

基于暗目标法和 GF-1 的农作物光合有效辐射反演

王利民, 杨玲波, 刘 佳, 杨福刚, 邵 杰, 姚保民

(中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

摘 要: 光合有效辐射是农田生产力和产量估算的依据, 也是农作物参数遥感反演的主要研究内容。该文基于大气辐射传输模型, 选择覆盖山东禹城市 2014 年 4 月—2014 年 12 月共 12 景 GF-1/WFV (wide field view) 数据, 结合浓密植被 (暗目标) 蓝光波段、红光波段之间反射率的线性关系, 基于查找表 (look-up table, LUT) 技术反演了大气气溶胶光学厚度 (aerosol optical depth, AOD) 等大气参数, 提出了基于蓝、绿、红 3 个离散波段反演光合有效辐射 (photosynthetically active radiation, PAR) 的算法。其中, 浓密植被是根据 WFV/NDVI (normalized difference vegetation index) 设置阈值的方式筛选的; 红光波段与蓝光波段地表反射率的比例系数为 1.7977, 截距为 0.0034, 决定系数达 0.9826, 是根据美国地质调查局 (U.S. Geological Survey, USGS) 提供的典型植被波谱库数据理论计算获取; GF-1/WFV 数据蓝、绿、红波段转换为 400~700 nm 波段间光合有效辐射值之间的转换系数分别为 0.09156、0.09951、0.1007。采用中国生态系统研究网络禹城实验站实测的 PAR 数据进行对比验证, 光合有效辐射的总体精度达到了 95.77%, 误差绝对值平均为 11.36 W/m², 平均误差小于 5%, 表明了该方法具有较高的精度。该方法不需要额外辅助数据, 产品生产过程简单, 是比较理想的 GF-1/WFV 数据光合有效辐射业务反演备选算法。

关键词: 遥感; 辐射; 光谱分析; 光合有效辐射; GF-1; 气溶胶光学厚度

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.22.025

中图分类号: S127

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2016)-22-0184-08

王利民, 杨玲波, 刘 佳, 杨福刚, 邵 杰, 姚保民. 基于暗目标法和 GF-1 的农作物光合有效辐射反演[J]. 农业工程学报, 2016, 32(22): 184-191. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.22.025 http://www.tcsae.org

Wang Limin, Yang Lingbo, Liu Jia, Yang Fugang, Shao Jie, Yao Baomin. Inversion of photosynthetically active radiation based on GF-1 image by dark object method[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(22): 184-191. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.22.025 http://www.tcsae.org

0 引 言

太阳辐射波长在 400~700 nm 之间, 能够用于绿色植物光合作用的太阳辐射能量称为光合有效辐射 (photosynthetically active radiation, PAR) [1]。PAR 是陆地植物的生长能量来源, 在地表与大气环境物质、能量交换、农作物长势及产量监测等各个方面的研究中均有重要的作用, 是陆地生态系统研究的重要依据 [2-5]。根据地面气象站的实测数据, 构建统计反演模型, 或者在实测数据基础上内插, 是以往区域性光合有效辐射数据获取的主要方法。这些方法很难量化精确表述各地区 PAR 值的差异, 影响了植被净初级生产力等参数的精确反演与评估 [6-12]。遥感数据具有获取高精度、空间连续 PAR 产品的能力, 近年来受到广泛重视与应用 [13-17]。

采用遥感技术进行 PAR 反演研究, 主要是围绕辐射传输机理模型 [18-19] 或者简化形式 [19-21] 开展的。前者如刘荣高等 [22-23] 以 MODIS 卫星数据为基础, 根据辐射传输方程建立查找表, 利用暗目标法反演气溶胶, 以及晴空条

件下大气可降水量, 实现了大批量、像元级的数据产品生产, 采用地面测量数据验证的误差在 10% 以内。后者如 Pinker 等 [24-25] 利用转换系数法, 基于 ISCCP C 卫星数据反演获取了 400~500、500~600、600~700 nm 这 3 个波段的太阳辐照度, 并以此为基础发布了第 1 个以月为单位的全球范围内 250 km 的 PAR 数据产品。由于气溶胶光学厚度 (aerosol optical depth, AOD) 与 PAR 密切相关 [18, 21-23], 在 PAR 反演中通常需要先对 AOD 进行反演, 结构函数法、深蓝算法、浓密植被法等都是常用的气溶胶反演算法。结构函数法对影像几何精度、光谱精度要求很高, 应用较少, 而深蓝算法则需要外部辅助的地表反射率库的方式, 来实现地气解耦, 获取 AOD [26-30]。浓密植被法又称暗目标法, 是利用浓密植被蓝光、红光、短波红外波段反射率存在良好线性关系的特点, 进行地气解耦反演 AOD, 该方法精度较高、输入参数少, 但在缺少植被或植被生长不茂盛的地区适用性较差 [31-34]。

以往的研究中, 光合有效辐射反演的遥感数据源主要以国外中低分辨率的卫星数据为主, 针对国产中高空空间分辨率遥感数据, 基于辐射传输模型的 AOD、其他大气参数反演的 PAR 算法研究报道不多。该文选择 GF-1/WFV 数据作为反演光合有效辐射的数据源, 利用大气辐射传输模型, 在查找表 (look-up table, LUT) 构建、浓密植被 (暗目标) 红、蓝波段反射率的线性比值确定、

收稿日期: 2016-04-15 修订日期: 2016-10-28

基金项目: “十二五” 国家科技重大专项 “高分辨率对地观测系统专项”, 应用系统项目 “高分农业遥感监测与评估示范系统 (一期)” (09-Y30B03-9001-13/15)

作者简介: 王利民, 男, 蒙古族, 内蒙古宁城人, 博士, 主要从事农业遥感监测业务运行研究。北京 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 100081。Email: wanglimin01@caas.cn

离散可见光波段反演 400~700 nm 连续谱段 PAR 值等方法研究基础上, 实现了 GF-1/WFV 数据的光合有效辐射的反演。

1 研究区概况

该文选择位于华北平原中部的山东省禹城市作为主要研究区域。禹城市位于山东省的西北部, 徒骇河的中游, 地处 116°22'11" ~ 116°45'00"E, 36°41'36" ~ 37°12'13"N。市境南北长约 58 km, 东西宽约 33 km, 总

