

唐玉琪, 谈建国, GRIMMOND C S B, 等. 典型特大城市下垫面空气动力学特征参数的计算与分析研究[J]. 热带气象学报, 2016, 32(4): 503-514.

文章编号: 1004-4965(2016)04-0503-12

典型特大城市下垫面空气动力学特征参数的计算与分析研究

唐玉琪¹, 谈建国^{1, 2}, GRIMMOND C S B^{1, 3}, 常远勇¹, 敖翔宇¹

(1. 上海市气象科学研究所(上海市卫星气象遥感应用中心), 上海 200030;
2. 上海市气象与健康重点实验室, 上海 200030; 3. Department of Meteorology, University of Reading, Reading, RG6 6BB, UK)

摘 要: 基于 2012 年 12 月—2013 年 11 月上海徐家汇气象铁塔风和湍流观测资料及铁塔周边 500 m 半径范围(平均建筑高度为 39.5 m)下垫面信息, 分别利用温度方差方法、风速标准差方法、涡度相关法和形态学方法计算典型特大城市下垫面零平面位移和动力学粗糙度。结果表明, 温度脉动方差法计算的零平面位移与建筑物高度分布存在差异, 但在 58~208°方向与建筑顶面积系数呈现正相关(相关系数 0.73), 计算公式的经验参数、稳定度阈值和风速对计算结果影响较为显著; 涡度相关方法和风速标准差方法计算的空气动力学粗糙度随风向分布趋势相似(相关系数 0.94), 并与零平面位移呈负相关关系。形态学方法与动力学方法之间数值和随风向的变化趋势均存在差异, 风温观测仪器源区和形态学方法分析区域具有显著影响。

关 键 词: 空气动力学参数; 特大城市; 动力学方法; 形态学方法; 影响因素
中图分类号: P433 **文献标识码:** A **Doi:**10.16032/j.issn.1004-4965.2016.04.008

1 引 言

空气动力学参数是研究地气相互作用重要的地表参数之一, 在一定程度上反映着下垫面与边界层内物质、能量交换强度, 并在数值模拟参数化过程中有重要意义。确定动力学粗糙度 z_0 和零平面位移 z_d 的途径主要有两种: 基于风或湍流观测资料的空气动力学方法, 以及基于研究区域建筑几何形态特征的形态学方法^[1]。

传统的动力学方法是利用三层以上的中性近地面风廓线外推, 或非中性层结廓线迭代求最佳拟合解^[2], 但该方法在观测数据获取和计算参数确定等方面存在困难, 并涉及不同高度观测资料“源”区差异^[3]。Thom^[4]的压力中心法和 Kustas 等^[5]假设 z_d 与植被高度存在比例关系的方法, 都存在一定主观或经验误差。随着超声风速计的问

世, 风温脉动资料的获取推动了粗糙参数计算方法的长足发展。Rotach^[6]提出通过测量单一高度温度脉动方差确定 z_d 的温度方差方法(Temperature Variance Method, TVM), 相关的空气动力学参数均可独立获得, 张宏升等^[7]、高志球等^[8]、周艳莲等^[9]利用 TVM 方法分别对北京城市北部边缘 325 m 气象铁塔和长白山森林观测塔附近区域空气动力学参数的计算, 取得较好效果。Grimmond 等^[1]收集美国 4 个城市的风和湍流观测资料, 在充分考虑 z_d 影响的情况下, 分别采用 Lettau 风廓线方法(Lettau wind profile method, Lw)、风速标准差方法(Standard of wind speed method, Su)和涡度相关法(Eddy correlation stress method, Es)计算 z_0 , 后两种方法仅需要单一高度的观测资料, 其中 Su 方法为世界气象组织推荐的计算方法^[10], 张文昱等^[11-12]、胡文超等^[13]曾利用该方法

计算了黄土高原和河西走廊非均一下垫面的动力学粗糙度。

形态学方法不需要气象铁塔和风观测数据,而是根据下垫面粗糙元形态和植被特征,用公式计算任意方向的空气动力学参数,能有效弥补局地观测资料的不足。Grimmond 等^[14]使用多种形态学方法计算了北美 7 座城市的 11 个研究区域的空气动力学参数,并与动力学方法计算结果进行对比,并认为 Raupach^[15]提出的方法(简称为 Ra 方法)较为合理;尽管不同方法结果差异较大,但为城市下垫面空气动力学参数估算的新思路开拓打下基础。高志球等^[8]利用单一高度超声风速仪风温资料计算中科院大气物理研究所气象铁塔附近非均匀下垫面 z_0 ,并与 Grimmond 研究结果进行对比,对多种形态学方法的验证和发展具有重要意义。Kanda 等^[16]提出了同时考虑最大建筑高度、建筑高度标准差、平均建筑高度、迎风面积系数和顶面积系数更为复杂的形态学计算方法(简称为 Kanda 方法),并在日本东京和名古屋的真实下垫面及模型下垫面的实验中均取得较好效果。

随着城市化进程加快推进,城市对气象环境的影响日趋凸显。目前国内空气动力学参数计算方法的研究对象以林地、沙漠等自然下垫面为主,城市下垫面的长时间序列的高塔资料分析^[17]和特征参数计算^[7-8]以北京 325 m 铁塔最多,而高层建筑林立的大型、特大型城市中心区域的相关分析和研究较少。本文采用 TVM 方法、风速标准差方法、涡度相关应力法、Ra 方法和 Kanda 方法计算上海徐家汇铁塔周围的空气动力学参数,重点讨论动力学方法的影响因素和不确定性,并分析两种形态学方法在典型特大城市适用性,为城市下垫面空气动力学参数计算方法适用性研究和有效特征参数的使用提供参考。

2 资料来源

2.1 研究区域

徐家汇铁建于上海市气象局 55 m 大楼楼顶,塔高 25 m,铁塔周围高层建筑林立而植被覆盖少,呈现典型的城市非均一下垫面特征。根据上

海市测绘院提供的区域建筑高度数据,确定以徐家汇铁塔为中心、半径 500 m 范围为研究区域(图 1,下文简称为徐家汇研究区域),并综合 GIS 信息为形态学方法计算提供参数。研究区域平均建筑高度 39.5 m,并呈现东面最高,西北方向次之,南、北方向最小的分布特征;除 $58 \sim 101^\circ$ 平均建筑高度超过 50 m,其余方向均在 40 m 以内。此外,铁塔西南 $208 \sim 236^\circ$ 方向约 54 m 处有高度在 80 m 以上的大楼,可能对观测数据造成较明显影响。因此,综合考虑建筑高度、密度等因素,以铁塔为中心划分如图 1 所示的 16 个风向区间进行动力学参数计算和分析。

