

基于UCMap的城市环境气候空间格局分析 ——以广州市为例

赵文博¹, 刘洪杰^{1*}, 田雪婷^{1,2}, 李宝林², 曹伟宏³

(1. 华南师范大学地理科学学院, 广州 510631; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;
3. 华北理工大学建筑工程学院, 河北 唐山 063200)

摘要:城市化的不断深入使城市下垫面发生改变, 自然景观的大幅减少与人工建筑的大规模增加, 给城市气候与环境带来了巨大影响。城市环境气候图作为分析与调控城市环境气候、评估城市环境气候状况的工具与平台, 拓展了城市气候信息在城市规划与发展中的应用。针对目前中国华南地区城市环境气候研究缺乏多要素图层、多技术方法综合分析的现状, 充分考虑到不同要素对环境气候影响程度的差异, 论文结合已有的城市环境气候图的编制方法, 选择典型亚热带季风气候特征的广州市为研究区域, 构建了多环境要素、多评估时段、多技术方法的复杂下垫面城市环境气候图系统, 利用专业气象插值、遥感反演、GIS空间分析等多种技术手段, 对广州市空气质量、热负荷与通风潜力进行分析评估。结果表明: 广州空气质量和热负荷具有明显的季节和空间差异性, 通风潜力的空间差异性明显而季节变化微弱。通过进一步叠加分析各环境要素, 将广州环境气候划分为7种类型, 其中最适宜类型主要分布于北部山区林地与城间耕地, 最不适宜类型位于天河、越秀、荔湾的城市核心区以及白云、增城的工业密集区, 形成“北优南劣”的环境气候空间格局。最后, 以环境气候分析结果为基础, 提出各气候类型所在区域的简要规划措施, 为广州市的可持续发展提供科学建议与建设方向。

关键词:空气质量; 热负荷; 通风潜力; 环境气候空间格局; 广州市

中国作为最大的发展中国家, 城市化发展迅猛, 但同时也暴露出城市热岛(肖荣波等, 2005)、城市灰霾(吉振明等, 2010; Wang et al, 2012)等极端的气候问题。认识城市气候, 并将气候信息运用在城市规划与建设过程中, 是改善城市环境气候的重要途径之一, 也是建设可持续的、健康舒适的现代城市的有利手段。城市环境气候图(Urban Climatic Map, UCMap)作为针对城市环境气候的信息平台与评价工具, 是近年来城市气候与城乡规划等领域研究的重点与热点(任超, 吴恩融, 2012)。城市环境气候图基于城乡规划, 融合城市气候信息, 利用二

维空间展现城市气候现象与现存问题(VDI, 1997; Scherer et al, 1999; Ren et al, 2011)。20世纪50年代, 德国学者首次提议绘制一系列不同尺度且适合当地规划的气候地图系统(Matzarakis, 2005)。80年代, 气候学家在西德(即联邦德国)斯图加特以减弱大气污染为目的, 首次正式开展城市环境气候图的研究(Baumüller, 2001)。自此, 学者们陆续对德国、瑞典、英国、日本等20多个国家的多个城市, 与中国香港、北京、高雄、深圳、宁波等城市开展了城市环境气候图的研究与应用, 以引导可持续城市建设, 改善城市环境气候(Unger, 2004; 任超, 吴恩融,

收稿日期: 2018-04-20; 修订日期: 2018-10-09。

基金项目: 国家自然科学基金创新群体项目(41421001); 河北省教育厅重点项目(SD181061)。[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41421001; Key Projects of the Department of Education of Hebei Province, China, No. SD181061.]

第一作者简介: 赵文博(1993—), 男, 满族, 宁夏银川人, 硕士生, 主要从事景观生态规划研究。E-mail: zhaowb@m.scnu.edu.cn

*通信作者简介: 刘洪杰(1962—), 男, 山东济南人, 教授, 硕士生导师, 主要从事城市生态环境与景观规划研究。

E-mail: jack@scnu.edu.cn

引用格式: 赵文博, 刘洪杰, 田雪婷, 等. 2019. 基于UCMap的城市环境气候空间格局分析: 以广州市为例 [J]. 地理科学进展, 38(3): 452-464.
[Zhao W B, Liu H J, Tian X T, et al. 2019. Environmental climate spatial pattern of Guangzhou City based on urban climatic map. Progress in Geography, 38(3): 452-464.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2019.03.014

Katzschner Lutz, 等, 2012; Suder et al, 2014; 贺晓冬等, 2014; 林姚宇等, 2014)。

如今,城市环境气候图的研究与编制呈现出环境要素丰富、技术方法深入、评估时段全面的特点。在评估环境要素方面,城市热岛、通风能力及大气污染是环境气候研究的核心要素,例如贺晓东等(2014)对北京市的研究、林姚宇等(2014)对深圳市的研究都集中分析了热负荷与通风潜力问题,刘乐乐等(2017)对宁波市的研究考虑了热负荷、大气污染、通风潜力的综合影响。在数据获取与信息挖掘方面,实测数据与反演信息相互结合,如对香港(Ng, 2012)和高雄(Ren et al, 2013)的研究主要采用地面测站的监测数据,而宁波市的环境气候研究大量结合了遥感图像反演的结果(刘乐乐等, 2017)。在评估时段方面,既有凸显城市热效应的夏季或夏冬两季研究,也有集合4个季节的全面分析,如对北京夏季热负荷的研究(张伟等, 2014)以及对宁波四季的综合评估(刘乐乐等, 2017)。在复杂自然环境与高速城市化的背景下,多环境要素、多技术方法、多时段分析成为环境气候图分析的趋势,同时也是科学引导城市规划的需要。

本文在借鉴北京市(贺晓冬等, 2014)、深圳市低碳城(林姚宇等, 2014)、宁波市(刘乐乐等, 2017)等中国城市环境气候图编制方法与应用实践的基础上,提出一种新的环境气候图构建与分析方法,认为城市环境气候受多种环境要素共同作用,并且需考虑不同时相下环境气候格局的差异,以及各要素对整体环境气候影响程度的差异。广州市作为我国华南地区改革开放的前沿阵地,城市化发展快、水平高,但是伴随而来的大气环境问题也日趋严重(孙武等, 2012)。因此本文以广州市为研究区域,基于地面监测数据与遥感反演信息,利用熵值法建立各要素对环境气候影响的多维权重,通过多数据图层的加权叠加,初步建立广州市城市环境气候图系统,并结合土地利用信息,对广州市环境气候进行分析与类型划分,试图阐释广州市环境气候的格局分布特征,并以期为华南发达地区复杂环境气候图系统的应用提供实例借鉴。

1 研究区域概况

广州市位于广东省中南部、珠江三角洲中北缘,地理位置为 $112^{\circ}57'E\sim 114^{\circ}3'E$ 、 $22^{\circ}26'N\sim 23^{\circ}56'N$,全市辖区总面积约为 7434 km^2 。属典型的南亚

热带海洋季风气候,气温较高,年平均气温为 $22\sim 24^{\circ}\text{C}$,全年最热月(7月)平均气温达 $28.4\sim 28.7^{\circ}\text{C}$;降水较多,年平均降水量达 1696.5 mm ;风速较小,年平均风速仅 1.9 m/s (王刚等, 2012)。地势东北高、西南低,背山面海,各市辖区内自然地貌类型、地表覆被类型与城市形态结构都呈现明显的空间差异(牟风云等, 2007; 王刚等, 2012),对广州市核心城区及周边地区的城市环境气候具有综合影响,因此将研究范围划定为广州市下辖的所有市辖区(图1)。

