

赵世强, 张镭, 王治厅, 等. 2012. 利用激光雷达结合数值模式估算兰州远郊榆中地区夏季边界层高度 [J]. 气候与环境研究, 17 (5): 523–531, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2011.10170. Zhao Shiqiang, Zhang Lei, Wang Zhiting, et al. 2012. Boundary layer height estimate in summer over the Lanzhou suburb in the Yuzhong area using lidar measurement and numerical model [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17 (5): 523–531.

利用激光雷达结合数值模式估算兰州远郊榆中地区夏季边界层高度

赵世强^{1,2} 张镭¹ 王治厅¹ 王腾蛟¹ 张磊^{1,3} 梁捷宁¹

1 兰州大学大气科学学院半干旱气候变化教育部重点实验室, 兰州 730000

2 93808 部队, 榆中 730109

3 92543 部队, 济源 454650

摘要 用激光雷达资料, 采用小波变化法反演兰州远郊榆中地区兰州大学半干旱气候与环境观测站 (SACOL) 的边界层高度, 并利用 WRF 中尺度数值模式, 选取两种不同边界层参数化方案 (YSU、MYJ) 模拟了该地区边界层及其高度。分析表明激光雷达反演边界层高度与 WRF 模拟边界层高度结果基本一致; WRF 选用 YSU 方案能较好反映热对流边界层, 而 MYJ 方案对于动力作用边界层模拟较好。日出后 08:00 (北京时间, 下同) SACOL 不稳定边界层开始发展, 17:00 达到最大高度。热对流边界层可以达到 2 km; 动力作用边界层可达到 1.5 km, 之后热对流边界层下降速度明显高于动力作用边界层。

关键词 边界层高度 激光雷达 小波变换 WRF

文章编号 1006-9585 (2012) 05-0523-09

中图分类号 P435

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2011.10170

Boundary Layer Height Estimate in Summer over the Lanzhou Suburb in the Yuzhong Area Using Lidar Measurement and Numerical Model

ZHAO Shiqiang^{1,2}, ZHANG Lei¹, WANG Zhiting¹, WANG Tengjiao¹,
ZHANG Lei^{1,3}, and LIANG Jiening¹

1 Key Laboratory for Semi-Arid Climate Change of the Ministry of Education, College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000

2 Unit 93808 of People's Liberation Army, Yuzhong 730109

3 Unit 92543 of People's Liberation Army, Jiyuan 454650

Abstract The atmospheric boundary layer over the Lanzhou suburb in the Yuzhong area was analyzed at the Semi-Arid Climate and Environment Observatory of Lanzhou University (SACOL). Micro Pulse Lidar (MPL-4B) data was retrieved by the wavelet transform method and a simulation was performed using the Weather Research Forecast (WRF) model with its two boundary layer parameterizations schemes: YSU and MYJ. The results showed that the Lidar retrieval data and the simulated boundary layer height were in agreement. The WRF with YSU scheme reflected the convection boundary layer well; the WRF with MYJ scheme showed good results in simulating the dynamic boundary layer. The boundary layer over SACOL started to develop around 0800 LST and reached its maximum height at 1700 LST. The analysis showed that the

收稿日期 2010-12-24 收到, 2012-06-15 收到修定稿

基金项目 国家重点基础研究发展规划项目 2010CB428604, 国家自然科学基金项目 41075104, 中央高校基本科研业务费专项 lzujbky-2009-k03

作者简介 赵世强, 男, 1984 年出生, 硕士研究生, 主要从事数值模拟研究。E-mail: zhaosq08@lzu.cn

通信作者 张镭, E-mail: zhanglei@lzu.edu.cn

thermic convection boundary layer can reach an altitude of more than 2 km, and the dynamic boundary layer can reach 1.5 km. The thermic convection boundary layer decreases faster than the dynamic boundary layer.

Key words boundary layer height, lidar measurement, wavelet transform, WRF

1 引言

大气边界层是贴近地球表面并受之直接作用的气层，它的主要物理过程包括动量输送、热量输送、水汽输送、摩擦效应和地形强迫等，是地球表面与自由大气间进行物质、能量、热量和水汽交换的必经气层，是人类活动和复杂生态环境的主要层次，大气边界层研究对于天气气候、大气扩散问题研究至关重要(Stull, 1988; 胡非, 1995; 赵鸣, 2006)。

边界层高度是研究大气边界层的重要参数，也是个很难确定的参数，它除了受大气层结影响外，还受到下垫面状况的影响。van der Kamp et al.

(2010) 在温哥华利用 26 个月测云仪资料，采用后向散射最小梯度法和理想廓线法估算混合层，认为理想廓线法好于最小梯度法，与前人结果相比在早晨和夜间对混合层高度略有高估。Pearson et al.