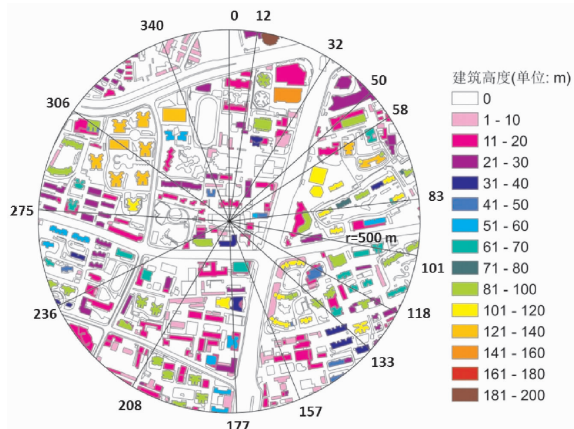


图 1 徐家汇研究区域内建筑物高度分布和 16 个风向区间划分

铁塔上各仪器安装位置如图 2 所示,三杯风速计(ZQZ-A,江苏省无线电研究所)架设于塔高 21 m 处、东北向(45°)伸出的横杆上,最小启动风速 0.3 m/s ,分辨率 0.1 m/s 。涡动相关系统架设于铁塔顶部东南向(135°)伸出的横杆上,包括超声风速仪(Campbell Scientific IRGASON)和快速响应集成红外气体分析仪,用于测量三维风速、虚温 and 空气中水汽/二氧化碳脉动含量,仪器的数据测量、采集、运算和存储均由数据采集器(CR3000, Campbell Scientific Inc)完成,采样频率为 10 Hz ,每 30 分钟取一次平均,经过延迟时间订正、超声虚温订正和 WPL 订正等。此外,塔顶正南向(180°)安装有四分量辐射仪(Kipp & Zonen, Model CNR4),西北向(315°)安装有温度相对湿度传感器(HMP155A)的小百叶箱。

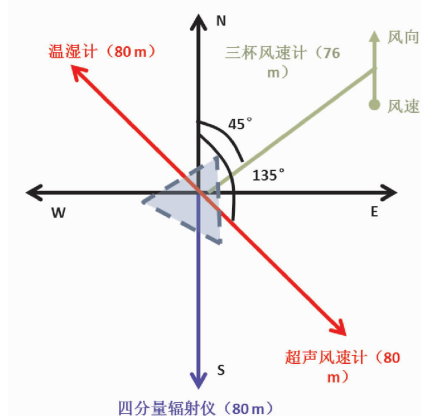


图2 徐家汇铁塔(虚线三角形)上各仪器安装位置(粗实线箭头)示意

2.2 数据说明和质量控制

本文选取2012年12月—2013年11月76 m观测高度三杯风速计的风向、风速观测资料,及80 m观测高度超声风速仪的风、温脉动观测资料。为使计算结果合理,三杯风速计选用风速大于2 m/s的观测资料,剔除缺测和僵直数据,并进行15分钟平均计算,其中风向平均采用单位矢量法^[18]。超声风速计资料选用水平风速大于2 m/s、摩擦速度大于0.1 m/s^[19]、潜热通量-100~400 W/m^[20]、风速垂直倾角大于5°^[7]的观测资料。为排除塔身和邻近高楼影响,剔除超声风速仪208~236°、275~340°,以及三杯风速计208~236°数据。

由于徐家汇研究区域为典型城市下垫面,植被覆盖率低,不同生长季节的观测数据的差异较小,因此空气动力学参数计算结果受生长季节变化的影响不明显。

3 空气动力学参数计算方法

3.1 动力学方法

本文研究三种动力学方法:以相似理论为基础、利用超声风温脉动资料计算零平面位移的TVM方法,以中性条件下对数风廓线公式为基础、利用三杯风速计风资料或超声风温脉动资料的Su方法和Es方法。上述动力学方法适用于不同稳定度条件,本文用超声风速仪观测资料计算无量纲稳定度参数 ζ ,判断观测仪器所在的76~80 m层次的大气稳定度:

$$\zeta = (z_s - z_d)/L \quad (1)$$

$$L = -\theta u_*^3 / (\kappa g \overline{\theta' w'}) \quad (2)$$

其中, z_s 为观测高度,零平面位移采用经验公式 $z_d = 0.67 z_H^{[21]}$, z_H 为区域平均建筑物高度,基于测绘院建筑物高度数据和GIS信息,用面积加权平均方法计算得到, L 为M-O长度, θ 为虚位温, $u_* = (\overline{u' w'})^{1/2}$ 为摩擦速度, $\kappa = 0.4$ 为Von-Karman常数, $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 为重力加速度, w 为垂直速度,右上角的撇号表示脉动值,上横线表示协方差。在国内外不同下垫面类型研究中,稳定度参数 ζ 有不同的阈值选择^[7-9, 22-23],本文参考Grimmond等^[1]在城市区域的研究中参数选择,分别设定 $-2.0 < \zeta < -0.2$ 和 $|\zeta| \leq 0.1$ 为不稳定和近中性阈值;稳定度参数阈值选择对计算结果的影响在后续章节中进行分析讨论。

空气动力学参数计算中,样本容量 ≥ 20 时认为该风向区间计算结果有效。分析时使用的动力学粗糙度结果为该风向区间粗糙度的平均值。

3.1.1 TVM方法

根据Monin-Obukhov相似理论,在不稳定层结下, σ_θ/θ_* 与 $(z_s - z_d)/L$ 呈 $-1/3$ 次方:

$$\sigma_\theta/\theta_* = -C_1 (C_2 - (z_s - z_d)/L)^{-1/3} \quad (3)$$

该关系已被证明在乡村^[22, 24]和城市^[1, 6, 25]区域均适用,可通过湍流资料计算 z_d 。其中, σ_θ 为虚位温标准差, $\theta_* = \overline{\theta' w'}/u_*$ 为摩擦虚位温, $C_2 = -(C_1/C_3)^3$, C_1 建议值为0.95^[7, 17], C_3 为中性层结系数,建议值范围为 $-3.5 \sim -2.5$ ^[7, 22, 26],根据Grimmond等^[1]和Rotach^[6]在城市下垫面的成功应用,本文选取 $C_3 = -3.5$ 。 z_d 预测值范围为0~80 m,根据最小二乘法,对于不同的初猜值,当观测值 σ_θ/θ_* 与计算值 $-C_1 (C_2 - (z_s - z_d)/L)^{-1/3}$ 之差的均方根(RMS)达到最小时,对应的 z_d 值即为所求。

3.1.2 Su方法和Es方法

Grimmond等^[1]将观测仪器分为快响应(即湍流观测,如采样频率 $\geq 10 \text{ Hz}$ 的超声风温仪)和慢响应(即风向风速观测,如三杯风速计)两种,并由中性条件下的对数风廓线方程:

$$U = \frac{u_*}{\kappa} \left[\ln \left(\frac{z - z_d}{z_0} \right) \right] \quad (4)$$

分别推导出 Su 方法(式(3))和 Es 方法(式(4)):

$$z_0 = (z_s - z_d) \exp\left(-\frac{U\phi_u \kappa}{\sigma_u}\right) \tag{5}$$

$$z_0 = (z_s - z_s) \exp\left(-\frac{U\kappa}{u_*}\right) \tag{6}$$

其中, U 为风速, $\phi_u = \sigma_u/u_*$ 为中性参数, σ_u 为风速标准差。 ϕ_u 可由超声风温仪数据计算或使用经验值, Roth^[25] 给出了城市下垫面 σ_u/u_* 参考值列表; Beljaars^[26] 根据实际观测资料, 认为 $\phi_u = 2.2$ 更适用于慢响应仪器的 10 min 平均风观测资料, 并在国内相关研究^[11-13] 中得到认可; Grimmond 等^[1] 通过洛杉矶观测站超声风速计和风杯风速计观测资料 15 min 风速标准差 σ_u 的相关关系分析, 得到 $\phi_u = 2.16$, 与 Beljaars 的结果非常接近, 故本文选用 $\phi_u = 2.2$ 。

