



高原气象
Plateau Meteorology
ISSN 1000-0534, CN 62-1061/P

《高原气象》网络首发论文

题目：利用大涡模拟分析地表加热和动力作用对边界层结构的影响
作者：张敏，梁捷宁，张志达，张镭
收稿日期：2020-11-06
网络首发日期：2021-07-21
引用格式：张敏，梁捷宁，张志达，张镭. 利用大涡模拟分析地表加热和动力作用对边界层结构的影响[J/OL]. 高原气象.
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1061.P.20210721.1022.004.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

张敏, 梁捷宁, 张志达, 等. 利用大涡模拟分析地表加热和动力作用对边界层结构的影响 [J]. 高原气象, 1-10. ZHANG Min, LIANG Jiening, ZHANG Zhida, et al. Analyze the Surface Thermodynamic and Dynamic Effects on the Atmospheric Boundary Layer Structure by Large Eddy Simulation [J]. Plateau Meteorology, 1-10. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2021.00046.

利用大涡模拟分析地表加热和动力作用 对边界层结构的影响

张敏¹, 梁捷宁¹, 张志达¹, 张镭^{1,2}

(1. 半干旱气候变化教育部重点实验室, 兰州大学大气科学学院, 甘肃 兰州 730000;
2. 兰州大学西部生态安全省部共建协同创新中心, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 大气边界层结构影响地气间物质能量交换、污染物扩散及人类健康。边界层结构受地表加热和动力作用影响显著, 但实际观测中难以分离每种因素的影响, 造成边界层结构和大气湍流参数化的困难。为此, 利用中尺度天气模式 WRF 中的大涡模块 WRF-LES, 设置控制试验 (Test1)、地表热通量试验 (Test2)、低层风切变试验 (Test3)、地表粗糙度试验 (Test4) 及同时改变上述变量的试验 (Test5), 研究地表加热、低层风切变和地表粗糙度对平坦下垫面条件下的边界层结构的影响。模拟结果表明: (1) 地表加热增强 5 倍使边界层升温, 对流增强, 夹卷层厚度增加 120.8%, 全边界层湍流动能增加 45.7%, 热力和动力边界层高度分别增大 28.3% 和 29.9%。强烈的垂直混合作用有利于动量向下传递, 使风速在边界层低层增大、中上层减小。(2) 低层风切变增大 0.5 倍, 使得热力和动力边界层高度分别增大 11.9% 和降低 6%, 夹卷层厚度增大 31.2%, 全边界层湍流动能增大 25.7%。(3) 粗糙度增加 4 倍, 对湍流动能的影响主要集中在低层, 动力边界层高度变化较小, 但摩擦损耗作用使动力边界层内风速减小; 同时, 增加了边界层顶附近的夹卷作用, 使边界层内位温升高。综合来看, 地表加热和风切变对湍流动能和边界层结构的影响较为显著, 而粗糙度的影响较小且主要集中在边界层低层。模拟结果能在一定程度上反映理想条件下边界层结构的变化特点, 对气象因素影响污染扩散过程等问题有指示性意义。

关键词: 大涡模拟; 大气边界层结构; 地表热通量; 风切变; 粗糙度

文章编号: 1000-0534(XXXX)XX-0001-10 **中图分类号:** P421.31 **文献标识码:** A

DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2021.00046

1 引言

大气边界层是最接近地球表面的低层大气, 受地表强迫较为显著。地表的加热和动力作用使大气边界层内的空气微团进行不规则的随机湍流运动, 没有稳定的运动方向但能有规律的传输物质和能量(张强, 2003), 这种湍流运动可通过不断改变气象要素的垂直分布而向上传递, 逐渐形成热力和动力边界层。其典型厚度为 1~2 km(赵鸣等, 1991), 在受地表强加热和残余层影响的极端荒漠地区能

超过 4 km(张强和王胜, 2008)。地表加热和动力作用影响边界层结构, 进而影响地气间物质能量的交换、污染物的扩散和输送, 与人类生产生活直接相关(张小曳等, 2020; 王倩倩等, 2020)。

目前, 对边界层结构的研究主要基于观测实验和中尺度模式模拟等方法(张强和王胜, 2008; 苗世光等, 2010; 王腾蛟等, 2013; 卢萍和李跃清, 2020)。大量研究表明: 地表热通量是地表加热作用的主要表现, 具有一定的日变化、季节变化和区域差异(解晋等, 2018; 杨成等, 2020), 边界层结

收稿日期: 2020-11-06; 定稿日期: 2021-05-21

资助项目: 国家自然科学基金项目(41605005, 41521004)

作者简介: 张敏(1997-), 女, 河南人, 硕士研究生, 主要从事大气边界层-气溶胶相互作用研究. E-mail: zhangm2019@lzu.edu.cn

通信作者: 梁捷宁(1985-), 女, 河南人, 讲师, 主要从事大气边界层和大气湍流研究. E-mail: liangjn@lzu.edu.cn

构受其影响也呈现一定的变化特征(张强等, 2011; 苏彦入等, 2018)。低空风切变和地表粗糙度是影响边界层结构的主要动力因素(杨耀先等, 2014; 黄倩等, 2014)。风切变增大能够加强大气湍流, 促进边界层发展(朱春玲等, 2011); 城市化进程增大了地表粗糙度进而增大了对大气运动的拖曳作用(彭珍和胡非, 2006)。为了应对观测实验成本高, 资料空间分辨率低和中尺度模式对于小尺度湍流分辨率过低等问题, 学者们提出大涡模拟的方法来模拟更加细致的湍流结构。在直接模拟法(DNS)和雷诺平均法(RANS)的基础上, 大涡模拟(Large Eddy Simulation, LES)将物理量区分为大尺度量和小尺度量, 小尺度量通过非线性关联量与大尺度运动产生联系; 直接数值计算出大尺度量后, 通过次网格模型给出关联量与大尺度量之间的关系(次网格雷诺应力), 进而计算出更细致的湍流谱(苏铭德, 1984)。大涡模拟(LES)具有分辨率高、可模拟大气的部分随机湍流运动的特点, 许多学者用它部分代替外场实验, 为大气边界层结构及湍流研究提供基础数据, 在边界层模拟中具有一定的优势(蒋维楣和苗世光, 2004; Zhu, 2008; 王蓉等, 2020)。

