

文章编号: 2096-1618(2020)01-0111-06

盆地城市下垫面相对湿度变化特征及数值模拟研究——以成都为例

周艳艳¹, 王超¹, 肖天贵¹, 刘思祺¹, 陈亚玲¹, 黎旭²

(1. 成都信息工程大学大气科学学院 高原大气与环境四川省重点实验室, 四川 成都 610225; 2. 中国人民解放军 95937 部队, 辽宁 阜新 123100)

摘要:为研究成都地区相对湿度的变化特征及中尺度数值模式不同陆面过程方案对该地区相对湿度的模拟能力,利用成都市 2014 年地面观测资料和 NCEP 再分析资料,通过不同时间尺度统计分析和数值模拟试验的方法,对比分析成都相对湿度特征及不同陆面过程方案模拟效果。结论表明:成都市平均相对湿度较高,主要集中在85%~100%;相对湿度季节变化中,秋季相对湿度最大,夏、冬季次之,春季最小;日变化中白天相对湿度较小,夜间较大;四季中相对湿度日变化大致相似,但幅度不同,春季日变化最为显著,冬、夏次之,秋季最小;3种常用的陆面过程参数化方案对成都城市下垫面相对湿度的变化趋势模拟较好,但在极值模拟上有所差异,通过参数评估,5Layer方案对城市下垫面相对湿度模拟效果的最好。

关键词:大气科学;数值模拟;城市下垫面;相对湿度;变化特征

中图分类号:P435

文献标志码:A

doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2020.01.015

0 引言

空气相对湿度是指湿空气中水气压与同温度和气压条件下饱和水气压之比^[1],水汽是重要的温室气体,也是重要的能量载体,其通过辐射性冷却、潜热交换和加热、形成云和降水的方式,对天气和气候都有显著影响。同时,大量研究结论表明相对湿度与颗粒物吸湿增长关系密切,湿度往往作为判别雾和霾天气现象的依据^[2-4]。湿度的高低对人体健康和生活的舒适程度等均有较大的影响,是舒适度预报、紫外线指数预报、体感温度预报等专项预报的主要影响因子;除此之外,湿度还在农作物种植、气候预报、疾病预防和生态旅游规划等诸多领域具有重要作用^[5-7]。

近年来,不同学者对不同城市的空气湿度进行了相应的研究。研究表明不同地区的相对湿度变化特征差异较大^[5-9],并且随着近年来大气颗粒物污染的关注,许多研究均指出相对湿度与 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 关系密切^[10-11],并对大气能见度有显著影响^[12]。相对于沿海、东部等发达城市,作为典型盆地城市的成都,其相对湿度变化特征和数值模拟研究相对较少。利用成都温江国家基准气候站整理的 2014 年相对湿度、气温逐时观测资料和再分析资料对该地区相对湿度变化特征进行研究,并评估中尺度数值模式 WRF(weather research and forecasting model)对城市下垫面空气湿度的模拟能力。通过

对盆地城市-成都相对湿度的研究,可以正确认识和了解城市相对湿度的演变特征,并可利用选取适当参数化方案数值模拟的方法,来弥补缺乏台站观测的地区获取相应数据,为后续城市气象、健康、环境等领域的理论、用科学研究提供相关参考依据。

1 城市相对湿度变化特征

1.1 总体分布特征

图 1 为 2014 年成都市相对湿度的总体分布特征,可以看出成都市空气相对湿度主要集中在85%~100%,占比超过总体的55%,根据观测数据计算,成都市相对湿度年平均值达80.89%,相比长春^[13],天津^[14]等其他城市,成都市相对湿度较大;同时,相对湿度观测样本标准差为16.33%,表明成都地区城市相对湿度变化幅度较大。

