

广州市主城区风道特征与通风效能评估

陈翔¹, 孙武¹, 沈子桐¹, 朱琳琳¹, 张佳滨¹, 许伟²

(1. 华南师范大学地理科学学院, 广州 510631; 2. 广东省建筑科学研究院集团股份有限公司, 广州 510500)

摘要: 本文以广州市主城区为研究对象, 简化城市建筑群后绘制出无建筑区域的中心线, 进而识别风道。利用2016年逐时风向风速数据, 基于GIS提出了度量风道物理、热力属性的指标, 据此分析风道特征, 并对通风效能进行了评估。研究表明: ①在40 m分辨率下识别出潜在风道中心线共有2451条, 相互组合后达到风道标准的有142条, 总通风面积为96.49 km², 占研究区的21.59%。②以珠江新城为中心, 研究区潜在通风网络呈现略向东北方向倾斜的密—疏—密的圈层特征; 老城区通风面积有限, 区间间风道的宽高比差异较大, 珠江新城最低(6.54), 海珠湿地最高(74.43); 主城区外围区域的绿地与水域占风道通风面积比重超过90%。③由走向效能空间分布格局的相似性, 可分为春、夏和秋冬3个模式; 依据走向效能得分的季节变化规律, 划分出常年风道、季节风道和沟通风道3类。各季节通风效能评估优劣关系为: 秋>冬>春>夏。④研究区内高架桥对阻滞度的贡献是行道树的2倍以上, 阻滞度最大值为4.70 m³/m², 阻滞程度较高的区域大部集中分布在研究区西侧, 特别是三元里周边密集的立交桥群区域。

关键词: 风道识别; 风道特征; 通风效能; 阻滞度; 广州

DOI: 10.11821/dlxb202103014

1 引言

城市表面低风速通常与高动力粗糙度(z_0)成正相关, 风力被城市核心地带的高密度建筑阻挡而导致动能损失, 流动能力降低^[1]。城市内高强度的人为释放热与弱通风环境共同作用不但进一步强化了热岛效应, 而且衍生出雾霾、逆温、颗粒污染物累积等城市气候难题^[2-5]。风道的规划是改善城市局地气候环境的措施之一, 这一概念在20世纪70年代末时由Kress^[6]首次提出, 特指城市通风系统中的空气引导通道。之后吴恩融、任超等^[7]进一步提出风道应以城市内部的大型空旷地带为骨干, 串联绿地、水域、道路和低矮楼宇, 随盛行风的风向伸展并引导其他气流深入城市内部。国内外许多城市已经完成了城市风道的规划编制, 武汉引导风道串通长江, 形成“三纵、四横、六带”的空间结构^[8]; 日本东京利用现有河川和街道引东南方向的海风入城, 规划建设呈环状分布的通风网络^[9]。

风道研究主要讨论风道识别、风道特征以及通风效能这三大主题。其中风道特征主要涵盖物理属性和热力属性两方面, 风道长度、风道宽度、风道走向和宽高比是风道较为重要的物理属性, 一般而言, 风道长度与宽度对通风效能有正向作用^[10-12]。Kress最早

收稿日期: 2019-11-26; 修订日期: 2020-10-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(41771001); 广州市产学研协同创新重大专项(201704020136) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41771001; Guangzhou Industry-University-Research Collaborative Innovation Major Project, No.201704020136]

作者简介: 陈翔(1995-), 男, 福建厦门人, 硕士生, 中国地理学会会员(S110013748A), 主要研究方向为城市风环境。
E-mail: 2017022041@m.scnu.edu.cn

通讯作者: 孙武(1963-), 男, 甘肃武威人, 教授, 硕士生导师, 主要从事城市风环境研究。E-mail: sunw@scnu.edu.cn

系统地提出风道的建设标准,认为风道的长度不应短于1 km,宽度不应小于30 m^[6],并开始探索风道的物理形态。随后,Givoni^[13]、匡晓明等^[14]对风道走向与盛行风向之间的关系进行了研究,提出夹角应控制在30°以下以提高通风效能;Edussuriya等^[15]与Merlier等^[16]根据风道的宽高比追踪了气流的运动模式;He等^[17]通过建筑密度、建筑高度和道路脉络识别出悉尼20个特征不同的通风区域,并基于实测的方法验证了通风区域的通风效能^[18-19],上述研究均是利用风道的物理属性评估通风效能。此外,风道的热力属性也常被纳入评估框架中,绿地与水域作为城市内常见的冷源,能够以局地环流的形式提供冷空气以补偿建成区^[20],如刘乐乐等对宁波市的绿地、水域、建成区设定阈值进行分类,作为通风效能评估的依据^[21]。在现有的研究中多采用迎风面密度(λ_f)、建筑地面覆盖率(GCR)、动力粗糙度(z_0)、地表温度(LST)、天空开阔度(SVF)等众多指标,以及对风道内存在的阻滞物^[6, 14]加以考虑,本质上是对风道的多项特征进行定量分析,进而评估城市风道的通风效能^[22-26]。

根据研究对象尺度的不同,风道研究选择的技术手段也有所差异。针对风道的研究主要有以下4种途径:①利用测风雷达或气象站^[27];②基于地理信息系统(GIS)和遥感(RS)^[28-29];③在风洞内进行中性流试验^[30];④基于计算流体力学(CFD)进行数值模拟^[31]。以街区作为研究尺度的现场观测、风洞试验或CFD模拟已经得到普遍的应用^[32-34],城市群尺度下则可基于大范围的地面自动气象站分析时空特征^[35],或采用中尺度气象模拟如WRF模拟^[36]。但对于特定城市的城区尺度而言,评估大规模建筑群的通风效能需要综合考虑到建筑形态、城市地形及其组合形态等中观层面的影响因素,相比之下,GIS和RS技术更加高效经济^[28]。基于GIS和RS技术主要是计算 λ_f 和反演LST两种手段,Wong等划分100 m的网格,计算香港九龙半岛的 λ_f 后,利用最小成本路径法(LCP)识别风道^[37];冯章献等则利用MODIS数据反演出LST,结合 λ_f 分析长春市主城区的风环境^[38]。众多基于GIS进行的风道研究大多以网格作为评价单元,将风环境良好的网格串联起来完成风道的识别,并根据网格数值评估内部的通风质量,Yang等^[39]还进一步细化分析了不同网格尺度下的城市风热环境。但网格法本身存在一定的固有局限,机械的网格边界割裂了城市肌理,将横跨相邻网格的地物切割为两个部分;城市网格化处理后过于概括,不利于分析风道形态的具体特征;网格的风环境特征为其内部所有要素所共有,难以制定详尽的规划改造方案。

综上所述,在准确识别风道的基础上,如何进行风道指标体系的构建与风道功能与作用的评价是风道规划中的重要理论问题,也是风道规划实践的依据。本文以简化城市建筑群为基础,绘制无建筑区域的中心线以替代网格作为研究单元,进而识别风道并统计风道物理与热力属性的指标,据此探讨广州市主城区风道的特征,并对通风效能进行评估,为相关规划与决策提供参考。

2 研究区域与数据来源

广州市位于中国华南,所辖越秀、荔湾、海珠、天河四区的城镇化率为100%,面积仅占全市3.8%,却集中了37.50%的常住人口,人口密度极高。位于珠江两岸的老城建筑低矮密集(图1b),但自明清以来,用地类型丰富、建筑高度逐渐提高^[40],城市天际线沿珠江前航道持续东移^[41],形成了以珠江新城为代表的广州主城区高度中心(图1c)。研究区内的超高层建筑数量在400栋以上,绝大部分都集中在天河和越秀;18层以上的高层建筑有7000多栋,建筑高度位居世界前列。在高密度人口与建筑群的共同作用下,广州市主城区通风环境逐渐恶化,全年静风频率达12%。本文以广州市主城区为研究对象,

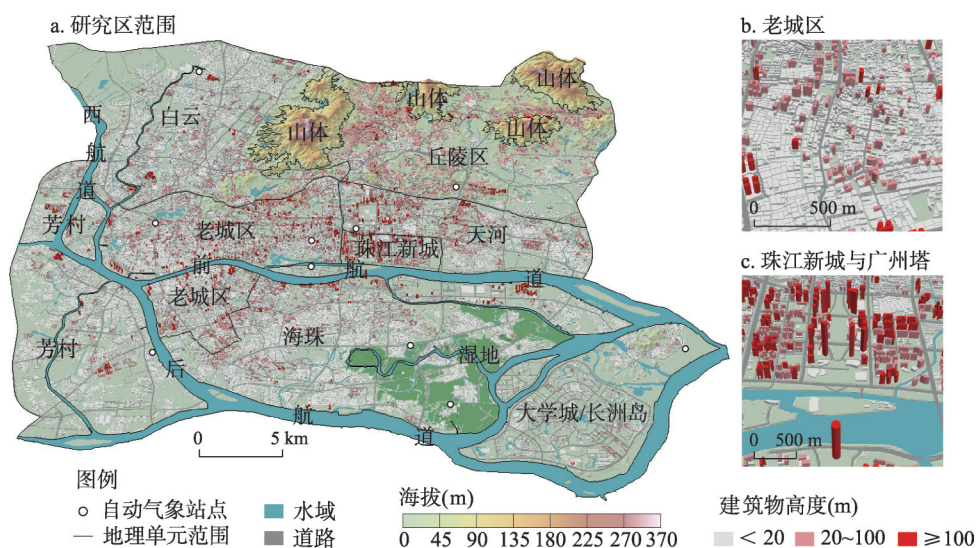


图1 研究区范围与地理单元划分

Fig. 1 Study area and division of geographic units

为保证研究区内风场环境相对独立,选取较大面积的无建筑区域或宽阔的道路作为范围界限。研究区范围内,绿地面积占比为33.60%,水体为8.85%,其余为建设用地。所有单点建筑的算术平均地形高程为12 m,有72.27%的建筑位于海拔12 m以下的区域,而海拔在12 m以下的区域面积也占到研究区总面积的73.78%,说明广州市主城区基本发育在平原上,风道的主要存在形式应为高密度建筑之间开阔的地带,即研究区中无建筑的留白区域。

