

郑拴宁 苏晓丹 王豪伟,等. 城市环境中自然通风研究进展[J]. 环境科学与技术 2012, 35(4): 87-93. Zheng Shuan-ning, Su xiao-dan, Wang hao-wei, et al. Review of natural ventilation in urban environment[J]. Environmental Science & Technology, 2012, 35(4): 87-93.

城市环境中自然通风研究进展

郑拴宁¹, 苏晓丹¹, 王豪伟¹, 李春明¹, 王翠平¹, 董仁才²

(1.中国科学院城市环境研究所 福建 厦门 361021;

2.中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室 北京 100085)

摘 要 城市环境中自然通风源于城市热压梯度及城市风压梯度的综合作用。城市环境中自然通风影响着城市“五岛”效应(城市热岛、湿岛、干岛、浑浊岛及雨岛)城市大气的自净能力和城市居民的身体与健康,也是研究快速城市化地区广义城市风环境(风场、温度场、湿度场)的参考因子。为了全面理解国内外针对城市环境中自然通风的研究进展,从城市环境中自然通风的监测、模拟及应用三个方面对目前国内外针对城市环境中自然通风的研究现状进行了综述,最后结合环境物联网、无线传感技术等目前在城市环境中自然通风研究的相关技术及应用领域的新进展,对城市环境中自然通风的后续研究热点和关键问题进行了展望,为城市环境中自然通风的相关技术及应用问题的后续研究提供了基础研究素材。

关键词 自然通风; 城市街谷; 热岛; 通风潜能

中图分类号:X22 文献标志码:A doi:10.3969/j.issn.1003-6504.2012.04.019 文章编号:1003-6504(2012)04-0087-07

Review of Natural Ventilation in Urban Environment

ZHENG Shuan-ning¹, SU Xiao-dan¹, WANG Hao-wei¹, LI Chun-ming¹,

WANG Cui-ping¹, DONG Ren-cai²

(1.Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021; China;

2.State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-environmental Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: Natural ventilation in urban environment is driven from urban thermal gradient and wind pressure gradient. Natural ventilation in urban environment affected urban “Five Island” effect including urban heat-island, urban moisture-island, urban dry-island, urban cloudy-island and urban rain-island, as well as self-purifying ability of the natural urban atmosphere and the health of urban residents very much, which also is the effective factors in study on broad sense of urban wind-environment. In order to review the progress of study on natural ventilation in urban environment systematically, the monitoring, simulation and application of natural ventilation in urban environment were taken into consideration, and natural ventilation in urban environment based on the advanced development of related technologies, such as the internet of environmental-things and wireless-sensor technology was reviewed, which provided information source for relative technology and application study on natural ventilation in urban environment.

Key words: natural ventilation; urban street canyon; heat island; ventilation potentiality

城市环境中的自然通风是指在城市环境中基于城市环境风压差及热压差所产生的非机械式通风^[1]。城市环境中的自然通风对缓解城市“五岛”效应(即城市热岛、湿岛、干岛、浑浊岛及雨岛),提高城市大气环境的自净能力,提升城市居民的感知舒适度,降低城市建筑的供暖、制冷能耗等都有着不可忽视的效能^[2-4]。同时城市环境中的自然通风也是城市热岛效应研究,

以及城市建筑设计和城市规划等所要考虑的主要环境要素之一^[5]。对于可持续城市建设具有重要意义^[6-7]。目前国内外对于城市环境中的自然通风的研究主要集中在城市环境中的单体建筑通风,小规模群体建筑通风及城市街谷通风 3 个主要的研究对象,主要采用现场监测、风洞试验和计算流体力学模拟 3 个主要的研究方法,研究的成果主要以风场特征值表达和可视

《环境科学与技术》编辑部 (网址)http://fjks.chinajournal.net.cn (电话)027-87643502 (电子信箱)hjkxyjs@126.com

收稿日期 2011-03-30 修回 2011-06-29

基金项目:中国科学院知识创新工程项目(KZCX2-YW-453)

