

河南焦作市通风廊道的分析与构建

Analysis and Construction of Ventilation Corridor in Jiaozuo, Henan Province

来燕妮 冯其林 杜钦*
LAI Yanní FENG Qilin DU Qin*

文章编号: 1000-0283 (2021) 10-0039-06
DOI: 10.12193/j.laing.2021.10.0039.006
中图分类号: TU986
文献标志码: A
收稿日期: 2021-07-30
修回日期: 2021-08-19

摘要

城市大气污染日益严重, 城市通风廊道有助于大气污染物的扩散, 改善大气环境。计算流体力学可对不同速度场、质量浓度场等流场进行分析、计算和预测, 实现对风速、大气颗粒污染物、建筑物密度等因素的模拟。以传统工业型城市河南焦作为例, 通过分析大气颗粒污染物的时空分布, 确定污染集中地及主要影响空间; 结合城市风玫瑰图和绿色基础设施, 识别出盛行风入城风口地带和识别氧源补给地; 利用计算流体力学模拟确定潜在的通风廊道; 通过换气平衡, 识别潜在氧源补给廊道。基于计算流体力学的通风廊道分析方法, 能为城市通风廊道的构建提供有益参考。

关键词

计算流体力学; 通风廊道; 大气颗粒污染物

Abstract

Urban air pollution is becoming more and more serious, and urban ventilation corridors help the diffusion of air pollutants and improve the atmospheric environment. Computational fluid dynamics can analyze, calculate and predict flow fields such as different velocity fields and mass concentration fields, and realize the simulation of wind speed, atmospheric particulate pollutants, building density and other factors appropriately. The study takes Jiaozuo, a traditional industrial city in Henan province, as an example. Firstly, through the spatial and temporal distribution of atmospheric particulate pollutants, the pollution concentration and the main impact space are determined. Secondly, based on the urban wind rose map and green infrastructure, the prevailing wind entering the city tuzere zone and the oxygen supply area were identified. Then, computational fluid dynamics simulation was used to determine the potential ventilation corridors. Finally, identify potential oxygen supply corridors through ventilation balance. The analysis method of ventilation corridor based on computational fluid dynamics can provide a useful reference for the construction of urban ventilation corridors.

Key words

computational fluid dynamics; ventilation corridors; atmospheric particulate pollutants

来燕妮

1994年生/女/河南焦作人/硕士/
河南省中纬测绘规划信息工程有限公
司/研究方向为城乡规划(河南焦作
454002)

冯其林

1983年生/男/河南焦作人/河南省中
纬测绘规划信息工程有限公司规划研
究中心主任, 注册城乡规划师/研究
方向为城乡规划(河南焦作 454002)

杜钦

1978年生/男/广西桂林人/博士/桂
林理工大学旅游与风景园林学院教授/
研究方向为生态廊道研究(广西桂林
541004)

*通信作者 (Author for correspondence)
E-mail: 80168391@qq.com

随着城市化进程不断加快, 中国城市大气污染问题日益严重, 近年来各地频发的大气污染事件本质上都与大气颗粒物污染密切相关^[1-3]。如何改善城市大气颗粒物环境已成为当下热点问题。对此, 2016年国家发展和改革委员会、住房和城乡建设部联合共同发布的《城市适应气候变化行动方案》明确提出, 可以利用打通城市通风廊道, 增加城市空气流动, 来缓解和改善城市大气环境问题^[4]。

目前, 通风廊道构建, 特别是运移大气颗粒污染物的通风廊道, 难点在于

如何对城市颗粒污染物随风运动路径进行判断和识别。一些研究通过地面实测观察数据来获得风和颗粒物的数据，然而此方法的不足在于难以实现同时在多点、同步收集风和空气质量数据。风动模型可以在一个地区上以大比例尺形式再现局地风场状况和污染物分散特性，尽管城市通风风动研究能提供一定约束条件下的精确模拟，但由于覆盖区域小、操作成本昂贵等问题，大大限制了其应用^[5-7]。近年来，计算流体力学由于可对不同速度场、质量浓度场等流场进行分析、计算和预测，逐渐应用于模拟城市大气环境与城市规划直接关系^[8]。

