

基于风热环境评估的平顶山城市通风廊道构建*

潘攀^{1,2}，李凤秀^{1,2}，朱业玉^{1,2*}，许蓬蓬^{1,2}，梁鑫³

1. 河南省气候中心，郑州，45003

2. 中国气象局·河南省农业气象保障与应用技术重点开发实验室，郑州，450003

3. 河南省城乡规划设计研究总院股份有限公司，郑州，450044

摘要：城市通风廊道以提升城市的空气流动性、缓解城市热岛效应和改善人体舒适度为目的，为城市引入新鲜冷湿空气而构建的通道，目前已在世界各国城市中得到广泛应用。本研究利用平顶山市及周边地区气象站观测资料、卫星遥感数据、基础地理信息资料，并结合城市规划，采用数理统计、地表温度反演、地理信息系统技术，综合分析平顶山城市风环境、城市热岛及绿源的分布并评估地表通风潜力，在此基础上初步构建平顶山市城市通风廊道。结果表明：（1）受地形与季风气候共同作用，平顶山市主导风向以西北风、东北风和南风为主，且存在季节差异；（2）平顶山市的城市热岛空间上呈多中心分布，热岛强度由中心城区向周围递减；城市绿源主要分布在城市周边，可为主城区引入新鲜空气；（3）基于城市地表粗糙度、天空开阔度等因子综合评估城市通风潜力，初步构建平顶山市“六主十次”的城市通风廊道系统格局。

关键词：城市通风廊道，风环境，热环境，通风潜力

doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2023.23084

Construction of Urban Ventilation Corridor in Pingdingshan City

Based on Wind and Thermal Environment Assessment

Pan Pan^{1,2}，Li Feng-Xiu^{1,2}，Zhu Ye-Yu^{1,2*}，Xu Peng-Peng^{1,2}，Liang Xin³

1. Climate Center of Henan Province, Zhengzhou, 45003

2. Key Laboratory of Agrometeorological Support and Application Technology of Henan Province, China Meteorological Administration, Zhengzhou, 450003

* 收稿日期 2023-08-21；收修订稿 2023-11-30

作者简介 潘攀，女，1981年出生，硕士，从事气候变化影响与适应研究。E-mail: nlpan@foxmail.com

通讯作者 朱业玉，E-mail: zhuyyhej@163.com

资助项目 河南省科技研发计划联合基金（232103810098）

Funded by Henan Provincial Science and Technology R&D Program Joint Fund（232103810098）

Abstract: Urban ventilation corridor was designed to introduce fresh air into the city with the purpose of enhancing air circulation of the city, alleviating urban thermal environment and improving human comfort, and has been widely used in cities all around the world. Based on the observation data of meteorological stations, satellite remote sensing data, basic geographic information and urban planning of Pingdingshan city, with the method of mathematical statistics, land surface temperature retrieval, geographic information systems and remote sensing techniques, we analyzed wind environment, urban heat island (UHI), green source and ventilation potential of the city, meanwhile constructed the structure of urban ventilation corridor preliminarily. The results showed that: (1) The dominate wind in Pingdingshan was mainly from northwest, northeast and south. (2) The spatial distribution of UHI was multicenter, and the intensity of UHI decreased from the central city to surrounding area. Urban green source was mainly distributed around the city, which can introduce fresh air into urban center. (3) Based on the comprehensive assessment of urban ventilation potential, urban surface roughness, sky view factor etc., the corridor system of “six main and ten secondary corridors” in Pingdingshan city was constructed.

Key Words: urban ventilation corridor, wind environment, thermal environment, ventilation potential

1 引言

在全球变暖和城市化快速发展的背景下，城市面临大规模扩张和人口增长，同时也伴随着一系列的环境和生态问题，如空气污染、热岛效应、植被退化等(Sun et al., 2011; Yang et al.,2011; Han, et al.,2015; Huang, et al. ,2016)。在城市高密度地区，通风不畅，人口众多，城市局地近地面的温度、风场、湿度等气象条件产生了明显变化，气候环境问题日益凸显（郑思轶等，2008；Sun et al.,2014；吴婕等，2015）。这些问题的产生与城市规划、建设和产业布局等有关，即城市规划中缺乏对气候和环境信息的考虑（李鹍等，2006；刘姝宇等，2010；房小怡等，2021；Liu et al.,2022）。

随着生态文明建设上升为国家战略，国家出台多项政策，指出在城市规划和未来的城市发展中均需要将气候因素纳入考虑，加强规划管理与合理布局，改善城市通风，缓解雾霾与热岛等城市环境问题。2012 年“联合国可持续发展会议”峰会，将可持续的、健康舒适的人居环境作为世界各国实现可持续发展的关键议题；2016 年第三届联合国住房和可持续城市发展会议（人居III）提出“韧性城市”

理念，更加关注城市生态与环境发展，城市与气候变化等问题，倡导通过生态建设手段强化城市韧性，减缓和适应气候变化。合理的城市规划和城市绿化的发展可以有效降低城市温度，从而有利于减缓和适应气候变化。增加自然通风可以有效改变城市小气候，缓解城市热岛效应，充足的城市通风可以带来更舒适的室外温度并驱散空气污染物，从而改善人类健康（Wong et al.,2010; Hsieh et al.,2016）。

城市通风廊道作为协调解决城市气候问题的一种有效规划手段，已在很多国家相继开展并实施。早在 1930 年，德国科学家就指出城市规划和建设会影响甚至改变当地气候与空气质量。斯图加特市将城市环境气候分析作为辅助城市规划的工具之一，为城市绿地、水系等生态空间的合理布局提供技术支撑（任超等，2012）。德国学者 Kress(1979)根据局地环流运行规律提出的下垫面气候功能评价标准，将城市通风廊道系统分为作用空间、补偿空间与空气引导通道。日本利用与实际的河川、绿地、街道、建筑物之间的空隙空间的联通确立“风道”，使新鲜冷空气可以流入到附近的城市空间或深入城市腹地，确保城市近地层空气交换与流通的有效性（任超，2016）。

在中国，2002 年《香港城市设计指引》中第一次提及“通风廊”，特别是针对海旁用地的通风廊，促进空气流通，将海风引入内陆，从而改善局部地区的气候（Ng E.,2009;袁超，2010;Ng E. et al.,2011;任超等，2014）。国内许多大城市诸如北京、武汉、南京、西安、广州、深圳、成都、杭州、郑州、济南等相继开展了城市通风廊道研究（李军等，2014；梁颢严等，2014；赵红斌等，2014；杜吴鹏等，2016；俞布等，2018；刘勇洪等，2018；刘红年等，2019；房小怡等，2021），研究从城市建设对生态环境的影响出发，依据城市主导风向来构建廊道，从而改善城市风环境和大气环境；有些增加了不同风速段对城市通风效果的影响，并考虑建筑信息和地理信息技术与气象学结合，使用多尺度数值模拟等手段开展城市尺度的通风环境评估；在构建城市多级通风廊道体系时，从廊道的宽度、走向、开敞空间、相邻界面、建筑等方面提出通风廊道规划控制指标，为城市规划提出指引。

城市通风取决于多种城市几何参数的组合(Carpentieri et al.,2015; Paulusci et al.,2022)，建设城市通风廊道的目的是合理组织城市空间，为空气流通创造通道（Guo et al.,2017）。不仅应考虑道路，还应考虑水体、地形和绿地，并应控制建筑物的高度、密度和分配（Ren et al.,2018），风速、风向、温度、湿度等气象参数对城市通风的影响也极为重要（Gu et al.,2020）。

城市风环境评价的方法主要包括现场测量、风洞试验和数值模拟 (Johnson et al.,1998; Gao et al.,2012; 郑祚芳等, 2022)。现场测量和风洞测试更为准确, 但耗时且昂贵。城市气候数值模拟方法主要分为中尺度和微尺度两大类, 但需要复杂的边界条件配置和模型构建。Yuan (2014) 提出了一种基于地理信息系统(GIS)数据利用城市地表粗糙度分析城市通风条件的方法, 利用地理信息系统格式的建筑和城市形态数据, 计算城市粗糙度长度和建筑体密度, 以检测盛行风条件下城市形态的渗透性。

