

肖之盛,孟凡,徐峻,等. 低空急流理论及其对空气污染物传输影响研究进展[J]. 环境工程技术学报,2019,9(2):111-118.

XIAO Z S, MENG F, XU J, et al. Research advances in Low-Level Jets theory and their impact on air pollutant transmission [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2019, 9(2): 111-118.

低空急流理论及其对空气污染物传输影响研究进展

肖之盛, 孟凡*, 徐峻, 何友江, 赵好希, 于扬, 张博雅

中国环境科学研究院大气环境研究所, 北京 100012

摘要 针对低空急流(Low-Level Jet, LLJ)这种与空气污染等现象密切相关的天气现象,综述了低空急流的定义、日变化特征、季节性变化特征,以及包括惯性振荡理论、地形的热力和动力作用、天气系统强迫等低空急流的形成和发展机制,总结国内外开展的低空急流数值模拟及其在大气污染源排放污染物的输送、扩散中的影响等研究成果,提出了下一步应开展低空急流的选取标准及其与空气污染学科的交叉研究,并开展适宜本地区低空急流数值模拟的参数化方案和小尺度研究等建议。

关键词 低空急流;理论研究;数值模拟;空气污染

中图分类号:X51 文章编号:1674-991X(2019)02-0111-08 doi:10.12153/j.issn.1674-991X.2018.11.200

Research advances in Low-Level Jets theory and their impact on air pollutant transmission

XIAO Zhisheng, MENG Fan, XU Jun, HE Youjiang, ZHAO Yuxi, YU Yang, ZHANG Boya

Research Institute of Atmospheric Environment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

Abstract Low-Level Jet (LLJ) is a weather phenomenon closely related to air pollution and other phenomena. The definitions of low-altitude jets, daily variation characteristics, seasonal variation characteristics, and the formation and development mechanisms of low-altitude jets including inertial oscillation theory, thermal and dynamic effects of terrain, and forcing of weather systems were summarized. The research results of numerical simulation of low-level jets developed at home and abroad and their influence on the transport and diffusion of pollutants discharged from atmospheric pollution sources were summarized. It was suggested that the next step should be to develop the low-altitude jet selection criteria and perform the cross-disciplinary study with air pollution discipline, and to carry out researches on the parameterization scheme and small-scale studies suitable for the numerical simulation of low-level jet in the region.

Key words Low-Level Jet; theoretical study; numerical simulation; air pollution

低空急流(Low-Level Jet, LLJ)是一种广泛分布于世界各地^[1],与空气污染、风能利用等现象密切相关的天气现象^[2,4]。低空急流事件自1938年在非洲地区被发现起,国内外众多学者对其进行了大量研究^[5]。1952年,Means^[6]在研究美国中部区雷暴天气过程中率先使用了低空急流这一术语。低空急流在大气边界层和天气学领域的概念有所不同,在天气学领域中是指存在于600~900 hPa高度上的

强而窄的气流带,它与暴雨等剧烈天气密切相关^[2];本文指边界层低空急流。不同学者对低空急流采用了不同标准,1968年,Bonner^[7]在对北美中央平原进行系统观测时,对边界层低空急流提出了三级标准,即当风速最大值超过12 m/s(或16、20 m/s)且同时沿垂直方向在3 km范围内风速垂直切变不小于6 m/s(或8、10 m/s)就定义为1级(或2级、3级)急流。Stull^[8]认为,边界层低空急流是位

收稿日期:2018-08-30

基金项目:大气重污染成因与治理攻关项目(DQGG0107);国家重点研发计划项目(2018YFC0213500)

作者简介:肖之盛(1995—),男,硕士研究生,研究方向为空气质量模式,xiaozs01@163.com

* 责任作者:孟凡(1963—),男,研究员,博士,长期从事空气质量模式与大气化学研究,mengfan@craes.org.cn

于地面 100 ~ 300 m, 最大风速为 10 ~ 20 m/s 的薄层快速运动气流。Schepanski 等^[9]对低空急流的标准给出了更为严格的定义, 认为低空急流是发生在夜间稳定边界层顶, 虚位温递减率为每 100 m 大于 1.5 K, 1 000 m 内急流中心的垂直风切变为每 100 m 大于 0.5 m/s 的薄层气流。除此之外, Blackadar 等^[10-11]研究低空急流时没有对风速的大小作出要求, 只考虑边界层流中惯性振荡等物理过程引起的夜间风速极值(nocturnal wind speed maximum)。国内学者对低空急流没有严格的限定, 一般认为 600 hPa 以下, 风速大于 12 m/s 的风速带为低空急流^[12]。典型的低空急流演变过程如图 1 所示。

