

城市冠层植被大气环境特性大涡模拟

严超, 崔桂香, 张兆顺

清华大学工程力学系, 北京 100084

摘要 植被通过生物物理过程影响着周围微气候环境, 对于城市植被环境流动的研究需要建立合理的植被模型。本研究发展了一套适于模拟植被边界层流动的大涡模拟数值方法, 并通过水平均匀模型植被算例对其进行了验证。在此基础上, 对空气流过三维非均匀分布钝体元阵列模型植被进行了大涡模拟, 并将不同植被数值模型的计算结果与相应的风洞实验数据进行了比较。结果表明, 树干部分采用刚性圆柱模拟、树冠用阻力模型的“阻力冠”方法相比于传统的“阻力元”方法能更好反映植被流动的影响。

关键词 植被下垫面; 大涡模拟; 环境流动; 植被模型

植被是地球生态系统中重要的组成元素, 地球表面约有30%的土地被植被所覆盖, 主要植被类型有森林和农作物^[1]。植被作为碳、水汽等标量的源和汇, 直接影响全球碳、水循环。此外, 植被通过光合作用和蒸腾作用等生物物理过程与周围大气之间不断进行着物质、动量和热量的湍流交换, 从而决定了局部地区风、温、湿等气象参数的空间分布和时间演化^[2]。例如, 在城市生态环境中, 植被冬季可用于阻挡冷空气, 夏季用于遮阳, 蒸散降温, 从而产生温湿条件适宜的局地环境。因此, 预测城市大气环境需要考虑植被对周围环境流动的综合影响。准确理解植被与大气之间相互作用, 将其中的湍流交换过程建立合理的参数化方案, 对改进城市冠层模型、改善城市大气环境具有重要意义^[3]。

1 研究背景

国际上已有相关场地实验长期测量植被与大气之间的湍流通量, 如FLUXNET^[4]、CHATS^[5]等, 以期预测大气边界层内气象参数演化特征。但实验测量往往局限于有限的空间位置, 合理分析观测结果需要获知植被冠层及其周围流动动力学特征。

从流体力学角度分析, 大气流过植被下垫面时, 由于植被地表物理性质特殊, 在植被冠层内部及其周围会形成运动性质不同于其他地表的流动区域, 称为植被边界层, 它表示大气与下垫面相互作用的区域, 厚度大约为1~2 km^[6]。依据边界层内流动规律的不同, 可以从地表至上层大气将边界层

依次划分为植被冠层、粗糙子层、惯性子层和充分混合层^[7] (图1)。当前, 科学界对惯性子层和充分混合层内流动规律的理解已经比较清楚, 但对于植被冠层和粗糙子层内植被与大气如何相互作用的研究仍然比较缺乏。这主要是由于绝大多数人为活动发生在城市冠层, 并直接影响到粗糙子层, 致使其中的湍流运动十分复杂, 难以准确预测。

在一般的城市大气环境中, 城市冠层是位于城市边界层最底层, 由建筑、陆地、植被覆盖所产生的微气候区域。植被和建筑是城市用地的主要方式, 二者的相对覆盖面积根据城市中土地利用方式的不同而有所不同。由于植被和建筑的物理性质不同(辐射、比热、含水量), 二者耦合所引起的城市边界层内流动的动力、热力特性更加复杂, 并伴随有特殊现象出现, 如“城市热岛”效应, 即城市地区的气温要高于郊

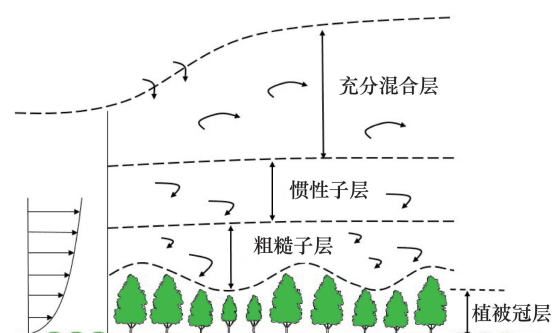


图1 植被边界层分层模型

Fig. 1 Boundary layer model of vegetation

收稿日期: 2016-11-22; 修回日期: 2016-12-17

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(11132005)

作者简介: 严超, 博士研究生, 研究方向为流体力学, 电子邮箱: yan-c11@mails.tsinghua.edu.cn; 崔桂香(通信作者), 教授, 研究方向为流体力学, 电子邮箱: cgx@mail.tsinghua.edu.cn