基于此, 为进一步改善城市大气环境, 缓解城市热岛效应, 本研究以平顶山市城市气候条件与城市发展规划为基础, 考虑当地风环境与热环境特点, 并结合城市空间布局, 利用气候统计、遥感反演、地理信息系统空间分析等方法, 对城市风环境、热环境和地面通风环境进行评估, 将气象信息和三维城市形态数据集集成, 初步构建平顶山市城市通风廊道系统, 为城市规划提供技术支持。

2 资料与方法

2.1 研究区域

平顶山市位于河南省中南部, 地势西高东低, 处于豫西山地和淮河平原的过渡地带, 呈梯形分布。境内河流众多, 均属淮河流域沙颍水系, 水资源较丰富。本文研究区域为平顶山中心城区, 包括湛河区、新华区、卫东区, 总面积 325 平方公里。中心市区西北、西南地势较高, 向东南逐渐降低成平原。北部有焦赞寨、马棚山等山峰呈北面西向排列; 南部有河山、北渡山等和白龟山水库及沙河; 这种特殊的地貌特征在两山间形成了一狭长的走廊式低地即湛河, 在平顶山市中心自西向东穿城流过。平顶山市城市空间布局结构为东、西、南三大片区, 其中东部为老城区, 是全市的商业和经济中心; 西部为新城, 是城市的行政、文化中心, 高新技术产业基地; 南部为产业片区。

2.2 数据资料

本研究所用数据包括:

(1) 气象观测数据, 源自河南省气象局, 覆盖研究区域的平顶山市及周边地区 62 个国家基本气象站 1991-2020 年的风向资料, 用于大范围风环境的统计分析; 平顶山市 1981-2020 年气温、降水、相对湿度、风速等资料, 用于平顶山气候背景分析; 平顶山市 44 个省级气象观测站 2015-2017 年风向、风速资料, 用于精细化

风场的统计。

(2) 基础地理信息数据，源自平顶山市城市规划部门，平顶山市 2018 年建筑图层，包括城市建筑高度、建筑形态。主要用于城市建筑形态特征提取和地表通风潜力的估算。

(3) 卫星遥感数据，源自美国 Landsat 数据，用于土地利用类型提取，地表温度反演、绿量计算等。

(4) 城市规划资料：源自平顶山市自然资源局，包括平顶山市城市总体规划、平顶山市城市绿地系统规划、平顶山市城市小微绿地规划等，主要用于城市形态分析与通风廊道的构建。

2.3 研究方法

基于气象观测站资料、基础地理信息、卫星遥感数据和城市规划资料，利用数理统计方法、遥感反演与地理信息系统（GIS）技术等，分别开展城市风环境、热环境、地表通风潜力的计算与分析。

2.3.1 城市热岛强度

采用卫星影像反演得到的地表温度来计算城市热岛强度，具体计算如下：

$$I_i = T_i - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N T_{crop_j} \quad (1)$$

式中：

I_i ——图像上第 i 个像元所对应的热岛强度，单位为摄氏度（℃）；

T_i ——第 i 个像元的地表温度，单位为摄氏度（℃）；

T_{crop_j} ——郊区农田地区第 j 个像元的地表温度，单位为摄氏度（℃）；

N ——郊区农田地区所有有效像元的总个数，单位为个。

城市热岛强度分为日热岛强度（ $I_{\text{日}}$ ）和月、季热岛强度（ $I_{\text{月, 季}}$ ），本文使用日热岛强度等级（表 1）。

表 1 热岛强度等级划分

Table 1 Classification of UHI and their significance

等级	日热岛强度（ $I_{\text{日}}$ ） ℃	月、季热岛强度（ $I_{\text{月, 季}}$ ） ℃	等级含义
1 级	$I_{\text{日}} \leq -7.0$	$I_{\text{月, 季}} \leq -5.0$	强冷岛
2 级	$-7.0 < I_{\text{日}} \leq -5.0$	$-5.0 < I_{\text{月, 季}} \leq -3.0$	较强冷岛

3 级	$-5.0 < I_{\text{日}} \leq -3.0$	$-3.0 < I_{\text{月, 季}} \leq -1.0$	弱冷岛
4 级	$-3.0 < I_{\text{日}} \leq 3.0$	$-1.0 < I_{\text{月, 季}} \leq 1.0$	无热岛
5 级	$3.0 < I_{\text{日}} \leq 5.0$	$1.0 < I_{\text{月, 季}} \leq 3.0$	弱热岛
6 级	$5.0 < I_{\text{日}} \leq 7.0$	$3.0 < I_{\text{月, 季}} \leq 5.0$	较强热岛
7 级	$I_{\text{日}} > 7.0$	$I_{\text{月, 季}} > 5.0$	强热岛

2.3.2 城市绿源

绿源又称生态冷源，为能产生新鲜冷空气的区域，一般指水体、林地和农田，以及城市绿地里的林地灌木和草地。它不但可以有效减缓城市热岛效应，同时也是冷空气来源和改善流通与人居环境的重要场所，是通风廊道规划的重要前提条件之一。

采用卫星遥感提取的土地利用类型和绿量这两个指标共同确定绿源等级，利用 Landsat 归一化植被指数（ $NDVI$ ）数据估算城市地区绿量 S ：

$$S = 1/(1/30000 + 0.0002 * 0.03^V) \quad (2)$$

$$V = (R_{nir} - R_{red})/(R_{nir} + R_{red}) \quad (3)$$

式中：

S ——绿量，单位为平方米（ m^2 ）；

V ——植被指数；

R_{nir} ——Landsat 卫星近红外波段反射率；

R_{red} ——Landsat 卫星红光波段反射率。

表 2 绿源等级划分

Table 2 Classification of green source and their significance

等级	土地利用类型	绿量（ S ） m^2	等级含义
1	水体	$S \geq 3600$	强绿源
2	林地或绿地	$S \geq 20000$	较强绿源
3	林地或绿地	$16000 \leq S < 20000$	一般绿源
4	林地或绿地	$12000 \leq S < 16000$	弱绿源
	农田	$S \geq 12000$	

2.3.3 城市通风潜力

城市通风潜力由地表植被、建筑覆盖及天空开阔度确定的空气流通能力。根据城市建筑高度及密度分布，地表粗糙度长度（ Z_0 ）和天空开阔度（ F ）的计算，可以确定城市的地表通风潜力等级（表 3）。

表 3 通风潜力等级划分

Table 3 Classification of ventilation potential and their significance			
通风潜力等级	粗糙度长度（ Z_0 ） m	天空开阔度（ F ）	等级含义
1	$Z_0 > 1.0$	--	无或很低
2	$0.5 < Z_0 \leq 1.0$	$F < 0.65$	较低
3	$0.5 < Z_0 \leq 1.0$	$F \geq 0.65$	一般
4	$Z_0 \leq 0.5$	$F < 0.65$	较高
5	$Z_0 \leq 0.5$	$F \geq 0.65$	高

2.3.3.1 粗糙度长度

地表粗糙度长度是指大气边界层中近地面风速向下递减到零时的高度（以零平面位移高度为高度起点），可以表示城市和植被区域的地表粗糙程度，其值越大表明对空气流通的阻碍越大。地表粗糙度的计算分为自然表面地表粗糙度和城市地区地表粗糙度。对城市地区，采用 Grimmond（1999）建立的城市形态学模型进行估算：

$$Z_0 = Z_h \times \left(1.0 - \frac{Z_d}{Z_h}\right) \exp \left(-0.4 \times \frac{U_h}{u_*} + 0.193\right) \tag{4}$$

$$Z_d = Z_h \times \left(1.0 - \frac{1.0 - \exp \left[-(7.5 \times 2 \times \lambda_F)^{0.5}\right]}{-(7.5 \times 2 \times \lambda_F)^{0.5}}\right) \tag{5}$$

$$\frac{u_*}{U_h} = \min \left[(0.003 + 0.3 \times \lambda_F)^{0.5}, 0.3\right] \tag{6}$$