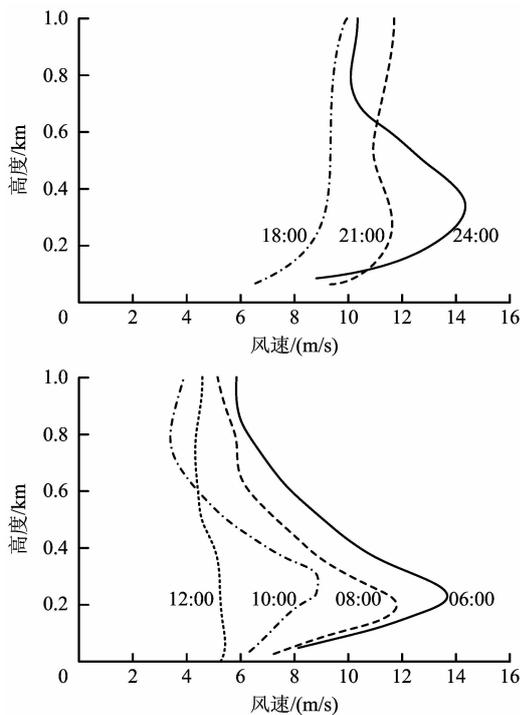


图 1 典型低空急流演变过程(地方时)^[13]

Fig. 1 Evolution of a typical low-level jet(local time)

低空急流的早期系统性研究主要集中在美国大平原地区, 研究方法以观测数据分析、理论研究为主。Mitchell 等^[14]利用无线电探空观测数据分析美国大平原地区的低空急流现象, 发现低空急流常发生在晚春和初夏季节, 并且对低空急流的形成和演变机制、结构特征等进行了深入研究。

随着计算机技术的发展和运用, 中尺度天气模式逐渐应用于低空急流的研究中。中尺度天气模式能够通过敏感性分析来验证现有的低空急流理论成果, 并进一步研究低空急流的生成机制。Mcnicder 等^[15]利用二维数值模式研究了与大平原相似的斜

坡地形边界层风的昼夜变化情况, 指出由地形诱发的气压梯度力是低空急流发展的重要机制。Zhong 等^[16]利用 RAMS (regional atmospheric modeling system) 模式对美国大平原地区夏季典型低空急流过程进行模拟和分析, 发现由贯穿整个夜间的摩擦解耦产生的惯性振荡是低空急流发生的主要原因, 斜坡地形上的水平气压梯度的日夜振荡变化是次要原因。与此同时, 由于低空急流具有很强的输送作用并且导致边界层内的较强风切变, 部分学者开始研究低空急流与空气污染之间的关系。Banta 等^[17]在研究美国纳什维尔地区的边界层臭氧污染过程中指出, 夜间低空急流的输送作用对臭氧污染有很大影响。

相对于国外而言, 我国的低空急流研究起步较晚, 并且集中于研究低空急流的日变化特征及其与强对流之间的关系, 主要手段为单站点的连续观测分析, 缺乏对低空急流形成机制等方面的深入研究^[18-20]。李兴生等^[18]利用北京 325 m 气象塔对低空急流进行连续观测, 发现低空急流的极值出现在夜间 02:00—03:00, 并且其位置与逆温层顶的生长密切配合。任敏等^[19]通过研究发现, 长江中下游地区低空急流与暴雨发生有直接关系。程佳等^[20]利用风廓线观测资料研究了苏州城区边界层低空急流的特征, 发现冬春两季低空急流发生频率最高, 夏季发生频率最低。从整体来看, 国内关于低空急流虽然有一些较好的研究成果, 但由于观测数据缺乏等客观条件的限制, 与国外研究相比还有一定的差距。

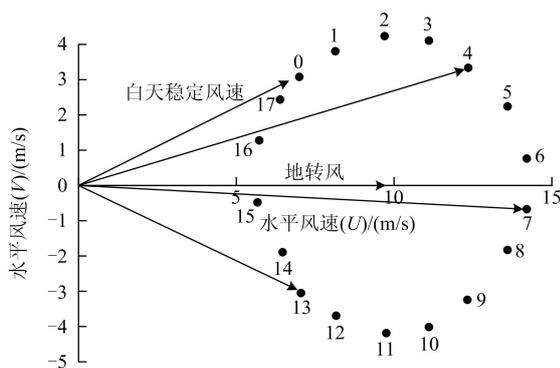
1 低空急流的形成和发展机制

目前低空急流形成的因素主要有惯性振荡、天气尺度和地形因素导致的斜压性天气系统(大气等压面与等密度面相交, 等压面上温度分布不均), 平流加速, 高山地形阻挡等^[8]。低空急流是由一种或多种因素共同作用导致的, 因此低空急流存在不同的特征, 可能是次地转的也可能是超地转的^[21]。何建中^[22]认为低空急流的形成是动量水平输送、地形动力作用、大气热力作用引起的动量垂直输送和地形热力作用的共同结果。尽管各地区低空急流的起止时间、最大风速和风向以及急流高度有所差异, 但无论是从气候平均还是个例进行分析, 低空急流的风速一般都在当地时间的午夜至清晨达到最大, 随后逐渐减小^[23]。

