

# Estimated and Tested of Sunshine Percentage Based on Total Cloud Amount Form FY-2G

Pengxiang Chen<sup>1,2</sup>, Dongmei Peng<sup>3</sup>, Xu Zhang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Xinjiang Uygur Autonomous Region Climate Center, Urumqi Xinjiang

<sup>2</sup>Xinjiang Uygur Autonomous Region Government Investment Review Center, Urumqi Xinjiang

<sup>3</sup>Xinjiang Uygur Autonomous Region Agriculture Network Information Center, Urumqi Xinjiang

Email: cpx1860@163.com

Received: Aug. 23<sup>rd</sup>, 2018; accepted: Aug. 30<sup>th</sup>, 2018; published: Sep. 6<sup>th</sup>, 2018

---

## Abstract

The sunshine percentage was calculated using the theoretical model of the distributed exposure time considering the terrain factors and the sunshine hours observed by the meteorological station. After re-sampling the total cloud amount remote sensing image products by the second generation geostationary meteorological satellite (FY-2G) in China, the daily scale sunshine percentage estimation model was established based on remote sensing total cloud amount and observation station cloud amount (total cloud amount and low cloud amount) used the negative correlation between cloud cover and sunshine percentage. The spatial simulations are completed of the two interpolation methods IDW and Kriging in Xinjiang. Finally, simulation results are verified by the test station. The conclusions are as follows: 1) The spatial distribution of the four seasons in Xinjiang has obvious changes. The average seasons in the whole region are 1165 h in spring, 1286 h in summer, 964 h in autumn and 823 h in winter. 2) The resampling scheme based on remote sensing cloud cover takes into account the cloud movement. The correlation was improved after resampling between cloud cover and sunshine percentage, and the correlation coefficient was 0.756. 3) The correlation coefficient of sunshine percentage model based on Remote Sensing has obvious differences in the two seasons in winter and summer; the highest correlation was found in summer; the distribution patterns were similar in spring and autumn; the correlation coefficient was the lowest in winter and represented along the Tianshan Mountains in the northern Xinjiang. 4) The sunshine percentage accuracy of the RS integrated model is obviously better than that based on the observation station cloud cover model. The mean absolute error of the sunshine percentage was 14.8%. As that gives full play to the superiority of the continuous observation of satellites in space, the spatial distribution is more continuous. The post-verification method can be used for business applications in the sparsely stationed western region.

## Keywords

Xinjiang, Remote Sensing, Sunshine Time, Re-Sampling

---

# 基于FY-2G总云量的日照百分率估算及检验

陈鹏翔<sup>1,2</sup>, 彭冬梅<sup>3</sup>, 张旭<sup>1</sup>

<sup>1</sup>新疆维吾尔自治区气候中心, 新疆 乌鲁木齐

<sup>2</sup>新疆维吾尔自治区政府投资项目评审中心, 新疆 乌鲁木齐

<sup>3</sup>新疆维吾尔自治区兴农网信息中心, 新疆 乌鲁木齐

Email: cpx1860@163.com

收稿日期: 2018年8月23日; 录用日期: 2018年8月30日; 发布日期: 2018年9月6日

## 摘要

首先以考虑地形遮蔽的分布式日照时间理论模型结合气象站观测的日照时间计算了日照百分率, 然后对我国第二代静止气象卫星(FY-2G)的总云量遥感影像产品重采样后, 根据日照百分率和云量的负相关性, 分别建立了基于遥感总云量和观测站云量(总云量、低云量)的日尺度日照百分率估算模型, 并以气象站点分布稀疏的新疆区域为例, 对两种估算模型使用IDW和Kriging插值方法的模拟效果进行了检验, 得出以下结论: 1) 实际地形下新疆区域日照时间的空间分布受地形影响较大, 全区四季平均日照时间分别为: 春季1165 h, 夏季1286 h, 秋季964 h, 冬季823 h。2) 基于遥感云量的条带状重采样方案考虑了日照轨迹和云的区域移动变化, 重采样后的云量值与日照百分率的相关性有所提升, 相关系数为0.756。3) 建立的单站分季节遥感集成日照百分率模型相关系数冬夏差异明显, 夏季最高, 春秋次之, 且分布形态较为一致, 冬季最低, 低值主要集中在北疆沿天山一带。4) 从模拟的效果来看, 遥感集成日照百分率模型(平均绝对误差为14.8%)要明显优于基于观测站云量模型模拟的结果, 由于遥感集成日照百分率充分发挥了卫星在空间上连续观测的优势, 空间分布更为连续, 通过检验后的该方法可以在站点稀少的西部地区进行业务应用。

## 关键词

新疆, 遥感, 日照时间, 重采样

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

## 1. 引言

日照百分率是表征气候变化的主要气象要素之一[1], 同时也是影响太阳辐射的重要因子, 常常被用来构建地面太阳辐射推算模型[2] [3] [4] [5] [6]。气象站点观测的日照百分率资料可信度较高, 但没有连续性, 将气象站点观测值推算至整个区域时, 最常用的方法是基于气象要素的2维空间关系, 采用数学方法插值得到平面上格点的值, 如反距离加权、克里金、样条函数等, 平面插值方法没有考虑气象要素自身的分布特性, 估算结果无物理意义[7]。