广州城市化发展迅速,1996—2006年全市建设用地面积增加了 504.7 km^2 ,全市人口增加了166.47万人(吴玉琴等, 2011),导致自然景观减少,城市下垫面粗糙度提高,人为热增加,空气污染加重,城市空气的通畅性也大大降低(孙武等, 2012)。具体来看,广州冬半年盛行偏北风,夏半年盛行偏南风,北部、东郊与南郊年平均风速较大,城市内部对风速的削减程度高,北郊与城市中心区风速相差可达 2.4 m/s ,呈风速小、风向不定、通风不良、静风频率大的特征(汤惠君, 2004)。温度呈南高北低的空间分布趋势,热岛效应由北至南逐渐增加,城区内达最大值,再向南有所减弱;并且因为下垫面改变、大气污染、人口膨胀等的共同作用,温度与热岛强度呈逐年波动上升趋势(江学顶等, 2007),高温天气频繁出现。伴随着城市化的不断深入,市郊与城区风

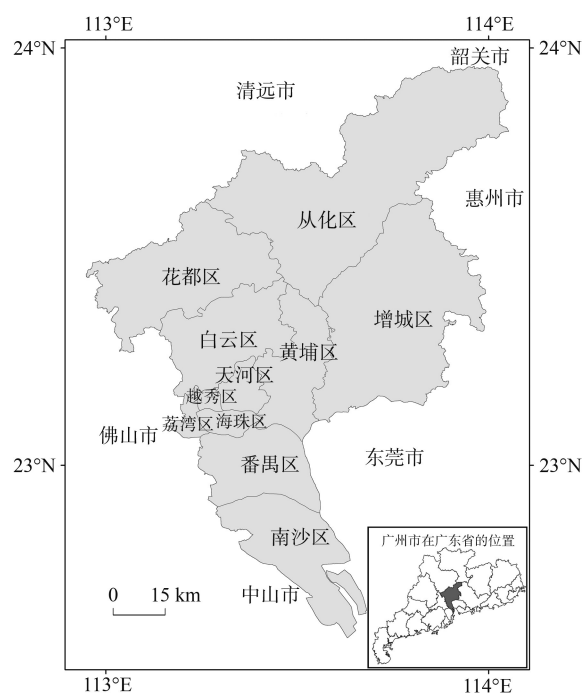


图1 研究区区位

Fig.1 Location of the study area

速差异增大,热岛强度增加,广州大气环境面临着很大挑战(孙武等, 2012)。

2 研究方法

依据传统城市环境气候图的研究与编制方法,针对广州暴露出的空气质量差、热负荷水平高、通风潜力弱的城市环境气候问题,选取相应环境要素多个季节(选取4月、7月、11月、翌年1月分别代表春季、夏季、秋季、冬季)的数据,对其进行处理,并计算各要素间、城市物理环境间的多维权重,通过多图层的加权叠加获得能表征广州城市环境气候的系列图谱,包括城市空气质量、热负荷、通风潜力3个方面。基于对城市环境气候图谱的分析,对广州城市环境气候进行单元划分与评价,提出广州城市环境气候规划的措施。广州城市环境气候研究的核心流程如图2所示。

2.1 数据收集

基于环境要素对城市空气质量、热负荷、通风潜力的作用,将环境要素的影响分为正面、负面,即该环境要素对某城市物理环境具有正效应或负效应;同时,考虑到环境要素数据收集、处理与表达的可操作性,最终选取如表1所示的环境要素。

根据如上筛选的环境要素,本文收集的数据类型主要包括遥感影像、规划数据、气象与空气质量统计数据4个方面。其中,选取2009年ASTER GDEM第一版包含广州全境在内的共4景影像数

据,用以提取广州海拔高程信息并反演坡度信息;选取2014年7月Landsat 8 OLI共2景影像数据^①,用以提取土地覆被信息;获取广州市城市规划勘测设计研究院编制的2012年广州土地利用现状图,用以修正与细化土地覆被信息;同时选取2016—2017年间各代表月份气象数据(268个区域自动站)与空气质量数据(51个大气污染监测点),该数据由广州市气象局与广州市环保局监测,每1 h发布1次,各测站所在的位置如图3。使用的专业软件包括ANUSPLIN 3.7、ENVI 5.1、ArcGIS 10.2。

2.2 基础数据处理

2.2.1 空间数据可视化

基于ANUSPLIN分别对4个月的月均空气污染数据进行空间插值,其中SO₂月均浓度、NO₂月均浓度采用规则样条函数法,PM_{2.5}月均浓度采用克里金法,以获得最佳的空间插值效果(丁卉等, 2016)。并将插值结果在ArcGIS中进行可视化表达。

同时利用ASTER GDEM影像提取广州地形的坡度信息(姜栋等, 2008)。根据Landsat 8 OLI影像,采用非监督分类方法划分出绿地、耕地、建设用地和水体,并参照广州市2012年土地利用现状图,获得较高精度的土地利用现状矢量数据,从而实现地形与地物信息的提取(图4)。

2.2.2 相关指数计算

(1) 城市热岛强度。城市热岛效应对城市热负荷具有很大的影响,其大小用热岛强度表示,即城市代表测点与郊区代表测点的气温差值。根据公式(1),利用月均气温数据计算热岛强度 ΔT :

$$\Delta T = T_i - T_0 \quad (1)$$

表1 本研究所筛选的环境要素

Tab.1 Environmental factors considered in this study		
城市物理环境	对城市物理环境的影响	所选要素
空气质量	负面影响	SO ₂ 月均浓度
		NO ₂ 月均浓度
		PM _{2.5} 月均浓度
热负荷	正面影响	热岛强度
	负面影响	海拔高程
		自然景观分布
通风潜力	正面影响	人体舒适度指数
		水体分布
	负面影响	开阔绿地分布
		建设用地分布
		风阻强度

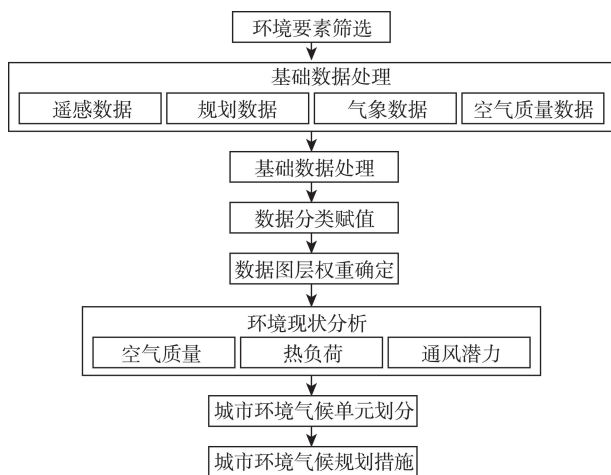


图2 广州城市环境气候分析研究流程

Fig.2 Flowchart of analysis on environmental climate of Guangzhou City

① ASTER GDEM 和 Landsat 8 OLI 影像的投影坐标系为 UTM(50N 带),地理坐标系为 GCS_WGS_1984,空间分辨率为 30 m×30 m。