1.1 夜间低空急流的惯性振荡理论

惯性振荡是解释发生在夜间边界层顶低空急流

形成机制的经典理论。Blackadar^[10]在1957年开展了惯性振荡导致低空急流的研究,他指出非地转风部分的惯性振荡是产生低空急流的重要原因,由于地面强摩擦阻力的作用,白天混合层内的风矢量保持较强的次地转分布,而入夜以后,大气边界层转化为稳定边界层,其湍流强度迅速减弱,在摩擦层表面的空气与地表解耦发生摩擦撤除效应,导致科里奥利力诱发惯性振荡,从而形成低空急流,这种惯性振荡的周期一般为17 h。与惯性振荡有关的低空急流的日变化过程如图2所示。



注: V 、 U 为水平风速的 2 个分量。图中数字为日落后小时数。

图2 与惯性振荡有关的低空急流日变化过程^[8]

Fig. 2 Diurnal variation of the low-level jet associated with the inertial oscillation

惯性振荡理论在低空急流研究中受到了学者的普遍认可^[24-27]。Brook^[28]在Blackadar理论的基础上对澳大利亚戴莉沃斯特地区的低空急流进行分析,模式模拟和观测结果均表明,该地区的低空急流主要是在夜间边界层形成后,由于湍流剪切应力的急剧减少引起的惯性振荡导致的。Parish等^[29]利用机载雷达高度计测量了低空急流发生时低层大气3个不同层的地转风变化,结果表明,在斜坡地形上冷热昼夜循环产生了振荡的水平气压梯度力,同时还观测到了由摩擦解耦引起的低空急流惯性旋转,认为惯性振荡是产生低空急流的主要原因。

1.2 地形的热力、动力和阻挡作用

通常来讲,低空急流倾向于在大型山脉的东部斜坡或具有强烈海陆温差的沿海地区形成,风向与山脉方向或者海岸线方向平行^[30-32]。山地地形往往能产生随日变化而改变符号的水平温度梯度,由水平温度梯度导致的山谷风在惯性振荡的作用下经常会导致低空急流的形成。午后太阳辐射的加热作用使山坡的温度高于山谷,温度梯度形成的气压梯度导致空气由谷底向山坡爬升,并在科氏力及惯性

振荡的共同作用下气流在夜间转向偏南,导致低空急流的形成。夜间的情况恰好相反,山风形成的气流在转向后形成偏北风,削弱低空急流并最终导致低空急流消亡。与山谷风的作用机制类似,海陆昼夜温差导致的海陆风也能促进低空急流的形成。除此之外,斜坡地形、天气尺度温度梯度、中尺度海陆温度梯度和穿过锋面的各种梯度等引起的强迫都能产生与斜压性有关的热成风,即由于等压面与等温面相互交割导致二者之间的气层厚度发生变化,使地转风随高度发生变化,进而形成热成风,热成风与山谷风、海陆风等共同作用,对低空急流的形成与消亡产生重要影响。

Holton^[11]发现在斜坡地形上的热力作用对惯性振荡产生边界层急流有重要影响,表明由浮力驱动的流场穿过美国大平原地区的倾斜地形上会产生非地转风分量,经过夜间惯性振荡后,会产生低水平的超地转风,从而导致低空急流的发生。Parish等^[33-34]发现,美国加利福尼亚海岸和加拿大沿海地区的低空急流是由陆-海表面温差引起的海陆气压梯度导致的。孙继松^[35]对北京南郊气象台观测数据进行分析,发现北京夏季夜间急流通常发生在600 m左右,风向以西南风为主,且在02:00左右达到最大值,同时发现北京地区平原和山区之间的温度梯度的方向和强度变化是导致夜间低空急流形成或消失的主要原因。

除了由地形因素导致的斜压性之外,高山地形对气流的阻挡作用对低空急流的形成也有重要影响。Wexler^[36]认为美国大平原地区的偏南急流是由穿越墨西哥湾的浅层气流被落基山脉阻挡而向北偏转,加之科里奥利力的增加被强反气旋切变的发展抵消,并且由于西部向上倾斜地形导致的摩擦作用使空气运动迟缓等多方面因素共同作用形成的。

1.3 与天气型有关的斜压性强迫

天气系统的强迫作用在低空急流的形成中也扮演着重要角色。虽然地形因素作用每天都存在,惯性振荡的周期为17 h,但低空急流却不是每天都发生的。某些中纬度地区的低空急流还与天气型有关的天气尺度斜压性强迫有关,天气系统导致强大的气压梯度形成,从而使风速加快,促进了低空急流的形成。

Chen等^[37]利用MM5中尺度模式(the fifth-generation mesoscale model)研究梅雨季节中国台湾地区低空急流的成因,发现西太平洋沿岸低空急流的发展是由太平洋高压的西移和南海东亚季风的爆

发推动的,并且随着中尺度对流系统的发展而逐渐增强。Wei 等^[38]利用风廓线雷达对中国长江三角洲地区的低空急流进行观测,分析低空急流的日变化和季节变化特征,指出长江三角洲地区春夏季低空急流以西南方向为主,秋冬季以东北方向为主,高度在 600 m 左右,长江三角洲地区天气气压系统、东南气流和海陆温湿变化在低空急流形成中有重要作用,低空急流东侧为副热带高压,西侧为低压系统,强大的水平气压梯度加强了风速,从而导致了低空急流的形成。

