

城市精细天气预报的理论与技术研究进展

孙继松

(北京市气象台, 北京 100089)

摘要: 对最近二十多年, 城市中尺度天气学和精细预报技术研究进展进行了回顾, 包括以下几个方面: (1) 城市环流对中尺度降水系统的影响研究; (2) 城市环流与地形相互作用的物理过程及其对中尺度系统的影响过程研究; (3) 城市环流与海(湖)风环流的相互作用对中尺度天气系统的影响过程研究; (4) 城市或城市群对大雾形成与分布的影响研究。最后, 对未来城市精细天气预报技术的发展方向进行了展望, 认为针对特大城市典型的中尺度天气系统开展精细化观测研究, 并将研究成果应用于中尺度模式物理过程的改进之中, 进一步完善城市冠层模式, 可能是提高城市精细化预报能力的主要有效手段。

关键词: 城市, 中尺度天气学, 精细天气预报

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2014.01.002

The Essential Theory and Technology on Accurate Urban Weather Forecast

Sun Jisong

(Beijing Meteorological Observatory, Beijing 100089)

Abstract: This paper reviews the advances in urban meso-scale synoptic meteorology and accurate urban weather forecast technology in the last two decades. It embodies following aspects: (1) The researches on influence of urban circulation on meso-scale precipitation system; (2) The advances in physical process of interaction between urban circulation and topography, and influence of the interaction on meso-scale synoptic system; (3) The progress in the interaction between urban circulation and sea-land breeze, and its effect on meso-scale synoptic system; (4) The investigation on distribution and development of a big fog caused by urban or urban-group effect. Finally, the paper indicates the direction on accurate urban weather forecast technology, and figures that it is possibly an effectual technique to enhance the capability of accurate urban weather forecast so as to carry out an accurate observation research on typical metropolis. By using the above achievements, we may promote the physical process of meso-scale numerical mode and improve urban canopy mode (UCM).

Keywords: urban, meso-scale synoptic meteorology, accurate forecast

1 引言

根据联合国人口司发布的《世界城市化展望》(2006年修正版), 预计世界城市人口在2030年达到49亿, 即60%的全球人口将居住在城市地区。城市特别是特大型城市一般是所在区域的政治、经济、文化和消费中心, 同时也是交通运输、工业生产的主要基地和商品流通集散地。因此, 城市单位面积上的经济当量、人口密度是其他区域无法比拟的, 相同程度的气象灾害发生在城市时, 所造成的生命财产损失、社会关注度往往是巨大的。从另一角度来看, 由于城

市下垫面的绝大部分被非透水性物理介质(如水泥、沥青等)所覆盖, 高度起伏的大面积建筑物、坡度不一的立体路面交通网以及人为地表坡度, 为地表径流的快速汇流提供了条件, 当强降水发生时, 低洼路段不仅成为城市交通网的“栓塞”, 造成大面积交通瘫痪, 而且已经直接威胁到居住或途径低洼地区市民的生命安全。近几年来, 无论是沿海的上海、天津, 还是内陆的北京、武汉、西安、济南、重庆、郑州、乌鲁木齐等绝大多数大型城市中心区, 几乎都发生过不同程度的局部内涝, 造成交通严重受阻、甚至巨大的人员伤亡。另外, 城市高耸的建筑进一步加大了雷电灾害对生命的威胁, 高大建筑之间的狭管效应也直接加重了风灾的危害, 极易造成高空物件坠落, 临时建筑、广告牌、绿化树木等倒塌造成人员伤亡事件也屡见不鲜。另一方面, 城市对电、水、燃气等资源的过度集中使用, 当突然遭遇高温热浪、寒流等气象灾害

收稿日期: 2013年6月3日; 修回日期: 2013年9月9日

作者: 孙继松(1965—), Email: sunjs_0314@sina.com

资助信息: 北京市科技计划项目“极端天气事件对城市安全运行的影响评估系统研究”; 中国气象局“全国强对流预报创新团队”项目

袭击时，往往造成这些管网不堪重负而发生崩溃。最近几年，先后发生在欧洲大陆、美国等地的高温热浪引发的城市大面积停电事故，不仅造成了城市生活的无序状态，而且造成了大量的城市人口死亡。从这一角度讲，看似坚固的城市，在气象灾害面前显得更加脆弱。从服务需求来看，具有重大国际影响的政治、经济、体育、文化等大型活动一般都在中心城市举行，常规天气预报服务的技术方法和科学支撑能力几乎无法满足这些活动对气象保障的精细化要求，正是由于城市气象服务的特殊需求，催生了城市中尺度天气动力学的兴起和发展。