本文将研究区划分为老城区、珠江新城、芳村、天河、海珠、白云、珠江、湿地、丘陵区、大学城/长洲岛10个次一级单元,总面积约447 km² (图1)。东西贯穿的珠江将研究区隔为南北两部分,北部以密集排列的高大建筑群和相间分布的丘陵为主要地理特征,南部建筑则被珠江环绕,高度和密度均低于北部,并且在东南侧拥有湿地、农田和果园这类大型开敞空间。

研究数据主要包括:2017年广州市单体建筑矢量数据 (<https://www.udparty.com/index.php/lists/data>)、Python爬取的研究区内10个自动气象站的2016年逐时风速风向数据 (<http://data.tqyb.com.cn/weather/>)、政府部门提供的广州市路网数据和2017年单点行道树数据、2014年等高距5 m的等高线数据、2016年底GF-2卫星遥感影像。结合《建筑工程建筑面积计算规范(GB/T50353-2005)》《2013年广州市城市住宅建筑面积计算规范》《深圳市建筑设计规则(2014)》等文件,按照不同功能类型建筑所对应的层高标准,赋值得到相对准确的单体建筑高度。利用等高线建立不规则三角网(TIN),获取单体建筑基底平面质心的地形高程,并与建筑高度相加得到绝对高度。

自动气象站在珠江南北两岸各有5座,辐射范围涵盖天河、五山、越秀、荔湾、龙潭、芳村、长洲岛等区域,能够较好地反映出研究区的背景风场。根据逐时风速风向数据,研究区背景风场特征如下:依照出现的频率,研究区内风向由高到低的顺序排列依次是正北风(11.29%)、西北偏北风(8.72%)、东南风(8.63%)、西南风(3.19%)、西南偏南风(3.51%)、西南偏西风(3.10%)。风向的季节变化明显,春夏两季多为东南系风向,且春季出现的频率(13.65%)较夏季(9.37%)更高;秋冬两季背景风场的性质则基本没有差异,以北风(秋14.81%,冬15.93%)和西北偏北风(秋11.55%,冬

11.25%)为主,但秋季各风向的平均风速总体略高于冬季(图2)。此外,频率较高的风向往往具有较大风速,如秋冬两季北风平均风速分别为1.98 m/s和2.05 m/s,是研究区风速最大的风向;春夏两季平均风速最大的风向则是东南风,分别为1.93 m/s、1.84 m/s(表1)。可以看出研究区春夏季盛行东南风,秋冬季盛行北风和西北偏北风,且秋冬季的风速与频率均高于春夏季。

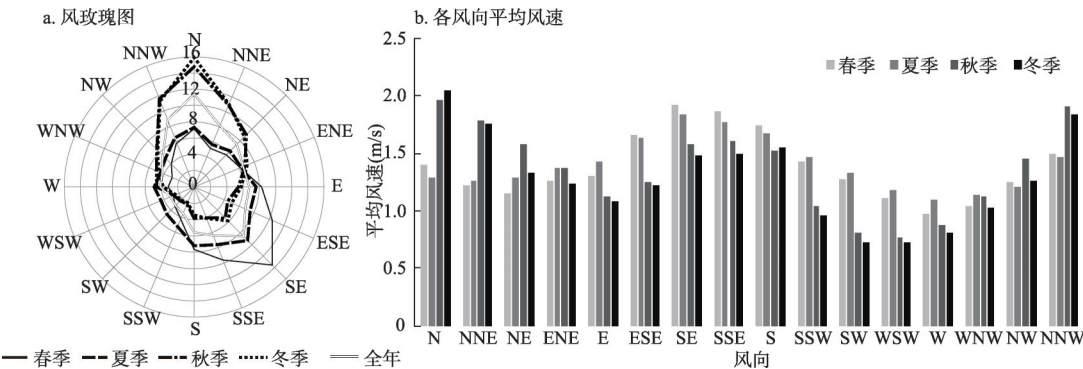


图2 研究区风场特征
Fig. 2 Wind characteristics in the study area

表1 各类风向的频率(%)与平均风速(m/s)

Tab. 1 Frequencies and average speed (%) of various wind directions (m/s)

季节	N-S		NNE-SSW		NE-SW		ENE-WSW		E-W		ESE-WNW		SE-NW		SSE-NNW	
	频率	风速	频率	风速	频率	风速	频率	风速	频率	风速	频率	风速	频率	风速	频率	风速
春季	15	1.59	9	1.32	9	1.20	9	1.46	11	1.22	13	1.05	18	1.77	16	1.74
夏季	15	1.49	11	1.37	11	1.31	11	1.44	12	1.31	12	1.15	14	1.63	14	1.65
秋季	19	1.88	13	1.66	11	1.42	9	1.23	10	1.02	9	1.13	12	1.52	16	1.84
冬季	19	1.96	13	1.63	11	1.21	10	1.15	10	0.98	10	1.04	12	1.38	15	1.75

3 风道的识别、属性与评估框架

以城区尺度对风道进行研究需要高分辨率的地形与遥感数据,对研究区内多达10万余栋的单体建筑进行适当简化概括,才能把握研究区内通风环境的主要特征,准确识别出风道。简化方法有多种标准,如土地利用现状和功能分区、街道宽高比值分类、街道划分街区单元等^[42-44]。对于广州此类平原型城市而言,建筑格局是确定研究区内风道形态的主要因素,风道宽度依赖于建筑间距状况。按一定单体建筑物间距要求,可聚合产生由道路、绿地或水域包围的建筑单元,单元形状与自然边界接近,避免了网格法建模边界过于机械的不足。基于简化后的模型,采用绘制中心线的方法识别风道。

3.1 研究方法

3.1.1 风段与风道的识别 考虑到研究对象为城区范围,将风道识别的分辨率设为40 m可保留城市主要道路以及非建筑空地,可较为有效地辨识城区尺度风道的相互作用及风道体系。以建筑间距为标准,采用ArcGIS将间距40 m以内的所有单体建筑聚合成连续性建筑斑块,删除与所有建筑距离均超过40 m且基底面积小于1600 m²的零散建筑,由此得到的2145块图斑即为简化模型。其中,大量存在的留白区域是常通量层潜在的通风面。聚合后的模型将过于细小的街道或绿地合并为建筑群的一部分(图3b),排除城区尺度下意义不大的细微风道。

将通风面抽象成线段表达有利于直观地判断和识别风道体系。对简化模型进行栅格二值化处理,采用中值交点解决方案捕捉留白区域的栅格像元,交互式矢量为中心线共计 2451 条,代表了研究区内所有可能存在的潜在风道。如图 3 所示,基于简化模型,可将一条完整的风道(AE)进一步区分为风段和岔口这两类基本单元:多条风段(如 AB 段、BC 段)长短不一、宽窄不均,是构成完整风道的骨架,风段与风段之间的共点(如 C 处、G 处)为岔口,表现形式为多条风段相接的开阔空间,如公园、广场、大型十字路口,是空气流通时的交汇点。当各风段的走向接近时,多条相连风段通过岔口共同组合成为完整的风道(如 AE 段、FH 段)。

3.1.2 风道的属性特征 风道的属性特征可以分为物理属性和热力属性两方面,其中物理属性主要涵盖走向、宽度、长度、宽高比、曲折度等指标。线性方向平均值可以代表走向(式(1)),在中心线上以 40 m 为间隔均匀增密采样点(图 4),采样中心线与单侧建筑的距离,用其切尾均值的 2 倍作为风道的总宽度(式(2))。风道宽度与其两侧建筑平均高度的比值称为风道的宽高比(式(3)),根据 GIS 求得的风道长度与其起点至终点的直线距离,可得风道的曲折度(式(4))。

$$LDM = \arctan \frac{\sum_{i=1}^n \sin \theta_i}{\sum_{i=1}^n \cos \theta_i} \quad (1)$$

式中: LDM 为线性方向平均值; θ_i 是始于单个源的中心线方向。

$$W = \left[\frac{\left(\sum_{i=1}^n L_i \right) - L_{\max} - L_{\min}}{n - 2} \right] \times 2 \quad (2)$$

式中: W 为风道宽度; i 为风道的第 i 个采样点; n 为采样点总数; L_i 代表采样点 i 到最近单点建筑的距离; L_{\max} 为该风道中采样距离的最大值; L_{\min} 为该风道中采样距离的最小值。

$$Ar = \frac{W}{H}, \quad H = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{n} \quad (3)$$

式中: Ar 为宽高比; H 为风道两侧建筑物平均高度; n 为风道两侧建筑物数量; h_i 是第 i 栋建筑物的高度。

$$K = \frac{l}{l'} \quad (4)$$

式中: K 表示风道的曲折度; l 为风道实际长度; l' 为风道起点至终点的直线距离。

为探索研究区内风道的分布状况将走向各异的风段中心线以八方位角归纳简化:每个走向间隔为 22.5° , 分别用 N-S、NNE-SSW、NE-SW、ENE-WSW、E-W、ESE-WNW、SE-NW、SSE-NNW 表示, 基于 GIS 求取各中心线的线性方向平均值并归类至相应的走向类型。此外, 多次试验后发现曲折度在 1.2 以下时能有效筛选研究区中过于扭曲的无效风段, 因此以走向和曲折度为标准, 对 2451 条风段进行组合, 得到风道共计 142 条。

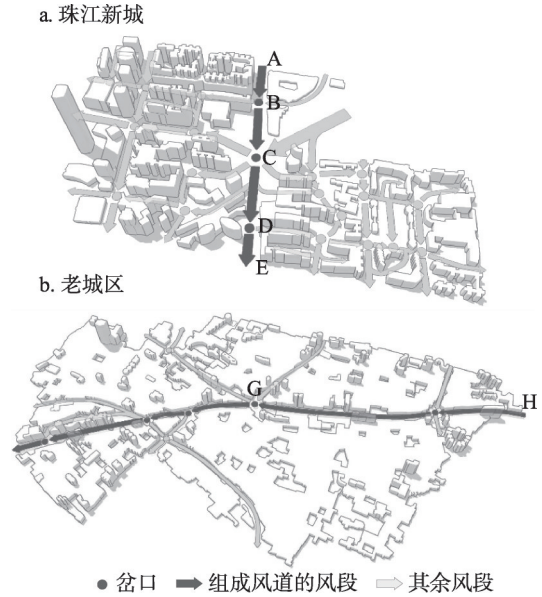


图 3 基于简化模型的风道识别示意图

Fig. 3 Ventilation path identification based on simplified model

在热力属性方面,由于风道载体的热容量有所不同,发育形成的风道热力属性便存在差异。水体、公园、植被是城市内部的凉源,与热量不易散发的高温建筑群形成鲜明反差^[45-47]。而以道路为载体的风道则不同,汽车排放的尾气、郁闭的林木会形成街谷型的复杂风热环境。本文在利用物理属性识别风道后,利用GF-2遥感影像解译得到研究区绿地与水域的分布状况作为确定风道热力属性的依据,根据风道宽度进行缓冲,计算绿地、水域、行道树等地物在风道中的占比,统计得到风道的热力属性。风道物理与热力两方面的属性将为下文研判风道特征提供数据基础。

