

文章编号:2095-6134(2016)06-0769-06

# 晴天条件下基于 FY-2E 数据的地表短波净辐射的反演方法<sup>\*</sup>

王亚维,宋小宁<sup>†</sup>,王睿馨

(中国科学院大学资源与环境学院,北京 100049)  
(2016 年 2 月 24 日收稿;2016 年 4 月 22 日收修改稿)

Wang Y W, Song X N, Wang R X. Estimation of net surface shortwave radiation using FengYun-2E (FY-2E) data on cloud-free days[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2016, 33(6): 769-774.

**摘 要** 地表短波净辐射是辐射能量的重要组成部分.高时间、高空间分辨率的地表短波净辐射数据对长时间区域尺度气象变化和陆表水文循环等方面的研究具有重要意义.当前大多数遥感地表短波净辐射的研究基于极轨卫星观测数据,而利用高时间分辨率的静止卫星数据来反演多时相地表短波净辐射的研究则较少,更缺少日变化的地表短波净辐射产品.基于此,开展了基于中国静止气象卫星数据 FY-2E 的地表短波净辐射反演研究,并利用实测辐射观测数据对反演结果进行验证.结果表明:在晴天条件下,均方根误差(RMSE)为  $27.51\text{ W/m}^2$ ,决定系数( $R^2$ )为 0.99;在除去冬季的晴天条件下, $R^2$  为 0.99, RMSE 为  $15.36\text{ W/m}^2$ .该结果表明本文提出的地表短波净辐射反演方法具有较高的精度,适于长时间区域尺度气象变化等方面的研究.

**关键词** 地表短波净辐射;静止气象卫星;高时间分辨率

中图分类号:P407.4 文献标志码:A doi:10.7523/j.issn.2095-6134.2016.06.008

## Estimation of net surface shortwave radiation using FengYun-2E (FY-2E) data on cloud-free days

WANG Yawei, SONG Xiaoning, WANG Ruixin

(College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** Net surface shortwave radiation (NSSR) with high temporal and spatial resolutions is of great significance to studies of the Earth surface radiation budget, climate change, and some other relevant fields. However, most of the present investigations on the estimation of NSSR focus on the polar-orbit satellite observations which have only one or two images available for a given study area. This study primarily develops a method for obtaining NSSR by directly using the geostationary satellite data, and we provide multi-temporal NSSR estimates in regional scale using the Chinese operational geostationary meteorological satellite FengYun-2E (FY-2E) data. Results indicate a very

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(41271379)和中国科学院重点部署项目(KZZD-EW-13)资助  
<sup>†</sup> 通信作者, E-mail: songxn@ucas.ac.cn

significant correlation between our estimated NSSR and the tower-based NSSR measurements with the coefficient of determination ( $R^2$ ) of 0.99 and a root mean square error (RMSE) of  $27.51 \text{ W/m}^2$ . The  $R^2$  value is 0.99 and RMSE is  $15.36 \text{ W/m}^2$ , excluding winter. This indicates that NSSR can be estimated by using the proposed method which benefits climate change and some other fields at the regional scale with high temporal resolution.

**Key words** net surface shortwave radiation; geostationary meteorological satellite; high temporal resolution

地表净辐射是驱动大气运动的主要能量来源,在地气系统的相互作用中起着关键作用.其中,地表短波净辐射(net surface shortwave radiation, NSSR)是地表净辐射的一个重要组成部分,地表短波净辐射的研究,对地表辐射平衡、蒸散以及气候变化等众多领域具有重要研究意义.

