

陈乐,郑丽英,宋雨润,等. 基于日照和气温日较差的太阳日总辐射模型在成都的有效性验证[J]. 陕西气象, 2025(6): 67-72.

文章编号:1006-4354(2025)06-0067-06

基于日照和气温日较差的太阳日总辐射模型在成都的有效性验证

陈乐^{1,2,3}, 郑丽英^{1,2,3}, 宋雨润^{1,2,3}, 王勤², 夏昕²

(1. 温江国家气候观象台, 成都 611130; 2. 成都市气象局, 成都 611130;

3. 成都农业气象试验站, 成都 611130)

摘要:利用 2005—2022 年成都温江国家气候观象台太阳日总辐射、日最高气温、日最低气温、日照时数等气象资料,采用非线性回归拟合经验系数建立基于日照和气温日较差的成都太阳日总辐射模型;应用相关系数、绝对误差、相对误差、均方根误差、归一化均方根误差等方法验证太阳日总辐射模型在全序列、有日照、无日照样本中的有效性。结果表明:全序列太阳日总辐射的模拟值与实测值的平均相关系数 0.95,平均绝对误差 $1.61 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}/\text{d}$,平均相对误差 25.16%,均方根误差 $2.21 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}/\text{d}$,归一化均方根误差 20.6%,模拟效果为可以接受。有日照太阳日总辐射的模拟值与实测值的平均相关系数 0.94,平均绝对误差为 $1.71 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}/\text{d}$,平均相对误差 15.46%,均方根误差 $2.21 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}/\text{d}$,归一化均方根误差 15.3%,模拟效果为好。无日照太阳日总辐射的模拟值与实测值的平均相关系数 0.68,平均绝对误差为 $1.42 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}/\text{d}$,平均相对误差 41.12%,均方根误差 $2.06 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}/\text{d}$,归一化均方根误差 45%,无日照太阳总辐射模拟效果不好。基于日照和气温日较差的太阳日总辐射模型在有日照的估算效果优于无日照的估算效果。

关键词:成都;太阳总辐射;估算;预测

中图分类号:P422.1

文献标识码:A

太阳辐射是地球表层能量的根本来源,是维持地球生态系统能量平衡的重要因子^[1]。太阳辐射的研究具有广泛应用领域,可用于太阳能资源开发、光伏发电、生物物理、生态系统、水文模拟等^[1-2]。四川省太阳辐射观测站点有 7 个,成都地区仅温江国家气候观象台有太阳辐射的观测,观测资源相对匮乏,时间和空间分辨率都不足以支撑实际生产科学研究的需要^[3]。成都处于全国太阳辐射低值区,建立适用于成都的太阳日总辐射估算方法,对填补成都地区研究空白、支撑生态环境相关研究和气象服务具有重要意义。

国内外学者从 1920 年代开始太阳辐射的研究,目前已取得大量的科研成果。一是构建太阳辐射的经验模型。主要包括基于日照百分率的 Angstrom 模型^[4]、Bahel 模型^[5]、基于气温日较差的 Hargreaves 模型^[6],以及基于日照百分率与气温日较差的综合模型^[7]。二是确定研究区域的经验系数。和清华等^[8]建立了以天文辐射、晴天太阳辐射和理想大气太阳辐射为起始值,通过聚类分析对经验系数进行分区,建立东部、西部、全国统一的太阳总辐射计算公式;刘媛媛等^[9]以日值和月值为起点分别对地表太阳总辐射计算模型

收稿日期:2024-12-26

作者简介:陈乐(1980—),女,汉族,重庆忠县人,硕士,高级工程师,主要从事综合气象观测与应用气象服务研究。

通信作者:夏昕(1972—),男,汉族,四川岳池人,学士,高级工程师,主要从事气象数据分析与应用平台开发研究。

基金项目:四川省科技计划(2023YFS0430)

