

深盆地平原地区辐射通量演变特征及数值模拟研究

吴雯, 王超*, 肖天贵, 张力川

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

收稿日期: 2022年4月25日; 录用日期: 2022年5月23日; 发布日期: 2022年5月30日

摘要

本文选取典型深盆地平原地区2013~2014年气象站辐射通量数据分析其演变特征, 并结合数值模拟试验, 评估了WRF模式对该地区的模拟效果。结论表明: 1) 辐射四分量中, 向上短波辐射通量平均值为34.42 W/m², 向下短波辐射为211.57 W/m², 而向上长波辐射为403.03 W/m², 向下短波辐射为377.51 W/m²; 2) 中尺度数值模式WRF常用的三种陆面过程方案均可较好地模拟出各辐射通量的变化趋势, 但对辐射各分量的极值出现了高估现象, 通过对比分析, Thermal方案在该地区模拟效果较好。

关键词

深盆地平原, 变化特征, 辐射四分量, 数值模式

Evolution Characteristics of Radiation Fluxes and Numerical Simulation in Deep Basin Plains

Wen Wu, Chao Wang*, Tiangui Xiao, Lichuan Zhang

Sichuan Provincial Key Laboratory of Plateau Atmosphere and Environment, College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Science and Technology, Chengdu Sichuan

Received: Apr. 25th, 2022; accepted: May 23rd, 2022; published: May 30th, 2022

Abstract

In this paper, the evolution characteristics of the radiation flux data analysis of meteorological

*通讯作者。

stations in Chengdu from 2013 to 2014 are selected, and the simulation effect of WRF mode on the area is evaluated by combining numerical simulation experiments. The conclusion shows that: 1) the overall characteristics of each surface radiation flux are similar to the normal distribution, the average of the upward short-wave radiation flux is 34.42 W/m^2 , the average downward short-wave radiation flux is 211.57 W/m^2 , the average up-wave radiation flux is 403.03 W/m^2 , and the average downward short-wave radiation flux is 377.51 W/m^2 ; 2) The three land surface process schemes commonly used in the mesoscale numerical model WRF can better simulate the change trend of each radiation flux. However, the extremums of the various components of the radiation were overestimated, and through comparative analysis, the thermal scheme simulated the effect in the region.

Keywords

Deep Basin Plains, Variation Characteristics, Radiation Partition, Numerical Model

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

地球所接收到的太阳辐射能量虽然仅为太阳向宇宙空间放射的总辐射能量的二十二亿分之一，但却是地球大气运动的主要能量源泉，决定地球气候的基本特征[1]。地表辐射演变特征与其下垫面有关，而植物本身具有的低反照率的特性会对地气系统的辐射传输产生影响，我国作为农业大国，研究深盆地平原植被下垫面的辐射演变特征有重要意义。

近年来，许多学者针对例如青藏高原、干旱及半干旱沙漠地区、草地、湿地、农田等特殊下垫面情况下地表辐射演变及能量平衡特征进行了研究，武荣盛等[2]对比分析了青藏高原五个站点所处地区的辐射分量及地表反照率等物理量的特征，得到青藏高原不同地区晴天向下短波辐射均有明显的日变化和月际变化；王超等[3]分析了敦煌双墩子戈壁试验站的塔站净辐射的变化特征，得出敦煌地区净辐射日变化特征规律；陈玲等[4]研究了东莞城市下垫面，总结了地面太阳总辐射平均值呈现单峰值变化；大量的研究均表明[5]-[15]：不同下垫面类型的地表辐射变化特征差异显著，并且中尺度 WRF 模式对地表辐射特征有较好的模拟能力。相比其他典型下垫面，深盆地平原地区植被下垫面地表辐射特征以及模拟研究相对较少。深盆地平原位于四川盆地成都平原，该区域正好处于青藏高原东缘周边地带，具有高原和平原过渡带的特性，伴随地表性质改变，辐射平衡和能量传送过程存在很大差异。随着城市的不断发展建设，下垫面辐射能量收支演变特征是研究城市局地天气、气候的重要问题之一，因此研究深盆地平原地表辐射特征十分重要。本文选取成都市 2013~2014 年辐射通量数据分析其演变特征，结合数值模拟试验，评估 WRF 模式对该地区的模拟效果，为后续的理论、应用等科学研究提供参考依据。

