

基于气候分析的城市通风系统构建方法初探

——以厦门市为例

刘姝宇¹, 余波¹, 宋代风¹, 王绍森¹, 吴滨²

(1. 厦门大学建筑与土木工程学院, 福建厦门 361000; 2. 福建省气候中心, 福建福州 350001)

摘要: 在城市气候问题持续恶化与精细化城市管理背景下, 对城市通风系统构建方法的辨析与思考将为复杂条件下的城市通风廊道建设提供重要前提。本文基于地理信息汇总与气候分析开展补偿空间与可利用风资源识别, 通过卫星遥感数据与气象观测数据耦合进行作用空间识别, 运用 Rhino、Grasshopper 工具与 GIS 技术, 采用最小成本路径分析法获取潜在的城市通风路径, 综合考虑系统风、海陆风、逆温的影响, 进行通风条件评估与廊道边界界定, 进而推导城市通风廊道的形态, 获取通风廊道各片段差异化、具体化的设计导则。实证表明, 在问题解决与成本控制导向下, 以气候分析为基础的城市通风系统构建方法有助于城市通风廊道建设思路优化与技术升级。

关键词: 气候分析; 城市通风系统; 城市通风廊道; 厦门

[中图分类号] TU14

[文献标识码] A

Preliminary Study on Construction Method of Urban Ventilation System Based on Climate Analysis

—— A Case of Xiamen

Liu Shuyu¹, Yu Bo¹, Song Daifeng¹, Wang shaosen¹, Wu Bin²

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Xiamen University, Xiamen Fujian 361000, China;

2. Fujian Climate Center, Fuzhou Fujian 350001, China)

Abstract: Under the background of the deterioration of urban climate issues and refinement of urban management, urban ventilation system establishing approaches guided by climate analysis are set up to clarify the misunderstanding in the method of identifying urban ventilation channels. Based on collection of geographic information and analysis of climate data, available wind resource and compensation area were identified. Effect area were recognized based on coupling between satellite remote sensing images and meteorological observation data. By using Rhino Grasshopper and GIS, potential urban ventilation paths were grabbed through least cost path analysis method. Impact of prevailing wind, sea-land breeze and temperature inversion was comprehensively considered to evaluate ventilation condition and set corridor boundary. Subsequently, the morphology of urban ventilation channel may be derived so as to generate specific differentiated planning guidelines. The case of Xiamen demonstrates that urban ventilation system established on the principle of problems-solving and cost-control based on localized climate analysis can be used to optimize the idea and upgrade the technology of urban ventilation corridor planning.

Key words: climate analysis; urban ventilation system; urban ventilation channel; Xiamen

近年来我国大中城市热岛、大气污染等城市气候问题持续恶化^[1-4]。数据显示, 热岛或雾霾发生概率往往与城市通风条件呈负相关^[5], 这得益于城郊间空气流动对城市热量的有效释放及对扩散污染物的快速驱散^[6]。合理的城市通风廊道建设能够促进城郊间的空气交换, 激发城市内部的局地环流。作为通风廊道建设的重要前提, 城市通风系统构建工作能够梳理自然资源与土地的气候功能, 识别城市气候问题特征与可利用资源。

在此过程中, 热污染与大气污染典型日常见于静小风天气^[6]的事实, 城市尺度气流模拟尚缺乏权威模型^[7]等问题限制了“盛行风模拟”这一常见风廊规划思路的适用性。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51408516)。

福建省自然科学基金计划资助项目(2019J01007)。

厦门市科技计划项目(XJK2017-1-11)。

作者简介: 刘姝宇(1980-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 城市气候与城市设计。

通讯作者: 宋代风(1978-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 人居环境, 邮箱: songdf22@163.com。

对此, 课题组分别以问题解决和成本控制为原则, 探讨复杂条件下的城市通风系统构建方法。第一, 通风路径旨在连接补偿空间与作用空间^[8], 促进二者间的空气交换, 若无二者的明晰, 便无通风路径的识别及通风系统的整体构建。所以, 作用空间与补偿空间的定位、可利用风资源的确认为必要基础, 可使每条通风廊道均具有明确的目标指向性与资源配置有效性。第二, 通风路径中不同片段的优化应因所处环境、所在区域而异, 在城市土地资源紧张的大背景下, 避免统一拓宽、加长所致的隐性浪费。据此, 在前人的基础上, 本案例尝试从气候分析思路探讨城市通风系统构建方法。

1 研究方法

基于对大量遥感、监测与模拟的气象数据统计, 气候分析用以深入研究过去、现在的气候状况, 以便根据太阳、温室气体、气溶胶等自然及人为因素预测气候变化^[9]。德国气象学家率先探索了服务于规划实践的气候分析方法, 克雷斯于1979年提出基于局地环流的下垫面气候功能评

