DOI: 10.5846/stxb202008182157
欧阳睿康,孙武,陈敏,孙靓,朱琳琳,乔志强.广州市主城区城市地形类型与风环境评价.生态学报,2021,41(7):2642-2651.
Ouyang R K, Sun W, Chen M, Sun J, Zhu L L, Qiao Z Q.Urban terrain types and evaluation of wind environment in the main urban area of Guangzhou. Acta Ecologica Sinica,2021,41(7):2642-2651.

广州市主城区城市地形类型与风环境评价

欧阳睿康,孙　武*,陈　敏,孙　靓,朱琳琳,乔志强
华南师范大学地理科学学院,广州　510631

摘要:对城市地形组合类型及其地形对风场影响的研究,有助于城市风场机理的认识与生态环境的优化。以高层建筑密集的广州市主城区为例,在确定城市宏观地形类型的基础上,基于最小成本路径(LCP)辨识了风道,并对风环境质量进行评价。主要结论有:(1)将城市地形简要概括划分为 4 个一级地形、11 个二级地形类型。(2)以 LCP 路径与盛行风交角不超过 22.5°的标准,筛选确定通风路径作为风道。根据 LCP 格网的密度与频次,结合不同风向下风速与风频,评价分析了风环境类型与空间分布。(3)根据自然与城市地形的配置,北风风环境质量远高于西北风和东风;东风由于风频与风速最低,因此通风条件较差。(4)珠江航道在三种风向下都是尺度最宽贯穿城市最好的风道;区域性的风道与风环境较好的地段集中在与主风向平行的主干道上,但以近似南北走向的居多;由于广州城市地形高度以珠江新城峰林为中心向外递减,以低地地形为主的主城区外围通风优于中心区域,特别是珠江新城峰林与网络状台地为主的老城区,通风环境较差。基于 LCP 的评价结果需要同其他方法相互验证,才能使其不断完善优化。

关键词:混合 DEM;地形分类;LCP;风环境类型;广州

Urban terrain types and evaluation of wind environment in the main urban area of Guangzhou

OUYANG Ruikang, SUN Wu*, CHEN Min, SUN Jing, ZHU Linlin, QIAO Zhiqiang
School of Geography, South China Normal University, Guangzhou 510631, *China*

Abstract: Research on the types of urban terrain combination and the influence of terrain on wind field is helpful to understand the mechanism of urban wind field and optimize its ecological environment. Taking the main urban area of Guangzhou with dense high-rise buildings as an example, on the basis of determining the urban macro-terrain type, the air duct is identified based on the low cost path (LCP), and the wind environment quality is evaluated. The results show that (1) the urban terrain is briefly divided into 4 first-grade terrains and 11 second-grade terrains. (2) According to the standard that the intersection angle between LCP path and prevailing wind does not exceed 22.5°, the ventilation path is screened and determined as the wind duct. Base on the density and frequency of LCP grid, combined with wind speed and wind frequency under different wind directions, the wind environment type and spatial distribution were evaluated and analyzed. (3) According to the configuration of natural and urban topography, the environmental quality of north wind is much higher than that of northwest wind and east wind. The east wind has the lowest wind frequency and wind speed, so its ventilation condition is poor. (4) The results show that the Pearl River waterway is the widest and the best wind passage in the city under three wind directions. The regional wind tunnel and the section with better wind environment are concentrated on the main road parallel to the prevailing wind direction, but the most of them are similar to the north-south direction.

基金项目:国家自然科学基金项目(41771001);广州市科技计划项目(201704020136)
收稿日期:2020-08-18;　　**修订日期**:2021-03-03
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: sunnw@scnu.edu.cn

Because the height of Guangzhou urban terrain decreases outward with the Peak Clusters of Pearl River New Town as the center, the ventilation of the periphery of the main urban area dominated by low-lying terrain is better than that of the central area. In particular, the old urban area with Peak Clusters and network platform in New Pearl River City has poor ventilation environment. Based on the LCP evaluation results, this paper requires mutual verification of different technical routes in order to improve and optimize them continuously.

Key Words: mixed DEM; terrain classification; leastcost path; wind environment type; Guangzhou

1980 年以来,中国城市经历了历史上最大规模的平面扩展与垂向高度的抬升,北京、上海、广州、香港、重庆等成为全球城市高层、超高层建筑物密集分布的城市[1-3]。城市建筑高度与密度的提高,导致城市风速降低,风环境质量变差。同时,伴随着城市建筑高度与密度的提高,原有的自然地形发生了极大改变,城市人工地貌类型变得多种多样。风环境质量是生态环境质量的一个重要内容,它与热岛强度、雾霾天气出现频率和静风日数等指标密切相关。在同样的来流之下,风环境质量主要依赖于区域的地形类型及其在整个城市宏观地形中所处的相对位置。高层建筑集聚的城市内部、建筑密度较高的“城中村”、高层围绕的“盆地”,以及由密集高层形成的背风区,由于风速减缓,形成城市内部高温和污染物不易扩散的斑块。因此,准确的划分城市地形组合类型,并选择合适的风环境评价方法,才能客观地反映城市地形组合类型及其地形对风场影响[4-5]。近地面风环境质量的评价,将有助于优化和提高城市宜居环境的质量。