近些年随着空间技术的发展, 卫星所提供的资料在空间和时间上弥补了地面观测的局限性, 越来越多的学者开始将卫星遥感数据应用于地面太阳辐射有关参量的反演[8] [9] [10]。有研究表明[11], 日照百分率和云量之间存在着良好的负相关关系, 卫星遥感器可连续观测到大范围区域的云覆盖状况, 可以克

服气象台站观测资料代表性不足的缺点, 因此引入卫星云量数字产品参与日照百分率的估算具有实际应用意义。目前, 国外主要卫星遥感云量资料有: NOAA 系列卫星云产品、国际卫星云气候计划 ISCCP 云产品、地球观测系统 EOS 系列卫星云产品等。国内外学者们对卫星和气象站总云量也进行过大量的比较研究[12] [13] [14]。其中搭载在 Terra 和 Aqua 卫星上的中等分辨率成像光谱仪(MODIS)具有多光谱通道和高空间分辨率的优点, 因此近几年常常被用于日照和辐射的模拟研究[15], Cao [16]和 Shi [17]等分别使用 MODIS 月、日云量观测数据建立了基于一元和多元回归的日照百分率模型, 取得了较好的模拟效果。

我国也有自主研发的风云卫星云产品, 对本国卫星数据质量进行检验和评估, 可以为数据进一步改进提供科学依据。风云二号气象卫星(FY-2)是我国自行研制的第一代地球静止轨道气象卫星, 与极地轨道气象卫星相辅相成, 构成我国气象卫星应用体系。王怀清等[7]建立了基于 FY-2C 云分类资料的日照百分率估算模型, 经过检验模拟效果好于站点插值的结果。FY-2G 是风云二号(03 批)卫星中的第二颗卫星, 也是目前风云系列中最新的静止卫星, 于 2014 年 12 月 31 日成功发射。FY-2G 每小时采样一次, 具有较高的时间分辨率, 可对大范围区域的云覆盖状况进行连续观测, 能够以时间尺度上的富余弥补空间尺度上的稀缺, 比较适合用来估算日照百分率。目前, 对于使用 FY-2G 云量资料来模拟日照百分率的研究鲜见报道, 因此本文拟使用 FY-2G 的总云量资料和地面云量观测资料分别构建日照百分率估算模型, 采用通用要素插值方法反距离加权法(IDW)和克里金法(Kriging)对模型系数和常数项进行空间插值, 完成日照百分率估算试验, 对比分析不同方法的估算结果。

## 2. 研究区概况及资料

### 2.1. 研究区概况

新疆地处亚欧大陆腹地, 位于我国西北部, 面积约占我国陆地面积的六分之一, 其四面被高山所环绕, 中部有天山横亘, 从而形成了“三山夹两盆”的特殊地貌格局。由于新疆远离海洋, 使得湿润的海洋气流难以进入, 形成了极端干燥的大陆性气候, 是世界典型干旱区之一, 同时, 新疆具有得天独厚的水土光热资源, 日照时间长、积温多、昼夜温差大、无霜期长, 年太阳能辐射量在全国范围内仅次于西藏, 具有丰富的太阳能光热资源[18]。但由于其地形复杂, 下垫面条件多样, 不同地区接收辐射条件相差悬殊, 进而影响整体气候的多样性和复杂性。因此, 对于了解区域内辐射空间分布特征, 合理开发利用区域太阳能资源而言, 日照百分率的计算是一项必要的基础性工作。

### 2.2. 资料来源

本文所用的地面观测资料包括新疆维吾尔自治区境内的 102 个气象站 2015 年 6 月 1 日-2016 年 5 月 31 日(以下称为全年)逐日日照时数的观测数据。其中 65 个气象站具有总云量、低云量的观测数据, 因此用于建立日照百分率估算模型, 剩余 37 个气象站作为检验站点。图 1 出示了新疆区域建模站点和检验站点的间分布。

FY-2G 静止卫星主要搭载扫描辐射计和空间环境监测器两个有效载荷, 其可见光红外自旋扫描辐射仪(VISSR)具有 5 个通道, 可以获取白天可见光云图、昼夜红外云图和水气分布图[19], 其总云量数据来自于国家卫星气象中心(NSMC)网站, 使用同期(2015 年 6 月 1 日~2016 年 5 月 31 日) FY-2G 逐小时总云量数据作为卫星遥感观测资料, 将 08 时至 20 时(北京时间)共 12 个时次的的数据平均后作为逐日可照时段内的总云量数据, 空间分辨率为  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 。

## 3. 研究思路及计算结果分析

### 3.1 研究思路

基于 FY-2G 总云量的日照百分率计算主要考虑三个方面: 复杂地形下的可照时间的计算、基于 FY-2G

总云量重采样方案的确定和日照百分率估算模型的建立。首先利用分布式天文可照时数理论模型，结合地形遮蔽的分析计算复杂地形下可照时间，气象站观测的日照时间与对应的地理可照时间的之比值就是该站点的实际日照百分率。然后对 FY-2G 总云量遥感数据进行重采样分析，确定最优重采样方案，最后利用云量与日照百分率之间良好的负相关关系，使用 FY-2G 总云量遥感数据建立估算模型得到日照百分率栅格数据。图 2 给出了计算流程示意图。