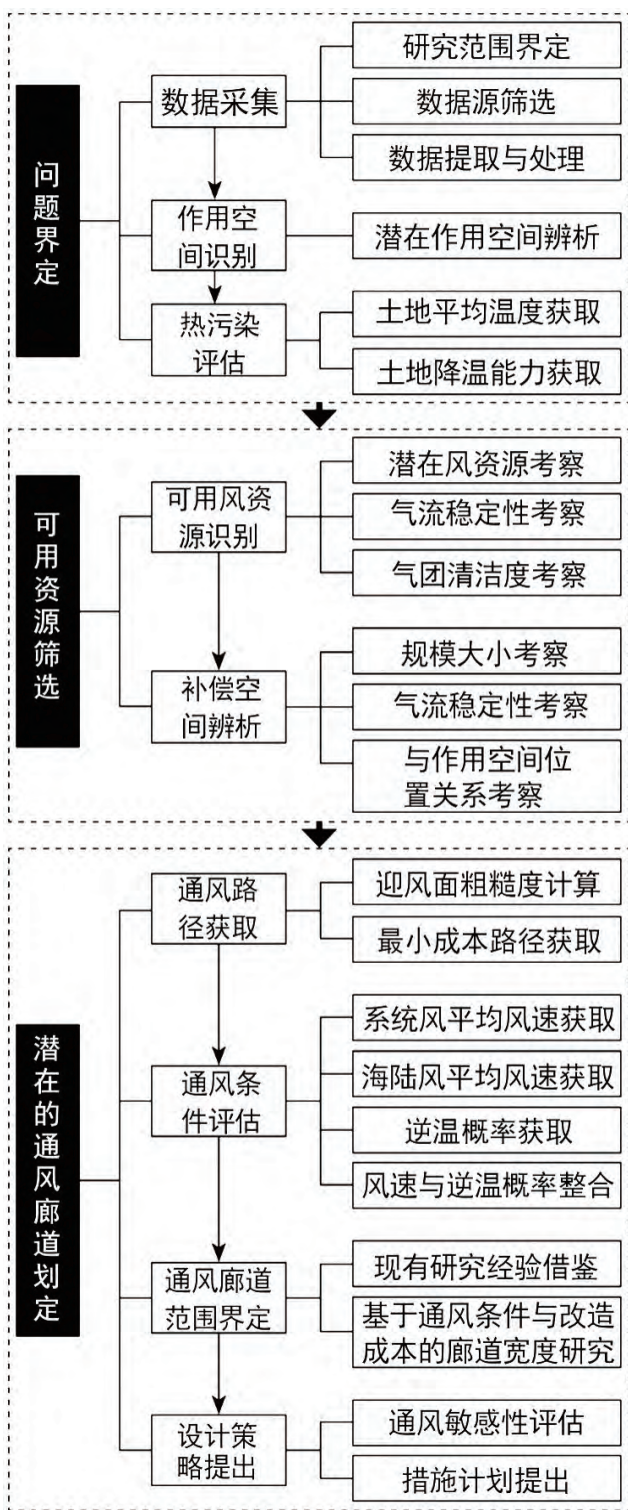


图1 技术路线(图片来源:课题组绘制)

价原则,在此基础上以斯图加特为代表的一系列德国城市先后顺应局地环流开展通风廊道规划^[10]。此类方法优势有二:第一,通过气候与下垫面信息的收集与整理,辨析各地块城市气候问题现状与成因,从而将可利用风资源作为解决问题的关键,避免滥用盛行风;第二,通过补偿空间与作用空间的识别,明确各廊道的目标与任务,进而根据通风条件、城市气候问题的严重程度,针对各片段提出差异性的通风性能优化策略,避免浪费土地资源。我国地处中低纬度亚欧大陆东岸,较欧洲国家气候条件复杂、气候资源丰富,各地应因地制宜地探索气候分析途径。厦门市东南环海,其余方向被山体阻挡,地形复杂,冬夏季风方向存在一定夹角,从对象的复杂性、数据的可获取性来看,厦门适合作为本研究的实证对象,技术路线见图1。

1.1 问题界定

1.1.1 数据采集

研究范围涵盖厦门市全部行政区,面积1699km²。根据地域资源特征与技术条件,数据采集囊括6个方面(见表1)。数据源包括辖区内近年Landsat TM卫星遥感影像数据、数字高程模型(DEM)数据、市内外31个自动气象站的近年监测数据、厦门市城市总体规划修编(2011—2020),以及相关开放数据库。