从城市气象学的发展进程来看，气象学家们首先注意到的是城市或城市群的崛起对局地气候的影响，提出了城市气候的概念，并开展了一系列的气候学研究，特别是在城市能量平衡（urban energy balance）、城市热岛效应（Urban Heat Island Effect）、城市大气边界层结构（structure of urban boundary-layer）^[1-10]等方面取得了大量的研究成果。一直到现在，城市气候学研究依然是气候学中最活跃的分支之一。随着全球气候变化研究不断深入，气象学家们逐渐意识到世界城市化进程对全球气候变化的可能影响，特别是最近几十年全球气候变暖并非像以前认为的整个对流层都在迅速升温，而可能只出现在近地面非常薄的一层大气中^[11]。一些气象学家认为，气候变暖在很大程度上可能受到了城市热岛效应的影响，而且在很多情况下，对一些大城市热岛效应的估计可能偏低^[12]；如果城市一直处于一种平稳发展的过程，评估热岛效应的影响可能容易一些，但是一些新兴的工业化国家（如中国、印度等）的迅速崛起，城市的快速扩张和区域城市群的出现，使得城市热岛效应对区域气温的影响评估变得非常困难，造成了全球气候变暖研究中的最大不确定性因素^[13]，而城市气候的形成，实质上是城市中小尺度大气环流的一种长时间平均态。最近几年来，大城市天气灾害所造成的损失和社会反响日益突显，例如，2001年12月7日发生在北京地区一次小雪天气而衍生的“城市雪灾”；2004年7月10日北京城区的短时暴雨造成的交通受阻，同年发生在上海的局地强风暴过程；2007年发生在济南、乌鲁木齐、重庆、郑州等地的特大暴雨等中尺度灾害天气造成了巨大人员伤亡；最近几年，西安、广州、深圳、香港、太原、天津、武汉等几乎所有的大城市都曾先后出现过局地强对流暴雨灾害，造成了巨大的经济损失，造成了极大的社会影响。

从本质上讲，城市中尺度天气动力学的核心问题是通过城市边界层与自由大气之间相互作用而造

成发生在城市及其周边地区特有的中小尺度天气现象及其物理机制进行系统性研究，进而形成精细预报技术。随着中尺度天气动力学的发展和数值天气预报技术的进步，针对城市特定环境下的中尺度天气系统的发生、发展和演变机理等方面的研究受到了广泛关注，在一定程度上提高了城市天气预报服务的精细化程度。但是，应该看到，横亘在气象工作者面临的诸多科学问题和预报技术难题仍然艰巨。本文旨在对近几年来有关城市中尺度天气动力学研究，特别是城市中尺度气象灾害动力学、预报技术方面的研究进展进行梳理，并就未来城市天气动力学的发展方向和城市天气预报技术需要解决的科学技术问题进行简单的探讨。

2 城市中尺度天气系统的特殊性

针对城市的中尺度天气系统及其预报技术的研究虽然只是中尺度天气动力学研究中的一个分支，但是相较广义上的中尺度天气动力学或中尺度天气学而言，又具有明显的特殊性。这种特殊性主要体现在四个方面。

(1) 特定的城市尺度。城市，即便是特大型中心城市，其水平空间尺度一般都不大于 α 中尺度，市区面积更小。例如，北京的辖区面积约为 1.68km^2 ，中心城区面积只有约为 $60\text{km} \times 60\text{km}$ （以六环路为界）。但是在夏季，在很多城市经常可以观测到一个或多个水平尺度比城区面积小得多的强对流系统，在城区或郊区造成严重的雷暴、暴雨灾害；在冬季，许多降雪天气过程也只出现在局部地区。因此，就城市灾害天气研究和预报而言，关注的主要对象是天气尺度或 α 中尺度背景下的 β 、 γ 中尺度系统的演变及其相互作用过程。

(2) 特定的地理环境。大多数城市要么依山而建，要么面水而立（例如大型湖泊、江河、海洋等）。地形对各种尺度天气系统的影响程度、影响方式，一直以来是气象学界的前沿课题之一，地形环流（山谷风环流）与城市环流（热岛环流）的相互作用过程对中尺度天气系统发生发展的影响进一步增加气象学家对城市中尺度天气系统形成机理的认识难度；海陆风、湖陆风的变化与城市大气的相互作用过程也是造成城市中尺度天气系统演变的重要原因。

(3) 特定的人为环境。城市是受人类活动影响最剧烈的区域，城市大气要素的变化幅度和速率都是其他区域无法比拟的。城市气候学更多地关注这些要素的长期影响，而城市中尺度天气动力学在于如何科学地描述它们的短期甚至短时变化：不同天气背景

下,起伏巨大的建筑造成了边界层流场的不同变化;下垫面物理属性的变化和人为热源形成了城市热岛,城市热岛的季节变化、剧烈的日变化及其强度、中心位置的非定常性改变了边界层内热力层结的垂直变化和水平分布,必然强迫流场、气压场、湿度场等发生相应的调整,这种调整过程本身就可能诱发中尺度天气系统的发生;气溶胶浓度存在的剧烈短期变化直接造成了城市上空凝结核数量的激烈变化,也可能是降水非均匀性变化的原因等。很显然,这些环境要素的短期变化与分布差异将直接影响中尺度天气系统的演变进程与高影响天气的落区变化。