### 3.2. 可照时间的计算及分析

日照百分率是台站观测到的日照时间与相应时段可照时间的比值，“可照时间”定义有两种，即天文可照时间和地理可照时间，前者是指不考虑大气影响和地形遮蔽的最大可能日照时间，后者是指考虑地形遮蔽而不考虑大气影响的可能日照时间，某地的天文可照时数可根据有关太阳轨迹方程精确计算得到[20]，地理可照时数也可通过天文可照时数减去地形遮蔽量精确计算得到[21]。本文计算的“可照时间”就是指“地理可照时间”。地理可照时间常常用在地形起伏较大的区域中应用。有研究证明新疆三大山区及高原地区可照时间受地形的影响较大[22] [23]，计算方法采用曾燕、邱新法等描述的分布式模型。其基本思想是任意一点 P 在一天中的任意时刻是否可照，主要由该时刻太阳光线投射方向上的地形对 P 点有无造成遮蔽而决定。当太阳高度角大于地形对 P 点造成的遮蔽角时，P 点可得到日照，反之，则被遮蔽，没有日照。图 3 为地理可照时间模型示意图。在本文的计算过程中基础数据为新疆区域 500 × 500 m 的 DEM 数据，在分布式模型基础参数的设定中，地形遮蔽半径取 20 km，时间步长为 10 min。使用程序计算得到了新疆区域全年每日可照时间的栅格数据集。

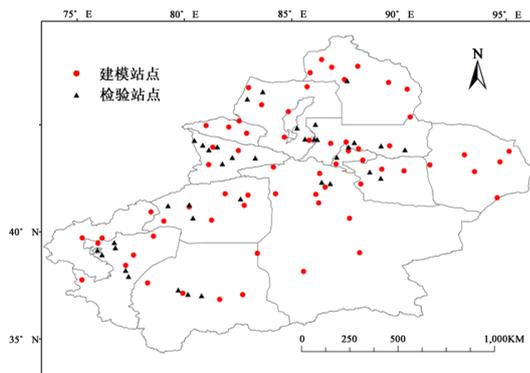


Figure 1. Distribution of meteorological stations in Xinjiang  
图 1. 新疆气象站点分布图

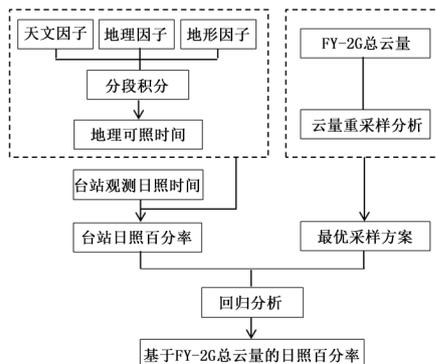


Figure 2. Calculation diagram of sunshine percentage based on total cloud amount of FY-2G  
图 2. 基于 FY-2G 总云量的日照百分率计算流程图

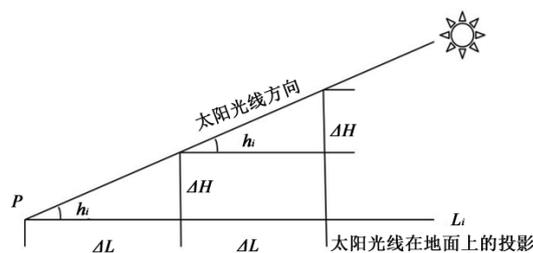


Figure 3. Diagram of sunshine duration model considering Terrain influence  
图3. 地理日照时间模型示意图

图4为新疆区域春季(3~5月)、夏季(6~8月)、秋季(9~11月)及冬季(12月、1~2月)日照时间的空间分布。实际地形下新疆各季日照时间的空间分布差异明显,具有明显的季节变化特征。全区四季日照时间平均分别为:春季1165h,夏季1286h,秋季964h,冬季823h,日照时间以夏季最长,春秋季节次之,冬季最短,区域内春秋两季变化差异较夏冬两季平缓,表现出四季分布的不对称性。从夏季和冬季的日照时间空间分布中可以看出有较为显著纬向分布特征,夏季日照时间表现出自北向南的递减,而冬季则表现出相反分布特点。无论哪一个季节,在三大山脉中由地形对日照时间造成的影响都非常明显。

### 3.3. 遥感云量重采样方案及分析

气象站观测到的总云量是指云遮蔽天空视野的成数,其物理意义是“视云量”,也就是云在观测者“视角”中占的比例,与卫星资料中的云量具有不同的物理意义。实际情况下,某一格点周围一定区域范围内的云都有可能对该格点的日照情况产生影响,因此,为了寻求影响日照的最佳云覆盖范围,通常使用重采样分析方法。常用的遥感重采样方法为窗口分析,以对应格点为中心,按东西和南北两个方向上等距的正方形区域为窗口进行采样。Shi等[17]提出了考虑日照轨迹的云量条带状取样试验方案,对云可能所经路径范围进行重采样,以求用到全且准的日照时段内的云量数据。本文通过对云量条带状重采样方案进行统计实验,来确定云对日照的影响区域。考虑到FY-2G总云量遥感数据的分辨率较粗,首先将其插值为 $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ 的分辨率,然后进行重采样,云量区域重采样试验方案为:分别考虑东西和南北两个方向上的平滑轨迹来选取范围,假设 $w$ 是东西向重采样的取值方案, $h$ 为南北向取值方案,递增单位是一个网格点分辨率(格点大小 $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ )。 $w$ 和 $h$ 起始都为1个格点距离,最大为10个格点,这样一幅FY-2G总云量影像将有100幅重采样影像。图5是格点重采样示意图。图中的粗线框内为1个格点 $\times$ 3个格点的采样范围(包含 $P(x, y)$ 点),此时 $h$ 取1个格点, $w$ 取3个格点,以此类推,对采样范围内格点求取均值,赋给 $P(x, y)$ 点作为 $P(x, y)$ 点的重采样值。