虽然自然地形分类体系与标准的研究已经比较完善[6-8]。然而,由于自然地形和城市人工地形差异较大,目前城市人工地形的划分还不能直接引用自然地形的分类体系与标准[9]。城市地形前期的分类相对简单,侧重于城市构筑物[10-11]。相比之下,近年来李雪铭对城市地形的划分最为系统[12-13]。传统的地貌类型划分主要依靠判读勾画,近年来,多基于 ArcGIS,通过数字高程模型数据(DEM)进行地形地貌形态的分类[14-16]。另外,与城市建筑地形相关的指标如建筑高度、建筑密度、城市天际线、城市体积及分维数、城市三维重心等在城市地形分析中得到了广泛的应用[17-23]。总体上,相比于城市高层建筑的发展速度以及社会的需求,针对城市地形分类的标准、方法以及应用的研究还比较缺乏。不过,仍可以借鉴自然地形的分类体系与建筑形态指标,基于 GIS 对城市地形进行分类。其中自然地形的分类体系里,海拔高度、相对高度、起伏度以及地形单元的平面形状是地形类型划分的主要指标,从而也成为城市建筑地形分类的主要指标。

城市地形与风环境相互关系的研究中,城市风道的规划是关注的重点。无论空间尺度大小,城市风道识别与风环境的评价必然要考虑自然与人工地形[24]。在 ArcGIS 平台借助 LCP(Least cost path),能确定费用表面的最佳路径[25]、动物的最佳生态廊道[26-30],以及偷采者可能的潜入路线[31]。在风环境研究领域中,目前在迎风面密度(λ_f)基础上,运用 LCP 识别城市风道的尝试逐渐增多[32-36]。总体上,运用 LCP 对风道的辨识中,基于格网评价相对较多,更多的突出了建筑物的相对高度,适合运用于平原城市,对于自然地形考虑不足。同时,LCP 的运用仅限于风道识别,还没有扩展到风环境质量的评价。

综上所述,本文以高层建筑密集的特大城市广州主城区为例,从宏观的城市尺度出发,基于建筑与自然地形形成的综合 DEM,对城市地貌的形态特征进行简要的分类。在此基础上,运用最小路径法,在三种主风向约束下,辨识和评估了城市尺度的风道以及城市的风环境质量。

1　数据来源与研究区域

本文数据主要包括:2014 年等高距 5 m 的等高线数据、2017 年广州市单体建筑数据(https://www.udparty.com/index.php/lists/data)和 2016 年底 GF-2 卫星遥感影像。上述三类数据符合后面综合 DEM 构建的分辨率要求。除此之外,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),是后续通过风频与风速评价风环境质量的依据。

本文所划定的广州市主城区是以珠江新城为中心半径约为 12 km 的范围,包括了整个海珠以及传统的越秀、荔湾、芳村、天河以及白云区的大部分,面积约为 447 km^2。主城区北部为白云山、凤凰山、火炉山等丘地,南部有珠江前后航道、海珠湿地、万亩果园等。研究范围包括了中部城市建筑密集区、北部白云山低丘以及平坦的东南部湿地三大地理单元,能反映城市建筑密集区与周边地形的风场相互作用,也能较好地体现珠江、建筑物之间以及丘陵地形夹持下不同类型的风道(图 1)。

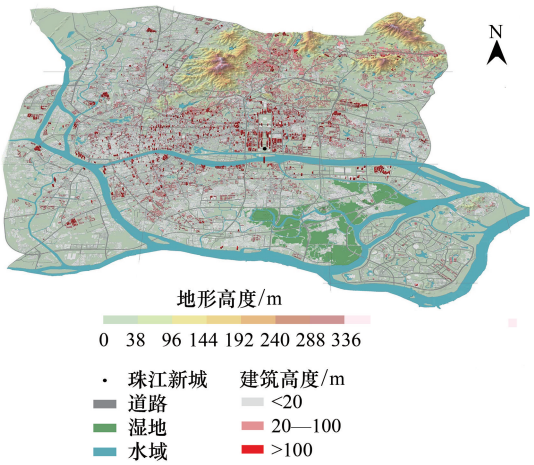

图 1 研究区域单点建筑物高度的分布

Fig.1 Distribution of height of single-point buildings

2 城市地形的分类标准与地形特点

2.1 综合 DEM 的生成

根据等高线生成的数据,获得每幢单点建筑物的基底海拔高度,将其与建筑本身高度相加,获取建筑物的绝对高度。以建筑面的质心代表建筑物位置,得到建筑的高程数据。地形等高线亦转为折点,同样形成地形的高程数据。保留珠江的基本形态,将珠江水域的矢量面数据同样转化为折点,赋高程为 0 m,和前述建筑、地形高程数据合并,得到包括建筑、地形、水域三种要素在内的点集合。在 Surfer 软件下采用最小曲率法,生成混合的 DEM,采样分辨率为 50 m。使用最小曲率法可在保持数据科学性的同时,生成尽可能圆滑的曲面。

2.2 城市地形的概括标准

在分辨率为 50 m 综合的 DEM 的基础上,重新设定等高距。通过近邻分析用 150 m 对建筑物再进行聚合,形成进一步概括的 DEM。根据绝对绝对高度 H、相对高度($H_{外}-H_{内}$)以及平面形状(扁度)三个指标,确定面向城市尺度城市风环境评价的简要标准。其中绝对高度对应自然地形分类中的海拔高度,相对高度表示地形单元的起伏程度,平面形状反映地形的空间结构,三个指标均为自然地形分类的主要指标。