引用格式: 严超, 崔桂香, 张兆顺. 城市冠层植被大气环境特性大涡模拟[J]. 科技导报, 2017, 35(3): 51-56. doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2017.03.005

区。而城市中植被下垫面能增加城市地表降雨的渗透和蒸散,通过改善地表辐射平衡及冠层内感潜热能量分配等机制能有效改善城市热岛效应。

作为简化处理,在场地观测实验数据分析以及大尺度气象模式预测中,将地表视为一类粗糙表面,通过引入地表粗糙参数来反映其对上层大气的整体影响,其中地表处湍流流量(动量通量、热通量和水汽通量)根据近地层莫宁-奥布霍夫(M-O)相似理论作出估计。这种方法显然过度简化,实际城市地表处湍流流量随地表类型不同会发生显著变化,而且M-O相似理论不能获得城市冠层及其周围复杂的流动结构和流动规律,无法解释冠层内的特殊流动现象,如标量和动量的逆梯度输运现象等^[8-9]。另外一种稍为精细的方法是采用城市冠层模式研究复杂城市环境,即通过分别建立不同类型地表的能量平衡关系获得城市冠层内的温度场和水汽场等物理量^[10]。但这种方法通常是假定冠层内平均速度已知,无法获知冠层内部的流动及湍流统计特征。

本质上,植被与大气之间的湍流交换过程是一个多尺度结构融合的物理过程。大气在绕流植被时,在其周围会形成不同尺度的剪切层,包括植被叶片尺度量级、植被树干尺度量级、植被冠层尺度量级以及植被边界层尺度量级。每一种尺度的剪切层,都会由于失稳而诱发产生不同的流动结构,这种流动结构决定了植被与周围大气之间的湍流动量和标量输运^[11]。由于植被分布形式多样、流动结构特征尺度不一,在植被冠层和粗糙子层内不存在普适的相似律,只能对具体流动问题进行针对性的分析。

其次,发生在植被边界层中的动力过程、热力过程和标量输运过程是多物理耦合过程。一般而言,植被冠层及其上方空间内气象要素的分布,如风速、温度、湿度以及标量浓度等,是湍流交换和标量源汇分布之间平衡的结果^[12]。但标量源和汇的分布及强度受多方面因素影响,如太阳辐射、周围环境温湿度以及相关生态过程。而且,植被边界层中温度分层和水汽分布会对冠层内外湍流场产生明显影响^[13]。以一般的城市生态系统为例(图2),植被叶片吸收太阳短波辐射,并

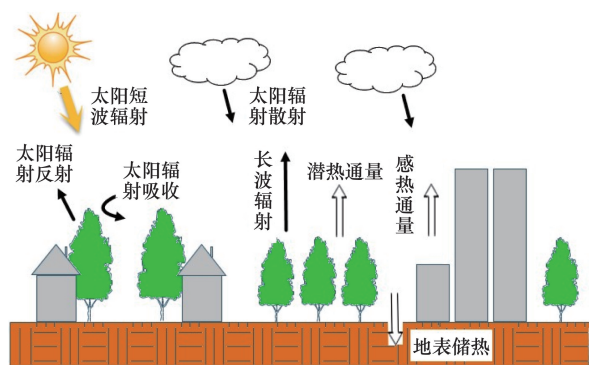


图2 城市植被环境能量平衡关系示意

Fig. 2 Energy balance relationship of urban vegetation environment

通过蒸腾作用将根系中的水分传输至叶片气孔处,由大气湍流运动引起热量和水汽向冠层内以及冠层上方空气输运,导致植被与大气之间不断进行着感热交换和潜热交换,从而影响冠层内外温度和水汽分布。实际上,感热和潜热是影响局部天气气候的重要决定因素^[14],它们之间满足植被生态系统的能量平衡关系:

$$R_n = H + \lambda E + G + P \quad (1)$$

该式建立了地表气象参数与空气气象参数之间的联系,其中净辐射 R_n 与感热 H 、潜热 λE 、植被内部储热 G ,以及光合作用和蒸腾作用消耗热 P 相平衡,能量平衡关系中各物理项的相对比重不同反映不同类型植被对局部天气气候的影响。太阳辐射吸收的空间非均匀性及大气不稳定性也会影响冠层湍流。