3.2 通风效能评估框架

风道的各项属性指标都会对通风效能产生影响,但因子权重确定比较复杂,有学者主观进行赋权,也有不考虑权重直接进行评估^[14, 48],而基于网格将 λ_r 、 z_0 或GCR等指标作为唯一因子又容易割裂城市肌理。盛行风方向与风道走向之间的夹角大小对风道通风能力有非常重要的影响^[49],夹角在 22.5° 或 30° 以内时通风效能较好,风场也较均匀,风影区的面积较少^[14],从而直接决定了该风道在主城区的功能与影响范围。另外,在一定的来流下,风道内部存在的林木、高架桥和立交桥等构筑物都会阻挡空气流通^[50-52],因此,本文从风道的走向与风道内部的阻滞程度2个方面来评价通风效能。

风道的走向效能取决于风向与风速。与盛行风向耦合的风道若风速较大,理论上通风效能也越好。一种走向的风道事实上可以服务于2种相反的风向,如N-S走向风道既可以服务正北风,也可以服务正南风,风向与风道的夹角大小在 30° 以内,不会超过 22.5° 。本文以季节为单位对风道通风效能进行评价,由于时间尺度较大,需要对自动气象站测得的逐时风向数据进行简化。与风道的八方位走向保持一致,合并走向相同、方向相反的风向,同样得到N-S、NNE-SSW、NE-SW、ENE-WSW、E-W、ESE-WNW、SE-NW、SSE-NNW八大类型风向。考虑到实际风向数据的差异很大,以标准的八方位角(0° 、 22.5° 、 45° 、 67.5° 、 90° 、 112.5° 、 135° 、 157.5°)对所有风向数据进行简化归类。

研究区为典型的南亚热带季风气候,年平均气温在 20°C 以上,因而采用天文学分类法定义四季。各风向 β 与风道走向 α 之间夹角的大小能够反映风道的季节性特征,在运算过程中需要对 α 的象限做出一定的调整,令夹角的范围始终处于 $0^\circ\sim 90^\circ$ 之间。以夹角的余角作为正向指标,采用标准化法无量纲处理,区间 $[0.01, 1]$ 。

$$\alpha_{ij} = 90^\circ - |\alpha_i - \beta_j| \quad (5)$$

式中: α_{ij} 代表第 i 条风道走向与 j 型风向夹角的余角; α_i 为第 i 条风道走向; β_j 为 j 型风的风向。

$$DE_{mi} = \sum_{j=1}^8 (\alpha_{ij}^* \times S_{mj} \times P_{mj}) \quad (6)$$

式中: DE_{mi} 为 m 季节时第 i 条风道走向的通风效能; α_{ij}^* 代表标准化处理后第 i 条风道走向与 j 型风夹角的余角; S_{mj} 表示 m 季节时 j 型风向的平均风速; P_{mj} 表示 m 季节时 j 型风向的频率。式(6)说明,风向与风道走向间的最小夹角的大小、风速和风频决定风道季节或全年的通风性能。

风道的阻滞程度可用单位面积上人造物与林木的总体积来表示:

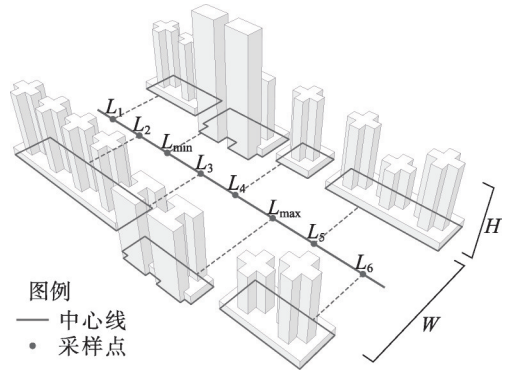


图4 风道物理属性示意图

Fig. 4 Diagram of ventilation path physical properties

$$C_i = C_t + C_o = \frac{V_{it} + V_{io}}{S_i} \quad (7)$$

式中: C_t 为 i 风道的阻滞程度; C_t 表示风道内林木阻滞度; C_o 表示风道内高架阻滞度; V_{it} 表示 i 风道内林木的总体积; V_{io} 表示 i 风道内高架桥/立交桥的总体积; S_i 为 i 风道的底面积, 也就是风道的通风面积。

假设单棵树冠占树高的 2/3, 林木的体积用拟合圆柱体体积的 2/3 来表示, 上式中有:

$$V_{it} = \frac{2H_{it}S_{it}}{3} \quad (8)$$

式中: H_{it} 和 S_{it} 分别为 i 风道内所有林木的平均树高和垂直投影面积。

设研究区内立交桥和高架桥厚度均为 5 m 且不考虑层数, 则式 (8) 简化为:

$$V_{io} = 5S_{io} \quad (9)$$

式中: V_{io} 为 i 风道内的高架桥/立交桥体积; S_{io} 为 i 风道内的高架桥/立交桥路面面积。

4 风道特征分析与通风效能评估

4.1 风道特征

研究区内风段总数量 2451 条, 总长度 1116.23 km, 平均宽度为 205.83 m, 总通风面积 175.38 km², 占研究区总面积 39.24%。风段组成的风道共 142 条, 总长度 552.30 km, 平均宽度 153.39 m, 总通风面积为 96.49 km², 占研究区总面积 21.59% (图 5)。分析物理属性和热力属性后得到广州市主城区风道特征如下:

4.1.1 通风网络具圈层性 以珠江新城为中心, 广州市主城区的潜在通风网络呈现略向东北方向倾斜的密—疏—密的圈层特征。珠江新城作为主城区的高度中心, 规划预设的较大建筑间距形成了研究区内独特的棋盘状通风网络, 塑造了最低的风段长度 (219.97 m) 和最低的离散程度 (118.88)。老城区、天河、海珠等主城区风段长度上升到 500~700 m 之间 (表 3), 芳村、丘陵区、大学城/长洲岛等主城区外围受丘陵、河流以及湖泊等自然形态的影响, 风段短小弯曲, 形状多样, 长度均值再次回落到 300~400 m 之间。通风面积及占各自区域的比重也出现了相似的空间分异, 由珠江新城的 72.26% 到主城区 20%~30%, 再到外围的 40%~70%, 形成疏密程度各不相同的网络型风道, 因而城市地理形态是研究区通风网络格局形成的主要驱动力。此外, 统计结果表明区内 N-S/NNE-SSW 型组合走向的风段在数量上最多 (表 2), 其次是 E-W/ESE-WNW 型组合走向, 表明通风网络的格局整体上是略以东北西南走向占优。在风段基础上识别的风道也基本保留了这一走向特性, 前者共有 50 条, 后者为 44 条。这一特征不利于促进以东南风、北风和西北风为优势风频的研究区进行气流交换, 该特点将对后续进行风道通风效能评估产生影响。



图 5 风道中心线与风段中心线的空间分布示意图

Fig. 5 Distribution of ventilation path and centerlines

表2 风段的物理属性
Tab. 2 Physical properties of ventilation path segments

区域	风段数量 (条)	风段长度		风段宽度		宽高比		通风面积	
		均值(m)	均方差	均值(m)	均方差	均值	均方差	总和(km ²)	占比(%)
老城区	154	705.40	483.99	105.66	84.13	8.44	11.77	8.96	19.36
珠江新城	190	219.97	118.88	128.51	117.19	6.54	13.04	4.43	72.26
芳村	366	366.85	242.29	147.98	96.09	18.12	18.06	15.19	37.76
天河	147	517.40	346.21	159.13	132.68	14.04	23.20	8.94	32.93
海珠	113	784.43	487.24	185.32	149.63	23.83	37.52	22.30	23.67
白云	318	583.24	464.27	169.04	128.91	21.32	24.55	12.67	22.74
珠江	125	639.22	514.81	627.03	276.45	70.94	68.52	44.10	114.79
湿地	62	948.72	506.26	471.13	252.60	74.43	61.78	18.98	145.66
丘陵区域	578	361.77	264.35	202.77	136.85	22.77	25.61	29.37	42.31
大学城/长洲岛	398	303.07	235.09	207.11	149.30	19.73	25.11	19.03	73.06
全区	2451	449.15	381.95	205.45	184.20	23.07	33.97	183.97	44.16

表3 不同走向风道与风段数量的空间分布(条)
Tab. 3 Spatial distribution of ventilation channel: directions and sections (line)

走向	N-S		NNE-SSW		NE-SW		ENE-WSW		E-W		ESE-WNW		SE-NW		SSE-NNW	
	风道	风段	风道	风段	风道	风段	风道	风段	风道	风段	风道	风段	风道	风段	风道	风段
老城区	2	18	0	13	3	21	2	25	3	30	1	15	1	6	4	26
珠江新城	7	66	0	15	1	6	0	14	5	54	0	15	0	7	0	13
芳村	4	49	2	27	5	42	3	63	5	60	1	29	3	45	3	51
天河	3	40	4	20	0	3	0	4	1	35	2	28	0	6	1	11
海珠	5	19	1	19	1	9	1	6	6	31	4	10	0	8	1	11
白云	7	52	4	48	3	39	0	25	3	49	1	39	3	23	1	33
珠江	2	11	1	10	1	15	0	21	2	22	2	26	1	10	0	10
湿地	2	6	3	12	0	4	3	9	2	4	2	14	3	5	0	8
东北丘陵区域	1	86	2	76	1	60	1	73	2	98	1	70	1	57	0	58
大学城/长洲岛	0	48	0	49	0	46	0	45	0	48	1	50	1	64	0	48
全区	33	395	17	289	15	245	10	285	29	431	15	296	13	241	10	269