式中：

- Z_0 —— 粗糙度长度，单位为米（m）；
- Z_h —— 建筑物高度，单位为米（m）；
- Z_d —— 零平面位移高度，单位为米（m）；

U_h —— 建筑物高度处的风速，单位为米每秒（m/s）；

u^* —— 摩阻速度（或剪切速度），单位为米每秒（m/s）；

λ_F —— 建筑迎风截面积指数。

2.3.3.2 天空开阔度

天空开阔度（Sky View Factor, SVF）是天空被周围障碍物遮挡程度的参数，反映城市不同街渠的几何形态，其中建筑物高度和建筑物密度是影响天空开阔度的主要因素，其值越大在一定程度上表明该地区空气越易于顺利通过。本研究采用 Zakšek et al.（2011）提出的基于数字高程的栅格计算模型来估算天空开阔度，计算公式如下：

$$F = 1 - \frac{\sum_{i=1}^M \sin \gamma_i}{M} \quad (7)$$

式中：

F —— 天空开阔度，值为 0-1.0，无量纲；

γ_i —— 第 i 个方位角时的地形高度平面角，单位为弧度（rad）；

M —— 计算的方位角数目，单位为个，建议 M 取值应不小于 36。

3 结果分析

3.1 城市气候特征

平顶山处于暖温带和北亚热带气候交错的边缘地区，为暖温带半湿润大陆性季风气候，具有明显的过渡性特征。平顶山市年平均气温 15.0℃，存在明显的年代际变化，同全球和全国气候变暖趋势一致，随时间整体呈现升高趋势，尤其在 20 世纪 90 年代以后，气温升高明显。气温的升高，特别是在城市建成区日益扩张的背景下，极易造成城市热岛效应加剧，不利于城市内部空气流通。高温日数呈增多趋势，其中 2008-2014 年增加明显，高温日数的增加加剧城市热岛效应。年平均降水量 713.7 毫米，年际间波动较大，降水差异明显，降水偏多年是偏少年的近 2.4 倍。降水主要集中在夏季（降水量 367.9 毫米），占年总量的 51.5%；暴雨日数无明显变化趋势，但阶段性变化比较明显，1988-1993 年处于偏少期，1994-2010 年总体偏多，2011 年以来明显偏少。夏季平均降水日数 31.3 天，总体呈减少趋势，阶段性变化比较明显。年平均相对湿度为 68%，呈明显减少趋势。相对湿度减小使城市干岛效应明显，不利于城市中空气污染物的湿沉降。年日照时数呈减少趋

势，年日照时数的变化不仅与不同年份的气象条件有关，还与大气污染物形成的气溶胶和云对太阳辐射的遮挡有关。年平均风速为 2.3 米/秒，风速随时间呈下降趋势，尤其在 2000 年以后。城市的发展对风速存在影响，平均风速的减小对污染物的扩散极为不利，较小的风速会加重大气污染物的积累。平顶山市城市气候向暖干化发展，风速明显减少，对污染物的清除不利；夏季降水日数减少、高温日数增多不仅加剧了城市热岛效应，也不利于污染物的湿沉降。

3.2 城市风环境

在城市总体规划层面，通风廊道主要考虑一级和二级廊道。一级廊道起引风作用：阻隔城区之间热岛蔓延连片，构建生态隔离廊道；二级廊道起导风作用：切割主城区热岛，联通冷源与热岛区域，引导城市空气流通（杜吴鹏等，2016；Ren, et al., 2018）。

综合考虑地形和季风气候的影响，为深入研究风环境场特征，扩大该项目的研究范围，将第一圈层扩大到北至郑州、南达南阳、东至周口、西抵洛阳，来分析平顶山的风环境背景场，为一级廊道的识别提供有效参考。将平顶山城区、平顶山所属县、市、区（平顶山市、叶县、汝州、舞钢、鲁山、襄城、宝丰、郏县）作为第二圈层，对所选区域的省级气象观测站风向频率进行分析，从而识别连接郊区与城市边缘的二级廊道。

3.2.1 第一圈层风场特征

3.2.1.1 平顶山风向频率

对平顶山多年平均的风向资料统计分析，以风频最大的风向作为年主导风向，绘制风玫瑰图，如图 1 所示。1991-2020 年平顶山市主导风向为西北偏北风(NNW)和西北风(NW)，分别占 10.1%和 9.5%；其次，东北偏东风(ENE)和东北风(NE)的频率也较大，分别为 9.5%和 7.6%；南风(S)频率为 7.4%。

平顶山处于季风区，风向随季节有所改变。与年分布相似，四季主导风向以西北偏北风和西北风为主，同时南风、东北偏东风均较明显。秋冬季以偏北风为主；春夏季南、北风参半，偏南风稍多于偏北风。

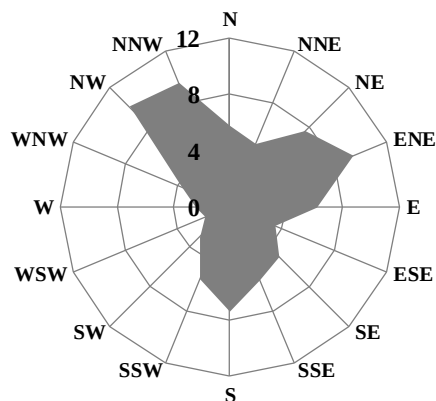


图 1 1991-2020 年平顶山风向频率

Fig. 1 Wind frequency of Pingdingshan City, 1991-2020

3.2.1.2 第一圈层风向频率

第一圈层 30 年平均风向玫瑰分布如图 2 所示，可以看到，在西北方向受伏牛山和箕山山脉影响，风向以西北风为主；同时受箕山余脉影响，有东北向的风吹向城市，为其另一个主导风向；即山脉的影响是平顶山出现西北风、东北风的主要原因，为平顶山主要风源；受夏季风影响，在东部平原地区南风出现频率较高，平顶山作为季风区城市，同时有北向风源。

结合地形和城市气候特征，影响平顶山市中心城区的外围新鲜空气更多来源于北部山体，从西北、东北方向进入城市，同时城市南部的清新空气也是城市通风的主要来源。因此，在城市主通风廊道走向设置时，更多考虑与第一圈层的背景风场一致，从西北、东北和南部引风入城，将生态价值较高的风，尽量贯穿城市中心区或城市边缘，阻隔城区之间热岛蔓延。

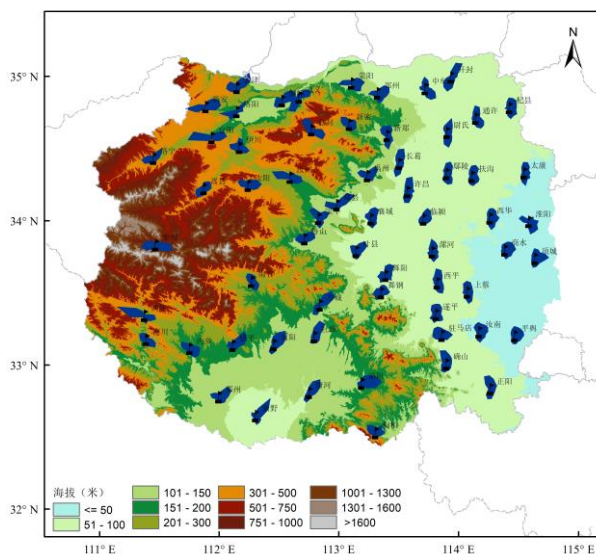


图 2 1991-2020 年第一圈层 30 年年平均风玫瑰分布图

Fig. 2 Spatial distribution of wind frequency in first layer, 1991-2020

3.2.2 第二圈层风场特征

在城市内部由于受到城市建筑、街道等因素影响，不同区域的通风存在差异。软轻风为扣除无风和大风后，影响城市内部空气流通效果明显的风速段（杜吴鹏等，2018），在城市通风中效果明显。因此，在对城市二级通风廊道识别时，主要考虑软轻风的分布，以便辅助和延展主通风廊道的通风效能以及沟通、连接局地生态冷源和风环境较差区域的功能。

3.2.2.1 平顶山软轻风风向频率

统计近 30 年软轻风的风向频率，可以看到主导风向仍以西北偏北风（NNW）为主（10%），东北偏东风（ENE）和东北风（NE）分别为 9.5%和 8.7%，西北风（NW）和南风（S）分别为 7.8%、7.4%，即软轻风仍以西北风、东北风和南风为主导（图 3）。四季的软轻风分布中，以西北风、东北风和南风为主，不同季节略存在差异，在春、夏季东南风频率有所增加。