以上所述反映了研究植被—环境相互作用的主要困难所在。目前,研究植被环境流动的主要方法包括理论分析^[15-16]、场地实验^[4-5]、风洞和水槽实验^[17-18]以及数值模拟^[19-20]。由于城市植被环境流动一般处于湍流状态,控制方程高度非线性,理论上分析往往需要引入诸多假设,虽然结果具有普适性但仅限于简单情形。场地或风洞实验虽然可以给出可靠的结果,但投入开销大,且测量数据往往局限于有限的空间位置,无法给出全场的三维流动图像。当前,随着计算机技术的迅速发展,研究者更多的采用数值方法来研究植被环境流动。

由于植被元素(树叶、树枝、树干)近似随机分布,导致几何建模十分复杂,研究必须基于一定假设和近似。通过引入反映植被结构特征的简化模型,本研究采用大涡模拟方法模拟研究三维植被下垫面周围环境流动特征。

2 植被环境流动特性研究现状

由于植被的阻力作用,边界层内流向速度剖面会在植被冠层顶部位置处出现拐点。由于含有拐点的速度剖面容易失稳,由此演化形成流动相干结构,它主导着植被与周围环境流体之间的湍流交换过程。大量的数值计算和场地实验都已经证实,粗糙子层内流动主要由大尺度相干结构起主导作用,其量级大致相当于植被冠层高度^[9]。

考虑到植被自身外形及其分布的复杂性,植被在实验中往往通过圆柱阵列作为简化物理模型。Brunet等^[21]通过分析水平均匀分布植被模型风洞实验中的单点流动统计量及功率谱,证实了大尺度相干结构在植被冠层与大气之间湍流交换过程中的重要性。Poggi等^[17]根据水槽激光多普勒测速实验结果,提出了植被冠层湍流结构模型。他们将植被边界层分为3层:第1层为底部区域,主要由圆柱尾流的卡门涡街主导;第2层中间区域位于冠层顶部附近,由Kelvin-Helmholtz(K-H)失稳生成的剪切结构主导;第3层为惯性子层,类似于粗糙边界层,这一层内流动由壁面附近大尺度结构主导。Bohm等^[22]在风洞实验中也得到了相似的结论,实验所采用的“黑森林模型植被”钝体元阵列,其中树干部分用圆柱模拟,

树冠部分用球状灯泡模拟,直径沿高度方向的变化类似真实树木情况。他们研究发现冠层顶部剪切结构与冠层内尾流结构相互影响。

植被湍流数值研究方面,一般通过在动量方程和标量方程中添加源项,反映植被对周围环境的影响。Aumond等^[23]将植被阻力项添加进中尺度气象模式中,发现这种植被模型表示方法相对于传统中尺度气象模式中采用的粗糙源方法,在稳定和中性大气条件下能够得到更好的模拟结果,而在不稳定条件下,由于湍流的强烈混合作用,这种改善效果不明显。

许多关于植被地表的研究均假定植被在水平方向分布均匀,而叶面积密度仅在高度方向存在变化。Shaw和Schumann^[24]最早采用大涡模拟方法(LES)模拟水平均匀植被下垫面周围环境流动,并考察了中性及弱不稳定大气条件下植被对大气流场的影响。由于受当时计算条件限制,他们模拟的计算域高度仅延伸至3倍植被冠层高度,再加上顶部边界条件的影响,计算得到的风速剖面与观测值定性上符合,而在定量上存在偏差。Raupach等^[25]提出混合层类比假设,认为植被冠层顶部流动与平面混合层流动相似。他们分析得出,冠层顶部相干结构导致冠层周围下扫运动占主导,而在惯性子层区域,上抛逐渐占主导。苗世光^[26]、Dupont^[27]及Huang等^[28]分别采用LES在更大的计算域范围内考察了叶面积密度分布和叶面积指数对植被边界层内流场的影响。Dupont发现随着植被分布密度的增加,冠层顶部流动结构愈加倾斜,该结构在冠层内部穿透深度减小,导致湍动能和动量通量在冠层内衰减愈加迅速,而且植被树冠部分相较于树干部分对流场影响更加明显。Finnigan等^[19]考察了冠层顶部流动结构形式,他们根据LES的计算结果提出了双发卡涡结构模型,这种模型能够很好的解释实验观测到的结果。

这种水平均匀植被模型的不足之处在于它忽略了植被元素所占空间体积,不能分辨植被冠层内部的尾流流动,因而不能准确预测植被与上层大气之间的通量交换。此外,植被阻力模型中的阻力系数需要依据实验和经验取值。由于实际情况下,水平均匀植被下垫面只是理想模型,非均匀情况才是普遍存在的植被分布形式,研究者们也逐渐转向于研究各种非均匀模型植被对流动的影响。