2. 地表辐射演变特征研究

2.1. 地表辐射总体演变特征

本文所采用的数据来至 2013~2014 成都市温江国家基准气象站安装的辐射四分量仪，包括向下短波辐射、向上短波辐射、向下长波辐射、向上长波辐射的辐射通量数据，仪器安装高度 1.4 米，观测间隔 30 min，其下垫面为低矮植被，数据均为北京时间，短波辐射仅分析了 08~18 时(表征白天)的观测资料。

图 1 中图 1(a)、图 1(b)为 2013~2014 年地表向上、向下短波辐射通量总体分布特征。从图中可以发现，向上短波辐射集中 0~20 W/m²，约占全年的 56%，其平均值为 34.42 W/m²，最大值是 188.13 W/m²，发生在 2013 年 6 月 11 日 13 时；而向下短波辐射则集中在 0~200 W/m²，约占全年的 67%，其平均值 211.57 W/m²，最大值为 1077.11 W/m²，出现在 2014 年 8 月 23 日 12 时，两类短波辐射均成反比例函数右支分布特征。地表反照率是地表对入射的太阳辐射的反射通量与入射的太阳辐射通量的比值，决定了多少辐射能被下垫面所吸收，是最重要地表能量收入，通过计算，深盆地平原地表平均反照率为 0.17。

