

许乐心,费烨,李琳琳. 基于 Himawari-8 卫星 AOD 产品的河南省能见度反演研究[J]. 陕西气象,2020(6):36-41.

文章编号:1006-4354(2020)06-0036-06

基于 Himawari-8 卫星 AOD 产品的 河南省能见度反演研究

许乐心¹,费 烨²,李琳琳³

(1. 河南省气象探测数据中心,郑州 450003;2. 国家气象信息中心,北京 100081;

3. 三峡水利枢纽梯级调度通信中心,湖北宜昌 443000)

摘 要:利用 2018 年 12 月—2019 年 2 月 Himawari-8 卫星气溶胶光学厚度数据产品与河南省 119 个国家地面观测站能见度观测资料,建立线性混合效应模型,并基于卫星观测 AOD 数据反演了河南省地面能见度。结果表明:Himawari-8 卫星的 AOD 产品与 Aqua 的 AOD 产品一致性较好。线性混合效应模型反演的地面能见度与台站观测的能见度相关性可以达到 0.82($P < 0.05$),反演的能见度均值与观测能见度均值仅相差 0.5 km。通过 2018 年 12 月 16 日 14 时个例分析,能见度的分布与地面观测基本保持一致,反演的地面能见度空间分辨率达到 2 km。

关键词:Himawari-8;能见度;线性混合效应模型

中图分类号:P427.2

文献标识码:A

随着经济的发展,人类活动对环境的影响增大,水平能见度日益成为一个备受人们关注的气象要素,它与交通运输、空气质量、人类健康息息相关。目前,气象台站使用水平能见度仪观测地面能见度。由于气象站点只是在一定范围内具有代表性,观测结果在空间上具有离散特征。而低能见度天气的水平尺度变化范围很广,地面观测站点的观测结果不足以涵盖尺度较大的低能见度天气过程。随着卫星遥感技术的发展,越来越多的遥感数据被应用于天气监测、预报,防灾减灾之中。卫星观测数据既可以做到空间上的大面积覆盖,也可以实现与地面台站观测的同步进行。目前在气溶胶研究、能见度反演、污染物分布及输送等方面已经得到了很多成果^[1-6]。例如,通过对 Terra 和 Aqua 的 MODIS 气溶胶光学厚度(Aerosol Optical Depth, AOD)与地面能见度对比分析,证明了卫星的气溶胶数据产品可用于能见度的研究^[7-12],常用的研究方法包括数理统计、

气溶胶标高法、数值模式、神经网络等。Fu 等^[13]利用 Terra/MODIS 的 AOD 数据产品和 AERONET 数据建立混合线性效应模型来估测 PM_{2.5} 浓度,结果显示,在冬季时,MODIS 的 AOD 数据的空间覆盖率约为 50%,通过增加 AERONET 的协同作用,能将 AOD 数据的空间覆盖率提高至 81%。气溶胶标高法也常被用于建立气溶胶光学厚度和地面能见度之间相互关系^[14-16]。Kessner 等^[8]通过气溶胶标高建立了 AOD 与地面能见度之间的重要联系。张倩倩等^[16]利用气溶胶标高和乘幂公式分别建立能见度估算模型,提出乘幂公式对能见度 4~10 km 部分估算效果较好,在大值和小值区反演误差较大;气溶胶标高法在能见度大值和小值区反演具有明显优势,但在小值区反演会出现负值。冯沁等^[17]将 Terra 和 Aqua 的 MODIS 和 FY-2A/MERSI 的 AOD 资料运用到同化预报试验,可明显降低空报和漏报率。不少学者将神经网络方法应用于卫星的能

收稿日期:2020-06-01

作者简介:许乐心(1992—),女,汉族,河南南阳人,硕士,助理工程师,从事气象卫星资料应用研究。

基金项目:中国气象局/河南省农业气象保障与应用技术重点实验室应用技术研究基金(KQ202010)