对于重采样后的云量数据,以全年FY-2G总云量与日照百分率相关系数的绝对值为指标来选取最优重采样方案。图6为全年3种网格采样方案下FY-2G总云量与日照百分率的线性相关变化, $h$ 代表采样方案中南北方向的网格递增数量, $w$ 代表采样方案中东西方向上的网格递增数量,从图中可以看出,随着采样方案中南北向网格的递增整体相关系数呈减小趋势,其中南北向递增1个网格的相关系数整体最大。3种采样方案的相关系数随着东西向网格的递增呈现出先增大后减小的趋势,均在网格递增量为3个时达到顶点,当采样方案中南北向网格递增量取1、东西向网格递增量取3时全年总云量与日照百分率的相关系数最大,为0.756,因此,选取气象站所在位置南北方向各递增1个像元,东西方向各递增3个像元共21个像元为采样区域,其算术平均值作为该点的总云量值。

### 3.4. 日照百分率估算模型建立及分析

根据日照百分率与云量之间较好的负相关关系,建立两种日照百分率估算模型,模型I为一元线性

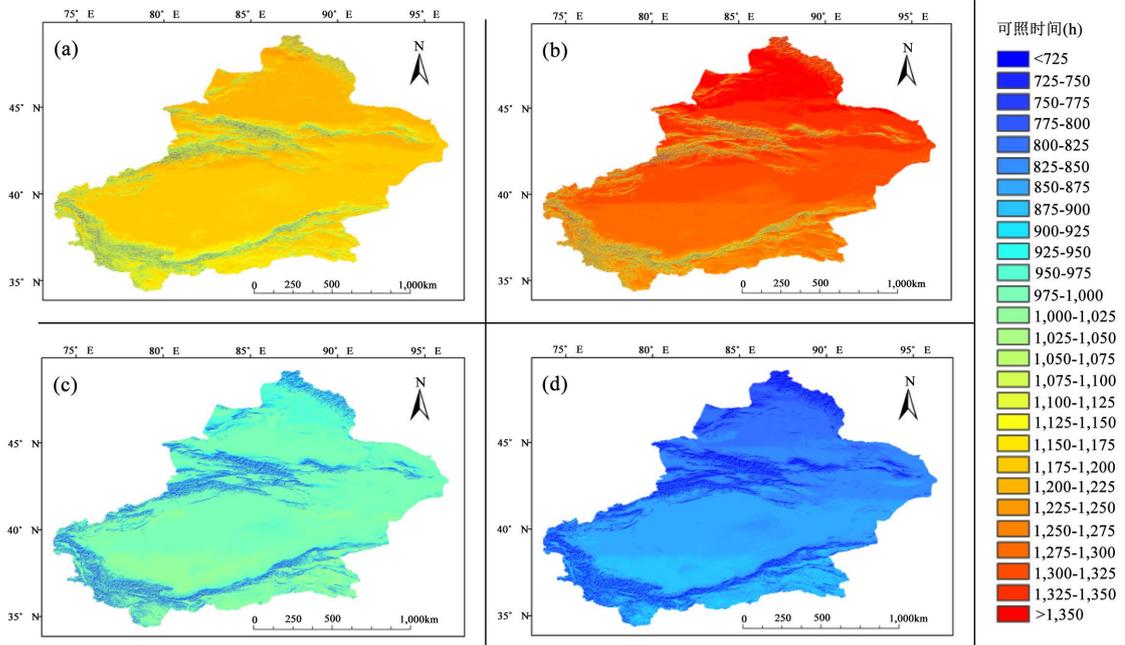


Figure 4. Spatial distribution of seasonal sunshine hours over Xinjiang (a: spring, b: summer, c: autumn, d: winter)  
 图 4. 新疆区域四季日照时间空间分布(a: 春季; b: 夏季; c: 秋季; d: 冬季)