1.1.2 作用空间识别

鉴于以下原因,热污染区域被作为作用空间。第一,热污染不仅对城市居民健康与生产生活产生威胁,而且严重干扰辐射与水分平衡、局地环流等原生系统;第二,借助气象站观测、卫星遥感等手段,热污染较大气污染状况更易获取。

实证对象的地理位置与地域条件决定了夏季热污染的缓解应将其作为本研究的首要任务。厦门地处夏热冬暖地区,冬季无须采暖,对夏季防热、通风的要求非常高。观测数据表明,近年来当地夏季热污染正持续加剧,夏季热污染核心区已联结成片,厦门岛年夏季最高气温纪录持续刷新,至2014年7月份上半月平均气温已较往年同期高出2.7℃^[11,12]。

1.1.3 热污染评估

热污染区域识别通过气象站观测或遥感等手段对近地面气温数据进行采集与处理,然而,监测网栅格较大、气象站迁移等现实问题制约了自动气象站观测数据的精度与连贯性,而利用遥感获得的地表即时热辐射温度也无法与地表2m高处百叶箱内的监测气温画等号。因此,本案例将地表亮温与气象观测数据的耦合作为热污染数据处理思路。由于亮温数据库庞大,为避免极端天气干扰,需进行代表性

表1 城市通风系统构建数据采集范畴

| 数据类型 | 具体内容 |
|--------|--|
| 土地利用信息 | 建设用地,水体,绿地,开放空间,山体,森林,建筑物高度、密度,建筑物轮廓,工业企业分布,道路分布等 |
| 地形地貌数据 | 国家地理空间数据云GDEM30m高程数据、坡度分布 |
| 气象观测数据 | 年平均气温分布,年最高、最低温度分布,气温日较差平均,各气象站冬、夏季典型日清晨(10:00)及日间(13:00)气温,风玫瑰,年平均风速、风向分布 |
| 气流模拟信息 | 海陆风典型系统风日及典型海陆风日02:00、08:00、14:00、20:00时风速、风向分布中尺度气象模式模拟,2014年逐日20:00各高层温度分布 |
| 遥感信息 | 弱风晴朗的天气下,冬、夏季典型日清晨(10:00)及日间(13:00)地表温度分布 |
| 污染源信息 | 道路日交通量分布,容量超过1000辆的停车场分布,客运站分布,工业污染源分布,非道路移动污染源分布,固定燃烧源分布 |

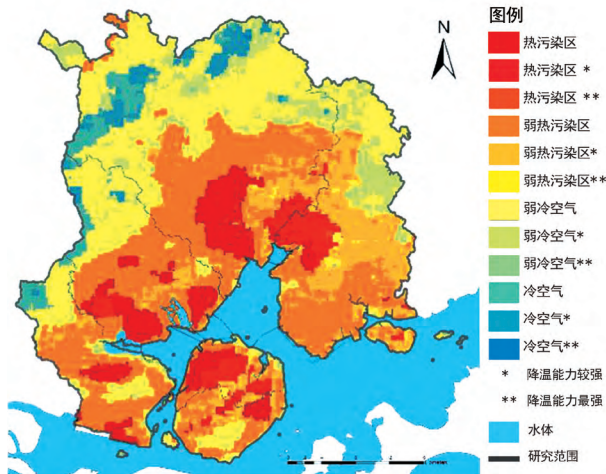


图2 厦门市热污染强度分布图(夏季)(图片来源:根据天地图 <http://www.tianditu.gw.cn> 相关资料整理改绘,审图号QS(2019)1719号)

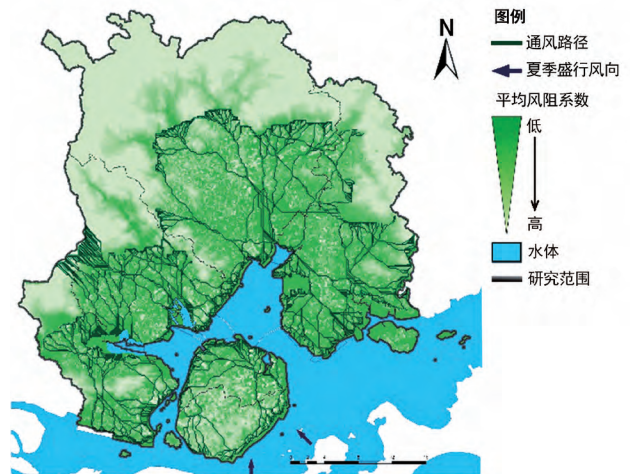


图3 潜在的通风路径分布图(夏季)(图片来源:根据天地图 <http://www.tianditu.gw.cn> 相关资料整理改绘,审图号QS(2019)1719号)