国内对城市通风廊道研究多偏向于半定性研究，较少考虑对城市通风廊道的定量计算，特别是定量过程中如何实现关键因子如风、污染物、建筑物密度等的梯度变化。由于计算流体力学模拟平台能实现对速度场、质量浓度场的定义与模拟，因此研究以传统工业型城市河南焦作为例，运用计算流体力学模拟平台，识别其潜在通风廊道，探讨如何利用计算流体力学模拟平台实现通风廊道的构建。

1 研究区域与方法

1.1 研究区概况

焦作市地处北纬34° 48′ 55″—35° 29′ 59″，东经112° 33′ 40″—113° 38′ 42″，位于河南省西北隅，北依太行与山西接壤，呈北山中川南滩之势，属于温带大陆性季风气候区，冬冷夏热、春暖秋凉、四季分明。全年主导风为东北风，其次是西南风，全年平均风速为2.3 m/s。城区地表水资源丰富，国家级引水项目——南水北调中段工程穿城而过，季节性河流有白马门河、影视沟、群英河等12条，目前处于蓄水状态的有南水北调工程焦作市城区段大沙河。焦作市总面积约407 110 hm²，建成区面积11 330 hm^{2[9]}。

1.2 数据来源

研究采用的数据主要包括：Landsat-8分辨率为30 m的遥感数据及高程数据，源自中国科学院地理空间数据云网站；焦

作市城市总体规划（2011—2020），源自焦作市住建局；大气颗粒污染物数据，源自焦作市气象局。

1.3 研究方法

工业城市通风廊道除了考虑本地区空气污染物扩散和通风良好之外，还应尽可能降低或避免空气污染物对下风向地区的影响。根据焦作市概况，构建既具有良好通风能力，又具有一定滞留和吸附空气污染物能力的绿色廊道，步骤主要包括：（1）确定污染集中地及主要影响空间；（2）确定盛行风入城的风口地带；（3）识别城市及周边的氧源地；（4）确定通风廊道和城市氧源补给风道；（5）识别城市下风向对出城空气污染物的滞留和吸附处理区。

1.3.1 确定污染集中地及主要影响空间

将研究范围云量值小于10%的Landsat8遥感影像（第1-9波段，2019年3月）进行多波段图像合成和转换，得到Landsat8OLI432自然真彩色影像。通过ArcGIS Desktop，采取人机交互方式，分别按居住区、商业区、公众用地（医院、学校等）、城市绿地、水体、农业用地、生态防护林、山林等类型，对照参考地物进行解译，得到焦作土地利用类型图。将研究范围内2017—2019年的大气污染颗粒物指数的空间数据与土地利用类型图进行叠加，按季节识别污染集中地及主要受影响空间。