Su 方法和 Es 方法的优势在于: 均只需已知单一高度的风观测数据即可进行计算, 避免城市区域非均一下垫面对梯度观测的影响, 从而获取更多有效数据; 局限是均仅能计算中性条件下的 z_0 , 并要求 z_d 已知。此外, Su 方法对仪器安装高度 z_s 有要求, 以 z_s 大于 2 倍平均建筑高度 $\overline{z_H}$ 为最佳; Es 方法可直接由湍流资料计算 u_* , 减少经验参量使用。

3.2 形态学计算方法

形态学方法以下垫面粗糙元的几何形态特征为基础, 通过分析 GIS 信息或地形资料建立方程求解空气动力学参数。 本文根据徐家汇研究区域下垫面粗糙元的几何参数, 分别用 Ra 方法和 Kanda 方法计算 16 个风向区间的空气动力学参数, 为动力学方法的分析和讨论提供参考。

3.2.1 Ra 方法

Raupach^[15] 在粗糙下垫面拖曳作用和区划研究基础上, 提出了基于粗糙元高度及迎风面积系数的粗糙参数计算方法:

$$\frac{z_d}{z_H} = 1 + \left\{ \frac{\exp\left[-(c_{dl}2\lambda_F)^{0.5} - 1\right]}{(c_{dl}2\lambda_F)^{0.5}} \right\} \tag{7}$$

$$\frac{z_0}{z_H} = \left(1 - \frac{z_d}{z_H}\right) \exp\left(-k \frac{U}{u_*} + \psi_h\right) \tag{8}$$

其中 ψ_h 为粗糙子层影响方程, $c_{dl} = 7.5$ 为自由系数, $\lambda_F = A_F/A_T$ 为建筑迎风面积系数(A_F 为建筑物迎风面积, A_T 为建筑总面积), 上划线表示平均

值。 Grimmond^[1] 等对该方法进行了风洞试验并取得较好效果。

3.2.2 Kanda 方法

Kanda^[16] 认为, 除了传统的粗糙元几何参数如平均建筑高度、迎风面积系数和水平面积系数外, 平均水平动量通量的垂直廓线还受最高建筑高度和建筑高度标准差的影响, 并在 Macdonold^[27] 的计算方法为基础, 提出了包含上述 5 个几何参数的动力学粗糙度计算经验公式:

$$\frac{z_d}{z_{Hmax}} = c_0 X^2 + (a_0 \lambda_p^{b_0} - c_0) X, X = \frac{\sigma_H + \overline{z_H}}{z_{Hmax}} \tag{9}$$

$$\frac{z_0}{z_{0mac}} = b_1 Y^2 + c_1 Y + a_1, Y = \frac{\lambda_p \sigma_H}{z_H}, 0 \leq Y \tag{10}$$

其中 z_{Hmax} 为最高建筑高度, 带下标的 a 、 b 和 c 为回归常数, σ_H 为建筑高度标准差, $\lambda_p = A_p/A_T$ 为建筑顶面积系数(A_p 为建筑物顶面积), 上划线表示平均值, z_{0mac} 为 Macdonold 方法计算的空气动力学粗糙度, 具体方法参考相关文献。

4 结果与讨论

4.1 徐家汇研究区域空气动力学参数分布情况

TVM 方法、Ra 方法和 Kanda 方法计算的徐家汇研究区域 16 个风向区间零平面位移 z_d 的分布情况如图 3 所示, 并与建筑物几何参数(图 1) 进行对比分析。 z_d 随风向的变化趋势上 Ra 方法与 Kanda 方法较相近, 相关系数 $R^2 = 0.81$, 但差值平均值占 Kanda 方法 z_d 平均值的 52.9%; 两种形态学方法与 z_H 、 σ_H 有较明显的正相关关系, Kanda 方法 z_d 与 z_H 的相关系数 $R^2 = 0.83$ (图 4b), z_d 与 σ_H 的相关系数 $R^2 = 0.97$ (图 4c), Ra 方法结果类似。说明两种形态学方法均体现与 z_H 、 σ_H 成正比的关系。 12~32° 附近三种方法均认为零平面位移 z_d 较大, 与对应方向有多栋 100 m 以上高楼的特征一致。明显的差异是 Ra 方法与 Kanda 方法均认为铁塔东面 z_d 略高于西面, 而 TVM 方法结果与之相反, 铁塔东、西面均为商住混合区(图 1), 但从建筑几何参数分布(图 4)看, 西面的 σ_H 分布小于东面, 而 λ_p 略高于东面, 即铁塔西面建筑较东面整齐且密度较大, 对比 TVM 方法结果与 λ_p (图 4), 其相关系数 $R^2 = 0.73$ 。此外, 340~12° 方

向建筑较少,Ra 方法和 Kanda 方法均得出较小的 z_d ,与该区域特征相一致,而 TVM 方法则得出高值。TVM 方法仅计算不稳定条件下的 z_d ,同时方法参数的选取、稳定度参数阈值选择、风速大小导

致的源区变化等因素均可能影响计算结果;形态学方法不受大气稳定度和风场影响,但依赖于下垫面粗糙元几何形态数据采集区域大小、准确性,以及计算方法设计合理性。

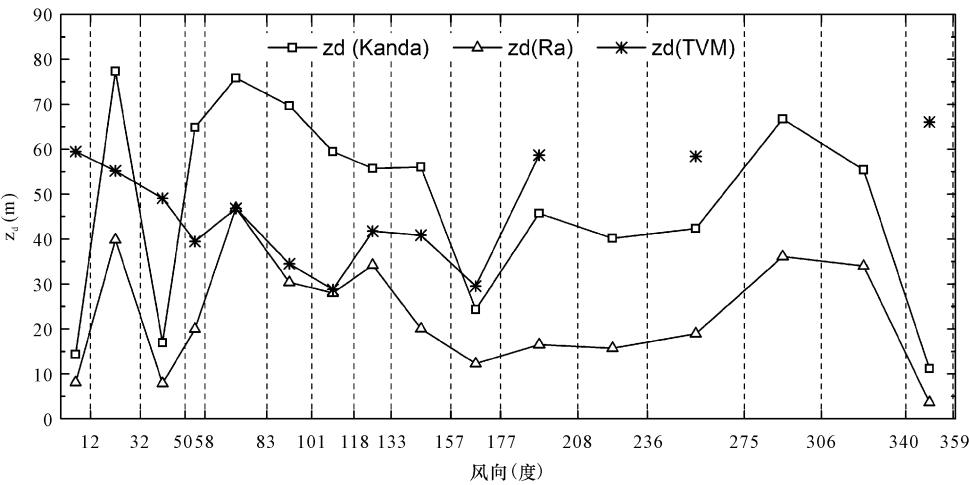


图3 TVM 方法、Ra 方法和 Kanda 方法计算的 2012 年 12 月—13 年 11 月徐家汇研究区域各风向区间零平面位移 z_d 的分布情况 虚线为 16 风向区间划分示意,下同。

