, 最大风速为7.2m/s, 平均风速为2.6m/s, 最小风速为0.9m/s^[18]。运用PHOENICS流体计算软件模拟钱塘江滨水区的风环境, 宏观层面运用三维简化后的街区体块导入FLAIR模块, 并依据钱塘江街区体块模型划分计算网格, 从而模拟得到各季节风速图, 并划分城市强风、弱风和静风区域。

3)声环境现状模拟方法。基于噪声模拟软件CADNA/A对城市噪声环境进行模拟, 通过模型构建设置模拟参数并进行模拟分析, 计算并生成平面等声线, 进而可显示街区及建筑3D噪声地图。本方法适用于工业设施、公路、铁路和区域等多种噪声源的预测、评价、设计与控制。

2.3 钱塘江滨水区物理环境现状模拟结果

1)热环境现状模拟结果分析。热环境模拟主要用于识别城市范围内的热岛与冷岛。城市热岛是指城市中的气温明显高于外围郊区的现象, 冬季城市冷岛则可能抑制对流边界层的发展, 加剧城市污染。模拟发现, 钱塘江沿江范围内现有两大城市热岛区(杭州主城区、滨江城区)、一大外围热岛区(萧山城区)、3处热岛显现区(富阳城区、下沙镇、南阳镇)和4个城市冷岛集聚区(图5)。

综合考虑不同温度下热舒适度评价, 针对中微观街区层面总结热环境特征(表1)。滨江新城为钱塘江沿线热岛集中区, 其中浦沿街道周边为热环境舒适度较低区域, 在滨江新城建设中应采取热环境优化措施。富阳城区为富春江段的小型热集中区, 热集中区沿城市主要道路向北延伸扩展, 已出现城市热岛现象, 北部区域可规划设计为中强度街区形态^[19](图6)。

2)风环境现状模拟结果分析。钱塘江范围夏季边界来风为西南风, 模拟发现市区高风速区主要存在于距离钱塘江较远的西北方高山处, 可自西北引入城市风廊缓解南岸滨江新城热岛效应。此外, 模拟发现钱塘江沿江区域风速集中在2~5m/s, 风舒适性呈现分段变化特征。通过风环境现状模拟分析识别出3个弱风段: 富春江段、钱塘江南岸滨江段、钱塘江下游段; 1个强风段: 钱塘江中游北岸; 1个静风段: 钱塘江中下游段; 1个漩涡风区: 之江、双浦漩涡风区。针对沿江风环境分段特征, 未来可打通垂江水系与湾头相连的山水江

