

文章编号:0254-0096(2018)01-0095-06

基于 TSI 地基云图的云量反演方法研究

高晓清¹, 蒋俊霞^{1,2}, 汪宁渤³, 吕清泉³, 李振朝¹, 杨丽薇¹

(1. 中国科学院寒旱区陆面过程与气候变化重点实验室/中国科学院西北生态资源环境研究院, 兰州 730000;
2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 甘肃省电力公司风电技术中心, 兰州 730050)

摘要: 基于金昌地区全天空成像仪(TSI-880)观测资料,进行地基云图还原,并根据样本统计分析得到合理的红蓝比阈值(0.84)来区分云和晴空,构建批量云图还原与云量计算自动化系统。结合该地区光伏电站辐射观测站的太阳辐射资料,将系统计算的云量(修正云量)和TSI自行分析结果(原始云量)分别与太阳辐射资料进行对比。结果表明原始云量与太阳辐射衰减相关系数为0.3,修正云量与太阳辐射衰减相关系数为0.88,具有更好的相关性。这对于太阳辐射临近预报有重要意义。

关键词: 全天空成像仪; 太阳能; 太阳辐射; 图像处理; 图像还原

中图分类号: TK513.5

文献标识码: A

0 引言

云是一种常见的天气现象,是大气中热力过程和动力过程的表现,在地球水循环、地气系统能量平衡和辐射传输过程中有极其重要的作用。云也是影响太阳地面辐照度的主要气象因素,其生消和移动变化是地面辐照度变化不确定性的根本原因之一^[1]。由于云在大气科学中的重要性和观测的复杂性,在《地面气象观测规范》^[2]中将云作为特殊的天气现象单独观测。传统的人工观测云主要通过肉眼观测云的宏观特征,主观性强,时效性差。随着遥感技术的不断发展,出现了各种云的自动探测识别仪器,主要分为卫星遥感和地基遥感^[3]。

近年来,随着电荷耦合器件 CCD 等硬件技术的发展和计算机数字图像处理等软件技术的完善,推进了地基遥感测云系统的研制,如全天空成像仪 WSI、TSI,红外测云仪 ICI 等^[4]。全天空成像仪利用大气和云在可见光波段与近红外波段的成像性质不同,通过各个波段的遥感成像,来实现对大气云的观测与记录^[5]。应用较广泛的是由美国 Yankee Environmental Systems (YES)公司生产的 TSI (total sky imager)。TSI 是全自动彩色数字成像仪,

时空分辨率较高,能够实时自动拍摄和处理白天的半球天空图像(视张角为 160°),持续观测白天的云量,得到的云量结果较人工目测、卫星探测的结果更准确^[6]。

Pfister 等^[7]通过分析 TSI 得到的云量和地表辐射量变化时指出,该仪器在进行云量计算时,忽略了图像上的遮挡部分,并且在观测过程中,在太阳和近地平附近易出现误判。朱想等^[8]提出全天空地基云图复原算法,得到了全景无畸变地基云图,提高了地基云图的科学实用价值;丁宇宇等^[9]基于全天空成像仪观测资料推导出辐射衰减模型,并在南京市浦口区建立了水平面太阳总辐射预测方法;周文君等^[10]结合南京信息工程大学太湖观测站不同能见度下的全天空成像仪(TSI-440)观测资料,采用直方图统计的方法重新计算了云量,改进后的云量更接近人工目测结果。

本文对用 TSI-880 全天空成像仪观测到的金昌地区资料进行再处理,构建批量云图还原与云量计算自动化系统,并重新计算云量。同时结合该地区辐射站太阳辐射观测资料,将原始云量和修正云量分别与地面太阳辐射衰减值对比研究,对云量和地面太阳辐射的关系进行初步的定性分析。

收稿日期: 2016-12-22

基金项目: 国家自然科学基金(91437108); 国家电网公司科学技术项目(SCGSKY00FJJS1700304; kjpgw2017-005); 甘肃省青年科技基金计划(1606RJYA291)