注：风道若横跨多个区域,则以其面积占比最大的区域作为所属区域。

4.1.2 老城区通风面积有限 在荔湾、越秀、海珠三区是广州的老城区，发育了线性特征明显、曲折度较低的由道路组成的风道。风段的数量为154条，其中大多以狭窄道路作为载体，宽50~70 m。风段宽度均值也只有105.66 m，为全研究区的最低值，均方差只有84.13，表明宽度的离散程度不大。在老城区中，可供通风的面积仅占总面积的19.36%，考虑到该区域行道树冠幅和树高两个指标也居于研究区之首，可以认为其通风网络的物理属性并不理想。白云与海珠的通风面积占比也分别只有22.74%、23.67%，相比之下，除珠江与湿地两大自然景观外，城区规划最晚的珠江新城与大学城/长洲岛的通风面积占比均超70%，良好的物理属性对于通风环境的改善有较大的正效作用。

4.1.3 宽高比区际差异大 研究区内宽高比值的区际差异显著，空间分布情况大体可以分为3种类型。首先是老城区和珠江新城所代表的低宽高比区域。依赖于两侧建筑的围合，以道路作为载体的风道宽高比值相对较低。老城区8.44的宽高比仅次于珠江新城(6.54)，离散程度也最小，说明老城区风道以道路作为载体的情况最为典型。虽然同样具有较低的宽高比，但珠江新城是由于高层建筑数量众多所致，但老城区较低的宽高比

值则是由于狭窄道路的影响。其二是珠江与湿地两大地理单元代表的高宽高比区域，宽高比分别为 70.94、74.43，均方差分别为 68.52、61.78。这类开阔空间的离散程度较大，原因更多是由于受宽窄不一的河道和不规则的湿地形状所制约。最后为其他建筑密集的建成区，宽高比值在 20 左右，介于上述两类之间。以行政区为单位，海珠区内部的宽高比差异最具代表性，海珠岛西侧开发历史较悠久，属于老城区的一部分，宽高比小；但东侧存在大面积的湿地、园地、农田，宽高比大（表 2）。

4.1.4 绿地和水域占比高 得益于良好的行道树绿化覆盖以及珠江水域，研究区全区风段内部的绿地、水域面积占全区通风面积的 76.60%（表 4）。研究区内热力属性最佳的区域为湿地、珠江、丘陵区、大学城/长洲岛 4 个地理单元，绿地与水域占通风面积的比重均超过 90%，并且其通风面积已经达到研究区通风面积的 60.60%。风道内的绿地和水域面积占比较高，反映出气候湿润的南亚热带城市风道的特点。被珠江环绕的大学城/长洲岛虽然风段的长度均值较短，离散程度也较低，但分散的建筑格局使通风面积达 19.03 km²，占本区域 73.06%，风道基底以水域和绿地为主；丘陵区生态配置优越，建筑大多依山而建，风段内部的绿地占比达到 84.45%。珠江和湿地自然景观的绿地水域占比，天河区绿地占比位居第二，拥有最多的绿地面积；老城区风段虽然大多以道路作为地面，但拥有荔湾湖公园、流花湖公园、东山湖公园此类中等规模的绿地，绿地占比也达 39.62%。

表 4 风段的热力属性
Tab. 4 Thermal properties of ventilation channel sections

区域	绿地		水域		道路	
	面积(km ²)	占比(%)	面积(km ²)	占比(%)	面积(km ²)	占比(%)
老城区	3.55	39.62	0.88	9.82	3.01	33.59
珠江新城	1.91	43.12	0.75	16.93	1.11	25.06
芳村	5.94	39.10	1.74	11.45	2.51	16.52
天河	3.74	41.83	0.59	6.60	2.59	28.97
海珠	5.53	24.80	2.01	9.01	2.92	13.09
白云	7.70	60.77	1.59	12.55	4.27	33.70
珠江	9.72	22.04	31.06	70.43	1.99	4.51
湿地	15.14	79.77	3.53	18.60	2.04	10.75
东北丘陵	24.80	84.44	1.31	4.46	4.23	14.40
大学城/长洲岛	15.42	81.03	4.01	21.07	2.58	13.56
全区	93.45	50.80	47.47	25.80	27.25	14.81

4.2 通风效能评估

4.2.1 走向效能评估 利用研究区内 10 个自动气象站的 2016 年逐时风速风向数据，采用风向频率和风速（表 1），利用公式（5）综合评估每一条风道在不同季节的通风效能（图 6），用四季各风道的平均值来表示全年总体通风水平。

由走向效能的空间分布格局的相似性，可以将四季风道走向效能分为春、夏和秋冬 3 个模式。4 个季节中风道通风效能最大为 1.00，最小为 0.50，以中位数 0.75 作为界定通风优劣的阈值。四季通风效能均为优秀的风道共计 51 条，走向类型集中在图中颜色偏绿色的 N-S、SE-NW、SSE-NNW，可以与广州市的背景风场相耦合；四季通风效能低下的风道共有 61 条，走向类型分别为图中颜色偏红色的 NE-SW、ENE-WSW、E-W 三类（图 6）。秋冬两季通风效能优秀的风道位于白云山两侧（图 6c、6d），春季通风优秀的风道多为东南风（图 6a），夏季（图 6b）通风效能普遍较差。全年的得分（图 6e）更接近于秋冬模式。

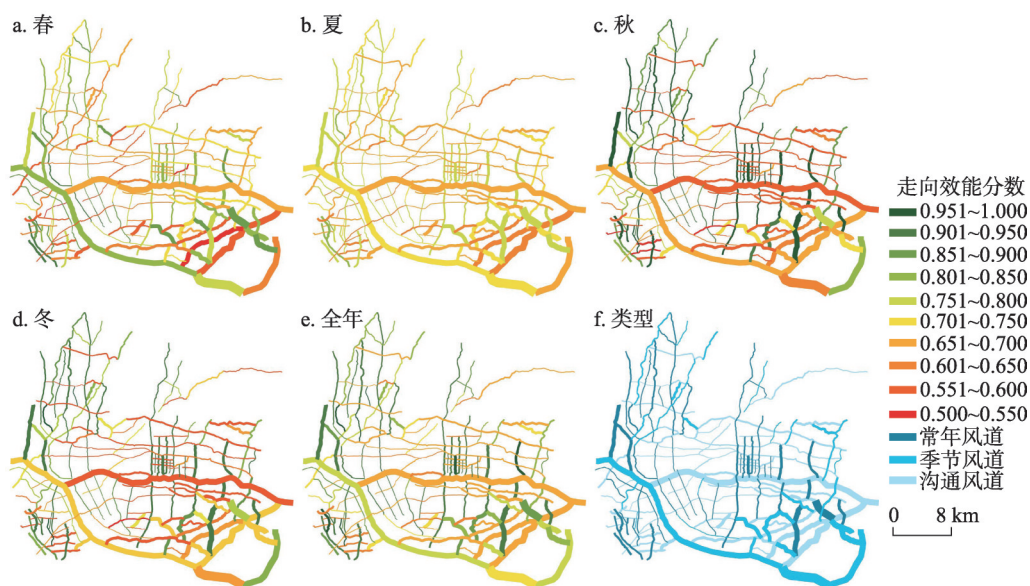


图6 走向效能的季节分布示意图

Fig. 6 The spatiotemporal distribution of direction efficiency

但并非N-S、SE-NW、SSE-NNW走向的风道四季得分通风效能均为优秀,有4条SE-NW走向的风道在秋冬季时得分小于0.75,原因是由于风向与风道走向夹角 α 介于 126° ~ 128° 之间,该类走向虽然能够很好地适应春季和夏季的东南风,但秋冬季的来风盛行西北偏北风,风向与走向之间的夹角超过了 30° ,致使秋冬季通风效能下降。和前述4条SE-NW走向风道相反,同样存在 α 大致为 35° 左右的2条NE-SW走向风道,尽管春季、夏季缺失西南偏南方向的来风,但秋冬季仍然能够契合东北偏北风的风向,出现了秋冬两季得分高于0.75的情况。包括4条SE-NW走向的风道和2条NE-SW走向风道在内,四季得分优劣并存的风道共有30条,余下走向类型为NNE-SSW和ESE-WNW,表现出了明显的季节性。NNE-SSW类风道与秋冬季风耦合,而ESE-WNW类风道则与春季和夏季风耦合。ESE-WNW类风道相比NNE-SSW类风道得分普遍更低,原因是春季、夏季的东南偏东风风向频率(10.38%、7.44%)低于秋、冬季的东北偏北风的风向频率(11.00%、11.02%)。由于主导风向和风速规律与春季大致相同,夏季的走向效能分数在总体分布特征上与春季相近,只是得分曲线更为平均,并且是四季中总分最低的季节,符合广州夏季时炎热弱风的气候特点。盛行北风、西北偏北风的秋冬两季之间,分数的空间分布则基本没有差异,同属一种模式,只不过秋季得益于各风向的风速略微大于冬季,因而最高分(0.97)高于冬季(0.94)。

在走向效能的3种模式中,秋冬季的风环境质量相较春季、夏季而言更为优越。若以四季作为评价对象,计算不同季节所有走向风道的总得分为:春103.51、夏101.60、秋108.14、冬104.06,则得分次序为秋>冬>春>夏。

根据走向效能的季节分布,风道可划分为常年、季节和沟通风道3类(图6f)。按走向的类型统计142条风道的得分,可知与春季、夏季来风耦合较好的走向为N-S、ESE-WNW、SE-NW、SSE-NNW,秋冬季的走向为N-S、NNE-SSW、SE-NW、SSE-NNW(表5),其中N-S、SE-NW、SSE-NNW为常年风道,故研究区内理想的风道为略向西北方向倾斜的南北走向。SE-NW走向的风道进行规划调整时应尽量保证 α 大于 135° ,使其能服务春夏与秋冬两季的盛行季风。四季得分均低于0.75的风道中,最明显的是横贯东