面积 990 km²。禹城市地形为黄河中下游冲积平原, 地势平坦, 自西南向东北缓缓倾斜, 海拔最高 27.27 m, 最低 19.2 m。属暖温带大陆季风气候, 四季分明, 干湿季节明显, 光照充足。年平均气温 13.3 °C, 年平均降水量 555.5 mm, 年平均无霜期 202 d, 全年日照 2 546.2 h, 年平均风速 2.5 m/s, 最多风向为西南偏南风。禹城市是典型的农作区域, 主要农作物为冬小麦和春玉米, 其余种植包括棉花、花生、西瓜等作物, 开展光合有效辐射研究具有农作物遥感研究的代表性。

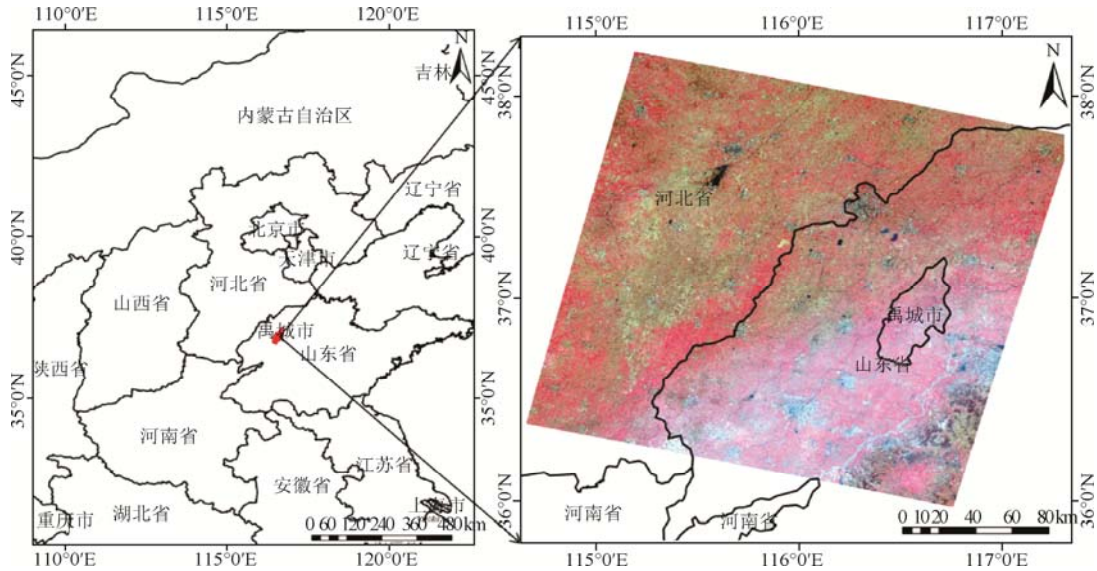


图 1 禹城研究区位置

Fig.1 Location of Yucheng study area

2 数据获取及预处理

该文采用 2014 年 4 月 14 日至 2014 年 12 月 29 日共 12 景 GF-1/WFV 影像进行光合有效辐射的反演, 其具体的传感器、轨道号及获取时间如表 1 所示。

表 1 GF-1/WFV 光合有效反演使用的 12 景影像信息
Table 1 Information of 12 phases GF-1/WFV images

序号 Series	传感器 Sensor ID	产品号 Product ID	获取时间 Acquiring time
1	WFV1	203495	2014-04-14
2	WFV2	227348	2014-05-17
3	WFV4	235700	2014-05-26
4	WFV3	247322	2014-06-07
5	WFV1	274542	2014-07-13
6	WFV2	286596	2014-07-26
7	WFV1	371501	2014-10-03
8	WFV4	427928	2014-11-02
9	WFV1	450997	2014-11-13
10	WFV3	454185	2014-11-14
11	WFV3	468481	2014-11-18
12	WFV3	552188	2014-12-29

GF-1 卫星是中国高分辨率对地观测系统的第 1 颗卫星, 于 2013 年 4 月 26 日成功发射。GF-1 卫星共有 4 台 16 m 分辨率多光谱相机 (WFV1~WFV4), 每台相机 4

个波段 (450~890 nm), 组合起来可以达到 800 km 的幅宽, 标称重返周期为 4 d。数据预处理主要包括几何校正、辐射定标、表观反射率计算等。几何校正基于影像的有理多项式系数 (rational polynomial coefficient, RPC) 参数, 结合 DEM 数据进行正射校正。辐射校正依据中国资源卫星应用中心提供的 GF-1/WFV 相机辐射定标系数, 将原始 DN 值影像转化为卫星入瞳处辐射亮度值, 并根据影像元数据文件, 获取影像成像日期、太阳天顶角、太阳方位角等信息, 计算表观反射率。预处理的相关技术流程可参见相关文献^[24-36], 本文不再赘述。

3 研究方法

3.1 技术路线

采用 GF-1/WFV 数据进行 PAR 的反演, 主要包括高分影像预处理、暗目标筛选、浓密植被红蓝波段反射率比值确定、AOD 反演、PAR 反演等 5 个步骤, 具体技术流程见图 2。高分影像预处理内容如上所述。暗目标筛选主要是通过设定 NDVI 阈值的方式获取浓密植被区域的过程。浓密植被红蓝波段反射率比值是根据美国地质调查局提供的典型植被波谱库数据, 通过 GF-1/WFV 相应波段波谱响应函数卷积计算地表反射率基础上获取的。AOD 反演是根据影像观测几何及大气模式设定条件下, 通过设置不同 AOD 值获取其他大气参数的对应关系, 在

查找表生成基础上结合红蓝波段反射率获取的。PAR 反演是对离散的气溶胶 AOD 空间插值计算, 获取研究区连续 AOD 基础上, 基于查找表获取对应的大气参数, 依据辐射传输方程计算出地面接收的光合有效辐射值。