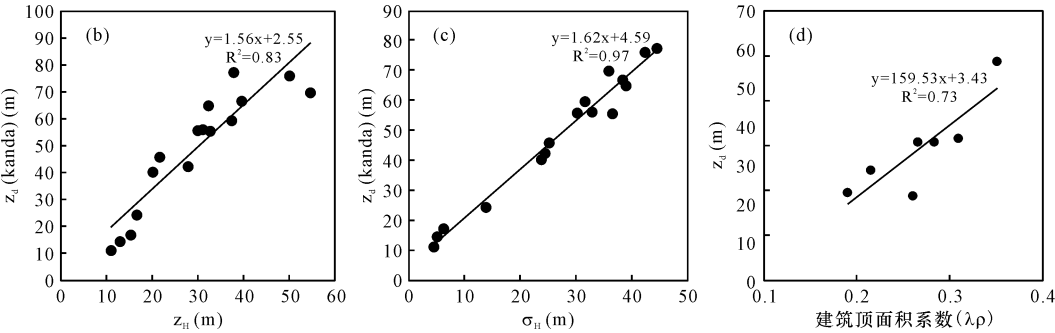
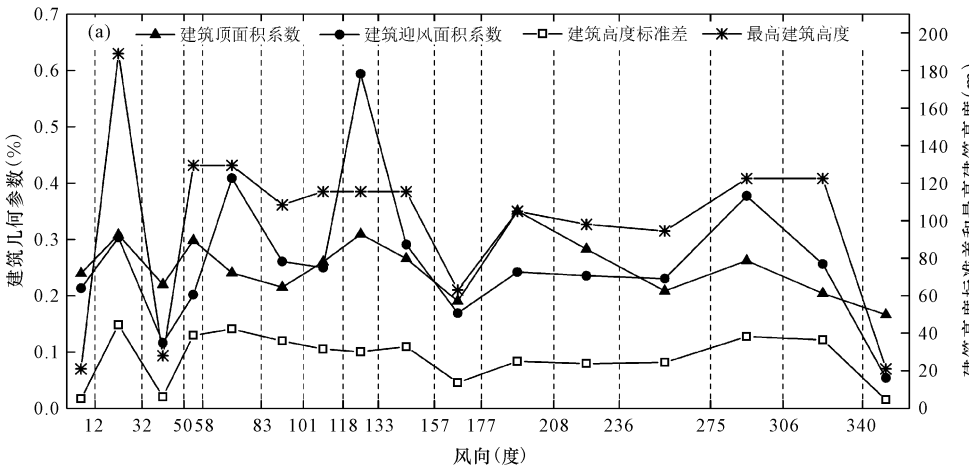


图4 z_d 计算结果与徐家汇研究区域建筑几何参数的对比分析 a. 徐家汇研究区域内建筑顶面积系数、

迎风面积系数、高度标准差和最高建筑高度分布情况;b. 各风向 Kanda 方法计算的 z_d 与平均建筑高度的线性关系;c. 各风向 Kanda 方法计算的 z_d 与建筑高度标准差的线性关系;d. 58 ~208 °TVM 方法计算的 z_d 与建筑顶面积系数的线性关系。

利用 TVM 方法计算的 z_d (图 3), 分别通过 Es 方法和 Su 方法计算研究区域 16 个风向区间的动力学粗糙度 z_0 , 并与 Ra 方法和 Kanda 方法进行对比。如图 5 所示, 从 z_0 随风向的变化趋势上看, Ra 方法与 Kanda 方法相似, 相关系数 $R^2=0.80$, 与 z_d 情况类似; 而 Es 方法与 Su 方法相似, 相关系数 $R^2=0.94$ 。Es 与 Su 方法分别基于安装高度相差 4 m 的超声风速计和三杯风速计观测资料, 两者分

布趋势相近验证了计算结果合理性。四种方法均认为 $50 \sim 157^\circ$ 附近 z_0 较大, 而 $340 \sim 12^\circ$ 附近 z_0 最小, 与研究区域东-东南方向为高层商住混合区、西北方向为学校操场等较开阔区域的特征基本一致; 而 $12 \sim 32^\circ$ 附近动力学方法与形态学方法存在明显差异。Es 方法在 $50 \sim 177^\circ$ 明显高于其他三种方法。

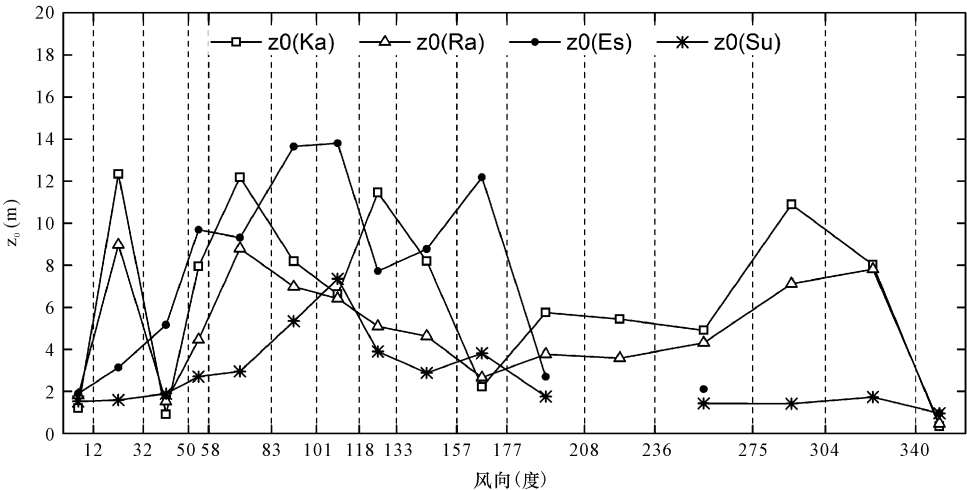


图 5 Es 方法、Su 方法、Ra 方法和 Kanda 方法计算的动力学粗糙度 (m) 在各风向区间的分布情况

4.2 动力学方法影响分析

4.2.1 TVM 方法参数设置影响分析

TVM 方法进行 z_d 的计算过程中涉及 C_1 、 C_2 和 C_3 三个参数, 而参数 C_2 由 C_1 和 C_3 确定, 因此通过选取不同的 C_1 和 C_3 进行计算, 分析 TVM 方法的不确定性, 其结果如图 6 所示。TVM 方法计算的 z_d 与参数 C_1 成反比, 而与 C_3 成正比, 前者对 z_d 的影响更为显著。当 $C_1=0.95$, C_3 由 -3.5 增大至 -2.5 (增大 28.6%) 时, z_d 平均增大 5.7 m, 占 z_d 平均值的 11.4%, 两组 z_d 相关系数 $R^2=0.99$ (图 7(a)); 而当 $C_3=-3.5$, C_1 由 0.95 增大至 1.05 (增大 10.5%) 时, z_d 平均减小 10.4 m, 平均变化率 20.7%, 两组 z_d 相关系数 $R^2=1.0$ (图 7b)。同时, 式(1)等号左右之差的均方根随 C_3 的增大而减小, 以风向区间 $157 \sim 177^\circ$ 的均方根为例, 当 $C_1=0.95$, C_3 为 -3.5 和 -2.5 时, 对应均方根最小值分别为 0.210 1 和 0.207 0, 等式两边均方根最小值随 C_3 的增大而减小, 即 C_3 越大, 等