数据筛选。依据最近时段原则、冬夏分选原则、日内差异反映原则以及晴朗无云原则,课题组选取2011—2015年间冬夏4个典型日10时、13时遥感数据,以红外、近红外、热红外三通道为基础绘制地表亮温图。同时,采用专家打分法确定权重系数,依据年均气温、年最高气温、年最低气温、年气温差值等气象观测数据对遥感亮温展开修正。

热污染强度主要取决于土地的平均温度与降温能力^[5]。在弱风晴朗天气下,平均温度为修正后的清晨、午间地表亮温均值;土地降温能力则近似于修正后的清晨、午间地表亮温差值。温差越大,冷空气生成能力、夜晚降温能力、微气候调节能力越强。由冬夏平均温度分布、降温能力分布可分别获取冬夏季热污染强度分布(见图2)。其中,地表平均温度越高,夜间降温能力越小,则热污染越强;地表平均温度越低,夜间降温能力越大,日落后的冷空气生成能力越强。

1.2 资源筛选

1.2.1 可利用风资源识别

可利用风资源的筛选应兼顾客频、气流稳定性与气团质量等因素,以便有效促进补偿空间与作用空间的空气交换。本案例分别针对盛行风、局地环流展开考察。在厦门,盛行风向与福建省沿海地区不尽相同,秋冬季受大陆高压控制盛行东北风,北面大陆污染物被输送至此,加重空气污染;而夏季盛行来自海面的南风或东南风,可驱散市区的污浊空气^[3]。由于海岸线曲折漫长,海陆风发生概率与影响范围明显高于其他类型的局地环流。据统计,当地夏季海风风向主要为SE、SSE风,陆风总体为WNW-SW风^[4]。据观测,即使受西北面山体阻挡,海风作用范围也可涵盖绝大部分建设区域。因此,在夏季对厦门市上空热空气具有稳定降温、净化效果的风资源主要选择夏季盛行风与海风。

1.2.2 补偿空间辨析

基于补偿空间与作用空间的位置关系与空气交换过程,作用空间中的热污染与空气污染将得以缓解。因此,宏观尺度上补偿空间的识别应全面考虑自身规模、补偿气团供给的稳定性、在可利用风资源驱动下与既存作用空间

的相对位置关系。本案例中,由于水面粗糙度低且热容大,城市东南方向的广阔海域在日间升温缓慢,可稳定提供冷空气,且补偿气团可被夏季盛行风与海风吹向市区。同时,鉴于建设区域与西北侧山体的相对位置关系,补偿气团在到达建设区之前不会受阻;鉴于规模限制,市区少量山体、水体的热补偿影响范围与稳定性受限;鉴于与热污染核心区的相对位置关系,西北侧大面积山体生成的冷空气难达市区。综上,考虑到冷空气来源的稳定性与广泛性,应将海面作为补偿空间。

1.3 通风廊道划定

1.3.1 通风路径获取

该步骤用以获取可利用风资源驱动下来自补偿空间的高速气流路径分布。目前,通风路径获取思路主要有二:CFD模拟法、最小成本路径分析法(以下简称LCP方法)。前者往往需要对城市模型进行大幅简化,以降低计算量,但这会使地块内部风通道被忽略;后者通过将近地层风环境模拟转换为下垫面粗糙度评估,大大提升了计算效率,规避了模型简化问题,其有效性已在一定程度上得到验证^[7,15]。因此,本案选用LCP方法,将迎风面粗糙度长度 Z_0 作为粗糙度评估参数,并进行以下优化。首先,除建筑物体型影响因素外,将地形因素纳入迎风面粗糙度长度的校准;其次,以成本路径算法替代频率统计法,其关键技术有二。

第一,运用Rhino、Grasshopper工具获取迎风面粗糙度分布。首先,基于对研究尺度与计算量的考虑,进行土地的栅格划分(100×100m)。其次,利用著名气象学家海因茨(Heinz H.Lettau)的“粗糙度长度”公式^[16]分别计算南风、东南风向上各栅格的迎风面粗糙度长度(Z_0)。计算公式如下:

$$Z_0 = \frac{H \cdot a}{A} \quad (1)$$

式中, H 为栅格内建筑物的平均高度, a 为网格内建筑物平面轮廓在垂直风向上的投影线长度, A 为网格内建筑基底面积,当栅格由山体覆盖时, A 取栅格面积。最后,用等量分类法将计算结果分为10级。