1.3.2 识别盛行风入口区

在污染集中地和主要影响空间的基础上，结合焦作近5年风玫瑰数据（表1），确定风源入城的上风向为风口地带。

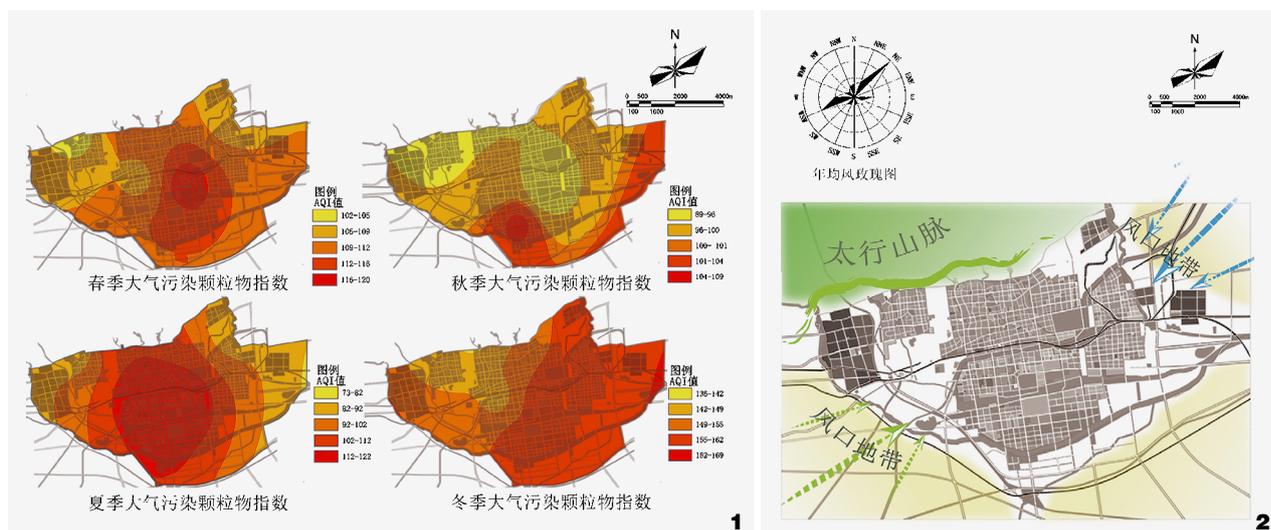
1.3.3 识别氧源地

氧源地能稀释空气污染物并为城市提供新鲜氧源补给。氧源地主要包括城市绿地系统、城市周边生态防护林、山林等。利用城市绿地和城市周边绿色空间，如自然山林、生态防护林等的分布，识别氧源补给地。

表1 焦作市近5年月均风速风向表

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	年均
风向	WSW	NE	NE	NE	NE	ENE	NE	NE	NE	WSW	WSW	WSW	NE
风速/ (m/s)	2.2	2.3	2.6	2.7	2.6	2.5	2.3	2	1.9	2	2.3	2.4	2.3

注：数据源自焦作市气象局。



1. 焦作市中心城区大气污染颗粒物指数分析图
2. 焦作市中心城区风口地带示意图

1.3.4 确定通风廊道和氧源补给廊道

利用研究区道路系统、水系分布等线性空间信息, 结合城市盛行风入口、大气污染物集中区和主要影响区, 采用计算流体动力学模型, 模拟风环境在研究区的流动, 确定扩散最优和扩散次优的通风廊道, 最优廊道设为一级廊道, 次优廊道设为二级廊道。计算机流体力学模型使用的是ANSYS Fluent模拟软件。它是目前功能最全、适用性最广的CFD软件, 集成在Workbench下, 方便模拟前后处理协同使用^[10]。ANSYS Fluent模拟过程主要分为几何模型建立、计算网格划分、初始条件设置和求解计算。

(1) 建立几何模型。将研究范围空间在AutoCAD中抽象绘制为几何图形, 将其导入ANSYS Workbench中, 对几何外形建立节点和单元^[11]。计算区域尺寸将直接影响模拟的准确性和计算时间^[12], 因此计算区域与进口口的长度为模型长度的1~2倍, 出口为最高建筑物高度的8~10倍。

(2) 划分网格。网格质量直接影响模拟的准确度、稳定性和收敛性, 可使用ANSYS中Workbench的Mesh工具划分网格, 网格划分方式为CutCell, 多以六面体网格为主, 部分为四面体网格。

(3) 设置边界条件。入口边界条件设置为速度入口边界条件, 使用梯度风的指数率规律, 在大气边界层以下, 由于摩

擦作用的存在使得靠近地面的风速较小, 而离地越远风速越大。平均风剖面用来描述平均风随高度变化的规律, 目前常用的模型有指数风剖面模型、对数风剖面模型等^[13]。中国常选用的指数风剖面模型方程见公式(1)。

$$V(z) = V_b \left(\frac{z}{z_b} \right)^a \quad (1)$$

其中: z_0 表示标准参考高度, 中国标准参考高度是10 m; V_b 表示参考高度处的平均风速; z 表示任一高度; $V(z)$ 表示该高度处的平均风速; a 是地面粗糙度, 较少高层建筑的市区空间, a 取值0.22^[14]。

其他边界中, 假设出流面的空气流动已恢复至没有建筑物阻碍的情况, 将出流边界设置为压力出口边界, 相对压力为0。因城市风环境模拟中所研究的区域较大, 可不考虑顶面及侧面对模拟区域内空气流动的影响, 将其定义为对称条件。

(4) 求解设置。包括求解模型、求解控制、监督控制、迭代次数等设置。本次研究采用湍粘模型二方程标准 $k-\epsilon$ 模型, 是一种半经验计算模型, 是基于湍流动能 (k) 和湍流扩散率 (ϵ) 方程组的湍流模型, 分子黏度的影响可忽略不计。在分析较大尺度的模型时, 选用该方法可减少计算压力。采用SIMPLE算法进行压力与速度的解耦, 避免不当的速度和压力