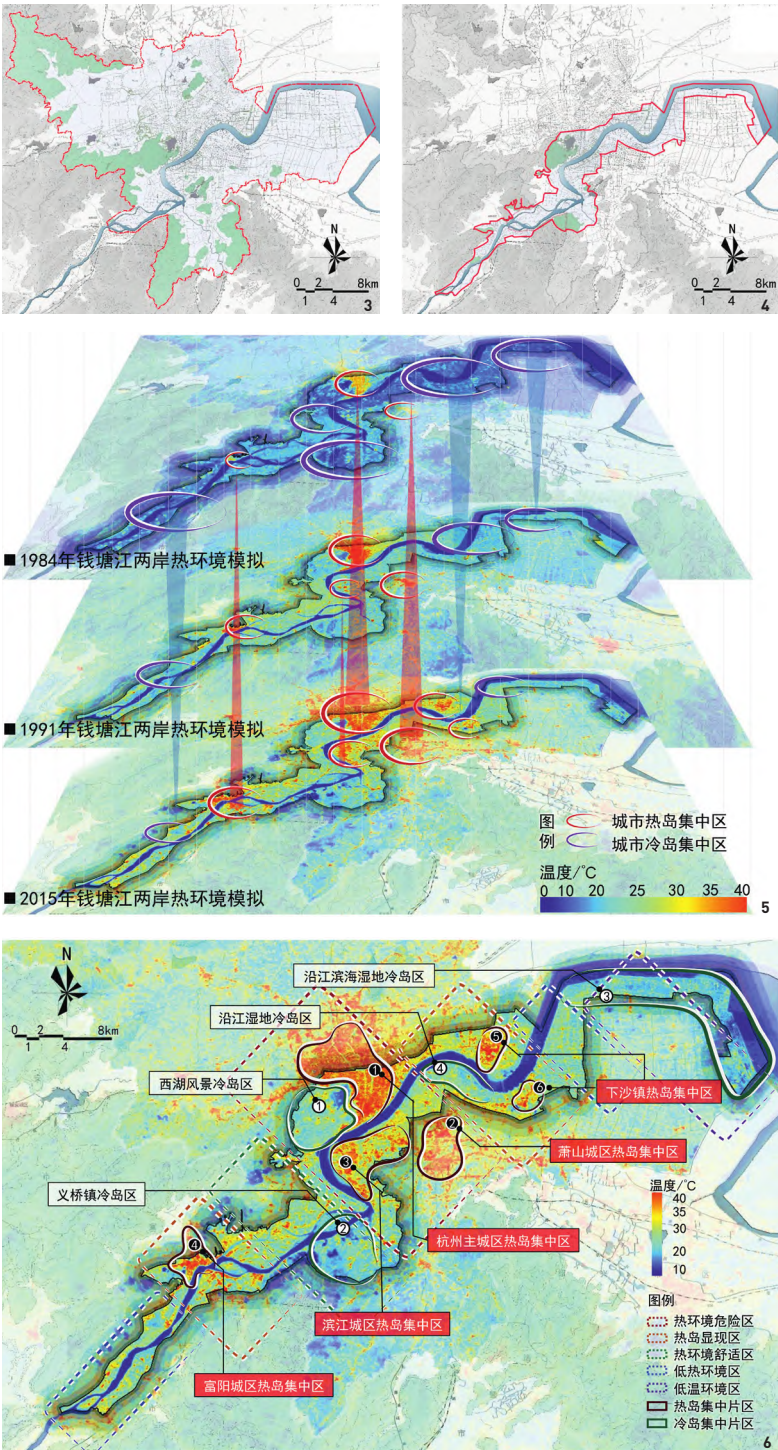


图3 杭州市域研究范围
图4 杭州钱塘江滨水区研究范围

图5 钱塘江两岸热环境模拟分析
图6 钱塘江滨水区热环境现状模拟分析

湾, 强调各城市簇群与水绿空间充分融合, 营造舒适的城市风热环境(图7)。

综合考虑风速、扬尘、空气污染扩散等问题, 针对中微观街区层面行人高度处风环境舒适性特征进行评价^[20](表2), 发现江干区风速较为低缓, 可满足人体舒适性要求; 余杭区部分地区出现静风区, 不利于通风散热; 双浦镇地区形成高风速漩涡区, 需要在街区尺度控制街道的宽度比, 避免因峡管效应形成街道风景(图8)。