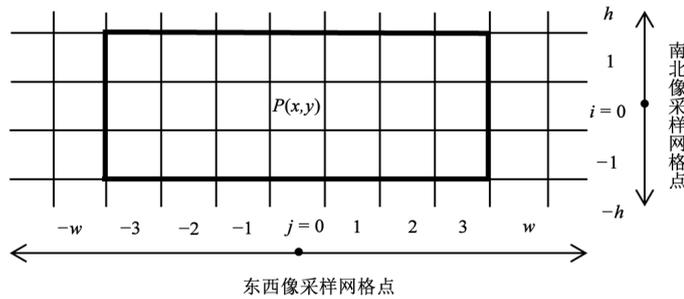


Figure 5. Diagram of grid resampling  
 图 5. 网格点重采样示意图

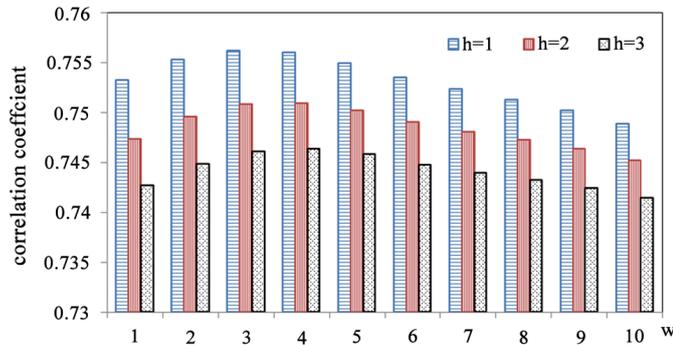


Figure 6. Changes of correlation coefficients for different resampling schemes  
 图 6. 不同采样方案的相关系数变化

回归模型，以使用重采样方案后的 FY-2G 日总云量数据作为日照百分率的影响因子，模型 II 为二元线性回归模型，以观测站的总云量和低云量同时作为影响日照百分率的因子。

有基于 MODIS 云量的研究指出[16], 虽然总云量与日照百分率具有良好的负相关性, 但相关性在不同的季节有明显的差异。所以, 本文在建模时采用单站分季节的模式来建立遥感集成日照百分率模型, 单站分月季节模式是将单个气象站, 同季节每日的遥感观测云量和日照百分率作为一个样本, 分别建立各气象站各季节日照百分率估算式(样本容量为每季节包含的日数)。图 7 是单站分季节回归模型的相关系数的空间分布, 整体来看, 相关系数在夏季最高, 春秋次之, 冬季最低; 从分布形态来看, 夏季全疆范围内的相关系数都较高, 单站相关系数都在 0.7 以上, 春秋季节的分布形态较为一致, 北疆相关系数整体要高于南疆, 模型相关较低的地方主要分布在南疆中部及阿克苏地区周边, 这可能与春秋季节天气系统过境引起的浮尘和扬沙, 从而对日照的影响有关, 冬季南疆的相关系数要高于北疆, 相关系数分布最低的地方主要集中在北疆沿天山一带。

#### 4. 模拟结果检验

按上述确定的最优重采样方案, 对全年每日的 FY-2G 总云量影像数据进行重采样, 利用建立的基于遥感云量的日照百分率模型, 完成全年每日的日照百分率的估算, 同时使用模型 II 完成基于观测站云量的日照百分率估算, 在计算过程中模型系数和常数项的插值方法分别采用 IDW 和 Kriging, 从空间分布和模拟误差两个方面来分析不同模型不同插值方案对日照百分率的模拟程度。

图 8 是使用不同插值方案下的遥感模型与观测站模型日照百分率空间分布对比图, (a)~(d)分别为 2015 年 7 月 15 日, 2015 年 10 月 15 日, 2016 年 1 月 15 日, 2016 年 4 月 15 日遥感集成的日照百分率空间分布, (e)~(h)为对应日期观测站云量模型计算的日照百分率空间分布, 1 为使用 IDW 插值方案, 2 是使用 Kriging 插值方案, 从图中可以看出, 不论使用何种插值方案使用遥感集成与观测站云量模拟的日照百分率在空间分布上吻合度都较高, 但是遥感集成日照百分率的空间分布更加连续, 结果更加客观。

