

向伟玲, 安俊岭, 王喜全, 等. 2013. 大气应急响应模拟中城市冠层风廓线参数化方法检验 [J]. 气候与环境研究, 18 (2): 187–194, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2013.11048. Xiang Weiling, An Junling, Wang Xiquan, et al. 2013. Testing of urban canopy wind profile parameterization for atmospheric emergency response modeling system [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 18 (2): 187–194.

大气应急响应模拟中城市冠层风廓线 参数化方法检验

向伟玲^{1,2} 安俊岭¹ 王喜全¹ 王自发¹

1 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理与大气化学国家重点实验室, 北京 100029

2 中国科学院大学, 北京 100049

摘 要 城市冠层内风场的准确模拟或预报是突发性大气污染应急响应措施制定和实施的重要前提和基础。为了合理反映城市冠层的影响, 并满足应急响应时效性的要求, 将 MacDonald (2000) 提出的城市冠层内风廓线参数化方法耦合于中尺度气象模式 MM5, 并利用 2010 年 7 月 18 日至 8 月 6 日北京 325 m 气象塔垂直观测资料进行验证。试验结果表明: (1) 城市冠层参数化方法能够较好的模拟各种稳定度条件下冠层内风速廓线垂直变化, 中性、稳定和不稳定层结时的标准平均偏差分别为 78%、12%、4%, 标准平均误差分别为 78%、52%、21%。(2) 城市冠层参数化方法能够较好的模拟冠层内实际风速变化情况, 虽然随高度增加模拟偏差增大, 但 8、15、32、47 m 高度的模拟风速与观测值依然十分接近, 标准平均偏差分别为 2%、-26%、25%、60%, 标准平均误差分别为 54%、46%、52%、73%。(3) 与传统的 Monin-Obukhov 相似性边界层参数化方法相比, 城市冠层参数化方法明显提高了冠层风速的模拟能力。中性、稳定、不稳定层结时, Monin-Obukhov 相似性边界层参数化方法的标准平均误差高达 420%、176%、184%, 城市冠层参数化方法的标准平均误差减小至 78%、52%、21%; 冠层内 8、15、32、47 m 高度, Monin-Obukhov 相似性边界层参数化方法的标准平均误差分别为 283%、184%、227%、167%, 城市冠层参数化方法的标准平均误差减小至 54%、46%、52%、73%。

关键词 城市冠层 风廓线 突发性大气污染事件 北京 325 m 气象塔

文章编号 1006-9585 (2013) 02-0187-08

中图分类号 P404

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2013.11048

Testing of Urban Canopy Wind Profile Parameterization for Atmospheric Emergency Response Modeling System

XIANG Weiling^{1,2}, AN Junling¹, WANG Xiquan¹, and WANG Zifa¹

1 State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract Simulation and forecasting of wind fields in the urban canopy layer (UCL) is important for developing and implementing measures for atmospheric emergency response. To reflect the impact of the UCL on wind fields and to fulfill rapid emergency response requirements, an urban canopy wind profile parameterization method (UCPM) proposed by MacDonald (2000) is coupled with the mesoscale model MM5. The performance of the UCPM is tested with

收稿日期 2011-03-20 收到, 2013-01-25 收到修定稿

资助项目 国家高技术研究发展计划 2007AA06A408

作者简介 向伟玲, 女, 1982 年出生, 博士, 主要从事大气环境研究。E-mail: xwl111@sohu.com

通讯作者 安俊岭, E-mail: anjl@mail.iap.ac.cn

observations from a 325-m meteorological tower in Beijing from 18 Jul to 6 Aug 2010. The results demonstrate that the UCPM accurately reproduces wind profiles in the UCL under neutral, stable, and unstable conditions with normalized mean bias of 78%, 12%, and 4%, respectively, and normalized mean error of 78%, 52%, and 21%, respectively. The UCPM shows excellent performances at heights of 8, 15, 32, and 47 m within the UCL with normalized mean bias of 2%, -26%, 25%, and 60%, respectively, and normalized mean error of 54%, 46%, 52%, and 73%, respectively. Comparison with the Monin-Obukhov similarity parameterization (MO) reveals that the UCPM significantly improves simulations of wind speeds in the UCL. Under neutral, stable, and unstable conditions, the normalized mean error of MO is 420%, 176%, and 184%, respectively, and UCPM is reduced to 78%, 52%, and 21%, respectively; at heights of 8, 15, 32, and 47 m within the UCL, the normalized mean error of MO is 283%, 184%, 227%, and 167%, respectively, and UCPM is reduced to 54%, 46%, 52%, and 73%, respectively.