作者简介:郑拴宁(1980-)男,博士研究生,主要研究方向为数字城市环境规划 (电话)0592-6190675 (电子信箱)snzheng@iue.ac.cn。

化表达为主^[8-10]。但是随着城市化的推进,地表环境日益破碎化和复杂化,目前城市环境中的自然通风的相关研究局限性也开始暴露:首先是城市环境中自然通风效能的评价的复杂化和现有评价方法的单一化之间矛盾日益突出,城市通风效能不仅与城市通风的可行性有关,还与周围环境的噪声、温适度,以及空气污染物浓度有关,对其综合效能的评价需要一套系统且合理的评价指标体系^[11];其次是城市环境中的自然通风的监测分析手段与实际应用需求之间的矛盾,目前对城市环境中自然通风的研究主要集中在对气象部门的监测数据分析,或者对城市环境中有限的代表性城市街谷的通风监测分析,或者小范围的城市通风 CFD 模拟几个主要的研究手段,受到数据点位过少或者研究区域范围有限等的限制,应用代表性和通用性不强^[12]。同时,随着我国城市化的推进,急需有针对城市环境的城市化演变与城市环境的自然通风之间的耦合关系的相关研究成果作为城市发展规划的参考指导^[13],但目前还没有相关的整体性的研究成果见诸文端。本文综述了从 20 世纪早中期到目前的国内外学者对城市环境中自然通风的研究成果,进一步提出了目前针对城市环境中的自然通风研究的发展机遇及发展方向,并结合具体开展的项目对城市环境中的自然通风监测、分析及应用层面提出了新的思考和初步的解决方案。

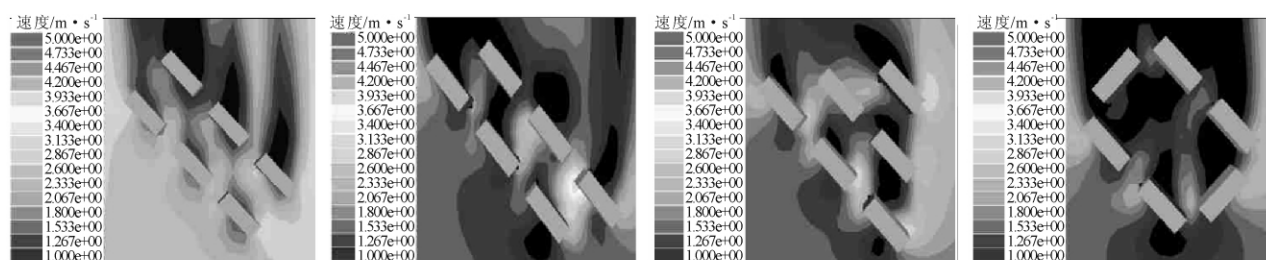
1 城市环境中的自然通风的影响因素

随着城市化水平的提升,城市环境中的近地格局日益破碎化和复杂化,这对城市环境中的自然通风

有着很大的影响。就城市环境的整体而言,影响城市环境中的自然通风的主要因素包括建筑格局、热压梯度、噪声水平和污染物浓度四个主要因子^[14]。

1.1 城市环境中的建筑格局

城市环境中的自然通风的主要驱动力源自于城市风压差及城市热压差。而城市风压差则主要缘于城市环境中的建筑格局的影响,从而使得城市环境中在建筑迎风面和建筑背风面产生较大的压力差值,进而在单体建筑周围会形成一定的风影区,而在群体建筑中则很容易形成狭管效应,形成基于建筑格局的局地疾风区和局地静风区,从而影响城市环境中的自然通风效能(如图 1 所示)。同时,城市盛行梯度风与由建筑格局形成的城市主要街谷的夹角更是影响城市环境中自然通风效能的长期稳定因素,其影响力更是远远大于微观尺度的作用。例如欧洲项目计划:URBVENT(Natural Ventilation in the Urban Environment)在城市环境中的自然通风的研究过程中,对于城市街谷通风的性能研究就主要在雅典市选择了 10 条基于不同建筑格局所形成的不同方向城市街谷,对城市街谷中的通风情况进行了不同高度的监测与分析。我国气象学者周淑珍在 20 世纪 80 年代也根据其研究组在上海市所开展的实验研究,对不同建筑格局下的自然通风性能进行了定性的描述与分析。马剑等采用数值模拟方法对由 6 幢方形截面高层建筑组成的建筑群的周围风环境进行了计算和分析,提出了通过调整平面布局改善高层建筑群风环境的措施和建议^[15]。



资料来源:王珍吾,高云飞,孟庆林等,2007-12.

图1 不同建筑布局下的局地风场分布图
Fig.1 Wind field in different layout of buildings

1.2 城市环境中的热压梯度

城市通风的另一个驱动力就是城市热压差,即城市环境中的热压梯度。城市环境由于其特殊的下垫面构成及城市内部的热源扩散而形成了城市热岛效应,也就是城市中心区温度高于郊区温度的现象,也就产生了较大的热压梯度^[16]。热压梯度会造成空气密度的差异,进而形成所谓的热压,在城市近地表产生正压区和负压区,成为城市环境中自然通风的驱动

力之一^[17]。但城市环境中自然通风的效能则不仅仅取决于是否通风,还取决于通风的合理性,如果基于热压梯度所产生的热压通风将高温气体不断地输送到需要低温、清新的空气的区域,如居住小区等则会产生负面效应,也就是城市热压通风存在负面效能。而如果热压通风是将高温气流输送到诸如水域、林地等具有较好的降温效能的下垫面区域,从而实现温度的下降,缓解城市热岛效应,则城市热压通风具有较理