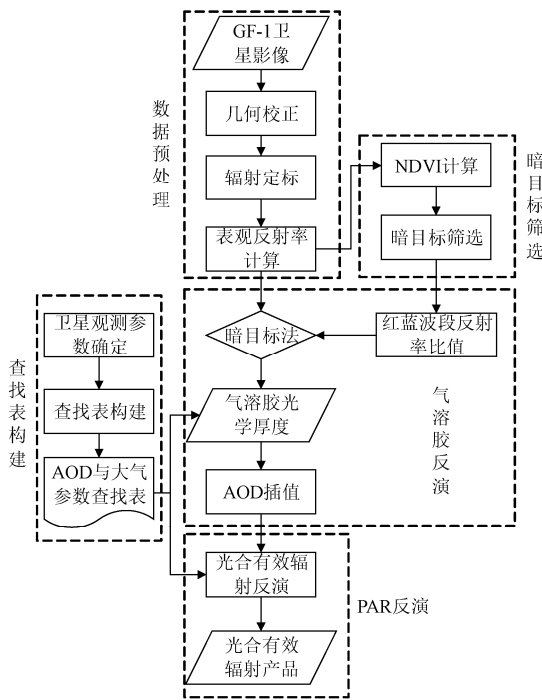


图2 高分影像反演 PAR 流程图
Fig.2 PAR inversion by GF-1 satellite image

3.2 暗目标的选取方法

通过对归一化植被指数设置阈值的方式获取暗目标, NDVI 值越大, 地物的暗目标特性越强。NDVI 的计算公式如下

$$NDVI = \frac{ref_4 - ref_3}{ref_4 + ref_3} \quad (1)$$

式中 ref_4 表示近红外波段反射率; ref_3 表示红光波段反射率。

暗目标的 NDVI 提取的阈值, 在不同的地区、时间、大气环境等情况下不尽相同, 主要依据人工经验的方式来确定。为保证非植被目标被误分到植被目标中, 该阈值可尽量设高。一般的原则是要保证暗目标点的数量足以满足区域 AOD 反演的数量及分布需求。在实际的操作中, 利用暗目标点反演气溶胶后获取目标点的红蓝波段反射率, 通过剔除与理论值有较大差异的点, 可以防止误选情况发生, 且不会增大工作量。

3.3 植被红、蓝波段反射率比值确定

传统卫星影像如 MODIS 等主要利用暗目标法进行气溶胶反演。Kaufman 等^[31]通过大量试验表明在植被区域, MODIS 红光、蓝光的地表反射率与短波红外 SWIR 波段 (2.1 μm) 表观反射率之间存在很好的线性关系, 而 SWIR 波段基本不受气溶胶影响, 因此可以直接使用其反射率来推导红、蓝波段地表反射率, 进而进行气溶胶反演。由于 GF-1 卫星并不具备 SWIR 波段, 无法直接使用该方法, 但可以利用植被红、蓝波段地表反射率之间良

好的线性关系作为约束条件, 代入到辐射传输方程中去求解气溶胶光学厚度。这种方法的关键就是确定传感器植被目标红、蓝波段反射率的比值。Kaufman 等^[31]研究认为 MODIS 红、蓝波段地表反射率之比为 2, 刘荣高等^[22]给出的 MODIS 红、蓝波段地表反射率之比则为 1.786, 王中挺等^[33]给出的 CBERS02B 卫星红蓝波段之比为 1.55。由于该比值在不同的传感器存在一定的差异, 因此下文对 GF-1 卫星的红蓝波段反射率比值进行计算研究。

该文采用 USGS 提供的典型地物波谱库提供的波谱数据, 确定 GF-1/WFV 传感器植被目标蓝、红波段反射率的理论比值。假设 GF-1 卫星暗目标红、蓝地表反射率之间存在线性关系如式 (2) 所示, 式中, ref_3 为红光波段反射率, ref_1 为蓝光波段反射率, a 、 b 为红蓝反射率的比例系数

$$ref_3 = a \cdot ref_1 + b \quad (2)$$

此处, 对于系数 a 、 b 需要利用地面观测数据进行确定。本文中, 利用美国地质调查局提供的典型植被波谱库 $S(\lambda)$, 结合 GF-1 卫星的波谱响应函数 $E(\lambda)$, 利用卷积的方式依次计算这些植被的蓝、红、近红外 3 个波段的地表反射率 (见公式 (3))。

$$ref_m = \left(\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) E(\lambda) d\lambda \right) / \left(\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E(\lambda) d\lambda \right) \quad (3)$$

获得各波段地表反射率后, 计算各植被的 NDVI 值, 筛选其中 NDVI 大于 0.5 的类别, 共得到 73 种典型植被, 分析其红蓝波段反射率关系, 如图 3 所示, 最终得到系数 $a=1.7977$, $b=0.0034$, 决定系数达 0.9826。

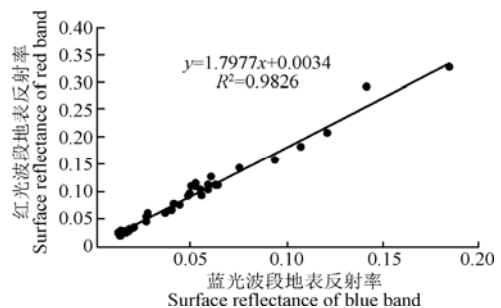


图3 典型植被 GF-1 红蓝波段反射率关系
Fig.3 Relationship of GF-1 red and blue band surface reflectance of typical vegetation

3.4 查找表实时构建及 AOD 反演算法

采用 6S (second simulation of a satellite signal in the solar spectrum) 辐射传输模型, 在获取每景 GF-1 数据观测时间、观测几何信息基础上, 建立 6S 模型输入参数与 AOD 等输出参数的查找表, 基于内插的方式获取不同气溶胶厚度下的大气透过率、半球反照率、散射透过率、大气程辐射等大气参数。通过查找表计算地表反射率, 选择红蓝波段比值最接近理论比值的大气参数条件, 即为暗目标区域 AOD 等大气参数反演结果, 再通过空间插值可以获取全部影像范围的 AOD 等大气参数反演结果。以下是辐射传输过程、查找表快速构建的具体描述。假设地面为朗伯体, 传感器入瞳处接收到的辐射亮度值可

以分解为地表直接反射和大气贡献两大部分，如公式 (4) 所示。式中， I 表示传感器位置处的辐射值， I_0 为大气程辐射 (path radiance)， I_1 则为地面反射太阳辐射经过大气多次反射及透射后进入传感器的辐射能量

$$I(\mu_0, \mu, \phi) = I_0(\mu_0, \mu, \phi) + I_1 \quad (4)$$

将公式 (4) 的 I_1 展开

$$I_1 = \mu_0 E_0 \gamma(\mu_0) (r_s + r_s(r_s \rho) + r_s(r_s \rho)^2 + \dots) \gamma(\mu) \quad (5)$$