利用大涡模式设计敏感性试验可讨论城市动力拖曳作用对于对流边界层湍流结构和湍流动能的影响, 风切变和地表热通量对大气边界层对流以及对示踪物抬升和传输的影响(刘红年等, 2008; 黄倩等, 2014; 王蓉等, 2015)。其中, 新一代中尺度预报模式(Weather Research and Forecasting Model, WRF)中的子模块-3D理想大涡模式(WRF-LES)也被广泛应用于大气边界层结构及湍流的模拟(曹帮军等, 2019; 李雪洮等, 2020)。利用WRF-LES, Kang and Lenschow(2014)在约100 m高的平坦地形上研究中尺度局部地表非均匀性对由二维地表热通量变化驱动的对流边界层中低层流动的时间演化的影响, 并且评估WRF-LES模型在模拟水平均匀和弱非均匀性地表上的水平风速和垂直速度(u 、 v 和 w)方差的性能; Cao et al(2018)研究了类似于中国西北地区灌溉土地利用类型的半理想化带状的绿洲和沙漠块地形差异对

对流边界层特征的影响, 通过一组敏感性试验, 细致研究绿洲土壤含水量对对流边界层结构、稳定性、湍流动能和垂直通量的影响; Shen et al(2018)研究城市热岛环流与海风环流之间的相互作用, 模拟了5个城市案例(城市大小、位置、地表加热强度和地表粗糙度差异)和一个非城市案例, 发现海陆风指标的时间特征在很大程度上受到陆地表面热通量的影响。WRF-LES大涡模式对边界层结构模拟效果良好, 对湍流的模拟是可信的, 已被大量应用于边界层结构的研究中, 但目前利用大涡模式讨论地表加热和动力的综合作用对边界层结构影响的研究仍需补充。

本文利用WRF-LES (Version 3.5.1)模拟分析了不同条件下平坦理想下垫面的边界层结构, 定量地讨论了不同地表加热、低层风切变和地表粗糙度对边界层结构的单一影响和综合影响, 加深对边界层结构的认识, 为后续分析气象因素影响边界层结构进而影响污染物分布方面的工作提供参考。

2 数据来源与方法介绍

2.1 模式方案

使用的WRF-LES(Version 3.5.1)对理想平坦下垫面条件下的对流边界层结构具有良好的模拟效果。

模拟空间设置为 $5\text{ km} \times 5\text{ km} \times 2\text{ km}$ (长 \times 宽 \times 高), 水平分辨率为100 m, 垂直分为50层。模拟的初始下垫面地形平坦均匀, 粗糙度为0.1 m(地表类型可对应为农田)。近地层物理参数化方案选择MM5相似理论, 陆面近地层模型选择5层热扩散方案, 三维1.5阶TKE(湍流动能)闭合方案以及Deardorff的TKE方案。模式输入的初始场气象数据为西安泾河气象站(34.43°N , 108.97°E)2017年8月16日08:00(北京时, 下同)的秒级探空数据。积分时长为10 h, 时间积分步长为0.1 s。

2.2 试验设置

设置1个控制试验(Test1)、3个单变量敏感性试验(Test2~Test4)和1个综合敏感性试验(Test5)(表1)。在控制试验的基础上, 地表加热试验Test2

表1 各模拟试验的初始气象参数设置

Table 1 Setting of the initial meteorological parameters of each simulation

变量	Test 1 控制试验	Test2 地表加热试验	Test3 风切变试验	Test4 粗糙度试验	Test5 综合试验
地表热通量/($\text{K} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	0.01	0.06	0.01	0.01	0.06
低层风切变/ s^{-1}	0.009	0.009	0.013	0.009	0.013
地表粗糙度/m	0.1	0.1	0.1	0.5	0.5

仅将地表热通量增大5倍,可用来模拟农田下垫面在日出时和10:00左右的地表热通量差异(陈丽晶等,2017)对边界层结构的影响;低层风切变试验 Test3 仅将500 m以下风切变增大0.5倍;地表粗糙度试验 Test4 仅将粗糙度增大4倍,可用来模拟农田和城镇郊区下垫面的粗糙度差异(李惠君,2008)对边界层结构的影响;综合试验 Test5 将上述三种

变量同时增大相应的倍数,模拟热力和动力的综合作用对边界层结构的影响。

模式输入的初始场气象要素廓线如图1所示,其中风速 u 、 v 分量分别表示纬向风分量和经向风分量,每个模拟试验具有相同的初始位温廓线和比湿廓线,其中 Test3 和 Test5 的 u 、 v 廓线有所不同,500 m以下风切变增大。

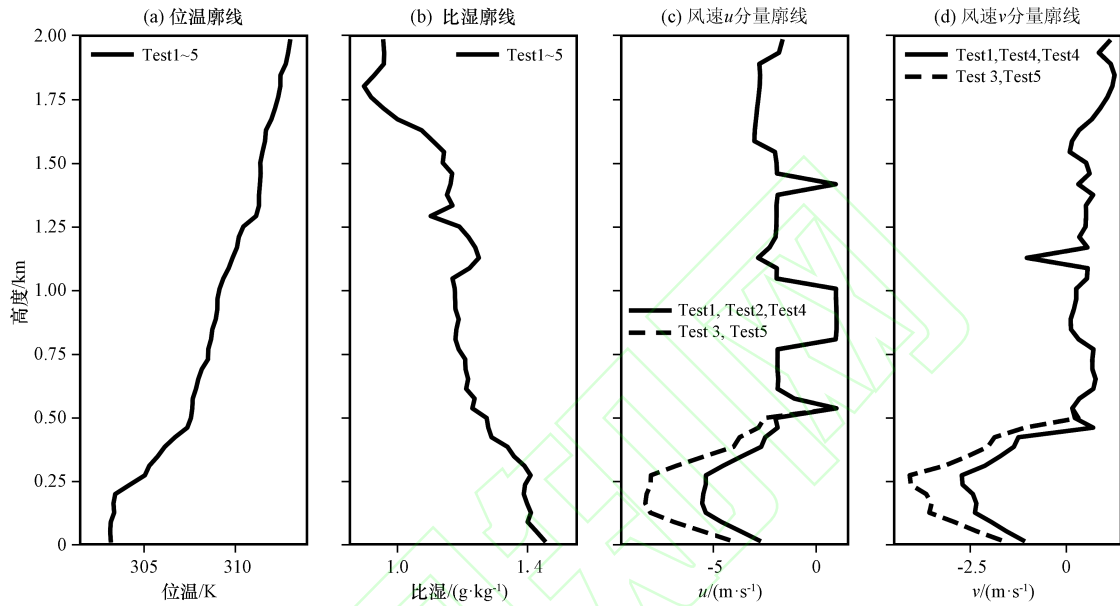


图1 各模拟试验的初始场气象要素廓线

Fig. 1 Initial sounding profiles of each simulation

2.3 边界层高度、夹卷层厚度和湍流动能的计算

大气边界层高度的确定有不同的途径和方法,从热力因素出发,将温度梯度明显不连续的高度,定为热力边界层高度(Thermodynamic Boundary Layer Height, TBLH),用位温垂直梯度($\partial\theta/\partial z$)最大值对应的高度表示(Seidel et al, 2010);从风随高度的变化来看,将水平 u 风速分量的第一个最大值对应的高度定为动力边界层高度(Dynamic Boundary Layer Height, DBLH)(叶卓佳,1982)。