3)声环境现状模拟结果分析。遴选出市域范围内主要噪声源, 包含铁路干

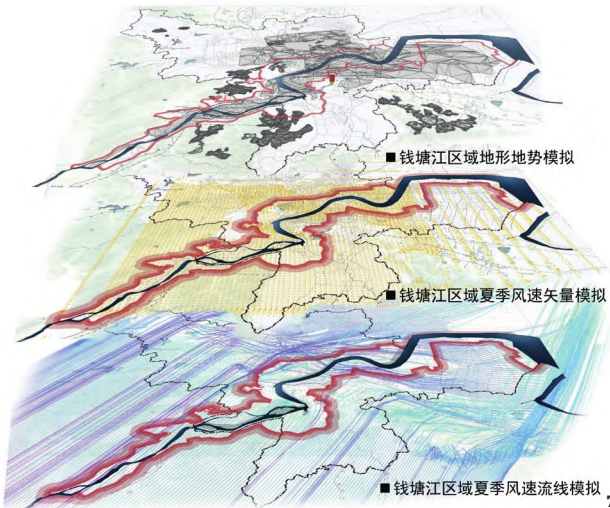


图7 钱塘江两岸风环境模拟分析
图8 钱塘江滨水区风环境现状模拟分析
图9 钱塘江滨水区声环境现状模拟分析
图10 宏观尺度下钱塘江热环境与空间形态耦合优化

线、高速公路、快速路等，在此基础上进行噪声等级空间分布分析，得到钱塘江滨水区噪声分布情况。钱塘江两岸按照主要桥梁的划分，存在4段噪声重度污染区、3段噪声中度污染区及5段宁静区(图9)。通过城市声舒适度特征分区，对滨江噪声污染区域进行优化设计。

3 钱塘江滨水区物理环境耦合优化

3.1 钱塘江热环境与空间形态耦合优化

采用城市热岛效应强度，即主城区平均气温和郊区平均气温的气温差，对不同区域进行热环境整体优化^[21]。杭州主城一级热岛控制区，包括上城区、下城区及江干区西部区域，热岛强度控制在3.5℃以下，为热环境可接受区域。义桥镇等冷岛区域能够缓解城市的热岛效应，城市冷岛强度控制在-1℃以下，部分冷岛区域可以适度开发利用(图10)。针对滨江新城、富阳城区等不同城市热岛区域，可通过城市建筑布局构建风道，提高片区绿化覆盖率。

中微观尺度细化设计中，针对温度较高的区域，在功能布局上结合学校、医院等低密度公共设施引入城市开敞型空间；空间形态上鼓励迎风处设置绿地，楔入城市，以利于冷空气进入城市内部；此外，顺应主导风向布局水绿复合廊道，在高密度城区均匀布局点状绿地(图11)。

3.2 钱塘江风环境与空间形态耦合优化

宏观尺度城市设计重点构建城市多层级通风廊道，以大型空旷区域连接而成，如城市主要道路、连续的休憩用地和美化城市的景观绿地等。针对沿江静风及弱风区域，通过规划主次三级通风廊道划分不同风速控制区，塑造提升沿钱塘江优质空间的物理环境，并提出中微观尺度廊道形态控制要求。

城市设计中微观尺度层面构建：1)5条主要通风廊道——顺应杭州夏季西南向主导风向构建主通风廊道，宽度控制在150m左右，与夏季主导风向夹角小于30°，主要街道走向与夏季主导风向平行