Keywords Urban canopy, Wind profile, Air pollution accident, 325-m meteorological tower in Beijing

1 引言

我国很多化工园区分布在人口稠密、经济发达的城市及周边地区,城市下垫面的极不均匀性和高粗糙度特征会显著影响城市冠层内的风场 (Bornstein, 1975; Oke, 1988; Roth, 2000; Paul, 2001),而城市冠层内风场的准确模拟或预报是突发性大气污染应急响应措施制定和实施的重要前提和基础。

获取城市冠层内风廓线的方法一般有两种,一是现场观测,二是数值模拟。现场观测可使用常规观测和风廓线仪得到观测点风廓线,但观测位置的代表性及其代表范围的确定是现场观测的难点 (黄江平, 2010),同时,风廓线仪的观测盲区多在城市冠层之内;再者,现场观测无法获得未来的气象场资料,但突发性大气污染事件应急响应需要未来气象场的资料。对于未来气象场的预报,数值模拟方法显示出自身优势。中尺度气象模式一般具备多重嵌套功能,考虑了较完整的物理过程和较细致的下垫面状况,具有良好的模拟性能,可预测几小时乃至几天的气象场,满足突发性大气污染事件应急响应对未来气象数据的需求。但是,目前中尺度气象模式的边界层参数化方案大多采用平坦、均匀下垫面的 Monin-Obukhov (M-O) 近地层相似理论,并未考虑城市下垫面复杂性的影响 (Baklanov et al., 2001),从而限制了其对城市冠层风廓线的模拟能力。

20 世纪 90 年代后期以来,城市边界层参数化的研究逐渐增多。Brown and Williams (1998) 在植被冠层数值研究工作的基础上,发展了基于静力 HOTMAC 模式的冠层参数化方案; Masson (2000) 提出了一个能够预报城市路面、墙面和屋顶温度的城市能量收支参数化方案; Grimmond et al.

(1998) 和 Grimmond and Oke (2002) 发展了计算城市湍流热通量的局地尺度城市气象参数化方案; Martilli et al. (2002) 发展了城市热力作用和城市结构动力作用的城市湍流参数化方案; Otte et al. (2004) 基于 MM5 模式发展了城市冠层参数化方案。根据 MacDonald (2000) 提出的城市冠层风廓线符合指数分布,摩擦副层适合对数分布,惯性层适用 M-O 相似理论的观点, Delle et al. (2009) 发展了一种城市边界层参数化方案。

中尺度气象模式 MM5 是目前区域或城市气象场模拟预报的代表性模式之一,已成功应用于北京奥运会、上海世博会和广州亚运会期间每天 48~72 h 气象场预报 (王自发等, 2009; 张伟等, 2010; 王茜等, 2010)。若 MM5 每天滚动预报 48~72 h, 则完全满足突发性大气污染事件应急响应时效性的要求。但 MM5 无法合理模拟预报城市冠层内的风场变化,严重影响应急响应的科学决策。为了合理反映城市冠层的影响,并满足应急响应时效性的要求,我们将 MacDonald (2000) 城市冠层内参数化方法耦合于 MM5 模式,并利用北京 325 m 气象塔垂直观测资料进行验证。

2 城市冠层风廓线参数化方法

城市冠层与摩擦副层、惯性层和混合层 (或称外层) 组成了城市边界层 (Grimmond et al., 2002)。在城市冠层中,风和湍流不可避免的受到建筑物和街道等影响,与上风向的郊区相比,城市中的风速通常会有所减小 (Delle et al., 2009)。MacDonald (2000) 指出城市冠层内风廓线符合指数分布:

$$u(z) = U_h \exp \left[\gamma \left(\frac{z}{h} - 1 \right) \right], \quad z < h, \quad (1)$$

其中, u 为风速, z 为垂直高度, U_h 为冠层顶风速,

$\gamma = a_1 \lambda_f$ 为指数廓线中衰变系数, a_1 为经验常数 (取 9.6) (MacDonald, 2000), λ_f 为建筑物迎风面面积与建筑物总表面积之比 (Burian et al., 2005), h 为冠层高度。

$$U_h = \frac{u_*}{b_1} \ln \left(\frac{l_c}{l_{rs}} \right) + u_{rs}, \quad (2)$$

其中, u_* 为摩擦速度, b_1 为校正因子, l_c 为冠层的垂直平均长度, l_{rs} 为摩擦副层顶高, $l_{rs} = k(h_{rs} - d)$, k 为冯卡曼常数 (取 0.4), h_{rs} 为摩擦副层的高度 ($h_{rs} = 3h$) (Delle et al., 2009), d 为零平面位移, u_{rs} 为摩擦副层顶风速。

$$u_{rs} = \frac{u_*}{k} \left[\ln \left(\frac{h_{rs} - d}{z_0} \right) - \psi \left(\frac{h_{rs} - d}{L} \right) \right], \quad (3)$$

$$b_1 = \frac{1}{h_{rs} - h} [k(h_{rs} - d) - l_c], \quad (4)$$

$$l_c = h \left\{ \frac{\overline{C_{DH}} \lambda_f [1 - \exp(-2\gamma)]}{4\gamma^3} \right\}^{1/2}, \quad (5)$$