想的正面效能^[18]。

1.3 城市环境中的噪声水平

城市环境中的噪声水平虽然不是城市环境中自然通风的驱动因素,但却是城市环境中自然通风的制约因素之一,尤其是在室内外自然通风环境中^[19]。例如,当室外噪声水平超出室内环境的容许值时,一般通过室内外自然通风来提升室内空气品质的可能性就会很小,同样条件下也就很难依靠室内外通风来进行室内外温湿度的交换,从而城市环境中自然通风的效能就会很低。因此,作为对城市环境中的耗能主体之一的建筑体的自然通风效能的主要影响因素之一,城市环境中噪声水平是城市环境中自然通风评价及设计的主要考虑指标。目前,国内外对于建筑体抗噪声自然通风的主要应对措施就是双层建筑幕墙设计,内外层幕墙之间的空间不仅是很好的建筑通风风道,更是屏蔽室外噪声的主要屏障^[20-21]。

1.4 城市环境中的污染物浓度

城市环境中的污染物浓度也是城市环境中自然通风的主要因素之一^[22]。城市环境中的日常污染物主要来源于城市环境中的日常生活排放及交通排放,日常生活排放多属于面源污染,而交通排放则多以线源污染的形式出现^[23]。城市环境内部由于区域分工的不同,污染物浓度及种类都会存在明显的区域差异性,如何将高浓度区域的污染物及时缓释扩散,且不对敏感区域或低浓度区域造成负面的影响或超出区域的环境容许阈值是城市环境中自然通风所需要考虑的提升城市环境自净能力的主要思路。同时,城市环境中的区域性污染物浓度也是影响室内外自然通风的核心要素,如果室外污染物浓度过高,则采用自然通风对城市建筑进行降温、供暖、除湿等相关自然通风策略都将视为无效^[24]。此外,由于城市街谷中的汽车高速行驶所产生的拖拽气流的形成的汽车风也与城市街谷中汽车尾气等污染物的扩散及局地自然通风效能有着密切的关系^[25]。因此,城市环境中的污染物浓度分布特征也是实现城市环境中自然通风的最佳效能所需要考虑的主要要素。

2 城市环境中的自然通风研究进展

截止目前,针对城市环境中自然通风的相关研究主要集中在监测方法,实时模拟和相关应用3个方面^[26]。监测方法是指对城市环境中的自然通风性能及潜力通过现场监测的方式进行前期数据获取的过程,主要涉及到监测手段和监测所覆盖的尺度等,目前大多数是基于地方气象台监测数据的大尺度区域研究和便携设备的小尺度区域研究为主。实时模拟主要是

针对小区域群体建筑或单体建筑的外围或室内空间的通风环境的风洞试验模拟和计算机模拟方法,风洞实验由于成本相对较高,应用具有一定的局限性,而计算机模拟方法目前相对较为普遍,也有如ANSYS, FLUENT等多款成熟的模拟软件,其基础理论是计算流体力学的三大基础守恒定律,但由于计算量相对较大,特别是针对大尺度的复杂城市环境,也存在一定的局限性。相关应用研究目前主要集中在小尺度区域的量化应用和大尺度区域的定性化应用两个层面,如单体建筑对城市风环境的影响机理研究及应用,群体建筑的布局形态研究及相关应用,城市街谷的通风效能及潜能分析及应用等,也有一些研究城市环境中的自然通风和其他城市环境中的气象参数之间的耦合机理的研究与应用在近几年开始见诸文端。本文将主要对上述三个方面的研究进展进行系统的介绍。

2.1 城市环境中自然通风监测研究进展

城市环境中的自然通风监测是城市环境中自然通风相关研究起步最早的研究手段和研究策略^[27]。风速及风向是城市气象参数的两个基本要素,也是城市环境中自然通风的主要表征量,最早的城市通风监测主要是政府气象专业台站的气象监测数据,传统的人工监测台站数量相对较少^[28],目前的政府气象台站大多数采用无线传输的自动气象站,监测站点分布则相对较为密集,所监测的气象参数的空间分辨率更高,同时从传统的人工记录气象站到目前的自动气象站,数据的精度及采样频率也大大提升,这种高空间分辨率、高采样频率的高精度气象数据更能为相关的研究与决策服务^[29]。除政府气象台站以外,随着对城市小气候及城市环境问题研究的深入,很多国内外研究机构也在全球尺度、国家尺度和城市尺度建立起了各种一体化的环境监测网络,如美国的凤凰城环境监测网络、巴尔的摩环境监测网、全球湖泊生态监测网络(GLEON)及中国环境监测总站布设的国家尺度113个城市环境空气自动监控系统,中国科学院地理科学与资源研究所负责搭建的中国生态系统研究网络(CERN)。