能见度反演研究中,建立了 AOD 估算能见度模型,取得很好的效果^[18]。

日本气象厅在 2014 年 7 月发射了新一代静止气象卫星 Himawari-8,全区域的时间分辨率可以达到 10 min/次,搭载的新型传感器 AHI (Advanced Himawari Imagery)波段包含了气溶胶通道,在能见度反演方面潜力极大。因此本文的研究思路是利用 Himawari-8 的 AOD 数据产品,运用线性混合效应模型,将卫星的 AOD 数据产品作为固定因子,将观测时间、台站位置等因素作为随机因子来反演河南省地面能见度,以提高地面能见度的时空分辨率,为霾天气过程的预报、预警提供数据支撑。

1 数据和算法

1.1 数据来源

1.1.1 台站数据 数据选用了 2018 年 12 月—2019 年 2 月河南省 119 个国家地面观测站的逐小时 10 min 水平能见度资料,气象数据来自于 CIMISS 气象数据统一服务接口提供的中国地面逐小时资料集。台站分布如图 1 所示。

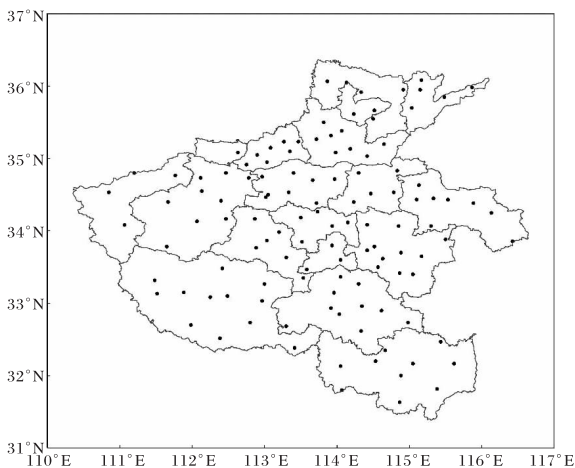


图1 河南省 119 个国家地面观测站分布

1.1.2 卫星数据产品 卫星数据是由日本 Himawari-8 卫星观测,由国家气象卫星中心定标、反演得到的气溶胶光学厚度数据集产品。数据时段同为 2018 年 12 月—2019 年 2 月。该气溶胶数据产品的时间分辨率为 10 min,空间分辨率约为 2 km。数据通过 ftp 方式从国家气象卫星中心获取。

为验证该套数据的可靠性,利用 2018 年 12 月美国 Aqua 卫星 AOD 数据产品对 Himawari-8 数据进行验证。从 NASA 官网下载 Aqua 卫星 L2 级数据产品,该气溶胶数据产品时间分辨率为 5 min,空间分辨率约为 3 km (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/order/1>)。

1.2 反演算法

本文使用的算法是线性混合效应模型,这个模型的特点是在进行建模时既包含固定因子又包含随机因子。现实中有许多数据问题是不能简单地采用普通线性回归处理的。固定效应一般是那些可以预测的因素,能够完整地划分总体;而随机效应则更多是因为个体差异导致,并且同一个体在不同的重复测量中也存在组内随机差异。

假设能见度和 $1/\text{AOD}$ 存在线性关系^[8],不同的台站,这两者之间的线性关系会存在差异,即线性方程的斜率项和截距项是不同的。不同的日期、相对湿度、甚至于大气环流形势等等都会对能见度有影响。线性混合效应模型能够综合考虑这些因素的影响,可以将时间、相对湿度、台站经纬度信息作为随机因子,建立如下模型。

$$V_{i,j} = (\alpha + \mu_j) + (\beta + v_j) \times \left(\frac{1.0}{\tau_{i,j}} \right) + s_i + \epsilon_{i,j} \quad (1)$$