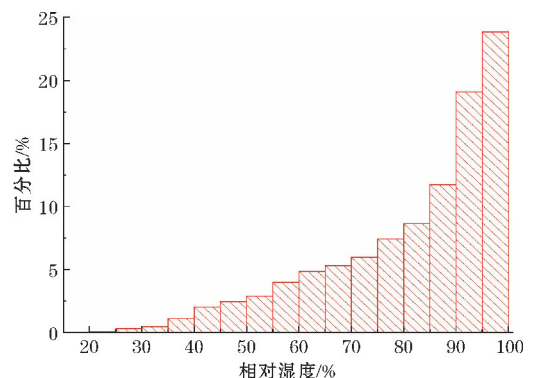


图 1 2014 年成都市相对湿度的总体分布特征

收稿日期:2019-04-09

基金项目:国家科技支撑计划资助项目(2015BAC03B05);中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室(2019LASW-B02);四川省科技厅资助项目(2019YJ0360)

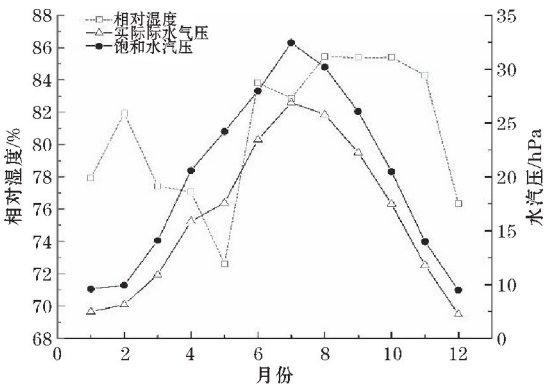
1.2 年和季节特征

图2为成都城市相对湿度年、季节变化图。从图2(a)年变化中可以看出相对湿度在8-11月偏大,3-5月偏小,最大值出现在8月,为85.44%,最小值出现在5月,为72.61%。按相对湿度为实际水气压和饱和水气压的比值^[1],利用经验公式(1)和(2),分别计算出实际水气压(e)和饱和水气压(e_s),进一步讨论相对湿度的年变化特征^[1]。

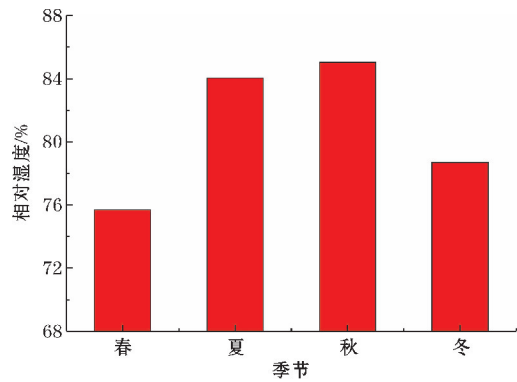
$$e=R\times e_s \tag{1}$$

$$e_s=6.11\times10^{\frac{7.5t}{237.3+t}} \tag{2}$$

式中 R 为相对湿度, t 为气温。



(a) 年变化特征



(b) 季节变化特征

图2 相对湿度年和季节变化图

图2(a)中可以看出,实际水气压(空心三角)与饱和水气压(实心圆)的变化趋势大致相同,均为夏季偏大,冬季偏小,峰值出现在7月,实际水气压最大值为26.90 hPa,饱和水气压最大值为32.45 hPa;谷值出现在12月,实际水气压最小值为9.47 hPa,饱和水气压最小值为7.23 hPa。实际水气压为空气中水汽的分压强,与空气中水汽质量密切相关,夏季为成都雨季,大量降水导致空气实际水气压也在夏季偏大,而在少雨的冬季实际水气压偏小。饱和水气压表示空气对水

汽的最大容纳能力,是与温度呈正比的物理量,所以与温度有着相似的年变化趋势。

相对湿度(空心矩阵)是实际水气压与饱和水气压的比值,导致在7月,虽然实际和饱和水气压均为最大,但其比值,既相对湿度偏小,同理在12月并不是最小值,以至于相对湿度出现不一样的年变化趋势。图2(b)为相对湿度随季节的变化趋势,成都地区秋季(9-11月)相对湿度最大,夏(6-8月)、冬季(12-次年2月)次之,春季(3-5月)相对湿度最小,其平均值详见表1。