针对城市环境中的自然通风监测主要分散在三个主要的方面,一是城市单体建筑对周围环境风场的影响监测,二是室内外自然通风监测研究,三是城市街谷自然通风的监测分析研究。欧洲科学研究与发展理事委员会的第五个科研与发展计划中所支持的城市环境中的自然通风研究(URBVENT)及法国政府资助的相关项目(PRIMEQUAL项目)中对上述三个方面的监测网络研究提供了很好的示范作用^[7]。同时,中国科学院城市环境研究所数字城市环境网络中心也在其所承担的中国科学院数字城市环境网络建设与

示范项目中通过将城市原有政府气象台站监测数据及其移动监测数据相整合的“基准站+流动站”的形式对试点城市的自然通风环境应用物联网技术进行数字化结点的网络化监测研究,以进一步研究与分析城市自然通风环境的区域性差异规律及城市自然通风环境与城市环境演变之间的相关性(见图 2 所示)。同期,国内外研究人员也借助便携式气象站等工具,对小区域内的自然通风情况及室内外自然通风进行了分析研究及评价,且提出了对改善局地自然通风切实可行的改善措施^[30-31]。但就目前发展的现状而言,针对气象监测的研究进展要远远落后于水环境监测等其他环境要素的监测,而针对城市环境中自然通风的监测研究的则更少,所以城市环境中自然通风的监测研究还需要不断地推进和完善。

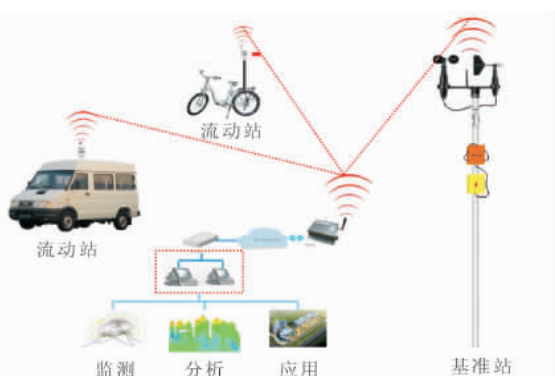


图2 基准站+流动站监测模式示意图

Fig.2 Monitoring model of base stations and rover stations

2.2 城市环境中自然通风模拟研究进展

对于城市环境中自然通风模拟研究而言,目前较为成熟的研究手段主要集中在风洞试验模拟和计算机流体力学模拟两个方面,这两方面的相关文献资料也很多。风洞试验是基于相对原理和相似原理的试验模拟方法,可用于单体建筑及小区域群体建筑的外围风场的实验模拟,目前多用于室内及室内外互通的研究区域内的流体特征研究,以及城市街谷的自然通风环境研究,也多用于像桥梁等跨度建筑的风振效能监测与模拟中,但由于风洞试验相似原理的局限性及外边界条件的制约,在实际应用中也存在各种局限性,同时,风洞试验的试验费用相比计算机流体力学模拟要昂贵得多,这也是目前风洞试验较少被考虑的原因之一^[32]。而随着计算机软硬件及相关技术的发展,计算机模拟城市环境中自然通风也取得很大的突破。计算流体力学模拟的主要基础是质量守恒定律、动量守恒定律和能量守恒定律,由于其科学理论的相对严密性和模拟成本的低廉而广受欢迎,如 ANSYS、CFX、Fluent 等诸多计算流体力学模拟软件目前已广泛应用于单体建筑、群体建筑、地下建筑等的外围风场模拟

和内部空间的自然通风环境数字化模拟,同时可以用于温度、噪声等环境要素的模拟研究中^[33-36]。

21 世纪以来,国内外在基于计算流体力学模拟软件的空间流体特征的研究方面都取得了很大的进展,特别是在温度计算及模拟,噪声计算及模拟方面,都在时间尺度及空间尺度上取得了一定的成果,如交通沿线交通噪声的全天候影响范围及水平的计算机模拟及可视化,城市热岛效应的局地计算及模拟及可视化等^[37]。针对城市风场的计算流体力学模拟在建筑行业相对关注较多,目前很多国家也相继出台了高大建筑自然通风环境评估的具体措施与办法,计算流体力学由于其模拟可以先于实体建筑而存在,所以在高大建筑环境评估等方面优势非常明显。但由于计算流体力学所考虑的环境要素相对有限,以及视网格单元密集程度的计算量的增加,使得其目前多用于小区域环境自然通风的模拟尚且可行,目前还没有文献将其应用于整个城市的自然通风性能的模拟与计算中。