传统获取地表短波净辐射通量的信息只能通过仪器实地测量而得.虽然这种需要利用地面台站气象数据方法计算的精度较高,但是计算麻烦,需要输入很多难以准确获取的气象参数,并且需要投入大量的人力物力财力,很难完成区域尺度的地表短波净辐射数据的获取.随着遥感技术的发展,基于航空和卫星数据来获取地表短波净辐射的方案被提出.自 1984 年起,许多学者针对大气顶部短波净辐射和地表短波净辐射之间的线性关系进行了研究<sup>[1-4]</sup>. Li 等<sup>[5-6]</sup>发现对于一个特定的太阳天顶角、辐射通量和地表反照率之间的关系是线性的,给定一个大气顶部的反射通量和太阳天顶角,仅存在唯一的地表短波净辐射通量值,基于此提出一个参数化模型. Masuda 等<sup>[7]</sup>考虑到云顶高度与类型、地表压强、臭氧数量和气溶胶类型与含量的影响,从而改进了 Li 等的参数化模型.随后,很多研究者们基于 Li 等和 Masuda 等的参数化模型,计算了不同地区地表短波辐射通量<sup>[8-12]</sup>.由于他们的模型输入参数中,大多采用的是宽通道卫星观测数据,2008 年 Tang 等<sup>[11-12]</sup>利用极轨卫星 MODIS (moderate-resolution imaging spectroradiometer) 基于 Li 等的方法,通过中等波段分辨率的大气辐射传输模型 MODTRAN 模拟,建立窄通道观测数据与大气层顶表观反照率之间的关系,提出利用 MODIS 7 个窄通道大气顶部观测值估算地表短波净辐射的新方法,解决了传感器大气顶部窄通道表观反射率向宽通道反照率转换的问题.

虽然当前已有众多学者利用遥感数据进行了

地表短波净辐射的反演研究,但是这些方法大多是基于极轨卫星数据.对于一个给定的研究区来说,当前极轨卫星在白天最多只能提供 1 至 2 个时相的数据,如遇云雨等不利天气条件,可用的数据将难以得到保障,从而严重地制约了对地表短波净辐射的研究.此外,虽然当前全球能量与水循环试验地表辐射收支产品数据集(GEWEX-SRB)能够提供时间分辨率为 3 h 的辐射产品,但其空间分辨率较低( $1^\circ$ ),导致其在局地尺度的研究上难以应用.如何有效兼顾地表短波净辐射数据的时间和空间分辨率,发展更为合适的卫星地表短波净辐射遥感估算方法,使其更有效地在区域气象、水文和生态环境等领域发挥其应有的作用,具有十分重要的科学意义和实用价值.考虑到静止气象卫星对给定的像元具有固定的观测角度,一天中能够提供 48 ~ 96 个时相的多光谱数据,并且其相对较高的空间分辨率(3 ~ 5 km)通常也能够满足各研究和应用领域的需求.因此,本文针对风云静止气象卫星(FY-2E)数据,发展了地表短波净辐射估算方法,并利用实测数据对反演结果进行验证.

## 1 研究区与数据

### 1.1 研究区概况

黄河源区位于青藏高原东部,是黄河上游的重要水源补给区.该地区地下特征显著且复杂,海拔落差较大,其地表辐射通量在量级与分布格局上存在显著的差异.分析该区域的净辐射变化情况,如此独特环境的辐射平衡,对了解黄河源区地气间相互作用过程、区域能量收支等方面具有重要意义.但由于地面观测资料的限制,对该地区不同时空尺度净辐射的研究还不多.

本文以黄河源区中的玛曲县为研究区(图 1),该区地理坐标为  $33^\circ 30' \sim 34^\circ 15' \text{N}$ ,  $101^\circ 38' \sim 102^\circ 45' \text{E}$ ,位于甘肃省甘南藏族自治州西南部,青

藏高原东端,甘、青、川三省交界处,黄河第一弯曲部.地势西高东低,由西北向东南倾斜,海拔在 3 300~4 806 m,属于高寒湿润型气候,年平均气温 1.1℃,年平均降水量 615.5 mm<sup>[13]</sup>.

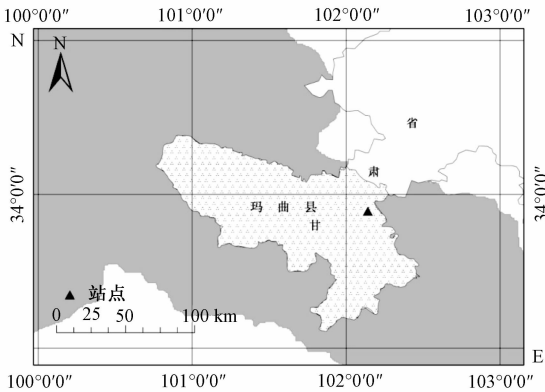


图 1 研究区位置图  
Fig.1 Location of the study area

1.2 FY-2E 数据

风云二号气象卫星 (FY-2) 是中国自行研制的第一代地球静止轨道气象卫星, E 星 (FY-2E) 于 2008 年 12 月 23 日发射成功, 并定点于东经 123.5°赤道上空, 接替 FY-2C, 与极地轨道气象卫星相辅相成, 构成中国气象卫星应用体系. FY-2E 可实现每 1 h 获取经纬度从 N60°~S60°, E45°~165°的一幅完整影像; 汛期每间隔 30 min 可获取一幅影像. FY-2E 卫星主要有效载荷为红外和可见光自旋扫描辐射器 VISSR<sup>[14]</sup>, 其技术指标如表 1 所示. 采用 FY-2E 卫星, 一天中最多能够获取 48 个时相的数据, 并且其有相对较高的空间分辨率 (5 km), 能够满足研究的需求.