其中, i 代表站点, j 代表时间, $V_{i,j}$ 代表不同台站不同时间的地面水平能见度, $\tau_{i,j}$ 代表不同台站不同时间的 AOD, α 和 β 分别为截距和斜率项, μ_j , v_j 分别代表时间随机因子对截距和斜率产生的随机效应, s_i 代表台站经纬度信息、相对湿度等因素产生的随机截距项, $\epsilon_{i,j}$ 为随机误差项。

2 Himawari-8 卫星气溶胶数据产品质量验证

大量研究成果证明,Terra 和 Aqua 的 MODIS 的 AOD 产品精度相对可靠^[19-20]。由于 Himawari-8 为地球同步卫星,其气溶胶产品的时间分辨率可以达到 10 min,空间分辨率约为 2 km。与 Terra 和 Aqua 极轨卫星相比,Himawari-8 在时间分辨率上有很大的优势,将 Himawari-8 的气溶胶数据应用到研究中,可提高大气能见度反演的时间精度。为验证 Himawari-8 气溶胶数据产品的可靠性,先利用 Aqua/MODIS 数据产品

对 Himawari-8 的 AOD 数据进行了质量对比。

图 2 给出了两套卫星数据 AOD 产品在 2018 年 12 月 16 日 14 时的分布情况。通过对比可以看出, Himawari-8 卫星的 AOD 数据产品的空间

覆盖率要比 Aqua 卫星 AOD 数据产品的高, Aqua 卫星由于其极轨卫星的特点, 受到 AOD 反演方法的限制, 在河南东北部地区和西部地区靠近图像边缘没有反演得到 AOD 数据。

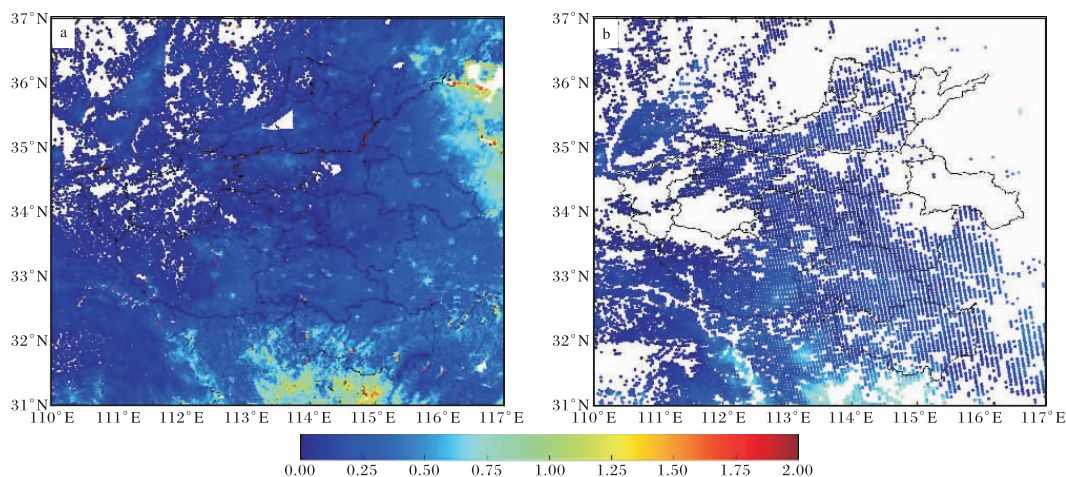


图 2 2018-12-16T14 Himawari-8(a)和 Aqua(b)卫星 AOD 产品对比

为了定量讨论 Himawari-8 卫星 AOD 数据产品的质量, 这里需要先对两套卫星资料进行数据匹配。Aqua 是极轨卫星, 相对太阳静止, Aqua 的过境时间为地方时 13:30。因 Himawari-8 卫星 AOD 数据产品的时间分辨率为 10 min, Aqua 卫星气溶胶数据产品的时间分辨率为 5 min, 以 Aqua 过境时间为时间基点, 选择和 Aqua 过境时间最近的 Himawari-8 卫星气溶胶产品匹配。另 Himawari-8 卫星气溶胶产品的空间分辨率为 2 km, Aqua 卫星气溶胶产品的空间分辨率为 3 km, 因而以 Aqua 卫星产品数据经纬度为中心, ± 1.5 km 范围内所有的 Himawari-8 的 AOD 数据做空间平均, 得到空间分辨率为 3 km 的 Himawari-8 AOD 数据。