通信作者: 高晓清(1966—), 男, 博士、研究员, 主要从事气候变化与气候资源方面的研究。xqgao@lzb.ac.cn

1 仪器及资料

本文所用仪器为美国 YES 公司生产的 TSI-880 型全天空成像仪,当太阳高度角大于 10° 时,能够反演出天空云的分布^[6]。其结构主要由摄像头、支架、带有加热装置的旋转半球镜面、镜面上的遮光带及镜面下方的存储传输设备组成。加热装置用于去除雨雪冰霜的影响;旋转镜面保持遮光带随着太阳方位角的变化移动,避免强烈的太阳直射损伤镜头。其工作原理是通过仪器上方的固态 CCD 相机垂直向下拍摄半球镜面,从而捕捉到天空在半球镜面上的成像。辐射站采用 TBQ-2 型总辐射表,该仪器能够准确地测量太阳总辐射能量,同时通过离线本地存储与在线实时传输至接收站存储 2 种模式,保证数据的及时性、完整性和可靠性。

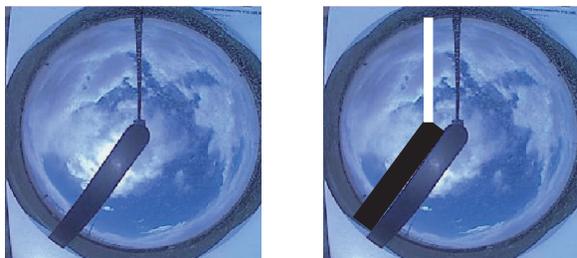
本文选取金昌地区(102.34°E 、 38.48°N 、海拔 1485 m)的全天空成像仪(TSI-880)观测资料,采样频率为 1 次/分钟。结合该地区辐射站资料分析云量和太阳辐射的相关性。

2 资料处理分析

2.1 地基云图还原

2.1.1 遮挡定位

图 1a 是 TSI 采集的 2015 年 5 月 7 日 14:00(本文所用时间均为北京时间)的原始地基云图,由于设备本身的特点,图像上有 2 部分不可避免的投影遮挡。第 1 部分是镜头支架及镜头保护装置在图像上的投影,该部分可以将其近似成矩形区域,根据云图成像中心定位出该区域,如图 1b 白色区域所示;第 2 部分是遮光带在图像上的投影,由于遮光带随太阳位置变化移动,可以根据图像拍摄时间和地点信息,由式(1)~式(6)得到太阳方位角^[11]。由



a. 原始图像

b. 投影定位

图 1 2015 年 5 月 7 日 14:00 金昌 TSI 地基云图

Fig. 1 TSI ground-based image of Jinchang area at 14:00 on May 7, 2015

于天空在地基云图上的投影是等角投影^[12],太阳方位角的大小就是图像上遮光带偏离正北方向的角度。根据图像成像中心和方位角可以确定出遮光带在图像上的投影,如图 1b 黑色区域所示。

$$\delta = 23.45^\circ \times \sin\left(360^\circ \times \frac{284+d}{365}\right) \quad (1)$$

$$\eta = 9.87 \times \sin\left(720^\circ \times \frac{d-81}{364}\right) - 7.53 \times \cos\left(360^\circ \times \frac{d-81}{364}\right) - 1.5 \times \sin\left(360^\circ \times \frac{d-81}{364}\right) \quad (2)$$

$$st = bt - 4 \times \frac{120-\lambda}{60} + \frac{\eta}{60} \quad (3)$$

$$\omega = 15^\circ \times (st - 12) \quad (4)$$

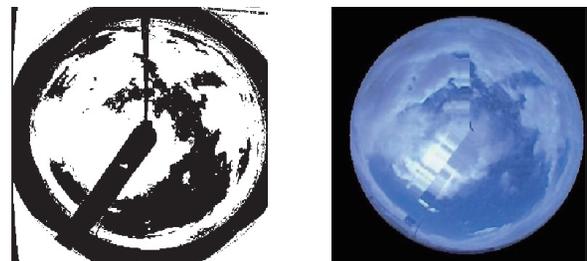
$$\cos \theta = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega \quad (5)$$

$$\cos \gamma = \frac{\sin \delta - \sin \varphi \cos \theta}{\cos \varphi \sin \theta} \quad (6)$$

式中, δ —— 赤纬角, ($^\circ$); d —— 年序日(1月1日为 1, 12月31日为 365); η —— 时差(地球绕太阳公转时运动和转速变化产生的时差), min; st —— 真太阳时; bt —— 北京时; λ —— 经度, ($^\circ$); φ —— 纬度, ($^\circ$); ω —— 时角, ($^\circ$); θ —— 太阳天顶角, ($^\circ$); γ —— 太阳方位角, ($^\circ$)。