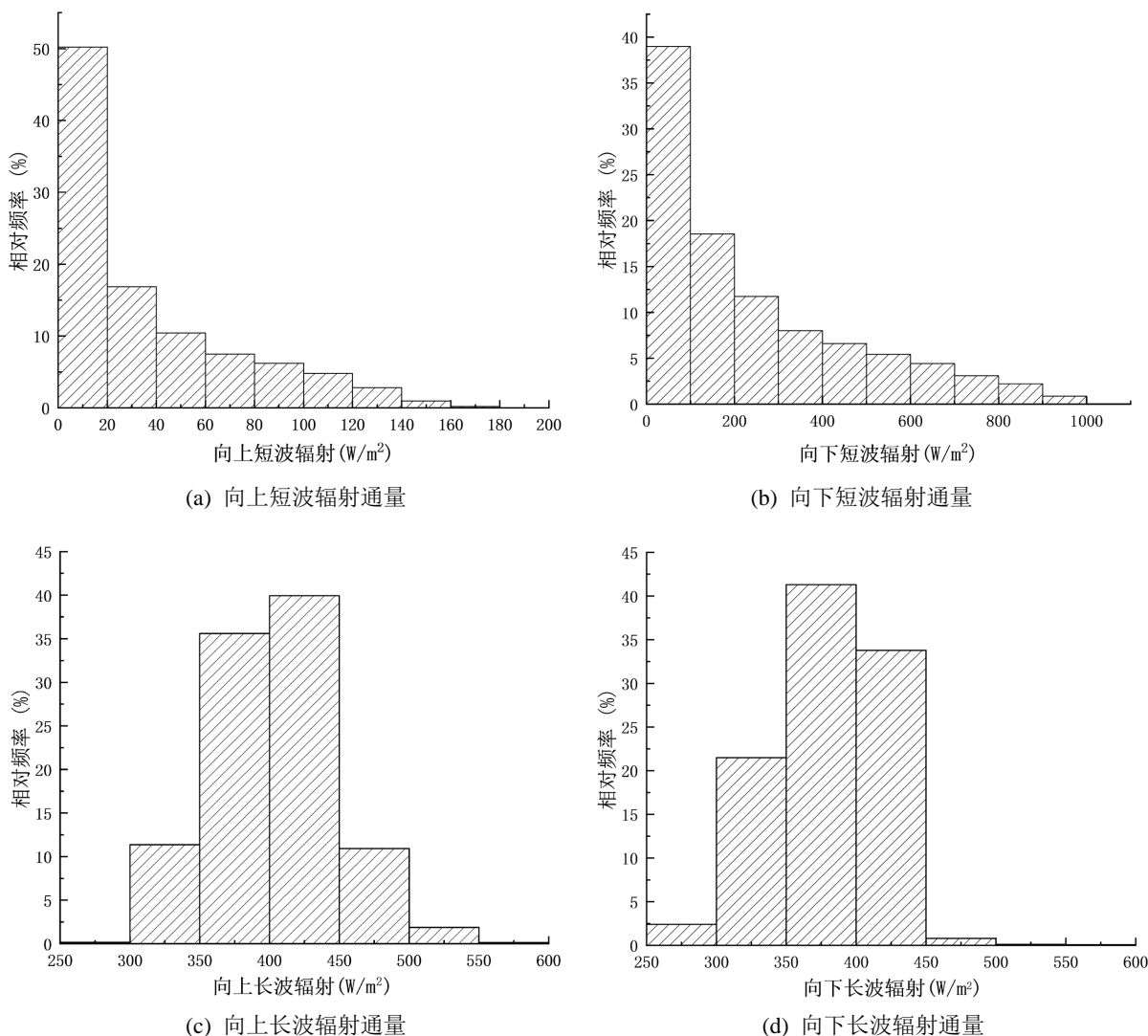


Figure 1. Characteristics of the overall distribution of each radiation ((a) upward shortwave, (b) downward shortwave, (c) upward longwave, (d) downward longwave)

图 1. 各辐射总体分布特征((a) 向上短波, (b) 向下短波, (c) 向上长波, (d) 向下长波)

图 1(c)、图 1(d)为地表向上、向下长波辐射通量总体分布特征。从图中可以看到，地表向上长波辐射集中在 350~450 W/m²这一区间，约占全年的 75%，其平均值 403.03 W/m²，最大值为 564.43 W/m²，发生在 2013 年 3 月 28 日 13 时，2013 年 1 月 1 日 8 时出现最小值 286.82 W/m²，而地表向下长波辐射集中于 300~450 W/m²，约占全年的 95%，其平均值 377.51 W/m²，最大值为 599.98 W/m²，最小值为 252.90 W/m²。

W/m^2 ，最大值出现在 2013 年 5 月 13 日 21 时，最小值出现在 2013 年 1 月 1 日 8 时。观测期间，两类长波辐射均呈正态分布特征，辐射分量统计参数详见表 1。

Table 1. Statistical parameter characteristics of short-wave and long-wave radiation fluxes

表 1. 短波、长波辐射通量的统计参数特征

辐射通量	平均值(W/m^2)	最大值(W/m^2)	标准差(W/m^2)
向上短波	34.42	188.13	37.58
向下短波	211.57	1077.11	233.33
向上长波	403.03	564.43	43.93
向下长波	377.51	599.98	38.47

2.2. 地表辐射年和季节演变特征

图 2(a)为向上、向下短波辐射的年变化特征。由图可以看到，向上短波辐射和向下短波辐射的年变化趋势基本相同，均呈近似单峰形式，两类辐射极小值均出现在 2 月，7 月最大。向上、向下短波辐射年变化特征图均在 6 月出现微弱下降，其原因为 6 月成都市多处于多云或降水天气，大气消光作用显著而导致。

图 2 中(b)分别为地表向上、向下长波辐射通量年变化特征。图中可得地表向上、向下长波辐射通量的年变化均为单峰的分布特征，但两类辐射极值出现的事件一致。其中，向上长波在 7 月达到最大值，为 451.36 W/m^2 ；向下长波辐射通达到最大值 424.04 W/m^2 ，两类最小值特征相同，在 1 月出现最小值，向上长波最小值为 345.27 W/m^2 ，向下长波最小值为 314.21 W/m^2 。分析可得，1、2 月，9~12 月均有向上长波辐射小于向下长波辐射，而在 3~9 月则为向上长波辐射大于向下长波辐射。