表 1 辐射计主要技术指标

Table 1 Main technical parameters of radiometer

通道	波段/ $\mu\text{m}$	星下点 分辨率/km	用途
可见光	0.510~0.905	1.25	白天的云、雪、水体
红外 1	10.29~11.45	5	昼夜云、下垫面温度、云雪区分
红外 2	11.59~12.79	5	昼夜云
红外 3	3.59~4.09	5	半透明卷云的云顶温度、中高层水汽
红外 4	6.32~7.55	5	昼夜云、高温目标

1.3 实测数据

在研究区内选取若尔盖高原湿地生态系统研究站玛曲观测场 (102.14°N, 33.89°E, 如图 1 中

三角形所示), 该地海拔 3 423 m. 本文获取了 2010 年北京时间上午 11 点该站点的下行短波辐射与上行短波辐射实测数据, 其地面观测上行和下行短波辐射由 kipp&zonen 公司的 CNR-1 传感器观测得到, 其光谱范围为 0.3~2.8  $\mu\text{m}$ .

2 方法研究

地表短波净辐射可以由 Pinty 和 Ramond<sup>[15]</sup>及 Pinker et al.<sup>[16]</sup>提出的下式求得:

$$S_n = R_s^\downarrow - R_s^\uparrow = (1 - r)R_s^\downarrow, \tag{1}$$

其中,  $S_n$  表示地表短波净辐射 ( $\text{W}/\text{m}^2$ );  $R_s^\downarrow$  和  $R_s^\uparrow$  分别表示下行短波辐射 ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) 和上行短波辐射 ( $\text{W}/\text{m}^2$ );  $r$  表示地表反照率, 无量纲.

在利用 FY-2E 数据计算地表短波净辐射时, 地表反照率是一个关键的地表参数. 由于 FY-2E 在可见光波段为一个较宽的观测波段 (0.510~0.905  $\mu\text{m}$ ), 因此, 本文不进行窄波段到宽波段的反演, 只将 FY-2E 观测的每小时的表观反射率通过简化黑暗像元法进行大气校正得到地表反射率后, 直接作为短波波段地表反照率参与短波净辐射的计算<sup>[17-18]</sup>.

2.1 太阳总辐射的确定

太阳总辐射  $R_s^\downarrow$  可以表示为<sup>[17]</sup>

$$R_s^\downarrow = G \times \cos(\text{SZA}) \times d_r \times \tau, \tag{2}$$

其中,  $G$  为太阳常数 ( $1\,367\text{ W}/\text{m}^2$ ); SZA 表示太阳天顶角;  $d_r$  指日地距离因子, 无量纲;  $\tau$  是大气透过率, 无量纲.

日地距离因子可以由下式计算得到:

$$d_r = 1.000\,11 + 0.034\,221\cos\alpha + 0.001\,28\sin\alpha + 0.000\,719\cos2\alpha + 0.000\,077\sin2\alpha', \tag{3}$$

其中,  $\alpha = 2\pi(\text{DOY} - 1)/365$ , DOY 表示年积日.

2.2 大气透过率的确定

因为大气透过率的变化主要取决于大气水汽含量的动态变化<sup>[19]</sup>, 本文通过大气水汽含量来计算大气透过率, 利用 FY-2E 的 2 个相邻热红外通道的地表比辐射率之比反演相应时刻的大气水汽含量<sup>[20-21]</sup>, 计算过程如下:

$$\text{WVC} = C_1 + C_2 \times \frac{\tau_{\text{IR}2}}{\tau_{\text{IR}1}}, \tag{4}$$

$$\frac{\tau_{\text{IR}2}}{\tau_{\text{IR}1}} = \frac{\varepsilon_{\text{IR}1}}{\varepsilon_{\text{IR}2}} \times \frac{\sum_{k=1}^N (T_{\text{IR}1,k} - \overline{T_{\text{IR}1}})(T_{\text{IR}2,k} - \overline{T_{\text{IR}2}})}{\sum_{k=1}^N (T_{\text{IR}1,k} - \overline{T_{\text{IR}1}})^2}, \tag{5}$$