其中, z_0 为地表粗糙度, ψ 为稳定度函数 (Dyer and Hicks, 1970), L 为 M-O 长度, $\overline{C_{DH}}$ 为冠层平均拖曳系数。

根据 M-O 相似理论, 利用 MM5 模拟预报的第一层 (约 1000 hPa) 风矢量、水汽混合比、气压、温度、地面温度, 可计算地表热通量, 继而求得摩擦速度和 M-O 长度 (Byun, 1990)。MM5 是美国国家大气科学研究中心 (NCAR) 与宾夕法尼亚州立大学 (PSU) 合作发展的第五代中尺度非静力气象模式 (Grell et al., 1994)。本研究中 MM5 采用 Labert 投影, 四重嵌套网格 (图 1), 水平分辨率分别为 27、9、3、1 km, 其中 D4 为北京地区。垂直方向上不等间距分 23 层。模式积分步长为 80 s, 模式输出频率为 720 s。物理过程参数化方案选用 Grell 积云参数化方案、简单冰相显式微物理过程、云辐射方案、MRF 边界层参数方案、5 层土壤温度模块 (高媛媛等, 2007; 王自发等, 2009)。初始场及边界条件采用美国大气海洋局 (NOAA) 的数值天气预报中心 (NWP) 全球预报系统数据集 AVN 资料 [0.5° (纬度) $\times 0.5^\circ$ (经度)], 每日世界协调时 00:00 开始预报, 滚动预报 48 h。

3 观测资料及相关参数设定

北京 325 m 气象塔地处 ($39^\circ 58'N$, $116^\circ 22'E$),

海拔高度 49 m, 距北三环路约 1 km, 东面 200 m 处为南北走向的八达岭高速公路, 北面 50 m 处为东西走向的北土城西路。气象塔建成于 1979 年 8 月, 建成初期, 周围无高大的建筑群, 属于北京市城郊, 反映的是城郊非均匀下垫面的特征 (洪钟祥, 1983)。1990 年以后, 随着北京城市建设的快速发展, 在气象塔南北方向出现了高大的建筑群, 使得气象塔周围变为复杂的城市粗糙下垫面 (刘辉志和洪钟祥, 2002)。城市冠层对风场的影响由气象塔实时记录。气象塔高 325 m, 观测高度分别为 8、15、32、47、65、80、102、120、140、160、180、200、240、280、320 m。彭珍 (2005) 利用气象塔 1994~2003 年夏季资料, 分析了北京城市化进程对边界层风场结构的影响; 姚文清 (2005) 利用气象塔资料, 研究了北京城市边界层大气过程垂直动力特征; 刘小红和洪钟祥 (1996) 利用气象塔资料, 对一次特大强风过程的边界层结构进行了分析。气象塔的观测资料是检验城市冠层风廓线参数化方法的理想实测资料。本研究所用资料是 2010 年 7 月 18 日至 8 月 6 日期间 8、15、32、47 m 高度风速, 此期间稳定度主要类型均出现过, 其中, 稳定层结为 54 个时次, 中性层结为 119 个时次, 不稳定层结为 300 个时次, 具有很好的代表性。

气象塔所在区域的城市冠层高度约 50 m (胡非等, 2005)。边界层高度由相应时段气象塔激光雷达探测得到, 其最高值为 2000 m, 最低值为 300 m。粗糙度 z_0 为 1.75 m, 零平面位移 d 为 40.12 m (高志球等, 2002), 冠层平均拖曳系数 $\overline{C_{DH}}$ 取 1.2 (MacDonald, 2000)。 λ_f 国际上普遍采用 3D 建筑物数据库、卫星遥感和地理信息系统相结合的方法确定 (Burian et al., 2002a, 2002b, 2002c, 2002d, 2003a, 2003b, 2005; Ratti et al., 2006)。根据 Grimmond (1998) 的计算结果, 美国芝加哥商业/居民区的 λ_f 为 0.16~0.27, 气象塔周边区域与美国芝加哥商业/居民区的建筑物结构相似 (图 2), 但建筑物略偏高, 铁塔周边区域的 λ_f 取 0.24。

4 模拟效果检验

图 3 为不同稳定度条件下城市冠层参数化方法 (UCP) 和传统边界层参数化方法 (适用于平坦、均匀下垫面的 Monin-Obukhov 相似理论, 简称 MO 方法) (Byun, 1990) 的垂直平均风廓线 (中性层

结 119 个时次、稳定层结 54 个时次、不稳定层结 300 个时次的平均值) 模拟与观测数据对比。从观测结果可以看出, 各种稳定度下, 气象塔处冠层内平均风速均较小, 其中, 中性层结时小于 1.5 m/s, 稳定时小于 0.3 m/s, 不稳定时小于 1.2 m/s, 且风速随高度上升呈递增趋势。与冠层之上 (140 m 高度) 各稳定度下的平均风速相比, 8 m 高度的平均风速分别减小了 4.0、2.2、4.6 m/s。说明气象塔区域建筑物明显减弱了冠层内的风速。