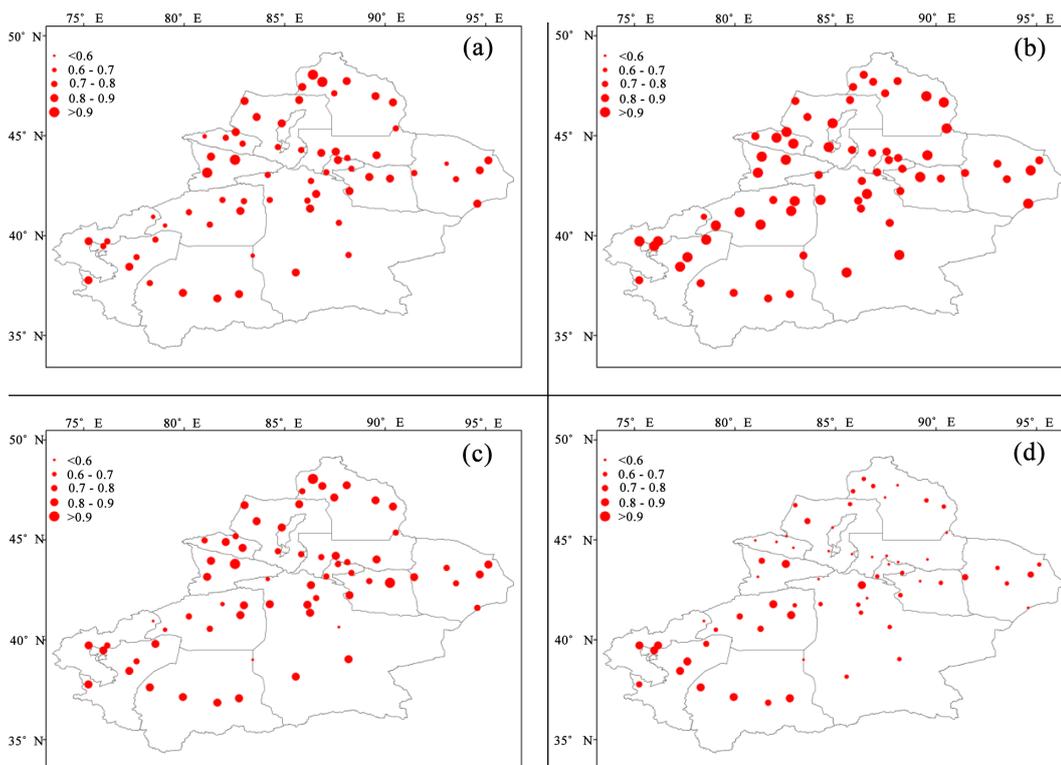
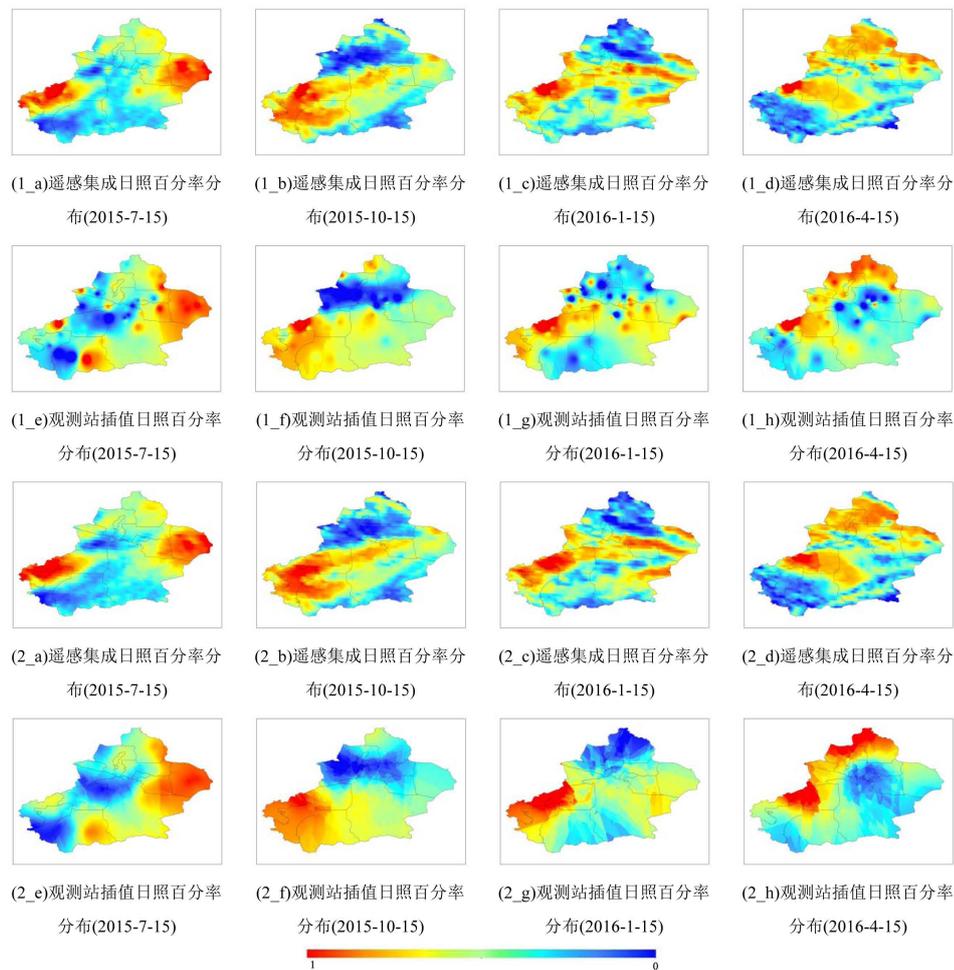
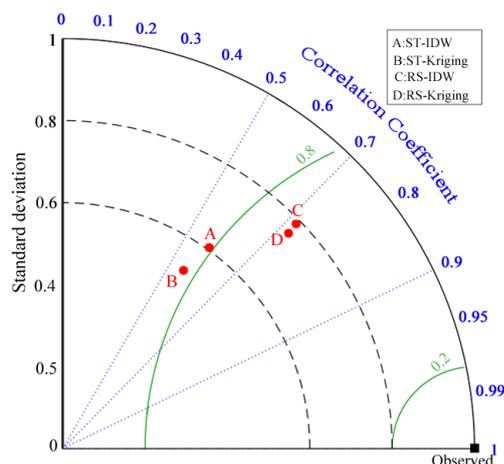


Figure 7. Correlation coefficient distribution of different season in models I (a: spring, b: summer, c: autumn, d: winter)  
图 7. 不同季节模型 I 的相关系数分布(a: 春季, b: 夏季, c: 秋季, d: 冬季)



**Figure 8.** Sunshine percentage spatial distribution contrast of remote sensing integration and observation station interpolation  
**图 8.** 遥感集成与观测站插值日照百分率空间分布对比