根据 Deardorff(1979)一阶模型得到的位温廓线[图3(a)],混合层高度用 h_0 表示,其内位温垂直分布均匀,混合层之上的夹卷层厚度(Entrainment Zone Thickness, EZT)用 $\Delta h = h_2 - h_0$ 表示, h_2 是夹卷层顶高度也是与自由大气层过渡的高度。模拟试验的下垫面平坦,湍流在水平方向均匀平稳,可用物理量的空间平均近似总体平均。将不同高度的 u 、 v 、 w 速度分量(单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)取空间平均得到 \bar{u} 、 \bar{v} 、 \bar{w} ,用速度的空间脉动 $u' = \bar{u} - u$ 、 $v' = \bar{v} - v$ 、 $w' = \bar{w} - w$ 来描述空间三维湍流。

袁仁民(2005)利用实测资料将归一化夹卷层厚度 $\Delta h/h$ 与全理查孙数 R_{h0} 的关系定义为式(1):

$$\frac{\Delta h}{h} = 1.47 \cdot R_{h0}^{-\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式中: h 是热力边界层高度(TBLH);全理查孙数 R_{h0} 定义为式(2):

$$R_{h0} = N \cdot h^2 / W_{h0}^2 \quad (2)$$

式中: $N = (g/\theta_0) \cdot \Gamma$, g/θ_0 是浮力常数, Γ 是 h_2 高度之上自由大气的位温梯度; W_{h0} 是混合层顶部热泡平均向上的速度尺度,定义为公式(3):

$$W_{h0}^3 = \frac{1}{2} w_*^3 + 32u_*^3 \quad (3)$$

式中: $u_* = [(\overline{u'w'})^2 + (\overline{v'w'})^2]^{1/4}$ (高会旺等,2009)是边界层高度处的摩擦速度,对流速度尺度 w_* 定义为公式(4)(林恒等,2008):

$$w_*^3 = (g/\theta_0) (\overline{w'\theta'})_s \cdot h \quad (4)$$

式中: $(\overline{w'\theta'})_s$ 是地表热通量(单位: $\text{K}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)。

湍流动能 \bar{e} (Turbulent Kinetic Energy, TKE, 单位: $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}$)是衡量湍流混合能力的重要指标,定义为公式(5)(袁仁民,2005):

$$\bar{e} = (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2})/2 \quad (5)$$

所有模拟结果在1~8 h内逐渐收敛并趋于稳

定, 8 h后达到准平稳状态, 后续分析采用9.5~10 h的时间平均值或模拟区域的空间平均值来描述对流边界层的结构特征, 结果具有一定的代表性。

3 地表加热、低层风切变和地表粗糙度对边界层结构的影响

3.1 对边界层高度的影响

图2比较了三个单变量敏感性试验和控制试验(Test1)的位温廓线和风速 u 分量廓线的模拟结果以及各试验的热力边界层高度(TBLH)和动力边界层高度(DBLH)。Test1、Test2、Test3和Test4的热力边界层高度(动力边界层高度)分别为1007, 1292, 1127和1127 m(652, 847, 613和613 m)。四个试验的位温廓线模拟结果在混合层内垂直分布均匀,

与自由大气之间存在明显的位温梯度不连续, 均呈现对流边界层的特点。但由于加热和动力作用的影响, 各试验具体的边界层结构仍存在差异。与Test1相比, 地表加热作用增强5倍(Test2)直接导致了地表增温, 边界层内平均位温增大1.05 K, 约0.34%。加热后大气密度减小, 浮力及对流混合增强, TBLH明显增大28.3%。利用实测资料和模拟结果都能够得到地表热通量增加, 边界层高度相应增大的结果, 但定量的分析较少(万云霞等, 2017; 赵采玲等, 2014)。同时, 地面加热作用增强导致对流混合增强, 混合层内风速分布趋于均匀, 使得风速与Test1相比, 在混合层低层增大, 中上层减小, 这一变化增大上层风切变, 有益于对流作用在混合层上层的进一步发展, 夹卷层内有更多动量下传, 风速最大值的高度增大, DBLH增大了29.9%。

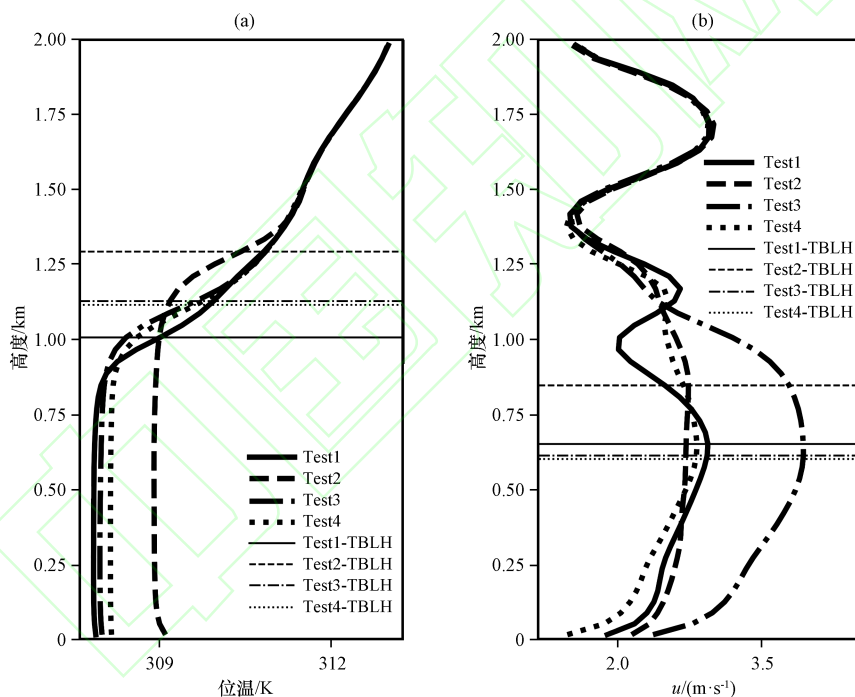


图2 各模拟试验的位温廓线(a)和风速 u 分量廓线(b)的模拟结果
水平线代表热力边界层高度(TBLH)或动力边界层高度(DBLH)

Fig. 2 Simulation results of potential temperature profiles (a) and wind speed u profiles (b) of each simulation.

