

文章编号: 2096-1618(2025)01-0094-06

成都双流航空港云底高度及地表太阳辐射特征分析

刘雨馨, 卢会国, 吴昊, 刘梦琪
(成都信息工程大学电子工程学院, 四川 成都 610225)

摘要:云底高度是重要的云宏观物理参数,地表太阳辐射占据全球辐射平衡的重要地位。云底高度与太阳辐射的定量化研究有利于加深对气象的理解,进而改进精细化城市气象预报;对成都地区云底高度及太阳辐射的综合观测还可以加强对该地区云情况的了解与太阳辐射资源利用。基于成都双流航空港地区2021年9月至2023年2月的地基观测数据,对云底高度与地表太阳辐射特征进行研究,结果表明:季节循环上,成都双流航空港地区夏季云底高度较高,秋冬较低且数值接近,该区域天空大部分时间被云覆盖,与附近其他地区云特征类似。由于云的遮盖,该地区太阳辐射数据整体较低,太阳总辐射在夏季较高,约为 540 W/m^2 ,秋冬较低,平均在 340 W/m^2 以下。四季太阳总辐射日变化趋势相近,均在12:00–14:00达到最高点且直接辐射均低于散射辐射。研究在评估和预测成都地区云特征及太阳辐射资源方面具有一定参考价值。

关键词:云底高度;成都;太阳辐射

中图分类号:P413.21

文献标志码:A

doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2025.01.014

0 引言

地球表面大约有50%的区域被云所覆盖。云,特别是中低云,通过透射、吸收和反射控制入射地球的太阳辐射,对到达地表的太阳辐射具有重要影响。云对辐射的作用是地球上各种天气和气候变化的重要因子之一,决定着辐射收支和温度变化等^[1-2]。

云对太阳辐射的影响取决于云的宏观(云量和云底高度等)和微观(云相态和云滴粒子大小等)物理特征^[3-4]。云特征及其辐射强度随时间和空间变化较大,且不同地区太阳辐射受云特征变化影响的程度不同^[5-6]。因此,要理解和量化云特征与太阳辐射资源之间的关系,需进行区域性综合评估工作。此外,了解和表示云特征参数对了解太阳辐射收支的区域性影响、准确模拟地球当前能量循环过程以及预测未来气候均具有重要意义^[7-8]。

成都地区位于四川盆地西部是整个四川盆地总云量的高值区,属温带季风气候,受地形影响,成都地区日照时间短、多云雾,阴天较多,天空亮度有限,云量及太阳辐射的测量难度大、误差大。成都地区目前仍然缺少基于地基仪器的云和太阳辐射的长期高精度区域性综合观测数据,导致高时间分辨率、定量化的云-太阳辐射研究难以展开。因此,本项目利用高时间分辨率的地基观测数据,对成都地区云底高度及地表太阳辐射特征进行定量化研究,在评估和预测当地云及太

阳辐射资源方面具有重要科学意义和应用价值。

1 数据和方法

1.1 仪器介绍

为研究云底高度与地表太阳辐射之间的关系,研究团队于成都信息工程大学航空港校区综合气象观测场布设观测仪器,进行短期观测。使用的数据及观测仪器信息如表1所示。

表1 项目所使用的观测仪器、用途及观测周期

仪器名称	用途	观测周期
Vaisala CL-51 激光云高仪	观测云底高度	2021年9月–
Hukseflux SR25 总辐射表	观测太阳总辐射	2023年2月
Hukseflux DR30-D1 日射强度计	观测太阳直接辐射	2019年7月–
Hukseflux SR25 总辐射表	观测太阳散射辐射	2021年7月

1.1.1 云底高度

云底高度是云底距离观测站地面的垂直距离,是气象预报的重要依据,其变化是分析天气系统未来演变的关键因素,也是保证航空安全的重要指标。使用芬兰Vaisala公司生产的CL-51型号激光云高仪,如图1所示。该仪器的是一款激光测距雷达,通过测量回波信号反演出后向散射系数,通过回波信号的时间测量距离。观测产品包括云层数量、云底云顶高度和后向散射系数廓线等,精度为 $\pm 1\%$ ($\pm 5\text{ m}$)左右(<https://www.vaisala.com/en/products/weather-environmental-sensors/ceilometers-CL31-CL51>)。