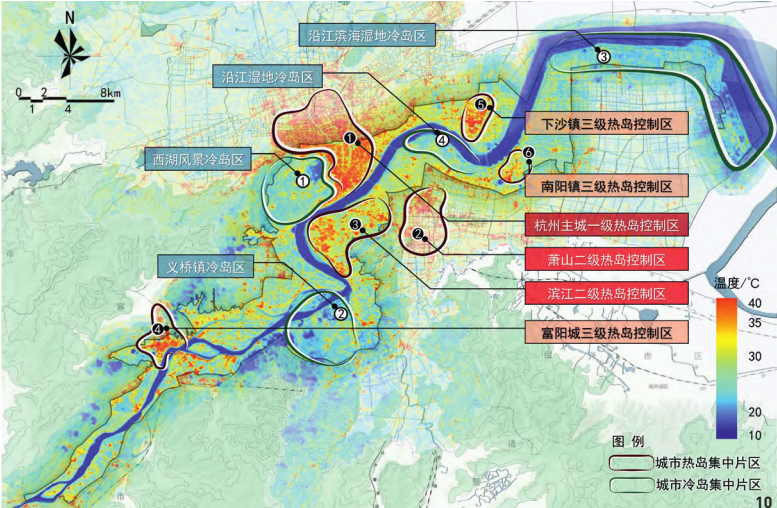
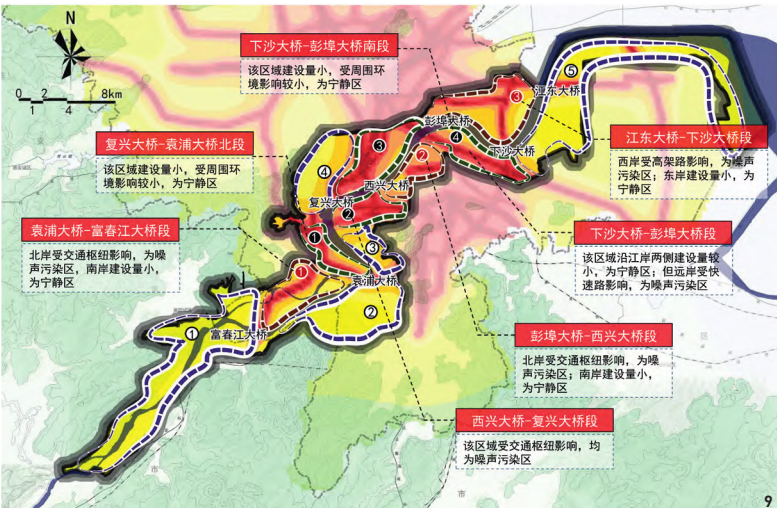
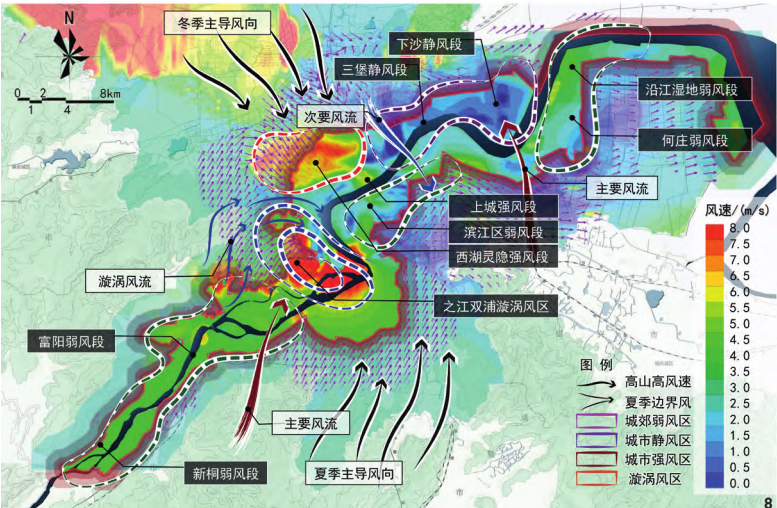


表2 城市风舒适度特征分区		
夏季行人高度处的风速/(m/s)	舒适性特征	风环境分区
$V < 1.0$	风速过低可能造成体感闷热、空气质量下降等问题，影响人的舒适性	静风区
$1.0 \leq V < 5.0$	满足了人的热舒适性需求，又未超过风舒适下所需的风速阈值	弱风区 (舒适区)
$V \geq 5.0$	室外活动者感到不适，影响人在室外的正常活动，甚至造成风灾	强风区