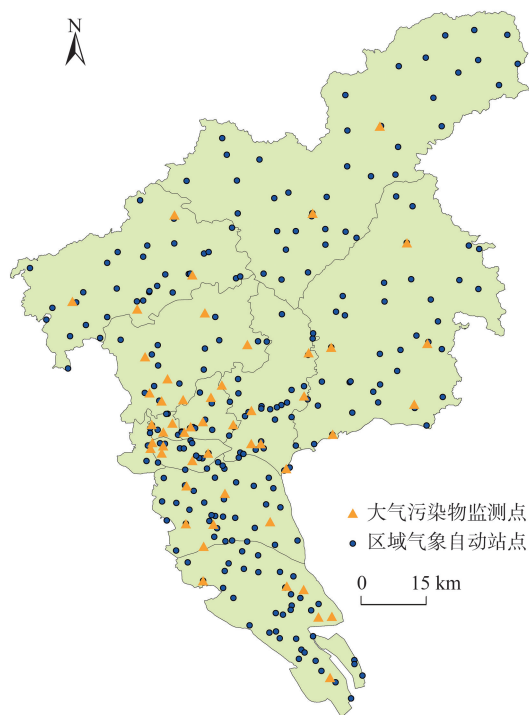


图3 研究区监测点位置

Fig.3 Location of the monitoring sites in the study area

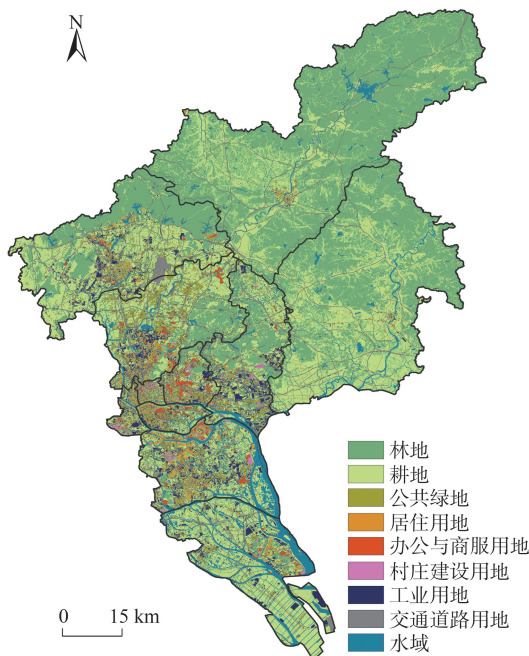


图4 土地利用分布

Fig.4 Land use map

式中: T_i 为城市内部测站的月均气温, T_0 为郊区测站的月均气温^②。使用反距离权重法对热岛强度进行空间插值, 表征月均热岛强度的空间分布特征(鲍文杰等, 2010)。

(2) 人体舒适度。人体舒适度是人在不同气候条件下的舒适程度, 人体舒适度指数是依据人体与大气环境间的热交换而制定的生物气象指标, 能有效反映人类机体对外界气象环境的主观感受, 同时也从侧面表征环境气候热负荷状况。采用式(2)计算人体舒适度 K :

$$K = 1.8t - 0.55(1.8t - 26)(1 - u) - 3.2\sqrt{v} + 32 \quad (2)$$

式中: t 、 u 、 v 分别表示月平均气温、月平均相对湿度和月平均风速(朱勇等, 2015)。

(3) 风阻强度。城市下垫面条件可简单分为人工地表覆盖与自然景观2类, 不同下垫面有不同的粗糙度, 下垫面越粗糙, 对城市风流通的阻碍程度越大(崔红蕾, 2014)。因此, 可将下垫面对空气流通、大气循环的阻滞程度转化为下垫面综合效应对风速的削减程度, 用风阻强度表示。选用式(3)计算风阻强度 ΔV :

$$\Delta V = \frac{V_0 - V_i}{V_0} \quad (3)$$

式中: V_0 表示城市郊区月均背景风速; V_i 表示城市内部月均风速。

2.3 数据的分类赋值

通过处理而得到的环境要素数据具有不同的量纲与数量级, 为了方便后续的数据处理与图层叠加, 使各数据具有趋同性并提高数据的可比性, 需要对各数据分类赋值, 实现数据的同趋化与无量纲化。利用 ArcGIS 重分类功能对环境要素数据进行分类赋值操作, 划分的等级与所使用的阈值见表2。

2.4 数据图层权重的确定

各环境要素对城市空气质量、热负荷、通风潜力的影响程度不同, 所以对数据图层叠加分析前需要确定各数据图层的权重, 以表现其对城市物理环境影响的水平差异。其中 SO_2 、 NO_2 和 $\text{PM}_{2.5}$ 月均浓度图层基于计算权重加权叠加生成空气质量图层; 热岛强度、海拔高程、自然景观分布和人体舒适度指数图层加权叠加得到热负荷图层; 水体分布、开阔绿地分布、建设用地分布和风阻强度图层加权叠置获得通风潜力图层; 再将空气质量、热负荷、通风

② 其中, 以从化区(中田村、钟楼村、山心村)、增城区(水围村、浪拔小学、心岭村)、南沙区(十九涌、芦湾村、新兴村)9个测站的数据均值作为郊区测站气象数据, 用以计算热岛强度、风阻强度。

表2 环境要素数据的分类

Tab.2 Classification of environmental factor data			
所选要素	单位	分类范围与分类规则	分类值
SO ₂ 月平均浓度	μg/m ³	≥20	-2
		15~20	-1
		10~15	0
		5~10	1
		≤5	2
NO ₂ 月平均浓度	μg/m ³	≥55	-2
		40~55	-1
		25~40	0
		10~25	1
		≤10	2
PM _{2.5} 月平均浓度	μg/m ³	≥45	-2
		35~45	-1
		25~35	0
		15~25	1
		15	2
热岛强度	无量纲	≥2.5	-3
		1.5~2.5	-2
		0.5~1.5	-1
		-0.5~0.5	0
		-0.5~-1.5	1
		-1.5~-2.5	2
		≤-2.5	3
海拔高程	m	≥300	-3
		150~300	-2
		50~150	-1
		≤50	0
自然景观分布		森林、草地、水体覆盖区	0
		建设用地、耕地、其他未利用地覆盖区	1
人体舒适度指数	无量纲	≥95	4
		80~85	3
		75~70	2
		70~75	1
		60~70	0
		50~60	-1
		40~50	-2
		25~40	-3
		≤25	-4
水体分布		水体及距水体边界≤70 m	2
		70 m<距水体边界<140 m	1
		距水体边界≥140 m	0
开阔绿地分布		森林、草地、耕地覆盖且坡度≤15°的区域	1
		分类值为1以外的区域	0
建设用地分布		建设用地覆盖区	1
		无建设用地覆盖区	0
风阻强度	无量纲	≥1.0	3
		0.6~1.0	2
		0.2~0.6	1
		-0.2~0.2	0
		-0.6~-0.2	-1
		-1.0~-0.6	-2
		≤-1.0	-3

潜力图层加权叠加,得到广州市综合的环境气候图层。本文采用熵值法确定各环境要素数据的权重(李久枫等, 2017),最终得到多维权重组(表3)。计算方式如下:

$$\widehat{X}_{ij} = \begin{cases} \frac{X_{ij} - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}, & \text{正向影响} \\ 1 - \frac{X_{ij} - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}, & \text{负向影响} \end{cases} \quad (4)$$

式中: X_{ij} 表示第*i*个月份的第*j*项数据的数值($i=1, 2, \cdots, m; j=1, 2, \cdots, n$); X_{\max} 为该数据最大值; X_{\min} 为该数据最小值; \widehat{X}_{ij} 为该数据标准化值。

$$e_j = -k \sum_{i=1}^n P_{ij} \ln(P_{ij}) \quad (5)$$

$$d_j = 1 - e_j \quad (6)$$

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{i=1}^n d_j} \quad (7)$$

式中: e_j 为第*j*项数据的熵值; k 为常数; n 为数据图层斑块数; P_{ij} 为第*j*项数据下第*i*月份数值占全部月份数值的比重; d_j 为第*j*项数据的差异性系数; w_j 为第*j*项数据的权重。

3 广州市环境气候分析

3.1 城市环境气候现状分析

3.1.1 城市空气质量分析

广州各代表月份城市空气质量的空间分布情况如图5所示。空气质量水平具有明显的季节差异性:秋、冬2个季节的空气质量较差,空气污染分布的面积与大气主要污染物的浓度明显高于春、夏2季;春季的空气质量最优;冬季的空气污染问题最