城市地形命名参考了自然地形的命名方式,三个指标设定考虑了主城区建筑物与丘陵高度发育的特点。居住是城市的首要功能[37],本研究区域住宅区在空间连片发育,多层建筑(5—8 层)占比较高,建筑高度都在 24 m 以下。若将林木视为一种特殊的建筑类型,其高度一般不超过 15 m(5 层),主城区分布的林木占研究区域的 31.19%,加上 1—8 层建筑基底面积 16.08%,两者共占区域面积的 47.27%。如果单从建筑基底面积的角度来考虑,2017 年 1—8 层占总建筑基底面积 74%(图 2)。因此,离地面 24 m 的高度形成了主城区由建筑和林木组成的基本高度面。另外,白云山山麓的绝对高度基本处于 55 m,在此海拔以下,2017 年主城区建筑物基底面积占总基底的 99%以上。而超过 55 m 的高层建筑,虽然建筑基底面积占总基底不到 5%,体积却达到了建筑总体积的 20%(图 2),对城市地形及其风场能够产生重要影响。基于以上分析,以绝对高度 H 作为基本指标,划分 H<24 m 连续平坦的区域为低地,24—55 m 为台地,H>55 m 的为高地,再通过对相对高差

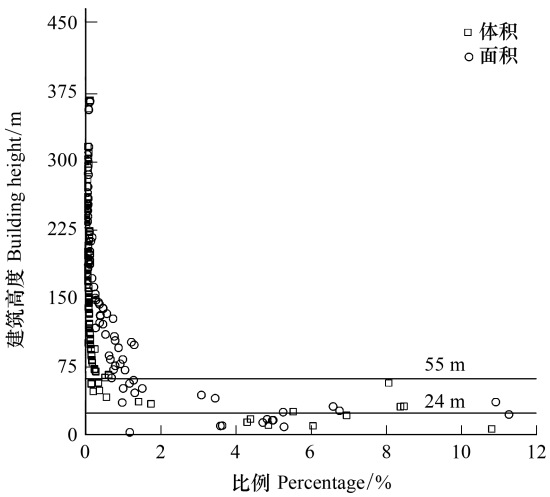

图 2 2017 建筑基地面积与建筑物体积随高度的变化

Fig. 2 Variation of Building Base Area and Building Volume with Height in 2017

($H_{外}-H_{内}$)的正负,识别是否为洼地,由此确定一级地形分类中的四类地形:洼地、低地、台地、高地。通过编程计算平面形状的扁度,经判别,扁度标准设定在 0.7 能较好的区分洼地中的盆地与谷地:

$$B=1-\frac{L}{w} \tag{1}$$

式中,B 为扁度,L 为最小外接矩形的长度,W 为最小外接矩形宽度。盆地的类型可由相对高差($H_{外}-H_{内}$)标准进一步细化,$H_{外}$为边界外缓冲 100 m 内的平均高度,若以广州市的盆地最低海拔在 0 m 为基准,盆地内外部高差达到 55 m 以上,则跨越了三个高度面,属于深盆地,否则该盆地属于浅盆地;若盆地未闭合的边达到盆地周长的 1/4,则为半盆地。谷地的类型则根据平面形态细化划出峡谷;台地根据能否连续又可细将分为台地与网络型台地;高地中高于 55 m 的区域分自然与人工两类地形,其中自然地形丘陵以北部白云山为代表,人工建筑地形通过 150 m 近邻聚合形成的面为峰林,无法聚合的为孤峰。由此,广州城市地形可简要概括划分 4 个一级地形、11 个二级地形类型(表 1)。

表 1　广州主城区城市地形类型划分简要标准

Table 1　Urban Terrain Classification and Its Characteristics

一级地形 First-grade terrain	二级地形 Second-grade terrain	指标 Index	依据 Basis		典型类型 Typical type	面积 Area /km²	面积 Area /%
洼地 Low-lying land	浅盆地	$0<H_{外}-H_{内}\leqslant 55$ m	$H_{外}$ 为外缓冲 100 m 内的平均高度,$H_{内}$ 同上,盆地边缘需手动划分		石牌村、天河公园	27.4	6
	深盆地	$H_{外}-H_{内}>55$ m			冼村、珠江公园	1.5	0.3
	半盆地	S<C /4、$0<H_{外}-H_{内}\leqslant 55$ m	盆地边缘需手动划分,S 是未闭合的边,C 是盆地周长		海珠区凤阳街道一带	15.9	4
	峡谷	$H_{外}/H_{内}<1$、扁度>0.7	峡谷类型边缘需手动闭合	狭长	白云山西侧、荔湾区与海珠区之间的珠江后航道	11.9	3
	谷地			沿着道路、河流等低地蜿蜒	东圃-黄村-岑村/沙面,珠江	41.3	9
低地 Lowland	低地	$H<24$ m	平坦连续的低层建筑		主城区西北、西南、东南三个方向外围	165.2	37
台地 Platform	台地	H 24-55 m	连续		白云山南侧大片区域	108.2	24
	网络状台地	$H_{外}/H_{内}>1$	网络状		越秀、荔湾的老城区、林和西	17.1	4
	丘陵	$H_{>}55$ m	自然地形		白云山、火炉山	42.9	10
高地 H_{i}ghland	峰林	$H_{>}55$ m	150 m 距离聚合连片		珠江新城一带	11.2	3
	孤峰	$H_{>}55$ m	150 m 距离内不能聚合		零散分布,广州塔为代表	4.2	1

城市建筑组成的地形与自然地形相比,在相同的空间尺度内,缺乏过渡性,变化突然,类型众多。建筑高度受成本的制约,多层建筑占比高,形成了城市建筑的基地,因而台地、低地占比较高(61%),而与高层建筑相关的地形峰林和孤峰占比较低(4%)。负地形洼地的谷地、峡谷、深盆地、浅盆地与自然地形相比,边界清晰,几何组合特征明显。网络状台地可能属于城市建筑特有的地形。本文对综合 DEM 的简化概括,更适合于城市尺度立体模型的构建。