(2010) 在热带雨林，使用多普勒激光雷达探测该地区的边界层，显示在不同的垂直速度、云量下，边界层高度有所不同。王珍珠等 (2008) 利用激光雷达探测北京城区夏季大气边界层，表明激光雷达探测大气边界层是有效的方法。宋星灼等 (2006) 利用 1998 年第 2 次青藏高原大气科学实验资料，对比分析了高原边界层演变规律。张强等 (2003) 利用系留气球观测资料研究了兰州市边界层结构和输送能力。杜萍等 (2001) 采用实测资料对兰州冬季城乡间边界层高度进行了比较分析。王式功等 (2000) 利用 Holzworth 干绝热曲线法求解兰州最大混合层厚度，12 月最低，5 月最高。Shou and Zhang (2010) 利用 WRF 和考虑城市冠层耦合模式，模拟了巴尔的摩城市边界层，模式能较好模拟城市由于热岛效应以及建筑物引起的局地环流特征。王颖等 (2010) 利用 WRF 模式 3 种不同边界层方案研究了兰州市冬季地面气温和风速的变化。杨胜朋等 (2009) 在山谷城市兰州对 RAMS 模式进行了模式模拟能力检验，结果表明其模拟能力较好。缪国军等 (2007) 使用 WRF 模式对兰州冬季大气边界层的风场和温度场进行了研究，结果表明模式具有良好的模拟

能力。陈炯和王建捷 (2006) 利用 WRF 模式对北京地区夏季边界层日变化做了模拟分析，认为使用高分辨率的模拟基本上能够反映出边界层的日变化特征。鞠丽霞等 (2003) 利用 RAMS 模式模拟济南地区城市热岛环流和山谷风环流，该模式能较好的模拟出这两种环流特征及其演变规律。郭振海等 (1999) 利用二阶湍流闭合大气对流边界层模式，结果表明模式能模拟出对流边界层的发展过程，准确地反映对流边界层中湍流扩散和输送过程。刘辉志等 (2001) 采用 ARPS 模式模拟研究对流边界层中气流过山引起的地形波。张美根和韩志伟 (1998) 利用发展后的混合层模式能很好反映复杂地形对混合层厚度和风速的影响。Jeričević et al. (2010) 在 EMEP 模式中对边界层采用改进湍流参数化方案与探空资料比较，结果显示改进方案较好反映了边界层的变化，并且提高了在稳定条件下模拟效果。Dandou et al. (2009) 在慕尼黑两个观测点，比较测云仪和声雷达得到混合层高度和 MM5 模式不同边界层参数化方案，表明在对流边界层中结果较为一致，稳定的条件下模式结果好于观测，有弱湍流的焚风期间，观测比模式结果更为合理。Bidokhti et al. (2008) 用激光雷达和 MM5 模式研究伊朗西北部赞詹城混合层的变化，激光雷达和模式对混合层高度的计算有较好一致性。Amiridis et al. (2007) 利用激光雷达和 CAMx 模式研究希腊日食过程中边界层的变化，表明当日食发生时，边界层高度降低，随日食结束又逐渐升高。

兰州地处东亚季风影响区的边缘区域，其影响热力大气边界层形成和发展的环境特征和气候背景都具有一定特殊性，对于内陆干旱区张强等 (2007) 利用敦煌观测资料进行了研究，而对于半干旱地区研究报道较少。兰州大学半干旱气候与环境观测站 (SACOL)，地处黄土高原半干旱区，位于距离兰州中心 48 km 的远郊兰州大学榆中校区萃英山顶($35.946^{\circ}\text{N}, 104.137^{\circ}\text{E}$, 海拔 1965 m)，建站以来积累了多年观测资料，为半干旱地区边界层研究提供了重要基础支撑。本文利用激光雷达资料和 WRF 模式综合分析兰州远郊榆中地

区边界层高度变化。

2 资料和方法

2.1 微脉冲激光雷达资料和边界层高度分析方法

微脉冲激光雷达 (MPL-4B) 安放在兰州大学半干旱气候与环境观测站 (SACOL)，是一种弹性后散射激光雷达，可用于气溶胶和云层探测，具有高精度、高分辨率等优点，文中使用的 MPL 资料每分钟记录 1 组数据，并经过质量控制。

用激光雷达资料反演边界层高度是以气溶胶浓度的垂直分布来确定。通常边界层内的气溶胶浓度远高于自由大气，因此在边界层顶（混合层顶）到自由大气，存在一个较大的气溶胶浓度的梯度。根据这一特征可以将气溶胶作为边界层高度的示踪物，激光雷达观测反映出信号明显变化，依此来反演边界层的高度。具体方法使用 Morille et al. (2007) 描述的小波变换法。

2.2 数值模式

WRF (Weather Research Forecast) 模式系统是由美国 NCAR、NOAA 等多个部门共同研发的中尺度预报模式和同化系统。支持单向和双向多重区域嵌套，具有较高的计算效率 (章国材, 2004; Joseph, 2004)。模式非静力，提供多种参数化方案选择，最终水平分辨率为 1~10 km。文中使用 WRFv3.1 版本，采用 NCEP 水平分辨率 1° (纬度) $\times 1^\circ$ (经度) 再分析资料作为模式初始场，每 6 h 提供一次边界条件。取双向反馈的三重嵌套区域，网格的格距分别是分别为 9、3、1 km，模拟区域中心 (35.95°N , 104.14°E)。第一层网格为 80×50 ，第二层 88×82 ，

第三层 118×67 。垂直方向 50 层，模式层顶气压 50 hPa，为了更好地描述边界层特征，将 550 hPa 以下分为 30 层，700 hPa 以下 22 层，模式积分步长 27 s，每 1 h 输出一次结果。图 1 是模拟区域地形图，可以看出 SACOL 处于西北—东南走向的山谷中。