表3 数据图层的权重

Tab.3 Weights of the data layers (%)			
城市物理环境	权重	所选要素	权重
空气质量	15.81	SO ₂ 月平均浓度	20.29
		NO ₂ 月平均浓度	38.85
		PM _{2.5} 月平均浓度	40.86
热负荷	43.90	热岛强度	14.86
		海拔高程	54.04
		自然景观分布	17.89
通风潜力	40.29	人体舒适度指数	13.21
		水体及其缓冲区分布	21.17
		开阔绿地分布	40.92
		建设用地分布	22.01
		风阻强度	15.90

为严重。广州冬季地面与低空风速较低,低层大气层结较大,移动能力差,降水较少,不利于大气污染物的扩散与稀释;而夏季气层不稳定,有上升气流,降水多,大气污染物的聚集封闭现象有所好转,因此空气质量受季节变化影响较大。同时可以看出,空气质量空间分布具有季节差异性:春季空气污染在

增城区、南沙区聚集较显著;而夏季白云区与黄埔区的空气质量较差;冬季静风频率高,大气污染物易在污染源附近的空气中累积,因此该季节空气污染分布与城市建成区分布具有一致性,城市主城区、工业用地分布较广的区域,其空气质量较差,而从化区海拔较高、植被覆盖度较大的山林地带与南沙沿海受

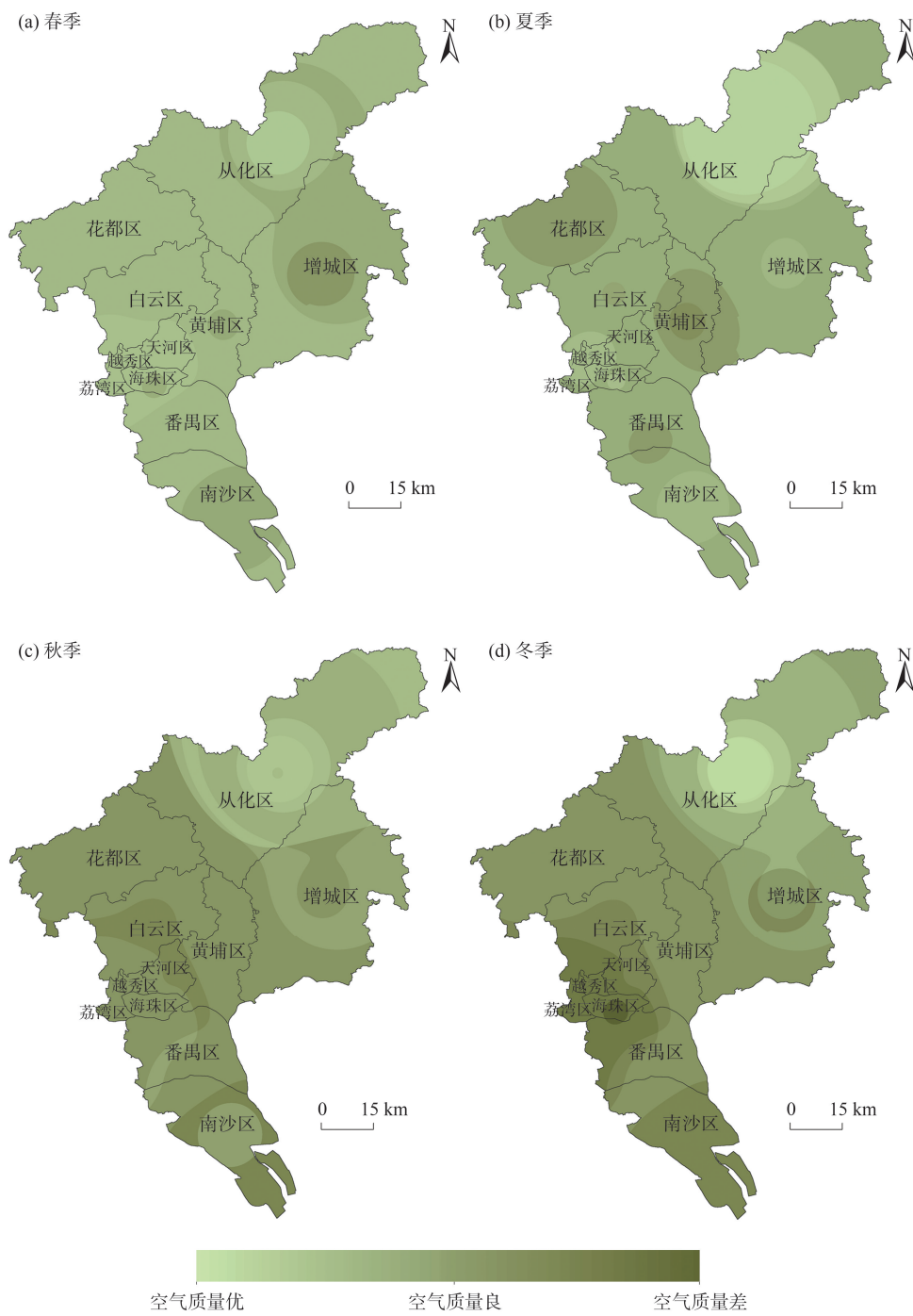


图5 广州市空气质量分析

Fig.5 Analysis on the air quality of Guangzhou City

海风影响较大区域的空气污染问题较小。并且空气质量与盛行风向关系密切,具有由东向西、由北向南降低的空间分布特征,与广州市年风向频率以北和东北偏北方向较大的分布基本保持一致。

3.1.2 城市热负荷分析

广州热负荷在季节与空间分布上差异性较显著,而空间分布特征在各个季节具有较高的相似性

(图6)。春、秋2个季节的热负荷水平基本一致,春季的高度热负荷分布比秋季略广;冬季的热负荷水平最低,基本无高度热负荷分布;而夏季的高度热负荷分布最广,与夏季高温天气现象关系密切,其热负荷效应最为明显。从空间格局来看,热负荷具有很强的南北分异:北部从化、增城等区植被茂盛、海拔较高,且分布有规模较大的水体,其热负荷效

