大气科学
CHINESE JOURNAL OF ATMOSPHERIC SCIENCES

WRF模式边界层参数化方案对川渝盆地西南涡降水模拟的影响

吴志鹏 李跃清 李晓岚 胡小明 周国兵 邓承之

Influence of Different Planetary Boundary Layer Parameterization Schemes on the Simulation of Precipitation Caused by Southwest China Vortex in Sichuan Basin Based on the WRF Model

WU Zhipeng LI Yueqing LI Xiaolan HU Xiaoming ZHOU Guobin DENG Chengzhi

在线阅读 View online: https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2005.19171

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

边界层参数化方案对“莫兰蒂”台风（1614）登陆阶段影响的数值模拟研究

Numerical Investigation of the Effects of Boundary Layer Parameterization Schemes on Typhoon Meranti (1614) Landing Process

大气科学. 2020, 44(5): 935 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2004.19135

不同边界层参数化方案对江苏地区一次平流雾过程的模拟影响

Influence of Different Boundary Layer Parameterization Schemes on the Simulation of an Advection Fog Process in Jiangsu

大气科学. 2018, 42(6): 1344 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1801.17212

边界层湍流参数化改进对雾的模拟影响

The Impact of an Improved Planetary Boundary Layer Parameteriza tion Scheme on the Simulation of Fog

大气科学. 2017, 41(3): 533 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1606.16152

边界层参数化方案在“灰色区域”尺度下的适用性评估

Assessment of the Suitability of Planetary Boundary Layer Schemes at "Grey Zone" Resolutions

大气科学. 2018, 42(1): 52 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1704.16269

根系吸水过程参数化方案对青藏高原陆面过程模拟的影响研究

Effect of the Root-Water-Uptake Process Parameterization Schemes on the Land-Surface-Process Simulation in the Qinghai-Tibet Plateau

大气科学. 2020, 44(1): 211 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1902.18246

高原涡和西南涡影响的两次四川暴雨过程的对比分析

Comparative Analysis of Two Rainstorm Processes in Sichuan Province Affected by the Tibetan Plateau Vortex and Southwest Vortex

大气科学. 2019, 43(4): 813 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1807.18147

关注微信公众号，获得更多资讯信息

吴志鹏, 李跃清, 李晓岚, 等. 2021. WRF 模式边界层参数化方案对川渝盆地西南涡降水模拟的影响 [J]. 大气科学, 45(1): 58−72.　WU Zhipeng, LI Yueqing, LI Xiaolan, et al. 2021. Influence of Different Planetary Boundary Layer Parameterization Schemes on the Simulation of Precipitation Caused by Southwest China Vortex in Sichuan Basin Based on the WRF Model [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 45(1): 58−72. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2005.19171

WRF 模式边界层参数化方案对川渝盆地西南涡降水模拟的影响

吴志鹏[1]　李跃清[2]　李晓岚[3]　胡小明[4]　周国兵[1]　邓承之[1]

1 重庆市气象台，重庆 401147
2 中国气象局成都高原气象研究所/高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室，成都 610072
3 中国气象局沈阳大气环境研究所，沈阳 110166
4 俄克拉荷马大学风暴分析与预测中心，诺曼 73072，美国

摘　要　应用 WRF v4.0 模式五种边界层参数化方案（YSU、MYJ、MYNN2、ACM2 和 SH），对 2016 年汛期（5～9 月）在川渝盆地东部造成暴雨的所有西南涡过程进行了数值模拟，检验评估了它们对各量级降水的预报能力，并基于加密的 L 波段秒级探空资料对比分析了模拟与实况边界层结构的差异，结合各方案对湍流运动的算法特点探讨了其差异的原因，最后对 ACM2 方案进行了湍流强度调整，由此改善其对于川渝盆地边界层与西南涡降水的模拟能力。结果表明：ACM2 和 YSU 方案 TS 评分表现较好，相对其它方案 ACM2 空报较少，这种可以根据周围环境的稳定性切换局地或非局地算法的方案更适合于盆地西南涡降水模拟，但边界层方案对西南涡降水的空报都较普遍，尤以大量级降水更明显；精细的探空资料进一步表明，所有方案模拟的白天边界层高度都偏高，湍流混合强度都偏强。通过参数调整而降低混合强度的 ACM2 方案，模拟的边界层温湿结构则更符合实际观测，其边界层下部温度更低、湿度更高，减少了大量级降水的空报，使盆地西南涡降水模拟有一定改善；边界层参数化方案对西南涡模拟的差别主要体现为不同的西南涡位置与降水强度，但归根到底都源于方案的局地或非局地特性、不同的混合强度这两方面原因。因此，根据不同特定区域下垫面环境与气候状况合理选择方案的特性和混合强度是准确模拟边界层结构及其降水过程的关键。

关键词　行星边界层　参数化方案　西南涡　暴雨　数值模拟
文章编号　1006-9895(2021)01-0058-15　　**中图分类号**　P435　　**文献标识码**　A
doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2005.19171

Influence of Different Planetary Boundary Layer Parameterization Schemes on the Simulation of Precipitation Caused by Southwest China Vortex in Sichuan Basin Based on the WRF Model

WU Zhipeng[1], LI Yueqing[2], LI Xiaolan[3], HU Xiaoming[4], ZHOU Guobin[1], and DENG Chengzhi[1]

收稿日期　2019-06-13；**网络预出版日期**　2020-06-11
作者简介　吴志鹏，男，1985 年出生，硕士研究生，主要从事中尺度数值天气模拟的研究。E-mail: 361913145@qq.com
通讯作者　李跃清，E-mail: yueqingli@163.com
资助项目　国家自然科学基金项目 91937301、42030611，第二次青藏高原综合科学考察研究项目 2019QZKK0103、2019QZKK0105，四川省气象局与南京信息工程大学局校合作项目 SCJXHZ03，四川省科技计划项目 2016JY0046
Funded by　National Natural Science Foundation of China (Grants 91937301, 42030611), The Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research (STEP) Program (Grants 2019QZKK0103, 2019QZKK0105); Cooperation Project between Sichuan Provincial Meteorological Bureau and Nanjing University of Information Science–Technology (Grant SCJXHZ03); Sichuan Provincial Science and Technology Project (Grant 2016JY0046)

1 *Chongqing Meteorological Observatory*, *Chongqing* 401147
2 *Institute of Plateau Meteorology*, *China Meteorological Administration*, *Chengdu* 610072
3 *Institute of Atmospheric Environment*, *China Meteorological Administration*, *Shenyang* 110166
4 *University of Oklahoma*, *Center for Analysis and Prediction of Storms*, *Norman* 73072, *USA*

Abstract Five planetary boundary layer (PBL) parameterization schemes [Yonsei University (YSU), Mellor–Yamada–Janjic (MYJ), Mellor–Yamada–Nakanishi–Niino Level 2.5 (MYNN2), Shin-Hong (SH), and the asymmetric convective model, version 2 (ACM2)] in the Weather Research and Forecast model (WRF v4.0), were used to simulate all well-developed Southwest China vortex (SWCV) processes in the eastern Sichuan basin in 2016. Each level of precipitation prediction was verified, and the L-band radiosonde data with temporal resolution of 1 s were used to reveal the fine structure of the PBL during a midday. The differences between the observation and simulation are assessed, and the reasons are discussed based on the characteristics of the turbulence algorithm used in each scheme. Finally, the parameter of turbulence intensity was adjusted for the ACM2 scheme to improve the structure of the PBL that influences the simulation of the precipitation in the eastern Sichuan basin. The results show that the ACM2 and YSU schemes show a relatively better TS performance. Compared with other schemes, ACM2 has fewer false alarms. The attribute of ACM2 that can modify local or nonlocal algorithms according to the stability of the surrounding environment seems to be more suitable for the Sichuan basin precipitation simulation than the other schemes. However, all PBL schemes show a high false-alarm rate in the prediction of the SWCV precipitation, especially when the precipitation is heavy. The sounding data with 1 s temporal and 3 m spatial resolution further show that all the PBL schemes predict a higher PBL height compared with that of the observations, which means that the simulation has a stronger mixing intensity compared with that of the real atmosphere. By parameter adjustment, using the ACM2 scheme with reduced mixing intensity, the potential temperature and humidity structure in PBL are more aligned with the observations. Further, the potential temperature of the low PBL is low, humidity is high, and false alarm reports of heavy precipitation are reduced, which leads to an improvement regarding the precipitation simulation in the Sichuan basin. The different characters of the PBL schemes that are used in the simulation of the SWCV mainly lead to different positions of the vortex and precipitation intensity. Essentially, these characters are derived from a local or nonlocal attribute and the intensity of vertical mixing. A selection based on regional features of a research object is the key to the accurate simulation of a PBL structure and precipitation process.

Keywords Planetary boundary layer, Parameterization, Southwest China vortex, Torrential rain, Numerical simulation

1 引言

行星边界层（Planetary Boundary Layer，PBL）处于对流层的最下层，是与人类活动联系最紧密的一层。由于直接与地球表面接触，因而受到地表热量、水汽与动能的影响最大。边界层内最主要的特征是湍流及其日变化，通过湍流，边界层将白天地表的太阳能以感热和潜热的方式向上层空气输送；夜间地面辐射冷却也同样会影响上层的大气（盛裴轩等, 2013）。然而，边界层内大气的湍流运动非常复杂，人们对湍流的认识还很粗浅，现代数值天气预报技术中仍然通过多种参数化方案对湍流热量、湿度和动能的交换进行统计意义上的描述（Nielsen-Gammon et al., 2010）。

边界层参数化方案在描述湍流运动时无法避免的会出现不确定与不准确性，最终可能对天气现象的预报结果带来很大偏差（Hacker, 2010; Hu et al., 2010）。目前，最新版本的 WRF v4.0 模式（Weather Research and Forecast Model，4.0）有 YSU（Hong et al., 2006）、MYJ（Janjić, 2001）、MYNN2（Nakanishi and Niino, 2006）、SH（Shin and Hong, 2015）和 ACM2（Pleim, 2007）等 11 种边界层参数化方案可供选用，国内外学者针对不同季节、区域和预报对象，对各边界层参数化方案已做了大量的评估与分析。Hu et al.（2010）通过对比 YSU、MYJ 和 ACM2 三个方案在美国德克萨斯州 3 个月的平均表现，指出不同边界层参数化方案对垂直混合强度和卷夹通量的计算差异是导致边界层结构预报结果不同的主要原因。Cohen et al.（2015）综述了多种边界层参数化方案的优点与不足，并针对美国南部的寒冷季节对比了它们的差异，指出非局地方案考虑了更大尺度的湍流涡旋对整个边界层内热量、湿度和动量的影响，比局地方案能更好地模拟边界层高度的发展。而李斐等（2017）、许鲁