2.1.2 遮挡恢复

根据文献[10]提出的云图复原算法,将原始图像进行二值化,如图 2a 所示。在二值化图像中搜索云团,根据连续两幅图像中云团质心的位置变化计算出云团移动的速度向量,将云团在短时间小区域内的运动视为刚体运动,预测下一时刻云团的位置,将当前时刻的遮挡部分像素填充到下一时刻的遮挡区域。最后利用霍夫变换进行边缘检测^[13],提取 160° 张视角范围内的像素点作为天空部分,如图 2b 所示。



a. 二值图像

b. 复原天空

图 2 2015 年 5 月 7 日 14:00 金昌 TSI 地基云图

Fig. 2 TSI ground-based image of Jinchang area at 14:00 on May 7, 2015

2.2 云量

2.2.1 云点识别

在晴空条件下,大气分子对蓝光波段的散射远远大于对红光波段的散射,所以晴天时人眼看到的天空呈蓝色。取金昌地区 2015 年 5 月 5 日 15:16 的 TSI 图像为例,该时刻为晴天,对应图像上的蓝色通道亮度值大,红色通道亮度值小,红蓝通道亮度比值(以下简称红蓝比)分布情况如图 3 中实线所示;而大气中云粒子、气溶胶等颗粒对蓝光波段和红光波段的散射大致相当^[14],所以有云的时候天空呈白色或灰色。取 2015 年 5 月 2 日 15:21 的 TSI 图像,该时刻为阴天,对应云图上的蓝色通道亮度值比晴空时小,红色通道亮度值大,红蓝比分布情况如图 3 中虚线所示。因此根据大气分子和云粒子不同的散射原理,提取图像中 R、G、B 3 个通

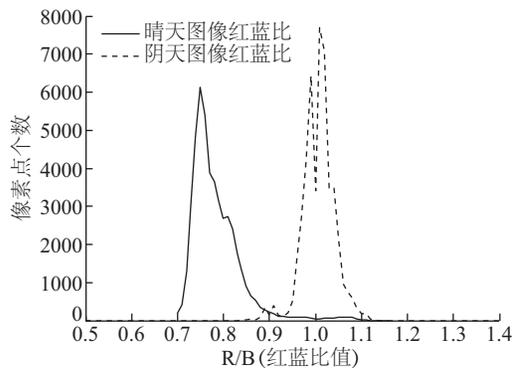


图3 晴天、阴天红蓝比值分布对比

(晴天:2015年5月5日15:16;阴天:2015年5月2日15:21)

Fig. 3 Comparison of the red blue ratio distribution of clear sky image at 15:16 on May 5, 2015 and overcast sky image at 15:21 on May 2, 2015

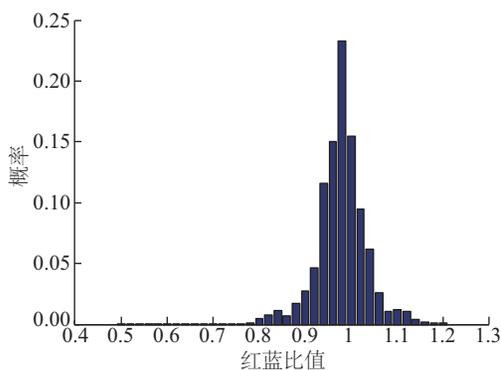


图4 阴天样本图像红蓝比平均概率分布

Fig. 4 The average probability distribution of red blue ratio of overcast sky images

道的亮度值,通过计算各像素点的红蓝比(R/B),设置合理的阈值来识别云图上的像素是否为云点^[14]。本文选取 300 幅阴天图像样本,利用上述图像复原方法进行处理,计算图像上每个像素点的红蓝比值,进行概率分布统计,得到所有像素点的平均概率分布情况,如图 4 所示,可以看出阴天云图的红蓝比集中在 0.84~1.12 间,峰值位于 0.98,因此文中采用 $R/B \leq 0.84$ 时,该像素点为晴空; $R/B \geq 0.84$ 时,该像素点为云点。

2.2.2 云量计算

在晴空及云量较少时,由于气溶胶和薄雾的向前散射,使得太阳圈和太阳圈附近地平区域的像素点看起来更白更亮^[6,7]。TSI 在进行图像处理时,将这些点作为云点处理,使得晴空及云量较少的情况下计算的云量有误差。