模式微物理过程选择 WSM3 类简单冰方案，长波辐射选用 RRTM 方案，短波辐射采用 Dudhia 方案，近地面层采用 Monin-Obukhov 方案和 Monin-Obukhov (Janjic Eta) 方案，边界层分别选用 YSU 和 MYJ 方案，积云对流采用 Kain-Fritsch (new Eta) 方案，每 5 min 调用一次 (考虑格距小于 5 km 一般建议不使用积云对流参数化，只在第一层网格使用)，陆面过程选择 Noah 方案 (该方案与 NCEP 再分析资料的土壤资料分层相同)。考虑到辐射过程对许多物理量计算结果的重要性，辐射方案每 10 min 调用一次，其它物理过程每步调用一次。考虑到地形、地表信息对边界层模拟影响较大，且 SACOL 地形复杂，采用地形高度分辨率 30 s，使用了美国 USGS 30 s 的 LANDUSE 资料，有 24 种土地利用分类，为高分辨率数值模拟提供必要的基础。为检验模式的模拟效果，利用观测资料进行比较分析。

边界层选用的 YSU/MYJ 方案，YSU (Hong et al., 2006) 是 MRF 边界层方案的第二代，MRF 方案在不稳定状态下使用反梯度通量来计算水汽和热量。在边界层中使用增强的垂直通量系数，边界层高度由临界 Ri (理查孙数，用于表征层结大气稳定性) 决定，利用基于局地自由大气 Ri 隐式局地方案来处理垂直扩散项。YSU 相对于 MRF 增强了处理边界层顶部夹卷层方法。MYJ 方案 (Mellor and Yamada, 1982; Janjić, 2002) 是一维湍流动能诊

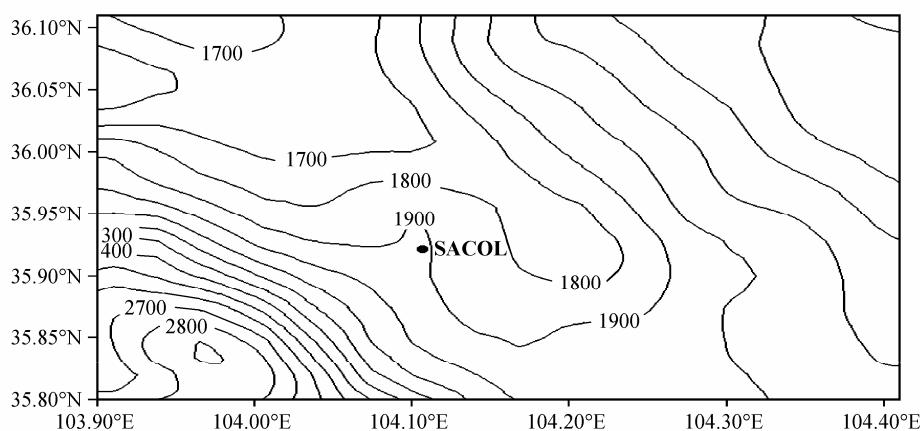


图 1 模拟区域地形，等值线代表海拔高度 (单位: m)

Fig. 1 Terrain height of simulation area. Isolines indicate the height above sea level (m)

断预报方案，并有局地垂直混合，采用边界层和自由大气中的湍流参数化过程代替 Mellor Yamada 的 2.5 阶湍流闭合方案。

2.3 个例及其天气背景

2007 年 7 月 14 日，SACOL 处于低槽后、高压外围西北气流中，具有典型山谷风环流特征；随着低槽东移，16 日 SACOL 处于暖高压外围，整日以东南风为主且风速较大；7 月 22、23 日，贝加尔湖地区为暖性高压控制，SACOL 处于槽后脊前，并伴有弱的冷平流，为两个连续的晴天；8 月 5 日，白天受弱的短波槽影响，SACOL 白天以卷云为主的多云天气，夜间逐渐转晴。

3 结果与讨论

3.1 SACOL 的局地环流特征

模拟 7 月 14 日典型近地面风场，可以看出该地区具有典型的山谷风特征。夜间（图 2a）为山风，由西南—东北海拔较高地域流向谷底，山谷中的风速明显小于山坡上的风速，地势最低处是静风区。

白天（图 2b）主导风向西北，由山谷吹向山坡，呈谷风特征。SACOL 这种典型山谷风局地环流，对使用激光雷达通过对气溶胶的探测来确定边界层高度有一定的影响。

3.2 地面温度、相对湿度模拟与观测对比分析

由于 SACOL 复杂下垫面、地形和局地山谷风作用，使其相对于其它均一平坦下垫面问题较为复杂。图 3、图 4 分别为地面（2 m 高度）温度、相对湿度比较。

2 m 处温度采用 YSU 边界层方案模拟值较观测值变化范围更小（图 3）。地处半干旱地区的 SACOL 昼夜温差变化剧烈模式两种方案能反映出较好的变化趋势，但是对于这种迅速增温、降温略显不足；另一方面测站地形复杂，模拟过程存在部分误差。总的看来模拟值与观测值基本吻合，能够反映出该气象要素的日变化规律。

图 4a、4b 为 7 月 22~23 日连续两天地面温度以及相对湿度的对比，对于温度白天采用 YSU 方案与观测值接近，夜间 MYJ 的方案略好于 YSU 方案；而相对湿度 YSU 方案好于 MYJ 方案，7 月 22