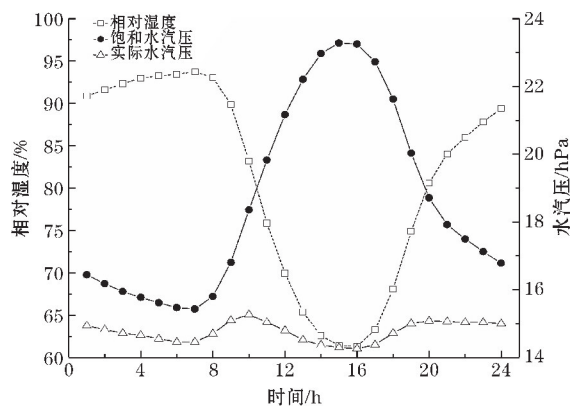
表1 成都相对湿度四季统计参数

季节	平均值	标准差
春	75.68	13.63
夏	84.05	10.88
秋	85.03	9.79
冬	79.31	13.18

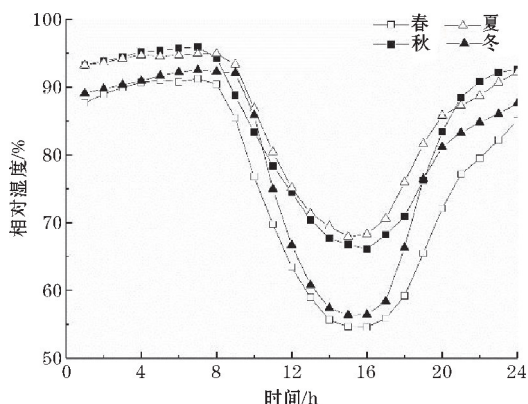
1.3 日变化特征

图3(a)为成都地区相对湿度、实际水气压和饱和水气压的日变化特征,可以看出,相对湿度(空心矩形)有显著的日变化特征,图形大致呈现“U”型。相对湿度峰值出现在上午7时,为94%,然后逐渐下降到15时,达到最小值61%,然后先迅速增加到22时后,再缓慢增加到次日7时。相对湿度出现的显著日变化特征的原因是,饱和水气压在一天的日变化也非常显著。根据公式(1),相对湿度是由空气实际、饱和水气压共同决定的,在图3(a)中,虽然实际水气压(空心三角)日变化相对不大,而作为分母的饱和水气压(实心圆),由公式(2)可以看出,饱和水气压与温度呈正比关系,当温度越大,饱和水气压也就越大,于是受到昼夜气温的变化,饱和水气压出现了明显的倒“U”型结构,白天偏高、夜间偏低的特征。而相对湿度为实际、饱和水气压的比值,受两者水气压共同影响,从而导致了相对湿度出现日高夜低的“U”型日变化特征。

图3(b)是相对湿度在四季中的日变化特征,由图可知,四季的相对湿度日变化特征趋势一致,均有明显的“U”型变化特征,但在四季日变化中的极值、增减降低转折时间有所差异,春季日变化最为明显,冬、夏季次之,秋季最小。四季中相对湿度最大值出现在上午7时,最小值出现在下午16时左右;春、冬两季相对湿度标准差较大(见表1),表明在这两季节中相对湿度日变化幅度较大,而在秋季相对湿度日变化相对平稳。



(a) 日变化特征



(b) 不同季节的日变化特征

图3 相对湿度日变化图

2 城市相对湿度的数值模拟研究

中尺度天气预报模式 WRF 被誉为是次世代的中尺度天气预报模式,该模式由美国 NCAR (national center for atmospheric research) 等多家研究单位联合开放并维护,具有较好模拟能力¹⁵⁻¹⁷。采用 WRF 中 ARW v3.8 模式 (advanced research WRF) 对典型盆地城市—成都的相对湿度进行模拟研究。相比以往的模式版本,在这一版本的模式物理框架增加了 Kain-Fritsch 积云参数化方案,增加了气溶胶—辐射之间的相互影响方案,改进了部分物理过程选项,更新了 WRF-Hydro4.0,即水文模块等,以上的改进工作使得 WRF 模式在大气、环境、水文等相关领域成为更有力的研究和应用工具。由于模式提供了众多参数化方案的选择,不同参数化方案又有不同的模拟效果,所以对于不同地区和下垫面参数化方案的选取并没有统一的结论,需要对特定地区和下垫面进行模拟试验。