君等（2018）分别在中国青藏高原那曲和藏东南检验了 YSU、MYJ、Boulac（Bougeault and Lacarrere, 1989）和 ACM2 四种方案，发现局地方案对边界层的模拟均好于非局地方案。因此，不存在某一种参数化方案适合所有情景的模拟，其需要因时、因地、因对象而选择，一般应开展本地化的具体检验、综合调试等工作。

数值模式的降水模拟是一个非常复杂的过程，其机理涉及到多种因素。赵鸣（2008）基于多年研究指出：虽然大尺度动力过程才是暴雨发生发展的主要原因，但边界层和陆面过程会影响暴雨的强度和中心位置。尤其是地处青藏高原东侧的川渝盆地（原四川盆地），夏季受多重季风影响和复杂地形作用，中小尺度系统非常活跃，强降水等灾害天气频发、突发。李跃清（1996, 2000）发现青藏高原东侧长江上游地区大气边界层的热力、动力过程与暴雨天气有着非常密切的关系，提出了在青藏高原—四川盆地特殊地形下，大气边界层的激发作用是长江上游暴雨天气发展演变的物理机制。而西南低涡（简称西南涡）是青藏高原特殊地形与大气环流相互作用下，形成于我国西南地区 700 或 850 hPa 等压面的 α 中尺度气旋低压系统，其低涡暴雨也是一种非常复杂、富有特色的强降水现象（卢敬华, 1986; 李国平, 2002; 赵思雄和傅慎明, 2007; 李跃清和徐祥德, 2016），造成的暴雨强度、频次和范围仅次于台风（王作述等, 1996）。Wang and Tan（2014）的理论分析表明：西南涡是不同地形共同作用的结果，青藏高原、横断山脉具有首要的作用，四川盆地起到促进的作用。Fu et al.（2015）首次分析了长生命史西南涡的普遍演变机制和能量转换特征，揭示了其三维结构。Feng et al.（2016）的气候分析得到：西南涡的平均生命史 15.1 h、水平尺度 435 km、移动速度 8.6 m s^{-1}，四类不同的西南涡表现出浅薄深厚、冷热中心、干湿中心和正压斜压等不同性质。Cheng et al.（2016）分析了一次深厚型西南涡与高原涡耦合引发的大暴雨过程，提出了西南涡与高原涡相互作用的横向耦合新机制。并且，卢萍等（2014）针对 3 次东移影响我国华南持续性强降水的西南涡过程进行了数值模拟，由此分析了西南涡及其暴雨的演变特征和影响因素。高笃鸣等（2016）利用 YSU、MYJ 和 ACM2 三种边界层方案对四川盆地连续 40 天的降水开展模拟试验，并讨论各方案对不同量级降水的预报能力，对比分析了实况探空与不同方案对边界层结构预报的差异，指出 YSU 对大量级降水预报能力较优，ACM2 更适合小量级降水模拟。关于西南涡的定义、涡源、结构、活动、影响和机制等都取得一些新的成果（Zhong et al., 2014; Zhang et al., 2014; 李超等, 2015; Yu et al., 2016; 叶瑶和李国平, 2016; 慕丹和李跃清, 2018; 杨颖璨等，2018）。但是，西南涡及其暴雨的模拟与预报仍然是研究和业务的难点和重点。由于青藏高原东侧复杂地形和多尺度系统的影响，目前对西南涡精细结构的了解还有限，其发生发展机理与引发高影响天气过程的物理机制仍不是很清楚，对西南涡气候学特征的认识还有差异，故其降水预报难度很大，也是数值天气预报最薄弱的方面。

由上可知，关于西南涡及其暴雨过程的已有研究和模拟多针对一两个典型的个例或较短一段时间的天气，难以系统深入考察模式边界层参数化方案对西南涡天气系统的预报能力，并且，模拟使用的背景场与嵌套子网格分辨率也较为粗糙（多用 1°×1°FNL 资料，最内层网格分辨率 5～15 km），加之观测资料的精细程度也较难反映白天真实的大气边界层状况。更为重要的是，WRF 模式中几乎所有边界层方案的参数选择都有一个要求的合理范围，而这些默认的参数大小都是基于美洲地区的试验选定，其是否适合青藏高原、四川盆地等特殊地区的边界层模拟还有待于试验验证。因此，本文选用 0.25°×0.25°GDAS/FNL 资料为模拟侧边界条件与初始场，采用 5 种涵盖局地与非局地的边界层参数化方案 YSU、MYJ、MYNN2、SH 和 ACM2（其中 SH 和 MYNN2 分别对 YSU 和 MYJ 做了对流环境下的优化），最细网格分辨率 3 km，并关闭最内层嵌套的积云对流参数化方案（Convention-allowing），垂直方向 50 层，模拟了 2016 年全年所有典型的西南涡影响过程，检验它们对不同量级降水的模拟能力，对比精细的 L 波段秒级探空数据，考察它们对边界层结构的模拟差异，进而优选与改进 WRF 模式的 PBL 参数化方案，提高复杂地形环境下川渝盆地西南涡降水的模拟与预报能力。

2 资料和方法

2.1 西南涡过程与观测资料

2016 年汛期（5～9 月），川渝盆地东部共出现 9 次大范围暴雨过程，根据西南低涡 2016 年年鉴（李跃清, 2018），其中有 7 次暴雨过程受到西南涡的影响（表 1），其强降水的时间、范围，以

表 1　2016 年汛期盆地东部区域性暴雨过程及影响系统

Table 1　Heavy rainfall processes and affecting weather systems in the eastern part of the Sichuan Basin in 2016

暴雨过程	时间(北京时)	影响系统			
		500 hPa	700 hPa	850 hPa	地面
“5.6”	5月6日14时～8日08时	低槽、高原涡	西南涡	西南涡、急流	冷锋、热低压
“6.1”	6月31日20时～7月2日20时	低槽、高原涡	西南涡、急流	西南涡、急流	冷锋、辐合线
“6.19”	6月18日18时～20日14时	低槽	西南涡、急流	西南涡、急流	辐合线
“6.23”	6月23日18时～25日08时	低槽	西南涡、急流	西南涡、急流	冷锋、热低压
“6.27”	6月26日20时～28日20时	低槽	切变线、急流	切变线	冷锋、辐合线
“6.30”	6月30日02时～7月1日10时	低槽、高原涡	西南涡、急流	西南涡、急流	辐合线
“7.14”	7页13日19时～15日08时	低槽、高原涡	西南涡	西南涡	冷锋
“7.18”	7月18日14时～20日08时	低槽	西南涡、急流	西南涡、急流	冷锋、辐合线
“9.9”	9月9日02时～20时	低槽	切变线	切变线	辐合线

及西南涡活动及其影响等都是历史少见的。整个汛期降水整体呈前强后弱的特征，有 8 次暴雨过程出现在 7 月中旬及以前，尤其是 6 月中下旬的两周时间里接连出现了 4 次区域性大暴雨过程。本文重点针对西南涡引发的 7 次暴雨过程，开展其 48 h 降水的模拟试验。

利用中国气象局重庆站 [（29.52°N，106.48°E），海拔 541.1 m，图 1 中红点位置] L 波段高空气象雷达加密探测数据，分析 7 次西南涡过程中边界层的垂直结构并对模拟结果进行校验。值得说明的是，该探测数据在 08 时（北京时，下同）与 20 时业务探空基础上，加密了午后 14 时观测，并且所有时

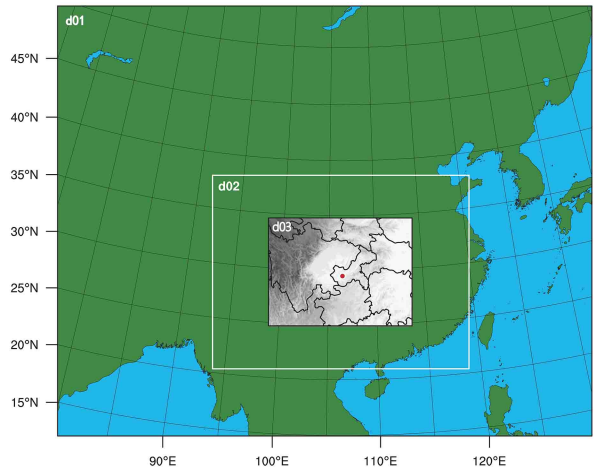

图 1　嵌套区域图（红点处为重庆站）。d01 格距为 27 km，格点数为 200×160；d02 格距为 9 km，格点数为 288×216；d03 格距为 3 km，格点数为 480×360

Fig. 1　Forecast and nest area diagram (red spot is Chongqing station). d01 grid resolution is 27 km and grid number is 200×160; d02 grid resolution is 9 km and grid number is 288×216; d03 grid resolution is 3 km and grid number is 480×360

次探空数据时间分辨率为 1 秒，垂直分辨率 3 m，观测的气象要素包括气压、温度、相对湿度、风速、风向，这种高精度的探空资料适用于中国不同地区精细化的日间边界层高度、温度和湿度分析，进而更准确的认识边界层参数化方案对边界层内气象要素的模拟能力，提供灾害性天气系统影响下，边界层参数化方案的改进依据。

此外，本文采用的实况降水资料来自国家气象信息中心研发的 CMA（China Meteorological Administration）三源（地面—卫星—雷达）降水融合分析产品，中国区域的格点分辨率为 0.05°×0.05°。研究中将其插值到 d03 区域内（图 1），使之与模拟试验分辨率匹配，从而可在每个格点上检验降水模拟的效果。

2.2　模式配置与参数设置

模拟内核使用 WRF-ARW4.0 版（Weather Research and Forecast Model，4.0），采用如图 1 所示的 3 层嵌套，水平分辨率分别为 27 km、9 km、3 km，最内层嵌套 d03 覆盖青藏高原东部与整个川渝盆地，是受西南涡生成与发展直接影响最大的地区。采用 NCEP（National Centers for Environmental Prediction）6 h 时间间隔，0.25°水平分辨率的 GDAS/FNL 资料（数据集编号 ds083.3）作为模式初始场与侧边界，最外层积分步长 90 秒，垂直方向 50 层，不采用资料同化模块。