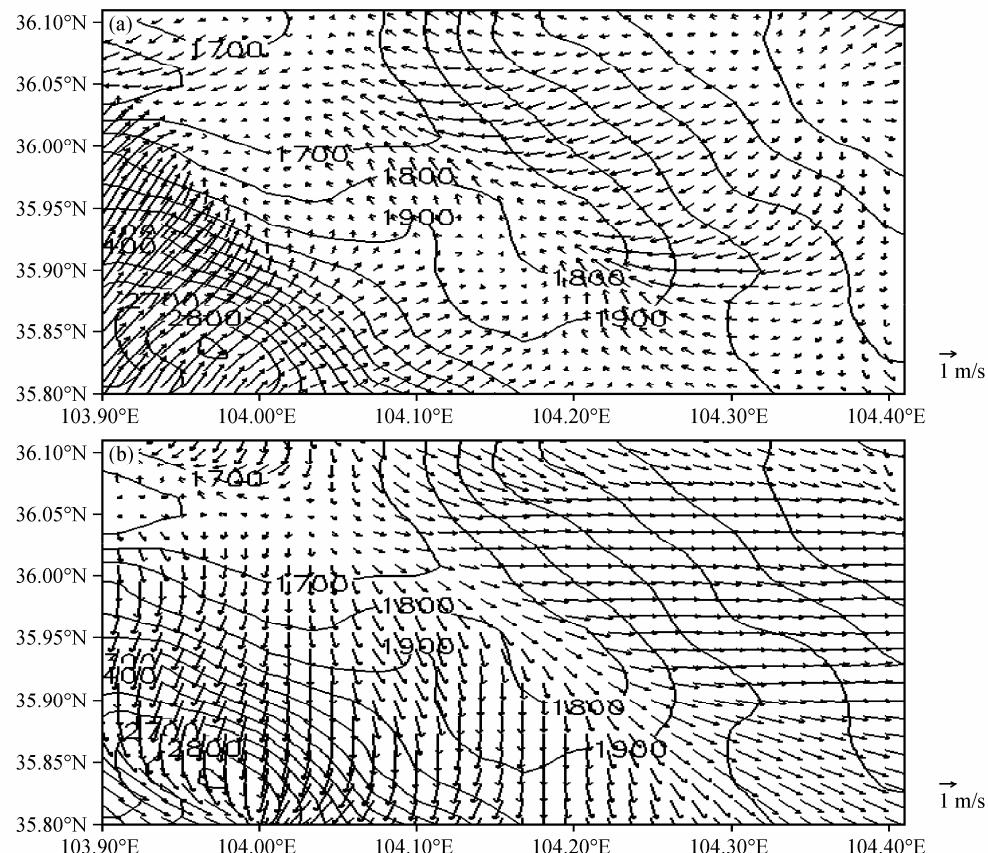


图 2 模拟的 2007 年 7 月 14 日 SACOL 近地面风场：(a) 02:00 (北京时间，下同); (b) 14:00。等值线代表海拔高度 (单位: m)

Fig. 2 Vectors of wind near the ground at SACOL at (a) 0200 LST and (b) 1400 LST on 14 Jul 2007. Isolines indicate the height above sea level (m)

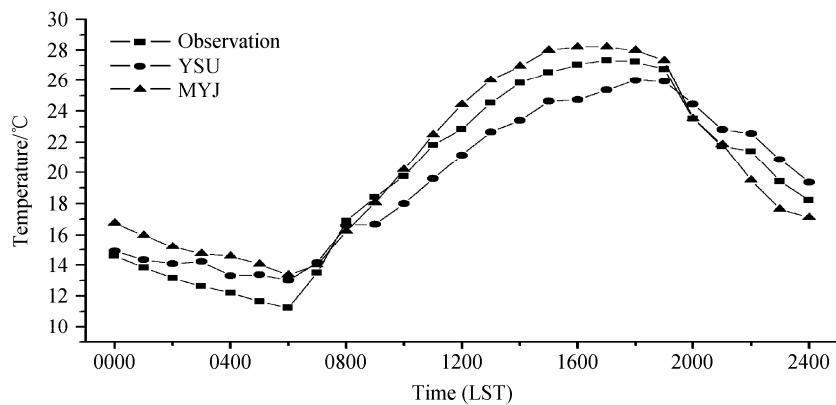


图 3 模拟与观测的 2007 年 7 月 14 日 SACOL 2 m 温度日变化比较

Fig. 3 Comparison of simulated and observed 2-m temperature at SACOL on 14 Jul 2007