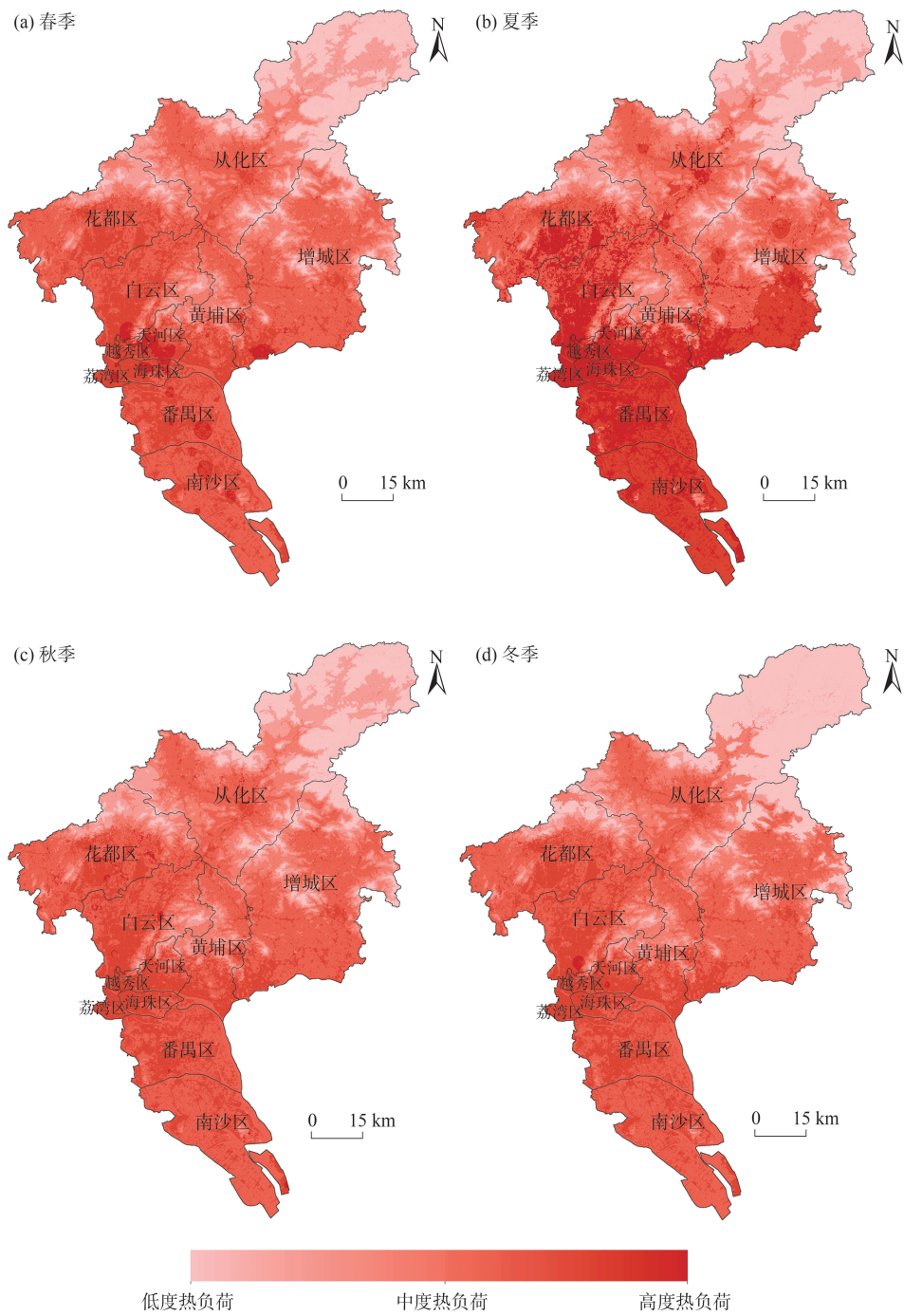


图6 广州热负荷分析
Fig.6 Analysis on thermal load of Guangzhou City

应较小,对城市局地气候的调节和降温具有积极作用,其中以从化山区最为明显,全年都处于低度热负荷水平;广州主要建设用地集中在中部与南部,密集建筑物影响通风能力,同时带来大量人为热,其热负荷水平较高,城市中心城区全年处于高度与中度热负荷,天河核心区的热负荷效应最为明显。

3.1.3 城市通风潜力分析

广州通风潜力分布状况如图7所示,通风潜力的空间格局在各个季节保持较高的一致性,而其分布特征则呈现显著的空间差异性。通风潜力的大小主要受城市下垫面影响,有季节差异的气象因素对城市通风影响较小,所以通风潜力在季节间的差

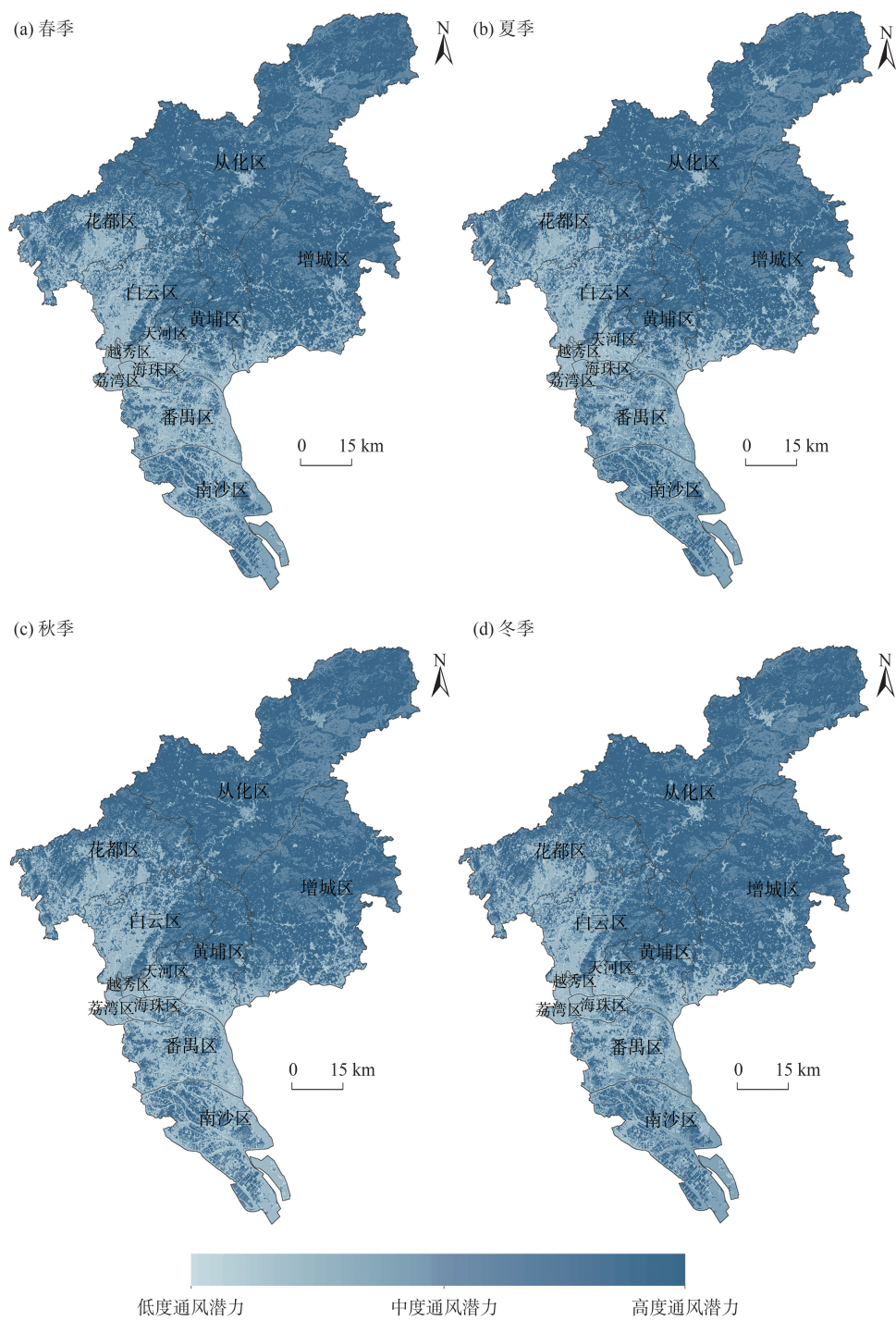


图7 广州通风潜力分析

Fig.7 Analysis on ventilation potential of Guangzhou City

别很小。从空间分布上看,通风潜力的分布特征与热负荷相似,也具有明显的南北差异。城市北部的高海拔、高植被覆盖区域通风潜力较大;中部与南部的城市建筑密集区域通风潜力较小。进一步分析可以发现,在林地中坡度较大的地区对风的阻滞作用强,使得与开阔绿地相比通风潜力明显降低;城区内部绿地与耕地的通风潜力较大,形成突出的高通风潜力斑块;水体对风的流通具有积极作用,通风能力较高,河流湖泊流经的区域基本具有中度通风潜力;而天河区、越秀区、荔湾区、海珠区由于建筑密度与人口密度高,同时建筑的高度与体量大,建筑的排布与规划混乱,严重影响空气流通,产生了密集相连的低度通风潜力斑块。

3.2 城市环境气候类型划分

通过对广州空气质量、热负荷、通风潜力相关图层的加权叠加,得到广州市全年城市环境气候图,可以清楚地看到城市内建设用地、自然景观、地形地貌等对环境气候影响的综合效果。同时基于环境气候加权叠加数值,截取自然断点,并采用综合分析方法,结合广州市环境气候的分布特征、经济建设与生态建设的共同发展现状,对广州市环境气候进行类型划分(图8)。