自 WRF3.9 版升级以后，NCAR 发布并推荐了“CONUS”和“TROPICAL”两套物理过程套装供大陆与海洋气候模拟研究（https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_v4/v4.0/users_guide_chap5.html [2019-03-24]），并称该物理过程套

装在美洲已经过多年大量测试，为较优选择。本文除采用不同边界层参数化方案外，同时关闭了 d03 嵌套的积云对流参数化方案，而其它物理过程皆保持与“CONUS”一致：Thompson V3.1 微物理、Tiedtke 积云对流、unified-Noah 陆面过程和 rrtmg 长波辐射与短波辐射参数化方案。

2.3 边界层参数化方案简介

边界层参数化方案在数值模拟过程中，对湍流的计算与解释主要围绕两个中心：一是湍流闭合的阶数，二是方案是局地还是非局地假设（Stull, 1988; Stensrud, 2007）。因为在湍流的建模方程中，其未知项的数学量级往往比已知项的总和还高一个量级，所以，需要凭经验将未知项大小做 $n+1$ 级，由此与已知项相关联，从而使湍流方程闭合得以求解，这被称为 n 阶湍流闭合；而局地与非局地参数化方案的差别在于，物质和通量的交换只在相邻格点上进行或是可以发生在不相邻的层次之间。

表 2 中，SH 方案实质上是 YSU 的对流升级方案，强化了不稳定层结时的方案性能。MYNN2 是 MYJ 的升级方案，参考了非局地方案的一些春季试验特征，对深厚湿对流环境下的参数特征做了改进。ACM2 方案是一种非局地向上混合与局地向下混合的非对称对流模式，其特点是在稳定或中性层结时关闭垂直方向的非局地输送，只允许相邻网格间的湍流输送。因此，可以将它看成一种局地—非局地混合型边界层参数化方案，Pleim（2007）指出：因为该方案基于美洲午后风廓线雷达实况做过订正，它能更好地描述边界层高度。值得指出的是，以上 5 种方案内的参数确定与升级试验皆是在美洲大陆进行。

2.4 检验方法

降水检验使用 TS（Threat Score）与 BS（Bias Score）评分，分别对 24 h 和 48 h 降水分级检验，降水分级使用国家气象中心 24 h 降水分级标准（小雨/中雨/大雨/暴雨/大暴雨分别对应阈值 0.1/10/25/50/100，单位：mm）。

降水事件如表 3 所示，TS=a/(a+b+c)，TS 评分结果范围 0～1，值越大说明预报效果越好；BS=(a+b)/(a+c)，BS 评分结果范围 0 至∞，BS 大于 1，说明高估降水频率，空报多于漏报，小于 1 则表示低估降水频率，漏报大于空报，越接近 1 则效果越好。TS 评分能对预报降水的准确程度做出定量评估，然而却不能反映出误差来源。因此，使用 BS 评分作为弥补，反映空报与漏报的量化特征。

边界层结构的分析，使用垂直层 50 层的模拟对比 L 波段高空气象雷达秒级加密探测数据，分析数值模拟与观测的川渝盆地东部代表站重庆站的位温层结与湿度层结。

3 试验结果

3.1 降水检验

图 2 是 7 个西南涡过程 5 种参数化方案 24 h 和 48 h 分级降水平均 TS 评分。如图所示，整体上并没有哪种边界层参数化方案在西南涡降水模拟中具有明显的优势，这说明尽管 SH 与 MYNN2 方案分别对 YSU 与 MYJ 方案在对流情况下做了改进

表 2 五种边界层参数化方案简介与选用利弊

Table 2 Listing of chosen weather research forecast planetary boundary layer (PBL) schemes along with a reference, a brief description, and their pros and cons

边界层参数化方案	方案类型	方案描述
YSU Hong et al.（2006）	1阶非局地闭合K方案	与MRF类似，除了在边界层顶对夹卷层有更准确的描述，加强了热力驱动的自由混合强度，减少了动力强迫性对流混合，但仍然发现其在深厚湿对流模拟中对边界层混合强度计算偏强。边界层高度由浮力廓线决定。
MYJ Janjić（2001）	1.5阶局地闭合方案	局地垂直混合的一维湍流动能（TKE）预测方案，只计算在相邻格点上的通量交换，对较大涡旋完成的垂直混合往往计算不够，适合在稳定层结使用。边界层高度定义为TKE的生成不能平衡其耗散的最低模式层高度。
ACM2 Pleim（2007）	1阶局地—非局地混合型闭合方案	通过牺牲更多的计算资源，ACM2同时具备了局地与非局地的理念，它通过调整湍流扩散项和非局地项之间的比例系数来实现从稳定条件下的涡动扩散算法到不稳定条件下局地和非局地输送算法，使其平稳转换Pleim（2007）。也有研究指出ACM2在夜间的混合强度偏强Coniglio et al.（2013）
MYNN2 Nakanishi and Niino（2006）	1.5阶局地闭合方案	在MYJ基础上改进，不通过观测而基于大涡模拟的结果表达稳定度和混合高度，使得方案更适合在对流状态的边界层描述。即便如此，依旧受到局地方案的约束，可能对较大涡旋产生的湍流混合强度模拟不够。
SH Shin and Hong（2015）	优化对流环境下的1阶非局地闭合K方案	由YSU改进而来。在对流边界层中加入了垂直传输的尺度依赖性，分别对待对流环境下的非局地传输和其余小尺度涡流引起的局地传输，在稳定状态下的边界层垂直混合或自由大气中保持和

（Coniglio et al, 2013; Shin and Hong, 2015），然而，不同边界层参数化方案的选择对西南涡降水模拟的准确率的敏感性较差。

值得注意的是：48 h 暴雨及以上量级降水 TS 评分略优于 24 h 模拟，这与高笃鸣等（2016）对四川盆地 40 天降水评估的结果一致。而 Zhang et al.（2019）对此进行了解释，指出模式运算前 5～6 小时处于平衡调整状态（Spin-up），加了同化的试验初始 ETS（Equitable threat score）评分比未加同化的试验高 0.4 左右，然而在 5～6 小时后都逐渐趋于它们的中间值，同化提升效果逐渐消失。所以，决定前 24 h 的降水模拟效果的主要因素为是否加入同化。另外，不同边界层参数化方案的平衡调整时长存在差异，例如 ACM2 方案运算量较大，所需时间偏长。

综上所述，在模式平衡调整结束后分析模拟差异更为合理，使用后 24 h 时段来分析结果，得到的边界层影响结论应当比前 24 h 时段更为客观可信。

为进一步对比不同边界层参数化方案的 TS 和 BS 评分差异，若将表现最好的方案突出（表 4，* 为最佳方案），可见：前 24 h YSU 方案 TS 表现

表 3　标准 2×2 二分类事件列联表

Table 3　Contingency table of standard 2×2 bicategorical event

	预报有降水	预报无降水
实况有降水	a	c
实况无降水	b	d

注：a代表预报准确的，b代表空报的，c代表漏报的，d代表实况和降水均没有的情况。

表 4　所有过程五种参数化方案降水 24 h、48 h 预报的 TS 平均值和 BS 平均值

Table 4　TS mean-score values of five PBL schemes for all Southwest China vortex (SWCV) processes at 24- and 48-h precipitation and the same for BS at 24 and 48 h

		全过程TS平均					全过程BS平均				
		YSU方案	MYJ方案	MYNN2方案	ACM2方案	SH方案	YSU方案	MYJ方案	MYNN2方案	ACM2方案	SH方案
24 h	小雨	0.781*	0.779	0.78	0.764	0.78	1.008	1.053Δ	1.015	0.903	1.005*
	中雨	0.443*	0.43	0.442	0.431	0.439	1.158	1.191Δ	1.156	1.021*	1.156
	大雨	0.28	0.272	0.281*	0.276	0.28	1.223	1.229Δ	1.21	1.096*	1.236
	暴雨	0.137	0.132	0.134	0.123	0.137*	1.678	1.657	1.668	1.433*	1.678Δ
	大暴雨	0.028*	0.023	0.027	0.016	0.027	5.443Δ	5.021	5.051	3.698*	5.087
48 h	小雨	0.793	0.791	0.794	0.78	0.795*	1.027	1.059Δ	1.019*	0.944	1.029
	中雨	0.454*	0.443	0.441	0.451	0.452	1.279	1.295Δ	1.245	1.104*	1.285
	大雨	0.292	0.282	0.284	0.305*	0.291	1.374Δ	1.335	1.278	1.186*	1.353
	暴雨	0.148	0.152	0.148	0.17*	0.155	1.9689Δ	1.9097	1.78	1.767*	1.95
	大暴雨	0.05	0.04	0.051	0.065*	0.051	14.878	15.159	14.442	12.270*	15.288Δ

注：*代表最佳方案，Δ代表空报最多方案

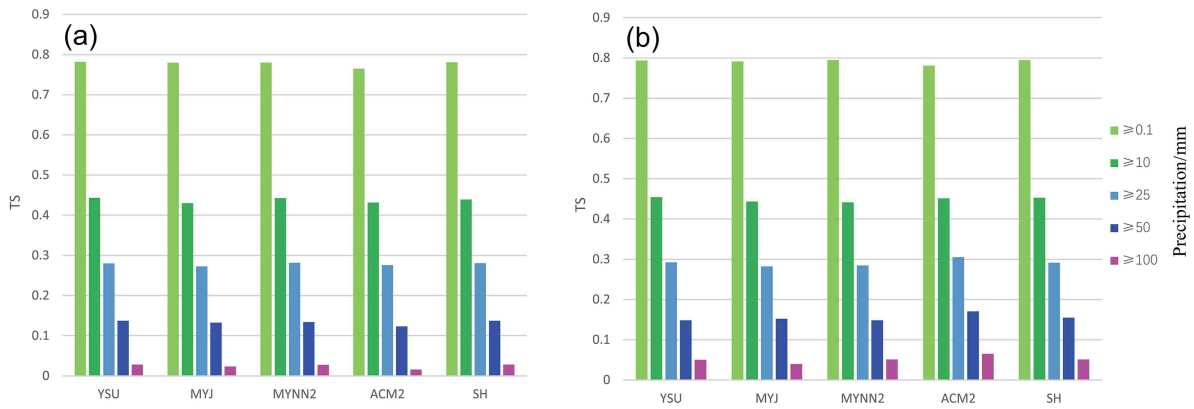

图 2　2016 年 5～9 月所有西南涡过程的五种边界层参数化方案降水 TS 平均评分：（a）24 h 预报；（b）48 h 预报

Fig. 2　TS (Threat Score) mean scores of the five planetary boundary layer (PBL) schemes for all the Southwest China vortex (SWCV) processes in 2016 flood season（From May to September）at (a) 24-h precipitation and (b) 48-h precipitation forecast time