Horizontal lines are thermodynamic boundary layer height (TBLH) or dynamic boundary layer height (DBLH)

与Test1相比, 500 m以下风切变增大0.5倍(Test3)后边界层内平均位温增大幅度很小, 其主要导致湍流动能增大, 对低层的对流作用影响较大, 但程度小于地表加热作用, TBLH增大11.9%。由于风切变的作用主要集中在中低层, 对流作用对上层风的分布改变不大, 故而DBLH变化较小, 下降了39 m, 减小约6%。另外, 增大风切变后间接增大了低层风速, DBLH内平均风速从 $3.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 增大

为 $4.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

与Test1相比, 地表粗糙度增大4倍(Test4)后边界层内增温略大于风切变作用, TBLH增大了11.9%; 同时摩擦作用会耗散能量, DBLH减小了6%, 但影响主要集中在低层, 故DBLH降低的不明显。由于地面摩擦作用增大, 边界层底部风速减小, 边界层内平均风速减小为 $3.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

地表的加热作用使得边界层内的温度明显增

加,对流作用明显增强,促进热力边界层的发展;同时由于对流作用改变了风速的垂直分布,动力边界层高度也因此升高。风切变和粗糙度对于边界层高度的影响则不如地表加热作用明显。

3.2 对夹卷层厚度和湍流动能的影响

依据计算公式(1~4), Test1、Test2、Test3 和 Test4 的归一化夹卷层厚度分别为 0.076, 0.132, 0.089 和 0.085, 对应的夹卷层厚度分别为 77,

170, 101 和 95 m。三个单变量敏感性试验的夹卷层厚度与 Test1 相比,有不同程度的增大[图 3(b)~(d)]。地表加热试验(Test2)中夹卷层厚度的增大程度最大,约 120.8%;风切变试验(Test3)和粗糙度试验(Test4)增大程度相当,分别为 31.2% 和 23.4%。夹卷层厚度的增加,使自由大气中更多的暖空气被夹卷进入边界层,增大边界层顶位温,提升热力边界层高度。

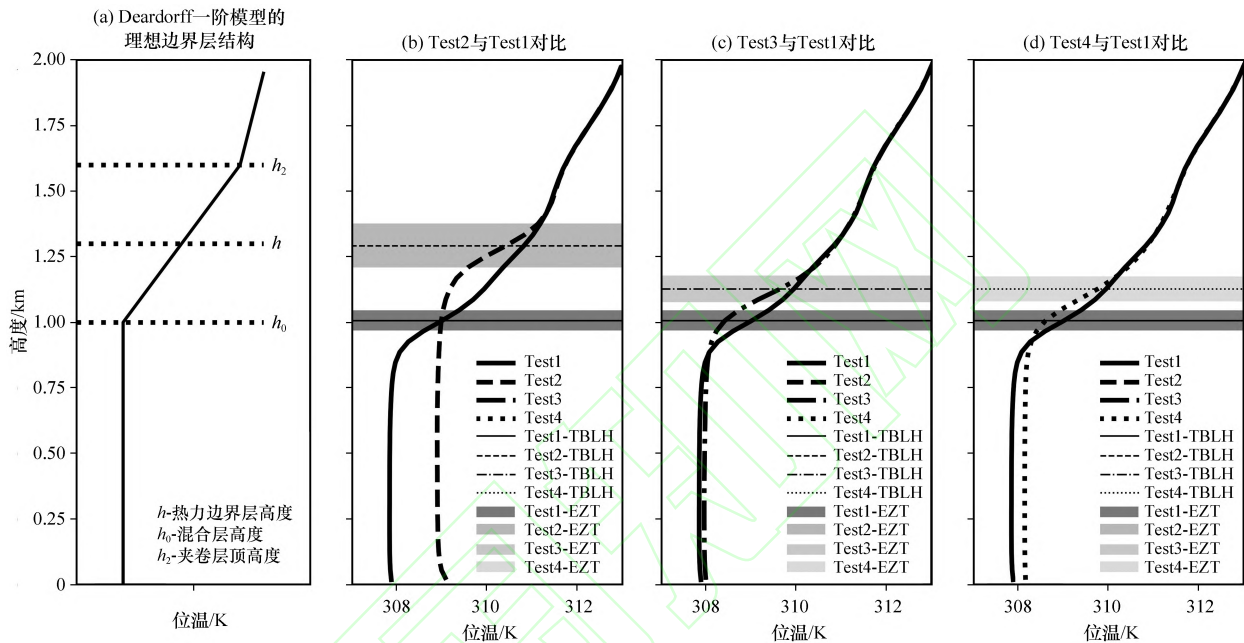


图3 理想对流边界层结构示意图、各模拟试验的大气边界层结构和夹卷层厚度(EZT)

(b)~(d)中水平线和阴影区分别代表各试验的热力边界层高度(TBLH)和夹卷层厚度(EZT)

Fig. 3 Schematic diagram of the ideal convective boundary layer structure, atmosphere boundary layer structures and entrainment zone thickness (EZT) of each simulation. In Fig. 3(b)~(d), horizontal lines and shadows represent the thermodynamic boundary layer height (TBLH) and the entrainment zone thickness (EZT) of each simulation

依据公式(5),计算并对比三个敏感性试验和控制试验(Test1)的湍流动能廓线(图4),同时分析其与热力边界层高度和夹卷层厚度的关系。热力边界层高度内,Test2、Test3和Test4的湍流动能平均值分别为 $0.51 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ 、 $0.44 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ 和 $0.34 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$,前两者分别比Test1($0.35 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$)增大了约45.7%和25.7%,而粗糙度试验则减小了约2.9%。地表加热和风切变增大,均使全边界层的湍流动能明显增大,但风切变试验增大的程度较小;这两个试验的夹卷层厚度均增加,表明动量更多地向下夹卷进入边界层,边界层顶附近的湍流动能增大。地表粗糙度增大后,摩擦作用的影响主要集中在低层,使得低层湍流动能减小;而由于地表粗糙度试验夹卷层也略有增厚,边界层顶部湍流动能有所增大,但其影响范围有限。