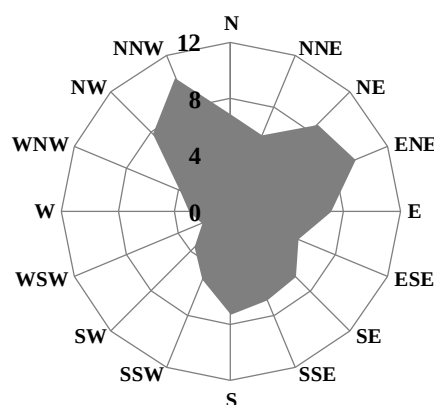


图 3 1991-2020 年软轻风风向频率

Fig. 3 Soft and light breeze wind frequency of Pingdingshan City, 1991-2020

3.2.2.2 第二圈层风向玫瑰

第二圈层的风向玫瑰分布中（图 4），在平顶山市辖区，风频多以西北风、东北风居多，在市辖区的西侧受山地地形影响，以西风、西北风居多；在市辖区东部多平原，以东北-西南风为主。因湛河在市区穿城而过，在西部新城区以西北-东南风居多，在老城区主要为东-西向的分布，北部山体以东北风和北风出现频率较高，市区的南部多出现东北-西南风和南风。故在设置二级通风廊道时，应顺应城市软轻风的方向，辅助和延展主通风廊道，引导新鲜冷空气进入城区风环境较差的区域，缓解城市热岛。四个季节的分布大致相似。

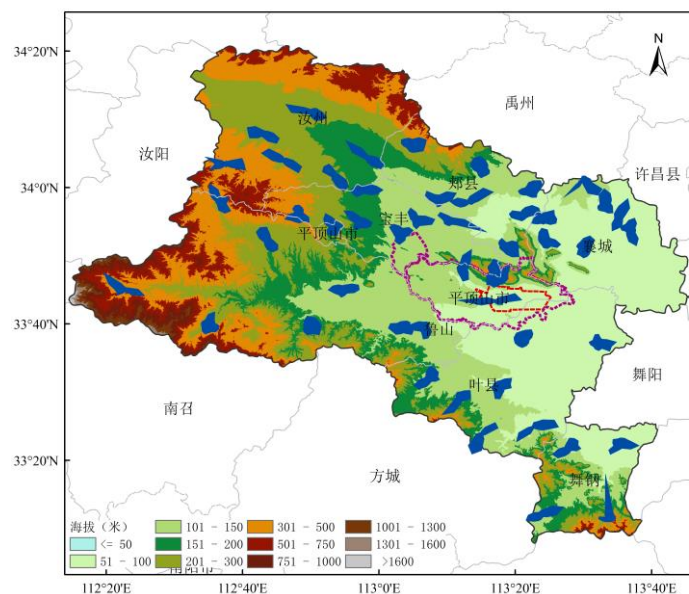


图 4 2015-2017 年软轻风下第二圈层风向频率分布图

Fig. 4 Spatial distribution of soft and light breeze wind frequency in second layer, 2015-2017

3.2.2.3 第二圈层风速分布

图 5 为第二圈层平均风速的分布，受城市建筑群、下垫面等因素影响，平顶山市中心城区风速明显小于周边地区，而在城市西北部的山区风速相对较大，东部和南部的平原风速也较城区大。

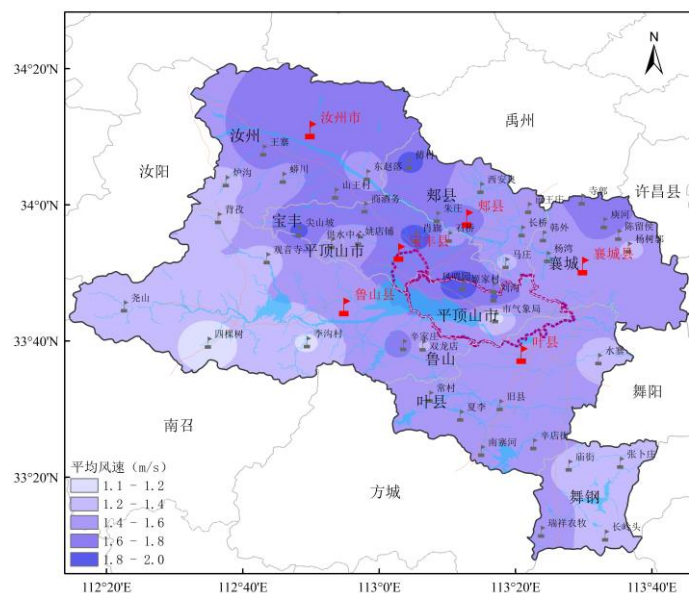


图 5 2015-2017 年第二圈层风速分布图

Fig. 5 Spatial distribution of velocity in second layer, 2015-2017

3.3 城市热环境

3.3.1 城市热岛

选取 1987 年、2004 年和 2013 年的 Landsat 遥感影像，反演平顶山不同时期的城市热岛状况，研究平顶山城市发展及规模的扩大对城市热岛演变的影响。

1987 年（图 6a），平顶山市城市热岛主要集中在老城区的市中心一带，湛河以北的区域，热岛强度以弱热岛-较强热岛为主，局部存在强热岛，强热岛覆盖范围较小；在平顶山的西北一带存在小范围的弱热岛和较强热岛，而在西部新城区基本无热岛出现。这与当时城市规模和工业的布局有关，20 世纪 80 年代平顶山城市规模小，且重工业发达，因此热岛主要分布在主城区和大型重工业厂区。

随着城市的发展，到 2004 年（图 6b），平顶山市城市热岛强度增强，热岛范围较 1987 年明显扩大。平顶山市区的大部以强热岛为主，主要分布在湛河两侧的老城区（即城市建成区），在市区的北部、南部以弱热岛为主；在新城区的东部有热岛存在，主要以弱热岛为主，局部存在强热岛，但范围较小。一方面是因为城市建设力度的加强，城市范围的扩大，导致能源消耗的增加、热排放的增加、另一方面是临时建设用地的存在，裸露地表的强地表辐射率，使平顶山市城市热岛强度明显增加。

到 2013 年（图 6c），平顶山市的城市热岛范围进一步扩大，向西延伸至新城区，热岛强度以弱热岛-强热岛为主，强热岛的范围较 2004 年略有减弱。但新城区的热岛范围较 2004 年向西部进一步扩大，主要以弱热岛为主，新城区的东部有较强热岛和强热岛的存在。造成热岛范围扩大、强度改变的原因主要是城市的发展，2008 年来，平顶山按照“向西跳跃式发展”的思路，积极推进西部新城区建设，向西的发展扩大了热岛的范围。

综上分析，随着城市建设的推进，人类活动范围和强度的不断扩展，平顶山市城市热岛范围在不断增大，热岛强度不断增强。目前，平顶山市区大部均呈现城市热岛分布，且由于临时性建设用地导致的裸露地表较多，分散在平顶山市的各区内，因此热岛中心不仅只集中在市中心，而是呈现多区域分散性的强城市热岛。热岛强度与建成区面积和建设开发强度密切相关，即随着城市的发展，建设开发强度不断加大，城市面积不断扩张，林地、水体、绿地等相应减少，导致城市热岛呈现多点并发且强度增强的趋势。