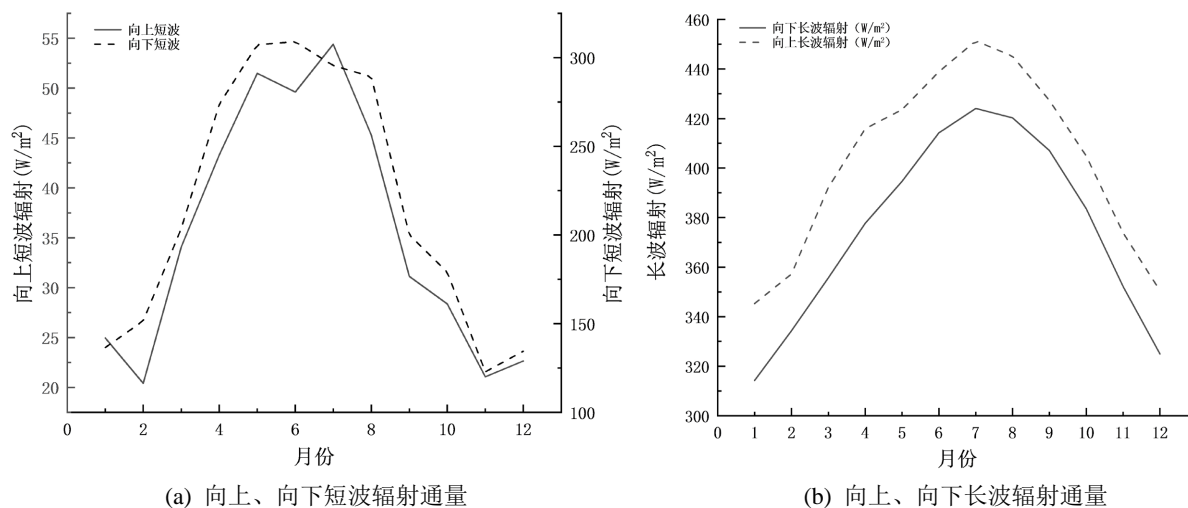


Figure 2. Characteristics of annual variation of radiation by radiation ((a) up, down short wave, (b) up, down long wave)

图 2. 各辐射年变化特征((a) 向上、向下短波, (b) 向上、向下长波)

表 2 为短波、长波辐射通量的季节变化平均值。四类辐射中，均为夏季最大，冬季最小，两类短波和向上长波辐射，其春季大于秋季，但在向下长波中，秋季大于春季。

Table 2. Seasonally varying averages of short-wave and long-wave radiation fluxes
表 2. 短波、长波辐射通量的季节变化平均值

	春(W/m ²)	夏(W/m ²)	秋(W/m ²)	冬(W/m ²)
向上短波	42.94	48.50	26.89	22.47
向下短波	261.38	295.19	167.60	141.40
向上长波	412.06	445.36	402.15	351.47
向下长波	375.08	419.95	381.07	325.33