其中, WVC 表示大气水汽含量 ( $\text{g}/\text{cm}^2$ );  $\tau_{\text{IR1}}$  与  $\tau_{\text{IR2}}$  为通道 IR1 和 IR2 的大气透过率, 无量纲;  $\varepsilon_{\text{IR1}}$  与  $\varepsilon_{\text{IR2}}$  表示通道 IR1 和 IR2 的比辐射率, 无量纲;  $\bar{T}_{\text{IR1}}$  与  $\bar{T}_{\text{IR2}}$  分别表示通道 IR1、IR2 的  $N$  个相邻像元的大气顶层亮温的平均值 ( $K$ );  $C_1$  与  $C_2$  可以通过如下公式计算得到:

$$C_1 = 28.104 - \frac{14.996}{\cos(VZA)} + \frac{3.211}{\cos^2(VZA)}, \quad (6)$$

$$C_2 = -28.056 + \frac{14.954}{\cos(VZA)} - \frac{3.206}{\cos^2(VZA)}, \quad (7)$$

其中, VZA 表示观测天顶角.

利用大气透过率的变化主要取决于大气水

汽含量的动态变化这一特征, 本文基于 MODTRAN 模拟大气水汽含量与大气透过率之间的关系, 通过得到的大气水汽含量计算大气透过率. 又由于本研究拟反演中国地区的地表短波净辐射, 故根据 MODTRAN 中标准大气模型的设置, 挑选出适合中国地区的大气模型——中纬度地区夏季和冬季大气模型, 选用 Rural-VIS = 23 km 的气溶胶模式. 分别模拟中纬度地区夏季大气模型和中纬度地区冬季大气模型中 FY-2E 可见光波段大气透过率 ( $\tau$ ) 与大气水汽含量 ( $w$ ) 的关系 (表 2).

表 2 FY-2E 可见光波段大气透过率与大气水汽含量关系估算  
Table 2 Estimation of the relationship between atmospheric transmittance and water vapor content for the FY-2E VIS band

大气模型	大气水汽含量 $w/(\text{g}\cdot\text{cm}^2)$	大气透过率与水汽含量关系 $\tau$	$R^2$
中纬度夏季大气	$0 < w \leq 0.5$	$\tau = -0.0174w + 0.7524$	0.9975
	$0.5 < w \leq 1.6$	$\tau = -0.0115w + 0.7490$	0.9975
	$1.6 < w \leq 2.6$	$\tau = -0.0087w + 0.7446$	0.9994
	$2.6 < w \leq 3.7$	$\tau = -0.0099w + 0.7483$	0.9924
	$3.8 < w \leq 4.9$	$\tau = -0.0115w + 0.7529$	0.9899
	$4.9 < w \leq 5.4$	$\tau = -0.0041w + 0.7175$	0.9824
中纬度冬季大气	$0 < w \leq 0.5$	$\tau = -0.0178w + 0.7655$	0.9976
	$0.5 < w \leq 0.9$	$\tau = -0.0155w + 0.7647$	0.9921
	$0.9 < w \leq 1.2$	$\tau = -0.0441w + 0.792$	0.9998
	$1.3 < w \leq 1.4$	$\tau = -0.0063w + 0.745$	1
	$1.4 < w \leq 5.4$	$\tau = 0.7362$	1

3 结果分析

基于上述方法, 随机选取 2010 年的一个晴天 (2010 年 9 月 15 日), 反演当天北京时间上午 11 点研究区的地表短波净辐射, 如图 2 所示. 可以看出地表短波净辐射由南至北、由东至西递减, 与太阳天顶角有关. 为进一步分析地物类型对地表短波净辐射的影响, 同时做出下午 2 点与上午 8 点的地表短波净辐射差值图 (图 3) 与土地利用图 (图 4), 从图中能明显看出, 越高植被覆盖地区地表短波净辐射差值越低, 这与实际情况完全吻合, 植被覆盖率越高, 地表吸收的辐射能越低.