在模拟试验中,模拟以观测站点为网格中心 (103.88 °E, 30.75 °N),其模拟区域包括成都市区,模拟选用双重嵌套的方式,其水平分辨率分别为 15 km 和 5 km,时间步长为 30 s,以保证模式计算稳定。模拟试验选取分辨率为 1°×1° 的 NCEP 再分析资料作为模

式的初始场和边界条件资料,模拟时间选取 2014 年 7 月 12 日—18 日,该时期为成都地区典型夏季晴天,模拟期间无降水发生,对比分析 3 种常用陆面过程方案 (5Layer, Noah^[18], CLM4^[19]),在城市下垫面空气湿度的模拟效果。其中,5Layer 方案把土壤温度和湿度分为 5 层,其计算量相对较小,模拟计算速度快。Noah 方案把土壤温度和湿度分为 4 层,并考虑了复杂下垫面结构,例如地表积雪覆盖、冻土物理过程等,该方案为一般 WRF 模拟的默认方案,其计算耗时略长于 5Layer 方案。CLM4 方案为 NCAR 和多家单位开发的陆面过程模式,其中包括了生物、水文和动态植被等多种复杂过程,在该方案中,陆面网格被细分为植被、城市、荒漠等 5 类主要的地表种类,植被类型也被细分为不同的生长过程与结构特征,由于考虑了多种复杂过程,所以该方案所耗计算时间较长。文中选取相关系数 (r) 和均方根误差 (RMSE, Root Mean Square Error) 评估模拟能力为

$$r = \frac{\sum (O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{(\sum (O_i - \bar{O})^2) \sum (S_i - \bar{S})^2}} \quad (3)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum (S_i - O_i)^2}{n}} \quad (4)$$

式中 O 为观测值, S 为模拟值。当 r 越趋近 1, 并 RMSE 值越小, 表明拟合效果越好。

图 4 为成都市 2014 年 7 月 12—18 日, 3 种不同参数化方案模拟的相对湿度和观测资料散点图, 图中实线为 $y=x$ 的过原点的直线, 散点分布越靠近直线, 表明拟合效果越好。从图 4 得知, 3 种参数化方案散点均偏直线下方, 说明模拟值偏小, 特别是 CLM4 方案更为明显。对 Noah, CLM4, 5Layer 按公式 (3) 分别计算了相关系数, 分别为 0.69、0.77、0.75, 相关系数较大, 表明 3 类方案对该地区相对湿度变化趋势有一定的模拟能力, 其中 5Layer 方案相关系数最大, 其模拟结果与观测资料变化趋势最为一致。为进一步对 3 类方案的模拟效果进行分析, 绘制了相对湿度模拟与观测值的时序图。

图 5 是模拟时间段中不同参数化方案与观测数据的时序图。3 种模拟结果与观测数据的变化趋势大致相同, 但在极值方面, 均有不同程度的偏差, 特别是在白天相对湿度谷值时, 3 类方案均出现偏小结果, 特别是 CLM4 方案, 这也是导致在图 4 中, 3 类方案散点分布偏下的原因。在夜间相对湿度偏大时, 模拟效果较好。根据公式 (4) 计算 3 类方案的相关系数和均方根误差 (表 2), 对比其结果发现, 3 种方案的相关系数均较高, 表明模式对相对湿度的日变化趋势模拟较好, 其