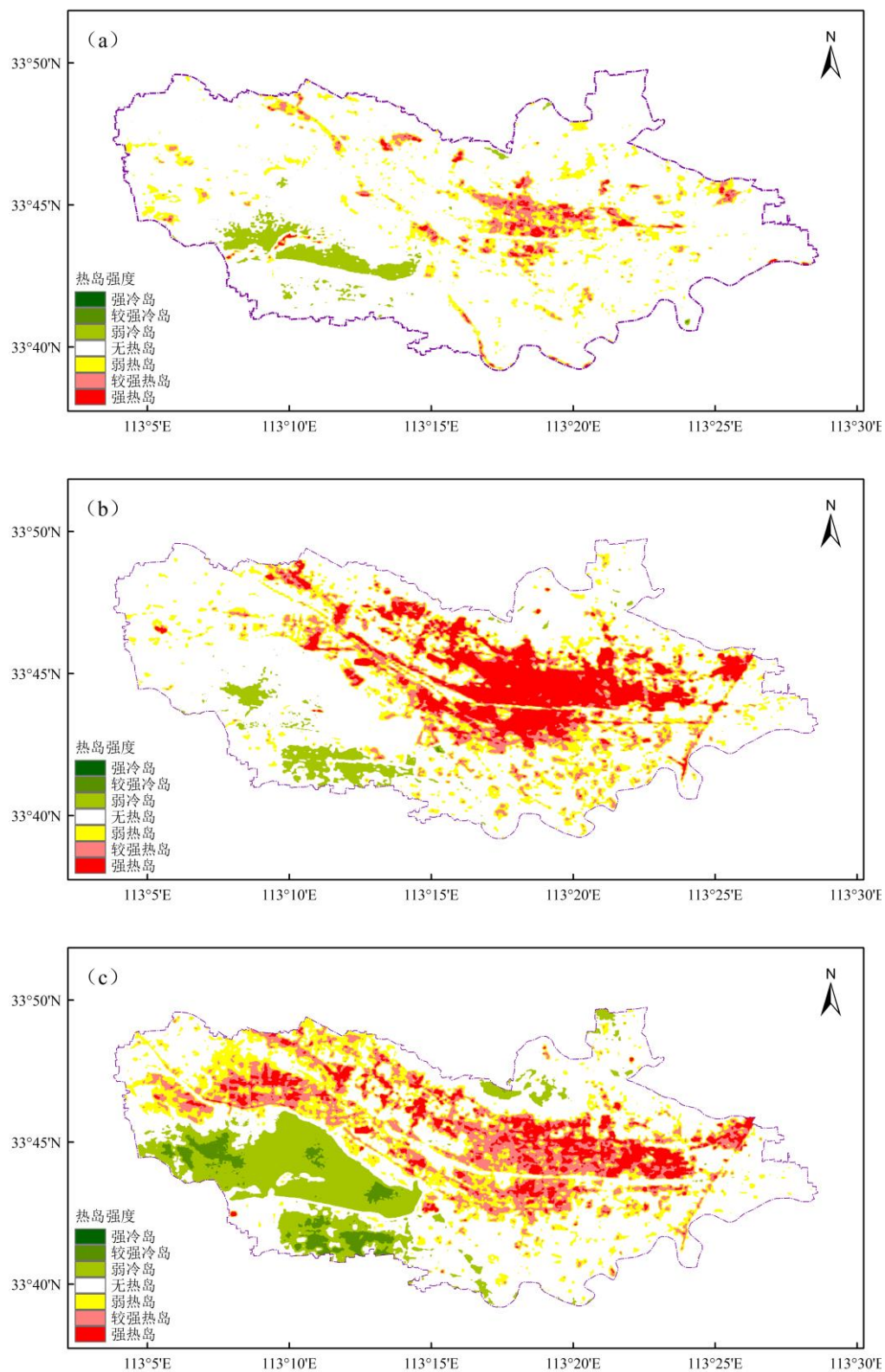


图6 平顶山市城市热岛强度分布: (a) 1987 年; (b) 2004 年; (c) 2013 年
Fig. 6 Spatial distribution of UHI in Pingdingshan City: (a) 1987; (b) 2004; (c) 2013

3.3.2 城市绿源

平顶山市城市绿源主要分布在市区的周边，老城区和新城区以外的大部分地区均有绿源的存在，以北部山体、西南侧白龟山水库和南部沙河为主要的城市绿源分布区，农田、绿地等为分散式绿源分布区（图 7）。强绿源主要分布在白龟山水库西部、西北部，包含国家级湿地公园，主要以水体为主；较强绿源主要分布在平顶山沿北部的山体一带的山地，以林地和绿地为主；而在城市的周边及内部则为弱绿源的分布区，主要是以农田和绿地为主。

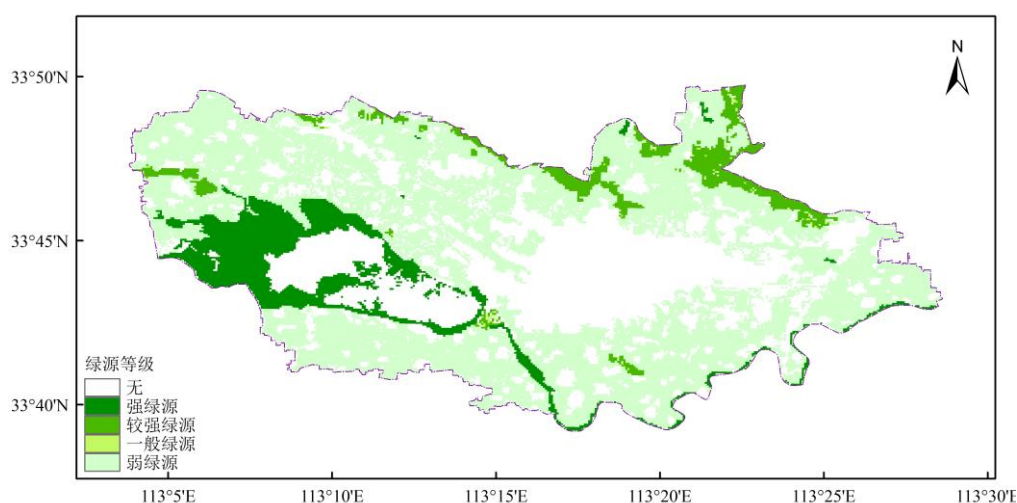


图 7 平顶山市城市绿源分布图

Fig. 7 Spatial distribution of green source in Pingdingshan City

3.4 城市通风环境

3.4.1 地表粗糙度

基于平顶山市建筑高度计算地表粗糙度长度（图 8），在老城区和新城区的东部区域，粗糙度长度一般在 1 米以上，在老城区尤其是湛河以北的大部分区域，粗糙度长度在 2 米以上的范围较大，即空气流经这些地方时因受阻挡风速减小明显；而在老城区的东部、南部及新、老城区的交界一带、新城区的西部等地粗糙度长度一般在 1 米以下，地表粗糙度相对较小。从城市功能分区看，火车站周边、商业区、生活区和集中建设的办公区域粗糙度较大，主要分布在老城区的市中心一带、新城区的东部；市郊及重工业集中区粗糙度较低。从下垫面角度分析，水体地表粗糙度最小，其次为绿地、林地和道路，开发强度较低的区域地表粗糙度较小。

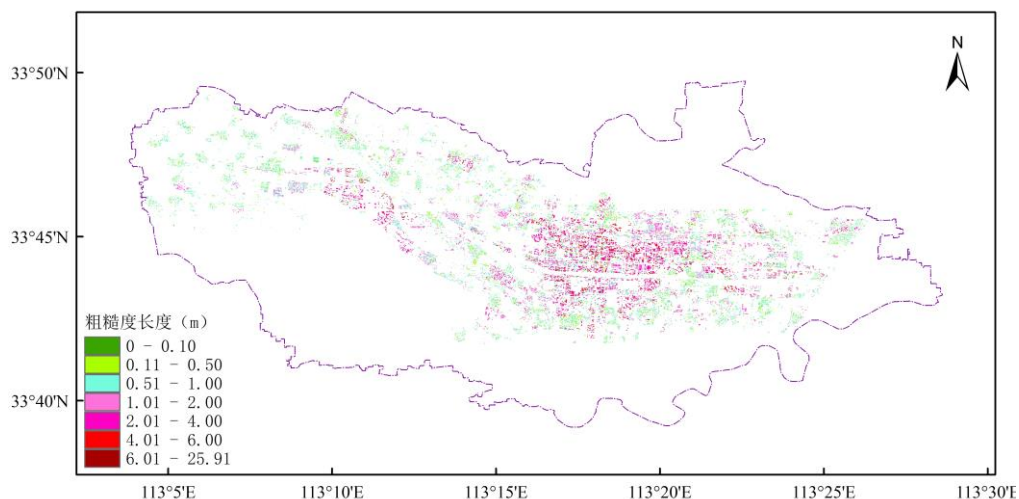


图 8 平顶山市市辖区粗糙度空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of roughness length in Pingdingshan City

3.4.2 天空开阔度

平顶山市天空开阔度空间分布如图 9 所示，在老城区的湛河两侧尤其在湛河北部的大部分区域、新城区东部的部分区域受工业用地、商业区、集中建设的高建筑办公及生活区等影响，天空开阔度略小，一般在 0~0.6，局部不足 0.2。而在老城区以外的南、北两侧，新城区的西部、老城区的东部天空开阔度一般在 0.6~1.0，即市郊受遮挡少，天空开阔度较大。