较好，后 24 h ACM2 表现较好，尤其对大雨以上量级降水模拟效果普遍优于其它方案，其次是 SH 方案。BS 评分显示 ACM2 方案的整体表现最佳，除小雨降水外，其它量级降水最接近 1。$^{\Delta}$数值代表 BS 评分最大的方案，这意味着该方案对降水模拟空报最多。可以看到，小雨与中雨量级降水 MYJ 方案空报最多，而大雨以上量级降水 YSU 方案与 SH 方案空报最多。

尽管如此，除方案之间的相对优劣外，BS 评分也给出了另外一个信息：几乎所有的边界层参数化方案在西南涡暴雨降水模拟中普遍偏强，空报偏多（表 4）。除 ACM2 方案在小雨量级有漏报的情况外，其余量级降水都体现出空报偏多特征，而且随着降水量级的增大，空报更加严重。

需要指出的是，目前，数值预报模式在青藏高原及其周边地区的预报性能都显著低于我国其它地区，其空报率偏高也是一个薄弱环节。如新一代西南区域数值预报模式 SWC-WARMS（South West Center WRFADAS Real-time Modeling System, SWC-WARMS）业务系统，是基于 WRF（3.5.1）和 ADAS 5.3.3（ARPS Data Analysis System）为基础建立，已成为西南地区主要的灾害性天气业务预报工具，虽然具有较高的预报技巧，尤其是对复杂地形和暖区暴雨有突出的预报能力，但空报偏高，尤其是强降水（陈良吕和杜钦, 2016; 屠妮妮等, 2017），这也从另一个侧面证明了以上空报偏多等分析结果。

3.2 边界层结构分析

图 3 是几次西南涡过程 5 种边界层方案对重庆站边界层高度的模拟与观测对比，所有高度统一为距离地面的高度 AGL（Above ground level）。值得说明的是，此次 L 波段加密探空资料虽然精细，并且除 08 时与 20 时探空外加密了午后 14 时观测，这对不同方案在白天边界层结构与混合强度的对比有重要意义，但存在一定的数据缺测，有些时次的

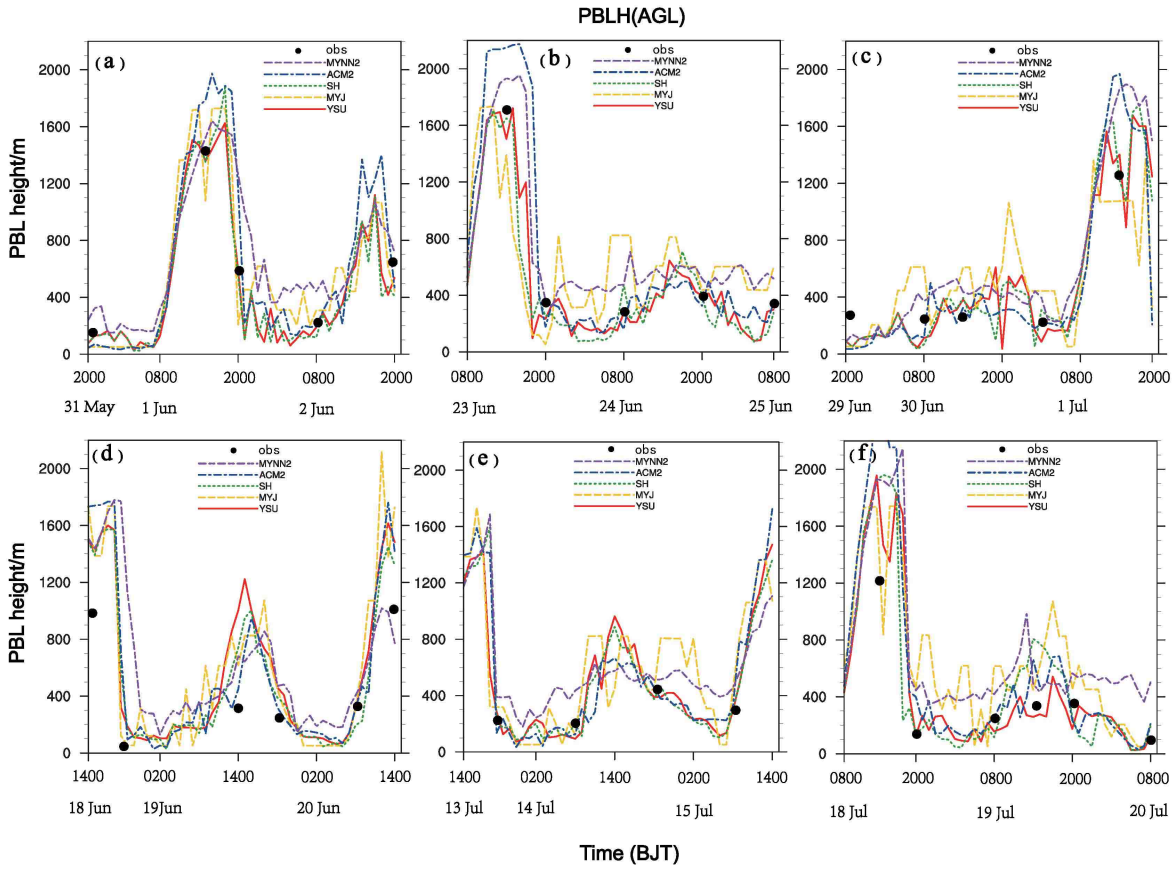

图 3 2016 年几次西南涡过程 5 种方案的边界层模拟高度与观测高度对比：（a）“6.1”过程；（b）“6.23”过程；（c）“6.30”过程；（d）“6.19”过程；（e）“7.14”过程；（f）“7.18”过程。BJT：北京时间

Fig. 3 Comparison between the observed PBL height and simulated height with the five schemes of the several SWCV processes in 2016: (a) “6.1” process; (b) “6.23” process; (c) “6.30” process; (d) “6.19” process; (e) “7.14” process; (f) “7.18” process. BJT: Beijing time

探空缺失，因此，“5.6”过程没有在此列出。另外，WRF 模式中不同边界层参数化方案对边界层高度（Planetary Boundary Layer Height，PBLH）的计算方法也不同，例如 ACM2 与 YSU 使用临界理查德森数计算边界层高度，而 MYJ 则由 TKE（Turbulence kinetic energy）廓线诊断得出。这里，实况边界层高度采用 Nielsen-Gammon et al.（2010）提出的“1.5-theta increase”方法，即将 PBLH 定义为首次超过最低位温 1.5 K 的高度。

几次西南涡过程中，MYJ 方案白天的边界层模拟高度相对于其它方案偏低，而夜间却明显偏高，也就是说相对于其它方案，它白天的混合强度不够，而夜间则偏强。因为 MYJ 是局地型方案，它的垂直混合强度系数由 TKE 诊断得到，整个方程系统是强耦合的，这使得在不对方程系统进行实质性修改的情况下，难以增加或减小垂直混合强度。尽管 MYNN2 方案对 MYJ 进行了调整，明显增加了白天的混合强度，使得边界层的高度提高，但夜间的边界层高度依旧同 MYJ 一样，明显偏高。SH 方案提高了白天的边界层混合强度，边界层高度有所提高，其余时间与 YSU 大致相同。ACM2 方案模拟的边界层高度在几次过程的午后都较其它方案偏高，甚至高于 YSU 方案，而夜间则偏低，这与 Hu et al.（2010）的研究结果一致。ACM2 方案的特点是综合考虑了局地与非局地算法，在稳定与中性层结状态，关闭非局地项而采用局地闭合算法，边界层高度取临界理查德森数值为 0.25 的高度，不稳定层结时边界层高度为夹卷层与自由对流层高度之和，高笃鸣等（2016）指出这种方案似乎更适合川渝盆地的小量级降水，因为它在保证足够混合强度的同时，能在较稳定条件下关闭非局地输送，不至于产生过强的降水。

另外，从图 3 还可以看到，尽管几次西南涡过程的起始时间不同，探空站上空降水情况不同，但在总体上都有对边界层高度模拟较实际偏高的特征，尤以午后为甚。在 WRF 模式中边界层参数化方案对混合强度的计算差异会直接影响边界层高度，而边界层高度越高，表明边界层内的混合强度越大，越有利于热量与水汽向上传输，而且边界层的发展具有明显的日变化，其厚度在午后达到最高，可达 2 km 以上甚至更高，从而最终影响到西南涡降水发生时的物理量分布与降水结果。

图 4 对比了“6.19”过程 19～21 日 14 时模式模拟和观测的重庆站位温与水汽混合比廓线（空白处为缺测），需要注意的是重庆站前 24 h 内受降水影响较明显，后 24 h 无降水。对比精细的位温观测廓线可以看到：分析场在初始时刻就高估了边界层厚度 300 m 左右，同时对低层的水汽混合比也偏高 2～6 g kg^{-1}。一般来说，随着模拟时效的增加，模式经过平衡调整后，动力与热力匹配，模拟误差将逐渐减小。可以看到，YSU 与 SH 方案混合最强，因此边界层低层温度更高、湿度更低，例如 YSU 方案无论是 24 h 还是 48 h 模拟结果在近地面层位温普遍偏高 5 K 左右，由于混合层更高，水汽向更高的层次混合，近地面层更干，48 h 时其近地面层最干，但 1000～2000 m 却偏湿。MYJ 与 MYNN2 在 24 h 的特征类似，位温与混合强度相对 YSU 和 SH 偏低，低层湿度则最高，48 h 时 MYJ 的位温模拟跃增，其边界层高度迅速上升，底层湿度下降，具体原因并不清楚，但图 3 几次西南涡过程里 MYJ 方案白天混合强度不够，夜间偏强的特征却是清楚的。“6.19”过程后半段，24 h 至 48 h 边界层从稳定状态向不稳定状态的过渡变化为 ACM2 模拟效果最好，这可能是因为 ACM2 根据不同的层结状态采用的算法不同有关。尽管如此，相对于实况，所有方案的边界层混合强度都表现出偏高的特征。