式中 $\mu_0 = \cos\theta$ ， θ 为太阳天顶角， E_0 为大气顶层太阳辐射值， $\gamma(\mu_0)$ 为太阳辐射路径上从大气顶层到地面目标的大气总体透射率，又称为大气下行透过率，这样 $\mu_0 E_0 \gamma(\mu_0)$ 就是地面接收到的太阳辐射能量值。 r_s 为地表反射率， ρ 为大气半球反照率， $(r_s + r_s(r_s \rho) + r_s(r_s \rho)^2 + \dots)$ 即为地面反射及经过大气-地面多次反射后的地面反射总辐射； $\gamma(\mu)$ 为从地面到传感器的大气路径总透射率，又称大气上行透过率。稍作整理，即可得公式 (6)

$$I(\mu_0, \mu, \phi) = I_0(\mu_0, \mu, \phi) + \frac{r_s}{1 + r_s \rho} \mu_0 E_0 \gamma(\mu) \quad (6)$$

公式 (6) 即为大气辐射传输的一个基本方程。而利用 6S 大气辐射传输模型，可以确定气溶胶光学厚度 AOD 与公式中各项大气参数之间的关系。

首先根据高分影像数据的元数据，设置包括太阳高度角、太阳方位角、卫星高度角、卫星方位角、月份、日期、大气模式、气溶胶模式 (一般为大陆性)、地面海拔、波谱响应函数等，然后依次输入 20 个气溶胶光学厚度 (0.01、0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6、0.7、0.8、0.9、1.0、1.1、1.2、1.3、1.4、1.5、1.6、1.7、1.8、1.95)，得到包括大气半球反照率 ρ 、散射透过率 S_{ca} (包括上行 S_{ca}^u 和下行 S_{ca}^d)、气体吸收透过率 T_g (包括上行 T_g^u 和下行 T_g^d)、程辐射 I_0 在内的大气参数，即可制作完成查找表。根据公式 (6)，暗目标点蓝光波段和红光波段分别可以构建一个方程，再结合公式 (2) 确定的蓝、红波段反射率之间的线性关系，三式联立，利用查找表，即可求解 ref_1 、 ref_3 ，并反演获取 AOD 值。

表 2 是查找表的一个示例，在实际的运算中，每景影像的一个波段产生一个查找表，按照 LUT 的各个 AOD 值获取对应的大气参数，计算出暗目标各个波段的地表反射率，进而计算红蓝波段的比值，与上文确定的比值进行对比，即可插值计算出最适合的 AOD 值。

表 2 查找表示例

Table 2 Simplified example of look-up table

AOD	T_g^u	T_g^d	S_{ca}^u	S_{ca}^d	ρ	$I_0/(W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1})$
0.01	0.99314	0.99337	0.91517	0.91776	0.13091	34.28603
0.1	0.99314	0.99337	0.89305	0.89658	0.14787	37.91097
0.2	0.99314	0.99337	0.86852	0.87307	0.16399	41.97809
...
1.95	0.99314	0.99337	0.48985	0.50207	0.27948	103.24684

注：AOD 为气溶胶光学厚度； T_g^u 、 T_g^d 、 S_{ca}^u 、 S_{ca}^d 、 ρ 、 I_0 分别为上行、下行气体吸收透过率，上行、下行散射透过率、大气半球反照率、程辐射。
Note: AOD represent aerosol optical depth; T_g^u , T_g^d , S_{ca}^u , S_{ca}^d , ρ , I_0 represent upward, downward gaseous transmittance, upward, downward Rayleigh and aerosol scattering, spherical albedo and path radiance.

3.5 光合有效辐射反演算法

AOD 是影响 PAR 大小的主要因子，根据 AOD 从 LUT 中获取对应的大气参数，将这些参数代入公式 (7) 至 (12)，即可计算获取对应的 PAR。基于 10 nm 的间隔模拟整个可见光范围内 (400~700 nm) 的综合辐射能量值，分析 GF-1/WFV 数据离散的 3 个波段 (红、绿、蓝) 地面辐射能量值转化为全波段辐射能量值的关系，即可实现 GF-1/WFV 数据的光合有效辐射反演。

利用 LUT 获取包括下行散射透过率 S_{ca}^d ，大气半球反照率 ρ 、下行气体吸收透过率 T_g^d 、程辐射 I_0 ，计算地表反射率 ref ，详见公式 (7)、(8)。

$$X_a = \frac{I - I_0}{E_0 T_g^d S_{ca}^d} \quad (7)$$

$$ref = \frac{X_a}{1 + X_a \cdot \rho} \quad (8)$$

获取地表反射率后，结合大气半球反照率，可以计算地面接收到的辐射能量值 F^λ 中来自地-气相互作用的部分能量 F_e^λ 。依据大气下行透过率、散射透过率等参数，可以计算直接来自太阳贡献的辐射能量值 F_s^λ ，详见公式 (9)、(10)、(11)。

$$F^\lambda = F_s^\lambda + F_e^\lambda \quad (9)$$

$$F_s^\lambda = E_0 T_g^d S_{ca}^d \pi \quad (10)$$

$$F_e^\lambda = (F_s^\lambda \cdot ref^\lambda \cdot \rho) / (1 - ref^\lambda) \quad (11)$$

同时需要将高分卫星影像离散的 3 个波段 (红、绿、蓝) 的地面辐射能量值，通过一定的方式转化为整个可见光范围内 (400~700 nm) 的综合辐射能量值。

由于在大部分情况下，地面接收到的光合有效辐射值的 95% 以上基本都来自太阳的直接辐射贡献 F_s^λ ，来自地-气相互作用的非常小。图 4 为利用大气辐射传输模型模拟的多种不同大气条件下可见光波段接收到的太阳直接辐射强度的分布曲线，可以看出，曲线虽然大小不同，但是分布基本一致，这就为从离散的 3 个波段推导整个可见光波段地面辐射强度提供了可能。

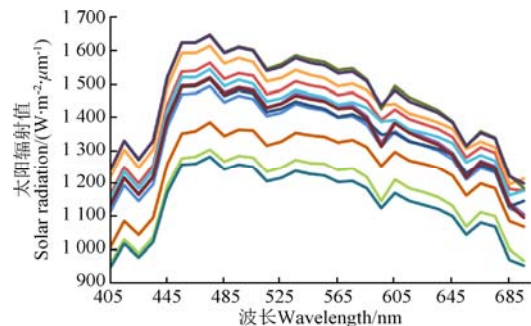


图 4 不同条件下地面接收太阳直接辐射分布曲线
Fig.4 Distribution curve of direct radiation absorbed by surface in different conditons

首先将 400~700 nm 的可见光波段按照 10 nm 的间隔进行分割，并假设光谱响应函数都为 1，分别导入到 6S 模型中，从而模拟不同气溶胶光学厚度、大气模式、