锋面和高空急流耦合作用在特定季节或地区对低空急流的形成有重要的推动作用。Lau 等^[39]发现中国香港和华南的冬季低空急流活动通常与冷锋通道有关。Qian 等^[40]利用中尺度模式论证了梅雨时期潜热释放和低空急流的相互作用,表明由于水汽凝结潜热造成了风场和垂直环流的相互促进发展,二者相互的正反馈作用导致了低空急流的形成和发展。Saulo 等^[41]通过数值敏感性试验揭示了低空急流、中尺度对流和高空急流三者的相互作用,研究发现位于 200 ~ 300 hPa 高度的高空急流能够对低空急流形成和发展起到促进作用,但二者耦合度较高,日变化特征不明显。

2 低空急流的研究手段与方法

早期低空急流的研究方法主要包括利用气象雷达等工具进行观测研究和理论研究,随着计算机技术的发展,中尺度气象模式开始逐渐运用于低空急流的敏感性分析、理论验证等方面,并且取得了较好的研究成果。但是由于对夜间边界层发展认识不足,夜间低空急流模拟的准确性还不够,未来还有广阔的发展空间^[42-47]。

2.1 观测研究

早期对低空急流的观测研究主要是在特定地点观测风速的时间变化,或在限定的时间内沿着观测站点进行沿线观测^[48-50]。由于各观测站点之间的间隔较大,且垂直分辨率相对较低,很难发现在水平或者垂直尺度上较薄的低空急流层。随着大规模观测网络的建立,众多学者对低空急流展开了系统性的观测研究,对其全过程进行分析,开展了日变化和季节变化特征、方向性特征、形成机制等方面的研究。Frisch 等^[51]在北达科他州的多普勒气象雷达上观测到一次典型的低空急流过程,指出边界层表面摩擦释放在低空急流的发展过程中起重要作用,气压梯度力的增加有助于早期阶段低空急流的增

强。Shu 等^[52]对中国香港 2 年的气象观测资料进行分析,指出低空急流的特性与风速标准的选择密切相关,平均速度为 14.5 m/s,平均高度在 420 m,呈现出明显的季节变化特征,低空急流的强度、风切变指数和平均高度受低空急流方向的影响明显。

2.2 数值模拟研究

中尺度气象模式被广泛用于研究和预测各种大气现象。由于大气数值模拟的结果在不同模式配置的表现不同,如边界层参数化方案、地表参数化方案、模式的分辨率、辐射方案以及模拟的初始和边界条件等。因不同的参数化方案在物理过程的描述上侧重不同,所以在同一模式中,可以利用不同的参数化方案配置,来对比研究各种参数化方案对低空急流模拟结果的效果,进行数值模拟的敏感性分析,以期达到模拟的最佳效果,进而也为数值模拟的参数化方案改进提供参考。

2.2.1 WRF 模式大气边界层参数化方案敏感性

在 WRF 模式 (the weather research and forecasting model) 中,大气边界层参数化方案可分为 2 类:1) 以梯度输送理论为基础,如 YSU 方案和 ACM2 方案;2) 以显示预报湍流能为特点,如 MYJ 方案。各方案的实现手段不完全一致,对边界层内物理过程的细致、复杂程度描述不同^[53]。不同的边界层参数化方案对边界层高度以及边界层内部垂直混合、扩散、边界层顶的热通量等相互作用过程的模拟表现不同,并且低空急流的形成与夜间大气边界层过程密切相关。基于此,众多学者对低空急流模拟的大气边界层参数化方案敏感性和形成机制理论展开研究。如 Mirocha 等^[54]采用 YSU、QNSE、MYNN2.5 等边界层参数化方案和 Noah、RUC 等地表参数化方案综合配置来研究美国大平原地区低空急流模拟的准确性和模式配置的影响,通过与观测数据进行对比,发现各种方案的组合表现好坏不一,模拟范围较广时,难以确定一组有效的物理参数化方案来完整地表现低空急流的全过程和特征。

通常来看,MYJ 方案和 Shin-Hong 方案模拟风速会偏高,ACM2 方案会偏低,YSU 方案在不同研究中的表现具有很大的差别^[42-47]。Hu 等^[42]在 WRF 模式中比较了不同的边界层参数化方案对低空急流模拟的结果,发现 MYJ 方案高估了夜间低空急流的强度,而 YSU 方案、Boulaç 方案和 ACM2 方案则低估了低空急流的强度,并且指出产生差异的原因主要是由于方案的垂直混合强度不同。Yang 等^[45]选择了 YSU、MYJ 和 UW 3 种边界层参数化方案对哥

伦比亚斜坡地形上发生的低空急流现象进行模拟,结果表明,虽然3种边界层参数化方案均高估了低空急流的高值,而且可以表现低空急流全过程,但是从整体上来看,难以选择一种表现最优的参数化方案配置。Santos等^[47]利用WRF模式模拟南美地区低空急流,开展敏感性研究,指出从低空急流和位温模拟表现来看,YSU方案表现较好,MYJ方案由于在夜间条件下垂直混合动量较小,所以导致模拟风速过高。Gevorgyan^[55]对亚美尼亚的低空急流进行模拟,发现YSU方案和Shin-Hong方案会高估低空急流的程度。

