基于卫星数据的地表下行短波辐射估算: 方法、进展及问题

胡斯勒图¹, 施建成^{1*}, 李明¹, 王天星¹, 尚华哲¹, 雷永荟¹, 姬大彬¹, 闻建光¹, 阳坤², 陈良富¹

1. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100010;

2. 清华大学地球系统科学系, 北京 100049

* 通讯作者, E-mail: shijc@radi.ac.cn

收稿日期: 2019-02-22; 收修改稿日期: 2020-02-03; 接受日期: 2020-02-14; 网络版发表日期: 2020-04-14

第二次青藏高原科学考察与研究计划(STEP)项目(编号: 2019QZKK0206)、国家自然科学基金项目(批准号: 41771395)和中国科学院战略性先导科技专项A类项目(编号: XDA20100300)资助

摘要 地表下行短波辐射的估算对全球辐射平衡及气候变化研究具有重要的意义. 文章从卫星载荷、反演算法和发展趋势等方面, 回顾和总结了近十年来地表下行短波辐射的相关研究. 到达地表的短波辐射受大气和陆表参数的双重影响. 最近的研究对影响地表下行短波辐射的因素给予了更细致的考虑, 例如通过提升云微物理参数的反演精度, 降低云层引入的不确定性, 以及考虑气溶胶、复杂地形和高反照率地表(如冰雪覆盖区)对地表下行短波辐射估算的影响等. 此外, 文章还对当前地表下行短波辐射估算的四类主要方法(经验法、参数化法、查找表法和机器学习法)的精度和优缺点进行了对比分析. 未来需要提高云、雾霾、水汽等大气参数及复杂地形和亮地表的反照率等陆表参数的计算精度, 有机结合机器学习和其他方法, 利用新一代静止卫星和极轨卫星资料生产高时空分辨率地表下行短波辐射产品, 推进辐射产品在陆面水文模型和气候模式中的应用.

关键词 地表下行短波辐射, 卫星遥感, 云光学厚度, 气溶胶, 地形校正

1 引言

地表下行短波辐射(Downward Surface Shortwave Radiation, DSSR)(波长范围 $0.3\sim 3.0\mu\text{m}$)是大气顶的太阳辐射经大气中的气体、云、气溶胶等吸收、散射的多重作用后最终到达地表的部分. DSSR作为地球净辐射收支的重要组成部分, 是生物圈以及地球化学循环

的主要能量来源, 其精度对植被光合作用(Wang等, 2015)、地-气感热/潜热交换、水循环等过程的准确模拟具有重要作用(Wang和Dickinson, 2013). DSSR的估算精度受云、气溶胶、大气水汽及地形等参数影响, 会给地表能量平衡估算、气候变化研究等带来一定的不确定性. 多年来, DSSR的观测手段主要依赖于有限的地面观测站点, 较低时空分辨率的卫星(极轨卫星为

中文引用格式: 胡斯勒图, 施建成, 李明, 王天星, 尚华哲, 雷永荟, 姬大彬, 闻建光, 阳坤, 陈良富. 2020. 基于卫星数据的地表下行短波辐射估算: 方法、进展及问题. 中国科学: 地球科学, 50: 887–902, doi: [10.1360/SSTe-2019-0032](https://doi.org/10.1360/SSTe-2019-0032)

英文引用格式: Letu H, Shi J, Li M, Wang T, Shang H, Lei Y, Ji D, Wen J, Yang K, Chen L. 2020. A review of the estimation of downward surface shortwave radiation based on satellite data: Methods, progress and problems. Science China Earth Sciences, 63: 774–789, <https://doi.org/10.1007/s11430-019-9589-0>

主)及再分析资料, 很难满足目前地表过程研究中对DSSR输入数据的要求. 随着近年来新一代静止卫星的成功发射以及遥感技术与机器学习方法的深度融合, 基于卫星遥感的DSSR估算在时空分辨率、计算精度方面有了显著提高(Hänsch等, 2018; Letu等, 2020; Ma等, 2020).