Schlegel等^[29-30]通过激光扫描获取德国德累斯顿市一座森林的实际叶面积密度分布,采用LES研究中性条件下植被非均匀分布对流场的影响。他们将流动统计量与场地实验测量和水平均匀算例计算结果进行比较,发现植被与大气之间质量和动量传输过程与植被分布密度及分布形式密切相关,并得出结论,真实的植被叶面积分布是捕捉局部流动结构(复杂的上抛和下扫运动)、雷诺应力和湍动能的关键。Bailey等^[31]研究了稀疏植被非均匀分布形式对流场的影响,发现植被非均匀分布对高阶统计量影响更明显,而平均速度分布在均匀和非均匀分布植被情况下没有明显差别。还有部分研究者考察了其他形式非均匀分布植被的环境流动情况,如植被—空地边界^[32-33]和森林覆盖的丘陵^[34-35]等。

尽管以上植被模型考察了植被小尺度非均匀性对流动的影响,但这些研究并不能分辨植被元素的几何外形,因此无法获得植被尾流流动特征。Yue等^[36]结合植被的空间分布,分别考虑树冠和树干的影响,其中树冠部分仍采用传统阻力源模型,而树干部分则采用圆柱阻力模型进行计算。他们通过对比这种模型与传统阻力模型所得到的计算结果,发现这种模型的计算结果与实验符合更好,认为尾流结构对冠层内动量输运具有重要作用。

3 植被边界层流动的大涡模拟方法

3.1 大涡模拟控制方程

植被周围环境的流动过程遵循基本的物理定律,即质量守恒和动量守恒等规律。本研究假定植被周围空气流动采用不可压缩牛顿流体模型,温差产生的浮力效应采用Boussinesq假设计算。流动控制方程为过滤后的不可压缩连续方程和Navier-Stokes(N-S)方程:

$$\partial \tilde{u}_i / \partial x_i = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \tilde{u}_i \tilde{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \tilde{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\tau_{ij} + \nu \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} \right) + f_i \quad (3)$$

式中带上标“~”的变量表示过滤后可解尺度分量,分别表示流向、展向和垂向。 $x_i(x_1=x, x_2=y, x_3=z)$ 为 \tilde{x}_i 方向上的速度分量。 ρ 为空气密度, ν 为空气分子运动黏性系数, \tilde{p} 为过滤后的压力。 f_i 表示植被冠层对流场的阻力作用,它与植被叶面积密度分布 a ,阻力系数 C_D 和风速有关,可以表示为:

$$f_i = C_D a(z) U \tilde{u}_i \quad (4)$$

冠层阻力主要由压差阻力起主导作用,通过调节阻力系数大小以反映压差阻力和黏性阻力相对比重的变化。亚格子动量通量 $\tau_{ij} = \tilde{u}_i \tilde{u}_j - \widetilde{u_i u_j}$ 和亚格子标量通量 $\tau_{\alpha} = \tilde{u}_i \tilde{c} - \widetilde{u_i c}$ 表示不可解亚格子尺度对可解尺度的作用。

3.2 亚格子模式

LES采用可解尺度物理量对亚格子应力和亚格子通量建立亚格子模式,从而封闭方程。当前,对于植被边界层的模拟,所采用的亚格子模式主要有Smagorinsky模式、动力模式^[36]等。由于植被冠层内部会存在逆梯度扩散现象^[9],简单的Smagorinsky模式耗散过大,不能直接反映能量反传,因此本研究采用动力Lagrangian模式。这种模式沿着流体质点轨迹动态调整模式系数,适于计算复杂流动。

3.3 离散方法

本研究采用有限体积法离散大涡模拟控制方程,在同位网格上使用动量插值算法避免压力奇偶失连。对流项离散采用Quick格式,扩散项离散采用中心差分格式,时间方向采用四阶龙格-库塔格式推进,并通过SIMPLE算法保证连续性条件,复杂边界表面边界条件由虚拟网格浸没边界法实现。