MO 方法模拟的各种稳定度下冠层内的平均风速廓线与观测趋势大体一致, 但由于 MO 方法未考

虑城市复杂下垫面对冠层内风速的影响, 冠层内风廓线满足对数分布, 其模拟数值都明显偏高。中性、稳定和不稳定层结时平均风速分别偏高 3.0、0.4、1.1 m/s, 标准平均偏差和标准平均误差相等, 3 种稳定度下分别高达 420%、176%、184%。与 MO 方法相比, UCP 方法将表征城市复杂下垫面的 z_0 、 d 、 λ_f 等形态学参数加入冠层内风廓线参数化方法, 使冠层内风廓线满足指数分布, 因此, UCP 方法显著的减小了冠层内风速的模拟结果, 显示出较好的模拟性能。与观测资料相比, UCP 方法模拟的平均风速廓线与观测结果的变化趋势非常一致, 且数值与观测值更加相近, 中性、稳定、不稳定层结时的平均偏差均有所减小, 标准平均偏差分别为 78%、12%、4%, 标准平均误差分别为 78%、52%、21%。与 MO 方法的模拟结果比较, UCP 方法模拟的冠层内平均风速均显著减小, 中性层结时减小了 2.3 m/s, 稳定层结时减小了 0.4 m/s, 不稳定层结时减小了 1.0 m/s, 在中性、稳定、不稳定层结时标准平均偏差分别减小了 342%、164%、180%, 标准平均误差分别减小了 342%、124%、163%。

图 4 是实验期间城市冠层内 4 层 (47、32、25、8 m) 小时平均风速模拟结果与观测数据对比。从图中可以看出, MO 方法模拟的 4 层小时平均风速均整体性偏高, 且随高度上升而整体偏高明显加大, 例如, 47 m 高度模拟的小时平均风速超过 8 m/s 时, 对应时刻观测值不到 4 m/s, 相对误差超过了 100%。UCP 方法考虑了城市复杂下垫面对冠层内风速的影响, 因此, 模拟的 4 层小时平均风速与观

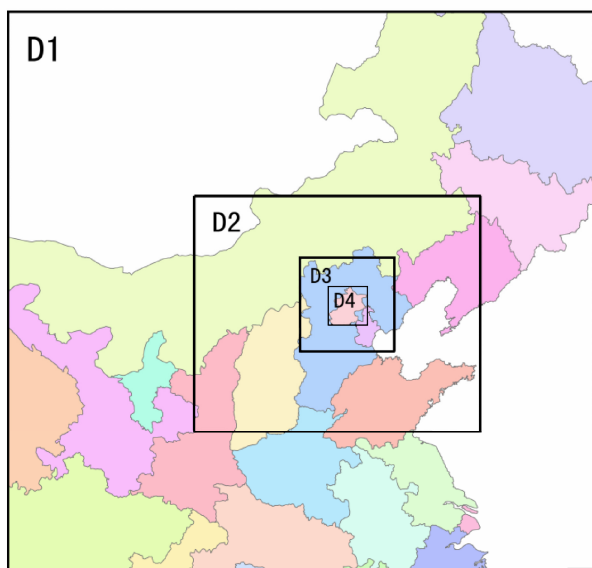


图 1 MM5 模拟区域设置
Fig. 1 Nested domains for MM5 simulation

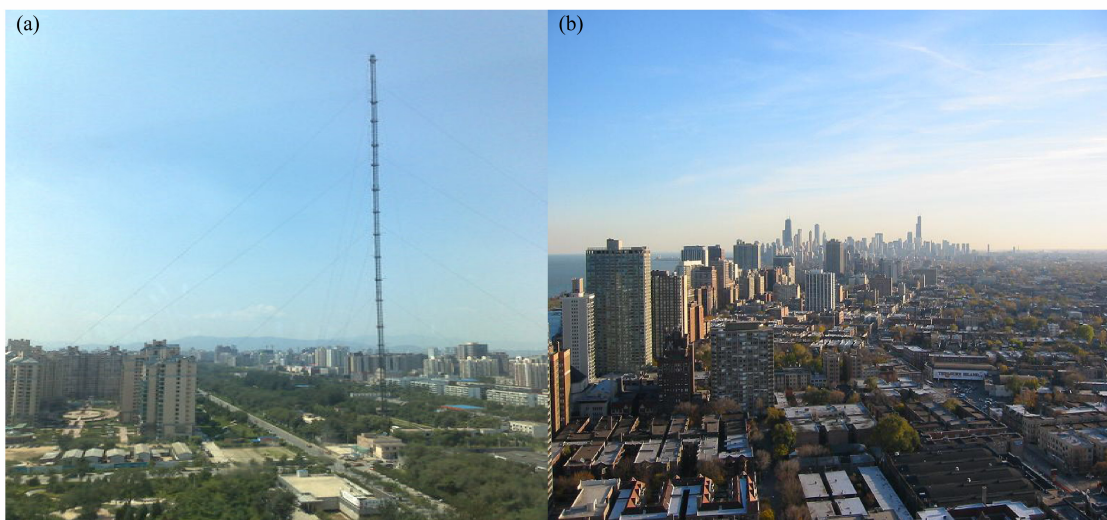


图 2 (a) 北京 325 m 气象塔区域与 (b) 美国芝加哥商业/居民区建筑物结构比较
Fig. 2 Comparison of building structure (a) at 325-m meteorological tower area in Beijing and (b) commercial/residential area in Chicago