表5 各走向效能平均得分
Tab. 5 Average value of direction efficiency

走向类型	N-S	NNE-SSW	NE-SW	ENE-WSW	E-W	ESE-WNW	SE-NW	SSE-NNW
春季	0.81	0.69	0.58	0.57	0.66	0.76	0.88	0.90
夏季	0.77	0.72	0.65	0.64	0.66	0.71	0.77	0.80
秋季	0.97	0.88	0.71	0.59	0.56	0.62	0.79	0.93
冬季	0.94	0.85	0.69	0.57	0.53	0.59	0.75	0.89
全年	0.87	0.78	0.66	0.59	0.60	0.67	0.80	0.88

西、将研究区分为南北两部分的珠江前航道。由于东风风向的频率不高，珠江前航道春夏秋冬得分分别为0.67，0.67，0.56，0.53，全年平均分数只有0.61。因此，珠江前航道对于研究区的作用更大程度上是用于沟通南北两岸的空气流动，而非承载与河流走向相同的来风。规划中应尽量降低NE-SW、ENE-WSW、E-W走向风道两侧的建筑密度，预留出足够的岔口，以便联结常年风道和季节风道，促进风道的沟通。以走向效能评估结果，划分N-S、SE-NW、SSE-NNW为常年风道、NNE-SSW、ESE-WNW为季节风道，NE-SW、ENE-WSW、E-W为沟通风道，共3种类型。基于GIS平台计算缓冲后的风道几何面，求得常年风道的通风面积为23.69 km²，季节风道通风面积为30.02 km²，沟通风道为41.54 km²。其中珠江为沟通南北两岸的风道做了重要的贡献。

4.2.2 阻滞程度评估 阻滞程度计算中考虑了通风面积，指标本身已经涵盖了风道的长度、宽度这2项基本物理属性。将达到风道标准的所有风段作为阻滞程度的计算单元，得到高架桥/立交桥的总体积为2.08×10⁷ m³，行道树则为1.01×10⁷ m³，明显发现高架桥/立交桥对阻滞度的贡献是行道树的2倍以上。此外，高架桥/立交桥与行道树对阻滞度贡献的区域分布也存在一定的差异（图7）。行道树的高阻滞区域总体上分布偏西的老城区，这里行道树树龄较长，冠幅较大。江南大道北至昌岗地铁站（AB段）的行道树阻滞度最高，为3.20 m³/m²；其次是小北至天河立交路段（CD段），为2.01 m³/m²，均位于老城区范围内（图7a）。高架桥/立交桥阻滞的分布均匀一些，虽然西侧的白云为最严重区域，但在老城区、天河、海珠也都有不同程度的阻滞（图7b）。阻滞度最高的区域是广园中路至现棠溪火车站（EF段）总体算术平均阻滞度达到3.59 m³/m²。在许多风段上高架桥/

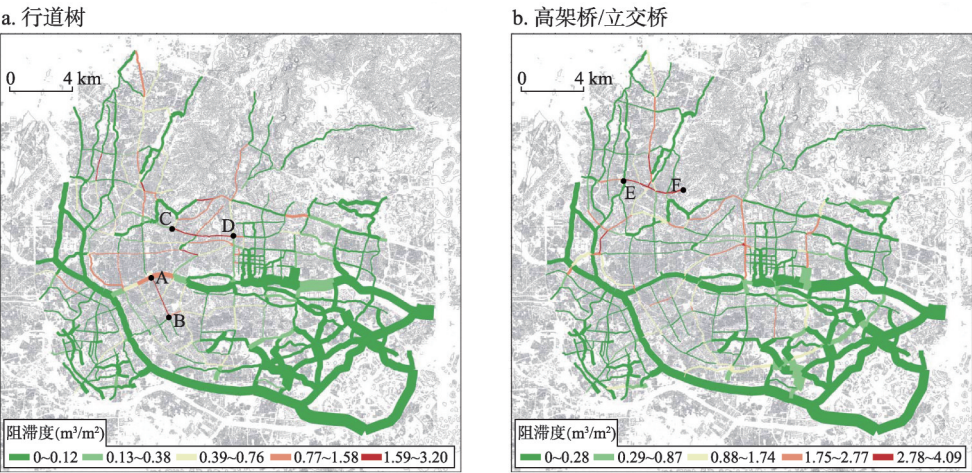


图7 不同障碍物阻滞程度的空间分布
Fig. 7 Spatial distribution of retardation caused by different obstacles

立交桥与行道树阻滞程度双高是普遍情况,原因是高架快速路、立交桥常采用行道树装饰中央绿化隔离带,或在两侧密集种植以降低噪音。

在总阻滞程度上(图8),有10.45 km²的风段单位面积上存在的障碍物总体积超过了1 m³,高阻滞程度区域大部集中分布在研究区西侧,特别是三元里周边(CGJ围合区域),密集的立交桥群使总阻滞度达到2.80~4.70 m³/m²,研究区内阻滞度最大值4.70 m³/m²就出现在此处。建筑密集的老城区同样分布着大量的高架桥,会使本就不佳的通风环境更趋恶化。老城区总阻滞度在0.9~1.66 m³/m²之间,主城区外围的广阔区域总阻滞度则在0.90 m³/m²以下,物理条件较好。

常年风道的总体算术平均阻滞度为0.62 m³/m²,为3类风道中最高值。总阻滞度1 m³/m²以上的通风面积占常年风道总通风面积的16.53%。BC段虽为常年风道,但却是所有风道中受阻滞程度最严重的,阻滞值高达4.70 m³/m²,属于连接越秀区和白云区的机场路(图8中AD段)中的一部分。由于机场路高架、黄石立交桥、机场路立交桥的存在,总长度8778.40 m的AD段算术平均阻滞度为3.35 m³/m²。除BC段宽度为68.63 m外,其他风段宽度区间在82.64~118.44 m,风段的宽度因素应是BC段出现高阻滞度的主要原因。

季节风道的总体算术平均阻滞度为0.37 m³/m²,在三大类型风道中阻滞度均值最低,总阻滞度1 m³/m²以上的通风面积仅占季节风道总通风面积的2.92%。其中比较显著的高阻滞区域是荔湾区的部分内环路高架(EF段),老城狭窄的建筑间距和内环路高架抬升了阻滞程度,阻滞长度为3304.18 m,风段宽度62.50~68.18 m,算术平均阻滞度3.25 m³/m²。

沟通风道的总体算术平均阻滞度为0.53 m³/m²,总阻滞度1 m³/m²以上的通风面积占沟通风道总通风面积的13.08%,分布在广园中路至现棠溪火车站(GJ段),总体算术平均阻滞度达到4.06 m³/m²,是研究区受到阻滞最为严重的区域。特别是其中宽度为77.92~84.13 m的HI段高达4.55 m³/m²,由东到西排列了机场路立交桥、广园西立交桥、机场高速和广州环城高速互通立交桥3座大型交通枢纽,使得该段虽然宽度尚可,但单位面积上的障碍物却比老城区的EF段还要多出1.3 m³。

4.3 城市形态对近地面气象环境的影响

风道走向、来流风速、风道阻滞度以及风道宽高比是影响风道通风效能的重要因素。所有风道的通风面积占研究区总面积21.59%,是城市近地面空气流动的主要区域。通风效能评估结果可以反映风道内风速的强弱。风速随季节的变化和不同风道之间的内部差异通过风道内部蒸散、风场类型以及热岛强度影响着近地面气象环境的质量,影响城市的宜居水平。

4.3.1 低风速抑制了风道的蒸散与蒸发 主城区风道基底中绿地、水域、道路占比分别为50.80%、25.80%和14.81%,风速是影响蒸散与蒸发的重要因子之一,制约着风道内部、林地、灌丛、草地与水域的蒸散与蒸发,还通过风向导引水汽以及污染物的输送路径。尽管蒸发与风速存在不同的数学表达,有的甚至呈平方关系,但多数学者认为蒸发量与风速成正比^[53-54]。

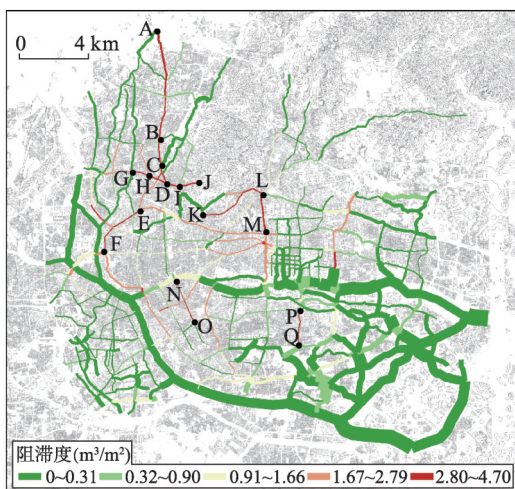


图8 总阻滞程度的空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of the total blockade

广州 1960—2017 年多年平均风速为 1.9 m/s, 1966—1975 年有小的波动, 1976 年以后降至多年平均风速以下, 风速的持续降低与 1978 年以来的城市化密切相关。作为世界上建筑高度和密度名列前茅的城市^[58], 广州冬、夏季风速均低于北京、武汉等城市, 反映了城市形态的改变对风速的整体影响。多年风速的持续下降、12% 的静风频率以及低于 2 m/s 的风速动力特征, 降低了主城区蒸发中风速的动力作用, 抑制了蒸发与蒸散。在主城区 142 条风道中, 四季通风效能均为优秀的风道共计 51 条 (占比 35.92%), 效能低下的风道共有 61 条 (占比 42.96%), 常年、季节和沟通风道 3 种类型通风效能逐次下降。如果考虑林木的阻滞度, 虽然主城区内部随着季节来流变化, 风道内部风速存在很大的差异, 低风速降低了风道近地面水分的蒸发蒸散以及污染物的扩散。