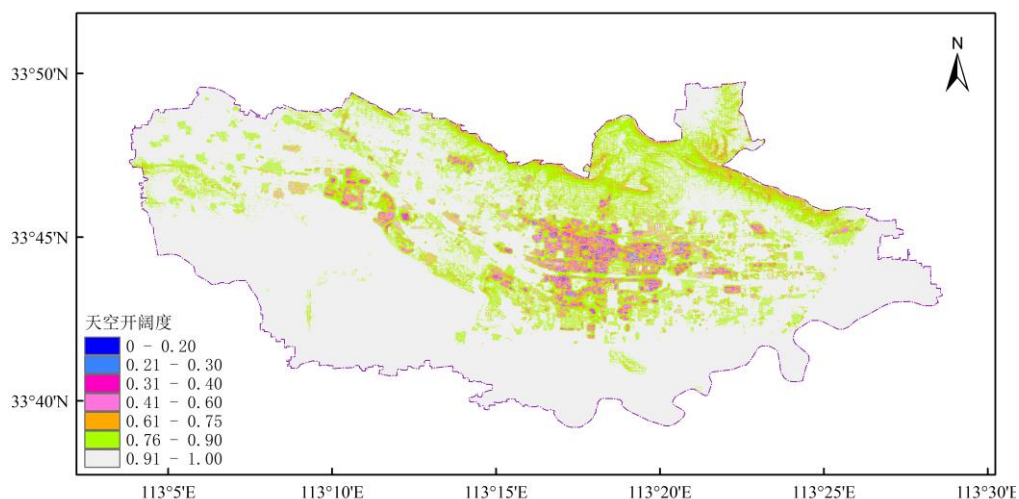


图 9 平顶山市天空开阔度空间分布

Fig. 9 Spatial distribution of sky view factor in Pingdingshan City

3.4.3 地表通风潜力

根据地表粗糙度和天空开阔度来评估平顶山市地表通风潜力(图 10): 平顶山市老城区和新城区东部的生活区、商业区和集中建设的办公区域通风潜力等级为 1-2 级, 通风潜力为无、低或较低, 说明这些地方的空气流通能力相对较差; 而在老城区的南部、东部, 新城区的西部, 沿北部山体一带通风潜力为 3-5 级, 通风潜力较高和高, 即在 these 区域空气的流通能力相对较好。总体来看, 平顶山市辖区建筑区域的通风潜力一般, 空气流通性相对弱些; 市郊和老城区南部、东部通风潜力较好。通风潜力较大的区域主要为绿地、河道、农田、宽阔街道以及低矮零碎的建筑区、而建筑密集、街道狭窄区域的地表通风潜力相对较小。

由通风潜力图还可以看到, 在东西方向上, 湛河及交通主干道的建设路、黄河路、鹰城大道等有较好的通风效果; 南北方向, 西环路、光明路、新华路、开源路、开发路等也有较好的通风效果; 在新城区的西部及老城区东部东北-西南走向上, 通风潜力等级较高。这些水体和道路均可作为通风廊道的载体, 使新鲜冷空气到达城市热岛较强、通风能力较差的区域, 起到有效连接和沟通生态冷源的作用。

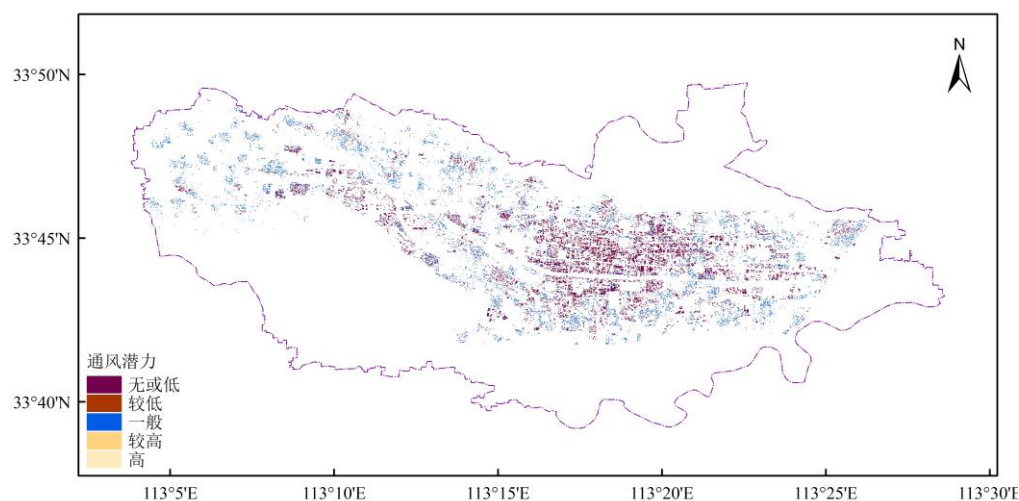


Fig. 10 Spatial distribution of ventilation potential in Pingdingshan City

3.5 城市通风廊道构建

3.5.1 通风廊道构建原则

在城市用地现状或规划图上利用地理信息技术叠加城市风环境、热环境、绿源分布、通风潜力等，在城市总体规划或区域规划层面初步确定城市主通风廊道和二级通风廊道（杜吴鹏等，2018）。城市主通风廊道宜贯穿整个城市，沿低地表粗糙度和通风潜力较大的区域，连通绿源与城市中心、郊区通风量大与城区通风量小的区域，打通城市中心通风量弱、热岛强度强的区域，宜依托城市现有的交通干道、河道、公园、绿地、高压线走廊、相连的休憩用地以及其他类型的空旷地作为廊道载体。二级通风廊道应沿通风潜力较大的区域进行规划，连通绿源与密集建成区以及相邻的通风量差异较大的区域，弥补城市主通风廊道没有贯通的通风量较小、热岛强度较强的区域。二级通风廊道走向应尽可能辅助和延展主通风廊道的通风效能，宜将城市现有街道、河道、公园、绿地以及低密度较通透建筑群等作为廊道载体。

3.5.2 通风廊道系统空间结构

根据平顶山城市建设规模 and 实际建设情况，本次通风廊道规划原则上确定一级风廊宽度控制在 200 米以上，二级风廊控制在 50 米以上，通过通风廊道串联起公园、水系等生态绿地与城市干道等线性开阔区域和点状开阔区域，将风源引入城区内部，形成良好的通风循环以达到改善微气候的效果。平顶山中心城区周边的白龟山水库、山体以及大面积的农田、林地等是中心城区冷源补偿空间和清洁空气生成区，能够有效缓解城区高温闷热环境和街区空气污染。

整合并叠加平顶山市的城市热环境和城市绿源的空间分布、道路通风性能、基础地理环境、城市作用空间、城市补偿空间等，结合平顶山市城市总体规划、绿地系统专项规划等，初步构建“六主十次，两屏多点，三区协同”的城市通风廊道系统格局（图 11）。六主十次，即六条一级风廊、十条二级风廊。两屏多点，即通风廊道系统补偿空间，两屏是指北部连绵山体构筑城市北部生态屏障和南部白龟山水库及湿地公园构筑城市南部生态屏障；多点主要是分布于城市和郊区的绿色开敞空间。三区协同，即通风廊道系统作用空间，作用空间主要包括东部老城片区、西部新城片区、南部产业片区。

一级通风廊道分别为：1 号湛河通风廊道，顺应城市主导风向西北风和市区

软轻风的主导东西风向，将平顶山市区分隔为南北两个区域，且下垫面为水体和绿地，为较好的生态冷源，且贯穿整个城市，起到很好的阻隔城市热岛连片发展的效果。在新城区主要顺应城市西北风，将新鲜的空气引入市区，到达老城区后，主要顺应城市东-西为主导的风向，深入达到城市热岛较强的区域。该廊道宽度在 200 米以上，长度较长，生态效益好。2 号沙河通风廊道，主要顺应城市的主导风向西北风和东北风，分隔平顶山主城区和尼龙新产业，且下垫面为水体和绿地，为较好的生态冷源，起到很好的阻隔城市热岛连片发展的效果。3 号为平叶大道通风廊道，顺应城市东北风主导风向，宽度在 200 米及以上，将东北向城市外围新鲜空气引入城市内部，该廊道贯穿城市南北，可以深入到城区热岛较强的区域。4 号廊道从市区外围以楔形绿地的形式连接平顶山-平舞铁路，将城市外围绿地与城市公园连接，该廊道走向与东北风主导风向夹角小于 45° ，宽度为几百米到数公里，能利用夜间的山谷风，将山上的清洁空气引入市区。5 号廊道从市区外围以楔形绿地的形式连接落鳧山-西环路，将城市外围绿地与城市公园及白龟山水库连接，将新城区和老城区分隔开，该廊道走向顺应东北风主导风向，宽度为几百米到数公里，且能利用夜间的山谷风，将山上的清洁空气引入市区。6 号为香山-梅园路通风廊道，顺应冬季东北风主导方向，沿线绿化面积较大，开发强度和建筑密度低，该廊道将北部山体的新鲜空气引入新城区，用于缓解新城区的热岛。