经验系数 a 、 b 进行拟合,并探讨 a 、 b 的空间变化特征;谭文等^[10]建立分月太阳辐射参数 a 、 b 。三是基于数理统计方法建立有日照、无日照太阳日辐射估算方法。张佩等^[11]采用逐步回归方法建立有日照、无日照太阳日辐射估算方法;蔡元刚等^[12]利用四川省地面气象观测资料建立全序列日总辐射、有日照日总辐射、无日照日总辐射计算模型。四是智能计算方法。王卫东等^[13-14]应用神经网络方法对太阳辐射进行模拟。五是模型验证。毛洋洋等^[15]通过对五种经验模型在华北地区的对比验证,证实了各类模型的区域适用性。申颜波等^[16]、钟燕川等^[17-18]聚焦四川太阳辐射的计算及订正,陈乐等^[19-20]对四川太阳辐射的时空特征进行了研究。成都是典型盆地气候区,针对成都的太阳辐射模拟研究还存在空白。太阳辐射经验模型具有参数少,物理意义明确等优点。本文利用日照和气温日较差资料建立了成都太阳日总辐射模型,探讨其在成都地区的适用性,以期为生态环境、气候变化、气象服务等领域提供依据。

1 资料与方法

1.1 数据来源

研究采用 2005—2022 年成都温江国家气候观测台的逐日太阳日总辐射、日最高气温、日最低气温、日照时数等地面气象观测数据,数据经过质控。其中 2005—2014 年数据用于模型系数拟合,2015—2022 年数据用于模型检验。

1.2 研究方法

1.2.1 太阳日总辐射估算模型 建立以日照百分率为主导因子,气温日较差为订正项的综合太阳日总辐射估算模型^[21]:

$$Q = Q_0(aS_1 + b \ln D + c), \quad (1)$$

$$Q_0 = \frac{24 \times 60}{\pi} I_0 \rho [\omega_0 \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \sin \omega_0], \quad (2)$$

$$\rho = 1 + 0.033 \cos\left(\frac{2\pi}{365} J\right), \quad (3)$$

$$\delta = 0.409 \sin\left(\frac{2\pi}{365} J - 1.39\right), \quad (4)$$

$$\omega_0 = \arccos(-\tan \varphi \tan \delta), \quad (5)$$

$$S_1 = m/M, \quad (6)$$

$$M = (24/\pi) \times \omega_0. \quad (7)$$

Q 为太阳日总辐射($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}/\text{d}$); Q_0 为到达大气上界的天文日总辐射($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}/\text{d}$); S_1 为日照百分率,即实际日照时数与可照时数之比,可照时数为理想日照时数或最大日照时数; D 为气温日较差($^{\circ}\text{C}$),即日最高气温与日最低气温差; a 、 b 、 c 为经验系数; ρ 为日地距离系数; I_0 是太阳常数,为 $0.082(\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}/\text{min})$; φ 是纬度(rad); δ 是太阳赤纬(rad); J 是计算日在一年中的日序,1 月 1 日取值 1,取值范围从 1 到 365 或 366; ω_0 为日落时角(rad); m 为实际日照时数(h); M 为可照时数(h)。

1.2.2 成都太阳日总辐射估算模型建立 根据式(2)~式(7)可得到 Q_0 、 S_1 ,应用 2005—2014 年逐日气象数据采用 SPSS 非线性回归对式(1)进行拟合,得到拟合系数 a 为 0.421, b 为 0.118, c 为 -0.01,成都全序列太阳日总辐射估算模型见式(8)。

$$Q = Q_0(0.421S_1 + 0.118 \ln D - 0.01). \quad (8)$$

1.2.3 太阳总辐射模型检验 计算未参与建模年份的太阳日总辐射模拟值,用相关系数(R)、平均绝对误差、平均相对误差、均方根误差、归一化均方根误差进行模型评估。

$$Y_{\text{MABE}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |O_i - Q_i|, \quad (9)$$

$$Y_{\text{MAPE}} = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|O_i - Q_i|}{Q_i}, \quad (10)$$