3.3 对垂直速度和10 m高度处风速的影响

图5显示了Test1~Test4不同高度垂直速度的水平分布(用X、Y代表模拟区域水平方向的长、宽距离),取0.2 h、0.5 h和1.0 h(h分别是各试验对应的热力边界层高度)分别代表每个试验的边界层的下部、中部和顶部。将每个高度的垂直运动强度定义为上升速度和下沉速度的平均。地表加热增大5倍[Test2,图5(d)~(f)],边界层上部、中部和下部的垂直运动强度分别比Test1增大了67%,64%和105%,边界层整层的垂直运动强度明显增大,在边界层顶部仍有很多上升速度高值中心,这导致了夹卷层厚度和湍流动能的增强,使得边界层高度上升。低层风切变增大0.5倍[Test3,图5(g)~(i)],不同高度的垂直运动强度分别比Test1增大了8%,-3%和4%。500 m以下风切变增大主要增大了低层的对流运动;中层,由于受低层风速增大的影

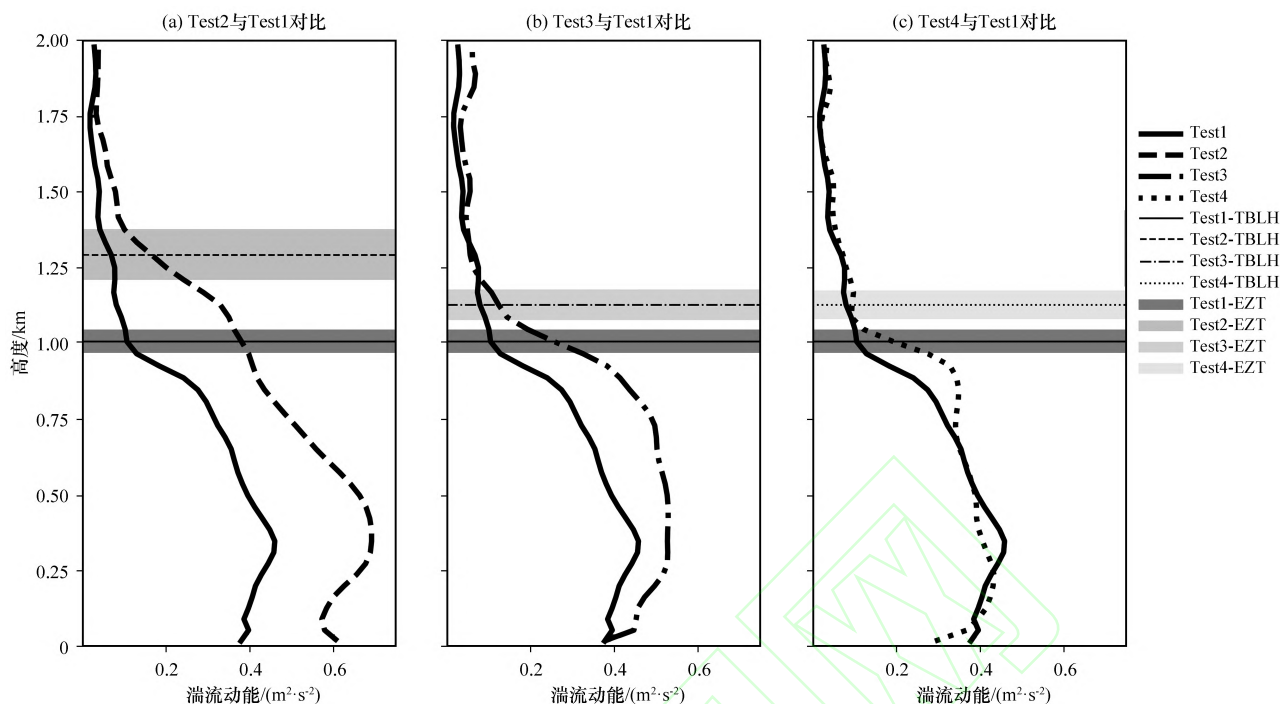


图4 各模拟试验的湍流动能(TKE)廓线计算结果(单位: $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$)

水平线和阴影分别代表各试验的热力边界层高度(TBLH)和夹卷层厚度(EZT)

Fig. 4 Calculated results of turbulent kinetic energy (TKE) profiles of each simulation. Unit: $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$. Horizontal lines and shadows represent the thermodynamic boundary layer height (TBLH) and the entrainment zone thickness (EZT) of each simulation, respectively

响,风切变有所减小,导致对流运动受到影响。地表粗糙度增大4倍[Test4,图5(j)~(1)],不同高度的垂直运动强度分别比Test1减小了4%、0.1%和16%。增大地表粗糙度后,垂直运动强度有所减小,尤其在边界层顶。

图6是各模拟试验10 m高度处风速模拟结果的水平分布。控制试验Test1的风速范围为 $1.5 \sim 3.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,平均值为 $2.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。地表加热试验Test2的风速范围是 $1.2 \sim 3.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,平均值为 $2.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,风速范围比Test1大,但平均值相差不大,并且Test2的水平风切变更大。风切变试验Test3的风速范围为 $2.0 \sim 4.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,平均值为 $3.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,风速比Test1大,这是由于在增大风切变的过程中间接增大了风速。粗糙度试验Test4的风速范围是 $1.1 \sim 2.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,平均值为 $1.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,与Test1相比,风速有明显的减小,这是由于当粗糙度增大时,近地层的湍流应力增大,这将引起其上方的空气减速,这种减速又使湍流应力减少,最后达到一个新的平衡,但新的应力比原来要大一些;当近地表的空气减速时,与其上部气层间切变增大,应力增大,其上的空气又减速,如此向上传播,使得整层的风速减小。

3.4 地表加热、低层风切变和地表粗糙度综合作用对边界层结构的影响

综合试验(Test5)的位温廓线与Test2相似,具有对流边界层的特点,但在三种变量的共同作用下,边界层结构又与三种单变量敏感性试验有差别。Test5的热力边界层高度为1333 m,动力边界层高度为690 m。Test5的混合层内位温廓线与地表加热试验(Test2)几乎重合,但夹卷层内位温略高于Test2;由于增大风切变后间接增大了风速,Test5动力边界层内的风速大于Test2,增加动力作用后,边界层整层的湍流动能比Test2大 $0.22 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$,可见在地表加热基础上增加风切变和粗糙度作用会对夹卷层和湍流动能产生一定影响。Test5动力边界层内的 u 风速小于风切变试验(Test3),这主要是地表加热增强了对流混合作用,风速垂直混合更加均匀;边界层整层的湍流动能比Test3大 $0.28 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$,可见加入了地表加热影响能有效增大湍流动能。Test5的湍流动能也较粗糙度试验Test4增大了 $0.40 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ 。地表加热和风切变对湍流动能和边界层结构的影响较为显著,而粗糙度的影响主要集中在低层,在综合试验中产生的影响较小。