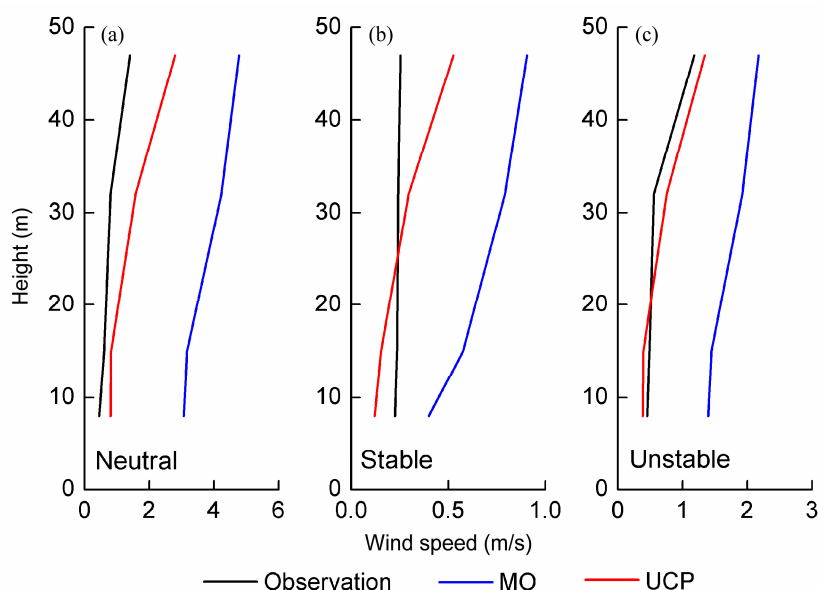


图3 3种稳定度条件下(中性、稳定、不稳定)城市冠层参数化方法(UCP)和传统边界层参数化方法(MO)计算的冠层平均风速与观测结果对比
Fig. 3 Comparison of observations and simulations of the urban canopy parameterization (UCP) and the Monin-Obukhov similarity parameterization (MO) under neutral, stable, and unstable conditions

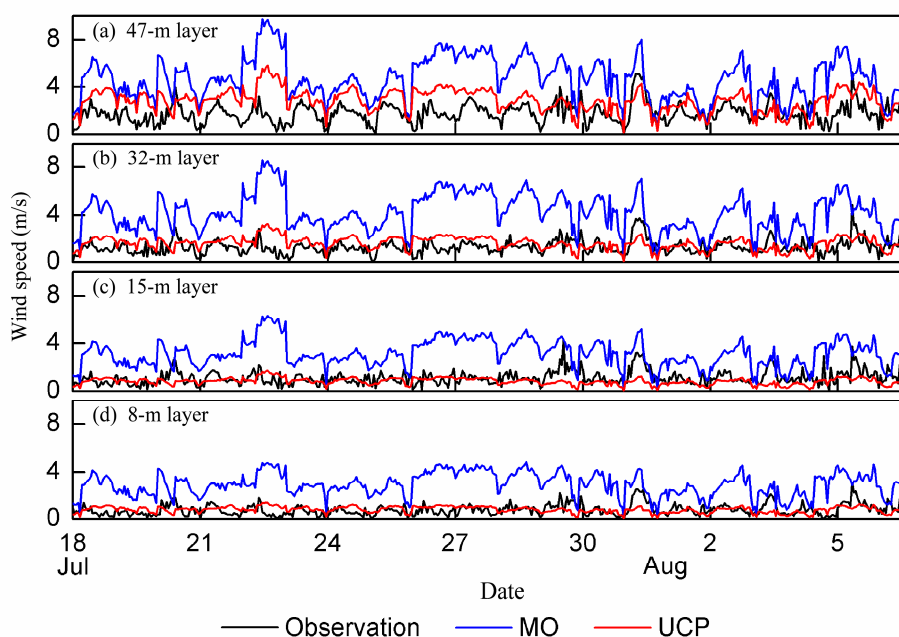


图4 2010年7月18日至8月6日城市冠层参数化方法(UCP)和传统边界层参数化方法(MO)模拟的8、15、32、47 m小时平均风速与观测值对比
Fig. 4 Comparison of hourly mean wind speeds at height of 8, 15, 32, and 47 m from 18 Jul to 6 Aug 2010 between observations and simulations of the urban canopy parameterization (UCP) and Monin-Obukhov similarity parameterization (MO)