3.4 统计平均方法

当流动计算达到稳定后,对流动物理量进行时空平均,定义时间平均运算

$$\bar{\phi}(x,t) = \frac{1}{T} \int_{t-T/2}^{t+T/2} \phi(x,t) dt \quad (5)$$

式中, $\phi = \bar{\phi} + \phi'$ 表示任一流体物理量, ϕ 为 ϕ' 的时间脉动量, $\bar{\phi}$ 为 ϕ 的时间平均值。进一步对流体物理量按空间平均, 定义 $\overline{\bar{\phi}}$ 为水平方向空间脉动量, $\langle \phi \rangle$ 为水平方向空间平均值, 可得

$$\langle \overline{\bar{\phi}} \rangle(x,t) = \frac{1}{V_j} \iiint_{V_j} \bar{\phi}(x,t) dV, \bar{\phi} = \langle \overline{\bar{\phi}} \rangle + \overline{\phi'} \quad (6)$$

平均体积 V_j 在垂直方向只占 1 个网格尺度大小, 从而保留物理量沿垂向的变化, 并已去除植被元素 (树叶、树干) 所占体积。

3.5 算例验证

采用 Shaw 和 Schumann^[24] 的算例——空气流经水平均匀森林下垫面的流动问题, 来验证数值方法的合理性, 森林高度为 20 m, 叶面积指数 $LAI=2$, 叶面积密度 $a(z)$ 仅随垂向变化,

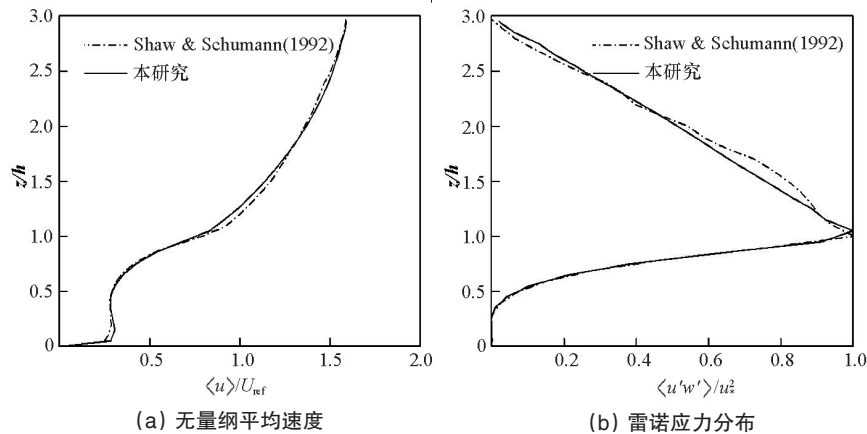


图3 水平均匀植被情况下无量纲平均速度和雷诺应力分布与Shaw等(1992)的比较

Fig. 3 Comparison of dimensionless mean velocity and Reynolds stress distribution with Shaw et al (1992) in horizontally homogeneous vegetation

4 刚性模型植被环境流动的大涡模拟

本研究采用大涡模拟方法计算了空气流过钝体元阵列模型植被下垫面的算例, 该模型的几何参数、空间分布及相应计算条件均与 Böhm 等^[22] 的风洞实验结果保持一致。这种模型植被的树干部分是由刚性圆柱模拟, 树冠部分是由刚性圆球模拟, 直径随高度的变化与一般的落叶林变化趋势一致。为简化起见, 在以下称这种植被模型为“柱干球冠”模型。对于这种模型植被周围流动的数值实现, 不采用阻力模型, 而是通过浸没边界法精确模拟。本研究同时模拟了另外 2 种植被模型的边界层流动, 分别称为“阻力冠”模型和“阻力元”模型, 以比较不同植被数值模型间的差别。其中“阻力冠”模型植被的树干部分仍沿用圆柱模拟, 树冠部分则采用阻力模型; 而“阻力元”模型对植被整体均采用阻力模型模拟。与“柱干球冠”方法相同, “阻力冠”和“阻力元”方法均考虑植被单元在空间的相对位置。

4.1 算例设置

如图 4(a) 所示, 长方体形计算域内种植有交错分布排列的钝体元阵列模型。该模型植被迎风面积指数 $\lambda_f=0.38$, 占地

计算域在流向、展向以及垂向分别为 192 m×96 m×60 m, 计算采用均匀网格, 网格间距为 2 m。水平方向采用周期边界条件, 顶部给定自由滑移不可穿透条件, 计算域底部为无滑移条件, 底部切应力根据 Obukhov 壁函数由第一层网格点速度确定。在每个时间步, 通过调整平均压力梯度项以保证流量保持不变。