2.2.2 低空急流模拟的影响因素

除了单纯的边界层方案敏感性分析之外,很多学者倾向于在WRF模式中将各类参数综合配置来进行研究。总体来看,受地形、土壤湿度等因素的影响,低空急流对边界层参数化方案的敏感性和初始边界数据在不同地区和季节表现不同,改变模式的水平垂直分辨率和辐射方案对模式模拟的结果影响不大。

Storm等^[3]利用WRF模式模拟美国大平原地区的低空急流,采用RRTM、GFDL、Dudhia等不同的长短波辐射方案配置,发现RRTM方案与GFDL方案低空急流模拟结果无明显区别。Bernier等^[56]在全球环境多尺度模式中分别使用72层与58层垂直分辨率研究垂直分辨率对低空急流模拟的影响,发现使用高垂直分辨率使整个层的风切变值有整体改进,但在同一高度风速差值在0.5 m/s之内,表明增加垂直分辨率对低空急流模拟效果改善不大。Mirocha等^[54]分别使用1、3、9 km的水平分辨率以及10、20、40 m的垂直分辨率对美国大平原地区的低空急流过程进行了模拟,发现随着水平分辨率增加,标准偏差从1.143降至0.742,但垂直分辨率增加使标准偏差从0.719增至1.097,其他的统计参数也发现同样的规律。表明增加水平分辨率对模式模拟效果改善较大,但增加垂直分辨率会导致某些配置选择的模拟性能显著下降。

由于不同的全球气象再分析资料有一定的差别,所以使用不同的再分析资料对低空急流模拟能够产生较大影响。Schepanski等^[9]利用WRF模式模拟北非地区低空急流,发现使用GFS和ERA-5模式表现差异很大,虽然ERA-5和GFS再分析资料急流中心轴风速都较观测值偏低,但GFS再分析资料与观测值相差6 m/s,同时发现模式模拟结果对初始和边界数据的敏感性比边界层参数化方案、地表参

数化方案、模式分辨率的敏感性要高。Gevorgyan^[55]利用WRF模式结合European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) ERA-5和global forecast system(GFS)2种原始数据并配合多种参数化方案对亚美尼亚的低空急流进行模拟,发现在200 m以下使用ERA-5比GFS的模拟结果更加贴近观测值,但从风速峰值模拟情况看,100 m高度GFS模拟结果比ERA-5模拟结果高出4 m/s,与观测值较为接近。

众多学者通过模式模拟发现,地形和土壤因素在低空急流的形成过程中具有十分重要的作用,从数值模拟层面验证了Pan等^[57-59]的理论。Pan等^[57]利用MM5模式研究了地形阻挡、背风涡旋、地表热通量对美国大平原地区低空急流演变的影响,指出斜坡地形的缺失会减弱低空急流发展的潜力,并且斜坡地形诱发的水平温度梯度在低空急流形成中有重要作用。Mccorcle^[58]利用大气和土壤水文模式研究了低空急流对土壤参数的敏感性,发现其他条件不变,仅改变土壤湿度,在土壤干燥条件下模拟的低空急流风速比水分饱和土壤模拟的低空急流风速下降了约40%,表明土壤水分对低空急流的模拟具有重要影响,当模拟区域内土壤湿度变化时,急流的结构和量级也会发生变化。Schepanski等^[9]也认为本地粗糙度、反射率和土壤湿度等地表条件对模拟结果有很大的影响。He等^[59]利用WRF模式研究了中国云贵高原地区的低空急流,发现WRF模式能够很好地模拟西南地区的低空急流日变化特征,并且通过敏感性分析研究了地表热量辐射、地形因素和潜热释放对低空急流的形成作用,发现地表辐射加热和地形对低空急流模拟效果有重要影响。

3 低空急流与空气污染

随着科学技术的发展和人们对环境污染的关注程度日益增加,低空急流与空气污染的关系越来越受到重视。Davis^[60]在使用一维模式模拟英国卡丁顿地区的低空急流现象时指出,低空急流能够通过气流传输对空气污染产生影响。低空急流对空气污染的作用往往具有两面性:1)低空急流在夜间边界层上方形成了一条狭窄的空气输送带,低空急流底部的强切变经常会产生向下风向或者向地面传输的湍流混合过程,加剧外来污染物对本地的输送作用,使本地污染物浓度升高;2)低空急流可以将本地污染物输送至下风向地区,对本地污染物有一定的清除作用。廖晓农等^[61]发现边界层低空急流对北京

市 PM_{2.5} 污染改善起关键作用,急流的发展加大了边界层内水平风的垂直切变,导致湍流增强,有利于污染物的向下输送。

夜间臭氧浓度出现峰值与低空急流有关,此外也与大气化学过程、城市热岛循环和人为排放有关^[62]。Fischer 等^[63]通过分析华盛顿山(Mount Washington)海拔高度相差较大的监测站点之间的臭氧浓度来研究低空急流对臭氧浓度的影响,结果表明,在山脚下观测到的臭氧浓度比通常观测到的要高得多,且更接近华盛顿山顶的观测浓度,这是由于低空急流的发展导致的机械驱动湍流使臭氧从高空穿透到稳定的夜间边界层中,从而导致地表臭氧浓度升高。Sullivan 等^[64]利用雷达观测华盛顿地区的一次臭氧污染过程,发现低空急流可以将本地的臭氧输送至下风向地区,并使下风向地区在第 2 天的臭氧浓度快速升高。