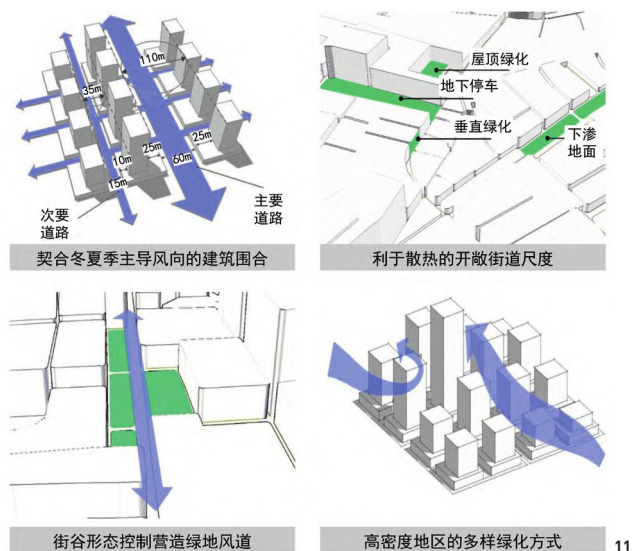


图11 中微观尺度下街区层面风-热环境耦合优化策略

图12 中微观尺度下钱塘江风环境与空间形态耦合优化

图13 宏观尺度下钱塘江声环境与空间形态耦合优化

图14 物理环境优化下的钱塘江沿线城市-水绿骨架优化

图15 物理环境优化下的钱塘江沿线街区整体形态引导

或夹角小于 30° ；2)19条次要通风廊道——次要通风廊道主要由城市主干路、城市绿带等构成，利用开敞空间与城市空间形成的风压差和不同下垫面在太阳辐射下产生的热压差形成局部通风廊道，宽度为50~80m。其中，次通风廊道包含3条二级廊道和16条三级廊道，其余16条较窄廊道多依街区道路格局而建，宽度不宜小于50m(图12)。

3.3 钱塘江声环境与空间形态耦合优化

针对研究区噪声污染较为严重的分段，充分利用钱塘江“听潮基因”下的自然声景资源，塑造多层次沿江声景观。对钱塘江两岸的公园声景观、广场声景观、山体声景观、水体声景观、地方戏剧声景观和竹林声景观等声环境现状进行梳理，识别出声景观集聚点。最终合理划分钱塘江两侧的声景观区，包含校园声景观区、水体声景观区、公园声景观区、广场声景观区和山体声景观区，并对其进行声景观引导(图13)。

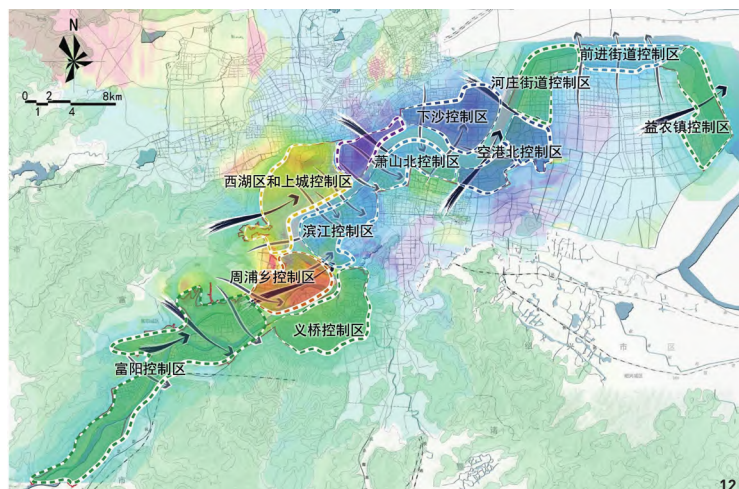
中微观尺度细化设计中，须合理设置建筑布局，并对工业园区等会产生较强噪声污染的建筑群落进行噪声消解改造，在江湾口等地点结合自然资源进行声景设计，掩蔽外界噪声，沿江可布置大型公共建筑，利用公共建筑遮挡噪声。