第二,运用ArcGIS工具开展基于迎风面粗糙度分布

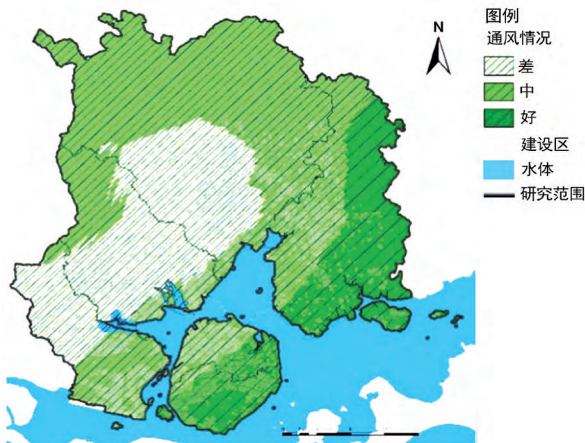


图4 厦门市通风条件分布图(图片来源:根据天地图<http://www.tianditu.gov.cn>相关资料整理改绘,审图号QS(2019)1719号)

的最低成本路径分析。首先,为各粗糙度等级定义通风成本值,并绘制通风成本分布图;其次,根据资源风走向,初步定义通风路径起始点;再次,根据各类可利用风向下的通风成本分布图及通风路径起始点进行LCP分析,获得各类可利用风资源驱动下基于当前城市建设与地形现状的通风路径分布;最后,滤除计算结果中少数与风向差异过大的通风路径,获得通风路径分布图(见图3)。

1.3.2 通风条件评估

该步骤用以获取各地块通风条件的优劣,以判断通风路径各片段的影响范围,是设定通风廊道宽度的前提。通常,难以仅利用近地面自动气象站监测结果开展通风条件评估。第一,在通常情况下监测网栅格较大,图纸精度受限。第二,各自动气象站的风玫瑰图汇总显示,各地区盛行风向无法完全与全市盛行风向匹配,这说明地形与局地环流影响显著。因此,必须找出影响当地通风条件的关键因素,具体问题具体分析。首先,实证对象具有典型的季风特性。其次,厦门由多个岛屿与沿海地块组成,海岸线曲折漫长,午后海陆风影响明显。最后,冬季厦门地区受冷高压控制,空气干燥、层结稳定,频繁出现的逆温使近地面污染物难以扩散,从而导致21世纪以来PM10浓度在冬季均超过70%^[17]。因此,本案例将系统风、海陆风、逆温概率的耦合作为通风条件评估思路。

课题组选取系统风典型日(2014年1月5日、1月15日、1月21日、6月12日、6月14日为偏北风典型日,2014年6月6日、6月21日为偏东风、南风典型日),模拟了四个时段(02时、08时、14时、20时)的风向、风速分布情况;选取海陆风典型日(2014年1月17日、1月23日、6月2日、6月27日),采用中尺度气象模式WRF模拟,经多层嵌套获得四个时段的风向、风速分布情况,利用2014年逐日20时各高度层温度场数据,计算各点全年逆温概率,最终,利用以上成果合成通风条件分布图(见图4)。

1.3.3 通风廊道范围界定

该步骤用以根据通风路径各片段所在位置通风条件确定风廊宽度,界定其范围,风廊各片段宽度设置应考虑

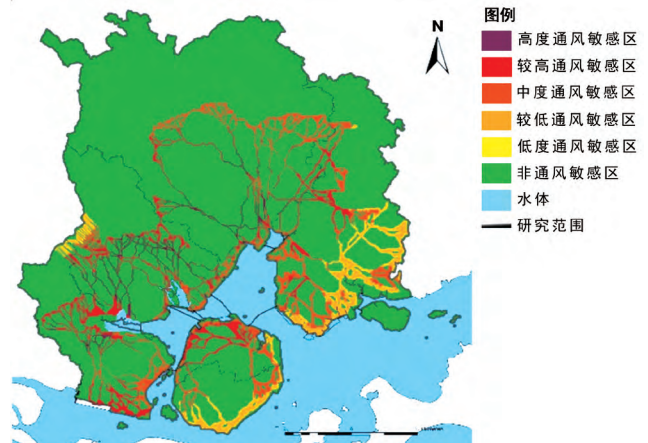


图5 厦门市通风敏感性分布图(图片来源:根据天地图<http://www.tianditu.gov.cn>相关资料整理改绘,审图号QS(2019)1719号)