图 1 Vaisala CL-51 激光云高仪

1.1.2 地表太阳辐射

地表太阳辐射驱动地球上的大气、水、生物的发展变化以及各要素之间的相互联系,为生产和生活提供能量。太阳总辐射是地球表面某一观测点水平面上接收太阳的直射辐射与太阳散射辐射的总和,太阳直接辐射就是通过直线路径从太阳射来的光线,而散射辐射则是经过大气分子、水蒸气、灰尘等质点的反射,改变了方向的太阳辐射。研究使用的太阳总辐射(global horizontal irradiance, GHI)、太阳直接辐射(direct normal irradiance, DNI)和太阳散射辐射(diffuse horizontal irradiance, DHI)分别使用荷兰 Hukseflux 公司生产的 SR25、DR30-D1 和 SR25 型号辐射观测仪进行观测,其中散射辐射观测在总辐射观测仪的基础上配备遮光球,如图 2 所示。SR25 是一种高性能的总辐射表,设计用于测量水平面上的辐射通量,即直接辐射和上半球 2π 角弧度天空内向下的散射辐射之和。DR30-D1 安装在太阳追踪器上测量垂直入射到仪器孔径内的日盘发出的辐射^[9-10]。SR25 配备遮光球遮挡日盘以测量散射辐射。以上仪器均为符合 ISO 9060:2018 标准的太阳辐射观测仪器,灵敏度分别为 0.9%、1.2% 和 0.9% (<http://hukseflux.cn/zh-hans/products/taiyang-fushechuanganqi>)。



图 2 太阳辐射观测仪器

1.2 方法

1.2.1 地表太阳辐射质量控制

项目选用基准地表辐射观测网(baseline surface radiation network)推荐的质量评估方案,如表 2 所示^[11-13]。其中,可能极限值检验结果仅作为参考,不代表数据未通过质量检验。

表 2 基准地表辐射观测网质量控制方案 单位: W/m^2

方案	观测数据	下限	上限
物理可能 值检验	GHI	-4	$1.5 \times SC \times (\mu^{1.2}) + 100$
	DNI	-4	SC
	DHI	-4	$0.95 \times SC \times (\mu^{1.2}) + 50$
可能极限 值检验	GHI	-2	$1.2 \times SC \times (\mu^{1.2}) + 50$
	DNI	-2	$0.95 \times SC \times (\mu^{0.2}) + 10$
	DHI	-2	$0.75 \times SC \times (\mu^{1.2}) + 30$
比较检验	GHI/GHI _{sum} (SZA<75)	0.92	1.08
	GHI/GHI _{sum} (SZA>75)	0.85	1.15
GHI _{sum} = DHI+DNI $\times\mu$	DHI/GHI (SZA<75)	-	1.05
	DHI/GHI (SZA>75)	-	1.1

1.2.2 均值计算

本文采取推荐的方法进行云和辐射特征月均值的计算:使用分钟级数据计算每 15 min 的平均值,得到拥有 96 个区间的月均日变化($96 \times 15 \text{ min} = 24 \text{ h}$),月均日变化的平均值即为月均值^[14]。该方法可以减少不完整或误差数据的影响,同时避免因数据插值造成的误差。

2 结果与讨论

2.1 云底高度特征分析

图 3 描述了成都双流航空港不同云层的分布概率,其中 1~5 层云的概率分布分别为 82.36%、27.39%、7.00%、2.80%、0.07%,即观测期间 80% 以上时间有云。根据已有研究,西南地区总云量以四川盆地为中心常年存在高值区^[15]。此外,观测地以单层云或双层云为主,多层云则相对出现较少,与厦门和黄河流域内蒙古段等地区云层结构分布及出现概率接近^[16-17]。

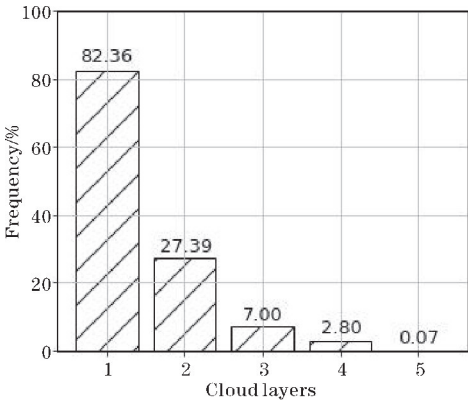


图 3 不同云层的出现频率

图4为第一层云底高度的季节及平均日变化。研究表明,4个季节第一层云底高度在13:00左右达到最低值,一天内的变化曲线接近V形。春、秋、冬3季的日最低云底高度较接近,约为110 m;而夏季日最低云底高度为180 m左右。在2:00左右第一层云底高度较高,夏季为400 m左右,春季约为250 m,秋、冬两季最低,均为150 m左右。成都双流航空港的云底高度呈现白天低、夜晚高、夏季较其他几个季节高的云底高度特征,与中国东部地区、秦岭地区及青藏高原的观测结果类似,但成都第一层云底高度值为其中最小^[18-20]。