(4)城市环流对上下游天气的影响。城市中尺度天气动力学需要解释天气系统在城市环流的影响下,天气系统内部发生的一系列调整过程。而城市环流的强迫作用造成城市上下游发生的特有的中小尺度天气系统生消过程则是城市天气精细预报不得不面对的另一个课题。已经有研究^[14]表明,以特大型城市为中心的都市群的崛起,不仅改变了城市的局地环流,而且很可能已经或者正在影响更大尺度范围内天气系统的演变。

针对城市中尺度天气系统的上述特殊性的认识,不仅是建立和完善城市天气精细化预报技术的科学基础,而且是推动中尺度天气动力学进步的关键环节。如果我们能够将不同天气背景、不同地理特征和不同人为环境下的 β 中尺度、 γ 中尺度系统的演变机制进行科学、完整的数学物理描述,那么,阻碍中尺度数值模式发展进步的主要物理过程问题将迎刃而解。

3 城市中尺度降水系统研究

气象学家首先把城市或城市群作为一个整体,研究它对天气系统的影响。最先受到气象学家关注的是:降水、雷暴活动在城市下风方向有明显增多、增强现象。1971年,Changnon等人^[15]的统计研究就表明:城区及其下风方的年降水量比周围农村地区高出10%~17%,其中雷暴的增加可达到21%。蒙伟光等^[16]最近进行的数值模拟表明,发生在珠江三角洲地区的雷暴发展和演变过程与这一地区的城市化发展有密切关系:与城市影响有关的低层辐合主要位于500m以下的近地面层,形成于上风方的雷暴在城市下风方明显增强。黎伟标等^[17]利用TRMM卫星资料的研究结果也表明,发生在珠三角都市群的降水与比邻海区的降水存在明显的不同,前者以对流性降水为主,后者以稳定性降水为主。

关于城市及其下风方降水增加的原因,可能和环境气流与城市热岛效应、城市大气污染相互作用,以及高层建筑导致机械湍流增强有关。孙继松等^[18]就城

市化过程对北京地区冬夏季中尺度降水分布的影响进行了研究,结果表明,在北京城区南北两侧,冬季和夏季的降水日数、降水量的相对变化趋势明显不同:相对区域平均而言,在城区及南部近郊区,冬季降水日数和降水量都在明显增加;夏季,城区北侧的降水日数呈加速增长趋势,尽管南部平原郊区的相对降水日数变化不大,但降水量在相对减少,并指出,这种现象可能是城市热岛与盛行风流场相互作用的结果。Rosenfeld^[19]则认为,城市及下游方向降雨、降雪量的增加不仅与城市化进程有关,而且与城市空气污染程度和扩散方向有关。

随着城市极端天气事件的频繁发生,发生在城市中心区的中尺度灾害天气系统的形成机理和演变过程受到了越来越多的关注。城市地表加热的非均匀性是城市中尺度系统发生、发展的根本原因之一。Thielen等^[20]的数值研究表明,城市地表的感热通量、特别是降水发生之前4小时内的感热通量变化对 γ 中尺度的对流降水有重要影响;孙继松等^[21]的研究结果认为:在夏季,城市热岛可能直接对一些雷暴起到强迫和组织作用,晴空背景下,中午前后,开始出现郊区气流向中心城区辐合的现象,这种热力强迫有利于形成城市中尺度的低空风场辐合线,它的存在不仅可能触发局地对流单体,而且对多单体起到了组织作用,同时城区与郊区的这种热力差异,还可能造成边界层内中心城区风场垂直切变加强,即市区边界层顶气流加速;而在郊区,表现为边界层下部的风速加大,这种强迫有利于降水中心区强烈的上升运动维持,保证了低空水汽在较大范围内向对流体中流入,维持对流降水的持续(图1)。在冬季,同样存在城市热岛对流场的强迫作用:桑建国等^[22]发现,由于热岛效应的存在,容易形成一个以市区为中心的低压系统以及指向市中心的气压梯度力,造成气流在边界层内辐合,抬升的热羽在边界层上部辐散流出。实质上,由于城市热岛环流存在斜压性特征,在平坦地形条件下,由于城市

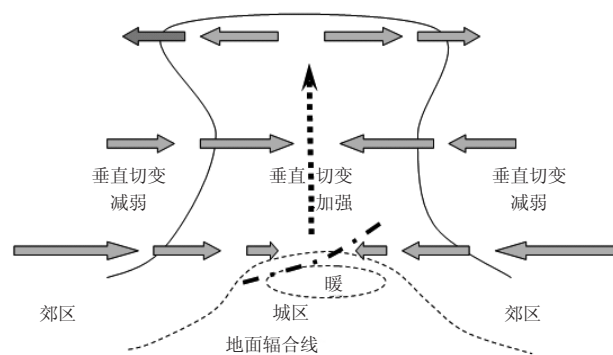


图1 城市热岛效应诱发对流性降水的动力学结构示意图^[21]