太阳角度、卫星角度等情况下的连续 F_s^λ ，并认为该值可由红绿蓝 3 个离散波段线性拟合而来，只需分别计算其拟合系数即可根据离散波段反演 PAR。具体公式如下

$$PAR = PAR_s + PAR_e = \int_{400}^{700} (F_s^\lambda + F_e^\lambda) d\lambda \quad (12)$$

$$PAR_s = a \cdot F_s^b + b \cdot F_s^g + c \cdot F_s^r \quad (13)$$

分别计算这些输入条件下 GF-1/WFV 卫星红、绿、蓝波段地面接收太阳直接辐射强度，按照公式 (13) 对图 4 数据进行分段拟合 (蓝 400~500 nm, 绿 500~600 nm, 红 600~700 nm)，得到 $a=0.09156$, $b=0.09951$, $c=0.1007$ ，最终获取的 PAR 的单位为 W/m^2 。同时另外计算 13 组不同大气条件下的 PAR 值，对拟合系数进行精度验证，结果表明拟合精度为 99.89%，表明拟合系数的高精度性，也表明利用离散波段进行整个可见光范围光合有效辐射强度反演是可行的。

4 结果与分析

利用本文方法对禹城研究区 2014 年 4 月至 2014 年 12 月共 12 景有效的 GF-1/WFV 卫星影像进行光合有效辐射的反演，并利用国家生态系统研究网络山东禹城农田

生态系统国家野外科学观测研究站 (以下简称禹城站) 的光合有效辐射地面实测资料，对各期光合有效辐射反演结果进行精度验证，同时分析红蓝波段比值对 PAR 反演精度的影响情况。

4.1 气溶胶光学厚度反演结果

图 5 给出了 2014 年 7 月 26 日禹城地区高分影像的原始影像、提取的暗目标点示意图、气溶胶光学厚度反演结果。可以看出，7 月下旬，华北平原作物植被较多且生长旺盛，提取的暗目标点分布广泛。该地区当天雾霾较大，尤其是影像中部从西南至东北的长条状区域雾霾最为严重，其次为西北部地区，东南方则较为晴朗。在最东北角，雾霾导致地面暗目标无法识别，因而无法进行气溶胶反演，形成大片无值区域。最后的气溶胶光学厚度反演结果与影像观察情况基本吻合 (图 5c)，中部从西南到东北的 AOD 值很大，达到了 1.3~1.6；其次是西北区域，除城镇区域 AOD 达到 1.3~1.4 外，其余区域的 AOD 在 1~1.2 之间；东南方的 AOD 值则普遍较低，在 0.5~0.8 之间，而最南边一角的 AOD 同样较大，达到了 1.1~1.5。可以看到，雾霾的存在使得 AOD 值普遍增大，最终将导致 PAR 的降低。

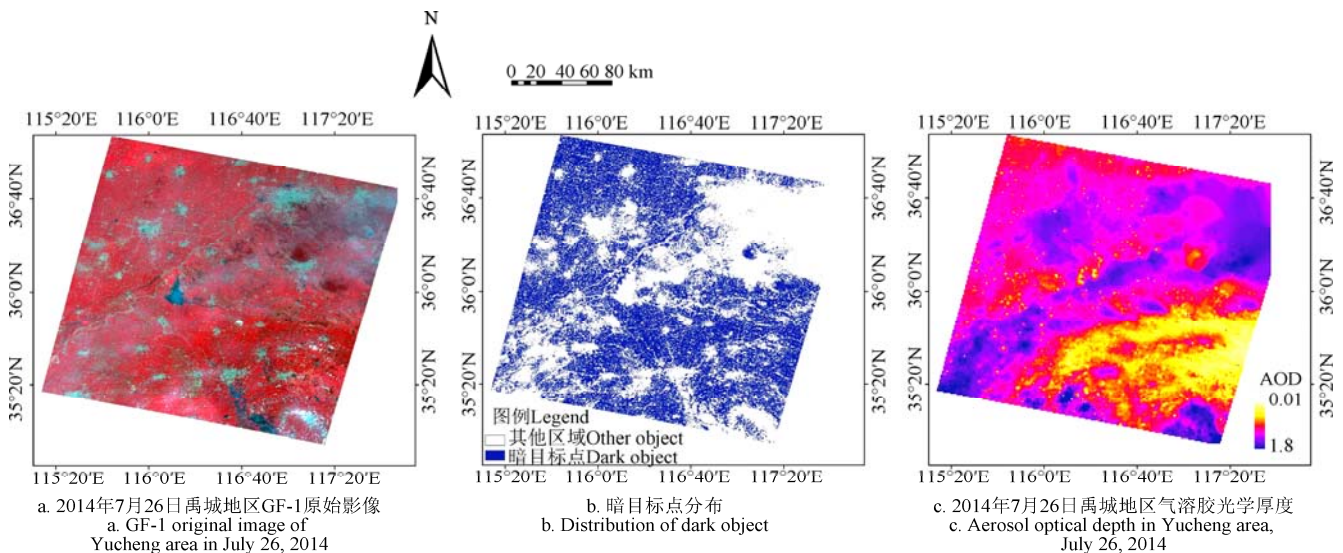


图 5 2014 年 7 月 26 日禹城地区暗目标点提取及气溶胶光学厚度
Fig.5 Dark objects and AOD in Yucheng area, July 26, 2014

4.2 光合有效辐射 PAR 反演

仍以 2014 年 7 月 26 日禹城市的研究结果为例说明，利用 AOD 反演禹城地区 PAR。从图 6 可以明显看出，PAR 的大小与气溶胶光学厚度密切相关。在中部雾霾及 AOD 最大的地区，PAR 最小仅为 $270 W/m^2$ ，而在东南方 AOD 较小的区域，PAR 最大可达 $440 W/m^2$ ，PAR 最低值仅为最高值的 61%。由于光合有效辐射的大小与农作物的生长有密切的联系，华北平原的雾霾可能对该地区作物长势及产量造成负面影响。在 2014 年 7 月 26 日 PAR 反演结果中，从西南到东北的条带状地区 PAR 的值在 $270 \sim 300 W/m^2$ ，而北部除城镇地带在 $300 W/m^2$ 左右外，其余地区在 $300 \sim 320 W/m^2$ 之间；在东南方雾霾未扩散到的地区，PAR 则较大，普遍在 $350 \sim 390 W/m^2$ 左右。