$$Y_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - Q_i)^2}, \quad (11)$$

$$Y_{\text{NRMSE}} = Y_{\text{RMSE}}/Q_a \times 100. \quad (12)$$

Y_{MABE} 为平均绝对误差, Y_{MAPE} 为平均相对误差, Y_{RMSE} 为均方根误差, Y_{NRMSE} 为归一化均方根误差, O_i 为模拟值, Q_i 为实测值, Q_a 为实测样本平均值, n 为样本数。模拟值与实测值相关系数 R 的大小决定模拟效果,愈接近 1 说明模拟效果越好。 Y_{MABE} 、 Y_{MAPE} 反映了模拟值与实测值之间的误差, Y_{RMSE} 反映离散程度。 Y_{MABE} 、 Y_{MAPE} 、 Y_{RMSE} 越小,表示模拟效果越好。采用毛洋洋等^[14]的模型评价方法,当 Y_{NRMSE} 小于 10% 表示模拟效果“非常好”,为 [10%, 20%) 表示“好”,为 [20%, 30%) 表示“可以接受”,大于 30% 表示“不好”。

2 太阳日总辐射与气象因子的关系

太阳日总辐射与日照时数、气温日较差关系密切。全序列太阳日总辐射与日照时数的相关系数为 0.859,通过 0.01 显著性检验,表明日照时数大时太阳日总辐射大,日照时数小时太阳日总辐射小。当日照时数为零时,则天空状态为阴或雨,太阳日总辐射以天空散射辐射为主,此时日照时数与太阳日总辐射之间无相关,仅用日照时数无法反演太阳日总辐射的大小。而当日照时数大于零时,表示天空状态为晴、多云,此时日照时数与太阳日总辐射呈正相关(见图 1),相关系数为 0.784($p<0.01$),用日照时数可以反演太阳日总辐射的大小。

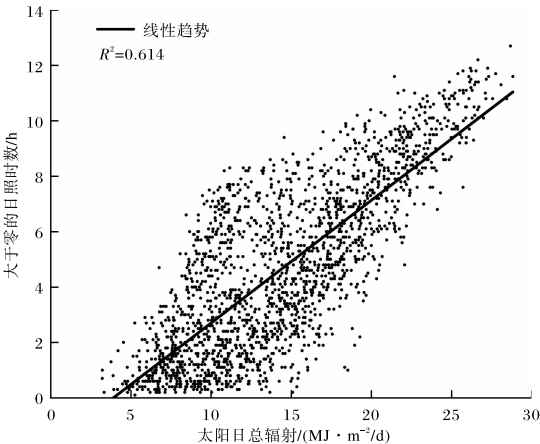


图1 成都2005—2014年>0 h的日照时数与太阳日总辐射散点图

太阳日总辐射与气温日较差呈正相关,两者的相关系数为 0.778,通过 0.01 显著性检验(见

图 2)。当气温日较差大时,太阳日总辐射大;当气温日较差小时,太阳日总辐射小。用气温日较差也可反演太阳日总辐射的大小。

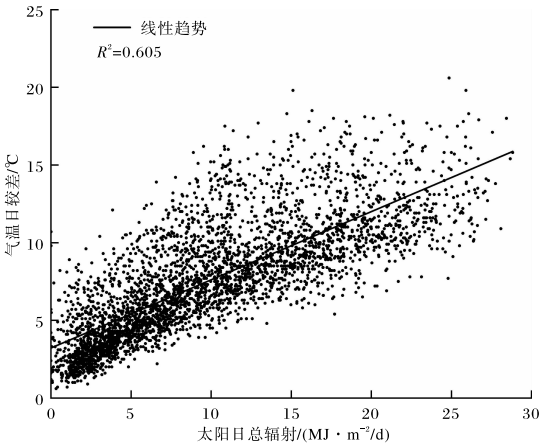


图2 成都2005—2014年太阳日总辐射与气温日较差散点图

3 模型效果检验

3.1 全序列太阳日总辐射估算效果

对 2015—2022 年成都全序列太阳日总辐射模拟效果进行检验,其结果见表 1。太阳日总辐射的模拟值与实测值的平均相关系数 0.95,平均绝对误差 1.61 MJ·m⁻²/d,平均相对误差 25.16%,均方根误差 2.21 MJ·m⁻²/d,归一化均方根误差 20.6%,模拟效果为可以接受。逐年模拟值与实测值的相关系数均在 0.90 以上,绝对误差 1.51~2.06 MJ·m⁻²/d,相对误差 19%~38%,均方根误差 1.68~2.48 MJ·m⁻²/d,归一化均方根误差 14%~28%。