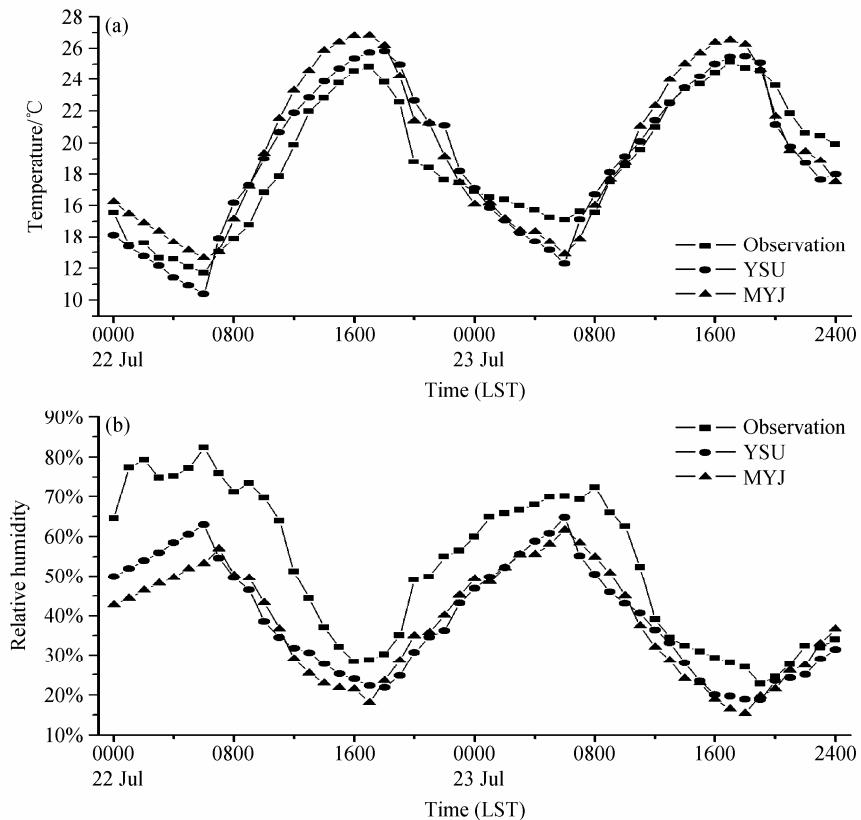


图 4 模拟与观测 2007 年 7 月 22、23 日 SACOL (a) 2 m 温度、(b) 2 m 相对湿度的日变化对比

Fig. 4 Comparison of simulated and observed (a) 2-m temperature and (b) 2-m relative humidity at SACOL on 22 Jul and 23 Jul 2007

目前几个小时误差略大，除了受复杂地形、地表影响外，可能是模式在前几个小时计算误差较大，需要计算一段时间才能稳定。

综合以上模拟与观测结果的对比可以看出，模式能够反映出气象要素的基本特征和随时间变化的特点，对该地区具有较好的模拟能力。

3.3 边界层日变化及垂直结构分析

图 5 给出了选取个例激光雷达反演边界层高度结果（以下简称雷达结果）和模拟的边界层高度日

变化对比。

图 5a 可以看出 YSU 模拟结果好于 MYJ，边界层达到最大高度模拟值比雷达结果大约早 2 h，并且模拟值在最高处维持大约 4 h。这种不一致，反映了激光雷达资料反演边界层高度的误差和 WRF 模式模拟的误差。利用激光雷达资料反演边界层高度的基本考虑是，在多数情况下，边界层内气溶胶较多，回波信号强，而自由大气回波信号弱，边界层与自由大气间过渡区回波信号急剧变弱，依此确

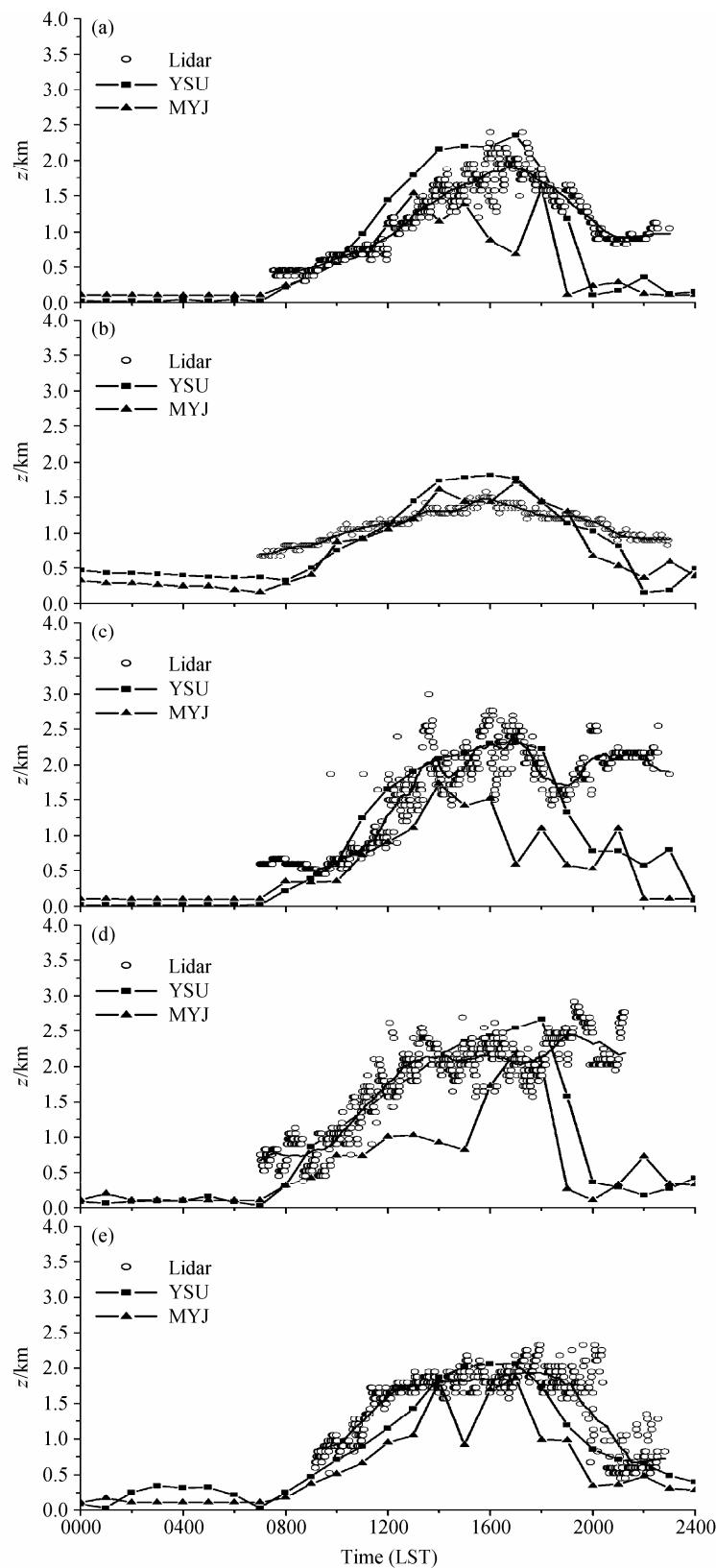


图 5 YSU 和 MYJ 方案的边界层高度与激光雷达反演边界层高度结果的日变化对比: (a) 2007 年 7 月 14 日; (b) 2007 年 7 月 16 日; (c) 2007 年 7 月 22 日; (d) 2007 年 7 月 23 日; (e) 2007 年 8 月 5 日