从图 3 看出, 本研究的计算结果与 Shaw 等的结果符合较好, $\langle u \rangle / U_{ref}$ 为无量纲平均速度, $\langle u'w' \rangle / u_{ref}^2$ 为无量纲雷诺应力, z/h 为无量纲垂直高度, 因而本研究采用的计算模型和数值方法得到了很好的验证。由于顶部给定零通量条件和流向平均压力梯度的结果, 因此在植被冠层以上, 雷诺应力线性衰减到零值, 对于实际情形, 在植被冠层以上, 湍流动量通量的垂向梯度与实际的压力梯度平衡, 顶部会有动量通量卷吸进来, 在惯性子层会出现等通量层。

面积指数为 $\lambda_f=0.38$, 等效叶面积密度 ah (植被单位占地面积上所占迎风面积) 分布剖面如图 4(b) 所示。流动在流向和展向均采用周期条件, 以模拟分布广泛的植被群落。计算边界条件设定与验证算例相同。以冠层顶部平均速度 u_h , 冠层高度 h 定义的粗糙雷诺数 $Re=u_h h / \nu=4100 \sim 4200$ 。每个植被元素采用 24^3 个均匀网格分辨。

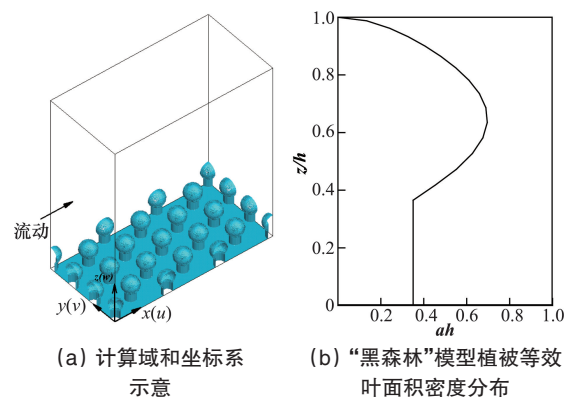


图4 大涡模拟计算条件

Fig. 4 Large eddy simulation

4.2 计算结果与分析

不同植被模型得到的平均流动和湍流二阶统计量的计算结果如图5所示, $\langle U \rangle / u_h$ 为无量纲平均流向速度, $\langle uw \rangle / u_h^2$ 为无量纲雷诺应力, $\langle \sigma_u \rangle / u_h$ 为无量纲流向速度脉动强度, $\langle \sigma_w \rangle / u_h$ 为法向速度脉动强度。由于“柱干球冠”模型利用浸没边界法精确分辨钝体元表面几何形状,能够精确分辨速度场在空间方向上的变化,其计算结果也与实验数据符合较好。但在“阻力冠”和“阻力元”方法中,由于其所采用的阻力模型仅在植被体内网格点处添加阻力,不能满足单元内速度为零值的条件,因此这两种方法会在不同程度上抹平速度在空间方向上的梯度变化,无法准确考虑植被非均匀分布特性对流动的影响。

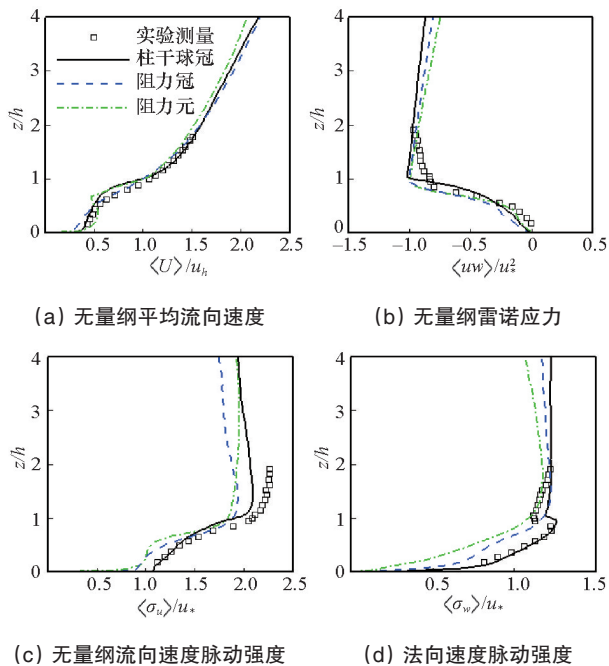


图5 不同植被数值模型算例计算结果与实验数据的对比
Fig. 5 Comparison of numerical results between different vegetation numerical models and experimental data