利用卫星观测数据估算DSSR的研究可以追溯至20世纪60年代. Fritz等(1964)利用TIROS-3卫星观测资料 and 地面站点的地表短波辐射数据之间的线性关系, 提出了基于卫星资料的DSSR估算方法. Hanson(1971)首次利用气象卫星数据定量计算了DSSR. 随着卫星观测平台和理论技术的不断发展, 目前已发展出多种DSSR估算方法, 总体归纳为以下四类: 经验法(Justus等, 1986; Schmetz, 1989)、参数化法(Gautier等, 1980; Diak和Gautier, 1983; Key等, 2002; Gupta等, 2004; Bisht和Bras, 2010; Qin等, 2011; 彭丽春等, 2015; Qin等, 2015)、查找表法(Müller等, 2009; Lu等, 2010; Huang等, 2011; Liang等, 2013a; Zhang Y等, 2018)和机器学习法(Tang等, 2006; Müller等, 2009; Kim和Liang, 2010; Wang等, 2012). 经验法基于卫星观测资料 and 地基观测资料来简化太阳辐射在大气传输中的复杂衰减过程, 获得大气辐射传输的简化公式并进一步计算DSSR. 机器学习法在一定层面上属于经验类方法, 与经验法的区别在于融合了遥感和计算机技术, 重在训练数据的灵活解析和训练方式的选择, 并通过对不同输入数据的多层次学习, 获取最优化的结果. 查找表法严格遵循大气辐射传输过程, 建立条件和结果一一对应的查找表, 利用反演方法从预先计算的查找表获得DSSR. 参数化方法通过简化辐射传输计算的过程, 利用卫星遥感资料获取的云和水汽等信息计算DSSR. 经验法、参数化法、查找表法和机器学习法各具有不同的优势与劣势, 应结合不同卫星观测平台灵活使用.

自2010年以来, GOES-R(Schmit等, 2005)、Himawari-8(H-8)(Letu等, 2019, 2020)、风云4(FY-4)(Yang等, 2017)等具有高时空分辨率的新一代静止卫星成功发射. 相对于以往的静止卫星(Cano等, 1986), 新一代静止卫星具有更好的观测和描述云、气溶胶光学和微物理特性及其时空变化特征的能力, 为精确估算DSSR提供了重要的契机. GOES-R卫星搭载的ABI(Advanced Baseline Imager)传感器具备了2个可见光波段

(中心波长为0.47和0.64 μm)以及14个红外通道(0.86~13.3 μm)(Schmit等, 2005), 可见光波段的空间分辨率为0.5km, 短波红外、近红外和热红外波段的空间分辨率分别为1和2km(Miller等, 2003), 能为发展北美洲高时空分辨率DSSR产品提供重要的数据源. H-8卫星搭载的AHI(Advanced Himawari Imager)传感器在圆盘观测范围的时间分辨率为10min(覆盖东亚和西太平洋地区), 波段3(中心波长为0.64 μm)的空间分辨率为0.5km, 其他波段的分辨率分别为1和2km(Letu等, 2019; Shang等, 2018, 2019; Wang等, 2019). FY-4卫星搭载的多通道扫描成像辐射计, 最高时间分辨率为15min, 空间分辨率为0.5、1、2和4km, 具备有效获取大气和地表物理参量的能力, 是发展东亚和大洋洲高时空分辨率DSSR产品的重要数据源(Yang等, 2017; Min等, 2017). 随着卫星遥感技术的发展, 近年来基于新卫星资料的DSSR估算算法也不断成熟. 马润等(2019)利用H-8卫星数据, 结合查找表方法估算了东亚地区的全天候DSSR, 得出计算结果与地面观测资料相关系数高达0.94、0.97和0.89, RMSE分别为94.1、62.9和110.6 W m^{-2} . Yu等(2019)利用东亚地区站点资料对H-8官方DSSR产品进行精度验证, 证实其精度优于已有静止卫星产品和多个再分析资料. Damiani等(2018)利用SKYNET站点辐射数据(<http://atmos2.cr.chiba-u.jp/skyenet/>)评价H-8估算的DSSR产品, 结果显示4个站点的相关系数分别为0.948、0.959、0.957和0.958, RMSE分别为105.0、88.2、89.9和79.4. 总体来看, 利用新一代静止卫星数据获取的DSSR产品均方根误差(RMSE)较2010年之前的估算结果普遍降低, 说明新一代静止卫星提供了更为可靠的观测数据, 为不断探索更为有效的估算方法提供了新的机遇.