中5Layer 方案的相关系数最高,为0.77,并且均方根误差最小,为10.07,表明该方案与观测值最为接近,结

合上述相关系数的比较,在成都地区空气湿度的模拟中,陆面过程选取 5Layer 方案更为适合。

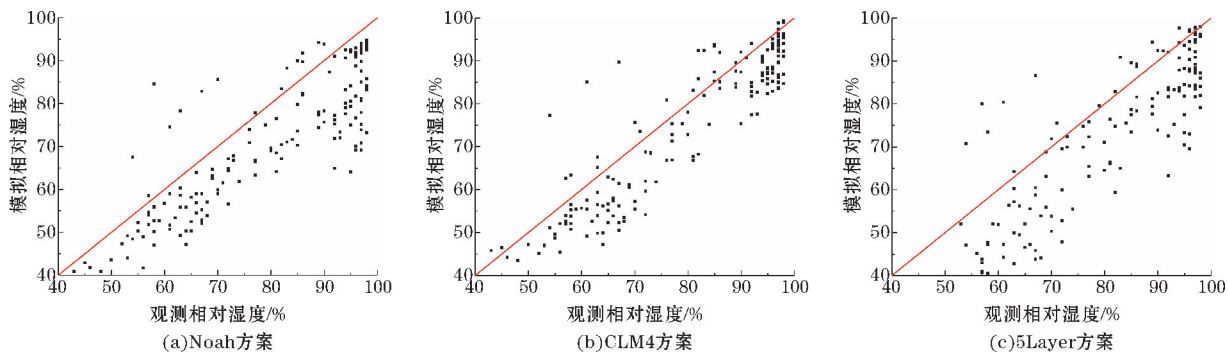


图4 2014年7月12-18日相对湿度散点图

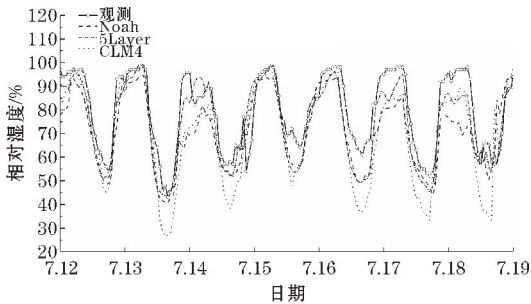


图5 3种参数化方案的相对湿度对比图

表2 3种模式相对湿度的相关系数与均方根误差值

参数	Noah 模式	5Layer 模式	CLM4 模式
相关系数 r	0.69	0.77	0.75
均方根误差 RMSE	12.24	10.07	13.46

由图3(a)得知,空气相对湿度的大小与空气饱和水气压密切相关,为进一步研究参数化方案误差产生的原因,分别对3种方案模拟的饱和水气压进行了比较,对相对湿度的模拟误差展开分析。

图6为成都市2014年7月12-18日,3类不同参数化方案模拟饱和水气压和观测资料散点图,从上图得知,3种参数化方案模拟的饱和水气压散点均偏直线上方,说明模拟值偏大,特别是 CLM4 方案更为明显。由于在计算公式中,相对湿度与饱和水气压呈反比关系,模拟的饱和水气压越大,相对湿度越小,这也是导致3种方案模拟的相对湿度均偏小的原因。由此,对饱和水气压模拟结果展开进一步分析。