根据统计出来的红蓝比阈值,对太阳圈及近地平区域以外的天空像素点进行统计,对太阳圈(以太阳中心为圆心,半径为 80 像素点和近地平区域云点识别时采用 Long^[15]提出的云量改进方案,根据天空其他区域的云点比例及分布特征来估算太阳附近及近地平区域的云量^[15]。

将晴空像素数记为 N_{clear} ,云点像素数记为 N_{cloud} ,则云量为:

$$p_{\text{cloud}} = \frac{N_{\text{cloud}}}{N_{\text{clear}} + N_{\text{cloud}}} \quad (7)$$

2.3 资料分析

2.3.1 TSI 资料云量提取

利用程序提取全天空成像仪自带的 2015 年 5 月 5 日 07:00~19:00 每个时点的云量处理结果^[16],记为原始云量。

通过上述图像遮挡复原及云量计算方法对金昌地区 2015 年 5 月 5 日的 TSI 连续观测资料进行批量处理,得到云点和晴空像素点数,根据式(7)计算出 07:00~19:00 之间每分钟的云量结果,记为修正云量。

2.3.2 辐射衰减

由于金昌地区通常情况下大气中气溶胶含量较少且变化不大,研究时段不包含极端天气(沙尘暴、大风等),该情况下对太阳辐射影响最大的是云。所以本文将大气层上界接收的太阳辐射与近地面实测的太阳辐射的绝对差值定义为辐射衰减,

可较直观地表示出云对太阳辐射的衰减。

地球大气层上界接收的太阳辐射能随日地距离变化而变化,把日地平均距离处大气上界垂直于太阳光线的单位面积每秒钟接收的太阳辐射能定义为太阳常数^[17](文中取 1367 W/m^2)。由于不同时刻太阳处于不同的高度,对处于纬度 φ 和经度 λ 的观测点而言,大气上界水平面上某一时刻接收的太阳辐射能 S_0 可通过到达大气上界的太阳辐照度和太阳位置计算^[11]。

$$S_0 = S_c(1 + 0.033 \times \cos(\frac{360^\circ}{365} \times d))\cos \theta \quad (8)$$

式中, S_c —— 太阳常数。

利用式(8)可计算 2015 年 5 月 5 号金昌地区 07:00~19:00 不同时间大气层顶接收到的理论太阳辐射值。

近地面太阳辐射强度通过与 TSI 对应的辐射站实测数据来获取,每 5 分钟采集一次。取 2015 年 5 月 5 日 07:00~19:00 的实测数据进行四次多项式拟合,与大气层顶接收的理论辐射值进行对比,如图 5 所示。由于云的遮挡作用^[7],太阳辐射有明显的衰减。

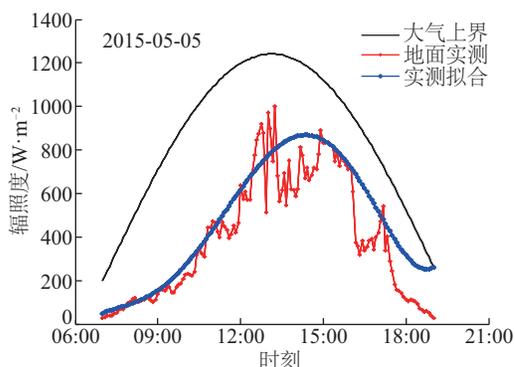


图5 大气层顶与近地面辐射对比

Fig. 5 Comparison of astronomical radiation and near-surface layer radiation

2.3.3 云量与辐射对比分析

将 TSI 原始云量和修正云量与太阳辐射衰减进行对比,分别如图 6 和图 7 所示。可看出,修正后的云量与太阳辐射衰减相关性较好,能较好地反映有云时太阳辐射的衰减。而 TSI 原始云量结果误差较大,这是因为 TSI 在不同地区和气候条件下,采用统一的阈值进行云点识别,且在进行云量计算时,忽略了遮光带、支架阴影区域、太阳圈和近地平区域部分。而图像亮度受大气能见度、气溶胶、沙尘