使用未参与模型运算的 37 个验证站点全年各月 15 日的日照百分率观测数据, 与两种模型计算的日照百分率数据进行检验。为了直观和全面地评估不同方法对日照百分率的模拟能力, 引入泰勒图分析方法, 它是由不同模型模拟的结果与实际观测的相关系数及其均方差比值(均方差比值是模拟和观测之间离散程度的比值, 1 代表与实际观测一致)组成的极坐标图。图 9 显示了使用不同插值方法的遥感云量集成模型和观测站云量模型模拟的日照百分率与实际观测场的泰勒图分布, 圆点代表不同方法模拟的结果, 距离原点(黑色实心方块)的越近, 表示模拟的效果越好(图中不同方法的表示: ST 代表基于观测站云量模型、RS 代表遥感云量模型、IDW 和 Kriging 代表不同插值方法)。从图中可以看出, 使用观测站云量模型模拟的结果相关系数都在 0.6 以下, 使用遥感云量模型模拟结果相关系数都超过了 0.7, 其中使用 Kriging 插值方案的相关系数最高, 达到了 0.72。从均方差之比(黑色虚线)来看, 使用遥感云量集成模型要比观测站云量模型更接近 1, 这说明使用遥感集成模型模拟的空间变率更加接近实际观测。对于标准化均方根误差来说, 使用观测站云量模型模拟的日照百分率与实际观测的均方根误差都在 0.8 以上, 而使用遥感云量模型的均方根误差减少至 0.7 左右, 说明基于遥感集成模型模拟的日照百分率要比基于观测站云量模型模拟的偏差幅度明显降低。对于不同的插值方法, 使用 IDW 和 Kriging 插值方案的遥感集成日照百分率模型的平均绝对误差为 15.1% 和 14.8%, 整体来说小于基于观测云量模拟的日照百分率(平均绝对误差分别为 19.09% 和 19.77%), 其中 Kriging 插值方案的结果要略优于 IDW 插值方案, 最后将本文计算结果



**Figure 9.** Taylor diagram of sunshine percentage between observations and four different simulation methods over Xinjiang. (On the Taylor diagram, angular axes show correlations between simulated and observed fields; radial axes show spatial standard deviation (root-mean-square deviation). Each dot represents a simulation methods, identified by its number on the right)  
**图 9.** 四种方法模拟的日照百分率与实际观测场的泰勒图分布。(弧度轴表示模拟场和观测场的相关系数, 黑色虚线表示均方差之比, 圆点到 observed 的距离(绿色实线)为模拟场与观测场的标准化均方根误差; 字母序号代表不同模拟方法, 见右上角)

与国内相关研究做了比对, Shi 等[17]将 MODIS 日云量数据与日照百分率建立一元线性模型, 使用中国区域气象加密站检验的绝对误差为 9.71%, 明显优于使用 FY-2G 总云量模拟的新疆区域日照百分率误差 (14.8%), 其主要原因可能与不同卫星的传感器质量、通道数量以及空间分辨率有关[24]。FY-2G 总云量产品的分辨率相对较低, 中高纬的区域反演误差在所难免。同时, FY-2G 总云量资料 2015 年 6 月至今才有两年的时间, 用于建模的资料十分有限, 相信随着今后遥感资料的延长及云量重采样方案的优化模拟效果会有所改善。根据当前的研究显示使用 FY-2G 总云量遥感资料对日照百分率进行模拟已经具有一定的稳定性, 本文的主旨在于对我国自主研发的 FY-2G 卫星的总云量资料的检验和应用, 以期为今后其他学者研究提供借鉴。

## 5. 结论

本文首先计算了考虑地形遮蔽的气象站日照百分率, 同时引入 FY-2G 的总云量遥感影像产品, 对遥感总云量数据在一定范围内重采样后, 根据云量和日照百分率的负相关性, 分别建立了基于 FY-2G 总云量和观测站总云量、低云量的日尺度日照百分率模型, 并使用 IDW 和 Kriging 两种插值方法完成新疆区域全年各月 15 日的日照百分率空间模拟, 得出以下结论:

1) 实际地形下新疆四季日照时间的空间分布差异明显, 具有明显的季节变化特征。全区四季日照时间平均分别为: 春季 1165 h, 夏季 1286 h, 秋季 964 h, 冬季 823 h。冬、夏两季的日照时间空间分布有较为显著纬向分布特征。三大山脉中由地形对日照时间造成的影响全年都非常明显。

2) 基于遥感云量的条带状重采样方案考虑了日照轨迹和云的区域移动变化, 通过实验得出的最优重采样方案为选取气象站所在位置南北方向各递增 1 个像元, 东西方向各递增 3 个像元, 共 21 个像元的算术平均值作为该点的总云量, 与日照百分率的相关系数为 0.756。

3) 本文建立的单站分季节的遥感集成日照百分率模型相关系数在夏季最高, 单站相关系数均在 0.8 以上; 春秋次之, 北疆相关系数整体要高于南疆, 且分布形态较为一致, 相关较低的地方主要在南疆中部及阿克苏地区周边; 冬季最低, 南疆的相关系数普遍高于北疆, 相关系数分布最低的地方主要集中在北疆沿天山一带。