将环境气候类型与土地利用数据相关联,得到各气候类型中主要土地利用类型的占比(表4),可以看出最适宜类型分布区域以自然景观相关土地利用类型为主,而气候类型适宜程度越低,人工景观相关土地利用类型占比越大。整体来看,环境气候适宜性较高的区域主要分布于广州北部,环境气候适宜性较低的区域主要分布于中部与南部,产生了北优南劣的环境气候空间格局,并且环境气候各类型的斑块有聚集分布特征。具体来看,广州市环境

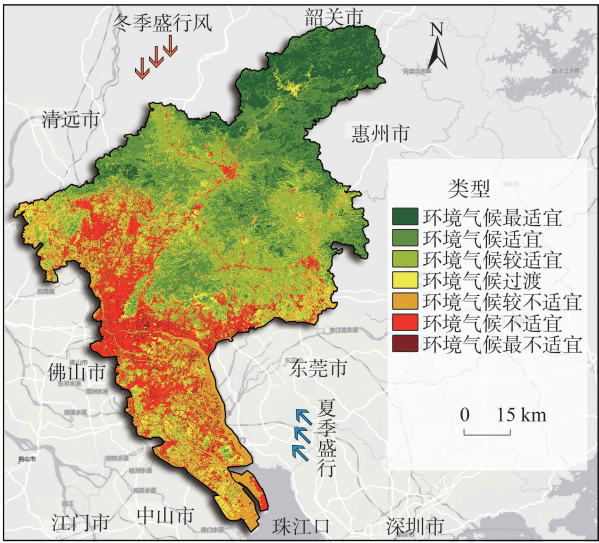


图8 广州市环境气候类型及其空间格局分布
Fig.8 Environmental climate units of Guangzhou City

气候共划分为7种类型,并依照其适宜程度从高至低依次命名为:环境气候最适宜类型、环境气候适宜类型、环境气候较适宜类型、环境气候过渡类型、环境气候较不适宜类型、环境气候不适宜类型、环境气候最不适宜类型。各类型特征如下:

(1) 环境气候最适宜类型:空气质量很好、低度热压、通风潜力很好的环境气候类型,主要集中在花都区北部芙蓉峰森林公园、从化区北部与西北部山区。该类型地表海拔较高,植被发育良好,人工干预的程度低,可产生下行的山风,加上植被作用,使其具有良好的通风能力与低热压环境,气温较低,空气污染很小,非常舒适。

(2) 环境气候适宜类型:空气质量好、低度热压、通风潜力好的类型,集中于从化区流溪河、石门、大封门森林公园,从化区与增城区交界的大金

表4 环境气候类型中土地利用类型占比
Tab.4 Land use of environmental climate units (%)

土地利用类型	环境气候类型						
	最适宜类型	适宜类型	较适宜类型	过渡类型	较不适宜类型	不适宜类型	最不适宜类型
林地	84.11	73.68	41.75	23.63	6.86	5.98	6.49
耕地	10.76	18.21	41.45	46.41	37.50	35.76	39.48
公共绿地	2.34	2.80	4.84	11.26	36.19	8.87	16.76
居住用地	0.47	0.96	2.07	3.58	3.80	9.03	7.42
办公与商服用地	0.35	0.74	1.58	2.73	2.77	5.34	5.21
村庄建设用地	0.77	1.31	2.65	4.32	5.48	13.29	8.52
工业用地	1.12	1.92	4.10	5.72	5.37	13.57	11.05
交通道路用地	0.07	0.29	1.25	1.70	1.51	7.52	4.29
水域	0.01	0.09	0.31	0.65	0.52	0.64	0.78

峰森林公园、白云区东部帽峰山森林公园、黄埔区东北部天鹿湖森林公园。该类型也有高海拔、高植被覆盖的特征,能有效降低热压,改善空气环境;气温凉爽,通风能力强,也是新鲜空气的发源地。

(3) 环境适宜类型:空气质量较好、低度热压、通风潜力较好的类型,此环境气候类型分布较为分散,主要集中于增城区中部、从化区中南部、黄埔区东北部,以及白云区东部、天河区北部的绿地公园,如白云山森林公园、火炉山森林公园、凤凰山森林公园等。该类型林地面积降低,而耕地面积大幅增长的特征明显,人工开发的程度相对较低,气温较为温和,通风能力较强,是城市内部良好的冷源。

(4) 环境气候过渡类型:城市环境气候的中间缓冲类型,空气质量降低,热压增强,通风能力减弱。分布于从化区、增城区的水域,如从化流溪河水库以及邻近城区的耕地。耕地作为人为开发但具有自然属性的土地利用类型,在过渡类型中的面积占比最大,可作为城市负效应向自然景观延伸影响的有效屏障。

(5) 环境气候较不适宜类型:空气质量较差、中度热压、通风潜力远低于环境气候价值的类型。主要由城区的公共绿地、珠江干流及其入海口构成,受城市化影响严重,具有人工景观环境气候特征;气温较高,舒适程度较低。

(6) 环境气候不适宜类型:城市建设密集区域的主要环境气候类型,空气质量差、高度热压、通风潜力低。该类型与城市建设用地的空间格局特征高度一致,集中分布于城市建设区、乡镇村建设区,由较高密度、少绿化的建筑区组成。林地、绿地面积占比大幅降低,居住用地、商服用地、工业用地等人工景观土地利用类型达到极大值,同时还有发达的交通设施集中。空气污染较重、气温高、舒适度低,是需要规划与改善环境气候的核心区域。

(7) 环境气候最不适宜类型:此类型呈零星聚集分布的小斑块,是空气质量差、极高热负荷、极低通风潜力的环境气候类型,主要分布于城区中的核心区构成,如天河区珠江新城商务区、天河街商业区。此区域聚集有高而密集的建筑群,并且人口密度极高,是城市气候负效应最为显著的地区。

3.3 城市环境气候规划措施

城市环境气候类型特征具有差异,对人居环境、生产建设的影响也不一致,针对不同的环境气候类型,应采取不同的规划方案与调控措施(表5)。

城市环境气候最适宜类型分布的区域是城市

重要的冷源,同时还是风的发源地、重要水源保育区,起到极高的生态积极作用。高适宜性分布的区域应严格保护,避免开发建设,杜绝人为破坏与污染,构建宽阔的通风廊道,加强与城市内部的生态联系,带动周边区域环境协同发展。环境气候适宜与较适宜类型所在区域包含邻近城市建成区的生态绿地、水体,在现有基础上需要进一步保护及改善。建成区附近的森林公园、山地公园是调节城市气候、居民休憩的重要场所,应保护并完善其绿地设施的建设;同时扩大水域面积,与周边区域水系进行汇接,形成多方向延伸并相互连通的城市水道系统。环境气候过渡类型分布区域是环境气候适宜类型、非适宜类型的分界地带,起到沟通生态积极效应、阻隔环境负面影响的重要作用。此类型区域应通过合理布局建筑、规划街道走向与宽度、合理设置绿化区域,结合已有风道,加强通风能力与空气交换,避免环境气候不适宜类型区进一步扩大相连,降低环境气候敏感区的影响。环境气候中不适宜类型、最不适宜类型分布区已经形成高建筑密度、高建筑高度、高人口密度、低绿地密度的格局,大面积与大幅度的改建很难实现,只能增加建筑间绿地面积、水域面积,拓宽楼宇间道路,缩小环境负效应的影响范围,同时调整能源利用的方式与结构,降低人为释放热,改善区域高热压,提高通风能力。新建设的大型建筑要结合城市风道的规划,优化设计、合理布局,考虑建筑周边绿地、水体以及交通道路的配置,降低高大建筑对风的阻挡作用。

4 结论与讨论

4.1 结论

基于气象监测数据、遥感图像数据与相关部门绘制的图件,利用ANUSPLIN、ENVI、ArcGIS等专

表5 环境气候类型的影响与规划措施
Tab.5 Impact and planning measures
of environmental climate units