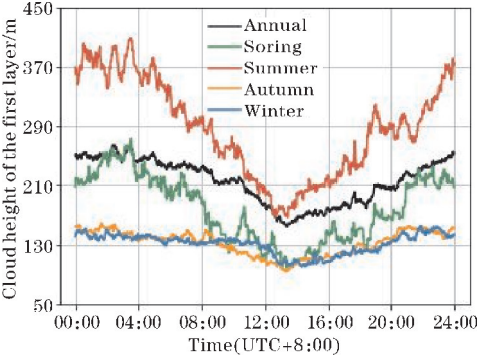


图4 云底高度日变化

夏季第一层云底高度呈明显日变化,变化范围在180~400 m。其次为春季,第一层云底高度的变化范围为110~270 m。秋、冬季第一层云底高度的日变化范围基本相同,为100~150 m,云底高度较低且波动较小。

研究总结了1~5层云在2021年8月至2023年2月的云底高度月变化曲线图,曲线为双峰型,如图5所示。

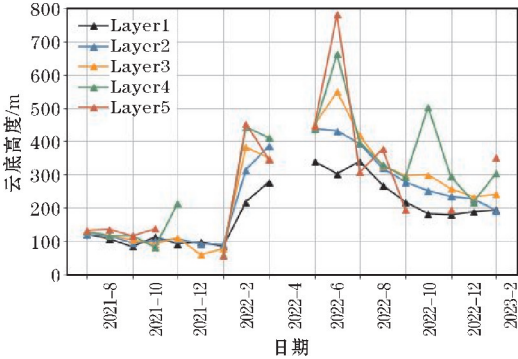


图5 不同云层云底高度月变化

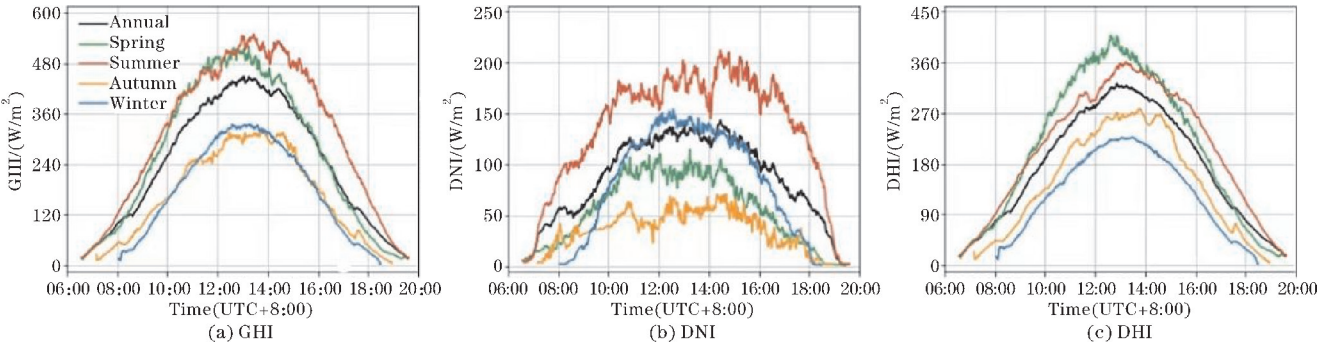


图6 GHI、DNI和DHI的年均及季节日变化

1~5层云底高度在2022年2月前较低,波动平缓,且云底高度相近,均在100 m左右。2022年2月后变化较明显,尤其在2022年3月及2022年7月升高最明显。2022年7月除第一层云外,其余云层云底高度均达到观测期间最大值,分别约为420 m、550 m、660 m、780 m。采样数据中,第四和第五层云底高度波动最明显。2022年7月后,5个云层云底高度月变化整体呈下降趋势,第四、五层云的云底高度偶有较大波动。

2.2 地表太阳辐射特征分析

图6为GHI、DNI和DHI三者的总体及季节日变化。GHI在夏季最高(图6a),且在12:00~14:00达到最高值约540 W/m²。13:00前,春、夏两季GHI曲线较接近;13:00后,夏季明显高于春季,差值可达到120 W/m²。秋、冬季变化范围接近,为0~340 W/m²,均低于四季均值。