式两边越接近, 与 Grimmond^[1] 和 Roth^[25] 的研究结果一致。

4.2.2 稳定度参数阈值影响分析

TVM、Es 和 Su 方法适用于不同稳定条件, 稳定度的判定直接影响计算时的数据样本。通过选择不同稳定度参数阈值, 分析其对三种动力学方法结果的影响。国内学者在利用 TVM 方法分析森林^[9] 和城市^[7-8] 下垫面空气动力学参数时, 常依据 $\zeta < 0$ 筛选不稳定条件数据, 因此设置实验方案一为 $-2.0 < \zeta < -0.1$, 方案二为 $-2.0 < \zeta < 0$, 对比方案为 $-2.0 < \zeta < -0.2$, 对比不同稳定度参数阈值对 TVM 方法的影响。试验结果如图 8a 所示, 除 $50 \sim 101^\circ$ 外, 三个方案计算结果随风向的分布趋势相近, 其中方案一与对比方案结果差异较小, 相关系数 $R^2=0.99$, 而方案二大于方案一和对比方案。近中性条件数据样本 ($0.1 \leq \zeta < 0$) 的加入使 TVM 方法结果发生明显的增大。式(3)等号左右两边之差的均方根亦随 ζ 上限的增加而增

大,各风向均方根的平均值分别为:对比方案 0.524 5,方案一 0.681 9,方案二 1.744 5;即越趋于不稳定条件,等式两边越接近。当近中性阈值范围变窄(图 8b、8c),Es 和 Su 方法结果变化不明显。

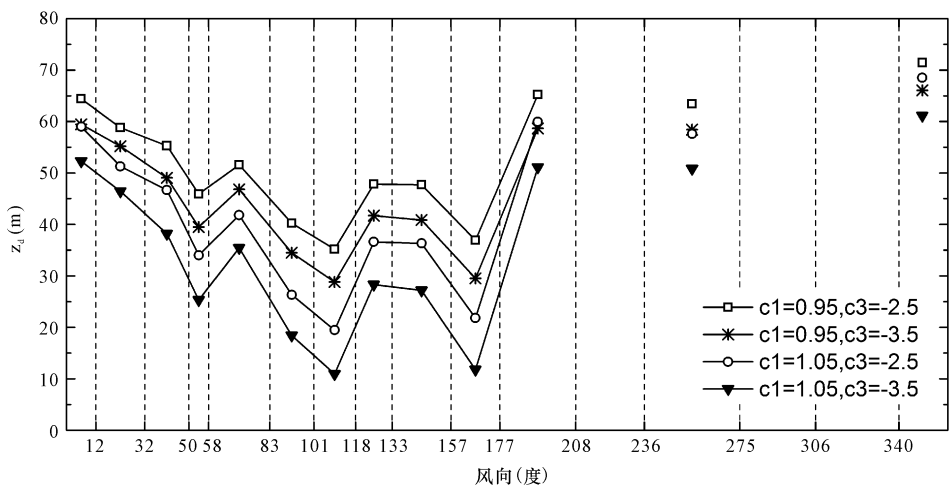


图6 TVM方法中参数 C_1 分别取值0.95和1.05、 C_3 分别取值-3.5和-2.5时,徐家汇研究区域内各风向零平面位移 z_d 的分布

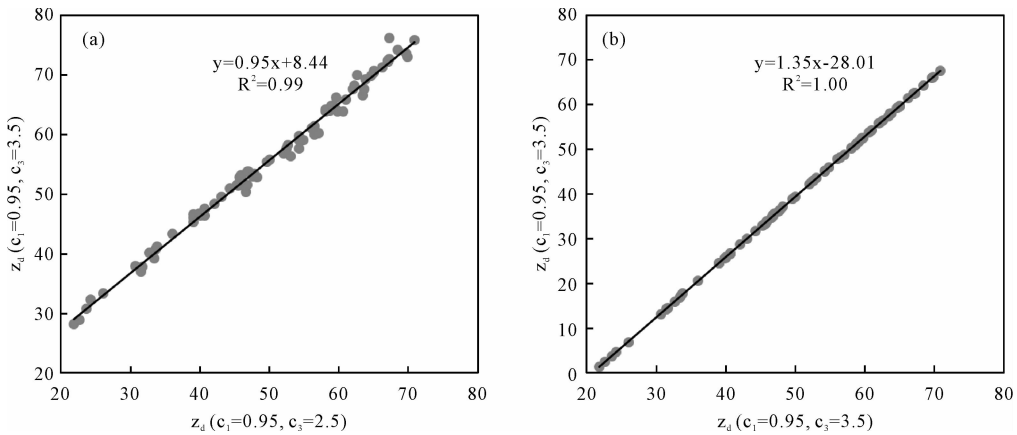


图7 TVM方法参数 $C_1=0.95$ 、 C_3 分别取值-3.5和-2.5时,各风向零平面位移 z_d 的线性关系(a)及 $C_3=-3.5$ 、 C_1 分别取值0.95和1.05时,零平面位移 z_d 的线性关系(b)

4.2.3 风速影响分析

根据痕迹理论^[28],非均一下垫面上通量浓度等观测结果受上游下垫面影响,且该影响区域随风速变化。通过分析空气动力学参数随风速大小的变化关系,并与GIS资料对比,讨论本文研究区域动力学粗糙度代表性与风速的关系。根据2012年12月—2013年11月徐家汇超声风速仪观测资料分析结果,91%的风速集中在2~4 m/s,平均风速约为3 m/s。因此,设计方案一取平均风速2~3 m/s的数据,方案二取平均风速3~6 m/s的数