低空急流也是夏季西非地区粉尘排放的重要气象驱动因素^[65]。Fiedler 等^[66]研究发现,由于边界层低空急流导致夜间的剪切驱动湍流和清晨低空急流的崩溃,使地表风速增强,从而驱动粉尘的排放。

低空急流对高架污染源排放的污染物长距离输送有重要作用。McNide 等^[67]利用气象-拉格朗日颗粒物耦合模式研究发现,低空急流产生的水平方向的垂直风切变能够使金属冶炼厂排放的烟羽进行长距离传输。

4 结论与建议

(1)夜间低空急流对区域空气污染具有双重作用:一方面加剧外来污染物对本地的输送;另一方面,可以将本地污染物输送至下风向地区,对本地污染物有一定的清除作用。

(2)大气数值模式在低空急流的全过程模拟、敏感性分析、理论验证等方面有很好的应用,由于受对夜间边界层理解的限制,及季节因素、土壤因素、地形因素等多方面的影响,利用大气数值模式进行数值模拟在不同地区不同季节的表现不一。

(3)建立统一的低空急流选取标准。根据国外学者的研究结果,结合本地区实际情况和长时间序列高空风速观测数据,选取适合本地区实际应用的低空急流标准。

(4)开展水平范围在 30 km 内的城市小尺度研究。低空急流与城市热岛和城市几何结构等有较密切的关系,国内对低空急流城市小尺度的研究较少,且不同地区的城市几何结构有显著差异,其对低空

急流的影响程度也会产生差异。

(5)开展交叉性综合研究。由于低空急流的作用广泛,与森林火灾、风能利用、飞机航行、空气污染等具有密切关联,因此可以在观测数据真实可靠的基础上,结合空气质量模式或其他模式进一步研究低空急流与其他过程的关系。

(6)开展边界层理论和参数化方案的深入研究。由于对夜间边界层发展机制的理解和模拟能力存在不足,在众多参数化方案中难以选择一种能够很好表现低空急流全过程的最佳方案,导致模拟结果存在偏差,不利于开展低空急流的深入研究。在今后的工作中,可以将最新的边界层研究理论形成适宜数值模式应用到参数化方案中,从而提高数值模式模拟的准确性。

参考文献

- [1] RIFE D L, PINTO J O, MONAGHAN A J, et al. Global climatology of diurnally varying low-level jets [J]. *Journal of Climate*, 2010, 23(19):5041-5064.
- [2] SJOSTEDT D W, SIGMON J T, COLUCCI S J. The carolina nocturnal low-level jet: synoptic climatology and a case study [J]. *Weather Forecast*, 1990, 5(3):404-415.
- [3] STORM B, DUDHIA J, BASU S, et al. Evaluation of the weather research and forecasting model on forecasting low-level jets: implications for wind energy [J]. *Wind Energy*, 2009, 12(1):81-90.
- [4] PITCHFORD K L, LONDON J. The low-level jet as related to nocturnal thunderstorms over midwest United States [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1962, 1(1):43-47.
- [5] GOUAULT J. Vents en altitude fort lamy (Tchad) [J]. *AnnPhysique du Globe France d'Outre; Meteorologie*, 1938, 5:70-91.
- [6] MEANS L L. On thunderstorm forecasting in the Central United States [J]. *Monthly Weather Review*, 1952, 80(10):165-189.
- [7] BONNER W D. Climatology of the low level jet [J]. *Monthly Weather Review*, 1968, 96(12):833-850.
- [8] STULL R B. An introduction to boundary layer meteorology [M]. Dordrecht: Springer, 1988:520-525.
- [9] SCHEPANSKI K, KNIPPERTZ P, FIEDLER S, et al. The sensitivity of nocturnal low-level jets and near-surface winds over the Sahel to model resolution, initial conditions and boundary-layer set-up [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2015, 141:1442-1456.
- [10] BLACKADAR A K. Boundary layer wind maxima and their significance for the growth of nocturnal inversions [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1957, 38:283-290.
- [11] HOLTON J R. The diurnal boundary layer wind oscillation above sloping terrain [J]. *Tellus*, 1967, 19(2):199-205.
- [12] 赛瀚, 苗峻峰. 中国地区低空急流研究进展 [J]. *气象科技*,