城市环境气候类型	对生产生活的影响	规划措施
环境气候最适宜类型	高度正效应	保护
环境气候适宜类型	中度正效应	保护及改善
环境气候较适宜类型	轻度正效应	改善
环境气候过渡类型	中和	
环境气候较不适宜类型	轻度负效应	
环境气候不适宜类型	中度负效应	建议采取修补行动
环境气候最不适宜类型	高度负效应	必须采取修补行动

业软件,从城市风环境、空气质量、热负荷与通风潜力等多个环境要素入手,对广州环境气候进行了多时段的综合分析,构建了广州城市环境气候图系统,得出如下主要结论:

(1) 广州市空气质量状况具有明显的季节和空间差异,秋冬季大气污染情况较严重,夏季次之,春季最弱;热负荷水平也有显著的季节和空间差异,夏季热负荷最强,冬季最弱;通风潜力的空间差异性较强,无明显的季节差别。综合来看,广州市显示出北优南劣的环境气候特征,将环境气候划分为7种类型,发现较适宜类型主要分布于从化区、增城区与黄埔区北部,较不适宜类型集中分布于天河区、越秀区、荔湾区与海珠区。

(2) 环境气候空间格局的分布情况与土地覆被状况、土地利用类型关系密切。人工景观往往对环境气候产生负效应,而自然景观对环境气候有改善作用。以较大面积的林地、绿地、水体为代表的城市冷源不仅降低城市热负荷强度,同时对空气质量与通风潜力都有较好的缓解、提高作用,因此环境气候适宜类型普遍分布于高山林地、湖泊、河流及其附近区域;而建设用地带来的城市污染、人为热排放、粗糙下垫面等问题使得环境气候趋于恶化,其中工业用地、商服用地集中区对环境气候产生的负效应最为明显。

(3) 随着生态文明建设的不断深入,城市的可持续发展成为环境问题研究的核心与热点,环境气候图揭示城市环境气候的空间格局分布情况,对城市生态建设与规划措施具有较强的指导意义。广州市要树立“绿水青山就是金山银山”的城市发展理念,充分保护环境气候适宜区域,保持过渡类型的沟通、阻隔作用,控制城市环境气候负效应继续延伸发展,并通过制定具体的调控措施减少环境气候不适宜地区的影响,整体改善广州市环境气候质量,优化环境气候空间格局。

4.2 讨论

(1) 大气污染重、热岛效应强、通风能力弱是广州城市气候的突出矛盾(孙武等, 2012),针对这3个环境气候问题,本文构建了一种基于可视化环境气候图的城市气候综合分析与评估方法。该方法揭示了广州市环境气候的空间格局分布特征,并对亚热带海洋性季风气候控制下的大型城市复杂环境气候提供了规划建议。环境气候图作为一种科学有效的城市气候信息评估工具,综合、科学地对城市环境气候进行分析,并通过制定相关调控措施来促

进城市大气局地环流,改善、缓解城市大气污染与城市热效应,对城市生态文明建设的方向进行引导,为城市的可持续发展提供决策支持。

(2) 与目前国内外环境气候图的编制与应用工作对比,本文的特点在于:数据采集方面,基于对广州市所有区域自动站发布数据的整理,获得基本气象要素,弥补了通过少量监测站获取基础数据的片面性(Ng, 2012; Ren et al, 2013),很大程度上精细化了后续环境气候的计算与分析。同时将遥感影像提取的土地覆被信息与规划数据结合,细化了土地覆被信息;环境气候要素选择方面,充分考虑了多种环境气候的综合影响,将空气质量、热负荷与通风能力都纳入分析评价中,而目前北京(贺晓冬等, 2014)、深圳(林姚宇等, 2014)等季风地区仅考虑了城市热岛等要素,多要素综合考量较少(刘乐乐等, 2017);环境气候分析方面,利用熵值法计算各要素权重,环境气候图采用加权叠加的方法进行绘制,而传统的环境气候图编制采用多图层直接叠加的方法(Ren et al, 2011),未能凸显不同要素对环境气候影响的程度差别。并且针对气候要素普遍具有时相差异的特点,对4个季节的环境气候都进行了综合分析与评价,而相关研究主要集中在夏季城市环境气候的探讨(贺晓冬等, 2014; 林姚宇等, 2014),考虑多时相的环境气候研究较少(Suder et al, 2014; 刘乐乐等, 2017)。

(3) 本文优化了已有城市环境气候图编制与分析方法,但还存在一些问题需要完善:一方面,只探讨了各环境气候类型中不同土地利用所占用的比例,未对土地利用与环境气候间的联系进行深入的讨论,下一步将具体分析不同土地利用对环境气候格局的影响;另一方面,获取大气污染相关数据的监测站数量较少,客观上降低了空气质量评价的精度,下一步应考虑利用遥感影像数据反演大气气溶胶光学厚度来替代空气污染采集数据;最后,对城市环境气候的规划措施只给出了宏观层面的意见,未来的研究可从设计多级通风廊道等具体方法进一步细化环境气候的规划建议。

参考文献(References)

- 鲍文杰, 马蔚纯, 邢超群, 等. 2010. 超大城市热岛研究方法对比: 以上海为例 [J]. 复旦学报(自然科学版), 49(5): 636-641. [Bao W J, Ma W C, Xing C Q, et al. 2010. A comparison study of research methods for urban heat island of megacity: With special regards on Shanghai. Journal of Fudan University (Natural Science), 49(5): 636-641.]