4 物理环境现状模拟与耦合优化下的多尺度城市设计策略

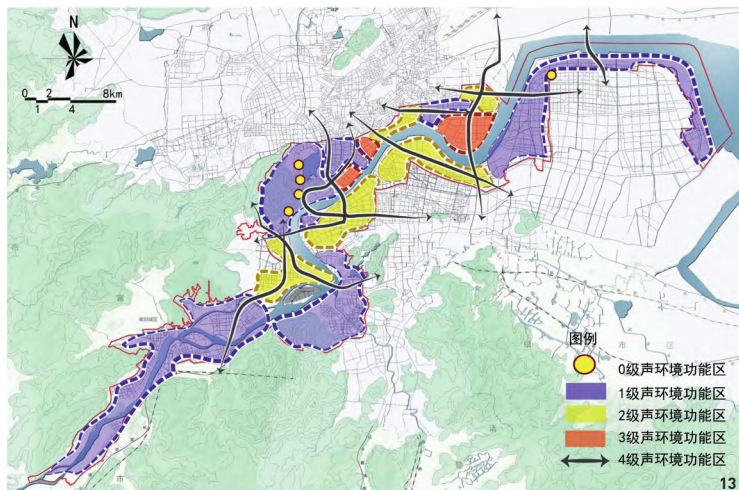
4.1 城市骨架廊道策略：构建沿江通风廊道，消解城市热岛

在物理环境综合模拟优化的基础上，钱塘江沿线滨水区打造5条主通风廊道、3条二级廊道及16条三级廊道以优化沿江两岸的城市风环境。减弱当前存在的无风区及涡流区的上风负面影响，合理消解城市热岛效应(图14)。

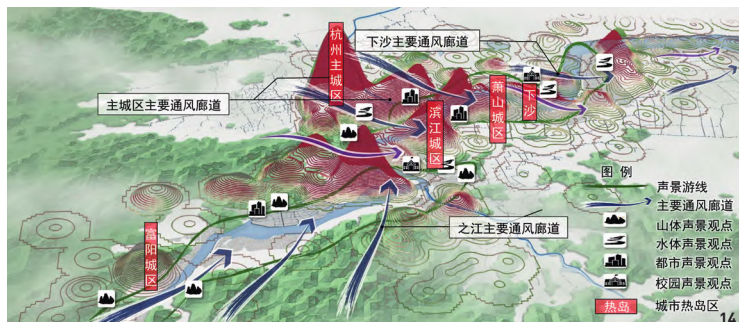
结合多层次沿江通风廊道，营造城市水绿廊道体系。系统优化垂江水脉，连通沿江水系，打造“互通互导”的棋盘式水网体系。结合山水形态特点及风热环境分区，将钱塘江沿江分成山岳汀州、山谷汊汉、山丘河汇、平原江湾、河口海湾5个观赏区，每个观赏区根据现有



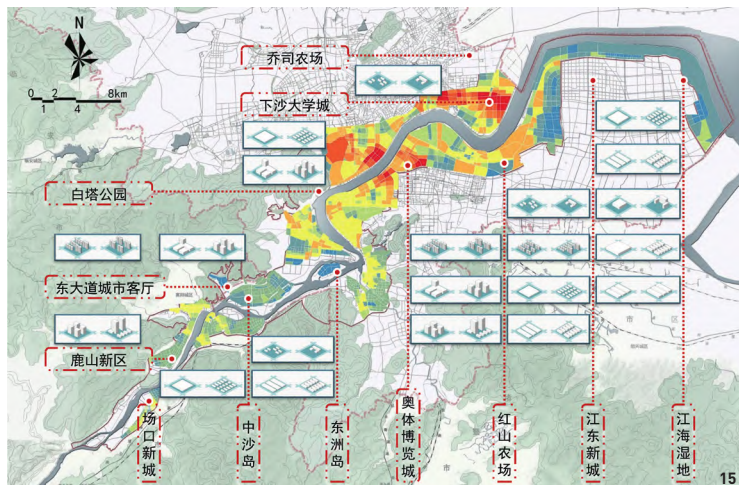
12



13



14



15

植被打造四季景观。

结合水绿廊道控制, 打造沿江交通宁静区。通过种植降噪植被减少声污染并增加声景观多样性, 形成高品质宜居环境。将钱塘江沿岸从上游至下游分为山居声景观片区、城市声景观片区和听潮声景观片区3个部分。对于重要的水脉及风廊道交互的沿江湾头地区, 在城市设计中作为重点意图区进行深化设计, 以营造舒适的湾头空间场景。