通风条件、改造成本等多方因素,有条件时还应结合实地监测结果。首先,风廊所处地块通风条件越好,其影响范围越广。根据伯努利原理,流体速度越快,内部压强越小,因此,风廊所处地通风条件越好,则其内部压强越小,与风廊两侧空气产生的压力差越大,带动周围空气进行对流运动能力越强,影响范围越广。其次,考虑到改造成本,各风廊片段宽度应视所处地地貌条件而定。另外,已有经验值也可以借鉴。相关成果显示,任何情况下风廊宽度均不应小于30m,最好达到50m;重力驱动的低速冷空气通道理想宽度为400~500m,最小宽度为200m^[18]。最终,兼顾上述因素、实证对象地域条件与栅格精度等问题,厦门市通风路径影响范围被设置为100~400m,并据此扩展潜在的通风路径,获得风廊分布。

1.4 设计策略提出

在问题解决导向与成本控制导向下,潜在的通风廊道上各片段的改造或发展措施因其与作用空间的相对位置关系、所处地块通风条件而异,无法一概而论。因此,需结合多种因素开展通风敏感性评估,以获取具体化、可实施的设计策略。

通风廊道的有效性不仅取决于下垫面形态与结构,更取决于城市通风系统各组成部分的气候功能及其在空间与内容上的联系^[19]。因此,各风廊片段的通风敏感性取决于其通风条件现状值与理想值之差,若现状值优于理想值,通风敏感性低;现状值不及理想值,通风敏感性高,应优化,且敏感性越高,越应优先改造。其中,通风条件理想值与热污染程度相关。热污染越严重,则经过该区域的风廊片段理想风速越高,反之亦然。最终,鉴于问题形成机制中的角色差异,应针对各类通风敏感区中的开放空间、建成区及道路分别提出优化导则(见图5、表2)。其中,建成区与道路可能是热污染与通风不畅问题的诱因,主要考虑改造或控制;开放空间与绿地则可能成为缓解问题的有效途径,主要考虑保护、优化。

2 成果分析

通过研究成果与当地地形、建设情况、热污染状况的比较可知,潜在风廊与地形、建成区、热污染区紧密相关,

表2 潜在的通风廊道优化建议

| 通风敏感性 | 用地性质 | 典型下垫面 | 设计导则 |
|-----------------|------|--|--|
| 高度通风敏感区、较高通风敏感区 | 开放空间 | <ul style="list-style-type: none"> ◆市中心、高密度建成区等高热敏感区内的低风速开放空间 ◆高热敏感区与郊外冷空气生成地之间的绿化空间、水域、未开发谷地、山峡、水体与凹地 | <ul style="list-style-type: none"> ◆应予以保护或景观维护 ◆避免任何形式的开发活动 |
| | 建成区 | <ul style="list-style-type: none"> ◆高密度低风速建成区 ◆严重影响空气交换的建成区 | <ul style="list-style-type: none"> ◆开展城市更新,以改善城市气候环境 ◆增加绿地率、减少土地封盖、减少污染源(尤其是交通污染源)、取消或迁移干扰空气交换的建构筑物 ◆改变土地用途时,应开展气候与空气卫生专项鉴定 |
| | 道路 | <ul style="list-style-type: none"> ◆高密度低风速建成区内的主要道路 | <ul style="list-style-type: none"> ◆适当延伸、拓宽 ◆适当增加大冠径乔木种植面积,抑制地面升温 ◆采用建筑沿街立面绿化等更新措施 ◆避免建设高架桥等可能阻碍空气流通的建构筑物 |
| 中度通风敏感区、较低通风敏感区 | 开放空间 | <ul style="list-style-type: none"> ◆毗邻建成区的较高风速开放空间 ◆不毗邻建成区的开放空间 | <ul style="list-style-type: none"> ◆保护对城市气候至关重要的地形单元,如山峡、通道、溪流流域 ◆如不对城市通风构成严重影响,允许适度开发 ◆建构筑物应普及屋顶与立面绿化,限制建筑高度 ◆必须开展专业鉴定,以评估建筑尺寸与布局 |
| | 建成区 | <ul style="list-style-type: none"> ◆密度较高、高度低、通风较好的建成区 ◆低密度高层建筑区 | <ul style="list-style-type: none"> ◆避免密度或土地封盖比率提升,普及屋顶绿化与立面绿化,保护绿地,减少污染源 ◆增加植被,延伸通风廊道 ◆改变土地用途时,应开展专业鉴定 |
| | 道路 | <ul style="list-style-type: none"> ◆密度较高、高度低、通风较好的建成区内主要道路 ◆低密度高层建筑区域的道路 ◆各区间通风较好的城市干道 | <ul style="list-style-type: none"> ◆增加大冠径乔木种植面积,抑制地面升温 ◆普及沿街建筑立面绿化 |
| 低度通风敏感区 | 开放空间 | <ul style="list-style-type: none"> ◆毗邻低密度建成区的高风速开放空间 | <ul style="list-style-type: none"> ◆不宜布置高层建筑、企业、工厂等大体量建筑物 ◆建构筑物应普及屋顶与立面绿化,限制建筑高度,采用不阻碍城市通风的布局以确保通风廊道畅通 |
| | 建成区 | <ul style="list-style-type: none"> ◆密度低、绿地率高、夜晚降温明显、风速较大的建成区 ◆通风条件良好的建成区 | <ul style="list-style-type: none"> ◆普及屋顶绿化与立面绿化,保护绿地,防止热污染 ◆在维持原有尺度的条件下,可填补空地、改变土地用途 ◆必须开展专业鉴定,以评估建筑尺寸与布局 |
| | 道路 | <ul style="list-style-type: none"> ◆建成区内道路密度低、绿地率高、夜晚降温明显、通风良好 ◆通风良好的山区、郊区等远离建成区的道路及部分沿海道路 | <ul style="list-style-type: none"> ◆增加大冠径乔木种植数量,保持降温效应 ◆建构筑物建设应保持通风方向畅通,并进行表面绿化 |