等影响较大,所以仪器原始云量在不同地区和天气状况下,很可能出现云量计算误差较大的情况。

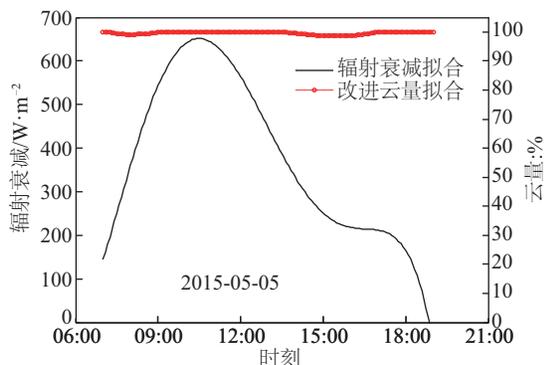


图6 原始云量与辐射衰减关系

Fig. 6 The relationship of original cloud cover and radiation attenuation

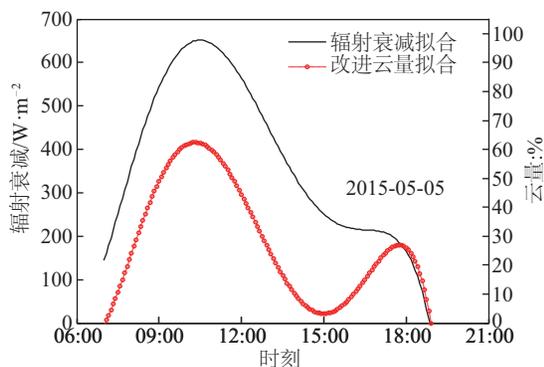


图7 修正云量与辐射衰减关系

Fig. 7 The relationship of corrected cloud cover and radiation attenuation

3 结论

由于全天空成像仪在计算云量时,忽略了遮光带、支架在镜面上的投影部分,并采用统一的阈值进行云点识别,而系统成像受大气气溶胶含量、能见度、镜面清洁程度等影响大,所以 TSI 处理的原始云量可能存在误差较大的情况。通过观察分析金昌地区 TSI 原始图像和自带云量识别结果,发现仪器原始云量存在较大的误差,将晴空误识别为云的情况较多。本文提出遮光带定位及还原算法,并针对金昌地区全天空成像仪资料进行分析,通过对 300 幅阴天图像红蓝比值进行直方图统计,并设置合理阈值,对复原后的图像进行云量计算。进一步基于云图还原算法和云量计算方法构建了批量云图还原与云量计算自动化系统。

将原始云量和修正云量与近地面接收的太阳辐射进行对比,结果表明原始云量与辐射衰减相关系数仅为 0.3,修正云量与辐射衰减相关系数提高到 0.88,相关性更好,并通过了信度为 0.01 的 t 检验。修正云量能更准确地反映该地区近地面接收的太阳辐射与大气层顶接收的太阳辐射衰减。

在地基云图复原过程中,未考虑图像的几何畸变,修正后的云量也存在一定的误差。由于资料有限,并未对晴空状态下太阳辐射衰减进行分析。TSI 云量计算方法的改进和不同天气状况下太阳辐射衰减以及不同类型的云对太阳辐射的影响是后续工作研究的重点。

[参考文献]