Fig. 5 Comparison of YSU and MYJ schemes boundary layer height with the Lidar value: (a) 14 Jul 2007; (b) 16 Jul 2007; (c) 22 Jul 2007; (d) 23 Jul 2007; (e) 5 Aug 2007

定边界层高度。但是,如果当地当时局地环流较强,或平流输送等过程较强,导致气溶胶垂直分布明显改变,可能造成判断边界层高度的误差,虽然这里利用小波变换的反演方法,尽量减少了误差,但仍可能存在误差,加之模式模拟结果可能的误差,会导致模拟边界层高度最大值出现时间与观测的不一致的情形。

图 5b 可以看出模拟结果和雷达结果基本一致,采用 MYJ 方案更接近观测值, MYJ 方案是根据湍流动能的廓线来确定边界层高度而 YSU 方案中边界层高度的确定是根据位温廓线确定,当日以东南风为主且风速较大,机械湍流起得作用更大;另一方面两种方案模拟结果都比雷达结果高度略高,主要是边界层发展起来后,气溶胶才会随之向上输送,存在气溶胶输送滞后性;午后模拟边界层迅速下降,而雷达结果下降缓慢也体现这种滞后性。

图 5c-5d 可以看出采用 YSU 方案好于 MYJ,可能是这两天边界层发展主要是热力作用的对流边界层。雷达结果波动较大可能是发生在不稳定边界层顶与自由大气之间产生的 Kelvin-Helmholtz 波(开尔文-赫姆霍兹波),这种波动通常在稳定边界层顶观测不到,波动使得自由大气中的气溶胶通过夹卷作用进入边界层顶。图 5c、5d 夜间边界层下降时观测没有反映出来,可能是气溶胶已经进入自由大气,不受边界层变化的影响,已不能示踪边界层顶的变化。

8月5日模拟结果与雷达结果的比较(见图 5e),采用 YSU 方案模拟边界层高度与雷达结果趋于一致。

采用 YSU 方案模拟 22 日和 23 日的位温廓线

图(图 6a、6b),反映了白天随着温度升高边界层的发展过程。SACOL 日出后地面温度和边界层高度逐渐升高,地面温度在 16:00 左右出现最高值,而边界层高度 17:00 左右达到最高并可维持到 18:00。其主要原因是 SACOL 地方时比北京时晚 1 小时 4 分钟,以及 SACOL 地形、下垫面复杂,与平坦下垫面相比,影响地面温度和边界层高度的因素较多,例如山谷风等局地因素对地面温度和边界层高度影响较大。

综上,模式模拟的气象要素与地面实测结果较一致,且模拟的位温廓线及其演化合理地反映出不稳定边界层日出后生成、发展的过程。而激光雷达反演的边界层高度与 WRF 模拟的结果基本一致,尽管在清晨二者有较明显差别,差别在 200 m 以内(除一个例外是 400 m)。不稳定边界层从日出 08:00 左右生成、发展,17:00 达到最大高度;热力作用边界层高度可达 2 km;动力作用边界层高度约 1.5 km,热力边界层下降速度明显大于动力边界层。

4 结果与讨论

利用激光雷达资料和 WRF 模式,对比分析了兰州远郊榆中地区 SACOL 的边界层高度特征。利用地面温度、相对湿度等要素比较验证了 WRF 模式,并比较分析了 YSU、MYJ 两种边界层方案的模拟结果。

(1) WRF 模拟的地面温度、相对湿度与实测地面温度、相对湿度能较好地符合;模拟的位温廓线及其演化能合理反映日出后不稳定边界层生成、发

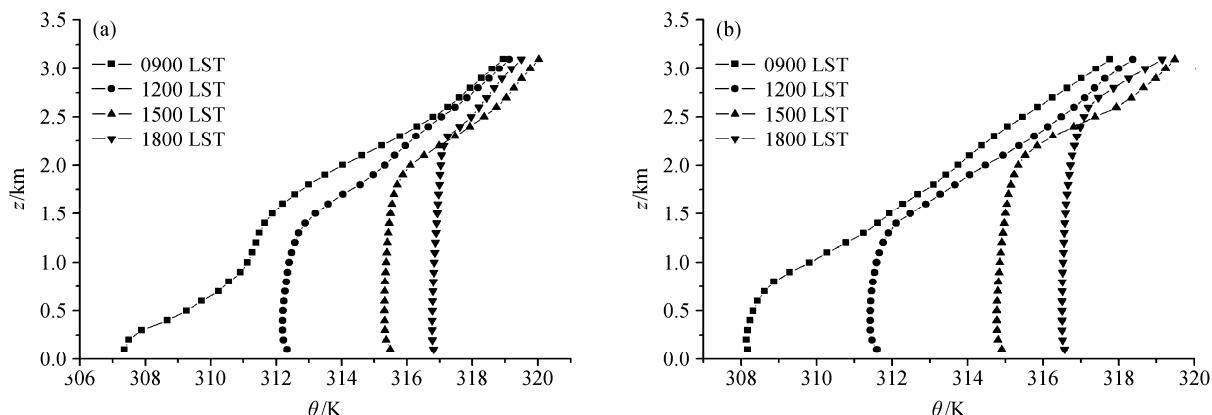


图 6 模拟位温廓线: (a) 2007 年 7 月 22 日; (b) 2007 年 7 月 23 日

Fig. 6 Simulated potential temperature profiles: (a) 22 Jul 2007; (b) 23 Jul 2007