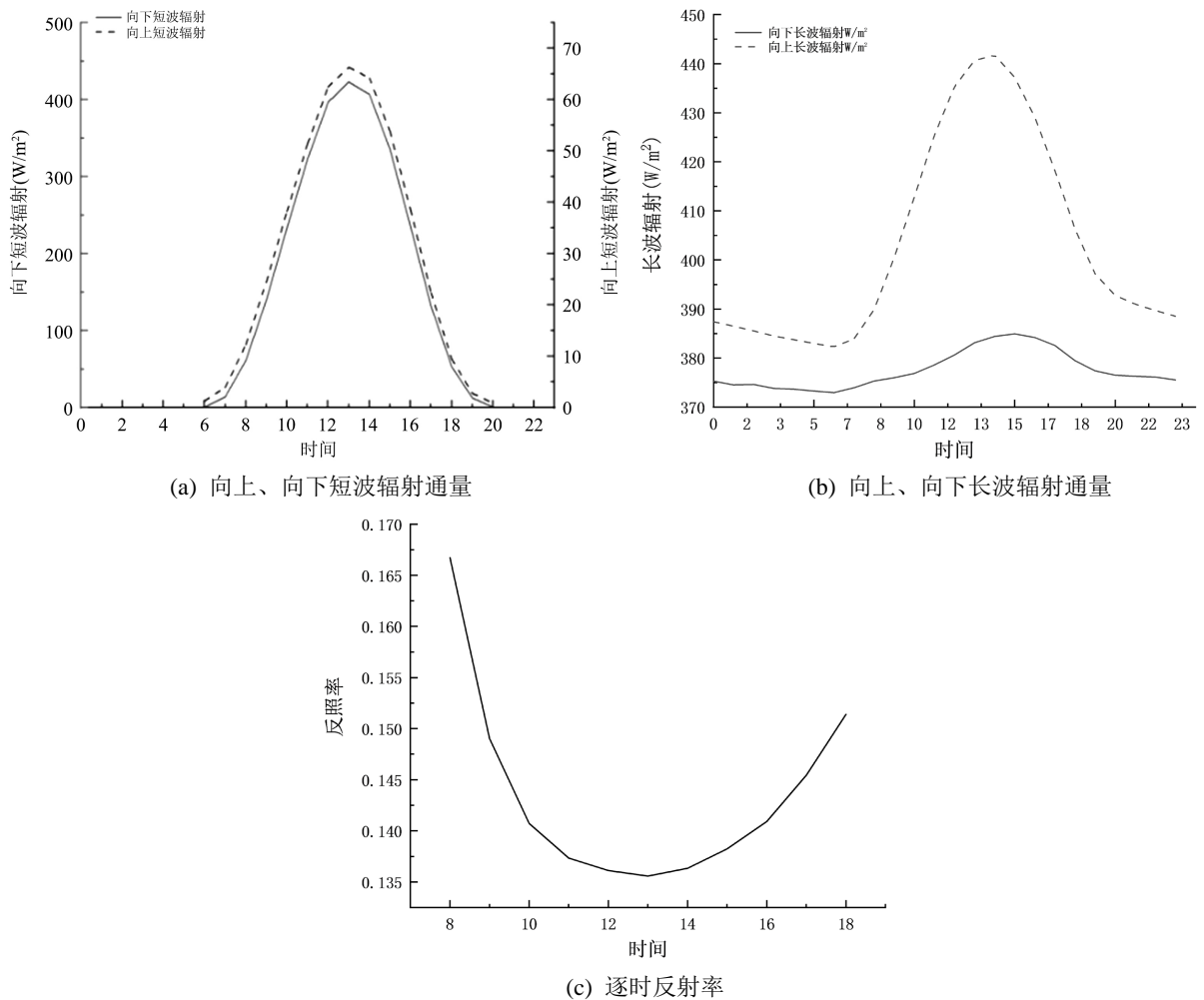


Figure 3. Characteristics of the daily variation of each radiation ((a) upward shortwave, (b) downward shortwave, (c) time-by-hour reflectivity)

图 3. 各辐射日变化特征((a) 向上短波, (b) 向下短波, (c) 逐时反射率)

2.3. 地表辐射日演变特征

从图 3 的地表各辐射分量的日变化特征, 图中可以看到两类短波辐射日变化趋势一致, 向下短波峰值为 422.98 W/m² 出现在 13 时, 向上短波 66.34 W/m²。两类长波辐射有滞后特征, 向上长波辐射通量日变化的峰值 441.74 W/m² 出现在 14 时, 向下长波辐射通量与向上辐射通量日变化范围不大, 但二者整体