然而, 目前基于卫星资料的DSSR估算仍存在以下难题: (1) 估算过程中所需的云物理参数反演方面仍存在一定的不确定性(Huang等, 2019). Nakajima和King(1990)、Nakajima和Nakajima(1995)利用一维辐射传输模式模拟了大气顶层卫星接收到的水云反射率, 发现云光学厚度在可见光通道(0.64 μm)较为敏感, 云粒子有效半径在短波红外通道(1.6、2.1、3.7 μm 附近)的敏感性较为显著, 可综合利用可见光和短波红外波段通道(双通道方法)对云光学厚度和云粒子有效半径进行反演, 结合辐射传输模式可进一步计算DSSR. 然而该方法仍存在一定的不确定性. 例如, 一维辐射

传输模式中云的宏观物理量包括三维(three-dimension, 3-D)结构(Okata等, 2017)、水平和垂直方向的非均匀性、云层数等多以假设为主, 使得最终反演的云微物理参数和DSSR计算结果产生一定的误差. (2) 复杂地形的影响. 地形影响地表反照率(闻建光等, 2008; Wen等, 2014; Hao等, 2018; Wu等, 2018a, 2018b), 是继云之后影响短波辐射最大的因素之一, 也是复杂地形区域辐射收支问题较难解决的原因之一(段克勤等, 2017). 近年来部分研究取得了较好的成果(Yang等, 2008; Wang等, 2015; Wang等, 2018), 然而很难满足生产复杂地形区域高精度DSSR产品的需求. (3) 遥感数据的时空连续性较差. 受限于传感器特定时空分辨率及云、水汽等变量的多变性影响, 目前利用单一传感器观测资料很难构建时空连续的全球尺度短波辐射产品, 如单用极轨卫星难以满足获取高时间分辨率地表辐射的需求, 而单用静止卫星虽然提高了时间分辨率, 然而无法满足全球覆盖的观测, 特别是极地地区即使利用多个静止卫星也无法覆盖. 因此, 未来可加强利用多传感器、联合多算法进行综合研究(Zhang F等, 2018).

综上所述, 新卫星载荷的成功发射为准确估算DSSR提供了新的机遇, 同时也充满挑战. 针对近年来的发展动态, 本文重在梳理2010~2020年期间基于卫星遥感估算DSSR的研究进展, 阐述基于卫星遥感的DSSR估算方法和卫星观测平台发展之间的联系. 同时, 梳理研究中面临的难题并探讨相应的解决方案.

2 卫星平台和产品

自20世纪60年代起极轨和静止卫星的成功发射, 为更好地认识地表能量平衡提供了重要的观测平台和数据源, 如Nimbus-7卫星搭载的Earth Radiation Budget (ERB)传感器(Jacobowitz等, 1984)、Terra和Aqua卫星搭载的Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES)传感器和MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer(MODIS)传感器、MSG卫星搭载的Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager(SEVIRI)传感器、FY-4卫星搭载的多通道可见光红外扫描成像仪和红外高光谱探测仪(干涉式大气垂直探测仪), 以及H-8卫星搭载的AHI传感器等. 极轨卫星相较静止卫星具有较高的空间分辨率以及丰富的波段设置, 如中分

分辨率成像光谱仪MODIS的最高空间分辨率为250m, 从可见光到热红外共计36个波段, 可获取详细的大气、陆表和海洋表面参量信息(Chen等, 2014). 传统的静止卫星相较极轨卫星具有更高的时间分辨率, 然而空间分辨率和波谱分辨率明显低于极轨卫星. 例如, 中国风云2D(FY-2D)静止卫星的观测频率为30min, 最高空间分辨率为1.25km, 共有5个波段. 相较FY-2D卫星, 2016年发射成功的中国FY-4新一代静止卫星在时空和波谱分辨率上有了明显的改进. FY-4具备高达15min的圆盘观测能力, 最高空间分辨率高达500m, 共有14个不同观测波段, 观测能力有了显著提高, 空间和波谱分辨率接近MODIS等中分辨率极轨卫星.