4) 使用检验站点对估算结果的检验分析显示, 基于遥感集成模型的模拟结果与实际观测值的相关系数、均方差比值以及标准化均方根误差三个指标都要明显优于基于观测站云量的模型模拟的结果, 使用遥感集成日照百分率模型的平均绝对误差为 14.8%, 小于基于观测云量模拟的日照百分率(平均绝对误差分别为 19.09%), 其中 Kriging 插值方案的结果要略优于 IDW 插值方案。同时, 使用两种模型两种插值方案模拟的日照百分率空间分布都较为一致, 但是, 基于遥感集成的日照百分率模型充分发挥了卫星在空间上连续观测的优势, 克服了气象站点分布不规律的限制, 模拟结果更为客观, 该方法可以在站点稀少的西部地区进行业务应用。

## 基金项目

国家自然科学基金(41505101)。

## 参考文献

- [1] 丁一汇, 任国玉, 赵宗慈, 等. 中国气候变化的检测及预估[J]. 沙漠与绿洲气象(新疆气象), 2007, 1(1): 1-10.
- [2] Angstrom, A. (1924) Solar and Atmospheric Radiation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **20**, 6121-6126.
- [3] Prescott, J.A. (1940) Evaporation from a Water Surface in Relation to Solar Radiation. *Transactions of the Royal Society of South Australia*, **60**, 114-118.
- [4] 王炳忠, 张富国, 李立贤. 我国的太阳能资源及其计算[J]. 太阳能学报, 1980, 1(1): 5-13.
- [5] 祝昌汉. 再论总辐射的气候学计算方法(一) [J]. 南京气象学院学报, 1982, 5(1): 15-24.
- [6] 祝昌汉. 再论总辐射的气候学计算方法(二) [J]. 南京气象学院学报, 1982, 5(2): 196-206.
- [7] 王怀清, 李三妹. FY-2C 云分类资料估算日照百分率[J]. 遥感学报, 2013, 17(5): 1295-1310.
- [8] Hou, Y.Y., Wang, J.L., Mao, L.X., et al. (2009) Dynamic Estimation Models of Corn and Wheat Yields in USA Based on Remote Sensing Data. *Chinese Journal of Ecology*, **28**, 2142-2146.
- [9] 张兴赢, 张鹏, 方宗义, 等. 应用卫星遥感技术监测大气痕量气体的研究进展[J]. 气象, 2007, 33(7): 3-14.
- [10] 牛晓俊, 冯文兰, 王永前, 等. 复杂地形下光合有效辐射的遥感估算研究[J]. 高原气象, 2017, 36(4): 1029-1038.
- [11] 丁守国, 赵春生, 石广玉, 等. 近 20 年全球总云量变化趋势分析[J]. 应用气象学报, 2005, 16(5): 670-677.
- [12] Rossow, W.B., Walker, A.W. and Garder, L.C. (1993) Comparison of ISCCP and Other Cloud Amounts. *Journal of Climate*, **6**, 2394-2418.
- [13] 翁笃鸣, 韩爱梅. 我国卫星总云量与地面总云量分布的对比分析[J]. 应用气象学报, 1998, 9(1): 32-37.
- [14] 张旭, 崔彩霞, 毛炜峰, 等. 基于 MODIS 数据的云检测及其在新疆的应用[J]. 干旱区研究, 2011, 28(4): 705-709.
- [15] 王丽娟, 郭锐, 左洪超, 等. 基于 MODIS 产品估算黄土高原半干旱区的净辐射通量[J]. 高原气象, 2015, 34(5): 1270-1278.
- [16] Cao, Y. (2012) Correction Methods of MODIS Cloud Product Based on Ground Observation Data. *Journal of Remote Sensing*, **16**, 325-342.
- [17] Shi, G., Qiu, X., Zeng, Y., et al. (2013) Remote Sensing Integration Model of Sunshine Percentage Based on Cloud Cover Images. *Journal of Remote Sensing*, **17**, 1508-1517.
- [18] 刘佳, 何清, 刘蕊, 等. 新疆太阳辐射特征及其太阳能资源状况[J]. 干旱气象, 2008, 26(4): 61-66.
- [19] <http://www.nsmc.org.cn/NSMC/Channels/100096.html>
- [20] 左大康, 周允华, 朱志辉, 等. 地球表层辐射研究[M]. 北京: 科学出版社, 1991.
- [21] 王怀清, 殷剑敏, 占明锦, 等. 考虑地形遮蔽的日照时数精细化推算模型[J]. 中国农业气象, 2011, 32(2): 273-278.
- [22] 曾燕, 邱新法, 缪启龙, 等. 起伏地形下我国可照时间的空间分布[J]. 自然科学进展, 2003, 13(5): 545-548.
- [23] Zeng, Y., Qiu, X., Liu, C., et al. (2005) Distributed Modelling of Direct Solar Radiation of Rugged Terrain over the Yellow River Basin. *Acta Geographica Sinica*, **60**, 680-688.
- [24] Kotarba, A.Z. (2009) A Comparison of MODIS-Derived Cloud Amount with Visual Surface Observations. *Atmospheric Research*, **92**, 522-530. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2009.02.001>

**知网检索的两种方式：**

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2168-5711，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：[ccrl@hanspub.org](mailto:ccrl@hanspub.org)