展的过程。模式验证表明, WRF 模式对 SACOL 所在地区具有较强的模拟能力。

(2) 比较 WRF 模式的 YSU、MYJ 两种边界层方案的模拟结果, 表明 YSU 方案对于热对流起主要作用边界层模拟效果较好, 而 MYJ 对于动力起主要作用的模拟效果较好。

(3) WRF 模拟的边界层高度与激光雷达资料反演的边界层高度具有较好的一致性。日出后 08:00 左右边界层开始生成发展, 17:00 达到最大高度, 一般可维持到 18:00。热对流边界层高度可达到 2 km, 而动力边界层高度约为 1.5 km, 热对流边界层下降速度明显快于动力边界层下降速度。

激光雷达反演边界层高度与 WRF 模拟边界层高度存在的差别, 源于激光雷达反演的误差和 WRF 模拟的误差。利用激光雷达资料反演边界层高度的基本前提是, 在多数情况下, 边界层内气溶胶较多, 回波信号强, 而自由大气回波信号弱, 边界层与自由大气间过渡区回波信号急剧变弱, 依此确定边界层高度。但是, 如果当地当时局地环流较强, 或平流输送等过程较强, 大气中开尔文-赫姆霍兹波等因素影响, 导致气溶胶垂直分布明显改变, 可能造成判断边界层高度的误差, 虽然本文利用小波变换的反演方法, 尽量减少了误差, 但仍然可能存在误差。这些问题都需要今后进一步深入研究。

致谢 感谢兰州大学半干旱气候与环境观测站 (SACOL) 提供的激光雷达等观测数据。

参考文献 (References)

- Amiridis V, Melas D, Balis D S, et al. 2007. Aerosol lidar observations and model calculations of the planetary boundary layer evolution over Greece, during the March 2006 total solar eclipse [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 7: 6181–6189.
- Bidokhti A A, Khoshima M, Sabetghadam S, et al. 2008. Estimation of urban mixed layer height in Zanjan using lidar observations and numerical modeling [J]. Journal of Earth System Science, 117: 925–934.
- 陈炯, 王建捷. 2006. 北京地区夏季边界层结构日变化的高分辨模拟对比 [J]. 应用气象学报, 17 (4): 403–411. Chen Jiong, Wang Jianjie. 2006. Diurnal cycles of the boundary layer structure simulated by WRF in Beijing [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 17 (4): 403–411.
- Dandou A, Tombrou M, Schäfer K, et al. 2009. A comparison between modelled and measured mixing-layer height over Munich [J]. Bound.-Layer Meteor., 131: 425–440.
- 杜萍, 陈长和, 钱泽雨. 2001. 兰州冬季城乡边界层高度的比较分析[J]. 兰州大学学报 (自然科学版), 37 (2): 152–154. Du Ping, Chen Changhe, Qian Zeyu. 2001. Urban-rural boundary layer height of comparative analysis in winter over Lanzhou [J]. Journal o f Lanzhou University (Natural Sciences) (in Chinese), 37 (2): 152–154.
- 郭振海, 陈重, 张宏升, 等. 1999. 一维大气边界层二阶闭合的有限元数值模式 I. 对流边界层模拟 [J]. 大气科学, 23 (6): 733–744. Guo Zhenhai, Chen Chong, Zhang Hongsheng, et al. 1999. A one-dimensional finite element model with two-order closure scheme simulating the atmospheric boundary layer Part I: Convective boundary layer [J]. Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 23 (6): 733–744.
- Hong S Y, Noh Y, Dudhia J. 2006. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes [J]. Mon. Wea. Rev., 134: 2318–2341.
- 胡非. 1995. 湍流、间歇性与大气边界层 [M]. 北京: 科学出版社, 160–193. Hu Fei. 1995. Turbulent, Intermittent and Atmospheric Boundary Layer (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 160–193.
- Janjić Z L. 2002. Nonsingular Implementation of the Mellor-Yamada Level 2.5 Scheme in the NCEP Meso model [R]. NCEP Office Note, 437, 61pp. 10
- Jerićević A, Kraljević L, Grisogono B, et al. 2010. Parameterization of vertical diffusion and the atmospheric boundary layer height determination in the EMEP model [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 10: 341–364.
- Joseph B K. 2004. Weather research and forecasting model: A technical overview [C]// 84th AMS Annual Meeting. Seattle, USA: 10–15.
- 鞠丽霞, 王勤耕, 张美根, 等. 2003. 济南市城市热岛和山谷风环流的模拟研究 [J]. 气候与环境研究, 8 (4): 467–474. Ju Lixia, Wang Qingeng, Zhang Meigen, et al. 2003. A simulation of heat island circulation and mountain-valley breeze in Ji'nan[J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 8 (4): 467–474.
- 刘辉志, 洪钟祥, 桑建国. 2001. 对流边界层中过山气流的数值模拟[J]. 气候与环境研究, 6 (3): 305–311. Liu Huizh, Hong Zhongxiang, Sang Jianguo. 2001. Numerical simulation of the flow over terrain on the convective boundary layer [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 6 (3): 305–311.
- Mellor G L, Yamada T. 1982. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems [J]. Rev. Geophys. Space Phys., 20: 851–875.
- 缪国军, 张镭, 舒红. 2007. 利用 WRF 对兰州冬季大气边界层的数值模拟 [J]. 气象科学, 27 (2): 169–175. Miao Guojun, Zhang Lei, Shu Hong. 2007. The numerical simulation of the wind speed and temperature field in winter atmospheric boundary layer in Lanzhou by using WRF [J]. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 27 (2): 169–175.
- Morille Y, Haefelin M, Drobinski P, et al. 2007. STRAT: an automated algorithm to retrieve the vertical structure of the atmosphere from single-channel lidar data [J]. J. Atmos. Oceanic Technol., 24: 76–775.
- Pearson G, Davies F, Collier C. 2010. Remote sensing of the tropical rain forest boundary layer using pulsed Doppler lidar [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 10: 5891–5901.
- Shou Y X, Zhang D L. 2010. Impact of environmental flows on the daytime urban boundary layer structures over the Baltimore metropolitan region [J]. Atmospheric Science Letters, 11: 1–6.