不同植被模型均能得到与实验一致的平均流向速度分布,“阻力元”方法中平均速度在近地面处会出现局部峰值。对于雷诺应力以及流向和垂向脉动速度强度的对比而言,“阻力冠”和“阻力元”方法的计算结果也小于“柱干球冠”模型和风洞实验的数据。相比较而言,“阻力冠”方法在高阶统计量的模拟效果上较好。

在实际中,植被树冠由近似随机分布的树叶和树枝组成。空气在流经树冠时,会在叶片表面形成流动边界层,并发生复杂的流动现象。采用圆球作为树冠只是一种理想近似,实际情况下无法精确分辨植被冠层树木分支分叉的几何形状,因此对于植被周围流动的数值研究有赖于合理的植被数值模型的建立。模拟结果表明,树干部分采用刚性圆柱模拟,而树冠用阻力模型的“阻力冠”方法要优于传统的“阻力元”方法。

5 结论

植被作为一种重要的城市地表覆盖类型,对城市风温湿环境特征会产生显著影响。大涡数值模拟被认为是研究植被周围环境流动的最佳方法之一。本文综述了植被边界层流动的大涡模拟研究现状,总结了现有的植被数值模型。

本研究通过模拟水平均匀模型植被周围流动。验证了所采用的大涡模拟数值方法和计算模型。在此基础上,对空气流过钝体元阵列模型植被进行了数值模拟,并比较了不同植被模型计算结果之间的差别。其中“柱干球冠”方法精确分辨钝体元的几何外形,相应的计算结果也与 Böhm 等^[2]的风洞实验数据符合较好。而树干部分采用刚性圆柱模拟,树冠用阻力模型的“阻力冠”方法要优于传统的“阻力元”方法。利用这种更加精细的植被数值模型,可以更准确的反映城市环境中植被的动力特性以及其他流动物理过程。进一步将采用多尺度耦合的大涡模拟方法精细研究城市植被区域的大气流动问题。

参考文献 (References)

- [1] Bonan G B. Forests and climate change: Forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests[J]. *Science*, 2008, 320(5882): 1444-1449.
- [2] Arya S P. Introduction to micrometeorology[M]. 2nd ed. California: Academic Press, 2001.
- [3] 季劲钧, 苗曼倩. 不均匀植被分布对地表面和大气边界层影响的数值试验[J]. *大气科学*, 1994, 18(3): 293-302.
Ji Jinjun, Miao Manqian. Atmospheric Science[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 1994, 18(3): 293-302.
- [4] Baldocchi D, Falge E, Gu L, et al. Fluxnet: A new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2001, 82(11): 2415-2434.
- [5] Patton E, Horst T, Sullivan P, et al. The canopy horizontal array turbulence study[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2011, 92(5): 593-611.
- [6] Kaimal J C, Finnigan J J. Atmospheric boundary layer flows: Their structure and measurement[M]. New York: Oxford University Press, 1994.
- [7] Fernando H J S. Fluid dynamics of urban atmospheres in complex terrain[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2009, 42(1): 365-389.
- [8] 尹协远. 关于植被中湍流的研究[J]. *力学进展*, 1991, 25(4): 444-456.
Yin Xieyuan. Studies on turbulence in vegetation[J]. *Advances in Mechanics*, 1991, 25(4): 444-456.
- [9] Finnigan J. Turbulence in plant canopies[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2000, 32(1): 519-571.
- [10] Lee S H. Further development of the vegetated urban canopy model including a grass-covered surface parametrization and photosynthesis effects[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2011, 140(2): 315-342.
- [11] Nepf H M. Flow and transport in regions with aquatic vegetation[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2012, 44(1): 123-142.
- [12] Belcher S E, Harman I N, Finnigan J J. The wind in the willows: Flows in forest canopies in complex terrain[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2012, 44(1): 479-504.
- [13] 赵鸣. 大气边界层动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 203-