如图 5 所示，其它几次西南涡过程的边界层模拟也能看到同“6.19”过程相似的特征，对午后的边界层高度模拟都较观测偏高，边界层下部位温与水汽混合比也同样偏高，即所有 PBL 方案模拟的混合层皆比实际偏厚。不仅如此，考虑到所使用的重庆探空站位于城市中央，下垫面多为密集高大的建筑群与公路，受城市热岛效应影响明显，而城区周围地区的江河流域复杂繁多，下垫面湿度普遍较高（Jiang et al., 2019）。所以，由于下垫面的不同，可以推测周边地区的边界层高度模拟应该比实际偏高更为明显。

3.3　不同混合强度的 ACM2 方案模拟

每个 PBL 方案中都有诸多参数可以修改调试，并且都有它们的可调范围与相应的物理意义，但 WRF 内可以选择的所有 PBL 方案参数都是在美洲地区通过观测校验取得的，而在其它地区，例如地形与气候复杂的青藏高原东侧和川渝盆地是否适用还需观测实验对比验证。上一节表明，几次西南涡降水过程中 5 个 PBL 方案普遍对垂直混合强度模

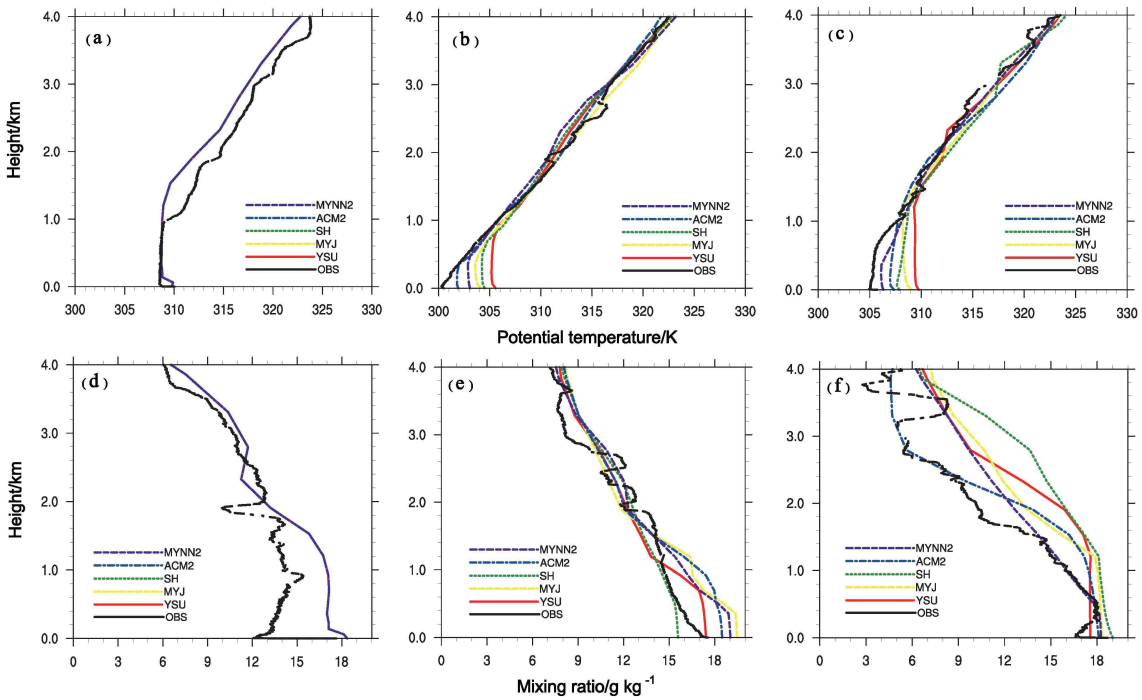

图 4 2016 年“6.19”过程重庆站上空位温、水汽混合比层结廓线：（a）初始位温；（b）24 h 位温；（c）48 h 位温；（d）初始水汽混合比；（e）24 h 水汽混合比；（f）48 h 水汽混合比

Fig. 4 Profiles of potential temperature and QVAPOR (water vapor mixing ratio) over Chongqing station during the “6.19” process in 2016: (a–c) Potential temperature profiles at (a) 0, (b) 24, and (c) 48-h forecast time; (d–f) QVAPOR profiles at (d) 0, (e) 24, and (f) 48-h forecast time

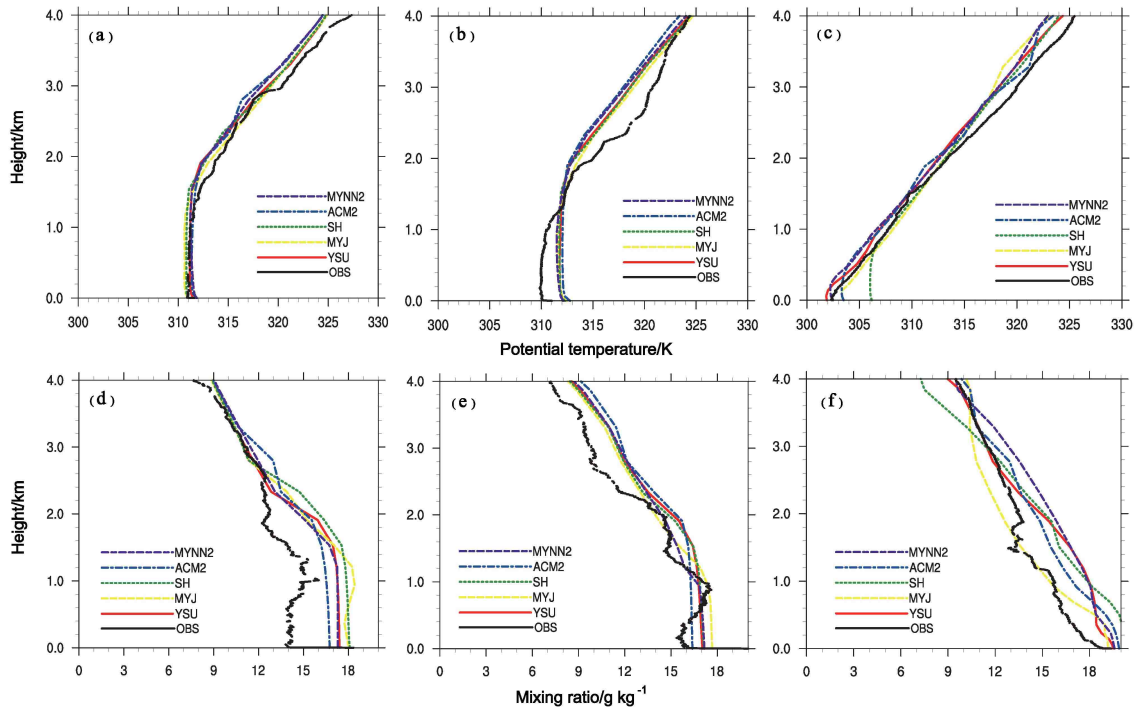

图 5 2016 年“6.23”与“7.18”过程重庆站上空位温、水汽混合比层结廓线：（a）“6.23”过程 6 h 位温；（b）“7.18”过程 6 h 位温；（c）“7.18”过程 30 h 位温；（d）“6.23”过程 6 h 水汽混合比；（e）“7.18”过程 6 h 水汽混合比；（f）“7.18”过程 30 h 水汽混合比

Fig. 5 Profiles of potential temperature and QVAPOR over Chongqing station during the “6.23” and “7.18” processes in 2016: (a) Potential temperature profile at 6 h in the “6.23” process; (b, c) potential temperature profile at (b) 6 and (c) 30 h in the “7.18” process; (d) QVAPOR profile at 6 h in the “6.23” process; (e, f) QVAPOR profile at (e) 6 and (f) 30 h in the “7.18” process

拟偏强，边界层高度模拟偏高，由于川渝盆地的降水受季风影响较大，相对湿度偏高，降水有明显的夜雨特征，并且区域差异较大。为了进一步探讨这个问题，选择总体模拟表现较好的 ACM2 方案，对其垂直混合强度进行调整模拟试验。

不同 PBL 方案对垂直混合强度和卷夹通量的算法差异，是导致边界层结构模拟差别的主要原因，在 YSU 与 ACM2 中垂直混合强度的计算是根据动量扩散系数（K_z）的大小而定，其公式为

$$K_z(z) = k\frac{u_*}{\phi}z(1-z/h)^p, \qquad (1)$$

其中，k为冯卡曼常数，可调范围在 10% 以内，可调整的空间并不大，ϕ是相似轮廓函数（包含热量ϕ_h和动能ϕ_m），z 是距地高度，h 是边界层高度，指数 p 的默认值设定为 2，但实际上它的范围为 1～3（Troen and Mahrt, 1986）。Nielsen-Gammon et al.（2010）从 ACM2 方案里众多的参数中挑选了 10 个物理意义相对重要的参数，并详细讨论了它们的功能与对边界层结构作用的敏感度，结果显示：参数 p 是控制白天垂直混合强度最敏感的参数，其次是临界理查德森数 Ri_{crit}（影响边界层高度的计算），然后是 K_v（涡旋扩散最小值）和湍流临界理查德森数 Ri_{c}（判定湍流是否开始）。

对于以上动量扩散系数公式中指数 p 大小的选择会直接影响边界层的垂直混合强度，从而改变整个边界层结构。在 1～3 范围里的 p 值越小，垂直混合强度越大，越有利于热量与水汽向更高的层次输送；反之 p 值越大，垂直混合强度越小，此时使得边界层低层更冷更湿，而自由对流层更暖更干。图 6 是 ACM2 方案采用 2～3 范围内 4 个 p 值的边界层高度和位温、水汽混合比廓线模拟结果，p=2 即是 ACM2 方案的原始状态，随着 p 值的增加，边界层混合强度减弱，边界层高度在逐渐降低，48 h 最为明显。p 值的增加对位温廓线的改变也很显著，近地层的位温在降低，而 1 km 以上位温在升高，廓线逐渐在向观测靠拢；当 p=3 时可以看到低层的位温与混合层高度甚至已经低于实况观测；水汽混合比廓线出现边界层低层更湿，高层更干的变化，这同样更接近实况。因为混合强度的变化可能会影响到其它复杂的物理量改变，体现在某个个例里或许不是线性降低，如 6 月 19 日 14 时 p=2.75 的边界层高度几乎和 p=2 相同，但更多的样本会使变化更加线性化（Hu et al., 2010）。