- 宋星灼, 张宏升, 刘新建, 等. 2006. 青藏高原中部地区不稳定大气边界层高度的确定与分析 [J]. 北京大学学报 (自然科学版), 42 (3): 328–333. Song Xingzhuo, Zhang Hongsheng, Liu Xinjian, et al. 2006. Determination of atmospheric boundary layer height in unstable conditions over the middle Tibetan Plateau [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis* (in Chinese), 42 (3): 328–333.
- Stull R B. 1988. An Introduction to Boundary Layer Meteorology [M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1–23.
- van der Kamp D, McKendry I. 2010. Diurnal and seasonal trends in convective mixed-layer heights estimated from two years of continuous ceilometer observations in Vancouver, BC [J]. *Bound.-Layer Meteor.*, 137: 459–475.
- 王式功, 姜大膀, 杨德保, 等. 2000. 兰州市区最大混合层厚度变化特征分析 [J]. 高原气象, 19 (3): 363–370. Wang Shigong, Jiang Dabang, Yang Debao, et al. 2000. A study on characteristics of change of maximum mixing depths in Lanzhou [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 19 (3): 363–370.
- 王颖, 张镭, 胡菊, 等. 2010. WRF 模式对山谷城市边界层模拟能力的检验及地面气象特征分析 [J]. 高原气象, 29 (6): 1397–1407. Wang Ying, Zhang Lei, Hu Ju, et al. 2010. Verification of WRF simulation capacity on PBL characteristic and analysis of surface meteorological characteristic over complex terrain [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 29 (6): 1397–1407.
- 王珍珠, 李炬, 钟志庆, 等. 2008. 激光雷达探测北京城区夏季大气边界层 [J]. 应用光学, 19 (1): 96–100. Wang Zhenzhu, Li Ju, Zhong Zhiqing, et al. 2008. Lidar exploration of atmospheric boundary layer over downtown of Beijing in summer [J]. *Journal of Applied Optics* (in Chinese), 19 (1): 96–100.
- 杨胜朋, 吕世华, 陈玉春, 等. 2009. RAMS 模式在山谷城市模拟性能的检验 [J]. 中国沙漠, 29 (6): 1212–1220. Yang Shengpeng, Lü Shihua, Chen Yuchun, et al. 2009. Test on simulating effect of RAMS model in valley-type city [J]. *Journal of Desert Research* (in Chinese), 29 (6): 1212–1220.
- 章国材. 2004. 美国 WRF 模式的进展和应用前景 [J]. 气象, 30(12): 27–31. Zhang Guocai. 2004. Progress of weather research and forecast (WRF) model and application in the United States [J]. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 30 (12): 27–31.
- 张美根, 韩志伟. 1998. 复杂地形对对流混合层的影响 [J]. 气候与环境研究, 3 (2): 117–123. Zhang Meigen, Han Zhiwei. 1998. Effects of complex terrain upon convective mixed layer [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 3 (2): 117–123.
- 张强, 吕世华, 张广庶. 2003. 山谷城市大气边界层结构及输送能力 [J]. 高原气象, 22 (4): 346–353. Zhang Qiang, Lü Shihua, Zhang Guangshu. 2003. The structure of atmospheric boundary layer over valley city and its transfer ability [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 22 (4): 346–353.
- 张强, 赵映东, 王胜, 等. 2007. 极端干旱荒漠区典型晴天大气热力边界层结构分析 [J]. 地球科学进展, 22 (11): 1150–1159. Zhang Qiang, Zhao Yingdong, Wang Sheng, et al. 2007. A study on atmospheric thermal boundary layer structure in extremely arid Desert and Gobi region on the clear day in summer [J]. *Advances in Earth Science* (in Chinese), 22 (11): 1150–1159.
- 赵鸣. 2006. 大气边界层动力学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1–12. Zhao Ming. 2006. Dynamics of Atmospheric Boundary Layer (in Chinese) [M]. Beijing: Higher Education Press, 1–12.