- 丁卉, 余志, 徐伟嘉, 等. 2016. 3种区域空气质量空间插值方法对比研究 [J]. 安全与环境学报, 16(3): 309-315. [Ding H, Yu Z, Xu W J, et al. 2016. Comparative study of the three spatial interpolation methods for the regional air quality evaluation. Journal of Safety and Environment, 16(3): 309-315.]
- 贺晓冬, 苗世光, 窦晶晶, 等. 2014. 北京城市气候图系统的初步建立 [J]. 南京大学学报(自然科学), 50(6): 759-771. [He X D, Miao S G, Dou J J, et al. 2014. The initial establishment of urban climate map system in Beijing. Journal of Nanjing University (Natural Science), 50(6): 759-771.]
- 吉振明, 高学杰, 张东峰, 等. 2010. 亚洲地区气溶胶及其对中国区域气候影响的数值模拟 [J]. 大气科学, 34(2): 262-274. [Ji Z, Gao X J, Zhang D F, et al. 2010. Simulation of the aerosols over Asia and its climate effect on China. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 34(2): 262-274.]
- 姜栋, 赵文吉, 朱红春, 等. 2008. DEM地形信息提取对比研究: 以坡度为例 [J]. 测绘科学, 33(5): 177-179. [Jiang D, Zhao W J, Zhu H C, et al. 2008. Comparison of land form information extracted from DEMs: A case study of slope. Science of Surveying and Mapping, 33(5): 177-179.]
- 江学顶, 夏北成, 郭砾, 等. 2007. 广州城市热岛空间分布及时域-频域多尺度变化特征 [J]. 应用生态学报, 18(1): 133-139. [Jiang X D, Xia B C, Guo L, et al. 2007. Characteristics of multi scale temporal spatial distribution of urban heat island in Guangzhou. Chinese Journal of Applied Ecology, 18(1): 133-139.]
- 李久枫, 刘艳艳, 吴大放, 等. 2017. 近30年珠海市耕地生态安全评价及未来预测 [J]. 广东农业科学, 44(1): 156-166. [Li J F, Liu Y Y, Wu D F, et al. 2017. Evaluation of cultivated land ecological security in Zhuhai City in recent 30 years and its future prediction. Guangdong Agricultural Sciences, 44(1): 156-166.]
- 林姚宇, 王丹, 单樑, 等. 2014. 深圳国际低碳城环境气候图集编制方法与应用技术研究 [J]. 建筑经济, (2): 84-91. [Lin Y Y, Wang D, Shan L, et al. 2014. Research on the method and application technology of environmental climate atlas of Shenzhen international low-carbon city. Construction Economics, (2): 84-91.]
- 刘乐乐, 赵小锋, 赵颜创, 等. 2017. 基于城市环境气候图的宁波大气环境分析与调控对策 [J]. 生态学报, 37(2): 606-618. [Liu L L, Zhao X F, Zhao Y C, et al. 2017. Ningbo atmospheric environment analysis and regulating countermeasure based on urban climatic map. Acta Ecologica Sinica, 37(2): 606-618.]
- 牟凤云, 张增祥, 谭文彬, 等. 2007. 广州城市空间形态特征与时空演化分析 [J]. 地球信息科学, 9(5): 94-98. [Mu F Y, Zhang Z X, Tan W B, et al. 2007. Analysis on the spatial-temporal characteristics of Guangzhou City's spatial morphologic evolution. Geo-information Science, 9(5): 94-98.]
- 任超, 吴恩融. 2012. 城市环境气候图: 可持续城市规划辅助信息系统工具 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社: 14-15. [Ren C, Wu E R. 2012. Urban environment climate map: Sustainable urban planning aid information system tool. Beijing, China: Architecture & Building Press: 14-15.]
- 任超, 吴恩融, Katzschner Lutz, 等. 2012. 城市环境气候图的发展及其应用现状 [J]. 应用气象学报, 23(5): 593-603. [Ren C, Wu E R, Katzschner L, et al. 2012. The development of urban environmental climate map and its application. Journal of Applied Meteorological Science, 23(5): 593-603.]
- 孙武, 王义明, 王越雷, 等. 2012. 珠江三角洲地面风场的特征及其城市群风道的构建 [J]. 生态学报, 32(18): 5630-5636. [Sun W, Wang Y M, Wang Y L, et al. 2012. Wind fields and the development of wind corridors in the urban metropolis of the Pearl River Delta. Acta Ecologica Sinica, 32(18): 5630-5636.]
- 汤惠君. 2004. 广州城市规划的气候条件分析 [J]. 经济地理, 24(4): 490-493. [Tang H J. 2004. Analysis on climate conditions of urban planning in Guangzhou. Economic Geography, 24(4): 490-493.]
- 王刚, 管东生. 2012. 植被覆盖度和归一化湿度指数对热力景观格局的影响: 以广州为例 [J]. 应用生态学报, 23(9): 2429-2436. [Wang G, Guan D S. 2012. Effects of vegetation cover and normalized difference moisture index on thermal landscape pattern: A case study of Guangzhou, South China. Chinese Journal of Applied Ecology, 23(9): 2429-2436.]
- 吴玉琴, 严茂超. 2011. 广州城市代谢与土地利用变化指标评价 [J]. 地理研究, 30(8): 1380-1390. [Wu Y Q, Yan M C. 2011. Analysis of the indicator between urban metabolism and land use change in Guangzhou. Geographical Research, 30(8): 1380-1390.]
- 肖荣波, 欧阳志云, 李伟峰, 等. 2005. 城市热岛的生态环境效应 [J]. 生态学报, 25(8): 2055-2060. [Xiao R B, Ouyang Z Y, Li W F, et al. 2005. Eco-environmental effects of urban heat island. Acta Ecologica Sinica, 25(8): 2055-2060.]
- 张伟, 张崇, 王朝霞. 2014. 城市气候地图的绘制及其在规划设计中的应用 [J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 46(2): 261-265. [Zhang W, Zhang C, Wang Z X. 2014. The drawing of urban climate map and its application in planning and design. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology(Natural Science Edition), 46(2): 261-265.]
- 朱勇, 李书桂, 温建荣. 2015. 华南典型城市旅游气候舒适度的评价 [J]. 广东气象, 37(4): 66-68. [Zhu Y, Li S G, Wen J R. 2015. Evaluation of tourism climate comfort in typical cities of South China. Guangdong Meteorology, 37(4): 66-68.]
- Baumüller J, Reuter U. 2001. Demands and requirements on a climate atlas for urban planning and design [R]. Stuttgart, Germany: Office of Environmental Protection: 21-27.

- Matzarakis A. 2005. Country report: Urban climate research in Germany [J]. *IAUC Newsletter*, 11: 4-6.
- Ng E. 2012. Towards planning and practical understanding of the need for meteorological and climatic information in the design of high-density cities: A case-based study of Hong Kong [J]. *International Journal of Climatology*, 32(4): 582-598.
- Ren C, Lau K L, Yiu K P, et al. 2013. The application of urban climatic mapping to the urban planning of high-density cities: The case of Kaohsiung, Taiwan [J]. *Cities*, 31: 1-16.
- Ren C, Ng E, Katschnner L. 2011. Urban climatic map studies: A review [J]. *International Journal of Climatology*, 31(15): 2213-2233.
- Scherer D, Beha H D E, Fehrenbach U. 1999. Improved concepts and methods in analysis and evaluation of the urban climate for optimizing urban planning processes [J]. *Atmospheric Environment*, 33(24): 4185-4193.
- Suder A, Szymanowski M. 2014. Determination of ventilation channels in urban area: A case study of Wroclaw (Poland) [J]. *Pure and Applied Geophysics*, 171(6): 965-975.
- Unger J. 2004. Intra-urban relationship between surface geometry and urban heat island: Review and new approach [J]. *Climate research*, 27: 253-264.
- VDI. 1997. VDI-Guideline 3787, Part 1, Environmental meteorology-climate and air pollution maps for cities and regions [Z]. Berlin: VDI, Beuth Verlag: 73.
- Wang T J, Jiang F, Deng J J, et al. 2012. Urban air quality and regional haze weather forecast for Yangtze River Delta region [J]. *Atmospheric Environment*, 58: 70-83.

Environmental climate spatial pattern of Guangzhou City based on urban climatic map

ZHAO Wenbo¹, LIU Hongjie^{1*}, TIAN Xueting^{1,2}, LI Baolin³, CAO Weihong³

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

2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

3. School of Architecture and Engineering, North China University of Technology, Tangshan 063200, Hebei, China)

Abstract: With the development of urbanization, the underlying land surface of urban areas also changes. The greatly declined natural landscape and increased number of buildings have significance influence on the urban climate and environment. Urban Climatic Map, a tool and platform for analyzing and evaluating the situation of urban climate, expands the application of urban climate information in urban planning and development. Based on the current situation in southern China for urban climate research, this study examined the difference of environment climate influence level caused by different factors. Combined with the existing compilation method of Urban Climatic Map, Guangzhou City was selected as the study area because of its typical subtropical monsoon climate characteristics. A complex underlying surface urban climatic map system was constructed with multiple environmental factors, assessment periods, and technical methods. Several technical means, including numerical model simulation, remote-sensing inversion, and spatial analysis in GIS, were comprehensively applied to evaluation urban air pollution, thermal load, and ventilation potential in Guangzhou City. We also put forward some preliminary planning recommendations. The results indicate that air pollution and thermal load are characterized by significant differences in seasonal and spatial distribution, while ventilation potential shows a clear difference in space and slight seasonal change. Guangzhou City is subsequently divided into seven zones and a spatial pattern of "superior north and inferior south" is observed. Specifically, the optimum types are mainly distributed in the woodlands and intercity cultivated land in the northern mountainous areas, and the most degraded types are located in the urban core areas of Tianhe, Yuexiu, and Liwan Districts, as well as the industrial areas in Baiyun and Zengcheng Districts. Finally, based on the results of environmental climatic analysis, planning measures of each climatic type are suggested to provide some scientific advices and direction for the sustainable development of Guangzhou City.

Keywords: air quality; thermal load; ventilation potential; environmental climate spatial pattern; Guangzhou City