- 2012,40(5):766-771.
- [13] KRAUS H, MALCHER J, SCHALLER E. A nocturnal low level jet during PUKK[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1985, 31(2): 187-195.
- [14] MITCHELL M J, ARRITT R W, LABAS K. A climatology of the warm season great plains low-level jet using wind profiler observations[J]. *Weather & Forecasting*, 1995, 10(3): 576-591.
- [15] MCNIDER R T, PIELKE R A. Diurnal boundary-layer development over sloping terrain[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1981, 38(10): 2198-2212.
- [16] ZHONG S, FAST J D, BIAN X. A case study of the great plains low-level jet using wind profiler network data and a high-resolution mesoscale model[J]. *Monthly Weather Review*, 1996, 124(5): 785-806.
- [17] BANTA R M, SENFF C J, WHITE A B, et al. Daytime buildup and nighttime transport of urban ozone in the boundary layer during a stagnation episode[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1998, 103(17): 22519-22544.
- [18] 李兴生, 叶卓佳, 刘林勤. 夜间低空急流的分析研究[J]. *大气科学*, 1981, 5(3): 210-317.
- [19] 任敏, 丁太胜. 长江中下游地区的低空急流与暴雨[J]. *暴雨: 灾害*, 1997(1): 130-137.
- [20] 程佳, 张宁, 朱焱, 等. 苏州城区大气边界层低空急流特征分析[J]. *气象科学*, 2016, 36(6): 843-848.
- CHENG J, ZHANG N, ZHU Y, et al. Analysis on low-level jet in atmospheric boundary layer in Suzhou [J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2016, 36(6): 843-848.
- [21] GARRATT J R. The inland boundary layer at low latitudes[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1985, 32(4): 307-327.
- [22] 何建中. 边界层低空急流超地转特征的数值研究[J]. *南京气象学院学报*, 1992, 15(3): 323-331.
- [23] 刘鸿波, 何明洋, 王斌, 等. 低空急流的研究进展与展望[J]. *气象学报*, 2014, 28(1): 57-75.
- LIU H B, HE M Y, WANG B, et al. Advances in low-level jet research and future prospects [J]. *Journal of Meteorological Research*, 2014, 28(1): 57-75.
- [24] WHITEMAN C D, BIAN X, ZHONG S. Low-level jet climatology from enhanced rawinsonde observations at a site in the southern great plains[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1997, 36(10): 1363-1376.
- [25] MAHRT L. Stratified atmospheric boundary layers[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1999, 90(3): 375-396.
- [26] ANDREAS E L, CLAFFY K J, MAKSHITAS A P. Low-level atmospheric jets and inversions over the western weddell sea[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2000, 97(3): 459-486.
- [27] LUNDQUIST J K. Intermittent and elliptical inertial oscillations in the atmospheric boundary layer[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2003, 60(21): 2661-2673.
- [28] BROOK R R. The koorin nocturnal low-level jet[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1985, 32(2): 133-154.
- [29] PARISH T R, RODI A R, CLARK R D. A case study of the summertime great plains low level jet [J]. *Monthly Weather Review*, 1988, 116(1): 94.
- [30] ARDANUY P. On the observed diurnal oscillation of the somali jet[J]. *Monthly Weather Review*, 1979, 107(12): 1694-1700.
- [31] DOUGLAS M W. The summertime low-level jet over the Gulf of California [J]. *Monthly Weather Review*, 1995, 123(8): 2334-2347.
- [32] DU Y, CHEN Y L, ZHANG Q. Numerical simulations of the boundary layer jet off the southeastern coast of China[J]. *Monthly Weather Review*, 2015, 143(4): 1212-1231.
- [33] PARISH T R. Forcing of the summertime low-level jet along the California coast [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1999, 39(12): 2421-2433.
- [34] DICKISON R B B, NEUMANN H H. The occurrence of nocturnal low-level jets in new England and the Canadian maritimes[J]. *Atmosphere*, 1982, 20(4): 287-300.
- [35] 孙继松. 北京地区夏季边界层急流的基本特征及形成机理研究[J]. *大气科学*, 2005, 29(3): 445-452.
- [36] WEXLER H. A boundary layer interpretation of the low-level jet [J]. *Tellus*, 1961, 13(3): 368-378.
- [37] CHEN C, TAO W K, LIN P L, et al. The intensification of the low-level jet during the development of mesoscale convective systems on a mei-yu front [J]. *Monthly Weather Review*, 1999, 126(2): 495-506.
- [38] WEI W, WU B G, YE X X, et al. Characteristics and mechanisms of low-level jets in the Yangtze River Delta of China [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2013, 149(3): 403-424.
- [39] LAU S Y, CHAN S T. A crescent-shaped low-level jet as observed by a Doppler radar[J]. *Weather*, 2003, 58(8): 287-290.
- [40] QIAN J H, TAO W K, LAU K M. Mechanisms for torrential rain associated with the mei-yu development during SCSMES 1998 [J]. *Monthly Weather Review*, 2004, 132(1): 3-27.
- [41] SAULO C, RUIZ J, SKABAR Y G. Synergism between the low-level jet and organized convection at its exit region[J]. *Monthly Weather Review*, 2007, 135(4): 1310-1326.
- [42] HU X M, NIELSENGAMMON J W, ZHANG F. Evaluation of three planetary boundary layer schemes in the WRF model[J]. *Journal of Applied Meteorology & Climatology*, 2010, 49(9): 1831-1844.
- [43] SHIN H H, HONG S Y. Intercomparison of planetary boundary-layer parametrizations in the WRF model for a single day from CASES-99 [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2011, 139(2): 261-281.
- [44] FLOORS R, VINCENT C L, GRYNING S E, et al. The wind profile in the coastal boundary layer; wind lidar measurements and numerical modelling[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2013, 147(3): 469-491.
- [45] YANG Q, BERG L K, PEKOUR M, et al. Evaluation of WRF-predicted near-hub-height winds and ramp events over a pacific northwest site with complex terrain [J]. *Journal of Applied Meteorology & Climatology*, 2013, 52(8): 1753-1763.
- [46] HU X M, KLEIN P M, XUE M. Evaluation of the updated YSU planetary boundary layer scheme within WRF for wind resource