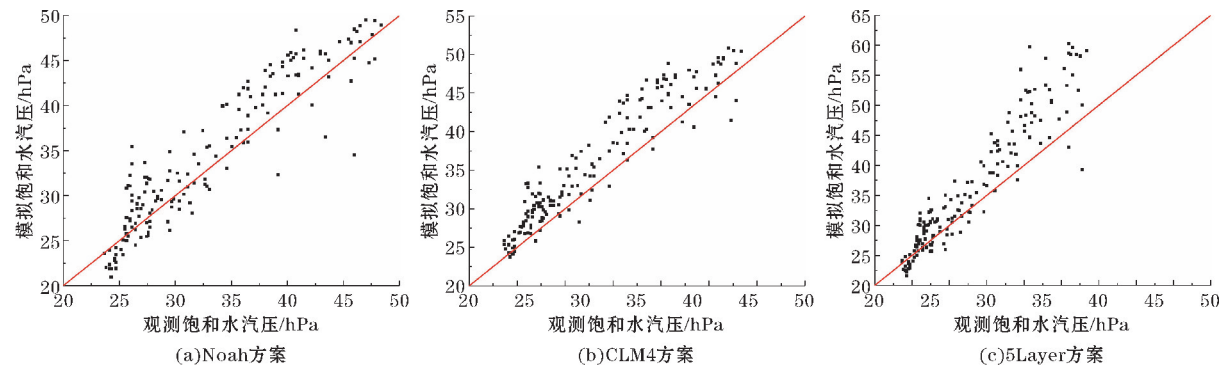


图6 2014年7月12-18日不同模式模拟饱和水汽压散点图

图7是模拟时间段中不同参数化方案模拟的饱和水气压与观测数据的时序图,可以看出,如同相对湿度模拟结果,3类参数化方案模拟与观测数据的变化趋势一致,同样在极值方面,有不同程度的偏差,特别是在白天谷值时,3类方案均出现偏大结果,特别是 CLM4 方案,由于在相对湿度计算公式(1)中,饱和水气压为分母,所以导致相对湿度 CLM4 方案的计算明显偏小;而在其余时刻,饱和水气压模拟效果相对较好。根据相关系数与均方根误差公式计算三类方案统

计参数见表3。

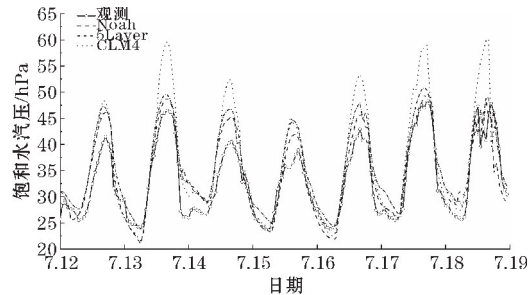


图7 3种参数化方案的饱和水汽压对比图

表 3 3 种模式饱和水汽压的相关系数与均方根误差值			
参数	Noah 模式	5Layer 模式	CLM4 模式
均方根误差	3.29	3.82	5.60
相关系数	0.86	0.90	0.89

由表 3 可知,3 类方案相关系数均达 0.85 以上,表明 3 类方案对饱和水汽压日变化特征有较好的模拟能力,其中 5Layer 方案相关系数最大,为 0.90,同时均方根误差也较小,为 3.82,相比较而言,5Layer 方案与观测值最为接近,所以对成都地区饱和水汽压的模拟中,陆面过程 5Layer 方案更为适合。

由上述试验得知,WRF 模式 3 种参数化方案对城市下垫面典型夏季相对湿度的数值模拟均有一定的拟合效果。对比分析 3 种参数化方案模拟相对湿度的相关系数和均方根误差可知,5Layer 方案的相关系数较大,其均方根误差也最小,表明 5Layer 方案对成都地区下垫面相对湿度模拟较好。同时,由于饱和水汽压对相对湿度影响密切,也讨论了饱和水汽压的模拟效果进行对比,综合比较而言,WRF 模式 3 种参数化方案对相对湿度和饱和水汽压的模拟中 5Layer 方案的模拟效果更好。

3 结论

利用 2014 年成都市地面观测资料和再分析资料,研究了城市下垫面不同时间尺度内相对湿度的变化特征,并对比分析了 WRF 模式不同参数化方案对相对湿度的模拟能力,得到以下结论:(1)成都市空气相对湿度偏大,平均值为 80.79%,主要集中在 85%~100%;相对湿度的年和季节变化显著,秋季最大,夏、冬其次,春季最小;四季中相对湿度日变化均有明显的“U”型特征,在不同季节的日变化中,湿度的幅度和增减的时间略有不同。(2)数值模式 WRF 试验中,常用陆面方案(Noah、CLM4 和 5Layer)均对相对湿度有一定模拟能力,可以较好地模拟出相对湿度的日变化特征,但是在极值的模拟上,特别是白天最小值的模拟中,3 类方案均存在偏小的情况,通过对模拟数据的统计,5Layer 方案对城市下垫面相对湿度和饱和水汽压模拟效果较好。

致谢:感谢成都信息工程大学项目(BKJX2019120)对本文的资助

参考文献:

[1] 盛裴轩. 大气物理学[M]. 北京:北京大学出版社,2003.

[2] 丁一汇,柳艳菊. 近 50 年我国雾和霾的长期变

化特征及其与大气湿度的关系[J]. 中国科学:地球科学,2014,44(1):37-48.

[3] 王敏珍,郑山,王式功,等. 气温与湿度的交互作用对呼吸系统疾病的影响[J]. 中国环境科学,2016,36(2):581-588.