3.1 反演结果与实测数据对照分析

为了检验方法的可靠性, 选取 2010 年玛曲县的所有晴天 (共 33 d) 的地面实测数据对反演结果进行对比验证. 图 5 给出 2010 年全年所有晴天地表短波净辐射地面测量值与 FY-2E 数据反演结果的散点图. 经过计算得出: 晴天条件下, 均方

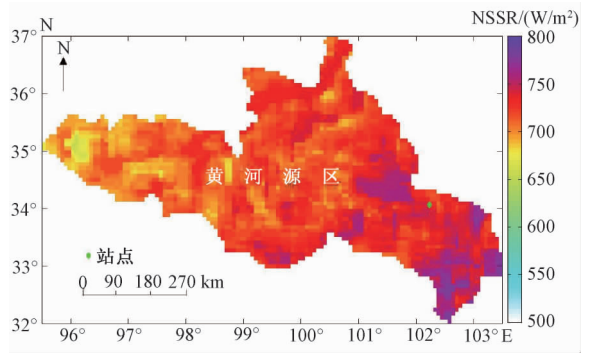


图 2 2010 年 9 月 15 日上午 11 点 黄河源区的地表短波净辐射反演结果  
Fig. 2 Estimation of NSSR at 11 a. m. over the source area of Yellow River on 15 September 2010

根误差 (RMSE) 为  $27.51 \text{ W}/\text{m}^2$ , 决定系数 ( $R^2$ ) 为 0.99.

本研究在不考虑冬天 (1、11 和 12 月) 的晴天情况下, 对剩下晴天 (共 22 d) 的反演结果与地面实测数据进行验证分析, 如图 6 所示,  $R^2$  为 0.99,

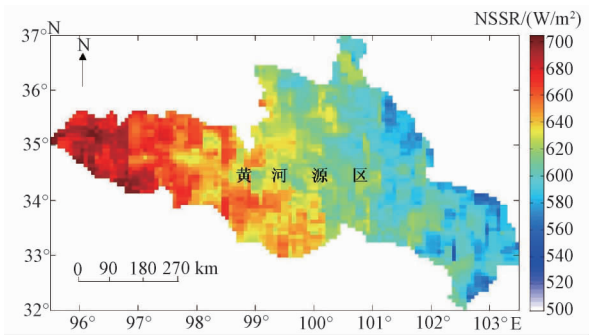


图 3 2010 年 9 月 15 日上午 8 点与下午 2 点的地表短波净辐射差值图  
Fig. 3 NSSR difference value between 8 a. m. and 2 p. m. on 15 September 2010

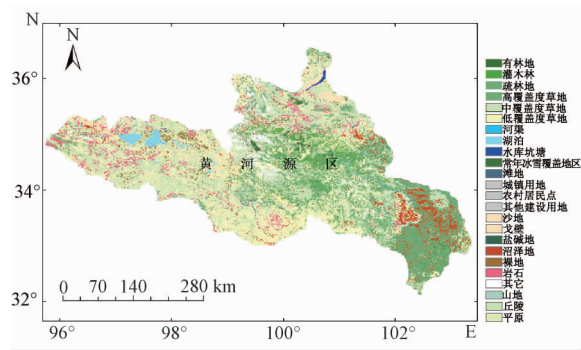


图 4 土地利用图  
Fig. 4 Land-use map

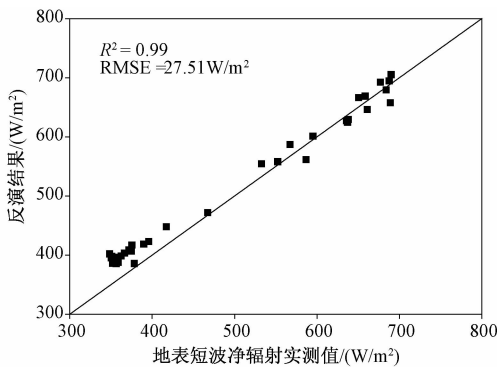


图 5 2010 年基于地面实测气象数据的验证  
Fig. 5 Validation with measurements in 2010

RMSE 为 15.36 W/m<sup>2</sup>.