据。结果如图9所示,两种方案TVM方法计算的 z_d 在数值和随风向的变化趋势上均有较大的差异,其中方案二在58~118°方向TVM方法无解;而Es方法计算的 z_0 差别不明显。同时,TVM方法计算的 z_d 有随风速的增大而减小的趋势,其中118~157°方向降幅最大,对照建筑物分布,上述方向距铁塔约1 km处为上海体育馆、体育场的低密度、开阔区域,与500 m半径范围内高层商住混合区密集的特征相比有明显变化,说明TVM方法用3~6 m/s的风速资料计算的 z_d 能够表征上游1

km 附近的下垫面特征,已超出了本文的研究区域。而 Es 方法计算的 z_0 随风速变化不明显,根据

式(4),或因观测高度 z_s 与零平面位移 z_d 之差或许对 z_0 的影响更大所致,需要进行进一步讨论。

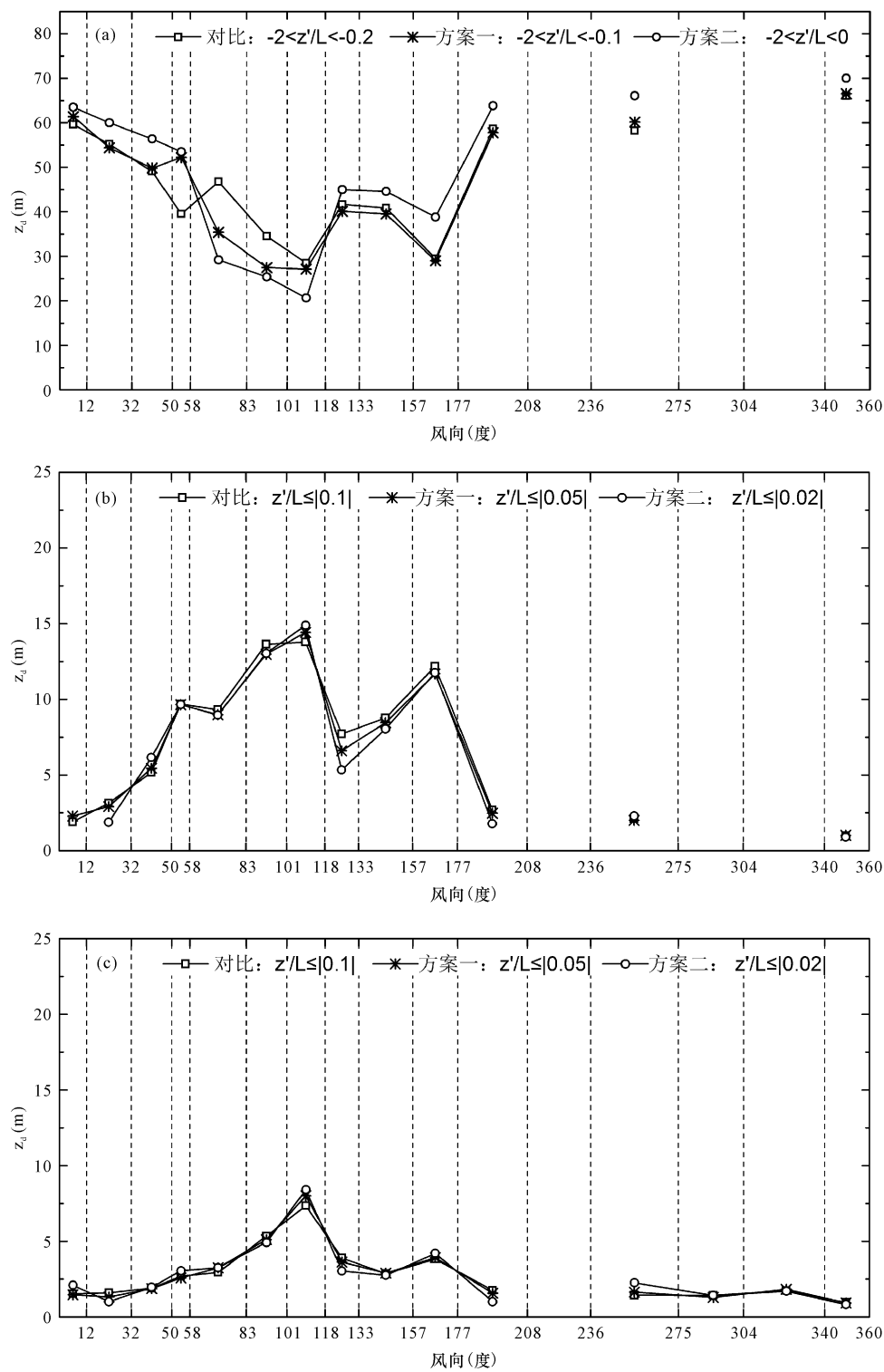


图 8 稳定度参数 ζ 阈值对三种动力学方法的影响 a. TVM 方法; b. Es 方法; c. Su 方法。

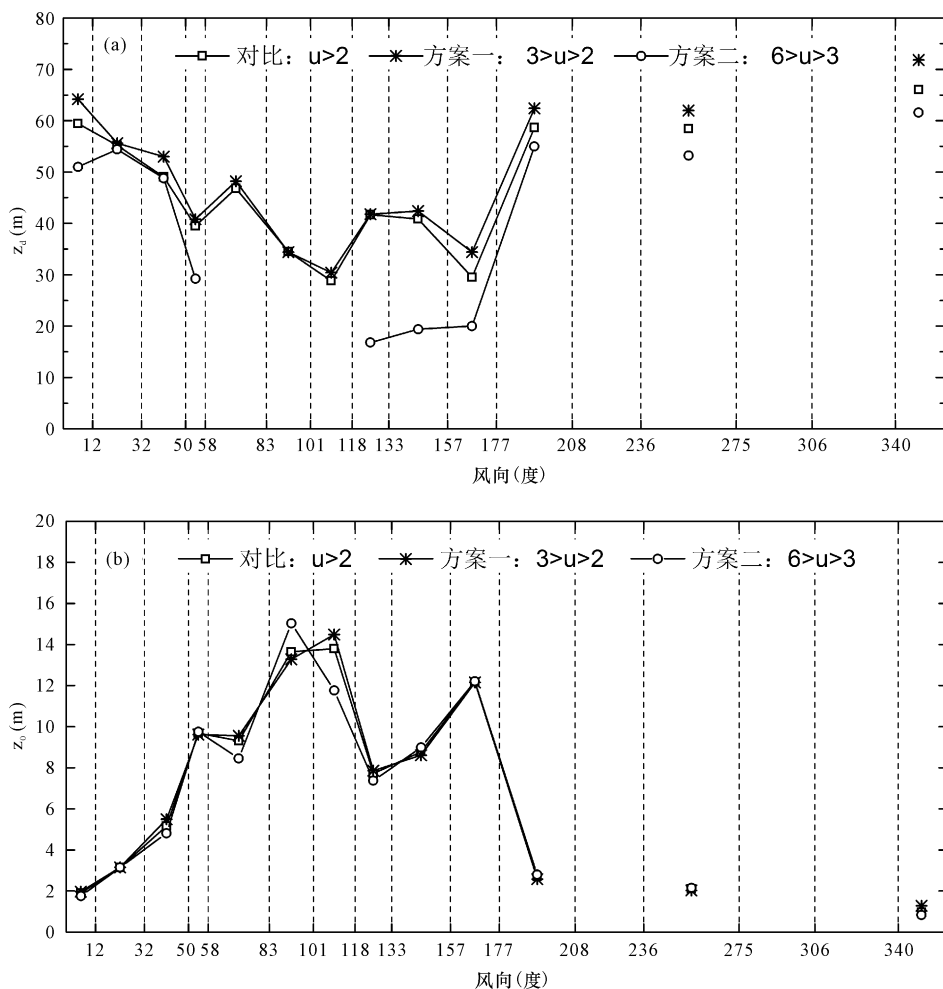


图9 TVM方法(a)和Es方法(b)风速敏感性试验对比分析

4.2.4 Es方法和Su方法对 z_d 的敏感性分析

Es方法和Su方法计算动力学粗糙度 z_0 时需要引入零平面位移 z_d ,根据实际可获取的资料, z_d 可由动力学方法如TVM方法计算,或者由形态学方法提供,因此设计实验分析上述两种计算方法对 z_d 的敏感程度。方案一采用TVM方法计算的 z_d ,方案二采用Ra方法计算的 z_d ,方案三采用Kanda方法计算的 z_d 。