4.3.2 宽高比的降低弱化了近地面水分与污染物的动力输送 城市高度抬升, 在地理形态上最明显的变化指标是宽高比降低, 而风道形态的峡管化趋势则是变化的典型 (图 9)。基于物理风洞和数值模拟已有宽高比对气流以及污染物扩散深入研究, 空气中的水汽与污染物路径依赖于风速与风向^[59]。随着宽高比的降低, 风场类型由孤立粗糙流 (Isolated Roughness Flow)、干扰尾流 (Wake Interference Flow) 向漂浮流 (Skimming Flow) 转化^[60-61]。研究区内 10 个地理单元的宽高比平均值为 23.07, 其中老城区 (8.44) 和珠江新城 (6.54) 较低, 珠江 (70.94) 和湿地 (74.43) 较高, 其余单元的平均值介于其间, 推测 3 种风场类型在风道上均有体现。

宽高比较高时低建筑群气流流动近似于孤立粗糙流, 风场受城市地物影响小, 风向与来流一致, 风速随高度遵循幂指数率, 水汽很容易在来流的携带下向下风向扩散 (图 9a)。进入高建筑群的漂浮流阶段时, 风速减弱, 涡旋形成, 风速随高度的变化难以用幂指数律表达, 水汽受峡管形态限制聚集在下部, 不易扩散 (图 9b)。因此, 宽高比的降低总体弱化了近地面水分的动力输送。

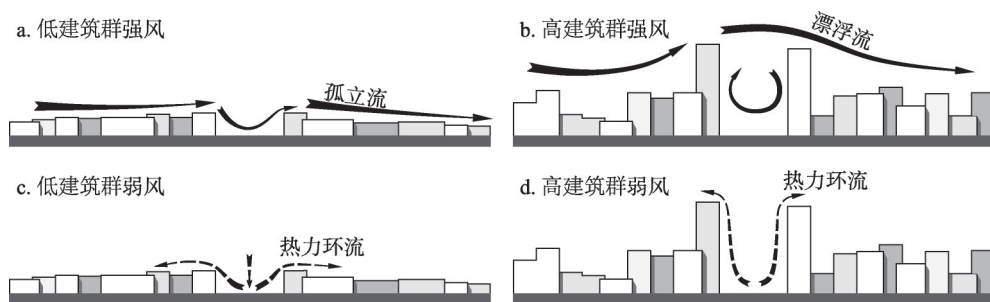


图 9 城市形态对风场的影响

Fig. 9 The influence of the urban morphology on wind field

4.3.3 弱风条件下宽高比的降低抑制了热力对流 通常来说, 感热和潜热总通量 (Q) 的计算公式如下^[62]:

$$Q = h_c (T - T_a) \quad (12)$$

式中: T 为街谷表面中某一点温度; T_a 为空气温度; h_c 为常数, 值取决于街谷中的风速。

对于依托绿地和水域而形成的风道, $(T - T_a)$ 可近似地作为冷源强度的指标。动力作用下, 近地面风速的降低抑制了蒸发, 但在弱风或静风环境下, 冷源强度的持续增加却能通过热力作用, 促进热力对流和蒸发^[63-64]。珠江航道作为研究区中面积最大的水域, 随着城市地理环境的变迁, 其与两岸建筑热容量的差异不断扩大, 再加上近年来较强的人为释放热增强了江面的冷源强度^[65-69]。

人为释放热对热岛强度的贡献可达到 1~3 °C^[70-71], 有些水体同周边的温度差异可达

20 °C^[72]。广州主城区夏、秋、冬三季湖泊水体分别比周边的建筑用地平均温度低4.97 °C、2.78 °C、0.71 °C^[73]。在热力环流的驱动下水平降温幅度最大的范围在500 m~100 m之间^[74-75]。综合动力与热力作用可以推测,由于风道两侧建筑物高度持续抬升,水分通过气流传送的高度和水平范围逐步变小,热力属性良好的风道对城市微气候的调控作用减弱(图9c、图9d),热岛效应加剧。

5 讨论与结论

5.1 讨论

(1) 借助GIS技术建立的风道体系准确与否还需要与CFD模拟、风洞试验等其他研究手段交叉验证,但相比以往划分网格的研究方法,直接针对无建筑区域进行矢量化的技术路线能够保留城市内部地理要素之间的联系,优势明显。通过简化不同高度截面上的建筑群,该技术路线也可辨识风道的立体形态,由于篇幅原因,本文并未详细展开讨论。但矢量化风道为线段的方法尚未完善,虽然可以合理地展现出依托道路而形成的风道形态,但对于发育在开阔空间的风道则表示得不够精确。特别是在风道宽度的计算上,由于开阔空间平面形状的不规则,尽管采用了切尾均值算法,宽度公式仍可能产生误差。此外,本文走向效能评估主要参考风道与风向之间的夹角、平均风速和风向频率3个变量,但在实际的流体运动中,夹角大小与风速大小之间的关系并非非线性,评估中并未考虑其变化的精确函数模型,这有待进一步的探索。

(2) 本文所建立的通风效能评估框架中,暂未涉及风道热力属性的影响。城市作为一种人类生产生活最为集中的地表景观,所积聚的大量人为释放热也会制约气流交换,因而风道的热力信息不仅局限于绿地配置和水域分布,还涵盖建筑能耗与交通能耗等人为热数据。如何将众多热力属性统一建库后与风道物理属性相结合,进一步优化通风效能评估框架,是未来需要重点关注的主题。

(3) 立交桥无疑能够缓解交通压力,而行道树也具有调节城市气候、削减污染、增强下渗和美化环境等多种生态服务功能^[76-77],但密集排列的立交桥和行道树在事实上阻碍了风道功能的发挥。若只考虑总阻滞程度在1 m³/m²以下的主城区风道(图10),主城区通风网络将是孤立和间断的。特别是老城区密集的行道树与常年风道中的高阻滞度将弱化人行高度处的通风环境。因此,在交通、生态、美学以及通风效能方面需要对立交桥与林木功能进行综合研究,以使二者配置与规划更为科学。

5.2 结论

本文以简化城市建筑群为基础,绘制无建筑区域的中心线进而识别风道,据此统计分析了广州市主城区风道的特征,并对风道的通风性能进行评估。主要结论有:

(1) 提出了度量风道宽度、宽高比、风道走向等基于GIS平台度量物理属性的主要指

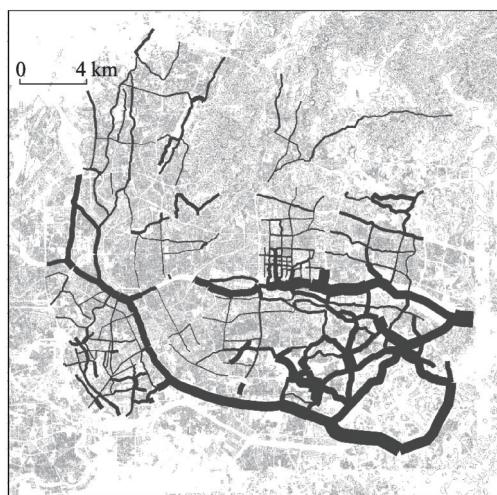


图10 总阻滞程度在1 m³/m²以下的风道
Fig. 10 Ventilation channels with total retardation lower than 1 m³/m²

标,并构建了基于风道走向与阻滞程度的两套通风效能评估体系。范围在40 m分辨率下识别出潜在风道中心线共有2451条,相互组合后达到风道标准的有142条,总通风面积为96.49 km²,占研究区总面积的21.59%。

(2)以珠江新城为中心,潜在通风网络呈现略向东北方向倾斜的密—疏—密的圈层特征;广州老城区通风面积较为有限;区际间的宽高比值差异较大,老城区和珠江新城在6~8左右,湿地与珠江却超过70;风道的绿地与水域面积占比较高,特别是在主城区外围区域如大学城/长洲岛、丘陵区比重均超过90%。城市风道的圈层结构主要受制于主城区外围湿地、水域和丘陵的宏观空间配置。

(3)以走向作为评分标准,风道通风效能的空间分布有春、夏与秋冬三种模式。若以各个季节作为评价对象,则通风效能评估优劣关系为:秋>冬>春>夏。依据得分的季节变化规律,判断研究区内风道N-S、SE-NW、SSE-NNW走向为常年风道,NNE-SSW和ESE-WNW走向为季节风道,NE-SW、ENE-WSW、E-W走向为沟通风道。城市规划中要反映常年、季节和沟通风道的功能,特别要重视对常年风道的保护与管理。

(4)所有风道内高架桥/立交桥总体积达到 2.08×10^7 m³,行道树则为 1.01×10^7 m³,高架桥/立交桥对阻滞度的贡献是行道树的2倍以上,未来在建设城市道路设施时应尽可能考虑到其对城市通风的影响。研究区内阻滞度最大值为4.70 m³/m²,且阻滞程度较高的区域大部分集中分布在研究区西侧,特别是三元里周边密集的立交桥群区域。

参考文献(References)

- [1] Yim S H L, Fung J C H, Lau A K H, et al. Air ventilation impacts of the "wall effect" resulting from the alignment of high-rise buildings. *Atmospheric Environment*, 2010, 43(32): 4982-4994.
- [2] Rajagopalan P, Lim K C, Jamei E. Urban heat island and wind flow characteristics of a tropical city. *Solar Energy*, 2014, 107: 159-170.
- [3] Li Lei, Wu Di. Ventilation assessment on urban-block detailed planning based on numerical simulation. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32(4): 946-953. [李磊, 吴迪. 基于数值模拟的城市街区详细规划通风评估研究. *环境科学学报*, 2012, 32(4): 946-953.]
- [4] Wang Q, Fan Y, Hang J, et al. Interacting urban heat island circulations as affected by weak background wind. *Building and Environment*, 2019, 160: 106224. DOI: 10.1016/j.buildenv.2019.106224.
- [5] Santamouris M, Ding L, Fiorito F, et al. Passive and active cooling for the outdoor built environment: Analysis and assessment of the cooling potential of mitigation technologies using performance data from 220 large scale projects. *Solar Energy*, 2017, 154: 14-33.
- [6] Kress R. Regional Air Exchange Processes and Their Importance for Spatial Planning. Dortmund: Institute for Environmental Protection of the University of Dortmund, 1979. [Kress R. Regionale Luftaustauschprozesse und ihre Bedeutung für die Räumliche Planung. Dortmund: Institut für Umweltschutz der Universität Dortmund, 1979.]
- [7] Ren Chao, Wu Enrong. Urban Environmental Climate Map. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. [任超, 吴恩融. 城市环境气候图. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.]
- [8] Wuhan University, Hong Kong University, Wuhan Land Resources and Planning Information Center. Wuhan City Wind Tunnel Planning Management Research, 2013. [武汉大学, 香港大学, 武汉市国土资源和规划信息中心. 武汉市城市风道规划管理研究, 2013.]
- [9] Narita K, Kiyota S. Klima Atlas of Urban Environment. Tokyo: Administrative Society Printing Office, 2000. [成田健一, 清田诚良. 克利玛城市环境地图集. 东京: 行政学会印刷所, 2000.]
- [10] Lau G E, Ngan K. Analysing urban ventilation in building arrays with the age spectrum and mean age of pollutants. *Building and Environment*, 2018, 131: 288-305.
- [11] Hang J, Li Y, Buccolieri R, et al. On the contribution of mean flow and turbulence to city breathability: The case of long streets with tall buildings. *Science of the Total Environment*, 2012, 416: 362-373.
- [12] Hang J, Li Y. Wind conditions in idealized building clusters: Macroscopic simulations using a porous turbulence model. *Boundary-Layer Meteorology*, 2010, 136(1): 129-159.
- [13] Givoni B. Climate Considerations in Building and Urban Design. New York: John Wiley & Sons Inc, 1998.