DNI在夏季数据波动幅度较大(图6b),波动幅度可达0~210 W/m²,14:00~16:00达最高值210 W/m²。春、秋、冬3季基本都低于四季平均日变化,其中秋季平均日DNI最低,变化范围在0~70 W/m²;春季变化范围为0~120 W/m²;冬季变化范围为0~150 W/m²;4个季节的DNI相差不大,夏季和秋季在14:00~16:00达到最大差值,约为150 W/m²。

春、夏、秋、冬4个季节的DHI分别在0~400 W/m²、0~360 W/m²、0~270 W/m²和0~230 W/m²波动(图6c),其中,在12:00~14:00 DHI的四季以及四季均值均达到日最高值,春季最高,冬季最低。DHI有明显的季节变化,四季日变化曲线较分明。

整体而言,3组数据的季节日变化趋势大体一致;由于成都夏季晴天较多,GHI较高;秋冬两季云出现相对频繁,云层对太阳辐射的反射和散射较多,GHI较低。尽管秋冬季GHI变化范围接近,但根据秋冬季DNI和DHI的变化范围发现,秋季DNI较低,冬季DHI较低,说明秋季太阳被遮蔽程度较冬天更大。此外,4个季节DHI均高于DNI,即太阳未被遮蔽情况较少。

图7为观测期间每个月 GHI、DNI 和 DHI 日均值变化的箱线图。整体上看,GHI、DNI、DHI 数据波动趋势相同,均是秋冬(2019年9月、2019年11月、2020

年1月)出现极低值,夏季出现极高值,且夏季普遍高于秋冬两季。

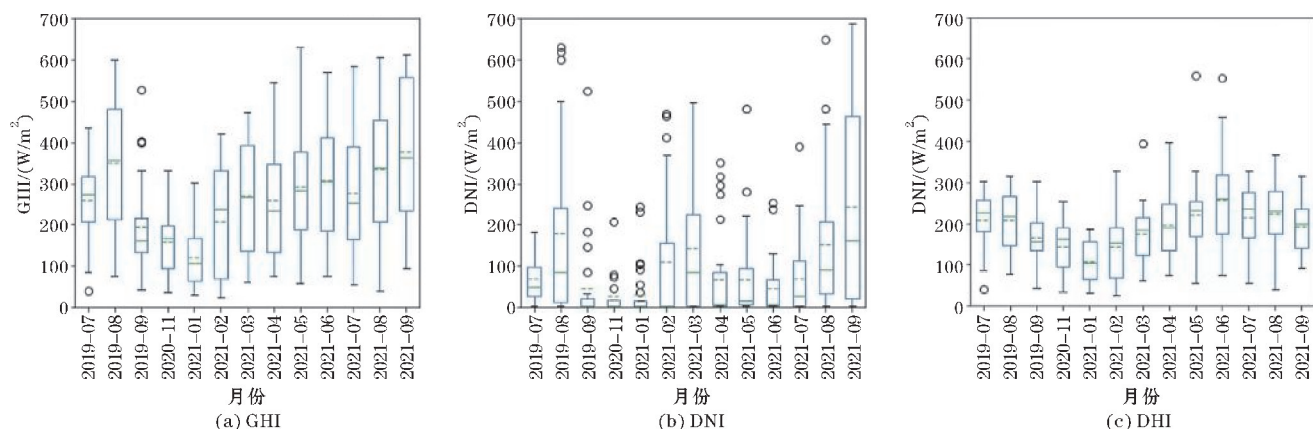


图7 GHI、DNI 和 DHI 日均值的月变化情况(绿色实线为平均值,绿色虚线为中位数,黑色圆圈为奇异值)

GHI 夏季日均值变化较大(图7a),最高出现在2021年5月,约为 650 W/m^2 ;秋冬(2019年9月、2019年11月、2020年1月)日均值变化较小,差值约为 300 W/m^2 ,4分位数间距较小,其原因可能是夏季较多晴天,云量较少且云高较高,GHI 测量数据相对较高;而秋、冬两季多是阴天,太阳多被云遮盖,GHI 相对较小。其余月份 GHI 日均值分布相对较分散并且差值较小,各月份极低值均分布在 $0 \sim 100 \text{ W/m}^2$ 。