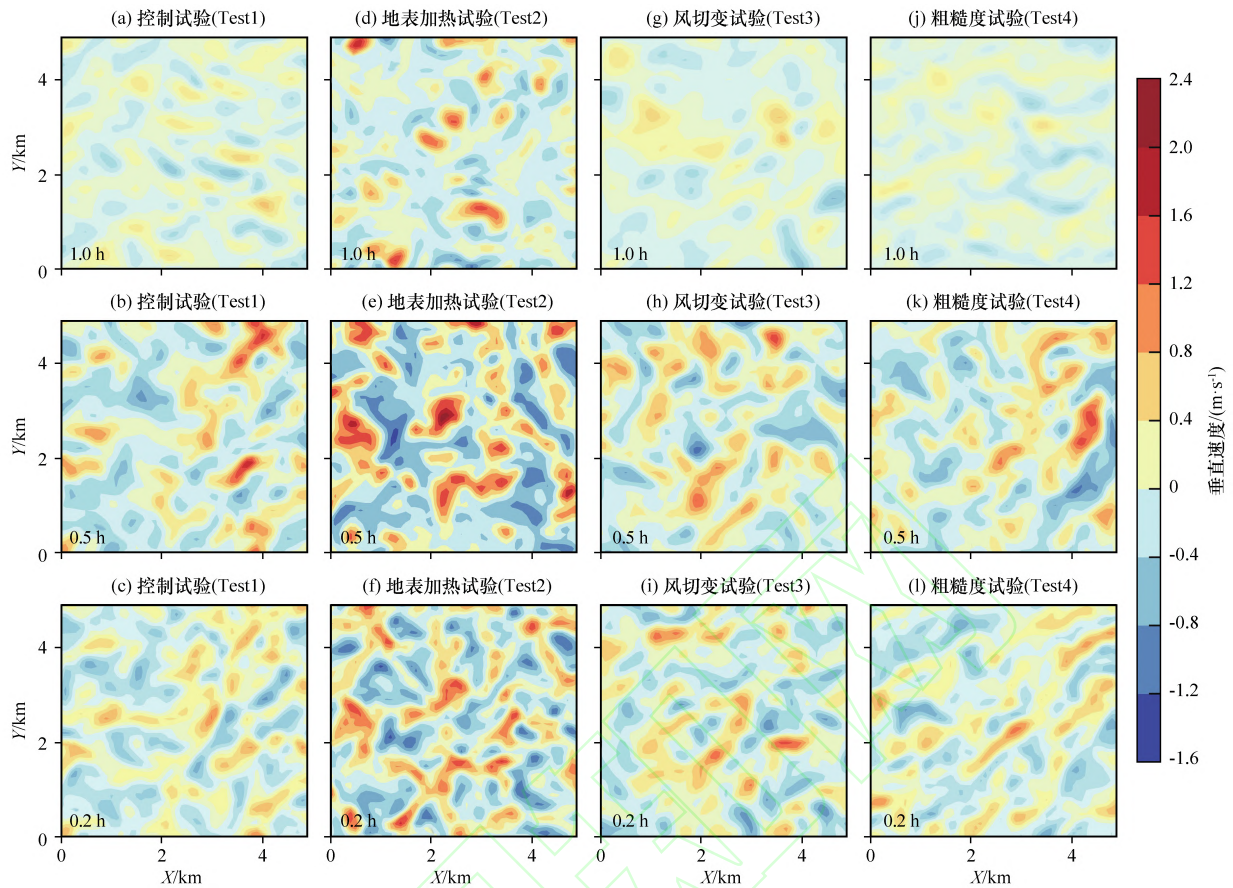


图5 各模拟试验不同高度(0.2 h, 0.5 h 和 1.0 h)处垂直速度模拟结果的水平分布(单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
h 是各试验的热力边界层高度

Fig. 5 Horizontal distributions of vertical velocity simulation results at different heights (0.2 h, 0.5 h and 1.0 h) of each simulation. Unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. The h was the thermal boundary layer height of each simulation

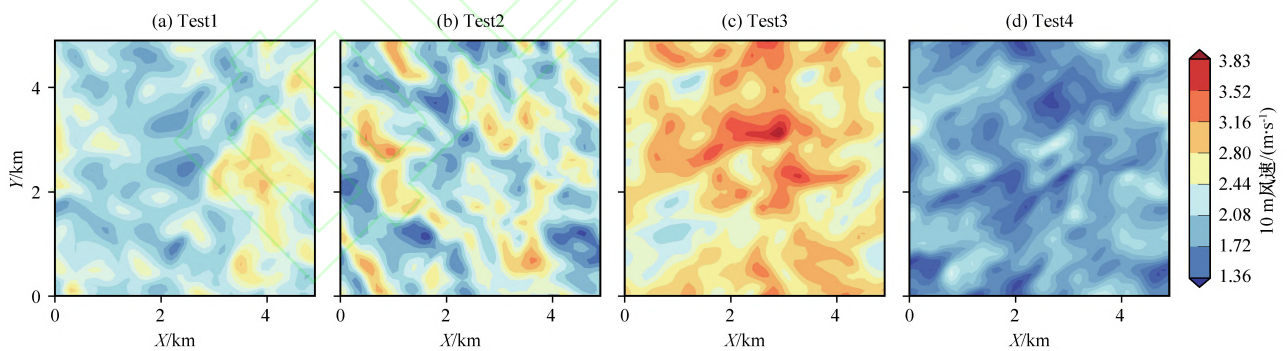


图6 各模拟试验 10 m 高度处风速模拟结果的水平分布(单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

Fig. 6 Horizontal distributions of wind speed at 10 m height of each simulation. Unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

4 结论与讨论

对大气边界层结构的研究有助于进一步了解气象因素影响污染扩散等问题。本文利用 WRF-LES, 在理想条件下分别讨论了地表加热、低层风切变和地表粗糙度对边界层结构产生的影响, 以及它们的综合影响。主要结果如下:

(1) 对于平坦均匀的农田下垫面, 地表加热增强 5 倍后, 热力边界层高度升高 28.3%, 动力边界

层高度升高 29.9%; 夹卷层厚度增大 120.8%, 湍流动能增大 45.7%。地表加热作用的增强, 增大了边界层内的位温和垂直速度, 使得对流作用增强, 边界层顶部不断向上发展, 夹卷层厚度增大, 夹卷作用将自由大气内更多温暖且动量大的空气与边界层大气混合, 湍流动能也相应增大。该变化能够反映平坦均匀地形下的热力作用对边界层结构的影响。

(2) 在平坦下垫面情况下, 低层风切变增大 0.5 倍后, 热力边界层高度增加 11.9%, 动力边界

层高度降低6%，夹卷层厚度增加31.2%，湍流动能增大25.7%。低层风切变增大，使得低层的湍流动能和垂直速度增大，虽然没有直接增加地表加热作用的影响明显，但也使得边界层高度和夹卷层厚度都有所增大，夹卷作用使得上层湍流动能增强。

(3) 下垫面粗糙度均匀时，地表粗糙度增大4倍后，热力边界层高度增大11.9%，动力边界层高度减小6%，夹卷层厚度增大23.4%，边界层低层湍流动能减小，10 m高度处风速明显减小。地表粗糙度增大，对地表附近空气的拖曳作用增强，耗散了湍流动能，使得近地层风速减小，动力边界层高度下降。夹卷层厚度增大，夹卷进入边界层的暖空气使得顶部位温升高，边界层顶湍流动能略有增大。

本文模拟了平坦均匀下垫面条件下，地表加热、风切变和粗糙度对边界层结构的影响，得到的量化指标能在一定程度上反映理想条件下对流边界层结构的变化特点，对了解气象因素影响污染扩散等问题有指示性意义。虽然在非均匀的下垫面情况下地表加热、风切变和粗糙度的变化对边界层结构的定量影响有一定的差异，但是关键性的变化趋势与理想情况相比仍然具有一定的相似性。不均匀的地形起伏和植被覆盖条件下的边界层结构受到的影响因素更多，因此，还需要进一步的研究。

致谢：感谢 WRF-LES 模式的开发团队以及西安泾河气象站提供相关数据资料。

参考文献：

- Cao B J, Zhang S W, Li D Q, et al, 2018. Effect of mesoscale land use change on characteristics of convective boundary layer: Semi-idealized large eddy simulations over northwest China[J]. *Journal of Meteorological Research*, 32(3): 87-98. DOI: 10.1007/s13351-018-7185-8.
- Dearhoff J W, 1979. Prediction of convective mixed-layer entrainment for realistic capping inversion structure [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 36(3): 424-436. DOI: 10.1175/1520-0469(1979)036<0424: POCMLE>2.0.CO;2.
- Kang S L, Lenschow D H, 2014. Temporal evolution of low-level winds induced by two-dimensional mesoscale surface heat-flux heterogeneity [J]. *Boundary Layer Meteorology*, 151(3): 501-529. DOI: 10.1007/s10546-014-9912-8.
- Seidel D J, Ao C O, Li K, 2010. Estimating climatological planetary boundary layer heights from radiosonde observations: Comparison of methods and uncertainty analysis [J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 115(D16): D16113. DOI: 10.1029/2009JD013680.
- Shen L D, Sun J N, Yuan R M, 2018. Idealized large-eddy simulation study of interaction between urban heat island and sea breeze circulations [J]. *Atmospheric Research*, 214(12): 338-347. DOI: 10.1016/j.atmosres.2018.08.010.
- Zhu P, 2008. Simulation and parameterization of the turbulent transport in the hurricane boundary layer by large eddies [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 113(D17): D17104. DOI: 10.1029/2007JD009643.
- 曹帮军, 吕世华, 张宇, 等, 2020. 绿洲灌溉对垂直湍流热通量的影响的大涡模拟研究 [J]. *大气科学*, 44(6): 1188-1202. DOI: 10.3878/j.issn.1006-9895.1912.19163.
- 陈丽晶, 张镭, 梁捷宁, 等, 2017. 半干旱区不同下垫面大气湍流通量比较分析 [J]. *高原气象*, 36(5): 1325-1335. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2016.00101.
- 高会旺, 顾明, 王仁磊, 等, 2009. 北黄海海域大气湍流强度特征及风速标准差相似性分析 [J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 39(4): 563-568. DOI: 10.3969/j.issn.1672-5174.2009.04.002.
- 黄倩, 王蓉, 田文寿, 等, 2014. 风切变对边界层对流影响的大涡模拟研究 [J]. *气象学报*, 72(1): 100-115. DOI: 10.11676/qxxb2014.007.
- 蒋维楣, 苗世光, 2004. 大涡模拟与大气边界层研究——30年回顾与展望 [J]. *自然科学进展*, 14(1): 11-19. DOI: 10.3321/j.issn:1002-008X.2004.01.003.
- 解晋, 余晔, 刘川, 等, 2018. 青藏高原地表感热通量变化特征及其对气候变化的响应 [J]. *高原气象*, 37(1): 28-42. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2017.00019.
- 李惠君, 2008. 大气边界层特性的风洞模拟研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 8.
- 李雪洗, 梁捷宁, 郭琪, 等, 2020. 利用大涡模式模拟黄土高原地区对流边界层特征 [J]. *高原气象*, 39(3): 523-531. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2019.00050.
- 林恒, 孙鉴泞, 袁仁民, 2008. 对流边界层顶部夹卷层厚度特征及其参数化分析 [J]. *中国科学技术大学学报*, 38(1): 50-56.
- 刘红年, 苗世光, 蒋维楣, 等, 2008. 城市建筑动力学效应对对流边界层影响的敏感性试验 [J]. *气象科学*, 28(6): 599-605. DOI: 10.3969/j.issn.1009-0827.2008.06.002.
- 卢萍, 李跃清, 2020. 9年夏季连续加密探空观测的九龙站边界层特征分析 [J]. *高原气象*, 39(5): 1058-1069. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2019.00098.
- 苗世光, Chen Fei, 李青春, 等, 2010. 北京城市化对夏季大气边界层结构及降水的月平均影响 [J]. *地球物理学报*, 53(7): 1580-1593. DOI: 10.3969/j.issn.0001-5733.2010.07.009.
- 彭珍, 胡非, 2006. 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*, 49(6): 1608-1615. DOI: 10.3321/j.issn:0001-5733.2006.06.005.
- 苏铭德, 1984. 大涡模拟—研究湍流的一种新手段 [J]. *力学进展*, 14(4): 440-451. DOI: 10.6052/1000-0992-1984-4-j1984-049.
- 苏彦入, 吕世华, 范广洲, 2018. 青藏高原夏季大气边界层高度与地表能量输送变化特征分析 [J]. *高原气象*, 37(6): 1470-1485. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2018.00040.
- 万云霞, 张宇, 张瑾文, 等, 2017. 感热变化对东亚地区大气边界层高度的影响 [J]. *高原气象*, 36(1): 173-182. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2016.00001.