基于上述的卫星资料, 已发展出了一批全球DSSR产品(表1), 如ISCCP-FD(International Satellite Cloud Climatology Project-Flux Data)(Ma等, 2007)、GEWEX-SRB(Global Energy and Water Exchanges-Surface Radiation Budget)(Gupta等, 1999)、ERBE(Earth Radiation Budget Experiment)(Li等, 1993a; Li和Leighton, 1993; Barkstrom, 1984)、UMD-SRB(the University of Maryland-Shortwave Radiation Budget)(Ma等, 2007)、CM-SAF SARA(H)(Satellite Application Facility on Climate Monitoring Solar Surface Radiation Heliosat)(Buffat和Grassi, 2015), 以及CERES(Clouds and the Earth's Radiant Energy System)系列产品(https://ceres.larc.nasa.gov/order_data.php), 包括CERES-EBAF(Energy Balanced and Filled)、CERES-SYN(Synoptic TOA and surface fluxes and clouds)和CERES-FSW(Monthly Gridded Radiative Fluxes and Clouds)产品. Liang等(2013a, 2013b)基于MODIS卫星资料开发了GLASS(Global Land Surface Satellite Data)产品, 相较以往的辐射产品GLASS的空间分辨率有了明显的提高, 并应用于生产空间分辨率为5km的地表净辐射产品(Jiang等, 2016). 国内外学者利用上述全球DSSR卫星遥感产品生产区域性DSSR产品并利用地基观测数据评估各产品精度, 同时开展DSSR卫星产品的对比工作(Huang等, 2016a). Stuhlmann等(1990)利用ISCCP-B2数据(Schiffer和Rossow, 1985)分析了1985~1986年期间地表太阳总辐射及其散射部分的日总量的月均值变化, 采用的ISCCP-B2数据空间分辨率为30~50km, 时间分辨率为3h, 计算了总太阳辐射每日总量的月均值与散射辐射每日总量的月均值, 结果与200个地面站数据

表 1 目前卫星地表短波辐射产品简介^{a)}

地表太阳辐射产品	辐射产品主要来源	空间分辨率	时间分辨率	时间范围
ISCCP-FD	ISCCP	280km	3小时	1983-07~2009-12
GEWEX-SRB	ISCCP-DX	1°	3小时, 每日和每月	1983-07~2007-12
UMD-SRB	METEOSAT-5	0.5°	每月	1983-07~2007-06
ERBE	ERBS&NOAA	30~50km	3小时	/
CERES-EBAF	CERES	1°	每月	2000-03~2013-03
CERES-SYN	CERES	1°	3小时	/
CERES-FSW	CERES	1°	1小时	/
CM-SAF SARA	GOES	>100km	3小时	/
GLASS-DSR	Terra/Aqua, GOES, MSG, MTSAT	0.05°	3小时	2008~2010
MCD18A1	Terra/Aqua, MODIS	5.6km	3小时	2001至今
Himawari-8 SWSR	Himawari-8	5km	10分钟	2015至今

a) “/”表明这项内容未查到相关资料

进行验证, 总体偏差为10%。Bishop和Rossow(1991)采用ISCCP-C1(Gridded Cloud Product)和CX(Pixel Level Cloud Product)产品数据估算DSSR, 其时间、空间分辨率分别为3h和250km, 评估结果得出在海面和陆表的日均DSSR平均偏差分别不超过6和10W m⁻²。Zhang X T等(2015)利用地面站数据评估了ISCCP-FD、GEWEX-SRB、UMD-SRB和CERES-EBAF四种产品(见表1), 得出CERES-EBAF产品与观测数据的相关系数优于其余三个产品的结果。Gui等(2010)利用地基点数据对CERES-FSW、ISCCP-FD和GEWEX-SRB三种产品进行评价, 得出在一些高纬度地(如格陵兰岛)和地形复杂地区(如南亚和青藏高原地区), 三种产品都显示较大的偏差, GEWEX-SRB的年均产品在南亚地区偏差在-90.2~45.8W m⁻², ISCCP-FD的DSSR年均产品在南亚和格陵兰岛地区的误差分别达到58.9和-33.2W m⁻², CERES-FSW的DSSR年均产品在南亚和日本地区的偏差达到72.6和66.5W m⁻²。在青藏高原地区和南亚地区, 其年均结果与地基观测数据的偏差也较大, 相关系数分别为0.35和0.47。Yang等(2006)以青藏高原为例比较分析DSSR产品, 发现在复杂山区卫星估算辐射的误差大于平坦地区。Yang等(2008)通过分析GEWEX-SRB产品精度, 揭示了GEWEX-SRB产品由于没有考虑高程效应, 在复杂地形区域存在系统误差。Rutan等(2015)比较了CERES-SYN、ISCCP-FD和GEWEX-SRB三种产品, 得出CERES-SYN精度最高的结果。Yu等(2019)利用东亚地区34个站点数据验证了