通过匹配得到 2018 年 12 月两套 AOD 产品关系(图 3)。两套卫星数据 2018 年 12 月在河南地区共有 41 194 对匹配数据, 相关系数达到了 0.87(通过了 0.05 显著性检验)。图中散点的颜色代表在对应位置散点出现频率的大小, 颜色越接近红色, 表示该数值出现频率越高。两套卫星 AOD 产品数值分布相近, 一致性很好, 大部分数值均集中在 AOD=1 以内。通过和理想的 $y=x$ 曲线对比, AOD=0.61 是两条直线的交点, 在

AOD 小于 0.61 时, 相比于 Aqua, Himawari-8 的 AOD 数值略微偏小; 在 AOD 大于 0.61 时, Himawari-8 的 AOD 数值略微偏大。两套数据产品最大差异不超过 0.11, 因此 Himawari-8 的 AOD 数值产品是可靠的。

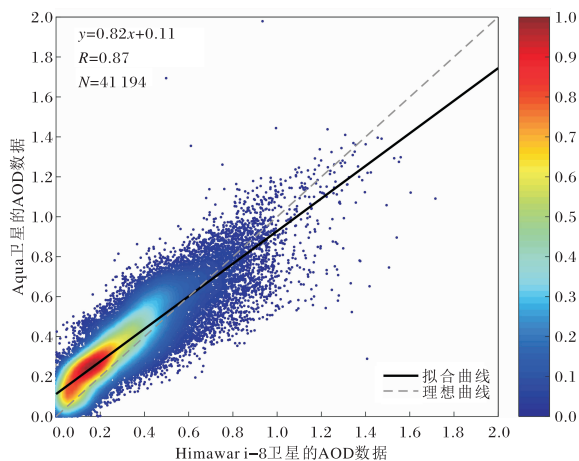


图 3 Aqua 卫星和 Himawari-8 卫星的 AOD 数据的散点密度及相关性分析

3 能见度反演模型验证与应用

使用线性混合效应模型对 Himawari-8 的 AOD 和河南省台站观测的能见度数据进行建模。通过验证发现台站观测的 1 min 水平能见度和

10 min 水平能见度在数值上差别不大,因此使用 10 min 水平能见度。采用交叉验证的方法,随机挑选 80% 的 AOD 数据进行建模,将剩余 20% 的数据计算得到能见度数据,通过和台站观测的能见度对比来验证模型效果。由于 AOD 数据产品是格点数据,台站数据是离散型的,因而需先进行空间匹配,将 AOD 格点场的数据插值到台站。采用平均插值算法,即以台站位置作为中心,±5 km 范围 Himawari-8 的 AOD 的算术平均值来进行空间匹配,得到与台站数据一一对应的逐小时的 AOD 数据用于建模。通过多次参数试验,当台站位置和观测时间作为影响斜率的随机因子时模型效果最优。

将所获取的 2018 年整个冬季能见度和卫星数据进行逐小时匹配、逐小时建模,考虑到能见度的演变在时间上具有连续性,添加建模时次的前两个小时卫星数据作为模型的时间随机因子,当模型可用站点数超过 30 时,进行建模并计算该模型的决策系数。在回归模型中,决定系数越高,代表可以被解释的程度越高,回归模型的效果越好。由于静止卫星在夜间时段没有数据,且 AOD 数据产品在反演时受到云等的影响,可建模时段主要集中在 10—15 时。从建模的统计结果上看,决策系数的数值范围为 0.24 到 0.96。通过绘制箱线图(图 4)可以看出,去除部分异常数据,模型的决策系数大部分集中在 0.4 以上,逐小时的决策系数中值均在 0.7 以上,证明模型是可靠的。