4.2 街区形态策略: 布局风热舒适街区, 引导街区形态

合理优化城市下垫面, 并利用街区容积率、街区围合度、街区建筑密度、街区交通路网等耦合性因子^[22], 对现状街区的建筑进行综合评价与整体形态引导(图15)。研究发现沿江不同街区容积率及围合度所呈现出的空间形态模式存在差异, 围合度由1增至3的过程中, 空气温度下降明显, 超过3后温度下降缓慢, 因此将街区围合度控制在2~3较为合理^[23]。街区建筑群落迎风面应避免建筑围合度过高, 整体街区形态隆起以利于中心热空气上升。控制街道高宽比避免天空可视度过低, 以利于夜晚散热。

充分权衡沿江高强度开发区与人文山水特色区的价值, 可较高强度建设的街区定位为湾头重点片区, 结合风廊道消解高强度街区热岛效应, 并在中微观尺度城市设计意图传递中, 局部优化大体量建筑的形态关系以利于通风散热。可设置地下停车场或立体停车楼减小地表温度, 地面停车场地鼓励进行遮阳设计。

4.3 景观植被策略: 合理种植降噪植被, 调节街区微气候

在风廊道设计的基础上, 合理优化控制城市绿廊两侧的植被种植, 形成城市生态绿廊空间。钱塘江沿岸共规划11条特色景观大道, 均为杭州主要的交通要道, 以香樟、桂花、悬铃木和无患子等为特色植被, 通过城市绿廊将习习凉风引入城区。

在中微观尺度城市设计意图传递中, 点状绿地能较好地形成建筑间的风巷, 形成舒适度较高的街区微气候空间^[24]。因此, 在城市设计中更多采取点状绿化, 特别是在穿流区和涡流区内合理优化绿地布局; 对于冬季风速过快区域, 通过增加植被形成风墙; 对于夏季静风区, 通过植被间风巷引入凉爽微风, 并增加植被荫蔽效应。

5 结语

在城市快速建设发展的时代背景下, 本文从数字化城市设计的理论发展与实践诉求入手, 将研究视野聚焦到城市物理环境的数据模拟、分析与优化, 将多源物理环境要素进行整合, 并与城市三维形态数据进行耦合分析, 试图探寻一种优化城市空间品质、提升人居环境品质的多尺度城市设计整体性方法。选取了杭州钱塘江沿线的城市滨水区为案例, 基于物理环境数据综合型分析方法, 强调了城市建设与山水格局、城市形态与环境品质的叠加。在城市物理环境模拟优化的基础上, 结合钱塘江沿线的具体发展需求, 提出城市骨架廊道、街区形态、景观植被等空间设计与营造策略, 试图对当前广大城市空间环境品质及舒适度的提升优化提供新的思路和方法。由于城市物理环境是一个复杂的巨系统, 如何将空间优化的管控要素进一步落实, 以及如何衔接不同尺度间的物理环境要素与城市形态控制要求, 还有待进一步研究。

注: 文中图片均由作者绘制。

参考文献:

- [1] 张兵, 赵星烁, 胡若函. 国家空间治理与风景园林: 国土空间规划开展之际的点滴思考[J]. 中国园林, 2021, 37(2): 6-11.
- [2] 庄少勤, 赵星烁, 李晨源. 国土空间规划的维度和温度[J]. 城市规划, 2020, 44(1): 9-13; 23.
- [3] 孙施文. 从城乡规划到国土空间规划[J]. 城市规划学刊, 2020(4): 11-17.
- [4] 段进, 邵润青, 兰文龙, 等. 空间基因[J]. 城市规划, 2019, 43(2): 14-21.
- [5] Mills G. Luke Howard and The Climate of London[J]. *Weather*, 2008, 63(6): 153-157.
- [6] 冷红, 李姝媛. 应对气候变化健康风险的适应性规划国际经验与启示[J]. 国际城市规划, 2021, 36(5): 23-30.
- [7] Hamoodi R. Thermophysical behaviour of LULC surfaces and their effect on the urban thermal environment[J]. *Journal of Spatial Science*, 2019, 64(1): 287-307.
- [8] Areti T, Tsiros X I, Marialena N. Seasonal differences in thermal sensation in the outdoor urban environment of Mediterranean climates - the example of Athens, Greece[J]. *International Journal of Biometeorology*, 2017, 61(7): 1191-1208.
- [9] 刘滨谊, 司润泽. 基于数据实测与CFD模拟的住区风环境景观适应性策略: 以同济大学彰武路宿舍区为例[J]. 中国园林, 2018, 34(2): 24-28.
- [10] 梅歆, 刘滨谊. 上海住区风景园林空间冬季微气候感受分析[J]. 中国园林, 2017, 33(4): 12-17.