2.3 城市环境中自然通风应用研究进展

随着城市环境的急剧恶化及城市化进程的加快,城市发展过程中的环境问题研究及应用广受关注。而城市环境中的自然通风作为提升城市大气环境自净能力、缓解城市热岛,改善城市中心区空气质量的有效手段,目前也在国内的建筑设计及城市规划中出现了较多的应用案例^[38-39]。例如,地处英国莱斯特的德蒙特福德大学的女王建筑便是利用自然通风的经典建筑,德国斯图加特市城市风道规划则堪称城市尺度自然通风应用研究的典范之作^[40]。而我国的武汉市也规划通过五条区域性的城市风道为武汉市城区自然降温,以摘掉“四大火炉”的帽子,重庆市更是在全城区通过旧城改造等项目在城区九个地方塑造城市通风廊道,利用江风为主城区自然降温,而与此形成明显对比的是,据相关报道福州市则因为城市规划和建筑布局过程中对城市自然通风风道的忽视等,目前则跃居为全国最热的城市。

就目前国内外的城市环境中自然通风的应用研究而言,相比城市热岛的应用研究而言还相对比较滞后,主要原因在于前期针对城市整体的自然通风现状还没有形成较为完善的理论体系,更没有充分的数据储备为城市环境中的自然通风性能研究,自然通风潜能发挥等提供可供参考的依据。针对城市环境中的自然通风应用方面的相关文献也有逐步增多的趋势,如我国的刘姝宇等结合德国斯图加特市城市风道规划,为我国城市风道规划研究提出了一些建设性的意见,朱亚澜则在城市风道以城市为气候调节和污染治理等方面进行了详细论述,郑拴宁则依据上述研究结

论,结合三维城市模型(3DCM)提出了城市风道网络的概念,并对城市风道网络的构成体系进行了详细的分析研究,上述理论研究均为城市环境中的自然通风应用研究奠定了一定的理论基础。

3 总结与展望

城市环境中的自然通风研究是研究城市环境整体通风性能的主要手段,也是发掘城市环境自然通风潜能,提升城市大气环境自净能力,改善城市环境大气环境质量,缓解城市热岛效应等的强有力的生态手段。就国内外目前的研究现状,相比20世纪均取得了长足的进展,这主要源于相关技术手段的提升和软硬件产品的跟进,同时也是基于相关科研领域的科研推进。但是,随着城市发展水平的提升,城市环境问题日益突出,而与此同时,人们对城市环境的生活质量要求却越来越高,尽管国内外政府及科研机构针对城市环境问题,乃至城市环境中的自然通风都给予了很大的关注,但在以下三个方面,还需要进一步加强。

(1)城市环境中的自然通风监测方面:城市环境中的自然通风受到诸多环境要素的影响,同时也对诸多环境要素产生重要的影响,对城市尺度高时空分辨率的自然通风监测研究的意义重大,但目前还没有政府部门或研究机构开展长时间序列的高时空分辨率的相关检测研究。同时,随着无线传感技术的发展,相关监测数据的远距离无线实时传输也将为城市尺度的大范围自然通风监测带来便利。因此,如何利用最新支撑技术实现城市环境中自然通风的高时空分辨率的实时无线监测必将成为今后城市环境中自然通风监测的研究重点。

(2)城市环境中的自然通风模拟方面:基于质量守恒定律、动量守恒定律和能量守恒定律的计算机流体力学模拟由于其可以以低廉的投资获得比风洞试验更为详细的参数而广受流体研究学者的青睐,但是由于其整个计算的基石是全封闭的守恒方程组,所考虑的因素相对有限,其模拟结果的定量值并不能很好的和现场监测值进行拟合,而只是在趋势上的一致性,同时由于其计算量相对较大,更不能应用于城市尺度的环境中进行城市环境中自然通风的性能分析与研究。因此,如何在现有的软硬件条件下,实现城市尺度的自然通风量化模拟,以及和现场监测数据的对比分析研究则是需要进一步探索的研究方向。

(3)城市环境中的自然通风应用方面:无论是城市环境中自然通风的监测,还是模拟分析,最终的落脚点都是现实环境中的应用。目前针对城市环境中的自然通风的监测与模拟的研究进展及不足则在很大

程度上影响着城市环境中自然通风的相关应用,国内外目前的研究案例多受监测数据的时空分辨率较低等影响,在具体应用中的严谨性还远远不够。例如,欧洲科学计划项目URBVENT针对城市街谷的自然通风性能的研究最终只给出了关于城市街谷度量的几个简化的参数,我国武汉、重庆等城市的应用也还停留在定性研究的层面。因此,必须在后续的研究中加强对城市环境中自然通风的监测,分析及局地模拟研究,同时更要注意其与城市环境中其他环境要素,乃至人的感官之间的耦合关系,为城市环境中自然通风的相关应用拓展提供定量化的分析依据。

[参考文献]