表 1 2015—2022 年成都全序列太阳日总辐射模拟效果检验

年份	相关系数	$Y_{\text{MABE}}/(\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}/\text{d})$	$Y_{\text{MAPE}}/\%$	$Y_{\text{RMSE}}/(\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}/\text{d})$	$Y_{\text{NRMSE}}/\%$
2015	0.97	1.51	23.55	2.07	19.0
2016	0.94	1.59	23.77	2.48	23.4
2017	0.97	1.27	19.34	1.68	15.4
2018	0.95	1.47	21.72	1.96	17.2
2019	0.95	1.87	24.03	2.55	24.0
2020	0.94	1.85	30.15	2.45	24.1
2021	0.90	2.06	37.60	2.89	27.8
2022	0.98	1.25	21.09	1.59	14.1
平均	0.95	1.61	25.16	2.21	20.6

注: Y_{MABE} 、 Y_{MAPE} 、 Y_{RMSE} 、 Y_{NRMSE} 分别为平均绝对误差、平均相对误差、均方根误差、归一化均方根误差,下同。

3.2 有日照太阳日总辐射估算效果

对 2015—2022 年有日照太阳日总辐射模拟效果进行检验,其结果见表 2。有日照太阳日总辐射的模拟值与实测值的平均相关系数 0.94,平均绝对误差为 $1.71 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}/\text{d}$,平均相对误差 15.46%,均方根误差 $2.21 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}/\text{d}$,归一化

均方根误差 15.3%,模拟效果为好。除 2021 年外,逐年模拟值与实测值的相关系数均在 0.90 以上,绝对误差 $1.2 \sim 2.4 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}/\text{d}$,相对误差 9%~32%,均方根误差 $1.50 \sim 3.05 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}/\text{d}$,归一化均方根误差 10%~25%。

表 2 2015—2022 年成都有日照太阳日总辐射模拟效果检验

年份	样本数/个	相关系数	$Y_{\text{MABE}}/(\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}/\text{d})$	$Y_{\text{MAPE}}/\%$	$Y_{\text{RMSE}}/(\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}/\text{d})$	$Y_{\text{NRMSE}}/\%$
2015	211	0.96	1.69	11.55	2.18	14.2
2016	196	0.97	1.24	9.27	1.58	10.9
2017	210	0.97	1.32	9.69	1.72	11.0
2018	232	0.95	1.56	10.80	2.04	13.1
2019	202	0.93	2.39	17.08	3.05	19.9
2020	213	0.93	2.05	23.65	2.58	18.7
2021	280	0.87	2.21	31.54	3.05	24.6
2022	248	0.97	1.22	10.12	1.50	10.3
平均	224	0.94	1.71	15.46	2.21	15.3

3.3 无日照太阳日总辐射估算效果

对 2015—2022 年成都无日照太阳日总辐射模拟效果进行检验,其结果见表 3。无日照太阳日总辐射的模拟值与实测值的平均相关系数 0.68,平均绝对误差为 $1.42 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}/\text{d}$,平均相对误差 41.12%,均方根误差 $2.06 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}/\text{d}$,

归一化均方根误差 44.7%,模拟效果为不好。除 2021 年外,逐年模拟值与实测值的相关系数均在 0.60 以上,绝对误差 $1.2 \sim 2.0 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}/\text{d}$,相对误差 31%~59%,均方根误差 $1.70 \sim 3.22 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}/\text{d}$,归一化均方根误差 36%~60%。

表 3 2015—2022 年成都无日照太阳日总辐射模拟效果检验

年份	样本数/个	相关系数	$Y_{\text{MABE}}/(\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}/\text{d})$	$Y_{\text{MAPE}}/\%$	$Y_{\text{RMSE}}/(\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}/\text{d})$	$Y_{\text{NRMSE}}/\%$
2015	154	0.67	1.27	40.30	1.79	42.2
2016	170	0.81	1.98	40.50	3.22	53.0
2017	155	0.72	1.18	32.50	1.64	35.7
2018	133	0.68	1.30	40.76	1.83	42.6
2019	163	0.71	1.21	32.68	1.71	36.1
2020	153	0.70	1.56	39.20	2.27	44.1
2021	85	0.47	1.57	58.27	2.29	59.6
2022	117	0.64	1.31	44.76	1.75	44.4
平均	141	0.68	1.42	41.12	2.06	44.7