“6.19”过程的后半段，随着西南涡结构的变化与东移，雨带逐渐呈西南—东北走向（图 7a），但 WRF 模式动力框架对此次西南涡变化的动力特征模拟并不准确，所有方案模拟的西南涡中心位置经度、纬度都较实况偏西、偏南 2°左右。因此，对西南涡模拟起关键作用的应是模式的动力框架，而青藏高原东部地形复杂，多天气系统相互作用，目前对西南涡形成发展的机理研究并不成熟，还有很多问题并不很清楚，这也制约了预报技术的提升。

尽管如此，从不同 PBL 方案对西南涡的模拟来看（图 7b–f），主要差别体现在西南涡的中心

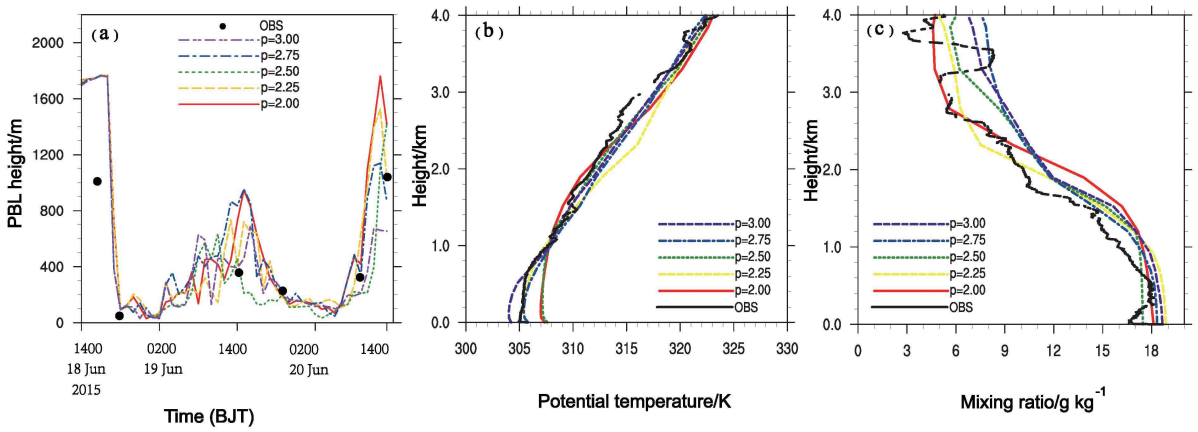

图 6　基于 ACM2 方案不同混合强度 p 值的 2016 年“6.19”过程重庆站上空边界层高度、位温和水汽混合比层结廓线：（a）边界层高度；（b）48 h 位温；（c）48 h 水汽混合比

Fig. 6　PBL height, potential temperature, and QVAPOR profiles over Chongqing station during the “6.19” process in 2016, simulating with the ACM2 (Asymmetric convective model 2) scheme that modified to different values of p: (a) PBL height; (b) potential temperature profile at 48 h; (c) QVAPOR profile at 48 h

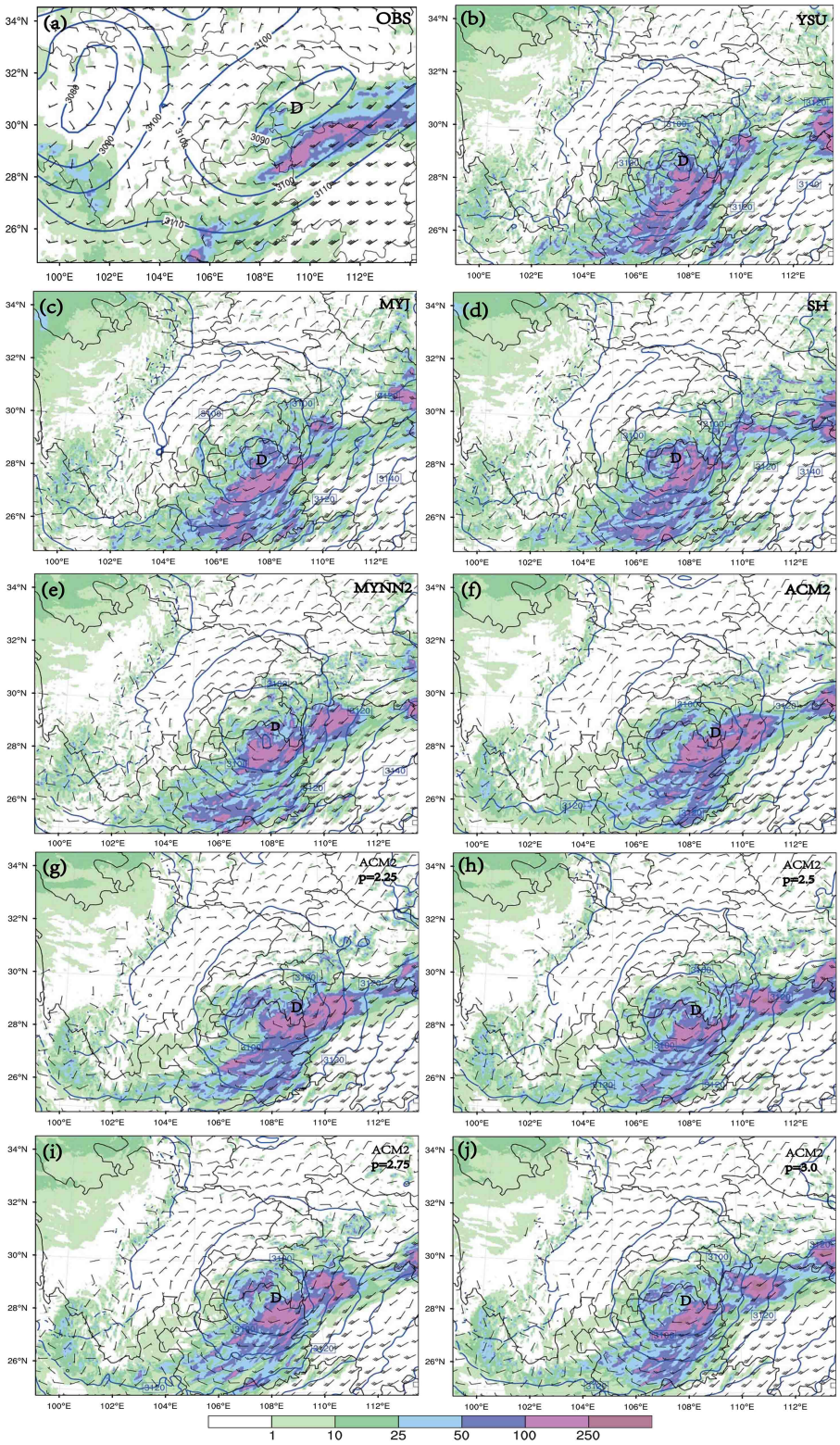

图 7 五种边界层参数化方案与基于 ACM2 方案不同混合强度 p 值预报的 2016 年“6.19”过程 48 h 700 hPa 位势高度场（蓝色等值线，单位：gpm）、风场（风标）和 24～48 h 累积降水量（彩色阴影，单位：mm）：（a）观测；（b）YSU 方案；（c）MYJ 方案；（d）SH 方案；(e) MYNN2 方案；（f）ACM2 方案；（g）ACM2 (p=2.25)；（h）ACM2 (p=2.5)；（i）ACM2 (p=2.75)；（j）ACM2 (p=3.0)

Fig. 7 The 48-h prediction of 700-hPa geopotential height field (blue contour，unit：gpm), wind field (barb) and 24–48-h cumulative precipitation (color shaded,unit:mm) with five PBL schemes and ACM2 modified at different values of p in the “6.19” process in 2016: (a) Observations; (b) YSU scheme; (c) MYJ scheme; (d) SH scheme; (e) MYNN2 scheme; (f) ACM2 scheme; (g) ACM2$_{(p=2.25)}$; (h) ACM2$_{(p=2.5)}$; (i) ACM2$_{(p=2.75)}$; (j) ACM2$_{(p=3.0)}$

位置和强降水的发生区域上，例如 SH 方案与 ACM2 方案对西南涡中心的经度偏差有 2°左右，对湖南西北部的降水范围、强度模拟也有很大差别，ACM2 方案较 SH 方案更偏强，更接近实况。

ACM2 方案采用不同混合强度模拟时，随着 p 值的增大，边界层混合强度降低，西南涡的中心位置与强降水范围也出现不同程度的改变。其中，p=2 时的 ACM2 方案低涡中心在重庆东南部，较 p=3 时位于贵州北部的低涡中心偏东近 2°经度，尽管西南涡的东移主要受到西风带高空槽、西南低空急流这类大尺度动力条件的制约，而周围地区下垫面的条件也会对西南涡的移速和结构有所影响，混合强度越强则边界层内温度会越高，特别是白天，可以较明显的改变地表 1～2 km 内的温度、气压和湿度条件（图 6b，7c），从而在西南涡系统经过有差异的边界层大气环境时，出现不同的变化特征。

川渝盆地的强降水具有弱冷空气触发和暖区暴雨的基本特征，大多是由湿热对流驱动。降水发生时边界层内的物理过程受到局地湿对流与地形的共同作用（李跃清, 1996, 2000），若在降水发生前边界层内混合强度减弱，将会使边界层低层的温度降低、湿度上升，在一定程度上减弱对流强度，有利于降水向小量级降水转变，即强降水变少，弱降水相对变多，从（图 7f–j）与 BS 评分（图略）都可以看到类似的特征。从较强的混合强度 p=2 到较弱的 p=3，中雨 BS 评分从 1.27 上升到 1.37，增幅 8%；大雨 BS 从 1.36 上升至 1.47，增幅 8%；而暴雨 BS 从 1.63 下降至 1.55，降幅 7%；大暴雨 BS 从 1.75 降至 1.53，降幅 13%。其它过程虽然降水量转变所对应的量级有所不同，例如“5.6”、“6.1”和“7.18”过程从大雨即开始出现量级降低转变，总体上都有降水从大量级向小量级转变的趋势。