热岛的中心位于城区以及偏下风方向，造成城市中心上游地区，低层气流辐散、上层辐合，而市中心下游低层气流辐合、上层辐散，组成一个穿过城区的低空闭合环流。

4 城市环流与山地环流、水陆环流相互作用及其对中尺度天气系统的影响

大多数大城市都依山傍水，或背靠山区，或面向大面积水体（海洋、湖泊、江河），使得城市大气环流与自然环境形成的局地环流系统之间形成了复杂的相互作用关系，这种相互作用对城市及其周边地区的中尺度天气过程产生了明显影响。

4.1 城市环流与山地环流之间的相互作用

研究表明，在不同天气尺度背景下，城市环流与山地环流之间的相互作用过程对中尺度天气系统的影响呈现出多样性特征。齐琳琳等^[23]研究了上海周边地形、城市暖干性效应及城市阻滞作用对2001年8月一次特大暴雨的影响程度，结果表明：地形影响了暴雨系统的移动、停滞、发展和加强，城市化地表特征造成暴雨系统内部中尺度动力、热力结构特征出现明显变化。孙继松^[24]研究证实，在不考虑平流垂直分布差异的背景下，如果没有降水发生，局地边界层内的垂直风切变的强弱主要是由边界层水平温度梯度方向、强弱变化决定的。在晴空背景下，郊区的加热率和冷却率大于城市，如果郊区为山区，郊区与城区之间的加热率/冷却率差异更大，昼夜间城区与郊区之间容易形成更强的水平温度梯度，其方向在白天由山坡指向城区、午夜则由城区指向山坡。当夜间的这种温度梯度足够强时，中尺度边界层急流就会出现，白天则相反。因此，夜间更有利于边界层急流的形成，白天边界层急流趋于消失。中尺度边界层急流的出现不仅为边界层与对流层之间的热量、动量和水汽交换起到了重要作用，而且为某些对流活动的启动提供了动力强迫源^[25]。在存在局地强降水的背景下，边界层急流与局地降水之间还可能形成明显的正反馈，造成城市下游 β 中尺度的暴雨中心的出现^[24]。

城市热岛环流与地形热力环流之间的相互作用还有可能对局地中尺度对流系统的强度、性质产生影响。有研究^[26]表明，在弱下沉气流大尺度背景下，在中午前后，地形与平原之间容易形成很强的、由山坡指向平原的温度梯度，如果平原地区下游是城区，由于城区的温度高于郊区，因此城区与山区之间的平原地区就有可能出现一个“冷楔”。近地面层的“冷楔”不仅削弱了对流层低层的热力不稳定，而且“冷楔”形成了边界层内的辐散气流，它们对来自于上游地区（山区）的强对流单体都起到了减弱作用，使得

山坡上形成的冰雹云下山后对流高度降低，对流活动减弱，降水性质由冰雹转为降雨。当对流系统随环境风场移到城区时，在城市热岛的作用下，对流可能再次被加强。

孙继松等^[27]最近讨论了地形与城市热岛共同作用下的 β 中尺度暴雨的一系列理论特征，并利用北京地区稠密的地面观测资料以及分布于距离暴雨中心区不同距离的风廓线仪观测资料进行了证实：由于城市与山区之间的温度梯度量级不同，引发对流性 β 中尺度暴雨的垂直切变的响应时间差异较大，一般从十几分钟到几个小时不等；地形坡度的大小对中尺度暴雨系统的水平尺度起到了决定性影响；一般情况下，地形与城市热力过程相互作用造成的中尺度暴雨多发于傍晚前后或凌晨前后。地形与城市热岛效应造成的局地对流性暴雨的物理概念模型如图2。

城市热岛效应与地形相互作用形成山前暴雨的物理机制如下。

(1) 由于山体阻滞了城市热岛的水平扩散效应，在山前地区形成了最强的水平温度梯度。水平温度梯度不仅造成山坡下滑冷气流与城市暖空气流出气流之间形成了山前水平辐合气流，形成抬升运动，而且强的水平温度梯度将强迫风的垂直切变增强，形成边界层顶的气流加强，出现边界层急流的雏形；边界层急流的高度一般低于山体的高度^[24]。

(2) 山前水平辐合气流形成的抬升运动、吹向山体的边界层急流形成的强迫抬升运动，在垂直风切变环境中，触发对流发生。

(3) 初生对流形成降水后，地面气温迅速下降，造成山前与城区间的水平温度梯度进一步加强，边界层急流加速，抬升运动也在加速，造成山前对流进一步加强，形成了温度梯度与对流强度之间的正反馈过程，山前对流不断发展且位置少动，形成暴雨甚至特大暴雨。