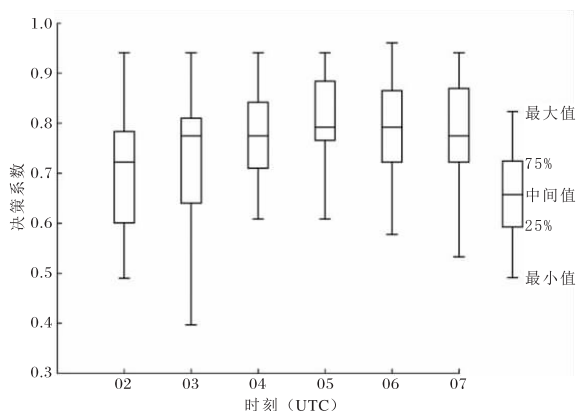


图 4 2018 年冬季数据模型决策系数箱线

为了验证模型的反演效果,选取 2018 年 12 月 16 日 06 UTC 数据所建模型,将空间匹配后的

AOD 数据代入模型,得到各台站的反演能见度数据集,并与台站观测能见度进行对比。如图 5 所示,能见度的计算值与台站观测值相关系数可以达到 0.82,通过了显著性检验。观测能见度和反演能见度的数值大部分集中在 5~20 km 之间,能见度的观测平均值为 11.3 km,卫星反演平均值为 11.8 km,绝对平均误差为 1.69,均方根误差为 3.72 km。模型计算的能见度与观测能见度具有很好的一致性。

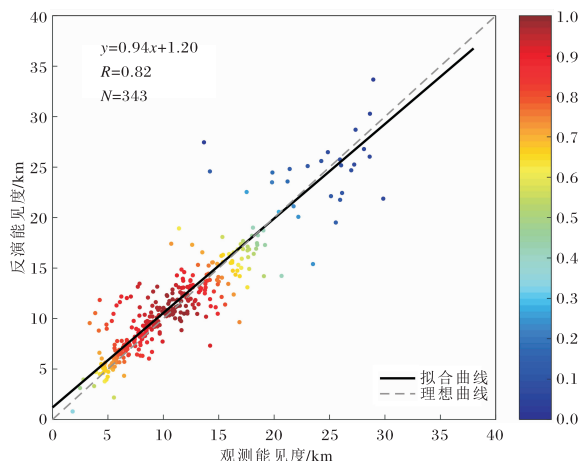


图 5 观测能见度与模型计算能见度的散点密度及相关性分析

应用上述模型,将分辨率为 2 km 的 Himawari-8 卫星 AOD 数据代入到模型中,即可计算得到空间分辨率为 2 km 的河南省格点能见度产品。选取 2018 年 12 月 16 日 14 时个例来说明反演效果,模型反演的格点能见度与观测能见度对比如图 6 所示。通过模型计算得到的能见度(图 6 a)与台站观测能见度(图 6 b)分布基本一致,河南省的西北部地区能见度较大,空气质量较好;在安阳、濮阳、新乡、焦作等豫北地区有一片区域能见度较小;重污染地区主要位于豫南。反演的能见度空间分布要比台站观测精细很多,能见度的空间分辨率得到了显著提高。

4 结论

利用 Himawari-8 卫星的 AOD 数据产品和河南省地面气象观测资料,分析了 Himawari-8 的 AOD 数据产品与 Aqua 卫星 AOD 数据产品的一致性,并建立了能见度的线性混合效应模型。