2.3　城市地形类型及其风环境特征

Bornstein 等认为当风速超过 4 m/s 时,可以有效缓解城市内部的热岛效应[38]。因此,在城市边界层,风

速是影响气象环境质量的重要因素。而城市建筑高度的差异抬升极大地丰富了人工地形的类型。主城区 11 种二级地形类型将在同样的来流下,将对应不同的风场类型,从而使城市风环境趋于多样复杂。主城区地形类型中,面积比例最大的分别是低地(37%)与台地(24%),反映了城市建筑地形中间高周边低阶梯型下降的特点。低地位于主城区外围,主城区内部的相对较高的台地、丘陵、网络状台地、峰林与孤峰占比 42%,与主城区外围的宽广的低地相比,对应的风环境质量相对较差(图 3)。台地之间所包围的谷地与峡谷占总面积的 12%,主要包括珠江及其周边、车陂涌沿岸以及增埗河至三元里大道两侧随河流或道路形成的谷地,上述谷底将成为主城区内部建筑密集区城市尺度的潜在通风走廊。另外在白云山西侧也形成长度为 5 km 和 3 km 的两条峡谷,可成为潜在的地方尺度风道。位于主城区内部的城中村和其他多层建筑,外围被高层住宅或商业大厦包围,形成深浅不同的盆地。盆地总面积为 44.8 km^2,占主城区的(10.5%),典型的有石牌村、珠江公园、广州东站广场等,潜在通风环境差。北部 200—300 m 的白云山及火炉山等丘陵构成主城区外围的风屏障区域,并通过风影区影响来流下方的通风环境。同样,以珠江新城为中心的广州中心商务区密集的超高层建筑形成了 11.2 km^2连续的峰林,成为广州城市高度的屋脊,也将随着不同的风向产生人工地形下的风影区域。最后,越秀、荔湾一带新建的高层与原有的低矮楼房交错,形成在城市地形中独特的网络状的台地(4%)以及零散分布的孤峰,将产生特殊的风环境形式。

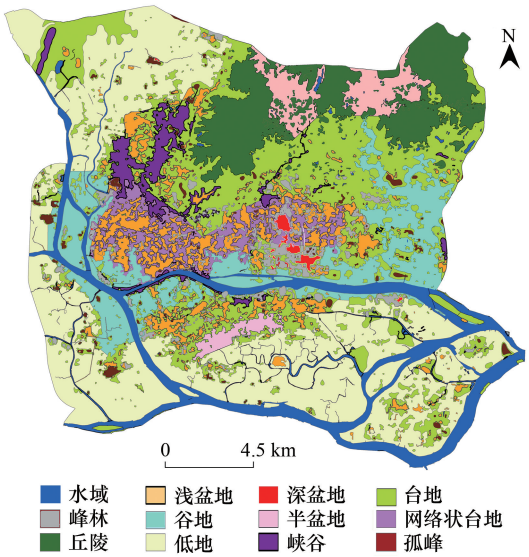

图 3 广州主城区城市地形组合分类

Fig.3 Stereoscopic skeleton map of Urban Topographic interaction classification of Guangzhou main Urban area

此外,由于北部白云山丘陵的存在,总体上城市地形北高南低,并呈现出围绕珠江新城向外围阶梯递减的趋势。而坡面上珠江新城峰林与白云山之间,也就是自然地形丘陵与人工地形高台地间的地形配置将决定和影响不同来流下城市尺度风道与宏观风场环境的质量。

3 基于城市地形风道的识别与通风环境质量的评价

3.1 风道识别(LCP)与通风环境质量的评价

前人基于格网 λ_f,应用 LCP 对风道的识别,只考虑建筑相对高度,同时并且未对 LCP 进行走向筛选[39]。本文利用综合的 DEM,近似均匀的在城市盛行风入口边界和出口边界上分别设置出入口。如在研究区边界的北侧布置风道的入口,在南侧布置出口,一般出入口各设置 50 个。通过 Python 编程,以海拔高度值为成本大小,计算从起点到终点的累积总成本。初步生成的 LCP 路径会出现与盛行风严重偏离的情况,因此需要经过进一步筛选剔除(图 4)。理论上风道的走向应尽量与主导风向保持一致,才能使风道具有较好的通风效果。另外,Givoni、匡晓明等也对风道走向与风向之间的关系进行了进一步的研究,提出夹角应控制在 30°以下[40-41]。因此,本文以 LCP 与盛行风最小夹角在 22.5°以内的路径作为标准,筛选城市风道。经过筛选后,代表从多个起点和终点组合而来的北风、西北和东风最小成本路径分别共有 3116、1979、1577 段。在来流的风速确定后,风环境的质量依赖于地形的类型与城市宏观地形的组合。地形单元能否处于通风路径,以及通风路径上来流经过的频率直接影响风速,进而决定风环境的优劣。因此,本文根据通过单位面积 LCP 经过且累计的总像元数来评价不同风向下通风环境的质量。某一区域内 LCP 出现次数越多,单位面积累积的总像元素越多,意味着来流通过的概率较高,通风环境质量较高。反之,若周边地形较高,阻止了来流的进入,风环境