- [1] 王汉青. 通风工程[M]. 北京:机械工业出版社,2007.
Wang Han-qing. Ventilation Works[M]. Beijing:China Machine Press,2007.(in Chinese)
- [2] 周淑珍. 城市气候学[M]. 北京:气象出版社,1994.
Zhou Shu-zhen. Urban Climatology[M]. Beijing:China Meteorological Press,1994.(in Chinese)
- [3] Cristian Ghiaus, Francis Allard. Natural Ventilation in Urban Environment:Assessment and Design[M]. London: Sterling, VA,2005.
- [4] 郑拴宁. 基于3DCM的城市通风性能分析与应用[D]. 湘潭:湖南科技大学,2010.
Zheng Shuan-ning. Analysis and Applications of the City's Ventilation Based on the 3DCM[D]. Xiangtan:Hunan University of Science and Technology,2010.(in Chinese)
- [5] Soraya Masmoudi, Said Mazouz. Relation of geometry, vegetation and thermal comfort around buildings in urban settings, the case of hot arid regions[J]. Energy and Buildings,2004,36:710-719.
- [6] 赵景柱,崔胜辉,颜昌宙,等. 中国可持续城市建设的理论思考[J]. 环境科学,2009,30(4):1244-1248.
Zhao Jing-zhu, Cui Sheng-hui, Yan Chang-zhou, et al. Theoretical thinking in sustainable city construction of China[J]. Chinese Journal Environmental Science,2009,30(4):1244-1248.
- [7] Jingzhu Zhao. Towards Sustainable Cities in China: Analysis and Assessment of Some Chinese Cities in 2008 [M]. New York: Dordrecht, Heidelberg, London:Springer,2011.
- [8] 彭荣强. 建筑物环境风场数值模拟[J]. 西华大学学报:自然科学版,2008,27(1):50-54.
Peng Rong-qiang. Numerical simulation of airflow field around buildings [J]. Journal of Xihua University:Natural Science Edition,2008,27(1):50-54.(in Chinese)
- [9] 张伯寅,桑建国,吴国昌. 建筑群环境风场的特性及模拟:风环境模拟研究之一[J]. 力学与实践,2004,26(3):1-9.
Zhang Bo-yin, Sang Jian-guo, Wu Guo-chang. Application of aerodynamics in the architectural wind environment:

- simulation studies of wind environment I[J]. *Mechanics and Engineering* 2004 26(3) :1-9.(in Chinese)
- [10] Birgit Krausse , Malcolm Cook , Kevin Lomas. Environmental performance of a naturally ventilated city centre library[J]. *Energy and Buildings* ,2007 , 39 :792-801.
- [11] Jens Pfafferott , Sebastian Herkel , Martina Jäschke. Design of passive cooling by night ventilation evaluation of a parametric model and building simulation with measurements [J]. *Energy and Buildings* 2003 35 :1129-1143.
- [12] G T Johnson , L J Hunter. Some insights into typical urban canyon airflows [J]. *Atmospheric Environment* , 1999 , 33 : 3991-3999.
- [13] 李朝奎,郑拴宁,赵会兵,等. 基于 3DCM 的中尺度地面风场的空间分析研究[J]. *地理信息世界* ,2009 , 3 :55-59.
Li Chao-kui , Zheng Shuan-ning , Zhao Hui-bing , et al. The spatial quantitative analysis of wind environment in medium size unit based on 3DCM[J]. *Geomatics World* 2009 , 3 :55-59.(in Chinese)
- [14] Katerina Niachou , Samuel Hassid , Mat Santamouris , et al. Experimental performance investigation of natural , mechanical and hybrid ventilation in urban environment[J]. *Building and Environment* 2008 43 :1373-1382.
- [15] 马剑,陈水福,王海根. 不同布局高层建筑群的风环境状况评价[J]. *环境科学与技术* ,2006 , 30(6) :57-61.
Ma Jian , Chen Shui-fu , Wang Hai-gen. Wind environment evaluation for tall building complexes with various plan arrangements [J]. *Environmental Science & Technology* , 2006 , 30(6) :57-61.(in Chinese)
- [16] M Kolokotroni , I Giannitsaris , R Watkins. The effect of the London urban heat island on building summer cooling demand and night ventilation strategies [J]. *Solar Energy* , 2006 , 80 :383-392.
- [17] 冯金辉,严涛,陈彦云,等. 树木的整体性运动及树内部风场的研究[J]. *软件学报* 2000 ,11(3) :363-367.
Feng Jin-hui , Yan Tao , Chen Yan-yun , et al. Research on whole trees movement and trees inner wind field[J]. *Journal of Software* 2000 ,11(3) :363-367.(in Chinese)
- [18] Xie Xiao-min , Huang Zhen , Wang Jia-song. The impact of urban street layout on local atmospheric environment[J]. *Building and Environment* 2006 41 :1352-1363.
- [19] Nicol J F, Wilson M P. The effect of street dimensions and traffic density on the noise level and natural ventilation potential in urban canyons [J]. *Energy and Buildings* ,2004 , 36(5) :423-434.
- [20] Pasquay T. Natural ventilation in high-rise buildings with double facades , saving or waste of energy[J]. *Energy and Buildings* ,2004 , 36(4) :381-390.
- [21] 刘小明. 浅谈外循环通风双层幕墙的设计[J]. *安徽建筑* ,2008 (1) :33-34.
Liu Xiao-ming. On the design of the exterior double ventilating curtain wall[J]. *Anhui Architecture* 2008(1) :33-34.(in Chinese)
- [22] Prashant Kumar , Paul Fennell , Rex Britter. Effect of wind direction and speed on the dispersion of nucleation and accumulation mode particles in an urban street canyon [J]. *Science of the Total Environment* 2008 402 :82-94.
- [23] Panagiota Karava , Ted Stathopoulos , Andreas K Athienitis. Wind-induced natural ventilation analysis[J]. *Solar Energy* , 2007 81 :20-30.
- [24] Andy T Chan , Michael W Chung. Indoor-outdoor air quality relationships in vehicle effect of driving environment and ventilation modes [J]. *Atmospheric Environment* ,2003 , 37 :3795-3808.
- [25] 吴兑,邓雪娇. 环境气象学与特种气象预报[M]. 北京 :气象出版社,2007.
Wu Dui , Deng Xue-jiao. *Environmental Meteorology and Special Meteorological Forecasts* [M]. Beijing China Meteorological Press 2007.(in Chinese)
- [26] Naghman Khan , Yuehong Su , Saffa B Riffat. A review on wind driven ventilation techniques [J]. *Energy and Buildings* 2008 40 :1586-1604.
- [27] Nkemdirim , Lawrence C. The Role of Wind Velocity and Mixing Depth in the Distribution of Urban Air Pollution Hazard in Calgary[M]. Alberta ,Canada.
- [28] 刘罡,孙鉴宁,蒋维楣,等. 城市大气边界层的综合观测研究 :实验介绍与近地层微气象特征分析[J]. *中国科学技术大学学报* ,2009 , 39(1) :23-32.
Liu Gang , Sun Jian-ning , Jiang Wei-mei , et al. Comprehensive observation on urban atmospheric boundary layer : Description of field experiment and analysis of micro-meteorological properties in the surface layer[J]. *Journal of University of Science and Technology of China* 2009 39 (1) :23-32.(in Chinese)
- [29] Auro C Almeida , Joe J Landsberg. Evaluating methods of estimating global radiation and vapor pressure deficit using a dense network of automatic weather stations in coastal Brazil [J]. *Agricultural and Forest Meteorology* 2003 118 :237-250.
- [30] Mahmoud Bady , Shinsuke Kato , Takeo Takahashi , et al. Experimental investigations of the indoor natural ventilation for different building configurations and incidences [J]. *Building and Environment* 2011 46 :65-74.
- [31] 王桂玲,蒋维楣. 复杂地形上的低层风场特征[J]. *解放军理工大学学报:自然科学版* ,2006 , 7(5) :491-495.
Wang Gui-ling , Jiang Wei-mei. Characteristics of wind field in low layer over complex terrain[J]. *Journal of PLA University of Science and Technology:Natural Science Edition* ,2006 , 7(5) :491-495.(in Chinese)
- [32] Zhen Bu , Shinsuke Kato , Takeo Takahashi. Wind tunnel experiments on wind-induced natural ventilation rate in residential basements with areaway space [J]. *Building and Environment* 2010 45 :2263-2272.

(下转第 194 页)