Himawari-8的5km瞬时DSSR产品, 验证结果显示全天候、晴空和有云条件下5km产品的偏差分别为19.7、19.9和18.7W m⁻², RMSE分别为111.1、66.2和136.7W m⁻²。同时显示Himawari-8的官方产品在精度和时空分辨率方面都优于CERES-SYN产品。

综上所述, 在已有的全球卫星遥感DSSR产品中, 部分产品的空间分辨率较粗糙, 不能满足高时空分辨率产品的生产需求。上述DSSR产品所使用的卫星平台不同(极轨、静止卫星), 受云、气溶胶的影响不同, 不同卫星传感器所获取的信息具有差异, 导致产品间具有不同的精度; 同时, DSSR产品在复杂地形区域的精度较差, 不利于DSSR产品在上述区域的应用。

3 DSSR估算算法进展

DSSR的估算算法随着卫星观测平台的发展与计算机技术的引入愈发成熟, 近几年呈现系统化、多学科交叉融合的趋势。卫星遥感估算DSSR的基本原理为: 通过卫星观测资料所提供的云、气溶胶和水汽, 计算它们对太阳辐射的影响, 估算到达地表的下行短波辐射(见图1)。

早期, 由于算法的种类较少且各算法之间的特点和优势不突出, DSSR的估算方法仅以经验法和物理法进行区分(Pinker等, 1995)。卫星观测平台的发展为DSSR估算算法的发展提供了更多的可能(Huang等, 2016b)。传统的静止卫星虽然时间分辨率高, 但波谱信

图1 太阳辐射传输过程示意图

据Iqbal和Valnicsek(1983)

息较为缺乏导致能够获取的大气背景信息不足, 辐射传输理论不能被很好的利用于DSSR估算中. 相较于传统静止卫星, 极轨卫星丰富的波谱信息及每个波段较高的空间分辨率, 能够提供较为丰富的大气信息, 如云、气溶胶和水汽等, 为基于物理基础的参数化法和查找表法的发展提供了机遇. H-8、GOES-R和FY-4等新一代静止卫星的观测能力进一步提高, 其能够提供时空分辨率更高的大气输入参数, 促进查找表法的多元化发展. 同时, 计算机技术极大地提高了卫星数据的解译速度和算法的运算效率, 机器学习等方法越来越多的应用于DSSR估算中. 本文将DSSR估算算法总结为经验法、参数化法、查找表法和机器学习法四类方法. 3.1~3.5节叙述了四种反演方法及精度的比较.

3.1 经验法

经验法其原理为基于到达地表的短波辐射已知值, 如地面站观测数据, 建立其与大气层顶反射辐射亮度之间的统计关系, 从而利用卫星观测的反射辐射亮度值估算DSSR. 一些学者(Tarpley, 1979; Klink和Dollhopf, 1986; Li等, 1993b; Pinker等, 1995)基于GOES卫星的观测反射值利用经验法估算地表DSSR, 精度满足一定研究的需求. 然而, 经验法基于统计关系, 仅将大气层顶辐射亮度和地面已知观测辐射值作为变量建立线性回归方程, 忽视云、气溶胶对于DSSR的削减影响, 能够导致晴空条件下DSSR的低估和有云条件下DSSR的高估. 随着理论的逐渐发展, 经验法在已有原理的基础上增加了云量的参数. Klink和Dollhopf(1986)在线性回归方程中增加云量信息, 基于GOES观测数

据采用阈值法确定三类云信息, 联合地面观测站的水汽量与地面压强建立不同云下的DSSR的线性回归方程. 验证结果显示在太阳辐射较低的区域估算结果高于观测值, 而在太阳辐射较强的地区估值偏低. 经验法为早期的参数化法提供了思路, 部分机器学习方法也在一定程度上以此为基础更进一步深化.

经验法操作简单, 当研究的区域面积较小且一定时间内地表特征变化可忽略时, 经验法可以取得较高的精度. 其缺点一是线性回归数学方程式的物理机制不明确, 参数单一; 二是对于已建立好的经验关系无法推广到其他不同地表类型地区的DSSR估算. 同时, 经验法无法适用于具有高反射特性的冰面、积雪覆盖的地表等.