质量差。

栅格路径(P)是一组相邻栅格像元构成的有序序列:

$$P = \{p_i\}, i = 0,1,2,\ldots,n \tag{2}$$

式中 p_i 是栅格像元,i 表示有序序列,p_0 称为起始点,p_n 称为终点。近邻成本 C 用来描述 2 个相邻栅格像元之间的高低差异:

$$C = |p_1 - p_2|^k \tag{3}$$

式中 p_1、p_2 是 2 个栅格像元值的向量,$|p_1 - p_2|$ 表示 2 个栅格像元向量差的模,k 是一个常数,用来调节近邻成本的大小。路径成本(D)用来描述起始点与终点之间某条栅格路径的成本积累,即:

$$D = \sum_{i=1}^{n-1} C_i = \sum_{i=1}^{n-1} f(p_i, p_{i+1}) \tag{4}$$

式中 C_i 是栅格路径中每对相邻栅格像元之间的近邻成本。最小成本(P^*)值是起始点 p_0 和终点 p_m 之间拥有最小路径成本,即

$$p^* = \mathrm{argmin} D_j, j = 0,1,2,\cdots,m \tag{5}$$

式中 m 表示第 m 条栅格路径,D_j 为第 j 条路径的成本。据此可通过计算同一路径不同风道上 LCP 的重叠次数,得出某条 LCP 经过的累计像元总量。LCP 生成的是矢量数据,在转换为栅格数据后,本文以 1×1　km 的格网为单位,统计在同一风向下,格网内 LCP 从第 1 条到第 n 条最小路径累计经过的像元总个数 M(式 6)称为 LCP 密度。其中 A 为格网面积,L_i 为第 i 条 LCP 所经像元个数,R_i 为该条 LCP 重叠的次数。

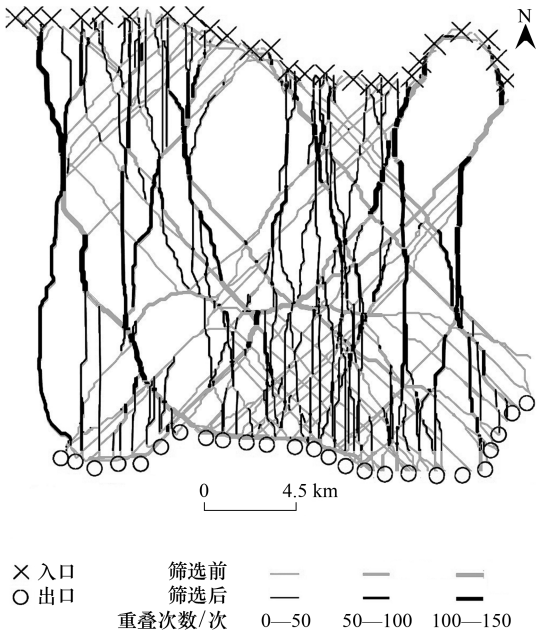

图 4　北风下筛选前后的 LCP 路径对比

Fig. 4　Comparison of LCP Paths before and after Screening under the north wind

$$M = \frac{\sum_{1}^{n} L_i \times R_i}{A} \tag{6}$$

对 2016 年研究区内 10 个自动气象站的逐时风速风向数据进行统计,结果表明正北-正南风是研究区内全年最常见的风向,风频占全年的 41%,其次是西北及东南风向为 25%,东风及西风方向只有 16%。鉴于 LCP 的算法,两个完全相反的风向下 LCP 路径基本相同。因此,本文选择风频较高的北风、西北风和东风三个风向进行辨识与评价。经过归一化处理,北风/南风、西北/东南风、东/西风风频 p_j 分别占 41%、25%、16%,年平均风速 v_j 分别为 1.9、1.7、1.1(m/s),j 为不同类型的风向,结合不同风向下的风速、风频,用式(7)表达不同风向和全年的风环境的质量 Q。

$$Q = \sum_{j=1}^{3} M_j \times p_j \times v_j \tag{7}$$

不同风向下前五位 LCP 密度最高的格网反映了较高的通风强度,具有重要的生态意义,属于城市风环境中的枢纽地段,本文称为风口。利用公式(5)、(6)和(7),结合地形类型进行风道辨识与风环境质量的评价(表 2、图 5)。对研究区划分 1 km 的格网,共有 499 个,将 1 km 格网内的像元密度 M(式 6)分为三档,它们均为通风区,没有 LCP 经过的区域为弱风区。

3.2　不同盛行风向下风环境的评价

3.2.1　北风

北风在通风区面积在三个风向里 LCP 所经过的像元总数、通风区平均像元数、最大通风强度以及排名稍低于东风(表 2)。由于在三风向下风频(41%)与风速(1.9 m/s)最高,风道密度大,风环境质量 Q 是其他两风

向的近 5 倍,通风条件最好。白云山西侧的低地与南北走向的珠江西航道谷地、珠江新城东侧的低地与海珠岛低地,相互配置形成南北延伸面积广大的通风区,相应也发育了南北贯穿的多条风道(图 5)。

表 2 不同风向下通风环境质量

Table 2 Ventilation environment quality in different wind directions

风向 Wind direction	弱风区 Weak winds area		通风区 Ventilation area		LCP 累计所经像元总数 M: Total number of pixels passing through the LCP/(10^6)	通风区平均像元数 Average number of pixels in ventilation area/(10^6/km^2)	最大通风强度 Maximum ventilation intensity/(10^6/km^2)	风频 p_j Wind f requency/%	年平均风速 v_j Annual average wind speed/(m/s)	通风质量 Ventilation quality
	/km^2	/%	/km^2	/%						
N	143	28.8	356	71.2	24.4	0.17	1.52	41	1.9	19.0
NW	128	21.8	371	74.2	10.2	0.03	0.28	25	1.7	4.33
E	223	44.8	276	55.2	25.1	0.28	4.32	16	1.1	4.41