3. 焦作市中心城区主要氧源地示意图

出现。收敛则是连续性绝对残差、动量项绝对残差、湍流绝对残差小于 10^{-3} 。

通过保证换气平衡，来确定氧源补给廊道。为了确保城市内外每日的换气平衡，设城市垂直风向边长为 L_1 (km)，平行风向边长为 L_2 (km)，顺风风速为 V (km/h)，城市每天的换气次数 T ，则城市风道的总宽度 W 占城市边长 L_1 的比例应是 T 的倒数^[12]，见计算公式(2)。

$$\frac{W}{L_1} = \frac{1}{T} \Rightarrow W = \frac{L_1}{T} \quad (2)$$

其中， $T=24V/L_2$ ，将 T 代入公式(2)，则 $W=(L_1 \cdot L_2)/24V$ 。

1.3.5 识别下风向空气污染物的滞留和吸附区

结合现有城乡绿色基础设施（即城市绿地、城市外围生态防护林地）和规划的绿色基础设施分布，识别城市下风向对出城空气污染物滞留和吸附的处理区，降低对下风向其他地区的影响。

2 结果与分析

2.1 污染集中地及主要影响空间

研究区污染集中地及主要影响空间见图1。总体上，春

季时段大气污染颗粒物指数102-120，夏季为73-122，秋季为89-109，冬季为136-169，冬季污染最为严重，秋季最轻。

2.2 盛行风入口区

影视路以北沿太行山下的生态保护区可作为山坡风环流进城的风口区；大沙河及沿岸的带状生态防护绿带可作为城西部—南部的风口区；东部工业区以西的耕地可作为城区东部各方位的风口地带（图2）。

2.3 主要氧源地

识别得到的主要氧源地有许衡公园、生态植物园、森林公园、缝山针公园、月季公园等，它们是重要的氧源补给地（图3）。

2.4 通风廊道和氧源补给廊道

2.4.1 通风廊道

通过对土地利用类型的空间几何简化处理^[12]，以盛行风年均2.3 m/s为风速，进行CFD模拟，确定通风风道。CFD核心参数设置如表2所示，模拟过程如图4，确定的通风廊道如图5和表3。

表2 CFD (计算流体动力学) 模拟参数值

	名称	参考值
Boundary conditions (边界条件)	Inlet (进口)	V=2.3 m/s
	Outlet (出口)	Pressure outlet (压力出口)
	Ground (地面)	Wall(遮挡物)
	Remainder (其余)	Symmetry (对称)
Solver (求解器)	Segregated implicit formulation (分离隐式)	
Turbulence model ($k-\epsilon$ 湍流模型)	K	0.6
	ϵ	0.8
Difference Schemes (差分格式)	Pressure term (压力项)	Standard format (标准格式)
	Momentum equation (动量方程)	First-order Up-wind (一阶迎风)
	Transport equation (运输方程)	First-order Up-wind (一阶迎风)
The coupling of pressure and velocity (压力和速度的耦合)	SIMPLEC algorithm (SIMPLEC算法)	
Relaxation factor (松弛因子)	Pressure term (压力项)	0.3
	Velocity term (速度项)	0.7

2.4.2 氧源补给廊道

焦作城区若以单条城市风道宽度为100 m估算, 大概需要12条城市风道才可以完成一日的换气平衡; 若单条城市风道宽度为80 m, 则需要15条城市风道。根据模拟结果, 择取普济路等7条通风状况较为良好、与主体风道相连、与组团内生态补偿空间相连的道路作为氧源补给廊道(表3)。