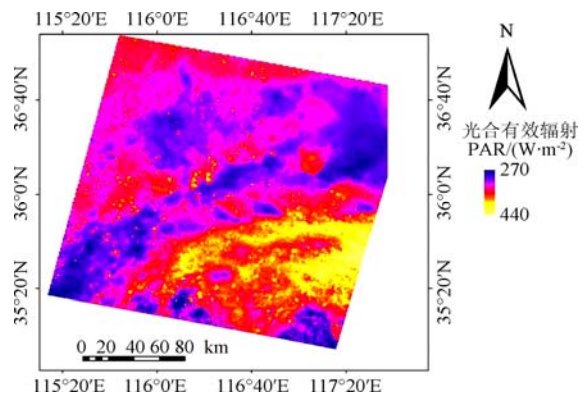


图 6 2014 年 7 月 26 日禹城地区光合有效辐射
Fig.6 Photosynthetically active radiation in Yucheng area, July 26, 2014

4.3 光合有效辐射反演精度验证

使用暗目标法,对禹城地区从 2014 年 4—12 月共 12 景有效的 GF-1 卫星影像数据,进行光合有效辐射遥感反演工作。利用禹城站提供的同一时间地面实测 PAR 进行反演精度验证。由图 7 及表 3 可以看出,PAR 实测值和反演值基本吻合,两者的决定系数达到了 0.9752,误差绝对值平均为 11.36 W/m²,平均误差为 4.23%,总体精度达到了 95.77%,表明利用 GF-1 卫星影像及本文技术方法进行 PAR 的反演具有可行性及精确性。

表 3 光合有效反演值精度
Table 3 Precision of inversion PAR

日期 Data	反演值 Inversion value/(W·m ⁻²)	实测值 Measured value/(W·m ⁻²)	差值 Difference value/ (W·m ⁻²)	误差 Error/%
2014-04-14	312	297	-15	-5.05
2014-10-03	278	274	-4	-1.46
2014-07-26	326	327	0.6	0.18
2014-05-17	365.3	397.3	32	8.05
2014-12-29	136	140	4	2.86
2014-06-07	422	425	3	0.71
2014-11-18	148.78	152	3.22	2.12
2014-07-13	367	379	12	3.17
2014-11-13	223	208	-15	-7.21
2014-11-14	147.4	169	21.6	12.78
2014-05-26	388.3	363	-25.3	-6.97
2014-11-02	233.7	233	-0.60	-0.26

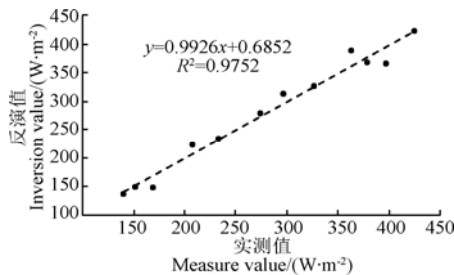


图 7 PAR 实测值与反演值对比

Fig.7 Comparison of measured value and inversion value of PAR

4.4 红蓝波段比值对 PAR 反演精度影响

在暗目标法反演 AOD 及 PAR 过程中,暗目标点红蓝波段反射率比值的确定是重要的一步,但即使对同一传感器,不同的学者得到的比值也不近相同。在不同的研究中,该值的大小从 1.55~2 不等,而本文根据 USGS 波谱库推导的 GF-1 卫星红蓝波段反射率比值为 1.7977。为研究该值大小对于 PAR 反演精度的影响情况,分别设置其值为 1.5、1.6、1.7、1.8、1.9、2.0、2.1,并将截距设置为 0,对 12 景 GF-1 影像进行 PAR 的反演并与地面站结果进行对比,结果如表 4 所示。从表 4 中可以看出,红蓝波段反射率比值设定在 1.5~2.1 之间时,PAR 的反演精度差异并不大;设置在 1.5 和 2.1 时误差稍大,在 1.8 时误差较小。分析其主要原因,在于进行暗目标反演时,该值主要作为辅助约束条件参与 AOD 反演,且在晴空条件下,PAR 的大小受太阳高度角的影响最大,其次才是大气参数中的主要影响因素 AOD,因此比值的细微差异对最终 PAR 反演精度影响较小。

表 4 红蓝波段比值对 PAR 反演精度影响

Table 4 Effect of red and blue band ratio on PAR inversion accuracy

比值 Ratio	PAR 平均差值 Mean D-value of PAR/(W·m ⁻²)	PAR 误差平均值 Mean error of PAR/%
1.5	19.28	8.21
1.6	16.91	7.19
1.7	14.54	6.19
1.8	12.29	5.23
1.9	13.58	5.77
2.0	15.72	6.68
2.1	15.14	6.44

5 结论与讨论

GF-1/WFV 影像具有幅宽大、分辨率高、重访周期短的特点,是进行农情遥感监测理想的数据源。基于大气辐射传输机理,采用 6S 辐射传输模型构建查找表,结合浓密植被(暗目标)方法实现 AOD 反演和大气校正,能够实现 GF-1/WFV 数据 PAR 反演,具有进一步业务化应用的潜力。

在实际运行中,浓密植被(暗目标)可以直接利用 WFV/NDVI 阈值提取。考虑到红蓝波段反射率比值在 1.5~2.1 范围变化时,对 PAR 反演精度影响较小,建议取值在 1.8 左右以获取最高精度。该文确定的红蓝波段之间反射率的比值为 1.7977,截距为 0.0034,决定系数达 0.9826。通过上述阈值设定,光合有效辐射的总体精度达到了 95.77%,误差绝对值平均为 11.36 W/m²,平均误差小于 5%,说明 GF-1/WFV 卫星进行光合有效辐射值反演是可行性。

在计算 PAR 的过程中,通过可见光波段拆分为 10 nm 间隔的 30 个离散波段的方式模拟连续光谱特征,结合 6S 传输模型获取 GF-1/WFV 蓝、绿、红波段离散地表接收太阳光照强度,与整个可见光波段的光合有效辐射的转换系数, a、b、c 等 3 个系数分别为 0.09156、0.09951 和 0.1007,拟合精度为 99.89%。表明 GF-1/WFV 传感器红、蓝、绿 3 个离散波段可用于反演整个可见光波段光合有效辐射值,且精度较高。