- [11] 甘月朗, 陈宏. 空间形态指标对于板式街区通风的适用性分析[J]. 城市规划, 2018, 42(12): 97-108.
- [12] 佟欢, 康健. 声环境视角下城市形态与公共健康的时空大数据分析[J]. 时代建筑, 2022(1): 70-73.
- [13] 刘滨谊, 彭旭路. 城市街道小气候舒适性研究进展与启示[J]. 中国园林, 2019, 35(10): 57-62.
- [14] 洪波, 林波荣. 基于实测和模拟的居住小区冬季植被优化设计研究[J]. 中国园林, 2014, 30(9): 104-108.
- [15] 李辰琦, 于淼, 李聪. 基于舒适度优化的沈阳旧住宅小区适老化景观更新研究: 以秀山小区为例[J]. 中国园林, 2019, 35(1): 23-28.
- [16] 成实, 张涵涵, 成玉宁. 数字景观技术在中国风景园林领域的运用前瞻[J]. 风景园林, 2021, 28(1): 46-52.
- [17] 杨俊宴, 章颀. 安全·生态·健康: 绿色城市设计的数字化转型[J]. 中国园林, 2018, 34(12): 5-12.
- [18] 宋芳婷, 诸群飞, 吴如宏, 等. 中国建筑热环境分析专用气象数据集[C]//中国建筑学会暖通空调分会, 中国制冷学会空调热泵专业委员会. 全国暖通空调制冷2006学术年会资料集. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006: 264.
- [19] 孟庆林, 王频, 李琼. 城市热环境评价方法[J]. 中国园林, 2014, 30(12): 13-16.
- [20] 马童, 陈天. 城市滨河区空间形态对近地面通风影响机制及规划响应[J]. 城市发展研究, 2021, 28(7): 37-42; 48.
- [21] 朱梓铭, 宋苑震, 覃盟琳. 城市热岛效应与建设强度空间关系研究[J]. 地理空间信息, 2022, 20(4): 37-43.
- [22] 张雅妮, 曾小洲, 肖毅强. 基于风热环境优化的“山·城共构”城市设计初探: 以广州白云新城为例[J]. 城市规划, 2018, 42(12): 116-124.
- [23] 杜思宏, 金星, 周欣, 等. 城市中心区空间形态与风热环境的关联性: 以沈阳市为例[J]. 城市建筑, 2020, 17(32): 7-12.
- [24] 彭翀, 邹祖钰, 洪亮平, 等. 旧城区风热环境模拟及其局部性更新策略研究: 以武汉大智门地区为例[J]. 城市规划, 2016, 40(8): 16-24.

(编辑/刘欣雅)

作者简介:

朱 骁
1992年生/男/江苏盐城人/东南大学建筑学院在读博士研究生/研究方向为城市设计数字技术方法(南京 210096)

杨俊宴
1976年生/男/江苏无锡人/东南大学建筑学院教授, 博士生导师, 东南大学智慧城市研究院副院长/国际城市与区域规划师学会(ISOCARP)学术委员会委员/研究方向为数字化城市设计的理论与方法/本刊特约编辑(南京 210096)

石 邢
1976年生/男/安徽五河人/同济大学建筑与城市规划学院副院长, 教授, 博士生导师/高密度人居环境生态与节能教育重点实验室主任/研究方向为建筑动态环境实验的理论和实验(上海 200092)

闵鹤群
1981年生/男/江西安福人/东南大学建筑学院副教授, 博士生导师/江苏省声学学会青年工作委员会主任/研究方向为城市物理与可持续设计(南京 210096)