都呈现日出后上升, 日落后下降的变化趋势。

图 3(c)中可以看到深盆地平原下垫面的特殊性使得 08~18 时的短波反射率基本处在 0.2 以下, 大部分短波辐射被吸收或透射, 仅少部分向上反射, 其短波反照率呈“U”型变化特征, 反照率与入射角度密切相关。

3. 地表辐射演变模拟研究

中尺度数值模式 WRF 能较好地模拟研究不同下垫面陆面过程特征, 在天气、气候和环境研究工作中有广泛应用[12], 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。模式为完全可压缩以及非静力框架, 水平方向采用荒川 C 网格点, 垂直方向采用地形跟随质量坐标, 时间积分采用高阶的 Runge-Kutta 算法[13]。

本文采用 WRF-4.12 版本对深盆地平原下垫面地表辐射进行模拟研究。模拟时段选取 2014 年 7 月 11~20 日典型夏季晴天, 该时间段无明显的降水过程。由于模式提供了众多的参数化方案的选择, 不同参数化方案又有不同的模拟效果, 特别是对于地面辐射过程影响显著的陆面方案的选择, 将直接影响到模拟效果, 因此本文选取三种常用的陆面过程方案(THERMAL、NOAH、CLM4)进行模拟比较, 利用相关系数 r 和均方根误差(RMSE, Root Mean Square Error)评估模式的模拟能力。

相关系数是研究变量之间线性相关程度的量, 一般用字母 r 表示。定义式为:

$$r(X, Y) = \frac{Cov(o, s_i)}{\sqrt{Var[o]Var[s_i]}} \quad (1)$$

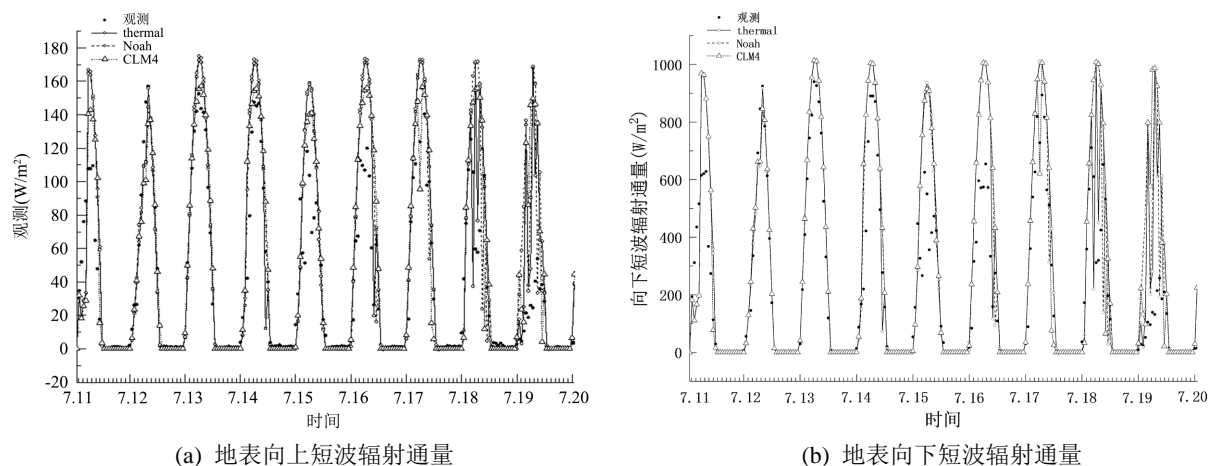
其中, $Cov(o, s_i)$ 为 o 与 s_i 的协方差, $Var[o]$ 为 o 的方差 $Var[s_i]$ 为 s_i 的方差。

均方根误差亦称标准误差, 是预测值与真实值偏差的平方与观测次数 n 比值的平方根; 其公式为:

$$rmse = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (o_i - s_i)^2} \quad (2)$$