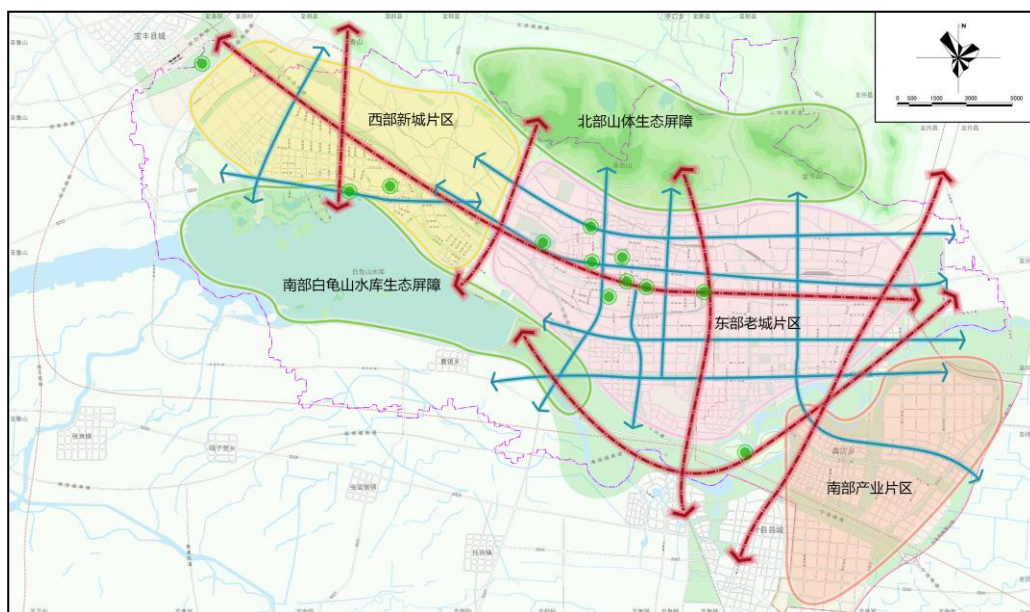


图 11 平顶山市区通风廊道空间结构图

Fig. 11 Spatial structure of ventilation corridor system in Pingdingshan City

4 结论与讨论

城市通风廊道作为优化城市通风环境的一种有效手段，可以有效改善城市生态环境，对改善城市气候具有重要作用。本研究基于平顶山市气象观测站、基础地理信息、卫星遥感和城市规划等多源资料，综合分析并评估了平顶山城市风环境、热环境、通风环境，在此基础上，初步构建了平顶山市城市通风廊道。主要结论如下：

(1) 受伏牛山、箕山山脉及季风气候影响，平顶山市主导风向以西北风、东北风和南风为主，不同季节略有差异。随着城市发展，城市建筑群、下垫面等因素影响，中心城区风速明显小于周边地区。

(2) 随着城市的发展，平顶山城市热岛呈现范围扩大、强度增强的趋势。城市热岛空间呈现多中心分布，强度由市区向周边递减。城市绿源主要分布在城市周边，以山体、河流水系、农田、绿地为主，作为生态补偿空间，可为主城区引入新鲜空气。

(3) 基于城市地表粗糙度、天空开阔度等因子综合评估城市地表通风潜力，并结合平顶山市精细化风场、城市热岛分布、考虑平顶山市下垫面对地表通风环境的影响，初步构建平顶山市以河流风廊、绿地风廊、道路风廊为主的“六主十次”城市通风廊道系统格局。

城市空间布局形态与气候环境存在密切的相关性，合理的廊道设置对改善城市局地风环境、热环境有着明显作用。城市水域和绿地的增加(Nichol, et al., 2008; 轩春怡等, 2010)，有利于城市降温、增湿、改变局地流场。在城市空间的引导下，增加城市绿地、水体，有助于改善局部城市气候环境。结合城市形态分析及相关规划，将在面向城市的精细化气候评估技术方面开展进一步的研究。

参考文献 (References)

- Carpentieri M, Robins A G. 2015. Influence of urban morphology on air flow over building arrays [J]. J Wind Eng Ind Aerod. 145, 61-74. doi.org/10.1016/j.jweia.2015.06.001.
- 杜吴鹏, 房小怡, 刘勇洪, 等. 2016. 基于气象和 GIS 技术的北京中心城区通风廊道构建初探[J]. 城市规划学刊, 5 (231): 79-85. Du Wupeng, Fang Xiaoyi, Liu Yonghong, et al. 2016. Construction of Ventilation

- corridors in the Beijing Central Urban Area Based on Meteorology and GIS Technology. Urban Planning Forum (in Chinese), 5 (231): 79-85. doi:10.13631/j.upf.201605009
- 杜吴鹏, 房小怡, 程宸等. 2018. 气候可行性论证规范 城市通风廊道 QX/T 437-2018 [S]. 中国气象局. Du Wupeng, Fang Xiaoyi, Cheng chen et al. 2018. Specifications for climatic feasibility demonstration-Urban ventilation corridor [S] (in Chinese). China Meteorological Adiminstration.
- 房小怡, 李磊, 刘宛, 等. 2021. 我国城市通风廊道研究与实践进展[J]. 生态学杂志, 40 (12): 4088-4098. Fang Xiaoyi, Li Lei, Liu Wan, et al. 2021. Progress of researches and practices of urban ventilation corridors in China[J]. Chinese Journal of Ecology (in Chinese), 40 (12): 4088-4098. doi:10.13292/j.1000-4890.202112.010
- Gao Y F, Yao R M, Li B Z, et al. 2012. Field studies on the effect of built forms on urban wind environments [J]. Renew Energ, 46 (5):148-154. doi.org/10.1016/j.renene..2012.03.005.
- Grimmond C.S.B., Oke, T. R.. 1999. Aerodynamic properties of urban areas derived from analysis of surface form [J]. Journal of Applied Meteorology, 38 (9): 1262-1292. doi.org/10.1175/1520-0450(1999)038<1262:apouad>2.0.CO;2.
- Gu K K, Fang Y H, Qian Z, et al. 2020. Spatial planning for urban ventilation corridors by urban climatology [J]. Ecosyst Health Sust. 6 (1),1747946. doi.org/10.1080/20964129.2020.1747946.
- Guo F, Zhu P S, Wang S Y, et al. 2017. Improving Natural Ventilation Performance in a High-Density Urban District: A Building Morphology Method [J]. Procedia Engineering, 205 (2017):952-958. doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.149.
- Han L J, Zhou W Q, Li W F. 2015. City as a major source area of fine particulate (PM_{2.5}) in China [J]. Environ Pollut, 206, 183-187. doi.org/10.1016/j.envpol.2015.06.038
- Huang L, Yan L J, Wu J G. 2016. Assessing urban sustainability of

- Chinese megacities: 35 years after the economic reform and open-door policy [J]. *Landscape Urban Plan*, 145, 57–70. doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.09.005.
- Hsieh C M, Huang H C. 2016. Mitigating urban heat islands: A method to identify potential wind corridor for cooling and ventilation [J]. *Comput Environ Urban*, 57 (2016):130–143. doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2016.02.005.
- Johnson G.T., Hunter L.J., 1998. Urban wind flows: wind tunnel and numerical simulations—a preliminary comparison [J]. *Environ Modell Softw*, 13 (3–4):279–286. doi.org/10.1016/S1364-8152(98)00028-0.
- Kress R. 1979. Regionale Luftaustauschprozesse Und Ihre Bedeutung Fur Die Raumliche Planung [M]. Dortmund: Institut fur Umweltschutz der Universitat Dortmund, 154–168.
- 李军, 荣颖. 2014. 武汉市城市风道构建及其设计控制引导[J]. *规划师*, 30(8): 115–120. Li Jun, Rong Ying. 2014. Urban design control for wind corridor: Wuhan case [J]. *Planners (in Chinese)*, 30(8):115–120.
- 李鹏, 余庄. 2006. 基于气候调节的城市通风道探析[J]. *自然资源学报*, 21(6):991–997. Li Kun, Yu Zhuang. 2006. Research on urban ventilation channel based of climate regulation [J]. *Journal of Natural Resources (in Chinese)*. 21(6) :991–997.
- 刘红年, 贺晓冬, 苗世光, 等. 2019. 基于高分辨率数值模拟的杭州市通风廊道气象效应研究 [J]. *气候与环境研究*, 24(1): 22–36. Liu Hongnian, He Xiaodong, Miao Shiguang, et al. 2019. A study on meteorological effect of the Hangzhou ventilation corridors based on high resolution numerical simulation [J]. *Climatic and Environmental Research*, 24(1): 22–36. doi:10.3878/j.issn1006-9585.2018.18027.
- 刘姝宇, 沈济黄. 2010. 基于局地环流的城市通风规划方法——以德国斯图加特市为例 [J]. *浙江大学学报 (工学版)*, 44 (10): 1985–1991. Liu Shuyu, Shen Jihuang. 2010. Urban ventilation channel planning method based on local circulation: a case study of Stuttgart, Germany [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science) (in Chinese)*,

44(10):1985-1991.