“6.19”过程混合强度的适当减弱使边界层的结构改变，位温廓线与水汽混合比廓线都逐渐靠近观测，同时使降水从大量级向小量级转变。图 8a 是“6.19”过程对 ACM2 方案降低混合强度后的 TS 评分，由此看到，混合强度的减弱先使 TS 评分有所提高，然后下降，这个过程的边界层结构变化如图 6b、7c 所示，当 p 值的大小由 2.25 到 2.5 左右，边界层模拟更接近实际边界层的高度与温湿状态，尔后模拟则过低。图 8b 是采用同样配置模拟的 2016 年所有西南涡降水过程的平均 TS 值。可以发现：ACM2 方案小雨与中雨 TS 变化并不大甚至略有下降，而大雨以上量级降水的 TS 评分先增后降与单一过程类似，这也符合更准确的边界层结构模拟能改善降水模拟结果的原理。就 2016 年的西南涡过程而言，通过调整动量扩散系数（K_z）中的参数 p 值，降低垂直混合强度的大小，更符合川渝盆地区域内的大气边界层湍流状况及其降水天气。另外，此研究结论对于新一代西南区域数值预报模式 SWC-WARMS 业务系统与重庆风暴尺度快速同化系统 SSRAFS 的改进与发展也有实际意义和指导价值。

4　结论和讨论

本文利用 WRFv4.0 中 5 种边界层参数化方案，对 2016 年汛期所有西南涡造成的川渝盆地东部区域暴雨天气过程开展数值模拟，通过检验不同量级

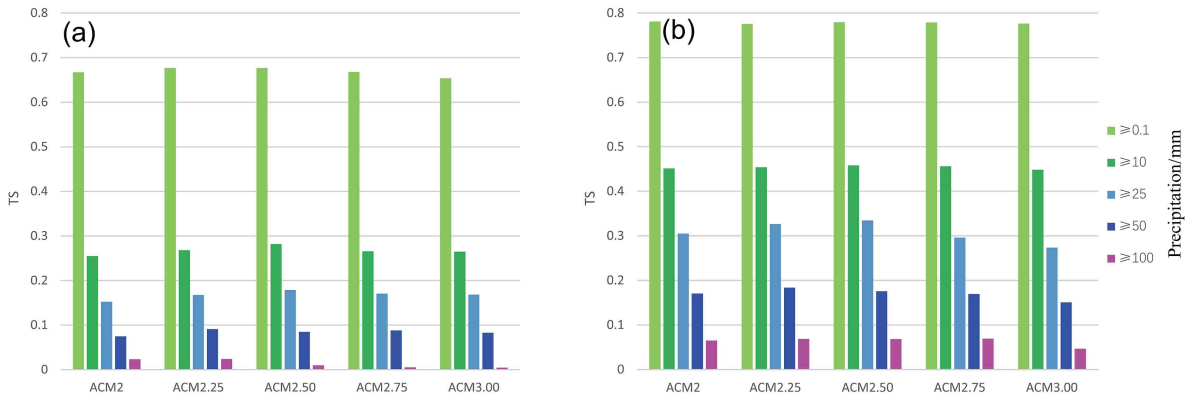

图 8　基于 ACM2 方案不同混合强度 p 值的 2016 年“6.19”过程和全年西南涡过程 24～48 h 累积降水平均 TS 评分：（a）“6.19”过程；（b）全年西南涡过程平均

Fig. 8　TS score during 24 h-48 h of ACM2 scheme with different values of p in the “6.19” process and the average TS score of all the SWCV processes in 2016: (a) “6.19” process; (b) average of all processes

降水的模拟结果，对比精细的观测边界层结构，分析各边界层参数化方案对湍流计算的特点与模拟结果的差异，主要得到以下主要结论：

（1）对西南涡降水的TS评分，ACM2、YSU和SH方案较好；而BS评分显示所有PBL方案都有空报偏多的特征，尤其以大量级降水为主，其中，ACM2方案较其它方案空报偏少，总体表现最好。YSU对大量级降水空报最多，MYJ方案对小量级降水空报最多。各方案对湍流垂直混合强度的计算方式不同可能是其原因，YSU属于非局地型方案，湍流混合可以在不同的垂直层次上相互影响，有利于能量和水汽向更高的层次输送。因此，更有利于强降水的模拟；MYJ方案中湍流的垂直混合只能发生在相邻的层次，所以使得低层湿度大，在较低层次中更容易形成降水，带来小量级降水的空报偏多。

（2）虽然SH和MYNN2方案分别对YSU和MYJ方案进行了对流状态的优化，但MYNN2的夜间边界层高度仍然同MYJ一样明显偏高，SH方案除白天的边界层高度模拟略高外，其余时间与YSU大致相同，而ACM2这种可以根据周围环境的稳定性切换局地或非局地湍流输送的方案则更适合川渝盆地低涡降水模拟。其原因可能是夏季低涡降水开始前，盆地受副热带高压或低纬暖湿气流影响，整个边界层发展迅速，非局地方案能更好地描述边界层的湍流混合，而对于降水开始后或夜间稳定的边界层状态，局地方案则更合适。

（3）现有的边界层参数化方案对川渝盆地内部的边界层混合强度都计算偏高。其原因可能是因为这些PBL方案的默认参数是在美洲大陆校定得到，而美洲大陆除落基山脉外并没有可以阻挡极地气团南下的天然屏障，这使得气团南下的速度更快、变性程度小，虽然可能发生更强烈的锋面天气，使强降水在较短时间内落地，但总体上日照时间更长、云层遮盖更少，从而边界层发展也更强烈。但位于青藏高原东侧的川渝盆地则不同，由于地形的阻隔，强冷气团很少翻越秦岭等山脉，相对美洲大陆来讲强风暴并不多见；且南支系统活跃，夏季风带来充沛的暖湿水汽，使盆地上空云层覆盖面积较大、维持时间较长，以及盆地内丘陵或水系丰富的下垫面土壤湿度偏高、比热较大，都是不利于边界高度发展的因素。

（4）通过模式模拟与L波段探空资料的对比得出，所有PBL方案对重庆站上空边界层高度的模拟结果都较实际偏高，考虑到受城市热岛效应的影响，重庆站边界层高度应相对其周边地区已明显偏高，因此，参数化方案在川渝盆地区域的实际偏高应更为严重。但通过参数修改降低ACM2方案的垂直混合强度，可使模拟边界层更符合实际观测状况。

（5）降低垂直混合强度后的ACM2方案，能使边界层状态与降水模拟都得到一定的改善。在允许范围内通过对动量扩散系数公式中指数p的调整，使ACM2方案的垂直混合强度降低，弱化了白天边界层内的湍流混合与边界层顶的卷夹通量，使边界层更冷、更湿。当p增加0.25～0.5时，模拟的边界层结构与实况更加吻合。同时，大量级降水的TS评分有一定提高，且空报减少，小量级降水TS评分略有提高。这对于区域数值预报模式的发展有应用价值。

（6）不同边界层参数化方案对西南涡模拟的差别主要是不同的低涡中心位置与降水强度，而低涡中心的位置又影响了降水范围，但最终都源于边界层方案的局地与非局地特性，以及混合强度的大小这两方面原因。局地与非局地特性决定了湍流交换能否发生在模式不相邻的高度层，这会制约下垫面热量、水汽与动能能否通过更大尺度的湍流直接影响边界层内上部的大气，使整个边界层更快、更充分的混合；而混合强度则代表了湍流传输的剧烈程度，对于ACM2方案，采用不同垂直混合强度系数会影响边界层内的能量与水汽分布，更强的混合会使边界层更热，有利于大量级降水的产生；而降低混合强度，边界层低层会更湿，有利于小量级降水的产生。

需要指出的是，不同的西南涡过程多少会有一些差异，且因为观测资料的限制，只考虑了2016年的西南涡暴雨过程，今后还需要基于更多样本的分析研究，以进一步验证边界层参数化方案的原始参数配置在川渝盆地数值模拟中混合强度偏高、降水空报偏多的结果，并有效应用于改进区域数值预报模式系统及其业务预报能力。

致谢 感谢匿名审稿专家的宝贵意见与具体指导，切实提高了本文章的质量和水平；感谢张春喜博士解决了研究过程中的一些科学技术疑点，同时分享了他最新的研究发现；感谢美国加州圣地亚哥超算中心（SDSC）的计算资源

（grant TG-ATM160014）保障。

参考文献（References）

Bougeault P, Lacarrere P. 1989. Parameterization of orography-induced turbulence in a mesobeta-scale model [J]. Mon. Wea. Rev., 117(8): 1872−1890. doi:10.1175/1520-0493(1989)117<1872:POOITI>2.0.CO;2

陈良吕, 杜钦. 2016. SWC-WARMS 在重庆地区的降水预报性能分析 [J]. 高原山地气象研究, 36(3): 1−6. Chen Lianglü, Du Qin. 2016. Analysis on the precipitation forecast performance of SWC-WARMS model in Chongqing [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research (in Chinese), 36(3): 1−6.

Cheng Xiaolong, Li Yueqing, Xu Li. 2016. An analysis of an extreme rainstorm caused by the interaction of the Tibetan Plateau vortex and the Southwest China vortex from an intensive observation [J]. Meteor. Atmos. Phys., 128(3): 373−399. doi:10.1007/s00703-015-0420-2

Cohen A E, Cavallo S M, Coniglio M C, et al. 2015. A review of planetary boundary layer parameterization schemes and their sensitivity in simulating southeastern U.S. cold season severe weather environments [J]. Wea. Forecasting, 30(3): 591−612. doi:10.1175/WAF-D-14-00105.1

Coniglio M C, Correia Jr J, Marsh P T, et al. 2013. Verification of convection-allowing WRF model forecasts of the planetary boundary layer using sounding observations [J]. Wea. Forecasting, 28(3): 842−862. doi:10.1175/WAF-D-12-00103.1

Feng Xinyuan, Liu Changhai, Fan Guangzhou, et al. 2016. Climatology and structures of southwest vortices in the NCEP climate forecast system reanalysis [J]. J. Climate, 29(21): 7675−7701. doi:10.1175/JCLI-D-15-0813.1

Fu Shenming, Li Wanli, Sun Jianhua, et al. 2015. Universal evolution mechanisms and energy conversion characteristics of long-lived mesoscale vortices over the Sichuan basin [J]. Atmospheric Science Letters, 16(2): 127−134. doi:10.1002/asl2.533

高笃鸣, 李跃清, 蒋兴文, 等. 2016. WRF 模式多种边界层参数化方案对四川盆地不同量级降水影响的数值试验 [J]. 大气科学, 40(2): 371−389. Gao Duming, Li Yueqing, Jiang Xingwen, et al. 2016. Influence of planetary boundary layer parameterization schemes on the prediction of rainfall with different magnitudes in the Sichuan basin using the WRF model [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40(2): 371−389. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1503.14323

Hacker J P. 2010. Spatial and temporal scales of boundary layer wind predictability in response to small-amplitude land surface uncertainty [J]. J. Atmos. Sci., 67(1): 217−233. doi:10.1175/2009JAS3162.1

Hong Songyou, Noh Y, Dudhia J. 2006. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes [J]. Mon. Wea. Rev., 134(9): 2318−2341. doi:10.1175/MWR3199.1

Hu Xiaoming, Nielsen-Gammon J W, Zhang Fuqing. 2010. Evaluation of three planetary boundary layer schemes in the WRF model [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 49(9): 1831−1844. doi:10.1175/2010JAMC2432.1

Janjić Z I. 2001. Nonsingular implementation of the Mellor-Yamada level 2.5 scheme in the NCEP meso model [R]. NCEP Office Note, 437.