其中, n 为测量次数; $(o_i - s_i)$ 为一组测量值与真值的偏差。

图 4 是成都市 2014 年 7 月 11 日~19 日三种参数化方案各辐射模拟的时间序列图, 通过计算, 除向下长波外, 其余各辐射三种方案的相关系数 r 均在 0.85 以上(见表 2), 表明所有方案模拟的趋势和观测资料大体一致, 4.12 版 WRF 模式对深盆地平原地表辐射的变化特征有一定的模拟能力; 由于向下长波辐射与天空云量状况密切相关, 可能模式在对该区域云量模拟效果欠佳, 导致模拟效果较差, 还有待进一步改进。



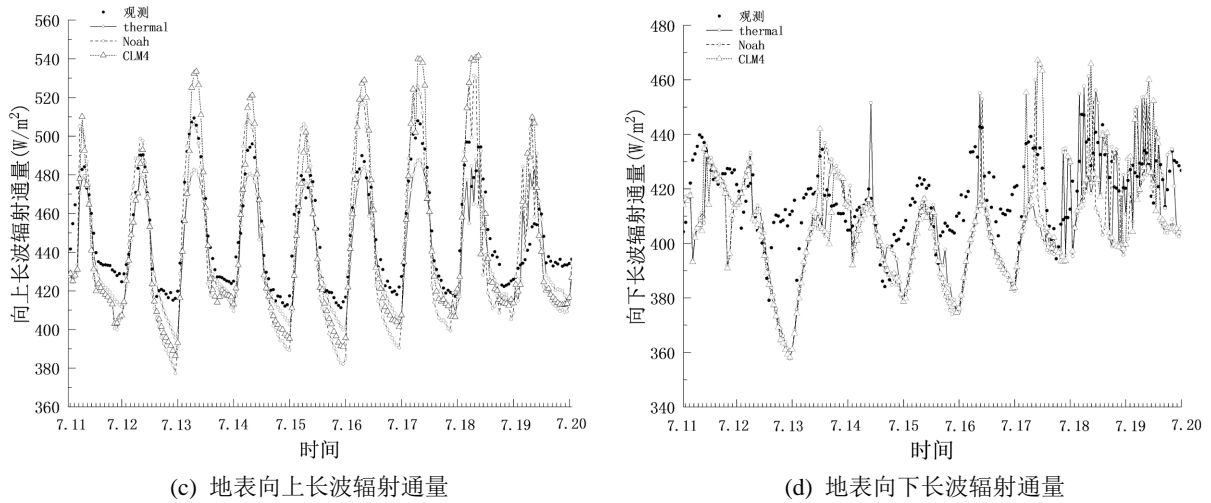


Figure 4. Time series of radiation simulations in Chengdu from July 11 to 20, 2014 ((a) upward shortwave, (b) downward shortwave, (c) upward longwave, (d) downward longwave)

图 4. 2014 年 7 月 11 日~20 日成都市各辐射模拟时间序列图((a) 向上短波, (b) 向下短波, (c) 向上长波, (d) 向下长波)

地表向上(图 4(a))、向下(图 4(b))短波辐射的三种参数化方案在白天的最大值均出现了高估现象, 其中地表向上短波辐射以 Noah 方案最为明显, 导致在 RMSE 的计算中, Noah 最大, 为 32.01 W/m², CLM4 其次; 分析地表向上(图 4(c))、向下(图 4(d))长波辐射时间序列图可以得出, 地表向上长波辐射在白天的最大值出现了高估现象, 以 Noah 方案最为明显, 计算 RMSE 时, Noah 最大, 为 21.40 W/m², CLM4 其次; 地表向下长波辐射白天的最大值则出现了低估现象, 也是 Noah 方案最为明显, 导致在 RMSE 的计算中, 为 21.07 W/m²。由表 3 分析, 对于深盆底平原地表辐射的模拟中, Thermal 方案效果较好, 可为深盆底平原其他缺乏辐射观测资料的地区提供数据支持。