三个方案下Es方法(图10a,见下页)和Su方法(图10b)的 z_0 分布差异显著,各风向分布趋势上 z_0 与 z_d 呈负相关趋势。以157~177°区间为例, z_d 的计算结果从小到大依次为:Ra方法、Kanda方法和TVM方法(图3),而通过Es方法计算得的 z_0 则正好相反,方案一大于方案三大于方案二;Su方法的计算结果与Es方法类似。零平面位

移 z_d 为粗糙元顶层附近、气流与下垫面相互作用发生的高度,动力学粗糙度 z_0 为这一高度之上的物理属性,从式(3)、式(4)可以看到 z_d 和 z_0 存在负相关可能,赵晓松等^[29]在对长白山阔叶红松林的研究中,也出现零平面位移和粗糙度呈现负相关关系的情况。

5 结 论

基于2012年12月—2013年11月上海徐家汇气象铁塔风和湍流观测数据以及铁塔周围半径500 m范围的建筑物几何信息,分别利用TVM方法、Es方法、Su方法、Ra方法和Kanda方法计算了16个风向区间的零平面位移 z_d 和动力学粗糙度 z_0 ,重点讨论了三种动力学方法的影响因素,得到以下结论。

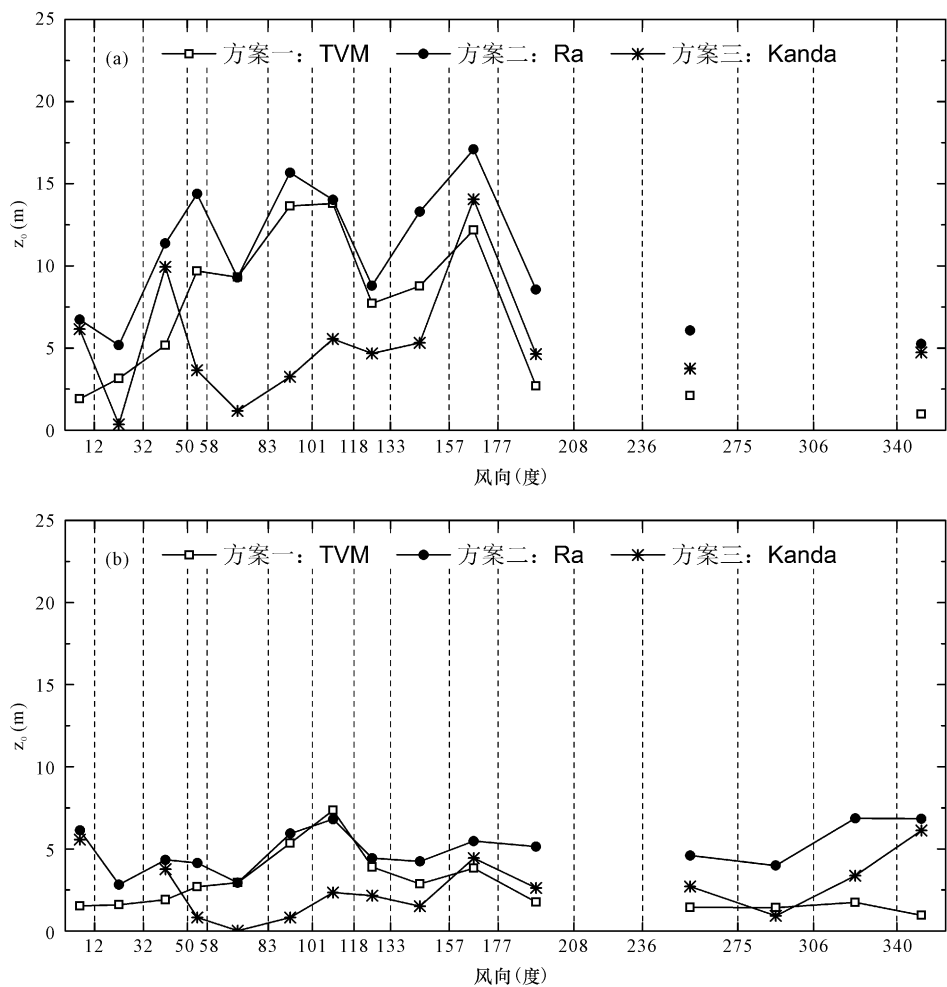


图 10 Es 方法(a)和 Su 方法(b) z_d 敏感性试验对比分析

(1) 基于建筑物高度数据和 GIS 信息的 Ra 和 Kanda 两种形态学方法计算结果随风向的分布趋势相近, 两者 z_d 的相关系数 $R^2 = 0.81$, z_0 的相关系数 $R^2 = 0.80$; 而基于徐家汇铁塔超声风速计和三杯风速计风观测资料的 Es 和 Su 两种动力学方法计算结果随风向的分布趋势也相近, z_0 相关系数为 $R^2 = 0.94$; 但动力学方法与形态学方法间差异较明显, TVM 方法计算的 z_d 与建筑高度 z_h 的分布存在差异, 但在 $58 \sim 208^\circ$ 与建筑顶面积系数 λ_p 呈现正相关, 相关系数 $R^2 = 0.73$ 。

(2) TVM 方法、Es 方法和 Su 方法的主要影响因素各不相同。参数 C_1 和 C_3 、稳定度参数阈值及风速大小对 TVM 方法影响较明显, 其中 z_d 与参数 C_1 成反比, 而与 C_3 成正比, 当 C_1 平均增大 28.6% 时, z_d 平均增大 11.4%, 而当 C_3 平均增大 10.5% 时, z_d 平均减小为 20.7%; 近中性条件数据

样本 ($0.1 \leq \zeta < 0$) 的加入使 TVM 方法结果发生明显增大, 即越趋于不稳定条件, 式 (3) 等号两边越接近; z_d 随风速的增大有减小趋势, 各风向的分布也发生改变, 能够表征上游更远区域的下垫面特征。Es 方法和 Su 方法主要受 z_d 的影响, 同时 z_0 与 z_d 呈现负相关趋势, 这一现象还需要更多的观测资料加以验证; 稳定度参数和风速的影响较不明显。

(3) 本文仅计算分析了徐家汇研究区域空气动力学参数的分布情况, 同时由于资料限制形态学方法的计算和分析对象为以徐家汇铁塔为中心、半径 500 m 范围的区域, 未来将对上海其他铁塔站点资料进行计算和对比, 延长观测资料时间序列, 同时调整研究区域半径, 验证和积累更多有效特征参数的同时探讨更适合大型城市下垫面特征参数计算的动力学或形态学方法。