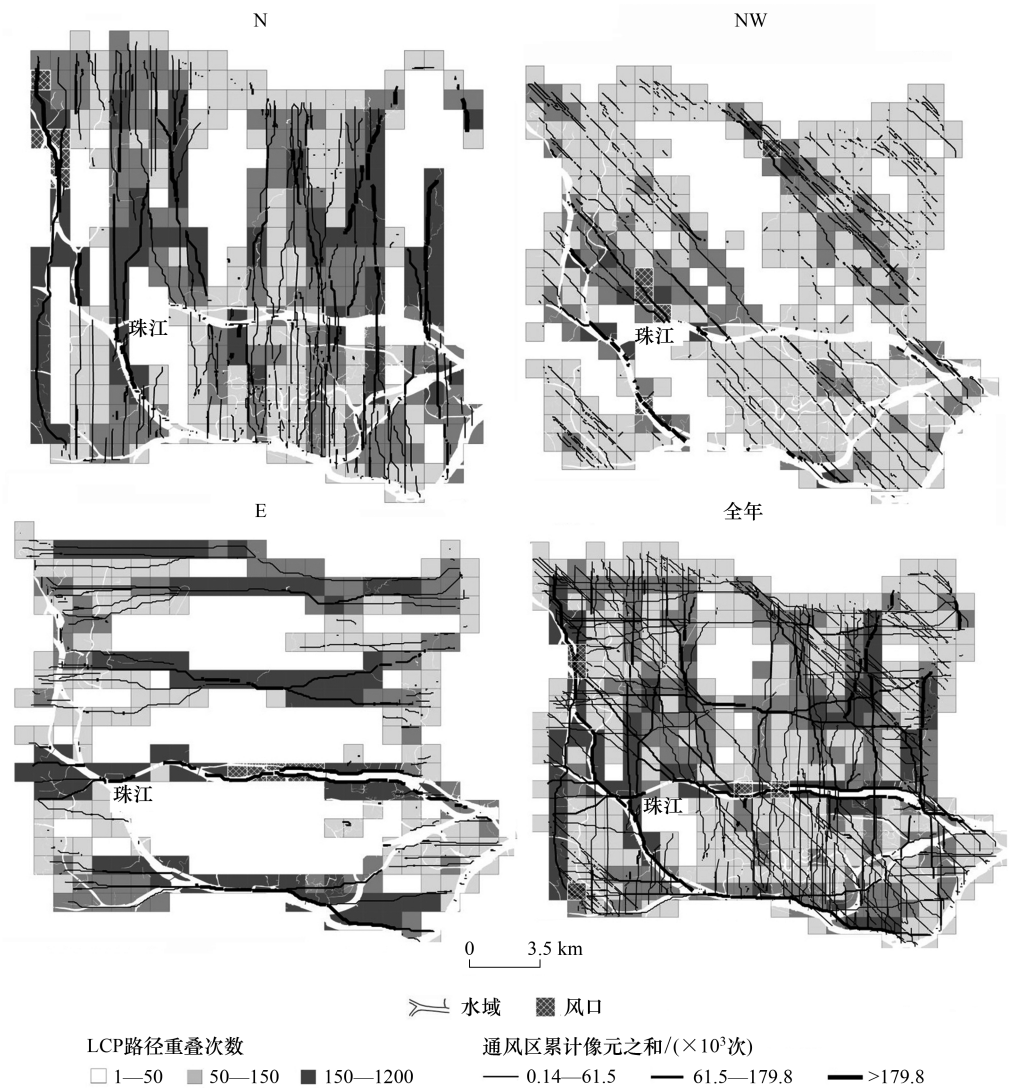

图 5 不同风向下风道与通风环境质量(N: 北风;NW: 西北风;E: 东风;全年)

Fig.5 Wind environment conditions (N: North wind; NW: Northwest wind;E: East wind;Whole year)

通风区面积占研究区总面积的 71.2%,通风区环境优良。特别是珠江西航道宽谷,成为南北延伸的重要风道,同时风口也主要发育在此风道上。通风区主要集中在珠江后航道-荔湾区南部,以及南北走向的主干道上,如流花湖-康王路/长寿路、东濠涌高架路、广州大道北、科韵路-华南快速干线、广州环城高速等。在白云山、在白云山火炉山南面,由于处于背风区, LCP 经过次数少,为弱风区。此外,弱风区还包括海珠区西部的网络状台地、增槎路和机场路之间,以及荔湾区环城高速与荔湾大道之间的区域。

3.2.2　西北风

西北风向下,通风区占比最大达到 74.2%,但 LCP 所经过的像元总数、通风区平均像元数、最大通风强度在三个风向里排名最差(表 2),(图 5)明显的显示出稀疏的 LCP 路径。白云山与建筑密集的主城区东北西南方向的配置总阻止了西北风的沟通,风环境质量 Q 只有 4.33。通风区主要分布在两个区域,一是白云山西南侧,广清立交以南,中山八路以北;二是火炉山以南,黄村立交一带,由白云山与龙洞之间的风口向东南方向延伸的扇形区域,在地形上黄村-东圃一带谷地与西北风一致,通风效果较好。白云山与珠江新城峰林之间既属于白云山的风影区,同时建筑物也较为密集,形成了弱风区域。此外,弱风区包括海珠区西部与荔湾老城区台地、网络状台地,海拔超过 24 m,通风性能较差。风口出现在解放中路和北京路一带以及白云山与火炉山之间,以及珠江西航道以及前航道的东侧。