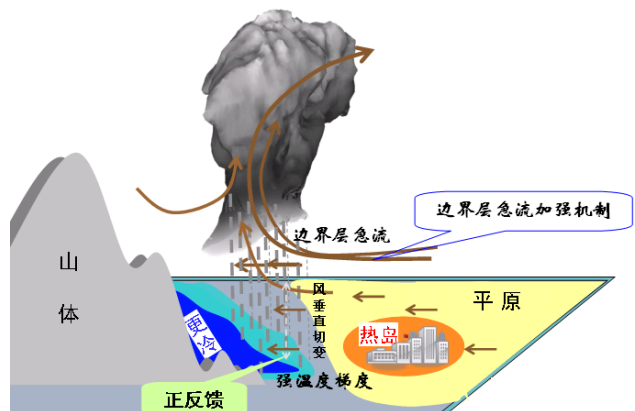


图2 城市热岛效应与地形相互作用形成山前暴雨的物理机制

4.2 城市环流与水陆环流的相互作用

与地形环流和城市环流相互作用一样，对于海（湖）滨城市来说，海（湖）陆风环流与城市环流的相互作用，往往会影响到中尺度对流系统的演变。海风与环境风场相互作用可以产生低空辐合线，形成海风锋，触发不稳定能量释放而形成中尺度局地强对流，因此对于海滨城市来说，研究海陆风环流与城市环流之间相互作用问题显得尤为重要。这种相互作用表现在两个方面，即海陆风对城市热岛的影响和城市对局地海陆风环流的影响。

Wu等^[28]对青岛海陆风的研究表明，由于胶州湾、崂山和浮山的存在，青岛近海岸存在多支海陆风，风场复杂多变，低空风场在地形作用下，在山前（城区一侧）产生爬坡运动，在山后产生背风波，这两种波动产生的波动能量都可以上传到4km以上。这一高度足以触发对流层中层存在的对流不稳定能量，产生局地强降水天气过程。张立风等^[29]和王卫国等^[30]的数值试验表明，在没有地形影响时，海风的强度减弱、向陆地伸展的范围减小，陆风也会减弱。海陆风强度与地形的这种关系可能主要是由于地形的热力作用造成的：与平原相较而言，当有地形存在时，陆地气温在白天上升和夜间下降都更快，造成海陆气温梯度加大。苗曼倩等^[31]和张雷鸣等^[32]的数值试验表明：在白天，东海海风和太湖风环流与上海城市群的热岛效应存在正反馈现象；而在夜间，陆风环流趋于减弱，出现了海陆温差减小的现象——由于海温日变化很小，局地海陆温差减小实质上表现为城乡之间的温差加大，即夜间的城市热岛效应被强化。

城市环流与海陆风环流之间存在的这些相互作用关系，对城市及其周边地区的降水分布产生了明显的影响。梁钊明等^[33,34]的数值试验表明：（1）城市下垫面较大的向上感热通量和较小的向上水汽通量以及高粗糙度对冷湿海风有削弱作用，造成城市区域与郊区相比而言，低层大气形成较高的温度和较低的湿度。另外，城市热岛环流和海风环流的共同作用使得海风在城市上空有所抬升，从而使得海风对低层大气降温和增湿的垂直范围扩大。（2）中心城区的高粗糙度对海风风速有明显削弱作用，因此海风锋在城区往内陆推进距离稍减，低层辐合和上升运动减弱。海风与热岛环流相互作用对层结不稳定造成的影响如图3：与郊区相比，城区内的自由对流高度和平衡高度都有所降低，因此，在海风作用下的城区内，对流有效位能（CAPE）比没有城市影响的海岸地区要小。另一

方面，城市粗糙度进一步削弱了海风的辐合作用，因此，相对郊区而言，城市并不利于海风环流触发的对流发展。但是，相对于没有海风影响的地区而言，海滨地区的对流有效位能都有明显增加，其中起主导作用的因子是海风带来的水汽影响。

4.3 城市群的发展对大雾分布的影响

城市或城市群的发展对大雾分布的影响日益显现。最近，我们的研究表明^①，城区大雾日数的相对减少和轻雾或霾的相对增加，除了空气污染的因素以外，城市环流的热动力学过程起到了重要作用：增强的城市热岛效应，减小了城区的昼夜温差，增加暖湿空气冷却凝结饱和的难度；另一方面，热岛效应导致的热力差异会在城市和郊区几十千米的范围形成次级环流圈，该次级环流圈能够有效阻止低层水汽进入城区，减小了大雾形成的概率；城市膨胀的速度越快，年平均雾日减少也越快。

城市的发展是一个动态过程，利用京津冀地区所有站点（98个人工观测站）每10年平均雾日与同期18个基本代表站的每10年平均雾日插值到同一网格再相减，得到的京津冀地区最近20年中每10年平均雾日分布图，这样可以过滤掉气候波动变化和地形对大雾分布的影响，结果表明：1989—2008年，北京、天津均进入城市化发展的高峰期，北京、天津城区的大雾日数减少速度明显加快，且相对减少区域已经连成一片，并不断向城市南北两面扩展，大雾日数相对增多的区域主要集中在紧邻北京南部的河北地区及北京、天津以北的河北地区。这是由于城市范围逐渐扩大，