- [14] Kuang Xiaoming, Chen Jun, Sun Changfeng. Evaluation of ventilation effectiveness of block scale urban green belt based on computer simulation. *Urban Development Studies*, 2015, 22(5): 91-95, 157. [匡晓明, 陈君, 孙常峰. 基于计算机模拟的城市街区尺度绿带通风效能评价. *城市发展研究*, 2015, 22(5): 91-95, 157.]
- [15] Edussuriya P, A Chan, A Ye. Urban morphology and air quality in dense residential environments in Hong Kong. Part I: District-level analysis. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(27): 4789-4803.
- [16] Merlier L, Kuznik F, Rusaouën G, et al. Derivation of generic typologies for microscale urban airflow studies. *Sustainable Cities and Society*, 2018, 36: 71-80.
- [17] He B J, Ding L, Prasad D. Enhancing urban ventilation performance through the development of precinct ventilation zones: A case study based on the Greater Sydney, Australia. *Sustainable Cities and Society*, 2019, 47: 101472. DOI: 10.1016/j.scs.2019.101472.
- [18] He B J, Ding L, Prasad D. Wind-sensitive urban planning and design: Precinct ventilation performance and its potential for local warming mitigation in an open midrise gridiron precinct. *Journal of Building Engineering*, 2020, 29: 101145. DOI: 10.1016/j.job.2019.101145.
- [19] He B J, Ding L, Prasad D. Urban ventilation and its potential for local warming mitigation: A field experiment in an open low-rise gridiron precinct. *Sustainable Cities and Society*, 2020, 55: 102028. DOI: 10.1016/j.scs.2020.102028.
- [20] Liu Shuyu, Shen Jihuang. Urban ventilation channel planning method based on local circulation: A case study of Stuttgart, Germany. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2010, 44(10): 1985-1991. [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. *浙江大学学报(工学版)*, 2010, 44(10): 1985-1991.]
- [21] Liu Lele, Zhao Xiaofeng, Zhao Yanchuang, et al. Ningbo atmospheric environment analysis and regulating countermeasure based on urban climatic map. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37: 606-618. [刘乐乐, 赵小锋, 赵颜创, 等. 基于城市环境气候图的宁波大气环境分析与调控对策. *生态学报*, 2017, 37: 606-618.]
- [22] Liu Yonghong, Zhang Shuo, Cheng Pengfei, et al. Research and application of heat and ventilation environment assessment for city planning: A case study of Jinan central urban area. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, 26(11): 1892-1903. [刘勇洪, 张硕, 程鹏飞, 等. 面向城市规划的热环境与风环境评估研究与应用: 以济南中心城为例. *生态环境学报*, 2017, 26(11): 1892-1903.]
- [23] Gál T, Unger J. Detection of ventilation paths using high-resolution roughness parameter mapping in a large urban area. *Building and Environment*, 2009, 44(1): 198-206.
- [24] Ng E, Yuan C, Chen L, et al. Improving the wind environment in high-density cities by understanding urban morphology and surface roughness: A study in Hong Kong. *Landscape and Urban Planning*, 2011, 101(1): 59-74.
- [25] Qiao Z, Xu X, Wu F, et al. Urban ventilation network model: A case study of the core zone of capital function in Beijing metropolitan area. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 168: 526-535.
- [26] Alcoforado M J, Andrade H, Lopes A, et al. Application of climatic guidelines to urban planning. *Landscape and Urban Planning*, 2009, 90(1/2): 56-65.
- [27] Drew D R, Barlow J F, Lane S E. Observations of wind speed profiles over Greater London, UK, using a Doppler lidar. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2013, 121: 98-105.
- [28] Zhan Qingming, Ouyang Wanlu, Jin Zhicheng, et al. RS and GIS based ventilation potential study and planning. *Planners*, 2015, 11(5): 95-99. [詹庆明, 欧阳婉璐, 金志诚, 等. 基于RS和GIS的城市通风潜力研究与规划指引. *规划师*, 2015, 11(5): 95-99.]
- [29] Yang J, Jin S, Xiao X, et al. Local climate zone ventilation and urban land surface temperatures: Towards a performance-based and wind-sensitive planning proposal in megacities. *Sustainable Cities and Society*, 2019, 47: 101487. DOI: 10.1016/j.scs.2019.101487.
- [30] Qi Honggang, Sun Wu, Li Qingxiang, et al. Influence of exponential parameters selection on exponent and profiles precision. *Journal of South China Normal University (Natural Science Edition)*, 2017, 49(5): 72-78. [齐宏纲, 孙武, 李庆祥, 等. 指数律参数选取对指数和廓线精度的影响. *华南师范大学学报(自然科学版)*, 2017, 49(5): 72-78.]
- [31] Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, National Institute for Land and Infrastructure Management. Urban Development Guidance for Urban Heat Island Countermeasures Utilizing "Kaze-no-Michi". Technical Note of National Institute for Land and Infrastructure Management, 2013. [日本国土技术行政综合研究所. 利用“风道”减轻热岛强度的城市规划指南. 2013.]
- [32] Wood C R, Pauscher L, Ward H C, et al. Wind observations above an urban river using a new lidar technique, scintillometry and anemometry. *Science of the Total Environment*, 2013, 442: 527-533.
- [33] Carpentieri M, Hayden P, Robins A G. Wind tunnel measurements of pollutant turbulent fluxes in urban intersections. *Atmospheric Environment*, 2012, 46: 669-674.

- [34] Zhang Kai, Zhao Tianliang, Cao Le, et al. Observation and simulation analyses on influence of street canyon on near-surface winds. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, 39(12): 4187-4195. [张凯, 赵天良, 曹乐, 等. 街道峡谷对近地层风场影响的观测和模拟分析. *环境科学学报*, 2019, 39(12): 4187-4195.]
- [35] Sun Wu, Wang Yiming, Wang Yuelei, et al. Wind fields and the development of wind corridors in the urban metropolis of Pearl River Delta. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(18): 5630-5636. [孙武, 王义明, 王越雷, 等. 珠江三角洲地面风场的特征及其城市群风道的构建. *生态学报*, 2012, 32(18): 5630-5636.]
- [36] Teixeira J C, Fallmann J, Carvalho A C, et al. Surface to boundary layer coupling in the urban area of Lisbon comparing different urban canopy models in WRF. *Urban Climate*, 2019, 28: 100454. DOI: 10.1016/j.uclim.2019.100454.
- [37] Wong M S, 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. *Building and Environment*, 2010, 45(8): 1880-1889.
- [38] Feng Zhangxian, Wang Shijun, Jin Shanhe, et al. Effects of urban morphology and wind conditions on land surface temperature in Changchun. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(5): 902-911. [冯章献, 王士君, 金珊合, 等. 长春市城市形态及风环境对地表温度的影响. *地理学报*, 2019, 74(5): 902-911.]
- [39] Yang J, Wang Y, Xiao X, et al. Spatial differentiation of urban wind and thermal environment in different grid sizes. *Urban Climate*, 2019, 28: 100458. DOI: 10.1016/j.uclim.2019.100458.
- [40] Sun Wu, Li Guo, Li Tao, et al. Urban spatial morphology of Guangzhou's built-up area in the period of the Republic of China. *Tropical Geography*, 2013, 33(5): 518-526. [孙武, 李国, 李涛, 等. 民国时期广州市建成区主体建筑立体形态的恢复及其特征. *热带地理*, 2013, 33(5): 518-526.]
- [41] Su Jianzhong, Wei Qingquan, Guo Hengliang. The mechanism and adjustment of urban sprawl of Guangzhou. *Acta Geographica Sinica*, 2005, 60(4): 626-636. [苏建忠, 魏清泉, 郭恒亮. 广州市的蔓延机理与调控. *地理学报*, 2005, 60(4): 626-636.]
- [42] Liu Pei, Gong Bin, Cai Zhilei, et al. Research on generalized ventilation ducts in small and medium-sized cities in hot and humid areas based on CFD simulation analysis: Taking Nanxiong City, Guangdong Province as an example. Qingdao: China Urban Planning Society Conference, 2013. [刘沛, 龚斌, 蔡志磊, 等. 基于CFD模拟分析的湿热地区中小城市广义通风道的研究: 以广东省南雄市为例. 青岛: 中国城市规划学会会议, 2013.]
- [43] Wu Zhenzhen, Yan Tao, Fu Xiangzhao. CFD simulation technology base analysis on urban wind environment of Shenzhen. *Engineering Quality*, 2009, 27(11): 49-53. [吴珍珍, 鄢涛, 付祥钊. 基于CFD模拟技术的深圳市城市风环境分析. *工程质量*, 2009, 27(11): 49-53.]
- [44] Cao Hao, Zhou Wenjie, Guan Yanling. Numerical modeling and analysis of ventilation environment in Xi'an. *China Science and Technology Paper*, 2015, 10(13): 1573-1577. [曹昊, 周文杰, 官燕玲. 西安市城区通风环境数值建模及分析. *中国科技论文*, 2015, 10(13): 1573-1577.]
- [45] Huang Tielan, Liu Huizhong, Ke Jincan. Research on urban heat island effect of Guangzhou based on Landsat TM data. *Beijing Surveying and Mapping*, 2018, 32(8): 891-896. [黄铁兰, 刘慧忠, 柯锦灿. 基于Landsat TM卫星数据的广州城市热岛效应特征研究. *北京测绘*, 2018, 32(8): 891-896.]
- [46] Zhang Zhengdong, Meng Jinhua. Planning research of cooling channel in cities based on urban heat island effect: On the case of Guangzhou. *Resources Science*, 2013, 35(6): 1261-1267. [张正栋, 蒙金华. 基于城市热岛效应的城市降温通道规划研究: 以广州市为例. *资源科学*, 2013, 35(6): 1261-1267.]
- [47] Zhou Hongmei, Zhou Chenghu, Ge Weiqiang, et al. The surveying on thermal distribution in urban based on GIS and Remote Sensing. *Acta Geographica Sinica*, 2001, 56(2): 189-197. [周红妹, 周成虎, 葛伟强, 等. 基于遥感和GIS的城市热场分布规律研究. *地理学报*, 2001, 56(2): 189-197.]
- [48] Wang Weiwu, Li Feinan, Wang Di, et al. Urban ventilation corridor construction based on ventilation potential and quantitative analysis of wind characteristics. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2019, 53(3): 470-481. [王伟武, 黎菲楠, 王嶙, 等. 基于通风潜力及风特征量化分析的城市风道构建. *浙江大学学报(工学版)*, 2019, 53(3): 470-481.]
- [49] Wedding J B, Lombardi D J, Cermak J E. A wind tunnel study of gaseous pollutants in city street canyons. *Journal of the Air Pollution Control Association*, 1977, 27(6): 557-566.
- [50] Huang Y, Li M, Ren S, et al. Impacts of tree-planting pattern and trunk height on the airflow and pollutant dispersion inside a street canyon. *Building and Environment*, 2019, 165. DOI: 10.1016/j.buildenv.2019.106385.
- [51] Merlier L, Jacob J, Sagaut P. Lattice-Boltzmann large-eddy simulation of pollutant dispersion in street canyons including tree planting effects. *Atmospheric Environment*, 2018, 195: 89-103.
- [52] Peng F, Wong M S, Wan Y. Modeling of urban wind ventilation using high resolution airborne LiDAR data. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2017, 64: 81-90.