Jiang Ping, Liu Xiaoran, Zhu Haonan, et al. 2019. Features of urban heat island in mountainous Chongqing from a dense surface monitoring network [J]. Atmosphere, 10(2): 67. doi:10.3390/atmos10020067

李超, 李跃清, 蒋兴文. 2015. 四川盆地低涡的月际变化及其日降水分布统计特征 [J]. 大气科学, 39(6): 1191−1203. Li Chao, Li Yueqing, Jiang Xinwen. 2015. Statistical characteristics of the inter-monthly variation of the Sichuan Basin vortex and the distribution of daily precipitation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 39(6): 1191−1203. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1502.14270

李斐, 邹捍, 周立波, 等. 2017. WRF 模式中边界层参数化方案在藏东南复杂下垫面适用性研究 [J]. 高原气象, 36(2): 340−357. Li Fei, Zou Han, Zhou Libo, et al. 2017. Study of boundary layer parameterization schemes' applicability of WRF model over complex underlying surfaces in southeast Tibet [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 36(2): 340−357. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2016.00041

李国平. 2002. 青藏高原动力气象学 [M]. 北京: 气象出版社, 23–26. Li Guoping. 2002. Dynamic Meteorology of the Tibetan Plateau (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 23–26.

李跃清. 1996. 长江上游暴雨的边界层动力诊断研究 [J]. 大气科学, 20(1): 73−78. Li Yueqing. 1996. The PBL dynamic diagnosis of heavy rain over the upper reaches of the Changjiang River [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 20(1): 73−78. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1996.01.09

李跃清. 2000. 1998 年青藏高原东侧边界层风场与长江暴雨洪水的关系 [J]. 大气科学, 24(5): 641−648. Li Yueqing. 2000. The PBL wind field at the eastern edge of the Tibetan Plateau and its relations with heavy rain-flood of the Changjiang River in 1998 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 24(5): 641−648. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2000.05.08

李跃清. 2018. 西南低涡年鉴 (2016) [M]. 北京: 科学出版社, 1–219. Li Yueqing. 2018. Southwest China Vortex Yearbook 2016 (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 1–219.

李跃清, 徐祥德. 2016. 西南涡研究和观测试验回顾及进展 [J]. 气象科技进展, 6(3): 134−140. Li Yueqing, Xu Xiangde. 2016. A review of the research and observing experiment on southwest China vortex [J]. Advances in Meteorological Science and Technology (in Chinese), 6(3): 134−140.

卢敬华. 1986. 西南低涡概论 [M]. 北京: 气象出版社, 63–64. Lu Jinghua. 1986. The Introduction of Southwest Vortex (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 63–64.

卢萍, 李跃清, 郑伟鹏, 等. 2014. 影响华南持续性强降水的西南涡分析和数值模拟 [J]. 高原气象, 33(6): 1457−1467. Lu Ping, Li Yueqing, Zheng Weipeng, et al. 2014. Analysis and numerical simulation of southwest vortex on continuous heavy rain processes in South China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 33(6):

1457−1467. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2013.00137

慕丹, 李跃清. 2018. 基于 ERA-interim 再分析资料的近 30 年九龙低涡气候特征 [J]. 气象学报, 76(1): 15−31. Mu Dan, Li Yueqing. 2018. Climatic characteristics of the Jiulong low vortex in recent 30 years based on the ERA-interim reanalysis data [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 76(1): 15−31. doi:10.11676/qxxb2017.077

Nakanishi M, Niino H. 2006. An improved Mellor–Yamada level-3 model: Its numerical stability and application to a regional prediction of advection fog [J]. Bound.-Layer Meteor., 119(2): 397−407. doi:10.1007/s10546-005-9030-8

Nielsen-Gammon J W, Hu Xiaoming, Zhang Fuqing, et al. 2010. Evaluation of planetary boundary layer scheme sensitivities for the purpose of parameter estimation [J]. Mon. Wea. Rev., 138(9): 3400−3417. doi:10.1175/2010MWR3292.1

Pleim F E. 2007. A combined local and nonlocal closure model for the atmospheric boundary layer. Part Ⅱ: Application and evaluation in a mesoscale meteorological model [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 46(9): 1396−1409. doi:10.1175/JAM2534.1

盛裴轩, 毛节泰, 李建国, 等. 2013. 大气物理学 [M]. 北京: 北京大学出版社. Sheng Peixuan, Mao Jietai, Li Jianguo, et al. 2013. Atmospheric Physics (in Chinese) [M]. Beijing: Beijing University Press 239-272.

Shin H H, Hong S Y. 2015. Representation of the subgrid-scale turbulent transport in convective boundary layers at gray-zone resolutions [J]. Mon. Wea. Rev., 143(1): 250−271. doi:10.1175/MWR-D-14-00116.1

Stensrud D J. 2007. Parameterization Schemes: Keys to Understanding Numerical Weather Prediction Models [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 459pp. doi: 10.1017/CBO9780511812590

Stull R B. 1988. An Introduction to Boundary Layer Meteorology [M]. Dordrecht: Springer, 666pp. doi: 10.1007/978-94-009-3027-8

Troen I B, Mahrt L. 1986. A simple model of the atmospheric boundary layer; sensitivity to surface evaporation [J]. Bound.-Layer Meteor., 37(1–2): 129−148. doi:10.1007/BF00122760

屠妮妮, 何光碧, 衡志炜, 等. 2017. SWCWARMS 模式对西南区域预报能力的检验 [J]. 高原山地气象研究, 37(3): 21−30. Tu Nini, He Guangbi, Heng Zhiwei, et al. 2017. The verification of SWCWARMS model in southwest of China [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research (in Chinese), 37(3): 21−30. doi:10.3969/j.issn.1674-2184.2017.03.004

Wang Qiwei, Tan Zhemin. 2014. Multi-scale topographic control of southwest vortex formation in Tibetan Plateau region in an idealized simulation [J]. J. Geophys. Res.: Atmos., 119(20): 11543−11561. doi:10.1002/2014JD021898

王作述, 汪迎辉, 梁益国. 1996. 一次西南低涡暴雨的数值试验研究 [C]//暴雨科学、业务实验和天气动力学理论的研究. 北京: 气象出版社, 257–267. Wang Zuoshu, Wang Yinghui, Liang Yiguo. 1996. The numeric experiment research on a southwest vortex rainstorm [C]//The Research on Rainstorm Science, Professional Experiment and the Theory Research on Weather Dynamics (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 257–267.

许鲁君, 刘辉志, 徐祥德, 等. 2018. WRF 模式对青藏高原那曲地区大气边界层模拟适用性研究 [J]. 气象学报, 76(6): 955−967. Xu Lujun, Liu Huizhi, Xu Xiangde, et al. 2018. Evaluation of the WRF model to simulate atmospheric boundary layer over Nagqu area in the Tibetan Plateau [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 76(6): 955−967. doi:10.11676/qxxb2018.059

杨颖璨, 李跃清, 陈永仁. 2018. 青藏高原及邻近地区低涡系统结构研究进展 [J]. 气象科技, 46(1): 76−83. Yang Yingcan, Li Yueqing, Chen Yongren. 2018. Progresses and new understanding of researches on vortex systems over Tibetan Plateau and its adjacent areas [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 46(1): 76−83. doi:10.19517/j.1671-6345.20170118

叶瑶, 李国平. 2016. 近 61 年夏半年西南低涡的统计特征与异常发生的流型分析 [J]. 高原气象, 35(4): 946−954. Ye Yao, Li Guoping. 2016. Statistics characteristics and the abnormal development of flow pattern of the southwest vortex in recent 61 summer half years [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 35(4): 946−954. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2015.00073

Yu Shuhua, Gao Wenliang, Xiao Dixiang, et al. 2016. Observational facts regarding the joint activities of the southwest vortex and plateau vortex after its departure from the Tibetan Plateau [J]. Adv. Atmos. Sci., 33(1): 34−46. doi:10.1007/s00376-015-5039-1

Zhang Chunxi, Xue Ming, Supinie T A, et al. 2019. How well does an FV3‐based model predict precipitation at a convection-allowing resolution? Results from CAPS forecasts for the 2018 NOAA hazardous weather test bed with different physics combinations [J]. Geophys. Res. Lett., 46(6): 3523−3531. doi:10.1029/2018GL081702

Zhang Yuanchun, Sun Jianhua, Fu Shenming. 2014. Impacts of diurnal variation of mountain–plain solenoid circulations on precipitation and vortices East of the Tibetan Plateau during the Mei-yu season [J]. Adv. Atmos. Sci., 31(1): 139−153. doi:10.1007/s00376-013-2052-0

赵鸣. 2008. 边界层和陆面过程对中国暴雨影响研究的进展 [J]. 暴雨灾害, 27(2): 186−190. Zhao Ming. 2008. A review of the research on the effects of boundary layer and land surface process on heavy rain in China [J]. Torrential Rain and Disasters (in Chinese), 27(2): 186−190. doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2008.02.016

赵思雄, 傅慎明. 2007. 2004 年 9 月川渝大暴雨期间西南低涡结构及其环境场的分析 [J]. 大气科学, 31(6): 1059−1075. Zhao Sixiong, Fu Shenming. 2007. An analysis on the southwest vortex and its environment fields during heavy rainfall in eastern Sichuan Province and Chongqing in September 2004 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31(6): 1059−1075. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2007.06.03

Zhong Rui, Zhong Linhao, Hua Lijuan, et al. 2014. A climatology of the southwest vortex during 1979–2008 [J]. Atmos. Oceanic Sci. Lett., 7(6): 577−583.