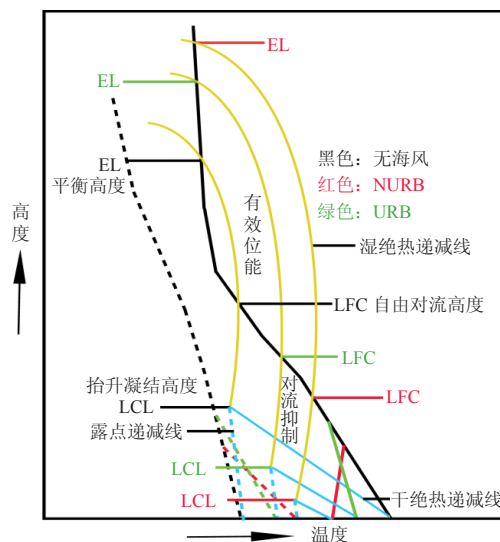


图3 海风穿过城区和郊区造成大气层结不稳定变化的示意图^[34]

① 引自“国家科技支撑计划项目：城市群高影响天气的特征和成因分析（2008BAC37B01）”技术报告，pp:50-64

城市热岛的范围也逐渐扩大，热岛环流圈的半径向南扩展，致使大雾易发区域南移。从40年来的变化趋势发现，京津城市群大雾减少的范围在逐步扩大，而南北两侧大雾发生频率相对增加的趋势在逐渐加强，说明由于城市化的发展，京津冀地区大雾发生频率及范围背离气候态特征越来越强，即极端事件发生的概率也在逐渐增强。

5 城市精细天气预报面临的科学技术问题

城市天气的客观精细预报技术的进步，在一定程度上取决于中尺度数值模式能力的提高幅度，而中尺度模式是否能够科学地描述一系列表征城市特征的边界层与天气系统的相互作用过程，将直接影响到预报员对中尺度模式产品的评价和应用。

近几年来，应用中尺度模式或云模式对城市效应引起的中尺度对流系统的演变开展了一系列数值模拟研究工作^[35-40]。概括而言，模式研究方法主要有两种：一种是通过改变模式现有过程中有关城区的反射率、粗糙度、土壤热力性质和蒸发率等来反映城市热动力学作用。这种办法比较简单，仅仅是改变了模式陆面过程中有关城市土地类型的相关参数。尽管如此，在研究城市化与对流发展的关系上，还是取得了一些令人鼓舞的成果，说明了城市陆面过程对局地对流的形成和发展产生了显著影响。另一种方法是，在中尺度数值模式中耦合城市冠层模式和城市陆面模式，不仅考虑城市建筑、道路的几何分布对热量和机械湍流的影响，还描述了城市冠层截取的辐射量、引起的风切变、边界层高度变化以及人为热源等。

尽管有关城市中尺度天气动力学研究已经取得了不少进展，但是，仍然存在大量的科学问题和技术难题有待进一步研究，目前还很少有真正建立针对城市环境的中尺度数值预报业务模式，城市精细化预报

业务还主要依赖于对不同分辨率数值模式产品的天气学解释应用和统计释用。而事实证明，目前的业务中尺度模式对相对孤立的 β 中尺度以下天气系统（即不是由更大尺度系统激发的、具备关联性的中小尺度系统）的模拟能力本身就非常有限，如果不能在模式中有效地耦合能够真实反映城市陆面过程、城市大气物理过程和动力过程的边界层模式和冠层模式，城市精细化数值模式预报技术可能很难取得实质性进展。为了解决这些科学技术问题，需要气象科技工作者在以下三个方面共同努力：

(1) 不同地理环境、不同天气背景下城市边界层的温湿垂直分布、湍流交换特征的连续变化及其与自由大气的相互作用过程的观测研究。目前有关城市大气环流变化的观测和数值模拟研究结果大多基于稳定天气背景下或气候平均态，据此得到的研究结果很可能造成无法真实地描述发生在城市的中尺度演变过程中的边界层物理过程，因为绝大多数局地天气过程、尤其是夏季中尺度对流系统往往发生在局地不稳定条件或稳定度剧烈变化的背景下。

(2) 目前，有关城市大气环流的研究主要集中在城市大气本身，例如城市大气能量平衡、湍流交换、城市局地环流等，而针对城市热力作用、动力作用与大气环流的相互作用研究比较薄弱。许多研究表明，地面热通量对局地强风暴和降水系统的影响并不只来源于当地、当时的通量变化^[41, 42]。因此，城市热量分布与低层环境流场的配置关系十分重要，因为城市地面热通量提供的感热能和潜热能可能通过大气流场在更大的范围内进行重新分布，对于城市群来说，它可能对更大范围内的天气系统演变产生了显著影响。