参 考 文 献:

- [1] GRIMMOND C S B, KING T S, ROTH M, et al. Aerodynamic roughness of urban areas derived from wind observations[J]. *Boundary-Layer Meteor*, 1998, 89(1): 1-24.
- [2] 陈家宜, 王介民, 光田宁. 一种确定地表粗糙度的独立方法[J]. *大气科学*, 1993, 17(1): 21-26.
- [3] SOZZI R, FAVARON M, GEORGIADIS T. Method for the estimation of surface roughness and similarity function of wind speed vertical profile[J]. *J Appl Meteor*, 1998, 37(5): 461-469.
- [4] THOM A S. Momentum absorption by vegetation[J]. *Quart J Roy Meteor*, 1971, 97(414): 414-428.
- [5] KUSTAS W P, BRUTSAERT W. Wind profile constants in a neutral atmospheric boundary layer over complex terrain[J]. *Boundary-layer Meteor*, 1986, 35(1): 35-54.
- [6] ROTACH M W. Determination of the zero plane displacement in an urban environment[J]. *Boundary-Layer Meteor*, 1994, 67(1): 187-193.
- [7] 张宏升, 陈家宜. 非单一水平均匀下垫面空气动力学参数的确定[J]. *应用气象学报*, 1997, 8(3): 310-315.
- [8] 高志球, 卞林根, 逯昌贵, 等. 城市下垫面空气动力学参数的估算[J]. *应用气象学报*, 2002, 13(特刊): 26-33.
- [9] 周艳莲, 孙晓敏, 朱治林等. 几种典型地表粗糙度计算方法的比较研究[J]. *地理研究*, 2007, 26(5): 887-896.
- [10] WMO. Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation (The Seventh Edition)[R]. 2006: C5-12.
- [11] 张文煜, 张宇, 陆晓静, 等. 黄土高原半干旱非均一下垫面粗糙度分析[J]. *高原气象*, 2009, 28(4): 763-768.
- [12] 张文煜, 刘欣, 张宇, 等. 河西地区两种计算粗糙度方法的差异性[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2011, 47(3): 40-43.
- [13] 胡文超, 张文煜, 张宇, 等. 河西走廊下垫面粗糙度实测值与模拟值的差异性分析[J]. *高原气象*, 2010, 29(1): 51-55.
- [14] GRIMMOND C S B, OKE T R. Aerodynamic properties of urban areas derived from analysis of surface form[J]. *J Appl Meteor*, 1998, 38(9): 1 262-1 292.
- [15] RAUPACH M R. Simplified expressions for vegetation roughness length and zero-plane displacement as functions of canopy height and area index[J]. *Boundary-Layer Meteor*, 1994, 71(1): 211-216.
- [16] KANDA M, INAGAKI A, MIYAMOTO T, et al. A new aerodynamic parametrization for real urban surfaces[J]. *Boundary-Layer Meteor*, 2013, 148(2): 357-377.
- [17] 彭珍, 胡非. 北京城市化进程对边界层风场结构影响的研究[J]. *地球物理学报*, 2006, 49(6): 1 608-1 615.
- [18] 邱传涛, 李丁华. 平均风向的计算方法及其比较[J]. *高原气象*, 1997, 16(1): 94-98.
- [19] 苗世光, 窦军霞, Chen F 等. 北京城市地表能量平衡特征观测分析[J]. *中国科学: 地球科学*, 2012, 42(9): 1 394-1 402.
- [20] GRIMMOND C S B, SALMOND J A, OKE T R, et al. Flux and turbulence measurements at a densely built-up site in Marseille: Heat, mass (water and carbon dioxide), and momentum[J]. *J Geophys Res*, 2004, 109: D24101.
- [21] GARRAT J R. The Atmospheric Boundary Layer[M]. Cambridge University Press, 1992, 316.
- [22] TILLMAN J E. The indirect determination of stability, heat, and momentum fluxes in the atmospheric boundary layer from simple scalar variables during dry unstable conditions[J]. *J Appl Meteor*, 1972, 11(5): 783-792.
- [23] FORTUNIAK K, PAWLAK W, SIEDLECKI M. Integral turbulence statistics over a central European city centre[J]. *Boundary-Layer Meteor*, 2013, 146(2): 257-276.
- [24] WYNGAARD J C, COTÉ O R, IZUMI Y. Local free convection, similarity, and the budgets of shear stress[J]. *J Atmos Sci*, 1971, 28(7): 1 171-1 182.
- [25] ROTH M. Turbulent transfer relationships over an urban surface. II: Integral statistics[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1993, 119: 1 105-1 120.
- [26] BELJAARS A C M, SCHOTANUS P. Surface layer similarity under nonuniform fetch conditions[J]. *J Appl Meteor*, 1983, 22(10): 1 800-1 810.
- [27] MACDONALD R W, GRIFFITHS R F, HALL D J. An improved method for the estimation of surface roughness of obstacle arrays[J]. *Atmos Environ*, 1998, 32(11): 1 857-1 864.
- [28] 蔡旭晖. 湍流微气象观测的痕迹分析方法及其应用拓展[J]. *大气科学*, 2008, 32(1): 123-132.
- [29] 赵晓松, 关德新, 吴家兵, 等. 长白山阔叶红松林的零平面位移和粗糙度[J]. *生态学杂志*, 2004, 23(56): 84-88.

ESTIMATION AND ANALYSIS OF AERODYNAMIC PARAMETERS
FOR A TYPICAL LARGE CITY

TANG Yu-qi¹, TAN Jian-guo^{1, 2}, GRIMMOND C S B^{1, 3}, CHANG Yuan-yong¹, AO Xiang-yu¹

(1. Shanghai Institute of Meteorological Science (Shanghai Satellite Remote-Sensing and Application Centre),
Shanghai 200030, China; 2. Shanghai Key Laboratory of Meteorology and Health, Shanghai 200030, China;
3. Department of Meteorology, University of Reading, Reading, RG6 6BB, UK)

Abstract: It is an obvious problem that few studies are conducted despite accelerated urbanization process and increased land-atmosphere interaction in typical mega – cities of China. Different methods for calculating aerodynamic parameters are evaluated for a site with tall buildings (>39.5 m mean height) in Xujiahui, Shanghai. Meteorological observations and morphometric data were both used in this study, with the former analyzed for the period from December 2012 to November 2013, and later collected for an area with a 500 m radius centered on the Xujiahui tower. The results show that zero-plane displacement (z_d) calculated by the temperature variance method (TVM) has a different variation in various wind directions from building height, but has a similar trend from 58 ° to 208 ° to the plane area index ($R^2=0.73$). The TVM method is sensitive to empirical parameters, stability range, and wind speed. The standard of wind speed method (Su) and eddy correlation stress method (Es) have similar variations of roughness length for momentum (z_0) with wind direction, and are inversely proportional to z_d input. There are obvious differences both in values and spatial patterns between the aerodynamic and morphometric methods. The source area of measurements and the study site of morphometric methods have obvious impact on estimation and analysis.

Key words: aerodynamic parameter; typical large city; aerodynamic method; morphometric method; influence factors