云污染、PAR 日变化规律的影响有待深入研究。该文研究的主要是晴空条件下的光合有效辐射值反演,并未考虑云等对 PAR 的影响,后续研究工作对于云层影响下的光合有效辐射反演需要进一步的研究。该文获取的 PAR 为遥感影像成像时刻的瞬时 PAR,在实际的应用中,还需考虑 PAR 在一天各个时段中的变化规律,从而合成日 PAR,同时考虑云和气溶胶的影响,获取更大时间尺度下的 PAR 值及其分布变化规律,最终为农田生态系统光合作用的准确评估提供可靠的产品。

[参 考 文 献]

[1] 张运林, 秦伯强. 太湖地区光合有效辐射(PAR)的基本特征及其气候学计算[J]. 太阳能学报, 2002, 23(1): 118—123.
Zhang Yunlin, Qin Boqiang. The basic characteristic and climatological calculation of the photosynthetically available

- radiation in Taihu region[J]. *ACTA Enrgiae Solaris Sinica*, 2002, 23(1): 118—123. (in Chinese with English abstract)
- [2] 董泰锋, 蒙继华, 吴炳方, 等. 光合有效辐射 (PAR) 估算的研究进展[J]. *地理科学进展*, 2011, 30(9): 1125—1134. Dong Taifeng, Meng Jihua, Wu Bingfang, et al. Overview on the estimation of photosynthetically active radiation[J]. *Progress in Geography*, 2011, 30(9): 1125—1134. (in Chinese with English abstract)
- [3] 李亚兵, 毛树春, 冯璐, 等. 基于地统计学的棉花冠层光合有效辐射空间分布特征[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(22): 200—206. Li Yabing, Mao Shuchun, Feng Lu, et al. Spatial distribution characteristics of photosynthetic active radiation in cotton canopy based on geo-statistics[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2012, 28(22): 200—206. (in Chinese with English abstract)
- [4] Monteith J L. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems[J]. *Journal of Application of Ecology*, 1972, 9(4): 747—766.
- [5] Monteith J L. Climate and the efficiency of crop production in Britain[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B: Biological Sciences*, 1977, B(281): 277—294.
- [6] Winslow J C, Hunt E R, Piper S C. A globally applicable model of daily solar irradiance estimated from air temperature and precipitation data[J]. *Ecological Modelling*, 2001, 143(3): 227—243.
- [7] 周允华, 项月琴. 太阳直接辐射光量子通量的气候学计算方法[J]. *地理学报*, 1987, 42(2): 116—128. Zhou Yunhua, Xiang Yueqin. The climatic estimation of photon flux density of direct solar radiation[J]. *ACTA Geographica Sinica*, 1987, 42(2): 116—128. (in Chinese with English abstract)
- [8] Grant R H, Slusser J R. Estimation of photosynthetic photon flux density from 368nm spectral irradiance[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2004, 21(3): 481—487.
- [9] González J A, Calbó J. Modelled and measured ratio of PAR to global radiation under cloudless skies[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 110(4): 319—325.
- [10] Möttus M, Ross J, Sulev M. Experimental study of ratio of PAR to direct integral solar radiation under cloudless conditions[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 109(9): 161—170.
- [11] Jacovides C P, Tymvios F S, Assimakopoulos V D, et al. The dependence of global and diffuse PAR radiation components on sky conditions at Athens, Greece[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, 143(3/4): 277—287.
- [12] Alados-Arboledas L, Olmo F J, Alados I, et al. Parametric models to estimate photosynthetically active radiation in Spain[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, 101(2/3): 187—201.
- [13] Eck T F, Dye D G. Satellite estimation of incident photosynthetically active radiation using ultraviolet reflectance[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1991, 38(2): 135—146
- [14] Tripathy M, Raman M, Chauhan P. Estimation of photosynthetically available radiation (PAR) from OCEANSAT-I OCM using a simple atmospheric radiative transfer model[J]. *Advances in Space Research*, 2015, 56(7): 1441—1452.
- [15] Pinker R T, Ewing J A. Modeling surface solar radiation: Model formulation and validation[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1985, 24(5): 389—401.
- [16] Frouin R, Lingner D W, Gautier C, et al. A simple analytical formula to compute clear sky total and photosynthetically available solar irradiance at the ocean surface[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1989, 94: 9731—9742.
- [17] 张喜旺, 于宁, 秦奋, 等. 基于遥感的植被吸收光合有效辐射估算[J]. *生态科学*, 2013, 32(5): 604—608. Zhang Xiwang, Yu Ning, Qin Fen, et al. Assessment of vegetation absorbed photosynthetic active radiation based on remote sensing[J]. *Ecological Science*, 2013, 32(5): 604—608. (in Chinese with English abstract)
- [18] Liang S, Zheng T, Wang D, et al. Mapping high-resolution incident photosynthetically active radiation over land from polar: Orbiting and geostationary satellite data[J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2007, 73(10): 1085—1089.
- [19] Chen Zhuoqi, Shao Quanqin, Liu Jiyuan, et al. Estimating photosynthetic active radiation using MODIS atmosphere products[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2012, 16(1): 25—37.
- [20] Singh S, Raman K, Dwivedi R M, et al. An approach to compute photosynthetically Active Radiation using IRS P4 OCM[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2008, 29(1/2): 211—220.
- [21] 谢小萍, 高志强, 高炜. MODIS 产品估算复杂地形下的光合有效辐射[J]. *遥感学报*, 2009, 13(5): 779—791. Xie Xiaoping, Gao Zhiqiang, Gao Wei. Estimation of land instantaneous photosynthetically active radiation over complex terrain based on MODIS products[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2009, 13(5): 779—791. (in Chinese with English abstract)
- [22] 刘荣高, 刘纪远, 庄大方. 基于 MODIS 数据估算晴空陆地光合有效辐射[J]. *地理学报*, 2004, 59(1): 64—73. Liu Ronggao, Liu Jiyuan, Zhuang Dafang. Estimation of land photosynthetically active radiation in clear sky using MODIS[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(1): 64—73. (in Chinese with English abstract)
- [23] Liu R, Liang S, He H, et al. Mapping incident photosynthetically active radiation from MODIS data over China[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(3): 998—1009.
- [24] Pinker R T, Laszlo I. Global distribution of photosynthetically active radiation as observed from satellites[J]. *Journal of Climate*, 1992, 5(1): 56—65.
- [25] Pinker R T, Laszlo I. Modeling surface solar irradiance for satellite applications on global scale[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1992, 31(2): 194—211.
- [26] Hsu N C, Tsay S C, King M D, et al. Aerosol properties over bright-reflecting source regions[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2004, 42(3): 557—569.
- [27] Hsu N C, Tsay S C, King M D, et al. Deep blue retrievals of Asian aerosol properties during ACE-Asia[J]. *IEEE Transactions Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(11): 3180—3195
- [28] 王中挺, 厉青, 王桥, 等. 利用深蓝算法从 HJ-1 数据反演陆地气溶胶[J]. *遥感学报*, 2012, 16(3): 596—610. Wang Zhongting, Li Qing, Wang Qiao, et al. HJ-1 terrestrial aerosol data retrieval using deep blue algorithm[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2012, 16(3): 596—610. (in Chinese with English abstract)
- [29] Kaufman Y J, Tanré D, Remer L A, et al. Operational remote sensing of tropospheric aerosol over land from EOS Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1997, 102067(D14): 17.
- [30] Cracknell Y X A P. Operational bi-angle approach to retrieve the Earth surface albedo from AVHRR data in the visible band[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1995, 16(3): 417—429.
- [31] Kaufman Y J, Wald A, Remer L A, et al. Remote sensing of aerosol over the continents with the aid of a 2.2 μm channel[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1997, 35: 1286—1298.