(3) 以稠密的城市气象观测资料（地面和风廓线观测网、微波等）为手段，研究造成城市高影响天

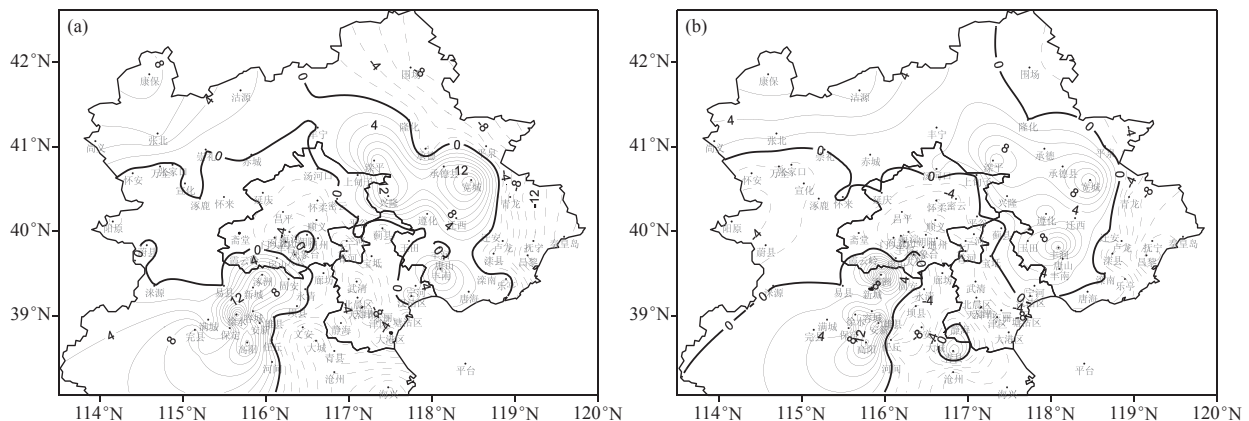


图4 京津冀地区10年平均雾日中尺度分布特征（98个观测站和18个基准站）
(a) 1989—1998年；(b) 1999—2008年

气系统的中尺度精细结构特征以及城市效应是如何影响这些天气系统的酝酿、发生、发展和消亡的物理过程等,还有待进一步破解。

6 结语与讨论

高影响天气发生发展对特大城市的物理响应过程,是城市中尺度天气动力学的核心问题,如何利用数值模式科学地描述这种过程是城市精细预报的发展方向。本文主要对最近二十多年来,城市中尺度天气学和精细预报技术研究进展进行了回顾,包括以下几个方面:(1)城市环流对中尺度降水系统的影响;(2)城市环流与山地环流相互作用的物理过程及其对中尺度系统的影响过程;(3)城市环流与海(湖)风环流的相互作用对中尺度天气系统的影响过程;(4)城市或城市群对大雾形成与分布的影响。

研究已经表明,发展能够反映城市建筑、街区几何分布对热量和机械湍流的影响,同时能够客观描述城市冠层辐射、垂直风切变、边界层高度变化以及人为热源等物理过程的城市冠层模式,并与中尺度天气模式进行耦合,并不断改进城市陆面物理过程等,能够有效地提高数值模式对地面要素的预报准确性,同时也有利于提高城市中尺度系统的预报能力。为了实现这一目标,针对特大城市的精细化观测研究,并将研究成果应用于模式物理过程的改进之中,是提高模式精细化预报的首要任务。