3.2.3　东风

由于白云山、珠江新城峰林区以及珠江前后航道东西向的配置都与东风相顺应,使得东风下具有较好的潜在通风环境(图 5),表现在 LCP 所经过的像元总数、通风区平均像元数、最大通风强度在三个风向里排名最高(表 3),但通风区面积(55.2%)在三风向下最低。考虑到三风向下最低的风频(16%)与风速(1.1 m/s),总体通风条件较差,风环境质量 Q 只有 4.41,同西北风相同。在主城区与白云山之间、珠江前、后航道形成了自北向南三条明显的东西向城市尺度的风道。北部的白云山阻断了东西之间的交换,形成了面积广大的弱风区。荔湾-天河区,海珠区之间网络型台地,属于弱风区。风口出现在石牌桥以及珠江新城与海珠区之间的珠江航道上。

3.2.4　全年

基于公式(7)对全年风道与通风环境质量进行评价(图 5)。珠江航道在三种风向下均为尺度最宽贯穿城市最好的风道,相应地风道周边风环境质量也高。受制于风向、风频与风速,区域性的风道、风环境较好的地段集中在与主风向平行的主干道上,但以南北走向居多,如华南快速路与环城高速路。北部白云山形成的风口,对主城区的通风质量有重要制约作用。风口除了白云山外,还分布在珠江航道上与城市内部的低地。城市内部的风口通风强度大,可能出现的强风将引起生态风险,需予以防范。由于广州城市地形以珠江新城高台地为中心向外递减,导致以低地地形为主的主城区外围通风优于中心区域,特别是珠江新城峰林与网络状台地为主的老城区通风环境差。另外,高度超过 55 m 的白云山与作为城市屋脊的珠江新城,随着风向的变化,所形成的背风区域也影响下游的风环境。

4　结论与讨论

4.1　结论

4.1.1　根据建筑基底高程值,生成分辨率为 50 m 地形与建筑混合的 DEM。由绝对高度、相对高度以及平面形状,通过近邻分析与聚合,面向城市风环境的研究,将城市地形简要概括划分 4 个一级地形、11 个二级地形类型。概括后的地形类型及其空间组合将利于城市尺度风道与风场环境质量的宏观展示。

4.1.2　以海拔高度值为成本大小,以 LCP 路径与盛行风交角不超过 22.5°的标准,筛选确定通风路径作为风道。根据 LCP 格网的密度与频次,结合不同风向下风速与风频,评价分析了不同盛行风向下风道、风口等风环境类型与空间分布。本技术路线,突出了地形影响,分辨率高,会较好的服务于城市规划。

4.1.3　主城区自然人工复合地形与风向的宏观配置决定不同风向下的风环境类型与质量。北风风环境质量

远高于西北风和东风,白云山风影区使得西北风风环境变差,东风具有较好的潜在通风环境,但由于最低的风频与风速,通风条件较差;珠江航道在三种风向下都是尺度最宽贯穿城市最好的风道;区域性的风道与风环境较好的地段集中在与主风向平行的主干道上,但以近似南北走向的居多;北部白云山形成的风口,对主城区的通风质量有重要制约作用;由于广州城市地形以珠江新城峰林为中心向外递减,导致以低地地形为主的主城区外围通风优于中心区域,特别是珠江新城峰林与网络状台地为主的老城区通风环境差。上述风环境特点,应在城市规划中予以重视。

4.2 讨论

数值模拟、物理风洞模拟以及风要素野外实测等多种技术路线均可实现风道的辨识与风环境质量的评价,但各自均具有明显的优势与不足。野外实测由于样本的局限,难以与其他平台上对整个城区风环境的评价结果相匹配,增加了结果验证的难度。同时,无论是数值模拟、物理风洞模拟还是基于 GIS 平台的评价结果均对城市立体形态进行了简化和概括,要同野外观测数据进行验证还需要进行尺度的转换。对于来流正好相反的西北风和东南风、东风和西风, LCP 路径结果是相同的,这也说明该方法所存在的局限性。因此,基于评价结果需要不同技术路线的相互验证,才能使其不断完善优化。

本文在 50 m 格网的基础上产生综合的 DEM,利用 LCP 所辨识风道的分辨率高于百米尺度的格网。未来可以根据城市规划的需要,提高综合 DEM 的分辨率,突出单点建筑物,确定风道的空间边界。另外,LCP 方法尽管可以确定不同风向、不同季节,以及全年所对应的风道与风环境质量,但可操作性风道最终的确定,还要考虑经济成本、交通的通畅性等其他要素。

参考文献(References):

[1] 葛珊珊. 基于 Urban DEM 的城市三维形态研究——以南京老城区为例[D]. 南京: 南京师范大学, 2009.

[2] Lin J, Huang B, Chen M, Huang Z. Modeling urban vertical growth using cellular automata—Guangzhou as a case study. Applied Geography, 2014, 53: 172-186.

[3] Shi L Y, Shao G F, Cui S H, Li X Q, Lin T, Yin K, Zhao J Z. Urban three-dimensional expansion and its driving forces—a case study of Shanghai, China. Chinese Geographical Science, 2009, 19(4): 291-298.

[4] 李大全, 孙武, 欧阳睿康, 黄盛, 高梦媛, 李庆祥, 黄启明. 湍流度随高度的变化及其对城市宏观地形的依赖. 热带地理, 2019, 39(3): 365-376.

[5] Sun W, Li T. Building height trends and their influencing factors under China's rapid urbanization: a case study of Guangzhou, 1960-2017. Chinese Geographical Science, 2020, 30(6): 993-1004.

[6] 中国科学院自然区划工作委员会. 中国地貌区划(初稿). 北京: 科学出版社, 1959: 24-29.

[7] 中华地理志编辑部. 中国自然区划草案. 北京: 科学出版社, 1956: 21-56.

[8] 中国科学院地理研究所. 中国 1:1000000 地貌图制图规范(试行). 北京: 科学出版社, 1987: 1-44.