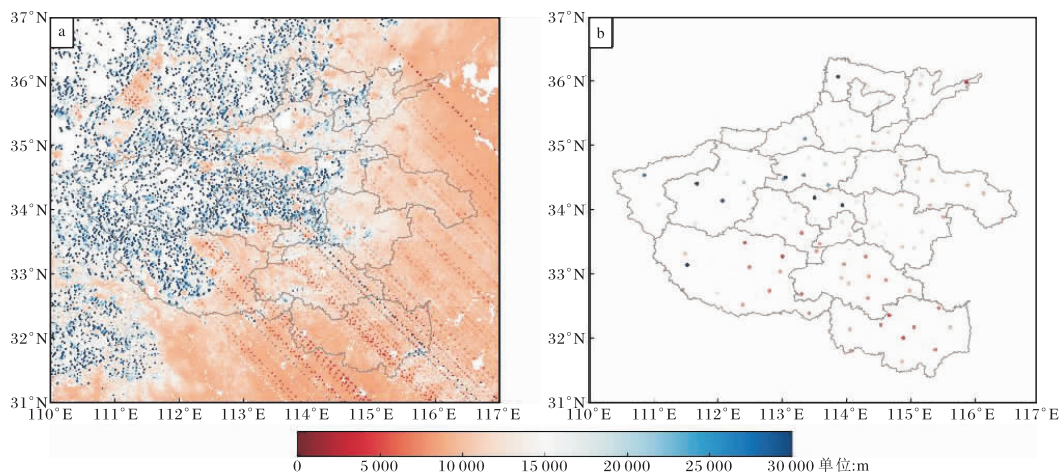


图6 2018-12-16T14 河南省能见度分布(a:模型反演;b:台站观测)

模型选取卫星 AOD 数据产品作为模型的固定因子,将台站位置和观测时间作为随机因子,利用模型反演得到河南省高分辨率的能见度图。主要结论如下。

(1)Himawari-8 卫星的 AOD 产品与 Aqua 的 AOD 产品一致性较好,相关系数达到 0.87,通过了 0.05 的显著性检验。

(2)通过建立线性混合效应模型,反演得到的能见度与观测的能见度相关系数达到了 0.82,通过了 0.05 的显著性检验,观测能见度的平均值为 11.3 km,反演能见度的平均值偏差仅为 0.5 km。

(3)根据模型反演了 2018 年 12 月 16 日 14 时的地面能见度。结果表明,模型的模拟结果与观测数据分布特征基本一致,空间分辨率明显提高,可达 2 km。

参考文献:

- [1] DI N W, CACCIARI A, TOMASI C. Particulate Matter at Surface: Northern Italy Monitoring Based on Satellite Remote Sensing, Meteorological Fields, and in-situ Samplings[J]. IEEE Journal of Selected Topics In Applied Earth Observations And Remote Sensing, 2009, 2(4):284-292.
- [2] VAN D A, MARTIN R V, BRAUER M, et al. Global Estimates of Ambient Fine Particulate Matter Concentrations from Satellite-Based Aerosol Optical Depth: Development and Application[J]. Environmental Health Perspectives, 2010, 118(6):

847-855.

- [3] 陈辉,厉青,王中挺,等. 利用 MODIS 资料监测京津冀地区近地面 $PM_{2.5}$ 方法研究[J]. 气象与环境学报,2014,30(5):27-37.
- [4] 于文金,于步云,谢涛,等. 基于 MODIS 气溶胶光学厚度与气象要素的苏锡常地区 $PM_{2.5}$ 地面浓度分布研究[J]. 环境科学学报,2016,36(10):3535-3542.
- [5] 林杨,胡琳,邓小丽,等. 西安市大气能见度变化规律及与空气污染关系[J]. 陕西气象,2007(6):29-31.
- [6] 高红燕,蔡新玲,李建科. 西安市低能见度特征分析[J]. 陕西气象,2005(6):28-29.
- [7] RETALIS A, HADJMITISIS D G, MICHAELIDES S, et al. Comparison of aerosol optical thickness with in situ visibility data over Cyprus[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2010, 10(107):421-428.
- [8] KESSNER A L, WANG J, ROBERT C L, et al. Remote sensing of surface visibility from space: a look at the United States East Coast[J]. Atmospheric Environment, 2013, 81(12):136-147.
- [9] LEE K H, WONG M S, KIM K, et al. Analytical approach to estimating aerosol extinction and visibility from satellite observations[J]. Atmospheric Environment, 2014, 91(7):127-136.
- [10] HUANG F, WANG H, QIAN J P, et al. Retrieval of atmospheric horizontal visibility by statistical regression from NOAA/AVHRR satellite data[J]. Journal of Ocean University of China,