根据已有研究,长江中下游以南区域、四川盆地以东区域、成都地区 GHI 较小,且夏季高,冬季低^[21-24],与本文研究结果吻合。显著小于邻近的青藏高原地区。

观测期间,DNI 平均值均小于 200 W/m^2 (图7b),大部分月份的 DNI 观测数值集中在 100 W/m^2 以下,远小于全国平均值,成都地区的 DNI 低于全国大部分地区^[25-26]。DHI 同月中日均值变化较小(图7c),数据分布较为密集,且月变化的日均值、中位数变化较小,大致分布在 $100 \sim 300 \text{ W/m}^2$,即不同月份日平均 DHI 差异较小。

由于观测条件限制,研究团队未能获取同时观测的云底高度及太阳辐射数据,无法就云底高度与太阳辐射之间的相互作用进行量化分析。但根据研究结果,比较图4、5和图7可知,夏季云底高度较高,不同层云云底高度差异较大,云结构较松散,GHI 较高;冬季云底高度较低,云层较厚,结构紧密,导致 GHI、DNI、DHI 的测量数值均较小。即云底高度与太阳辐射之间存在较明显的相关关系。后续随着仪器使用规范及数据的进一步积累,可开展更为深入的量化研究。

3 结束语

本文基于 Vaisala CL-51 激光云底高度仪采集的2021年9月至2023年2月云底高度数据及利用 Hukseflux SR25 总辐射表、Hukseflux DR30-D1 日射强度计以及 Hukseflux SR25 总辐射表测量的2019年7月至2021年7月地表太阳辐射数据,对成都双流航空港地区的云底高度及地表太阳辐射特征进行分析,得出结论:2021年9月至2023年2月成都双流航空港地区的云层结构以单层云为主,80%以上的时间有云,夏季不同云层的云底高度相对其他季节较高,且第一层云云底高度日变化较大;冬季不同云层的云底高度最低,第一层云云底高度变化较小。该地区全年 GHI、DNI 相较于中国其他地区低,DHI 较高。尽管秋冬季 GHI 变化范围接近,但秋季太阳被遮蔽程度较冬天大。总云量与总辐射之间在年及季节尺度上均有明显的相反趋势出现,成都地区冬季云量较高,GHI 较低,进而 DNI、DHI 也较低。

参考文献:

- [1] 王秀俊.云对太阳辐射的影响[J].科技风杂志社,2012(7):96-99.
- [2] Satoh M, Inoue T, Miura H. Evaluations of cloud properties of global and local cloud system resolving models using CALIPSO and CloudSat simulators[J]. Journal of Geophysical Research, D. Atmospheres: JGR, 2011, 116(D4): 1-18.