2.5 下风向空气污染物的滞留和吸附区

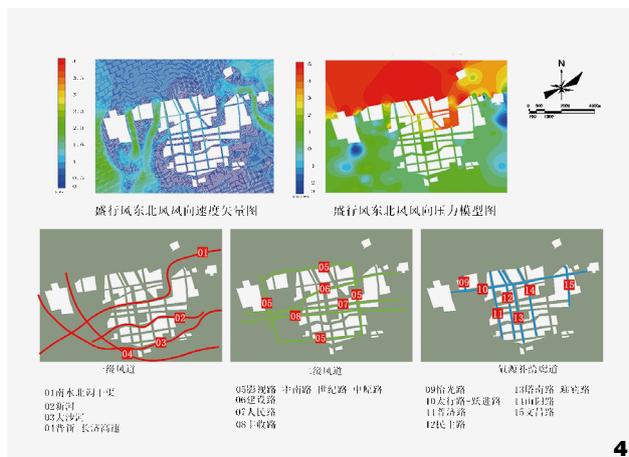
由于研究区主要盛行东北风和西南风, 西南方向和东北

方向的城市绿地、城市外围生态防护林地以及规划的绿色基础设施都可成为各自下风向污染物的吸附区(图5)。

3 结论与讨论

焦作是中国典型的工业污染型城市, 研究基于污染集中地及主要影响空间、盛行风入城的风口地带和城市及周边的氧源地, 采用计算流体力学的ANSYS Fluent模拟软件, 确定出相应的通风廊道和氧源补给廊道。与传统半定量城市通风廊道的识别相比, 计算流体力学可以综合分析风速、污染物质量浓

4. 焦作市部分地区风场模拟图
5. 焦作市通风廊道构建示意图



4



5

表3 焦作市的通风廊道

分级	名称	宽度/m
一级风道	晋新高速—长济高速	120
	南北水调工程焦作城区段	350
	新河	250
	大沙河	500
二级风道	中南路—世纪路—中原路—影视路	80
	人民路	60
	丰收路	100
	建设路	40
	太行路—跃进路	45
氧源补给廊道	怡光路	45
	民主路	45
	普济路	100
	塔南路—迎宾路	100
	山阳路	60
	文昌路	60

度和地表建筑物密度的三维时空变化关系及相互影响，寻找扩散条件最好的城市通风廊道。这种方法可为其他工业城市通风廊道的构建提供参考。

应当指出，城市大气颗粒污染物扩散和运移，在三维空间上除了受建筑物密度影响，还受建筑物高度的影响，特别是对于高楼耸立，高楼密度大的大型城市，建筑物单体高度对污染物扩散和通风影响极大^[11]。本研究因数据获取所限，在进行模拟时没有设置建筑物高度作为参数之一。但研究区域焦作，属于典型的中小型工业城市，建筑物比较低矮，主要影响要素建筑物密度设为参数因子，足以满足要求^[12]。另外，通风廊道是一个开放、动态的线性系统，与周边区域联系密

切。如果要发挥更大的扩散作用，还应该从城市群、省域乃至更大区域尺度，结合各类绿色空间，进行多层次构建，这样更有利于大气污染物的缓解和吸附。■

参考文献

- [1] CAPELUTO I G, YEZIORO A, SHAVIV E. Climatic Aspects in Urban Design—A Case Study[J]. Building & Environment, 2003, 38(6): 827-835.
- [2] ASHIE Y, TOKAIRIN T. Numerical Simulation of Urban Heat Island in a Ten-kilometer Square Area of Central Tokyo[J]. Earth Science, 2006(01): 45-48.
- [3] CHERNOW E. Implementing the Clean Air Act in Los Angeles: The Duty to Achieve the Impossible[J]. Ecology Law Quarterly, 2015, 4(3): 537.
- [4] 住建部门户网. 住建部: 城市适应气候变化行动方案发布[J]. 重庆建筑, 2016, 14(5): 36.
- [5] 任超, 袁超, 何正军, 等. 城市通风廊道研究及其规划应用[J]. 城市规划学刊, 2014(03): 52-60.
- [6] 李鹏, 余庄. 基于气候调节的城市通风道探析[J]. 自然资源学报, 2006(06): 991-997.
- [7] 张宁, 蒋维楣. 城市街渠内气流的数值模拟拟分析[J]. 南京大学学报: 自然科学版, 2000, 36(6): 760-772.
- [8] 张圣武. 基于数值模拟的杭州住区风环境分析研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- [9] 焦作市人民政府官网[EB/OL]. <http://www.jiaozuo.gov.cn/>
- [10] 邵腾. 严寒地区居住小区风环境优化设计研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [11] 王婷婷. 基于FLUENT的大气边界层风场LES模拟[D]. 北京: 北京交通大学, 2011.
- [12] 段翠娥, 顾兆林, 卢伟真. 城市下垫面阻力参数化研究[C]//2016年全国环境力学学术研讨会摘要集. 北京: 中国力学学会, 2016: 1.

本专题由上海市园林科学规划研究院碳汇中心协助组稿，特此感谢！