测值十分接近。虽然随着高度上升,UCP方法模拟的小时平均风速也出现偏差增大的趋势,但并不显著。与MO方法相比,UCP方法表现出很大的优势,能够较好的反映城市冠层内风速垂直变化特征。

为了定量比较两种模拟方法,本文对实验期间UCP方法与MO方法模拟的4层小时平均风速和观

测数据进行了统计(表1)。从表中可以看出,实验期间冠层内4层风速观测时均值均较小,其中47 m高度小时平均风速最大,为1.8 m/s;随着高度的增加,观测的小时平均风速逐渐增大,8 m高度为0.8 m/s,至47 m高度时已增加了1 m/s;同时,随着高度的增加,观测的小时风速变幅逐渐增大,在8 m

表 1 2010 年 7 月 18 日至 8 月 6 日城市冠层参数化方法 (UCP) 与传统边界层参数化方法 (MO) 在 8、15、32、47 m 高度小时风速的指标统计

Table 1 Statistics of simulation hourly wind speed of the urban canopy parameterization (UCP) and the Monin-Obukhov similarity parameterization (MO) at the height of 8, 15, 32, and 47 m from 18 Jul to 6 Aug 2010

			平均	平均	平均	均方根	标准	标准
高度		变幅	值	偏差	误差	误差	平均	平均
(m)		(m/s)	(m/s)	(m/s)	(m/s)	(m/s)	偏差	偏差
UCP	0.1~5.9	2.9	1.1	1.3	1.6	60%	73%	
MO	0.4~9.8	4.7	2.9	3.0	3.4	165%	167%	
32	观测	0.1~4.9	1.3					
	UCP	0.1~3.3	1.6	0.3	0.7	0.8	25%	52%
	MO	0.3~8.6	4.2	2.9	2.9	3.3	225%	227%
15	观测	0.1~4.3	1.1					
	UCP	0.1~1.7	0.8	-0.3	0.5	0.7	-26%	46%
	MO	0.2~6.4	3.1	2.0	2.1	2.4	180%	184%
8	观测	0.1~3.1	0.8					
	UCP	0.1~1.4	0.8	0.01	0.4	0.5	2%	54%
	MO	0.1~4.9	2.9	2.2	2.2	2.4	280%	283%

高度变幅仅为 3.1 m/s, 最大值为 3.1 m/s, 最小值为 0.1 m/s, 47 m 高度时, 变幅已增加至 5.2 m/s, 最大值增加至 5.3 m/s, 最小值为 0.1 m/s。气象塔的风速观测资料充分说明了城市冠层对风速的减弱作用, 且越接近地面, 风速越小, 风速变幅也越小。

实验期间, MO 方法模拟的 4 层风速平均偏差较大, 8 m 高度的平均偏差为 2.2 m/s, 15 m 高度为 2.0 m/s, 32 m 高度为 2.9 m/s, 47 m 高度为 2.9 m/s, 其小时平均风速、最大值、最小值均高于观测值, 且各层平均偏差和平均误差、标准偏差和标准误差整体性偏高, 小时平均风速分别偏高了 2.1、2.0、2.9、2.9 m/s。同时, MO 方法的 4 层风速模拟误差 8 m 为 283%, 15 m 为 184%, 32 m 为 227%, 47 m 为 167%。

UCP 方法模拟的 4 层小时平均风速与观测结果较为接近, 小时平均风速最大值和最小值与观测数据非常接近, 较好的反映了实际风速变化的幅度; 同时, UCP 方法模拟的 4 层小时风速的平均偏差、平均误差、均方根误差、标准平均偏差、标准平均误差均较小。该方法很好的再现了气象塔区域城市冠层内风速的实际状况。与 MO 方法相比, UCP 方法各项统计指标优势较为明显, 4 层平均偏差减小幅度非常明显, 平均偏差在 8 m 高度减小了 99%,

15 m 高度减小了 86%, 32 m 高度减小了 89%, 47 m 高度减小了 63%; 均方根误差分别减小了 1.9、1.7、2.5、1.8 m/s; 标准平均误差减小了 229%、138%、175%、94%。

5 结论

城市冠层内风场的准确模拟或预报是突发性大气污染事件应急响应措施制定和实施的重要前提和基础。为了合理反映城市冠层的影响, 并满足应急响应时效性的要求, 本文将 MacDonald (2000) 提出的城市冠层内风廓线参数化方法耦合于中尺度气象模式 MM5, 并利用北京 325 m 气象塔垂直观测资料进行验证。结果表明: (1) 城市冠层参数化方法能够较好的模拟各种稳定度条件下冠层内风速廓线垂直变化, 数值与观测值较相近, 中性、稳定和不稳定层结时的标准平均偏差分别为 78%、12%、4%, 标准平均误差分别为 78%、52%、21%。