Table 3. Schema evaluation parameters

表 3. 模式评估参数

气象要素	相关系数(r)			均方根误差(rmse)		
	Thermal	Noah	CLM4	Thermal	Noah	CLM4
向上短波	0.91	0.88	0.88	28.09	32.01	29.80
向下短波	0.91	0.88	0.88	28.19	32.13	29.61
向上长波	0.93	0.91	0.91	13.90	21.40	20.53
向下长波	0.49	0.42	0.50	19.45	21.02	20.72

4. 结论

本文利用成都市 2013~2014 年辐射通量数据分析其演变特征, 结合数值模拟试验, 得到以下主要结论:

- 1) 深盆底平原地区向上、下短波辐射分别为 34.42、211.57 W/m², 平均反照率为 0.17; 平原地区向上、下长波辐射分别为 403.03、377.51 W/m², 辐射各分量有着显著的季节和日变化特征。

2) 中尺度数值模式 WRF 能较好地模拟研究下垫面辐射特征, 三种陆面过程方案均可以较好地模拟出各辐射通量的变化趋势, 但均在对向上短波、向下短波、向上长波辐射最大值的模拟中, 出现了高估现象, 而对向下长波辐射的模拟则出现了低估现象, 通过分析得出, 该地区 Thermal 方案的模拟效果较好。

基金项目

四川省科技厅(2019YJ0360), 成都信息工程大学教改项目(JYJG2021033), 青藏高原综合科考项目(2019QZKK010408), 中国气象局创新发展专项(CXFZ2021Z010), 云南省重点研发计划项目(202103AC100028), 成都大运会项目(2020H467)。

参考文献

- [1] 盛裴轩. 大气物理学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2003: 90-92.
- [2] 武荣盛, 马耀明. 青藏高原不同地区辐射特征对比分析[J]. 高原气象, 2010, 29(2): 251-259.
- [3] 王超, 韦志刚, 李振朝, 等. 敦煌戈壁地区净辐射变化特征[J]. 干旱区研究, 2012, 29(2): 251-256.
- [4] 陈玲, 罗鹂, 袁志扬, 尹淑娴, 黄培光, 朱达洪, 夏冬. 东莞市辐射强度特征及影响因子[J]. 热带气象学报, 2014, 30(3): 585-593.
- [5] 马迪, 吕世华, 奥银焕, 赵林. 巴丹吉林沙漠不同下垫面辐射特征和地表能量收支分析[J]. 高原气象, 2012, 31(3): 615-621.
- [6] 王超, 韦志刚, 高晓清, 等. 夏季敦煌稀疏植被下垫面物质和能量交换的观测研究[J]. 高原气象, 2012, 31(3): 622-628.
- [7] 李英, 卢萍, 丁红英, 等. 成都平原农田下垫面地表通量特征及能量平衡分析[J]. 高原山地气象研究, 2013, 33(1): 35-40.
- [8] 王超, 韦志刚, 李振朝, 等. 西北干旱区戈壁下垫面陆面过程特征的模拟研究[J]. 太阳能学报, 2016, 37(9): 2422-2429.
- [9] 吴焕波, 石岚. 基于 WRF-SOLRA 数值模式的太阳总辐射预报性能分析[J]. 内蒙古大学学报(自然科学版), 2019, 50(2): 154-161.
- [10] 袁淑杰, 李钰春, 向乐, 张益炜. 起伏地形下四川省太阳直接辐射时空分布特征[J]. 干旱气象, 2016, 34(1): 23-28.
- [11] 刘雨轩, 赵欢, 安峡, 等. 成都东北部地区太阳辐射特征分析[J]. 中低纬山地气象, 2020, 44(2): 47-52.
- [12] 崔日鲜. 山东省太阳总辐射的时空变化特征分析[J]. 自然资源学报, 2014, 29(10): 1780-1791.
- [13] Skamarock, W.C., Klemp, J.B., Dudhia, J., et al. (2005) A Description of the Advanced Research WRF Version 3. *NCAR Technical*, **113**, 7-25.
- [14] 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.
- [15] Solomon, S., Qin, D., Manning, M., et al. (2007) Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Summary for Policymakers*, **18**, 95-123.