- [3] Mao Kebiao, Yuan Zijin, Zuo Zhiyuan. Changes in Global Cloud Cover Based on Remote Sensing Data from 2003 to 2012[J]. Chinese Geographical Science, 2019, 29(2): 306–315.
- [4] Van Tricht K, S Lhermitte, J Lenaerts, et al. Clouds enhance Greenland ice sheet meltwater runoff[J]. Nature Communications, 2016, 7(1): 10266.
- [5] Kim D, Ramanathan V. Solar radiation budget and radiative forcing due to aerosols and clouds[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2008, 113(D2).
- [6] Naud C, I Rangwala, M Xu, et al. A Satellite View of the Radiative Impact of Clouds on Surface Downward Fluxes in the Tibetan Plateau[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2015, 54(2): 479–493.
- [7] Solomon S, Qin D, Manning M, et al. Forster P, Ramaswamy V. Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing[M]. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge New York: Cambridge University Press, 2007.
- [8] Zhang Y, Zhou Q, Lv S, et al. Elucidating cloud vertical structures based on three-year Ka-band cloud radar observations from Beijing, China[J]. Atmospheric Research, 2019, 222: 88–99.
- [9] Stephens, G. Cloud Feedbacks in the Climate System: A Critical Review[J]. Journal of Climate, 2005, 18(2): 237–273.
- [10] Wild M, M Hakuba, D Folini, et al. The cloud-free global energy balance and inferred cloud radiative effects: an assessment based on direct observations and climate models[J]. Climate Dynamics, 2019, 52(7–8): 4787–4812.
- [11] Shi Y, Long C N. Preliminary Analysis of Surface Radiation Measurement Data Quality at the SGP Extended Facilities[C]. 13th ARM Science Team Meeting Proceedings, Broomfield, Colorado, Science Team Meeting Proceedings. Broomfield, Colorado, 2003.
- [12] Long C, Shi Y. An automated quality assessment and control algorithm for surface radiation measurements[J]. Open Atmospheric Science Journal, 2008, 2: 23–37.
- [13] Long C N, Dutton E G. BSRN Global Network Recommended QC tests, V2. 0 [EB/OL]. https://bsrn.awi.de/fileadmin/user_upload/bsrn.awi.de/Publications/BSRN_recommended_QC_tests_V2.pdf, 2023–11–18.
- [14] Roesch A, Wild M, Ohmura A, et al. Assessment of BSRN radiation records for the computation of monthly means[J]. Atmos. Meas. Tech, 2011, 4(2): 339–354.
- [15] 段皎, 刘煜. 近20年中国地区云量变化趋势[J]. 气象科技, 2001, 39(3): 280–288.
- [16] 蔡云萍, 罗昌荣, 陈赛, 等. 激光云高仪探测中国东南沿海云分布特征[J]. 气象, 2023, 49(2): 170–177.
- [17] 李慧, 郑旭程, 苏立娟, 等. 基于毫米波云雷达的黄河流域内蒙古段云宏观特征分析[J]. 干旱气象, 2023, 41(3): 434–441.
- [18] 唐钰寒. 中国东部地区云底高度研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2021.
- [19] 李金辉, 周毓荃, 岳治国, 等. 基于微波辐射计数据的秦岭南北水汽和云底高度等参量的差异[J]. 气象, 2022, 48(4): 452–458.
- [20] 徐文静, 吕达仁. 基于静止卫星探测的夏季青藏高原云分布及其日变化分析[J]. 气候与环境研究, 2023, 28(3): 229–241.
- [21] 赵文娜. 西藏羊八井地区地表太阳总辐射和长波辐射的时间变化特征分析[D]. 拉萨: 西藏大学, 2023.
- [22] 曹敏, 朱晓晨. 中国地表太阳总辐射空间化模拟及其时空特征分析[J]. 气象研究与应用, 2021, 42(2): 24–28.
- [23] 赵晓莉, 曹杨, 杜云松, 等. 成都太阳总辐射变化特征及对臭氧污染影响分析[C]. 中国环境科学学会. 第二十五届大气污染防治技术研讨会论文集. 2021: 6.
- [24] 范灵悦. 近几十年中国典型地区地表太阳辐射变化特征及其影响因素分析[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2023.
- [25] Luo Yunfeng, Lu Daren, Zhou Xiuji, et al. Analyses on the Spatial Distribution of Aerosol Optical Depth over China in Recent 30 Years[J]. Chi-

nese Journal of Atmospheric Sciences, 2002, 26 [26] 王秋艳. 东亚陆地辐射收支评估及其影响因子 (6): 721-730. 研究[D]. 南京:南京信息工程大学,2023.

Analysis of Cloud Basement Height and Surface Solar Radiation
Characteristics of Chengdu Shuangliu Airport

LIU Yuxin, LU Huiguo, WU Hao, LIU Mengqi

(College of Electronic Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

Abstract: Cloud basement height is an important macroscopic physical parameter of clouds, and surface solar radiation occupies an important position in the global radiation balance. The quantitative study of cloud basement height and solar radiation is conducive to deepening the understanding of meteorology, and then improving the refined urban weather forecasting. The comprehensive observation of cloud basement height and solar radiation in Chengdu can also strengthen the understanding of cloud conditions and the utilization of solar radiation resources in the Chengdu area. Based on the ground-based observation data from September 2021 to February 2023 in the Shuangliu Airport area of Chengdu, the cloud basement height and surface solar radiation characteristics were studied, and the results showed that the cloud basement height in the Shuangliu Airport area of Chengdu was higher in summer and lower and close in autumn and winter, and the sky in this area was covered by clouds most of the time, which was similar to the cloud characteristics of other nearby areas. Due to the cloud cover, the solar radiation data in the region are generally low, with the total solar radiation being higher in summer, about 540 W/m^2 , and lower in autumn and winter, with an average of less than 340 W/m^2 . The diurnal trend of total solar radiation in the four seasons was similar, reaching the highest point from 12:00 to 14:00, and the direct radiation was lower than the scattered radiation in all seasons. This study has a certain reference value in evaluating and predicting cloud characteristics and solar radiation resources in Chengdu.

Keywords: cloud basement height; Chengdu; solar radiation