(2) 城市冠层参数化方法能够较好的模拟冠层内实际风速变化, 虽随高度增加模拟偏差增大, 但 8、15、32、47 m 高度的模拟风速与观测值依然十分接近, 标准平均偏差分别为 2%、-26%、25%、60%, 标准平均误差分别为 54%、46%、52%、73%。(3) 与传统的 Monin-Obukhov 相似边界层参数化方法相比, 城市冠层参数化方法明显提高了冠层内风速的模拟能力, 中性、稳定、不稳定层结时标准平均偏差分别减小了 342%、164%、180%, 标准平均误差分别减小了 342%、124%、163%; 8m、15m、32m、47m 高度上均方根误差分别减小了 1.9、1.7、2.5、1.8 m/s, 标准平均误差减小了 229%、138%、175%、94%。

参考文献 (References)

- Baklanov A, Rasmussian A, Fay B. 2001. Possibilities and shortcomings of NWP models to provide meteorological data for UAP forecasting [C]. // Proceedings of the Urban Air Quality Conference. Louraki Greece.
- Bornstein R D. 1975. Two-dimensional, non-steady numerical simulations of nighttime flows of a stable planetary boundary layer over a rough warm city [J]. J. Appl. Meteor., 14: 1459-1477.
- Brown M J, Williams M D. 1998. An urban canopy parameterization for mesoscale meteorological models [C]. // Proceedings of the AMS Conference on 2nd Urban Environment Symposium 2-7 November, Albuquerque, NM, Amer Meteor Soc, 144-147.

- Burian S J, Brown M J, Linger S P. 2002a. Morphological analyses using 3D building databases: Los Angeles, California [R]. Utah. LA-UR, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM.
- Burian S J, Brown M J, Linger S P. 2002b. Morphological analyses using 3D urban databases: Phoenix, Arizona [R]. Utah. LA-UR, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM.
- Burian S J, Velugubantla S P, Brown M J. 2002c. Morphological analyses using 3D building databases: Salt Lake City [R]. Utah. LA-UR, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM.
- Burian S J, Velugubantla S P, Chittineni K, et al. 2002d. Morphological analyses using 3D building databases: Portland, Oregon [R]. Utah. LA-UR, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM.
- Burian S J, Maddula S R K, Velugubantla S P, et al. 2003a. Morphological analyses using 3D building databases: Albuquerque, New Mexico [R]. Utah. LA-UR, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM.
- Burian S J, Han W S, Brown M J. 2003b. Morphological analyses using 3D building databases: Houston, Texas [R]. Utah. LA-UR, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM.
- Burian S J, Han W S, Brown M J. 2005. Morphological analyses using 3D building databases: Oklahoma City, Oklahoma [R]. Utah. LA-UR, Los Alamos National Laboratory Los Alamos, NM.
- Byun D W. 1990. On the analytical solutions of flux-profile relationships for the atmospheric surface layer [J]. *J. Appl. Meteor.*, 29: 652–657.
- Delle M L, Weil J, Simpson M, et al. 2009. A new urban boundary layer and dispersion parameterization for an emergency response modeling system: Tests with the joint urban 2003 data set [J]. *Atmos. Environ.*, 43: 5807–5821.
- Dyer A J, Hicks B B. 1970. Flux-gradient relationships in the constant flux layer [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 96: 715–721.
- 高媛媛, 何金海, 王自发. 2007. 城市化进程对北京区域气象场的影响模拟 [J]. *气候与环境学报*, 23 (3): 58–64. Gao Yuanyuan, He Jinhai, Wang Zifa. 2007. Simulation for impact of urbanization on meteorological conditions in Beijing area [J]. *Journal of Meteorology and Environment (in Chinese)*, 23 (3): 58–64.
- 高志球, 卞林根, 谔昌贵, 等. 2002. 城市下垫面空气动力学参数的估算 [J]. *应用气象学报*, 13 (特刊): 26–33. Gao Zhiqiu, Bian Lingen, Lu Changgui, et al. 2002. Estimation of aerodynamic parameters in urban areas [J]. *Journal of Applied Meteorological Sciences (in Chinese)*, 13 (suppl.): 26–33.
- Grell G, J Dudhia, D Stauffer. 1994. A Description of the Fifth Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5) [R]. NCAR Tech. Note, NCAR/TN-398+STR, 117 pp.
- Grimmond C S B, King T S, Roth M, et al. 1998. Aerodynamic roughness of urban areas derived from wind observations [J]. *Bound.-Layer Meteor.*, 89: 1–24.
- Grimmond C S B, Oke T R. 2002. Turbulent heat fluxes in urban areas: observations and a local-scale urban meteorological parameterization scheme (LUMPS) [J]. *J. Appl. Meteor.*, 41: 792.
- 洪钟祥. 1983. 北京气象塔的观测系统 [M]. 北京: 科学出版社.
- Hong Zhongxiang. 1983. Observation System of Beijing Meteorological Tower (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press.
- 胡非, 程雪玲, 赵松年, 等. 2005. 城市冠层中温度脉动的硬湍流特性和相似性级串模型 [J]. *中国科学 D 辑 (地球科学)*, 35 (增刊 I): 66–72. Hu Fei, Cheng Xueling, Zhao Songnian, et al. 2005. Hard state of the urban canopy layer turbulence and its self-similar multiplicative cascade models [J]. *Science in China Serences D (Earth Sciences)*, 48 (suppl. I): 80–87.
- 黄江平. 2010. 城市环境下应急大气扩散模型研究 [D]. 中国科学院研究生院大气物理研究所, 111pp. Huang Jiangping. 2010. Emergency atmospheric dispersion model at urban sites [D]. Graduate University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Atmospheric Physics) (in Chinese), 111pp.
- 刘辉志, 洪钟祥. 2002. 北京城市下垫面边界层湍流统计特征 [J]. *大气科学*, 26 (2): 241–248. Liu Huizhi, Hong Zhongxiang. 2002. Turbulent statistical characteristics over the urban surface [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 26 (2): 241–248.
- 刘小红, 洪钟祥. 1996. 北京地区一次特大强风过程边界层结构的研究 [J]. *大气科学*, 20 (2): 223–228. Liu Xiaohong, Hong Zhongxiang. 1996. A study of the structure of a strong wind event in the atmospheric boundary layer in Beijing area [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 20 (2): 223–228.
- MacDonald R W. 2000. Modelling the mean velocity profile in the urban canopy layer [J]. *Bound.-Layer Meteor.*, 97: 25–45.
- Masson V. 2000. A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models [J]. *Bound.-Layer Meteor.*, 94 (2): 357–397.
- Martilli A, Clappier A, Rotach M W. 2002. An urban surface exchange parameterisation for mesoscale models [J]. *Bound.-Layer Meteor.*, 104 (2): 261–304.
- Oke T R. 1988. The urban energy balance [J]. *Progress in Physical Geography*, 12 (4): 471–508.
- Otte T L, Lacser A, Sylaaian D, et al. 2004. Implementation of an urban canopy parameterization in a mesoscale meteorological model [J]. *J. Appl. Meteor.*, 43 (11): 1648–1665.
- Paul S A. 2001. Introduction to Micrometeorology [M]. San Diego: Academic Press, 415 pp.
- 彭珍. 2005. 北京 325m 气象塔观测资料的统计分析 [D]. 中国科学院研究生院大气物理研究所硕士学位论文, 55pp. Peng Zhen. 2005. Statistical analysis of observational data at Beijing 325m meteorological tower [D]. Master dissertation (in Chinese), Graduate University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Atmospheric Physics), 55pp.
- Ratti C, Di Sabatino E, Britter R. 2006. Urban texture analysis with image processing techniques: winds and dispersion [J]. *Theor. Appl. Climatol.*, 84 (1–3): 77–90.
- Roth M. 2000. Review of atmospheric turbulence over cities [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 126 (564): 941–990.
- 王茜, 伏晴艳, 王自发, 等. 2010. 集合数值预报系统在上海市空气质量预测预报中的应用研究 [J]. *环境监控与预警*, 4 (2): 1–11.