- and air quality assessments[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2013, 118(18):10490-10505.
- [47] SANTOS D C, NASCIMENTO E D L. Numerical simulations of the South American low level jet in two episodes of MCSs: sensitivity to PBL and convective parameterization schemes[J]. *Advances in Meteorology*, 2016(12):1-18.
- [48] GERHARDT J R. A example of a nocturnal low-level jet stream [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2010, 19(1):116-118.
- [49] GERHARDT J R. Mesoscale association of a low-level jet stream with a squall-line-cold-front situation [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2010, 2(1):49-55.
- [50] IZUMI Y. The evolution of temperature and velocity profiles during breakdown of a nocturnal inversion and a low-level jet [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2010, 3(1):70-82.
- [51] FRISCH A S, ORR B W, MARTNER B E. Doppler radar observations of the development of a boundary-layer nocturnal jet [J]. *Monthly Weather Review*, 2009, 120(1):3.
- [52] SHU Z R, LI Q S, HE Y C, et al. Investigation of low-level jet characteristics based on wind profiler observations[J]. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 2018, 174:369-381.
- [53] 刘羽, 陈超君. 三种边界层参数化方案的敏感性实验[C]//第31届中国气象学会年会 S2: 灾害天气监测、分析与预报. 北京: 中国气象学会, 2014.
- [54] MIROCHA J D, SIMPSON M D, FAST J D, et al. Investigation of boundary-layer wind predictions during nocturnal low-level jet events using the weather research and forecasting model [J]. *Wind Energy*, 2016, 19(4):739-762.
- [55] GEVORGYAN A. A case study of low-level jets in Yerevan simulated by the WRF model [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, 123(1):300-314.
- [56] BERNIER N B, BÉLAIR S. High horizontal and vertical resolution limited-area model: near-surface and wind energy forecast applications [J]. *Journal of Applied Meteorology & Climatology*, 2012, 51(6):1061-1078.
- [57] PAN Z, SEGAL M, ARMITT R W. Role of topography in forcing low-level jets in the central United States during the 1993 flood-altered terrain simulations [J]. *Monthly Weather Review*, 2004, 132(1):396-403.
- [58] MCCORCLE M D. Simulation of surface-moisture effects on the Great Plains low-level jet [J]. *Monthly Weather Review*, 1988, 116(9):1705-1720.
- [59] HE M Y, LIU H B, WANG B, et al. A modeling study of a low-level jet along the Yun-Gui Plateau in South China [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2016, 55(1):41-60.
- [60] DAVIS P A. Development and mechanisms of the nocturnal jet [J]. *Meteorological Applications*, 2000, 7(3):239-246.
- [61] 廖晓农, 孙兆彬, 何娜, 等. 边界层低空急流导致北京 PM_{2.5} 迅速下降及其形成机制的个例分析 [J]. *环境科学*, 2016, 37(1):51-59.
- LIAO X N, SUN Z B, HE N, et al. A case study on the rapid cleaned away of PM_{2.5} pollution in Beijing related with BL jet and its mechanism [J]. *Environmental Science*, 2016, 37(1):51-59.
- [62] HU X M, KLEIN P M, XUE M, et al. Impact of the vertical mixing induced by low-level jets on boundary layer ozone concentration [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 70(2):123-130.
- [63] FISCHER E V, TALBOT R W, DIBB J E, et al. Summertime ozone at Mount Washington: meteorological controls at the highest peak in the northeast [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2004, 109(24):303-381.
- [64] SULLIVAN J T, RABENHORST S D, DREESSEN J, et al. Lidar observations revealing transport of O₃ in the presence of a nocturnal low-level jet: regional implications for “next-day” pollution [J]. *Atmospheric Environment*, 2017, 158:160-171.
- [65] HEINOLD B, KNIPPERTZ P, MARSHAM J H, et al. The role of deep convection and nocturnal low-level jets for dust emission in summertime West Africa: estimates from convection-permitting simulations [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2013, 118(10):4385-4400.
- [66] FIEDLER S, SCHEPANSKI K, HEINOLD B, et al. Climatology of nocturnal low-level jets over North Africa and implications for modeling mineral dust emission [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2013, 118(12):6100-6121.
- [67] MCNIDER R T, MORAN M D, PIELKE R A. Influence of diurnal and inertial boundary-layer oscillations on long-range dispersion [J]. *Atmospheric Environment*, 1988, 22(11):2445-2462. □