3.2 参数化法

入射到地面的短波辐射也可以看作是大气层顶的入射太阳辐射值和大气透过率的乘积在地表法向量上的分量. 由于大气透过率的计算比较复杂, 因此一些学者寻求一些简单的参数化方案, 基于一些核心影响因素如太阳天顶角、水汽等估算DSSR. Vulis和Cess(1989)通过不同天顶角(15个角度)、大气、云和地表条件组合下的辐射拟合试验, 发现地表和大气层顶的太阳辐射具有近似的线性回归关系(Cess等, 1991; Schmetz, 1989), 但其参数化方程中没有将太阳天顶角作为变量使用. Li等(1993b)将太阳天顶角引入到参数化方程中作为估算的参数之一. 早期的参数化方法(Zillman, 1972; Meza和Varas, 2000; Ertekin和Evrendilek, 2007)以简化的大气辐射传输原理为基础, 参数较少, 模型较为简单. 较为经典的为Iqbal模型(Iqbal和Valnicsek, 1983), 其基于辐射传输原理, 表达式如(1)和(2)所示:

$$I = I_n \cos \theta_z + I_d, \quad (1)$$

$$I = I_n \cos \theta_z + I_{dr} + I_{da} + I_{dm}, \quad (2)$$

式中, I_n 为直射部分, I_d 为散射部分. I_{dr} 为瑞利散射部分, I_{da} 为气溶胶散射部分, I_{dm} 为多重散射部分.

随着卫星数据能够提供更为丰富的信息, 越来越多的参数化方法将卫星的大气产品数据作为参数化方程的输入数据. 同时, 随着辐射传输原理理论不断完善, 近年来的参数化方法(Gupta等, 2002; Bisht等, 2005; Wang和Pinker, 2009; Bisht和Bras, 2010; 彭丽春

等, 2015; Tang等, 2016, 2017a, 2017b; Huang等, 2018) 考虑大气中更多的假设条件和影响因素。Masuda等(1995)考虑了大气臭氧浓度、气溶胶类型和光学厚度、近地表气压、云高以及云相态等信息, 利用LOWTRAN 7建立参数化方程估算DSSR。Tang等(2006)在Li等(1993b)参数化方案的基础上, 重新计算了其参数化方案中的公式系数, 利用MODIS产品获得大气层顶辐射亮度、地表反照率、总水汽含量和云物理参数, 并采用MODTRAN 4模式建立参数化方案估算DSSR, 结果与禹城地基站测量数据比较, 晴空空条件下的RMSE小于 20W m^{-2} , 有云条件下小于 35W m^{-2} 。Qin等(2015)利用MODIS大气和陆地产品, 如臭氧光学厚度、水汽、气溶胶含量、冰云和水云有效粒子半径、云占比和地表反照率等建立晴空、有云和全天空三种条件的多重参数化方程。Tang等(2019)使用改进的参数化方案生产了16年(2000~2015年)的高分辨率(3h, 10km)全球DSSR数据集, 与地面辐射数据观测网进行验证, 10km尺度的验证结果表明MBE、RMSE和相关系数分别为 -11.5W m^{-2} 、 113.5W m^{-2} 和0.92。近几年也有学者在参数化方法中加入神经网络(neural network, NN)等算法, 取得较好的估算结果(Qin等, 2011)。

3.3 查找表法

查找表法是基于辐射传输模型的正向模拟结果来构建查找表, 并进一步获取DSSR的方法。查找表法的

基本思路为建立大气层顶辐射亮度与到达地表的太阳辐射之间的条件-结果对应关系, 通过实际观测的大气层顶辐射亮度或表观反照率, 从条件-结果数据表中查找出与该条件值最接近的模拟值所对应的结果(图2), 进一步精确估算DSSR。在具体实施中, 利用辐射传输模型计算一定间隔的不同观测几何(太阳天顶角、观测天顶角、相对方位角)和大气状况(云参数、气溶胶、水汽、臭氧等)等条件下的DSSR值, 建立与卫星观测信息对应的查找表, 通过利用插值方法从查找表和卫星观测数据反演任意给定条件下DSSR。LOWTRAN(Kneizys, 1988)、MODTRAN(Berk等, 1998)、STREAMER(Key和Schweiger, 1998)以及R-STAR(Nakajima和Tanaka, 1986)等模式都曾用于生成反演查找表。查找表可以节约运算时间、提高反演效率。