- [32] Kaufman Y J, Sendra C. Algorithm for automatic atmospheric corrections to visible and near-IR satellite imagery[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1988, 9: 1357—1381.
- [33] 王中挺, 陈良富, 巩慧, 等. CBERS02B 卫星 CCD 传感器数据反演陆地气溶胶[J]. *遥感学报*, 2010, 13(6): 1047—1059.
Wang Zhongting, Chen Liangfu, Gong Hui, et al. Modified DDV method of aerosol optical depth inversion over land surfaces from CBERS02B[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2010, 13(6): 1047—1059. (in Chinese with English abstract)
- [34] 中国资源卫星应用中心. 2014 年绝对辐射定标系数—GF-1, ZY-3, ZY-102C, SJ-9A, HJ [EB/OL]. <http://www.cresda.com/n16/n1115/n1522/n2103/191962.html>, 2014-10-09.
- [35] 罗江燕, 塔西甫拉提·特依拜, 陈金奎. 基于表现反射率的渭一库绿洲植被动态变化分析[J]. *水土保持研究*, 2008, 15(5): 65—67.
Luo Jiangyan, Tashpolat Tiyp, Chen Jinkui. Analysis on dynamic change of Wei-ku oasis vegetation based on surface reflectance[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2008, 15(5): 65—67. (in Chinese with English abstract)
- [36] 刘佳, 王利民, 杨玲波, 等. 基于 6S 模型的 GF-1 卫星影像大气校正及效果[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(19): 159—168.
Liu Jia, Wang Limin, Yang Lingbo, et al. Atmospheric correction of GF-1 image based on the 6S Model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2015, 31(19): 159—168. (in Chinese with English abstract)

Inversion of photosynthetically active radiation based on GF-1 image by dark object method

Wang Limin, Yang Lingbo, Liu Jia, Yang Fugang, Shao Jie, Yao Baomin

(*Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China*)

Abstract: Photosynthetically active radiation (PAR) is an important influential factor of vegetation photosynthesis, and the study on its size and spatial distribution has an important significance in many fields such as ecosystem study, agriculture monitoring, and ground-air energy exchange. To meet the demand of GF-1 satellite PAR remote sensing inversion, the paper establishes an atmospheric parameter look-up table (LUT), utilized major atmospheric parameters, such as linear relation of reflectivity between blue band and red band of dark dense vegetation as well as inversed aerosol optical depth (AOD), and finally successfully inversed the ground PAR based on atmospheric radiation transfer model. The paper also conducted accuracy verification on the inversion result by using actually measured ground PAR. Dark dense vegetation algorithm used the fixed linear relation of reflectivity between blue band and red band of dark dense vegetation in the GF-1 images to inverse the AOD. Identification of dark dense vegetation was mainly based on NDVI (normalization difference vegetation index) values. Using typical vegetation spectral library provided by the USGS (United States Geological Survey), and based on GF-1 spectral response function convolution, the surface reflectivity of the vegetation in various wavebands were obtained, the proportionality coefficient of ground surface reflectivity between red band and blue band was analyzed, and finally obtained the proportionality coefficient of 1.7977 with the intercept of 0.0034, and the determination coefficient of 0.9826. By taking linear relation of vegetation reflectivity between red band and blue band as constraint condition, and combined with radiation transfer equation, the aerosol and atmospheric parameter LUT was established and the AOD was inversed based on the LUT. Meanwhile, the spatial interpolation was made by using the property of continuity of AOD to acquire the AOD of the overall study area. After the inversion of AOD, atmospheric parameters such as atmospheric transmittance and hemisphere albedo were calculated. Finally ground solar radiation intensities in red, green and blue wave band of GF-1 satellite image were calculated. By studying the relation between ground surface solar radiation intensities of blue, green and red waveband in GF-1 satellite image and overall 400-700 nm PAR value, the paper had worked out the 3 conversion coefficients of 0.09156, 0.09951, and 0.1007 respectively, and thus realized the inversion from the ground solar radiation intensity of 3 discrete wavebands to PAR. The study selected 12 pieces of GF-1 effective data from April 2014 to December 2014 in the study area in Yucheng City, Shandong Province to inverse AOD and PAR, and verifies the results by comparing them with actually measured data in Yucheng experimental station of Chinese Ecosystem Research Network (CERN). The result showed that the overall accuracy of PAR had reached 95.77% with the average absolute error of 11.36 W/m² and the average error less than 5%, indicating the correctness and precision of the method proposed by this paper, and also indicating the feasibility of PAR inversion by using GF-1 satellite images. The study also showed that the spatial distribution of PAR had significant correlation with AOD, and the higher the AOD was, the lower the PAR would be. By changing proportionality coefficient of vegetation reflectivity between red band and blue band, the study had found that when the coefficient value was approximately 1.5-2.1, its impact on PAR inversion accuracy was small. It was suggested to set the value to approximately 1.8 in order to achieve high accuracy. The method proposed by this paper can accurately inverse clear sky PAR with only original GF-1 satellite images without additional support data. This method was featured with simple production process and easy to be applied in the PAR operation inversion. It can provide important early-stage product data support for crop production estimation based on PAR in agricultural remote sensing monitoring practice.

Keywords: remote sensing; radiation; spectrum analysis; photosynthetically active radiation; GF-1; aerosol optical depth