- 2006, 5(3):207-212.
- [11] 黄艇,陈长和,陈勇航,等. 利用 MODIS 卫星资料对比反演兰州地区气溶胶光学厚度[J]. 高原气象,2006,25(5):886-892.
- [12] 孙卉,吴语燕,张明明,等. MODIS 气溶胶产品在池州市能见度估算中的应用[J]. 气象与环境科学,2018,41(4):27-33.
- [13] FU D S, XIA X A, WANG J, et al. Synergy of AERONET and MODIS AOD products in the estimation of PM_{2.5} concentrations in Beijing[J]. Scientific reports,2018,8(1):10174-10181.
- [14] 孙娟,束炯,鲁小琴,等. MODIS 遥感气溶胶光学厚度产品在地面能见距中的应用[J]. 环境科学与管理,2006,31(5):97-101.
- [15] KONDRAGUNTA S, LEE P, MCQNEEN J, et al. Air Quality Forecast Verification Using Satellite Data[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2008, 47(2):425-442.
- [16] 张倩倩. 基于 MODIS 数据的雾霾检测方法研究[D]. 南京:南京师范大学,2012.
- [17] 冯沁,鲍艳松,闵锦忠,等. 卫星气溶胶光学厚度资料同化对灰霾预报改进个例研究[J]. 气象学报,2018,76(1):104-116.
- [18] 郭建平,吴业荣,张小曳,等. BP 网络框架下 MODIS 气溶胶光学厚度产品估算中国东部 PM_{2.5} [J]. 环境科学,2013,34(3):817-825.
- [19] 王宏斌,张镭,焦圣明,等. 中国地区 MODIS 气溶胶产品的验证及反演误差分析[J]. 高原气象,2016,35(3):810-822.
- [20] 包云轩,邵艺,李迅. 基于 MODIS 的北京地区一次霾过程的能见度反演[J]. 大气科学学报,2018,41(5):710-719.

《陕西气象》征集 2020 年汛期天气预报专题论文征稿启事

《陕西气象》是国家新闻出版管理部门第一批认定的学术期刊,是我国地学领域高质量科技期刊,四次荣获陕西省科技期刊特色期刊奖。国内外公开发行,双月刊,国际和国内连续出版物号分别为 ISSN 1006-4354 和 CN 61-1282/P。

本刊现征集 2020 年汛期天气预报专题论文,侧重于 2020 年重大天气过程的数值预报、数值试验、诊断研究、预报方法及应用,暴雨洪涝灾害及其他气象灾害的成因、预测与减灾对策,新的探测技术和资料在暴雨等灾害分析研究中的应用。欢迎气象行业及相关行业的科技工作者及大专院校师生投稿。

来稿要求论点明确,文字精练,条理清晰,数

据可靠,图表清楚、简明。论文格式请参考《陕西气象》征稿简则和《陕西气象》文稿修改基本要求及投稿指南,具体请参阅本刊网站(<http://sxqx.alljournal.cn/>)。

投稿渠道:通过本刊网站注册后即可投稿,来稿请注明为 2020 年汛期天气预报专题论文。

联系电话:029-86163551

029-86231652-6214(6213)

电子邮箱:sqxqxbjb029@163.com

QQ 交流二群群号:634022951(申请时请说明单位和姓名)

《陕西气象》编辑部