- ence, 2010, 38(25) :13963-13965.(in Chinese)
- [19] 王博, 夏敦胜, 余晔, 等. 兰州市城区河道表层沉积物磁性特征研究[J]. 环境科学, 2010, 31(8) :1740-1748.
Wang Bo, Xia Dun-sheng, Yu Ye, et al. Magnetic characters of river sediment of urban area in Lanzhou[J]. Environmental Science, 2010, 31(8) :1740-1748.(in Chinese)
- [20] 王博, 赵爽, 夏敦胜, 等. 兰州市城区河道表层沉积物重金属污染及磁学参数相关关系研究[J]. 环境科学, 2011, 32(5) :1430-1440.
Wang Bo, Zhao Shuang, Xia Dun-sheng, et al. Characteristics of heavy metal elements and their relationship with magnetic properties of river sediment from urban area in Lanzhou[J]. Environmental Science, 2011, 32(5) :1403-1440.(in Chinese)
- [21] 郑艳, 李德生. 黄河兰州段水污染现状分析及防治[J]. 环境科学与管理, 2007, 32(1) :191-196.
Zheng Yan, Li De-sheng. Analysis of water pollution along Lanzhou reaches of Yellow River and its prevention[J]. Environmental Science and Management, 2007, 32(1) :191-196.(in Chinese)
- [22] 李鸿威, 戴霜, 张楠. 黄河兰州段、白银段重金属污染的磁学指标初探[J]. 环境污染与防治, 2009, 31(2) :51-55.
Li Hong-wei, Dai Shuang, Zhang Nan. Feasibility study of using magnetic parameters as indicator of heavy metals in water and sediment of Yellow River in Lanzhou and Baiyin [J]. Environmental Pollution and Control, 2009, 31(2) :51-55.(in Chinese)
- [23] 袁大刚, 张甘霖. 城市道路区土壤的磁学性质及其发生学意义[J]. 土壤学报, 2008, 45(2) :216-221.
Yuan Da-gang, Zhang Gan-lin. Magnetic properties of urban subgrade soil and their pedogenetic implications[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(2) :216-221.(in Chinese)
- [24] 张卫国, 俞立中, 许羽, 等. 沉积物磁性测量对铁还原的指示及其在重金属污染研究中的应用[J]. 科学通报, 1998, 43(19) :37-43.
Zhang Wei-guo, Yu Li-zhong, Xu Yu, et al. Iron reduction in tidal flat sediment indicated by magnetic measurements and its significance in the study of heavy metal pollution[J]. Chinese Science Bulletin, 1998, 43(19) :37-43.(in Chinese)
- [25] 段雪梅, 沈明洁, 胡守云, 等. 首钢工业区土壤剖面重金属含量及其结合态的磁指示作用的研究[J]. 地球物理进展, 2008, 23(1) :225-232.
Duan Xue-mei, Shen Ming-jie, Hu Shou-yun, et al. Magnetic properties as a proxy for contents and forms of heavy metal: Case study on a core from Shougang industrial areas[J]. Progress in Geophysics, 2008, 23(1) :225-232.(in Chinese)
- [26] Heller F, Strzyszc Z, Magiera T. Magnetic record of industrial pollution in forest soils of Upper Silesia, Poland[J]. Journal of Geophysical Research, 1998, 103(B8) :17767-17747.
- [27] Bitukova L, Scholger R, Birke M. Magnetic susceptibility as indicator of environmental pollution of soils in Tallinn[J]. Physics and Chemistry of the Earth A, 1999, 24(9) :829-835.
- [28] Williams T M. A sedimentary record of the deposition heavy metals and magnetic oxides in the Loch Dee basin, Galloway, Scotland[J]. The Holocene, 1991, 1(2) :142-150.
- [29] 夏敦胜, 余晔, 马剑英, 等. 兰州市街道尘埃磁学特征及其环境意义[J]. 环境科学, 2007, 28(5) :937-944.
Xia Dun-sheng, Yu Ye, Ma Jian-ying, et al. Magnetic characteristics of street dust in Lanzhou and its environmental significance[J]. Environmental Science, 2007, 28(5) :937-944.(in Chinese)

(上接第 92 页)

- [33] Gang Tan, Leon R, Glicksman. Application of integrating multi-zone model with CFD simulation to natural ventilation prediction[J]. Energy and Buildings, 2005, 37 :1049-1057.
- [34] Yuan Feng-Dong, You Shi-Jun. CFD simulation and optimization of the ventilation for subway side-platform [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2007, 22 :474-482.
- [35] 于凤全. 建筑物风环境 CFD 模拟方法综述[J]. 茂名学院学报, 2010, 20(1) :72-75.
Yu Feng-quan. The summary of CFD simulation methods for architecture wind environment[J]. Journal of Maoming College, 2010, 20(1) :72-75.(in Chinese)
- [36] 齐静, 李新, 张伟捷. 基于 CFD 的小区风热环境评价[J]. 住宅产业, 2010, 2 :104-106.
Qi Jing, Li Xin, Zhang Wei-jie. Wind-heat environment assessment in residential community based on CFD [J]. Housing Industry, 2010, 2 :104-106.(in Chinese)
- [37] Blocken B, Defraeye T, Derome D, et al. High-resolution CFD simulations for forced convective heat transfer coefficients at the facade of a low-rise building[J]. Building and Environment, 2009, 44 :2396-2412.
- [38] Birgit Krausse, Malcolm Cook, Kevin Lomas. Environmental performance of a naturally ventilated city centre library [J]. Energy and Buildings, 2007, 39 :792-801.
- [39] 朱亚澜, 余莉莉, 丁绍刚. 城市通风道在改善城市环境中的运用[J]. 城市发展研究, 2008, 15(1) :46-49.
Zhu Ya-lan, Yu Li-li, Ding Shao-gang. The application of urban ventilation channel for urban environment improvement[J]. Urban Studies, 2008, 15(1) :46-49.(in Chinese)
- [40] 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[J]. 浙江大学学报:工学版, 2010, 44(10) :1985-1991.
Liu Shu-yu, Shen Ji-huang. Urban ventilation channel planning method based on local circulation: A case study of Stuttgart, Germany[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2010, 44(10) :1985-1991.(in Chinese)