[9] 丁锡祉. 简论城市地貌学. 山地研究, 1988, 6(2): 65-72.

[10] 况明生. 沙坪坝地区城市地貌分类与制图. 西南师范大学学报: 自然科学版, 1990, 15(4): 498-505.

[11] 张友刚, 陈国建. 城市地貌分类研究——以重庆市北碚区为例. 西南师范大学学报: 自然科学版, 2000, 25(6): 713-717.

[12] 李雪铭, 周连义, 王建, 葛庆龙, 李双建. 城市人工地貌演变过程及机制的研究——以大连市为例. 地理研究, 2003, 22(1): 13-20.

[13] 潘凤英. 普通地貌学. 北京: 测绘出版社, 1989.

[14] 孙慧敏, 唐磊, 杨松, 柳青. 基于 SRTM-DEM 的安徽省地貌分类研究. 水利与建筑工程学报, 2016, 14(5): 189-192.

[15] 汪禹芹, 李艳, 刘爱利. 基于面向对象思想的中国地貌形态类型划分. 遥感信息, 2012, (1): 13-18.

[16] 秦承志, 朱阿兴, 施迅, 李宝林, 裴韬, 周成虎. 坡位渐变信息的模糊推理. 地理研究, 2007, 26(6): 1165-1174.

[17] 乔伟峰, 刘彦随, 王亚华, 陆昱颖. 2000 年以来南京城市三维空间扩展特征. 地理研究, 2015, 34(4): 666-676.

[18] 贺思嘉. 基于多源数据的城市三维扩展研究——以兰州市城关区为例[D]. 兰州: 兰州大学, 2020.

[19] 杨俊, 国安东, 席建超, 葛全胜, 李雪铭. 城市三维景观格局时空分异特征研究——以大连市中山区为例. 地理学报, 2017, 72(4): 646-656.

[20] 周鹏, 潘悦, 王丽, 彭玉玲, 刘文祥. 居住空间三维形态的多尺度研究——以武汉市主城区为例. 地域研究与开发, 2018, 37(3): 69-74.

[21] 乔伟峰, 刘彦随, 王亚华, 项灵志. 城市三维重心算法与实验分析——以南京市为例. 地球信息科学学报, 2015, 17(3): 268-273.

[22] 陈探, 刘淼, 胡远满, 常雄凯, 李春林, 徐岩岩, 施拓. 沈阳城市三维景观空间格局分异特征. 生态学杂志, 2015, 34(9): 2621-2627.
[23] 史北祥, 杨俊宴. 基于 GIS 平台的大尺度空间形态分析方法——以特大城市中心区高度、密度和强度为例. 国际城市规划, 2019, 34(2): 111-117.
[24] 孙武, 王义明, 王越雷, 陈东梅, 陈世栋. 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.
[25] Lee Dan Stucky J. On applying viewshed analysis for determining least-cost paths on Digital Elevation Models. International Journal of Geographical Information Science, 1998, 12(8): 891-905.
[26] Rees W G. Least-cost paths in mountainous terrain. Computers & Geosciences, 2004, 30(3): 203-209.
[27] Li H L, Li D H, Li T, Qiao Q, Yang J, Zhang H M. Application of least-cost path model to identify a giant panda dispersal corridor network after the Wenchuan earthquake——case study of Wolong Nature Reserve in China. Ecological Modelling, 2010, 221(6): 944-952.
[28] 诸葛海锦, 林丹琪, 李晓文. 青藏高原高寒荒漠区藏羚生态廊道识别及其保护状况评估. 应用生态学报, 2015, 26(8): 2504-2510.
[29] Pinto N, Keitt T H. Beyond the least-cost path: evaluating corridor redundancy using a graph-theoretic approach. Landscape Ecology, 2009, 24(2): 253-266.
[30] Nourani E, Safi K, Yamaguchi N M, Higuchi H. Raptor migration in an oceanic flyway: wind and geography shape the migratory route of grey-faced buzzards in East Asia. Royal Society Open Science, 2018, 5(3): 171555.
[31] 张钦, 张昆. 基于最小费用路径(LCP)的偷采者路线模拟与防范——以广西防城金花茶国家级自然保护区为例. 林业调查规划, 2018, 43(5): 25-29.
[32] 李廷廷. 基于城市形态和地表粗糙度的城市风道构建及规划方法研究——以深圳市为例[D]. 深圳: 深圳大学, 2017.
[33] Wong M S, Nichol J E, To P H, Wang J Z. 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.
[34] Qiao Z, Xu X L, Wu F, Luo W, Wang F, Liu L, Sun Z Y. 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.
[35] Hsieh C M, Huang H C. Mitigating urban heat islands: a method to identify potential wind corridor for cooling and ventilation. Computers, Environment and Urban Systems, 2016, 57: 130-143.
[36] 张弘驰. 基于迎风面积的滨海山地城市风廊发掘及设计策略[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
[37] 李雪铭, 姜斌, 杨波. 城市人居环境可持续发展评价研究——以大连市为例. 中国人口·资源与环境, 2002, 12(6): 129-131.
[38] Briatore L, Elisei G, Longhetto A. Local air circulations over a complex coastal site: a comparison among field surveys, hydraulic-and mathematical-model data. Il Nuovo Cimento C, 1980, 3(4): 365-381.
[39] 王开燕, 邓雪娇, 李海洋, 赵小伟, 祁秀香. 不同天气状况下气溶胶散射系数变化特征分析. 气象与环境科学, 2014, 37(1): 29-32.
[40] Givoni B. Climate Considerations in Building and Urban Design. New York: Wiley, 1998.
[41] 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. 城市规划, 2015, 22(9): 91-95.