### 3.2 误差分析

FY-2E 卫星的可见光波段范围为 0.510 ~ 0.905 μm,而地面实测上行和下行短波辐射数据的波段范围为 0.3 ~ 2.8 μm,因而反演结果对比实测数据具有一定的误差.另外,研究区海拔在 3 300 ~ 4 806 m,高程落差较大,地形崎岖不平,地

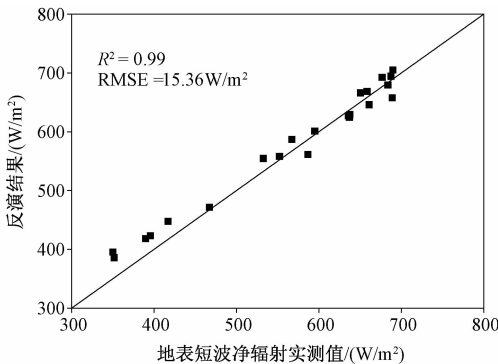


图 6 除去冬天后,基于地面实测气象数据的验证  
Fig. 6 Validation with measurements excluding winter

表粗糙度较大,同时,较大的景观多样性指数与空间缀块性进一步造成了该地区的空间异质性较为强烈,对地表比辐射率的反演的精度影响较大,从而导致大气水汽含量的误差,进一步降低地表短波净辐射的准确性.其次,风云卫星数据本身的信噪比较低,从而降低了反演精度.虽然观测塔观测的辐射数据能够代表一定范围的辐射状况,但是用观测值与 5 km × 5 km 像元值对比验证,也会导致一定的误差.另外,除去冬天后的反演结果精度更高的原因可能与冬天冰雪覆盖有关.

Huang et al.<sup>[22]</sup>的研究中对在玛曲县 GLASS 的下行短波辐射产品与实测数据进行验证,其中 RMSE 为 130.4 W/m<sup>2</sup>,相关系数(R)为 0.84.若需得到地表短波净辐射,还需获得上行短波辐射或地表反照率,因此,最终误差必定更大.因此,可以证明此方法比 GLASS 产品的方法更精确可行.另外,唐伯惠<sup>[10]</sup>的研究中提到,基于 MODIS 数据反演的地表短波净辐射结果与禹城(下垫面比较均一的地区)站点 2003 年 1、4、7、10 月的实测数据进行的对比验证,结果发现 RMSE 小于 20 W/m<sup>2</sup>.本文的研究结果在除去冬季的 1、11、12 月份后,反演结果也达到了唐伯惠<sup>[10]</sup>文中的精度,且本文选取的研究区下垫面异质性更高,有些地区常年冰雪覆盖,对反演精度影响更大.上述结论,可以证明该方法反演地表短波净辐射精确可靠.

## 4 结论

本文发展了适合于中国地区的地表短波净辐射的反演方法.首先,基于 MODTRAN 模拟大气水汽含量与大气透过率之间的关系,然后利用 FY-2E 的 2 个相邻热红外通道的地表比辐射率之

比反演得到大气水汽含量,进而反演得到地表短波净辐射。

结合地表发射率空间分布图、地表短波净辐射差值图与土地利用图能明显看出反演结果真实可信。此外,基于玛曲地区 2010 年的地面实测气象数据,本文将对应时刻的地表短波净辐射反演结果进行了验证。结果显示,对于晴天,均方根误差为  $27.51 \text{ W/m}^2$ ,决定系数为 0.99;在除去冬季的晴天条件下, $R^2$  为 0.99, RMSE 为  $15.36 \text{ W/m}^2$ 。因此,该结果证明本文的地表短波净辐射反演方法精确可行,从而为反演同时具备高时间和空间分辨率的地表短波净辐射数据提供坚实依据,对长时间尺度气象变化和陆表水文循环等方面的研究具有一定意义。

中国科学院寒区旱区环境与工程研究所西部气候环境与灾害实验室提供了若尔盖高原湿地生态系统研究站玛曲观测场的辐射数据,国家气象卫星中心 (<http://satellite.nsmc.org.cn/portalsite/default.aspx>) 提供了 FY-2E 数据,在此一并致以衷心的感谢!