参考文献

- [1] Bornstein R D. Observations of the urban heat island effect in New York city. *Journal of Applied Meteorology*, 1968, 7: 575-582.
- [2] Oke T R. Review of Urban climatology, 1968-1973. WMO Technical Note No.134, WMO No.383. Geneva: World Meteorological Organization, 1974.
- [3] Oke T R. The distinction between canopy and boundary-layer heat island. *Atmosphere*, 1976, 14: 268-277.
- [4] Oke T R. The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1982, 108: 1-24.
- [5] Arnfield A J. Simulating irradiative energy budgets within the urban canopy layer. *Modeling and Simulation*, 1984, 15: 227-233.
- [6] Nunez M, Oke T R. The energy balance of an urban canyon. *Journal of Applied Meteorology*, 1977, 16:11-19.
- [7] Melling H, List R. Characteristics of vertical fluctuations in a convective urban boundary layer. *Journal of Applied Meteorology*, 1980, 19: 1184-1195.
- [8] Uno I, et al. An observational study of the structure of the Nocturnal urban boundary. *Boundary layer meteorol*, 1988, 45: 59-82.
- [9] 周淑贞,束炯.城市气候学.北京:气象出版社,1994.
- [10] Arnfield A J. Review: Two decades of urban climate research: A review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *Inter Jour of climatology*, 2003, 23(1): 1-26.
- [11] National Research Council. Reconciling Observations of Global Temperature Change. Washington DC: National Academy Press, 2000.
- [12] Karl T. Urbanization: Its detection and effect in the United States climate record. *Journal of Climate*, 1988, 1: 1099-1123.
- [13] 龚道溢,王绍武.全球气候变暖研究中的不确定性. *地学前沿*, 2002, 9(2): 371-376.
- [14] 刘洪利,李维亮,周秀骥,等.长江三角洲地区区域气候模式的发展和检验. *应用气象学报*, 2005, 16(1): 24-34.
- [15] Changnon S A Jr, Huff F A, Semonin R G. METROMEX: An investigation of inadvertent weather modification. *Bull Amer Mete Soc*, 1971, 52: 958-968.
- [16] 蒙伟光,闫敬华,扈海波.城市化对珠江三角洲强雷暴天气的可能影响. *大气科学*, 2007, 31(2): 364-376.
- [17] 黎伟标,杜尧东,王国栋,等.基于卫星探测资料的珠江三角洲城市群对降水影响的观测研究. *大气科学*, 2009, 33(2): 1959-1266.
- [18] 孙继松,舒文军.北京城市热岛效应对冬夏季降水的影响研究. *大气科学*, 2007, 31(2): 311-320.
- [19] Rosenfeld D. Suppression of rain and snow by urban and industrial air pollution. *Science*, 2000, 287(10): 1793-1796.
- [20] Thielen J, Wobrock W, Gadian A, et al. The possible influence of urban surfaces on rainfall development: A sensitivity study in 2D in the meso- γ -scale. *Atmospheric research*, 2000, 54(1): 15-39.
- [21] 孙继松,王华,王令,等.城市边界层过程在北京2004年7月10日局地暴雨过程中的作用. *大气科学*, 2006, 30(2): 221-234.
- [22] 桑建国,刘万军.冬季城市边界层风场和温度场结构分析. *气象学报*, 1990, 48(4): 459-468.
- [23] 齐琳琳,赵思雄.局地地形、地表特征对上海暴雨过程的影响研究. *气候与环境研究*, 2006, 11(1): 33-48.
- [24] 孙继松.北京地区夏季边界层急流的基本特征及形成机理研究. *大气科学*, 2005, 29(3): 445-452.
- [25] Blackadar A K. Boundary layer maxima and significance for the growth of nocturnal inversion. *Bull Amer Mete Soc*, 1957, 38: 17-121.
- [26] 孙继松,石增云,王令.地形对夏季冰雹事件时空分布的影响研究. *气候与环境研究*, 2006, 11(1): 76-84.
- [27] 孙继松,杨波.地形与城市环流共同作用下的 β 中尺度暴雨. *大气科学*, 2008, 32(6): 1352-1364.
- [28] Wu Z M, Schlunzen K H. Numerical study on the local wind structures forced by the complex terrain of Qingdao area. *ACTA Meteorological Sinica*, 1992, 6(3): 355-366.
- [29] 张立凤,张铭,林宏源.珠江口地区海陆风系的研究. *大气科学*, 1999, 23(5): 581-589.
- [30] 王卫国,蒋维楣.青岛地区边界层结构的数值模拟. *大气科学*, 1996, 20(2): 229-234.
- [31] 苗曼倩,唐有华.长江三角洲夏季海陆风与热岛环流的相互作用及城市化影响. *高原气象*, 1998, 17(3): 280-289.
- [32] 张雷鸣,苗曼倩,洪钟祥,等.城市发展对夜间海陆风环流影响的预测模拟. *大气科学*, 1994, 18(3): 366-371.
- [33] 梁钊明,高守亭,王彦.渤海湾地区一次碰撞型海风锋天气过程的数值模拟分析. *气候与环境研究*, 2013, 18(6): 733-745, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2013.12027.
- [34] 梁钊明,高守亭,王东海,等.城市下垫面对渤海湾海风锋特征影响的一次数值试验. *大气科学*, 2013, 37(3): 53-64.
- [35] Craig K G, Bornstein R D. MM5 simulation of urban induced convective precipitation over Atlanta. Fourth AMS Conference on the Urban Environment Conference, Norfolk, VA. Amer Meteor Soc, 2002.
- [36] Rozoff C M, Cotton W R, Adegoke J O. Simulation of St. Louis, Missouri, Land use impacts on thunderstorms. *J Appl Meteor*, 2003, 42: 716-738.
- [37] Liu Y, Chen F, Warner T, et al. Improvements to surface flux computation in a non-local-mixing PBL scheme, and refinements on urban processes in the NOAA land-surface model with the NCAR/ATEC real time FDDA and forecast system. 20th conference on Weather Analysis and Forecasting /16th conference on Numerical weather Prediction, Seattle, Washington, 11-15 January, 2004.
- [38] 江晓燕,张朝林,高华,等.城市下垫面反照率变化对北京市热岛过程的影响——一个例分析. *气象学报*, 2007, 65(2): 165-171.
- [39] 李晓莉,何金海,毕宝贵,等. MM5模式中城市冠层参数化方案的设计及其数值试验. *气象学报*, 2003, 61(5): 15-28.
- [40] 陈炯,郑永光,邓莲堂.城市建筑物对城市边界层三维结构影响的数值模拟. *北京大学学报(自然科学版)*, 2007(3): 343-350.
- [41] Nuss W A, Kamikawa S I. Dynamics and boundary layers processes in two Asian cyclones. *Mon Wea Rev*, 1990, 118: 755-771.
- [42] Benjamin S G, Carlson T N. Some effects of surface heating and topography on regional severe storm environments. Part 1: Three dimensional simulations. *Mon Wea Rev*, 1986, 114: 307-343.