[4] 姚青,蔡子颖,韩素芹,等. 天津冬季相对湿度对气溶胶浓度谱分布和大气能见度的影响[J]. 中国环境科学,2014,34(3):596-603.

[5] 倪惠,杨雪艳. 长春市空气相对湿度的气候特征分析[J]. 吉林气象,2001,(3):12-13.

[6] 韩会庆,蔡广鹏,伍静,等. 1960-2013 年贵州省绝对湿度时空变化特征[J]. 四川农业大学学报,2016,34(3):348-353.

[7] 翟红楠. 深圳市流感与大气环境的关系研究及其预测模型的建立[D]. 中国地质大学,2009.

[8] 安顺清,吴其助,焦仪珍. 青藏高原及邻近地区中低空温湿度分布的一些气候特点[J]. 气象,1981(10):17-19.

[9] 蒋冲,穆兴民,马文勇,等. 秦岭南北地区绝对湿度的时空变化及其与潜在蒸发量的关系[J]. 生态学报 2015,35(2):378-388.

[10] 刘凡,谭钦文,江霞,等. 成都市冬季相对湿度对颗粒物浓度和大气能见度的影响[J]. 环境科学,2018,39(4):1466-1472.

[11] 宋明,韩素芹,张敏,等. 天津大气能见度与相对湿度和 PM(10)及 PM(2.5)的关系[J]. 气象与环境学报,2013,29(2):34-41.

[12] 王晓敏,韩军彩,陈静,等. 石家庄地区能见度变化特征及其与相对湿度和颗粒物浓度的关系[J]. 干旱气象,2016,34(4):648-655.

[13] 倪惠,杨雪艳. 长春市空气相对湿度的气候特征分析[J]. 吉林气象,2001,(3):12-13.

[14] 司鹏,罗传军,姜罕盛,等. 天津地面相对湿度资料的非均一性检验及订正[J]. 气象,2018,44(10):1332-1341.

[15] 何建军,余晔,刘娜,等. 复杂地形区陆面资料对 WRF 模式模拟性能的影响[J]. 大气科学,2014,38(3):484-498.

[16] 潘小多,李新,冉有华,等. 下垫面对 WRF 模式模拟黑河流域区域气候精度影响研究[J]. 高原气象,2012,31(3):657-667.

[17] 王晓君,马浩. 新一代中尺度预报模式(WRF)国内应用进展[J]. 地球科学进展,2011,26(11):1191-1199.

[18] 胡向军,陶健红,郑飞,等. WRF 模式物理过程

参数化方案简介[J]. 甘肃科技, 2008, 24(20): 73-75.

域土壤湿度的数值模拟及评估研究[J]. 大气科学, 2014, 38(3): 499-512.

[19] 赖欣, 文军, 岑思弦, 等. CLM4.0 模式对中国区

Characteristics and Numerical Simulation of Relative Humidity in Underlying Surface of Basin Cities-Taking Chengdu as an Example

ZHOU Yanyan¹, WANG Chao¹, XIAO Tianguai¹, LIU Siqu¹, CHEN Yaling¹, LI Xu²

(1. College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Plateau Atmosphere, Environment Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610225, China; 2. NO. 95937 of the Chinese People's Liberation Army, Fuxin 123100, China)

Abstract: To study the variation characteristics of relative humidity and the simulating capability of relative humidity of process schemes in different land surface while in the mesoscale numerical mode in this field. We took advantage of the ground observation data and reanalysis data and used methods of statistical analysis and numerical simulation experiment in varieties temporal scale to compare and analyze the relative humidity features and simulation effects in different surface process schemes in Chengdu. The results show that: the average relative humidity in Chengdu is comparatively high and is mainly concentrated between 85% and 100%. Relative humidity in autumn is the largest, followed by summer, winter, spring, and in the diurnal variation, relative humidity in daytime is higher than night. Three frequently-used land process parameterization schemes simulated the variation trend of relative humidity of underlying surface excellently in Chengdu, but there are differences in extreme value simulation. Through parameter evaluation, the best simulation effects of relative humidity of city underlying surface is performed by 5Layer scheme.

Keywords: atmospheric science; numerical simulation; urban underlying surface; relative humidity; change characteristics