故在风廊定位、定形以及设计策略提出上也应考虑上述因素。

2.1 潜在通风廊道受地形疏导

课题组分别在考虑地形条件与未考虑地形条件的情况下开展了通风路径获取实验,两次实验结果差异显著。首先,高海拔山地通常会形成通风屏障,迫使通风路径绕行;其次,若山体自身海拔高度变化较大而产生山坳,则通风路径在必须通过山体的情况下会穿越山坳。因此,地形起伏较大时,LCP方法必须考虑地形影响。

2.2 潜在通风廊道受制于建设区

通风路径明显集中在建筑密度、高度低于周边地区的地区,有绕过城市建成区的趋势。一方面,大部分通风路径集中于非建设区及行政区划间的空地上,整体走向顺应风向,但部分通风路径走向受地形或高大建筑物影响而改变;另一方面,通风路径明显与市区干道、河流、水体等无建筑物区域契合,而由于主岛建设程度整体较高,通风路径主要分布于沿岸绿地区。

2.3 潜在通风廊道受阻于热污染核心区

仅少数通风路径穿过热污染核心区,大部分穿过核心区间隙(见图6)。气流通常难以穿越超强蓄热性能下垫面,但能穿越热污染核心区的少数气流却最利于作用空间问

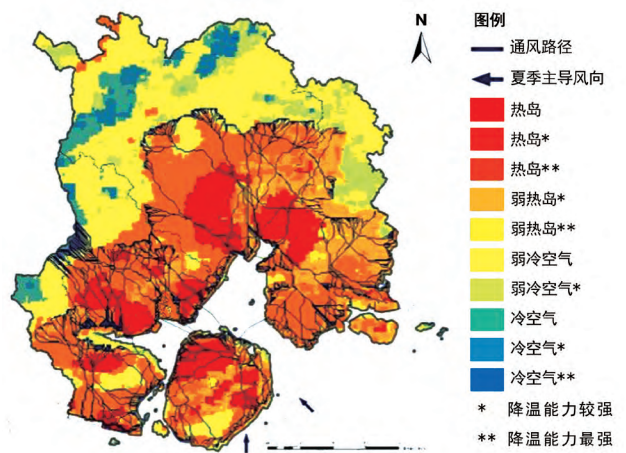


图6 通风路径与热污染分布(图片来源:根据天地图http://www.tianditu.gov.cn相关资料整理改绘,审图号QS(2019)1719号)

题的改善。故后续研究中,首先,应优先考虑热污染核心区风廊的建设,尤其应采取措施降低其地表粗糙度。其次,在其他通风敏感区应积极开展土地封盖拆除措施、绿地率提升措施,在保持气流流通的同时避免热污染核心蔓延。

3 思考与结论

综上所述,在问题解决与成本控制导向下,以气候分

析为基础的城市通风系统构建方法有助于城市通风廊道建设思路优化与技术升级,具体表现如下。

3.1 气候分析的必要性

作为宏观尺度应对城市气候问题的重要手段,城市通风廊道规划方案编制应基于城市通风系统的整体构建。气候分析基于对气象监测数据、数值模拟成果、土地利用信息、自然资源分布等多方因素的梳理,详尽展示某一区域的城市气候现状与发展预期,分析土地的气候功能,有助于作用空间与补偿空间的清晰定位,是城市通风廊道规划的必要条件。鉴于城市气候问题特征与可利用气候资源的差异性,各地应因地制宜地开展气候分析,探索城市通风系统构建及风廊规划的适宜性技术路径。