Liu X Q, Huang B, Li R R, et al. 2022. Wind environment assessment and planning of urban natural ventilation corridors using GIS: Shenzhen as a case study [J]. Urban Clim. 42, 101091 doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101091.

刘勇洪, 张硕, 程鹏飞, 等. 2017. 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 [J]. 生态环境学报, 26 (11): 1892-1903. Liu Yonghong, Zhang Shuo, Cheng Pengfei, et al. 2017. Research and application of heat and ventilation environment assessment for city planning—a case study of Jinan Central Urban Area [J]. Ecology and Environmental Sciences (in Chinese), 26 (11): 1892-1903. doi:10.16258/j.cnki.1674-5906.2017.11.010

梁颢严, 李晓晖, 肖荣波. 2014. 城市通风廊道规划与控制方法研究以《广州市白云新城北部延伸区控制性详细规划》为例 [J]. 风景园林, (5): 92-96. Liang Haoyan, Li Xiaohui, Xiao Rongbo. 2014. Research on the planning and control method of urban ventilation corridors [J]. Landscape architecture ecological planning and design (in Chinese), (5): 92-96. doi:10.14085/j.fjyl.2014.05.0092.05.

Ng E. 2009. Policies and Technical Guidelines for Urban Planning of High-Density Cities — Air Ventilation Assessment (AVA) of Hong Kong [J]. Build Environ. 44(7):1478-1488. doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.06.013

Ng E, Yuan C, Chen L, et al. 2011. Improving the wind environment in high-density cities by understanding urban morphology and surface roughness: a study in Hong Kong [J]. Landscape and Urban Plan, 101(1):59-74. doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.01.004.

Nichol J.E., Wong M.S. 2008. Spatial variability of air temperature and appropriate resolution for satellite-derived air temperature estimation [J]. Int J Remote Sens, 29(24):7213-7223.

Paulusci O, Monti P, Cecere C, et al. 2022. Impact of morphological parameters on urban ventilation in compact cities: The case of the

- Tuscolano-Don Bosco district in Rome [J]. *Sci Total Enviro*, 807(2022), 150490. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150490.
- 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, 35-68. Ren Chao, Wu Enrong. 2012. Urban climatic map—an information tool for sustainable urban planning [M] (in Chinese). Beijing: China Architecture & Building Press, 35-68.
- 任超, 袁超, 何正军, 等. 2014. 城市通风廊道研究及其规划应用 [J]. *城市规划学刊*, 216 (03): 52-60. Ren Chao, Yuan Chao, He Zhengjun, et al. A study of air path and its application in urban planning [J]. *Urban Planning Forum* (in Chinese), 216 (03): 52-60.
- 任超. 2016. 城市风环境评估与风道规划——打造“呼吸城市” [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 83-112. Ren Chao. 2016. Urban Ventilation assessment and wind corridor plan: Creating Breathing Cities [M] (in Chinese). Beijing: China Architecture & Building Press, 83-112.
- Ren C, Yang R Z, Cheng C, et al. 2018. Creating breathing cities by adopting urban ventilation assessment and wind corridor plan – The implementation in Chinese cities [J]. *J Wind Eng Ind Aero*, 182, 170-188. doi.org/10.1016/j.jweia.2018.09.023.
- Sun J Y, Wang X H, Chen A P, et al. 2011. NDVI indicated characteristics of vegetation cover change in China's metropolises over the last three decades [J]. *Environ Monit Assess*, 179(1-4): 1-14. doi:10.1007/s10661-010-1715-x.
- Sun Y, Zhang X B, Ren G Y, et al. 2016. Contribution of urbanization to warming in China. *Nat Clim Change*, 6(2016): 706-709. doi:10.1038/NCLIMATE2956.
- Wong M S, Nichol J E, To P H, et al. 2010. A simple method for designation of urban ventilation corridors and its application to urban heat island analysis [J]. *Build Environ*, 45(8): 1880-1889. doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.02.019.

- 吴婕, 徐影, 师宇. 2015. 华南地区城市化对区域气候变化的影响 [J]. 气候与环境研究, 20 (6): 654-662. Wu Jie, Xu Ying, Shi Yu. 2015. Urbanization effects on local climate change in South China [J]. Climatic and Environment Research (in Chinese), 20(6):654-662. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2015.14228.
- 轩春怡, 王晓云, 蒋维楣, 等. 2010. 城市中水体布局对大气环境的影响 [J]. 气象, 36 (12): 94-101. Xuan Chunyi, Wang Xiaoyun, Jiang Weimei, et al. 2010. Impacts of Water Layout on the Atmospheric Environment in Urban Area [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 36 (12): 94-101.
- Yang X C, Hou Y L, Chen B D. 2011. Observed surface warming induced by urbanization in east China [J]. Journal of Geophysical Research, 116 D14113. doi:10.1029/2010JD015452.
- 俞布, 贺晓冬, 危良华, 等. 2018. 杭州城市多级通风廊道体系构建初探[J]. 气象科学, 38 (5): 625-636. Yu Bu, He Xiaodong, Wei Lianghua, et al. 2018. Primary exploration for construction of urban multilevel ventilation corridors system in Hangzhou. Journal of Meteorological Sciences (in Chinese), 38(5):625-636.
- 袁超. 2010. 缓解高密度城市热岛效应规划方法的探讨——以香港城市为例 [J]. 建筑学报, (S1): 120-123. Yuan Chao. 2010. Mitigating urban heat island effects of high density cities: a study at Hong Kong [J]. Architectural Journal, (S1) (in Chinese): 120-123.
- Yuan C, Ren C, Ng E. 2014. GIS-based surface roughness evaluation in the urban planning system to improve the wind environment – A study in Wuhan, China [J]. Urban Clim 10(3):585-593. doi.org/10.1016/j.uclim.2014.06.005
- Zakšek K, Oštir K, Kokalj Ž. 2011. Sky-View Factor as a Relief Visualization Technique [J]. Remote Sensing, 3(2): 398-415. doi.org/10.3390/rs3020398.
- 赵红斌, 刘晖. 2014. 盆地城市通风廊道营建方法研究——以西安市为例 [J]. 中国园林, (11): 32-35. Zhao Hongbin, Liu hui. 2014. Research on the

Methods of Building Ventilation Corridors among Basin Cities-Taking the city of Xi' an as the Example. Chinese Landscape Architecture (in Chinese). (11): 32-35.

郑思轶, 刘树华. 2008. 北京城市化发展对温度、相对湿度和降水的影响[J]. 气候与环境研究, 13(2): 123-134. Zheng Siyi, Liu Shuhua. 2008. Urbanization effect on climate in Beijing [J]. Climatic and Environment Research (in Chinese), 13(2):123-134. doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2008.02.02.

郑祚芳, 雷小燕, 高华. 2022. 北京城市通风廊道研究 I: 环境效应模拟[J]. 地理科学, 42 (4) 631-639. Zheng Zuofang, Lei Xiaoyan, Gao Hua. Ventilation corridor in Beijing, Part I: Simulation of environmental effects. Scientia Geographica Sinica, 2022, 42(4): 631-639. doi: 10.13249/j.cnki.sgs.2022.04.008