## 参考文献

- [ 1 ] Cess R D, Dutton E G, DeLuisi J J, et al. Determining surface solar absorption from broadband satellite measurements for clear skies: comparisons with surface measurements [ J ]. *Journal of Climate*, 1991, 4: 236-247.
- [ 2 ] Cess R D, Nemesure S, Dutton E G, et al. The impact of clouds on the shortwave radiation budget of the surface-atmosphere system: interfacing measurements and model [ J ]. *Journal of Climate*, 1993, 6: 308-316.
- [ 3 ] Chou M D. The derivation of cloud parameters from satellite-measured radiances for use in surface radiation calculations [ J ]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1991, 48 ( 13 ): 1 549-1 559.
- [ 4 ] Schmetz J. On the relationship between solar net radiative fluxes at the top of the atmosphere and at the surface [ J ]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1993, 50 ( 8 ): 1 122-1 132.
- [ 5 ] Li Z Q, Leighton H G. Estimation of shortwave flux absorbed at the surface from TOA reflected flux [ J ]. *Journal of Climate*, 1993, 6: 317-330.
- [ 6 ] Li Z Q, Leighton H G, Cess R D. Surface net solar radiation estimated from satellite measurements: comparisons with tower observations [ J ]. *Journal of Climate*, 1993, 6: 1 764-1 772.
- [ 7 ] Masuda K, Leighton H G, Li Z Q. A new parameterization for the determination of solar flux absorbed at the surface from satellite measurements [ J ]. *Journal of climate*, 1995, 8: 1 615-1 629.
- [ 8 ] Fung K K, Ramaswamy V. On shortwave radiation absorption in overcast atmospheres [ J ]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 1999, 104 ( 18 ): 22 233-22 241.
- [ 9 ] Deneke H, Feijt A, Lammeren A, et al. Validation of a physical retrieval scheme of solar surface irradiances from narrowband satellite radiances [ J ]. *Journal of Applied Meteorology*, 2005, 44 ( 9 ): 1 453-1 466.
- [ 10 ] 唐伯惠. MODIS 数据地表短波净辐射与中红外通道地表双向反射率提取方法研究 [ D ]. 北京: 中国科学院大学, 2007.
- [ 11 ] Tang B H, Li Z L, Zhang R H. A direct method for estimating net surface shortwave radiation from MODIS data [ J ]. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 103 ( 1 ): 115-126.
- [ 12 ] Tang B H, Li Z L. Estimation of instantaneous net surface longwave radiation from MODIS cloud-free data [ J ]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112 ( 9 ): 3 482-3 492.
- [ 13 ] 王亚维, 宋小宁, 唐伯惠, 等. 基于 FY-2C 数据的地表温度反演验证: 以黄河源区玛曲为例 [ J ]. *国土资源遥感*, 2015, 27 ( 4 ): 68-72.
- [ 14 ] 国家卫星气象中心. 风云卫星遥感数据服务网 [ EB/OL ]. (2014-05-04) [ 2016-02-05 ]. <http://www.nsmc.cma.gov.cn/NSMC/Home/Index.html>.
- [ 15 ] Pinty B, Ramond D. A method for the estimate of broadband surface albedo from a geostationary satellite [ J ]. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 1987, 26: 1 709-1 722.
- [ 16 ] Pinker R T, Frouin R, Li Z L. A review of satellite methods to derive surface shortwave irradiance [ J ]. *Remote Sensing of Environment*, 1995, 51 ( 1 ): 108-124.
- [ 17 ] 刘蓉. 利用风云气象卫星遥感资料估算黄河源区蒸发量的研究 [ D ]. 兰州: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 2011.
- [ 18 ] 王欣, 文军, 张宇, 等. 利用我国气象卫星遥感资料估算黄河源区净辐射辐照度的研究 [ J ]. *太阳能学报*, 2012, 33 ( 2 ): 313-320.
- [ 19 ] 覃志豪, Zhang M H, Arnon K, 等. 用陆地卫星 TM6 数据演算地表温度的单窗算法 [ J ]. *地理学报*, 2001, 56 ( 4 ): 456-466.
- [ 20 ] Li Z L, Jia L, Su Z, et al. A new approach for retrieving precipitable water from ATSR2 split-window channel data over land area [ J ]. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, 24 ( 24 ): 5 095-5 117.
- [ 21 ] Tang B H, Bi Y, Li Z L, et al. Generalized split-window algorithm for estimate of land surface temperature from Chinese geostationary FengYun meteorological satellite ( FY-2C ) data [ J ]. *Sensors*, 2008, 8 ( 2 ): 933-951.
- [ 22 ] Huang G H, Wang W Z, Zhang X T, et al. Preliminary validation of GLASS-DSSR products using surface measurements collected in arid and semi-arid regions of China [ J ]. *International Journal of Digital Earth*, 2015, 6 ( 1 ): 50-68.