无日照太阳日总辐射估算误差高于有日照太阳日总辐射,可能原因有以下几点。一是与日最

低气温出现时间有关。约 58%的样本日最低气温出现在日出前后,这部分样本数据日最高气温

与最低气温差能反映天空辐射情况,太阳辐射模拟效果为好;而约 42% 的样本日最低气温出现时间不在日出前后,这部分样本中包含了复杂天气冷空气团导致的最低气温,这时气温日较差不再与天空辐射条件紧密相关,继续使用日较差作为计算因子估算太阳日总辐射量会缺失关联机理,容易出现较大误差,影响估算效果。二是无日照时太阳日总辐射低。成都无日照太阳日总辐射量平均值为 $4.5 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}/\text{d}$,其中有 30% 的样本日总辐射量低于 $3 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}/\text{d}$,估算时较容易出现较大的相对误差。

4 结论与讨论

采用非线性拟合建立基于日照和气温日较差的太阳日总辐射模型对成都全序列、有日照、无日照太阳日总辐射进行估算。全序列太阳日总辐射模拟效果为可以接受,有日照太阳日总辐射估算效果为好,无日照太阳日总辐射估算效果为不好。全序列太阳日总辐射模拟值与实测值的平均相关系数 0.95,平均绝对误差 $1.61 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}/\text{d}$,平均相对误差 25.16%,均方根误差 $2.21 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}/\text{d}$,归一化均方根误差 20.6%。有日照样本太阳日总辐射模拟值与实测值平均相关系数 0.94,平均绝对误差为 $1.71 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}/\text{d}$,平均相对误差 15.46%,均方根误差 $2.21 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}/\text{d}$,归一化均方根误差 15.3%。无日照样本太阳日总辐射模拟值与实测值的平均相关系数 0.68,平均绝对误差为 $1.42 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}/\text{d}$,平均相对误差 41.12%,均方根误差 $2.06 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}/\text{d}$,归一化均方根误差 45%。基于日照和气温日较差的成都太阳日总辐射模型在有日照的太阳日总辐射估算效果中优于无日照的估算效果。

本文主要是对基于日照和气温日较差太阳日总辐射模型进行本地化订正,当无日照时太阳日总辐射模型的主要因子为气温日较差,因子单一,这也是导致无日照时模拟效果不好的原因。太阳日总辐射的模拟比较复杂,除了与天空状况、海拔、纬度有关外,还与气溶胶、 CO_2 等温室气体的保温效应等多方面因素有关。太阳辐射的模拟仍是复杂的科学问题,还需要在工作中增加其他观测方式及更加全面的资料来进一步分析。

致谢 感谢成都市温江区气象局、温江国家气候观象台贺南高级工程师对本文的修改与指导。

参考文献:

- [1] 汪凯,叶红,陈峰,等. 中国东南部太阳辐射变化特征、影响因素及其对区域气候的影响[J]. 生态环境学报,2010,19(5):1119-1124.
- [2] 曹金峰,李玉中,刘晓英,等. 四种参考作物蒸散量综合法的比较[J]. 中国农业气象,2015,36(4):428-436.
- [3] 李茂芬,李玉萍,郭澎涛,等. 逐日太阳总辐射估算方法研究进展[J]. 热带作物学报,2015,36(9):1726-1732.
- [4] ANGSTROM A. Solar and terrestrial radiation[J]. Quarterly Journal of Royal Meteorological Society, 1924,50(210):121-125.
- [5] BAHREL V, BAKHSH H, SRINIVASAN R. A correlation for estimation of global solar radiation[J]. Energy,1987,12(2):131-135.
- [6] HARGREAVES G H, SAMANI Z A. Estimating potential evapotranspiration[J]. Journal of the Irrigation and Drainage Division, 1982,108(3):225-230.
- [7] CHEN R, ERSI K, Yang J, et al. Validation of five global radiation models with measured daily data in China[J]. Energy Conversion and Management,2004,45(11/12):1759-1769.
- [8] 和清华,谢云. 我国太阳总辐射气候学计算方法研究[J]. 自然资源学报,2010,25(2):308-319.
- [9] 刘媛媛,胡琦,和骅芸,等. 中国不同时间尺度地表太阳总辐射估算研究[J]. 气候变化研究进展,2021,17(2):175-183.
- [10] 谭文,古书鸿,廖留峰,等. 贵州省分月太阳辐射参数模型计算[J]. 气象科技,2018,46(2):316-323.
- [11] 张佩,高苹,谢小萍,等. 不同日照情况下太阳日辐射估算方法研究:以江苏为例[J]. 中国生态农业学报(中英文),2022,30(2):314-324.
- [12] 蔡元刚,王明田,蔡怡亨,等. 利用地面气象资料建立四川省日总辐射计算模型[J]. 中国农业气象,2019,40(9):543-556.
- [13] 王卫东. 基于神经网络的西北地区太阳辐射模拟及时空特征分析[D]. 甘肃:西北师范大学,2014.

- [14] 成驰,陈正洪,张礼平. 神经网络模型在逐时太阳辐射预测中应用[J]. 太阳能,2012(3):30-33.
- [15] 毛洋洋,赵艳霞,张祎,等. 五个常见日太阳总辐射模型在华北地区的有效性验证及分析[J]. 中国农业气象,2016,37(5):520-530.
- [16] 申彦波,张顺谦,郭鹏,等. 四川省太阳能资源气候学计算[J]. 应用气象学报,2014,25(4):493-498.
- [17] 钟燕川,马振峰,徐金霞,等. 基于分布式模型方法和气候经验模型的四川省总辐射结果比较研究[J]. 高原山地气象研究,2017,37(3):58-63.
- [18] 王传辉,申彦波. 复杂地形下太阳总辐射空间订正方法:以四川省为例[J]. 气象,2021,47(6):746-754.
- [19] 陈乐,贺南,王明田,等. 成都市太阳辐射时间变化特征及对气候因子的影响[J]. 沙漠与绿洲气象,2023,17(6):154-160.
- [20] 陈中钰,吕结. 近 44 年四川太阳辐射时空变化特征[J]. 高原山地气象研究,2018,38(3):56-60.
- [21] 曹雯,申双和. 我国太阳日总辐射计算方法的研究[J]. 南京气象学院学报,2008,31(4):587-591.

《陕西气象》2024 年度优秀论文和好文章

优秀论文

陕西低槽强降水过程分析及客观订正方法 ……

刘嘉慧敏,戴昌明,胡启元,李培荣,李文耀

西北涡影响下陕西一次强降水天气成因分析 ……

…………… 彭 力,卢 晔,贺 瑶,倪 闻

1971—2020 年陕西渭北地区冰雹气候特征及

成因分析 ……

…………… 岳治国,田 显,王瑾,宋嘉尧,李 燕

西北干旱区夏季水汽收支特征及对气温异常的

响应…………… 刘菊菊,屈丽玮,井 宇,黄少妮

好文章

陕西飞机增雨作业航线优化技术研究 ……

王 瑾,薛卫东,左爱文,李 燕,郑绥翔,岳治国

气溶胶吸湿性及其对霾形成的影响研究进展 ……

…………… 贺晨昕,李星敏,董自鹏,彭 艳,宋晓雯

陕西秦巴山区西南涡暴雨特征 ……

…………… 郑 驰,刘元珺,王云鹏,张寒玮,李瑞清

激光雷达和微波辐射计温湿度廓线与探空数据

的对比分析 ……

…………… 白水成,狄慧鸽,袁 云,任丹阳,曹 梅

陕西黄土高原丘陵区苹果干旱天气指数保险

研究 …… 杨晓娟,孙靖博,刘 璐,刘晓迎,

吉文娟,刘 园,陈 迪,韩 锐,刘布春

渭南高温时空变化特征及其定量化评估 ……

…………… 马耀绒,韩蓓蓓,尹贞铃,许伟峰