- 王倩倩, 余晔, 董龙翔, 等, 2020. 基于激光测风雷达的兰州冬季风场特征及其与大气污染的关系[J]. 高原气象, 39(3): 641-650. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2019.00009.
- 王蓉, 黄倩, 田文寿, 等, 2015. 边界层对流对示踪物抬升和传输影响的大涡模拟研究[J]. 大气科学, 39(4): 731-746. DOI: 10.3878/j.issn.1006-9895.1502.14155.
- 王蓉, 张强, 岳平, 等, 2020. 大气边界层数值模拟研究与未来展望[J]. 地球科学进展, 35(4): 331-349. DOI: 10.11867/j.issn.1001-8166.2020.036.
- 王腾蛟, 张镭, 胡向军, 等, 2013. WRF模式对黄土高原丘陵地形条件下夏季边界层结构的数值模拟[J]. 高原气象, 32(5): 1261-1271. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2012.00121.
- 杨成, 吴通华, 姚济敏, 等, 2020. 青藏高原表层土壤热通量的时空分布特征[J]. 高原气象, 39(4): 706-718. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2020.00022.
- 杨耀先, 李茂善, 胡泽勇, 等, 2014. 藏北高原高寒草甸地表粗糙度对地气通量的影响[J]. 高原气象, 33(3): 626-636. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2013.00199.
- 叶卓佳, 1982. 稳定行星边界层相似性函数A, B, C的实验研究[J]. 大气科学, 6(2): 171-178. DOI: 10.3878/j.issn.1006-9895.1982.02.08.
- 袁仁民, 2005. 白天混合层顶部夹卷层厚度的特征研究[J]. 地球物理学报, 48(1): 19-24. DOI: 10.3321/j.issn:0001-5733.2005.01.004.
- 张强, 2003. 大气边界层气象学研究综述[J]. 干旱气象, 21(3): 74-78.
- 张强, 王胜, 2008. 西北干旱区夏季大气边界层结构及其陆面过程特征[J]. 气象学报, 66(4): 599-608. DOI: 10.3321/j.issn:0577-6619.2008.04.013.
- 张强, 张杰, 乔娟, 等, 2011. 我国干旱区深厚大气边界层与陆面热力过程的关系研究[J]. 中国科学(地球科学), 41(9): 1365-1374. DOI: 10.1016/B978-0-444-53599-3.10005-8.
- 张小曳, 徐祥德, 丁一汇, 等, 2020. 2013~2017年气象条件变化对中国重点地区PM_{2.5}质量浓度下降的影响[J]. 中国科学(地球科学), 50(4): 483-500. DOI: 10.1360/N072018-00303.
- 赵采玲, 吕世华, 李照国, 等, 2014. 夏季巴丹吉林沙漠陆面热状况对边界层高度影响的模拟实验[J]. 高原气象, 33(6): 1526-1533. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2013.00160.
- 赵鸣, 苗曼倩, 王彦昌, 1991. 边界层气象学教程[M]. 北京: 气象出版社, 217-219.
- 朱春玲, 马耀明, 陈学龙, 2011. 青藏高原西部及东南周边地区季风前大气边界层结构分析[J]. 冰川冻土, 33(2): 325-333.

Analyze the Surface Thermodynamic and Dynamic Effects on the Atmospheric Boundary Layer Structure by Large Eddy Simulation

ZHANG Min¹, LIANG Jiening¹, ZHANG Zhida¹, ZHANG Lei^{1,2}

(1. Key Laboratory for Semi-Arid Climate Change of the Ministry of Education, College of Atmospheric Sciences,

Lanzhou University, Lanzhou 730000, Gansu, China;

2. Collaborative Innovation Center for Western Ecological Safety, Lanzhou University, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: Atmospheric boundary layer structure affects the exchange of material and energy between the earth and air, the dispersion of pollutants and human health. The boundary layer structure is significantly affected by surface heating and dynamics, but it is difficult to separate the effects of each factor in practical observations, which causes difficulties in parameterizing the boundary layer structure and atmospheric turbulence. Therefore, using the large eddy module, WRF-LES, in the Weather Research and Forecasting Model (WRF), set up control test (Test1), surface heat flux (Test2), low-level wind shear (Test3), surface roughness (Test4) tests and test that change the above variables simultaneously (Test5) to investigate the effects of surface heating, low-level wind shear and surface roughness on the boundary layer structure on the flat surface. The results were as follows: (1) The surface heating, enhanced by 5 times, warmed up the boundary layer, enhanced convection, increased the thickness of the entrainment layer by 120.8%, increased the turbulent kinetic energy of the full boundary layer by 45.7%, and increased the height of the thermodynamic and dynamic boundary layers by 28.3% and 29.9%, respectively. The strong vertical mixing facilitated the downward momentum transfer, which increased the wind speed in the lower boundary layer and decreased in the middle and upper boundary layers. (2) The 0.5 times increase in wind shear in the lower layer increased the thermodynamic and dynamic boundary layer heights by 11.9% and -6%, respectively, and increased the entrainment zone thickness by 31.2% and the full boundary layer turbulent kinetic energy by 25.7%. (3) The 4 times increase in roughness affected the turbulent kinetic energy mainly in the lower layers. The change in height of the dynamic boundary layer was small, but the friction loss effect reduced the wind speed in the dynamic boundary layer. Meanwhile, it increased the entrainment effect near the top of the boundary layer, which increased the potential temperature in the boundary layer. In a comprehensive view, the effects of surface heating and wind shear on turbulent kinetic energy and boundary layer structure are more significant, while the effects of roughness are smaller and mainly concentrated in the lower boundary layer. The simulation results can reflect to some extent the changing characteristics of the boundary layer structure under ideal conditions and are indicative for understanding scientific issues such as the influence of meteorological factors on pollution dispersion.

Key words: Large Eddy Simulation (LES); atmospheric boundary layer turbulence; surface heat flux; wind shear; roughness