- [53] Yang Y, Cui Y, Bai K, et al. Short-term forecasting of daily reference evapotranspiration using the reduced-set Penman-Monteith model and public weather forecasts. *Agricultural Water Management*, 2019, 211: 70-80.
- [54] Denmead O T, Dunin F X, Leuning R, et al. Measuring and modelling soil evaporation in wheat crops. *Physics and Chemistry of the Earth*, 1996, 21(3): 97-100.
- [55] Shi Chengxi, Ka Yuming, Zhu Xiaoyuan. Models for estimation of evaporation from water surfaces. *Scientia Geographica Sinica*, 1984, 4(1): 1-11. [施成熙, 卡毓明, 朱晓原, 等. 确定水面蒸发模型. *地理科学*, 1984, 4(1): 1-11.]
- [56] Denmead O T, Dunin F X, Leuning R, et al. Measuring and modelling soil evaporation in wheat crops. *Physics and Chemistry of the Earth*, 1996, 21(3): 97-100.
- [57] Medina J L, Camacho E, Reca J, et al. Determinization and analysis of regional evapotranspiration in southern Spain based on remote sensing and GIS. *Physics & Chemistry of the Earth*, 1998, 23(4): 427-432.
- [58] BARR J. Skyscraper height. *Journal of Real Estate Finance & Economics*, 2012, 45(3): 723-753.
- [59] Yassin M F. Numerical modeling on air quality in an urban environment with changes of the aspect ratio and wind direction. *Environmental Science & Pollution*, 2013, 20: 3975-3988.
- [60] Oke T R. Street design and urban canopy layer climate. *Energy and Buildings*, 1988, 11(1-3): 103-113.
- [61] Fernando H J S, Lee S M, Anderson J, et al. Urban fluid mechanics: Air circulation and contaminant dispersion in cities. *Environmental Fluid Mechanics*, 2001, 1: 107-164.
- [62] Montávez J P, Jiménez J I, Sarsa A. A Monte Carlo model of the nocturnal surface temperatures in urban canyons. *Boundary Layer Meteorology*, 2000, 96: 433-452.
- [63] Bergen O, Forkel C, Kngeter J, et al. Calculation of complex flow and transport phenomenas in lakes and reservoirs. *Physics & Chemistry of the Earth*, 1995, 20(2): 149-154.
- [64] Zhang M H. Impact of the convection-wind-evaporation feedback on surface climate simulation in general circulation models. *Climate Dynamics*, 1996, 12(5): 299-312.
- [65] Oke T R. Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: Comparison of scale model and field observations. *International Journal of Climatology*, 1981, 1(3): 237-254.
- [66] Yague C, Zurita E, Martínez A. Statistical analysis of the urban heat island. *Atmospheric Environment Part B Urban Atmosphere*, 1991, 30: 327-332.
- [67] Zhang Y F, Wang Z G, Sun Y X. Analysis of urban heat island effect using an improved CTTC and STTC model. *Transactions of Tianjin University*, 2009, 15(3): 201-205.
- [68] Hong Xingyuan, Fu Yunfei, Xian Tao, et al. Relationships between sea surface wind speed and the diurnal variation of sea surface temperature over the tropical ocean. *Climatic and Environmental Research*, 2014, 19(4): 470-481. [洪星园, 傅云飞, 洗桃, 等. 热带海表风速与海表温度日变化关系分析. *气候与环境研究*, 2014, 19(4): 470-481.]
- [69] Chen Kanglin, Gong Jianzhou, Chen Xiaoyue. Spatial pattern and differentiation characteristics of heat island intensity in Guangzhou. *China Journal of Ecology*, 2017, 36(3): 792-799. [陈康林, 龚建周, 陈晓越. 广州市热岛强度的空间格局及其分异特征. *生态学杂志*, 2017, 36(3): 792-799.]
- [70] Kimura F, Takahashi S. The effects of land-use and anthropogenic heating on the surface temperature in the Tokyo Metropolitan area: A numerical experiment. *Atmospheric Environment Part B Urban Atmosphere*, 1991, 25(2): 155-164.
- [71] Ichinose T, Shimodozono K, Hanaki K. Impact of anthropogenic heat on urban climate in Tokyo. *Atmospheric Environment*, 1999, 33(24/25): 3897-3909.
- [72] Tominaga Y, Sato Y, Sadohara S. CFD simulations of the effect of evaporative cooling from water bodies in a micro-scale urban environment: Validation and application studies. *Sustainable Cities and Society*, 2015, 19: 259-270.
- [73] Zhang Qifei, Wen Ya, Wu Zhifeng, et al. Seasonal variations of the cooling effect of water landscape in high-density urban built-up area: A case study of the center urban district of Guangzhou. *Ecology and Environmental Sciences*, 2018, 27(7): 1323-1334. [张棋斐, 文雅, 吴志峰, 等. 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.]
- [74] Chen Y C, Tan C H, Wei C, et al. Cooling effect of rivers on metropolitan Taipei using remote sensing. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2014, 11: 1195-1210.
- [75] Lin Y, Jim C Y, Deng J, et al. Urbanization effect on spatiotemporal thermal patterns and changes in Hangzhou (China). *Building and Environment*, 2018, 145: 166-176.
- [76] Groot R S D, Wilson M A, Boumans R M J. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological Economics*, 2002, 41(3): 393-408.
- [77] Costanza R, D'arge R, Groot R D, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387: 253-260.

Characteristics of ventilation channel and ventilation efficiency assessment: A case study of main built-up area in Guangzhou

CHEN Xiang¹, SUN Wu¹, SHEN Zitong¹, ZHU Linlin¹, ZHANG Jiabin¹, XU Wei²

(1. School of Geography, South China Normal University, Guangzhou 510631, China;

2. Guangdong Provincial Academy of Building Research Group Co., Ltd., Guangzhou 510500, China)

Abstract: This paper attempts to explore the feature and efficiency of the ventilation channel in the main built-up area of Guangzhou, one of the four first-tier cities in China. Building groups were simplified and then the centerlines of open areas were sketched out, and finally proceeded to the identification of the ventilation channels. Data of hourly wind direction and velocity of the year 2016 were used. Indicators based on GIS for measuring the physical and thermal properties of ventilation channels were proposed, which facilitate the analysis of the characteristics of the ventilation channels and the evaluation of their efficiency. The results show that: (1) There are 2451 potential ventilation channel centerlines at a 40-m resolution, when composed, 142 meet the standard of ventilation channel. The total ventilation area reached 96.49 km², accounting for 21.59% of the study area. (2) Centering around the Pearl River New Town, the potential ventilation network in the study area presents dense-sparse-dense concentric characteristics, and inclines slightly to the northeast direction. The ventilation area of the old town is relatively limited. The width-height ratio of ventilation channel in the Pearl River New Town is 6.54 while in wetland area it reaches the highest to 74.43, illustrating that width-height ratio among different districts varies greatly. Green lands and waters cover more than 90% of the ventilation area of the peripheral region outside the main urban area. (3) According to the similarity in spatial distribution of direction efficiency, there exist three patterns: spring, summer and autumn/winter. In line with the seasonal variation rule of efficiency, three categories of ventilation channel are classified: perennial paths, seasonal paths, and communication paths. The result of seasonal ventilation efficiency assessment shows that autumn outperforms winter which outperforms spring which outperforms summer (autumn > winter > spring > summer). (4) Regarding retardation degree, the contribution of overpassing bridge is two times and ever higher than that of street trees. The maximum retardation in the study area is 4.70 m³/m² and most of the high retardation values concentrated west of the study area, especially around Sanyuanli where high-density overpassing bridges exist.

Keywords: ventilation channel identification; characteristics of ventilation channel; ventilation efficiency; retardation; Guangzhou