- 208.
- Zhao Ming. Dynamics of atmospheric boundary layer[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006: 203–208.
- [14] Bonan G B. Ecological climatology[M]. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2008.
- [15] Harman I, Finnigan J. A simple unified theory for flow in the canopy and roughness sublayer[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2007, 123(2): 339–363.
- [16] Harman I, Finnigan J. Scalar Concentration profiles in the canopy and roughness sublayer[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2008, 129(3): 323–351.
- [17] Poggi D, Porporato A, Ridolfi L, et al. The effect of vegetation density on canopy sub layer turbulence[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2004, 111(3): 565–587.
- [18] Haverd V, Böhm M, Raupach M. The effect of source distribution on bulk scalar transfer between a rough land surface and the atmosphere [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2010, 135(3): 351–368.
- [19] Finnigan J, Shaw R, Patton E. Turbulence structure above a vegetation canopy[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2009, 637(20): 387–424.
- [20] Pan Y, Chamecki M, Isard S A. Large eddy simulation of turbulence and particle dispersion inside the canopy roughness sublayer[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2014, 753(16): 499–534.
- [21] Brunet Y, Finnigan J J, Raupach M R. A wind tunnel study of air flow in waving wheat: Single point velocity statistics[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1994, 70(1): 95–132.
- [22] Böhm M, Finnigan J J, Raupach M R, et al. Turbulence structure within and above a canopy of bluff elements[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2013, 146(3): 393–419.
- [23] Aumond P, Masson V, Lax C, et al. Including the drag effects of canopies: Real case large-eddy simulation studies[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2013, 146(1): 65–80.
- [24] Shaw R H, Schumann U. Large-eddy simulation of turbulent flow above and within a forest[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1992, 61(1): 47–64.
- [25] Raupach M R, Finnigan J J, Brunet Y. Coherent eddies and turbulence in vegetation canopies: The mixing-layer analogy[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1996, 78(3): 351–382.
- [26] Miao S G, Jiang W M. Large eddy simulation of turbulent flow in a forest canopy and the forest boundary layer[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2004, 47(4): 682–690.
- [27] Dupont S, Brunet Y. Influence of foliar density profile on canopy flow: A large-eddy simulation study[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148(6): 976–990.
- [28] Huang J, Cassiani M, Albertson J D. The effects of vegetation density on coherent turbulent structures within the canopy sublayer: A large-eddy simulation study[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2009, 133(2): 253–275.
- [29] Schlegel F, Stiller J, Bienert A, et al. Large-eddy simulation of inhomogeneous canopy flows using high resolution terrestrial laser scanning data[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2012, 142(2): 223–243.
- [30] Schlegel F, Stiller J, Bienert A, et al. Large-eddy simulation study of the effects on flow of a heterogeneous forest at sub-tree resolution[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2015, 154(1): 27–56.
- [31] Bailey B, Stoll R. Turbulence in sparse, organized vegetative canopies: A large-eddy simulation study[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2013, 147(3): 369–400.
- [32] Cassiani M, Katul G G, Albertson J D. The effects of canopy leaf area index on airflow across forest edges: Large-eddy simulation and analytical results[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2008, 126(3): 433–460.
- [33] Dupont S, Brunet Y. Coherent structures in canopy edge flow: A large-eddy simulation study[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2009, 630(13): 93–128.
- [34] Finnigan J J, Belcher S E. Flow over a hill covered with a plant canopy[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2004, 130(596): 1–29.
- [35] Dupont S, Brunet Y, Finnigan J J. Large-eddy simulation of turbulent flow over a forested hill: Validation and coherent structure identification[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2008, 134(636): 1911–1929.
- [36] Yue W, Parlange M, Meneveau C, et al. Large-eddy simulation of plant canopy flows using plant-scale representation[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2007, 124(2): 183–203.

Large eddy simulation of flow over urban vegetated regions

YAN Chao, CUI Guixiang, ZHANG Zhaoshun

School of Aerospace Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract Vegetation exerts notable influences on urban microenvironment through biophysical processes. Studying the flow over urban vegetated region requires a proper treatment of the vegetation canopy. A large eddy simulation (LES) method is developed in the present work, which can well simulate the canopy flow. Using LES the turbulent flow over a model vegetation canopy is investigated under the neutral atmospheric condition. Each vegetation element consisting of a sphere-shaped tree crown and a cylindrical trunk is fully resolved. The resulting turbulence statistics and the drag force on vegetation agree well with the measurements from the corresponding wind-tunnel experiment. Two other numerical representations of vegetation canopies, referred to as drag element approach and drag crown approach, have also been developed to assess their performances. The drag crown approach yields better agreement between numerical results and experimental measurements than the traditional drag element approach, thus providing a promising numerical model for simulating canopy turbulence.

Keywords vegetation canopies; large eddy simulation; environmental flow; canopy representation

(责任编辑 傅雪)