- [1] 林 晔. 大气探测学教程[M]. 北京: 气象出版社, 1993, 65—72.
- [1] Lin Ye. Atmospheric exploration[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1993, 65—72
- [2] 中国气象局. 地面气象观测规范[M]. 北京: 气象出版社, 2003.
- [2] China Meteorological Administration. Ground weather observation specifications [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2003.
- [3] 高太长, 刘 磊, 赵世军, 等. 全天空测云技术现状及发展[J]. 应用气象学报, 2010, 21(1): 100—109.
- [3] Gao Taichang, Liu Lei, Zhao Shijun, et al. The actuality and progress of whole sky cloud sounding techniques[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2010, 21(1): 100—109.
- [4] 秦 健, 刘 磊, 高太长, 等. 基于统计方法的地基器测云天识别[J]. 气象科学, 2011, 31(5): 604—612.
- [4] Qin Jian, Liu Lei, Gao Taichang, et al. Study on the recognition of whole-sky condition types based on the statistical method [J]. Journal of the Meteorological Sciences. 2011, 31(5): 604—612.
- [5] 陆雅君, 陈刚毅, 龚克坚, 等. 测云方法研究进展[J]. 气象科技, 2012, 40(5): 689—696.
- [5] Lu Yajun, Chen Gangyi, Gong Kejian, et al. Overview of researches on cloud sounding methods [J]. Meteorological Science and Technology, 2012, 40(5): 689—696.
- [6] Long C N, Slater D W, Tooman T. Total sky imager (TSI) model 880 status and testing results [R]. Atmospheric Radiation Measurement, 2001.
- [7] Pfister G, Mckenzie R L, Liley J B, et al. Cloud coverage based on all-sky imaging and its impact on surface solar irradiance [J]. Journal of Applied Meteorology, 2003, 42(10): 1421—1434.
- [8] 朱 想, 周 海, 丁 杰, 等. 全天空云图图像复原算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2014, 26(6): 896—902.
- [8] Zhu Xiang, Zhou Hai, Ding Jie, et al. All-sky cloud map image restoration algorithm research [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2014, 26(6): 896—902.
- [9] 丁宇宇, 丁 杰, 周 海, 等. 基于全天空成像仪的光伏电站水平面总辐射预报[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 50—55.
- [9] Ding Yuyu, Ding Jie, Zhou Hai, et al. Forecasting of global horizontal irradiance in photovoltaic power stations based on the total sky imager [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 50—55.
- [10] 周文君, 牛生杰, 许潇锋. 全天空成像仪云量计算方法的改进[J]. 大气科学学报, 2014, 37(3): 289—296.
- [10] Zhou Wenjun, Niu Shengjie, Xu Xiaofeng. Improvements of computational methods for cloud cover based on the total sky iamger [J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2014, 37(3): 289—296.
- [11] 程 序, 周 海, 王知嘉, 等. 晴空工况光伏超短期功率预报方法[J]. 可再生能源, 2011, 29(6): 142—145.
- [11] Cheng Xu, Zhou Hai, Wang Zhijia, et al. The method for ultra-short-term photovoltaic power prediction under clear sky condition [J]. Renewable Energy Resources, 2011, 29(6): 142—145.
- [12] 霍 娟, 吕达仁. 利用全天空可见光图像反演天空辐亮度[J]. 气象学报, 2010, 68(6): 800—807.
- [12] Huo Juan, Lyu Daren. A method to retrieve the radiance from all-sky visible images [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2010, 68(6): 800—807.
- [13] 冈萨雷斯. 数字图像处理(第2版)[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007.
- [13] Gonzales. Digital image processing (2nd Edition) [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2007.
- [14] Long C N, Sabburg J M, Calbo J, et al. Retrieving cloud characteristics from ground-based day time color all-sky images [J]. Atmos Ocean Technol, 2006, 23

- (5): 633—652.
- [15] Long C N. Correcting for circumsolar and near-horizon errors in sky cover retrievals from sky images [J]. *The Open Atmospheric Science Journal*, 2010, 4 (1): 45—52.
- [16] Morris V R. 2005. Total sky imager hand book[EB/OL]. <http://www.arm.gov/>, [2012-10-10]
- [17] 盛裴轩, 毛节泰, 李建国, 等. 大气物理学[M]. 北京: 气象出版社, 2006, 84—96.
- [17] Sheng Peixuan, Mao Jietai, Li Jianguo, et al. *Atmospheric physics* [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2006, 84—96.

STUDY ON THE RETRIEVAL METHOD OF CLOUD COVERAGE BASED ON TSI IMAGERS

Gao Xiaoqing¹, Jiang Junxia^{1,2}, Wang Ningbo³, Lyu Qingquan³, Li Zhenchao¹, Yang Liwei¹

(1. *Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, CAS/Key Laboratory of Land Process and Climate Change in Cold and Arid Regions, CAS, Lanzhou 730000, China;* 2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;* 3. *Wind Power Technology Center of Gansu Electric Power Company, Lanzhou 730050, China*)

Abstract: Based on the observational data of Total Sky Imager(TSI-880) in Jinchang area of Gansu province, China, the ground-based images were restored. According to the statistical analysis of the sample data, a reasonable red-blue ratio threshold (0.84) for identifying cloud was obtained and an automatic system for batch ground-based images restoration and cloud coverage calculation was constructed. Combined with the solar radiation data from the radiation observatory in Jinchang, a cluster of the corrected cloud coverage(CCC) was calculated by the system. And a cluster of the original cloud coverage (OCC) was also calculated by the built-in system of the TSI. These two clusters were compared respectively with the solar radiation attenuation. The correlation coefficient between OCC and atmospheric radiation attenuation is 0.3.) The correlation coefficient between CCC and atmospheric radiation attenuation is 0.88, which indicates that the cloud coverage obtained by the system CCC has a better correlation with atmospheric radiation attenuation than OCC. This is of practical importance for the solar radiation nowcasting.

Keywords: total sky imager(TSI); solar energy; solar radiation; image processing; image restoration