- Wang Qian, Fu Qingyan, Wang Zifa, et al. 2010. Application of ensemble numerical model system on the air quality forecast in Shanghai [J]. Environmental Monitoring and Forewarning (in Chinese), 4 (2): 1–11.
- 王自发, 吴其重, Gbaguidi A, 等. 2009. 北京空气质量多模式集成预报系统的建立及初步应用[J]. 南京信息工程大学学报 (自然科学版), 1 (1): 19–26. Wang Zifa, Wu Qizhong, Gbaguidi A, et al. 2009. Ensemble air quality multi-model forecast system for Beijing (EMS2Beijing): Model description and preliminary application [J]. Journal of Nanjing University of Information Science and Technology (Natural Science Edition) (in Chinese), 1 (1): 19–26.
- 姚文清. 2005. 北京城市边界层低层湍流动力结构及其影响特征 [D]. 中国气象科学研究院/南京信息工程大学博士学位论文, 175pp. Yao Wenqing. 2005. Characteristics of urban boundary lower layer turbulence dynamical structure and its effects in Beijing [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Chinese Academy of Meteorological Sciences/Nanjing University of Information Science and Technology, 175pp.
- 张伟, 王自发, 安俊岭, 等. 2010. 利用 BP 神经网络提高奥运会空气质量实时预报系统预报效果 [J]. 气候与环境研究, 15 (5): 595–601. Zhang Wei, Wang Zifa, An Junling, et al. 2010. Update the ensemble air quality modeling system with BP model during Beijing Olympics [J]. Climate and Environmental Research (in Chinese), 15 (5): 595–601.