3.2 城市通风系统构建的基本原则

鉴于城市土地资源的稀缺性、城市建设的不可逆性,合理的城市通风系统构建必须以问题解决与成本控制为导向。一方面,不宜简单地顺应主导风,而应着眼于对问题时段可用风资源的探索与挖掘,通风廊道各片段的形态特征也会受制于所在地块的通风条件与下垫面现状;另一方面,通风廊道各片段的角色将因其与作用空间的相对位置关系而异,相应的规划导则也因用地功能而异。

3.3 LCP方法的适用性与意义

城市尺度介于中尺度与微尺度之间,目前尚无权威的数值模拟模式。中尺度模式难以捕捉到城市下垫面的风环境影响;微尺度模式应用于城市尺度则无法逃避模型简化问题,而模型简化方式又将直接影响研究成果。LCP方法能够克服计算耗时与模型简化的弊端,将对近地面风环境的动态模拟转化为对下垫面粗糙度的静态评估,从而获取可利用气流最易通过的路径。在综合考虑地形、建筑物等因素条件下,粗糙度评估结果能够与地形、山水等自然景观高度匹配。因此,LCP方法可作为城市尺度通风系统构建的合理步骤,而研究结果中各路径的合理性与可利用性仍需通过实地监测方法予以筛选与验证。

致谢: 特别感谢北京市气候中心房小怡副主任为本研究提供的帮助。

参考文献

- [1] 申倩倩,束炯,王行恒. 上海地区近136年气温和降水量变化的多尺度分析[J]. 自然资源学报, 2011, 26(04): 644-654.
- [2] 胡保昆,窦以文,储伟. 北京城区气温变化特征[J]. 气象科技, 2014, 42(05): 852-855+873.
- [3] 郝立生. 哈尔滨、石家庄、武汉和广州的气候变化对比[J]. 气候变化研究进展, 2006(04): 193-196.
- [4] 丁一汇,柳艳菊. 近50年我国雾和霾的长期变化特征及其与大气湿度的关系[J]. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(01): 37-48.
- [5] Verband Region Stuttgart. Klimaatlas Region Stuttgart [EB/OL]. [2008-05-30]. http://www.stadtlima-stuttgart.de/stadtlima_filestorage/download/klimaatlas/Klimaatlas-Region-Stuttgart-2008.pdf.
- [6] 黄柏良. 城市通风及其影响城市热岛效应与空气质量研究[D]. 中南大学, 2011.
- [7] 陈士凌. 适于山地城市规划的近地层风环境研究[D]. 重庆大学, 2012.
- [8] KRESS R. Regionale Luftaustauschprozesse und ihre Bedeutung für die Räumliche Planung[M]. Dortmund: Institut für Umweltschutz der Universität Dortmund, 1979: 15-55.
- [9] Climate Analysis National Aeronautics and Space Administration [EB/OL]. [2015-11-17]. <http://atmospheres.gsfc.nasa.gov/climate/index.php?section=138>.
- [10] 刘姝宇,沈济黄. 基于局地环流的城市通风道规划方法——以德国斯图加特市为例[J]. 浙江大学学报(工学版), 2010, 44(10): 1985-1991.
- [11] 苏明峰. 厦门市气候变化及其应对建议[J]. 海峡科学, 2011(07): 16-18.
- [12] 佚名. 厦门七月上半月气温突破历史值[EB/OL]. [2014-7-21]. http://www.fjcx.gov.cn/qxxw/gdqx/sjqxdt/201407/t20140721_91057.htm.
- [13] 程承旗,何华伟,马廷,等. 厦门市2001-2002年PM10浓度时间序列变化分析[J]. 水土保持研究, 2005(06): 11-13.
- [14] 金文其. 厦门的海陆风[J]. 气象, 1988(09): 31-33.
- [15] MAN S W, NICHOL J E, TO P H, et al. A Simple Method For Designation of Urban Ventilation Corridors and Its Application to Urban Heat Island Analysis [J]. Building & Environment, 2010, 45(8):1880 - 1889.
- [16] Lettau, H. Note on Aerodynamic Roughness-Parameter Estimation on the Basis of Roughness-Element Description[J]. Journal of Applied Meteorology, 1969, 8(5):828-832.
- [17] 范新强,孙照渤. 1953—2008年厦门地区的灰霾天气特征[J]. 大气科学学报, 2009, 32(05): 604-609.
- [18] FENN C. Die Bedeutung der Hanglagen für das Stadtklima in Stuttgart unter besonderer Berücksichtigung der Hangbebauung [D]. Fachbereich Landschaftsarchitektur: Fachhochschule Weihenstephan, 2005: 106-120+141-165.