Liang等(2013a, 2013b)基于MODTRAN模型建立了大气顶辐射亮度与大气状况指数以及地表辐射三者之间的关系, 构建查找表估算DSSR, 一定程度上简化了复杂参数化的计算。Müller等(2009)构建CM-SAF查找表算法MAGIC(Mesoscale Atmospheric Global Irradiance Code), 针对晴空和有云条件应用两种不同的查找表分别计算DSSR。近年来查找表法用得越来越多, 趋于成熟, 并从多方面进行了优化处理和完善。一方面, 通过敏感性分析的结果, 优化查找表输入数据的选择。Huang等(2011)采用敏感性分析研究了AOD(Aerosol optical depth)和COD(Cloud optical depth)对DSSR的影响, 结合MODIS数据产品和MTSAT(Multi-

图2 利用查找表估算DSSR的流程图

据Müller等(2009)

functional Transport Satellite)卫星数据建立晴空和有云条件下查找表, 并优化插值网格提高查找表的运行效率, 5个站点验证的相关系数的均值为0.958, RMSE均值为 97.4 W m^{-2} . Zhang等(2014)从MODIS卫星MOD02和MYD02观测辐射亮度值中估算2008~2010年时空分辨率为3h和5km的DSSR和其重要组成部分光合有效辐射(Photosynthetically Active Radiation, PAR). 进一步地, Zhang等(2018)采用辐射传输方程和一个代价函数

(cost function)同时对大气和地表的参数进行优化处理, 仅利用MODIS的大气层顶光谱反射率建立查找表, 其他多重参数作为约束条件输入. 另一方面, 在查找表中引入更高时间分辨率的云、气溶胶产品, 以提高DSSR产品的精度. 图3为马润等(2019)和Ma等(2020)利用10分钟时间分辨率的H-8二级云、气溶胶产品结合查找表计算得到的DSSR, 与日本宇宙航空研究开发机构(Japan Aerospace Exploration Agency,

图3 H-8真彩图(第一行)、基于查找表计算的H-8 DSSR(第二行)和H-8卫星二级DSSR产品(第三行)
据马润等(2019)

JAXA)生产的H-8二级DSSR产品的对比结果, 可以看出空间分布上一致性较好. 在晴空区域从图像中心至图像边缘DSSR变化特征基本一致, 云覆盖区域两个产品的相似度也很高. 在图像的中央区域, 基于查找表计算的DSSR偏大于JAXA官方产品(颜色表现为深红), 这是由于在太阳耀光的区域, JAXA将该部分计算结果进行了剔除, 而基于查找表计算的DSSR则根据输入的云、气溶胶产品的反演结果获得了DSSR.

3.4 机器学习法

为了处理多种参数和大量的数据, 研究人员通常需要在计算精度和处理效率两者之间进行选择, 在DSSR的估算中也会面对这种问题. 在查找表方法中, 为了更高地估算精度, 大量的参数需要精确地进行输入, 如大气云、气溶胶和气体参数, 这会导致查找表的数据量大幅增加, 计算量的增加会降低DSSR的估算效率. 同时, 为了将离散的计算结果加密, 通常需要借助复杂的插值算法(Gasca和Sauer, 2000), 这反过来也会降低计算效率. 为了在保障DSSR估算精度不降低的前提下进一步提高计算的速度, 结合利用查找表方法和机器学习算法作为快速生产DSSR产品的工具. 机器学习法通过建立输入数据与输出数据之间的模型, 进而来实现DSSR的估算. 如今普遍应用于DSSR估算的机器学习方法有神经网络(Stoyanov等, 2018)、决策树(gradient boosting decision tree)(Yang等, 2018)和随机森林(random forest, RFs)等. 机器学习法的计算精度依赖于训练数据的选取及其预处理过程、学习过程中模型的选择等方面.

第一种机器学习方法相当于大脑神经元的数值模拟, 也称为人工神经网络(artificial neural network, ANN). 图4显示了神经网络的基本结构, 每一层神经元都对应着一个权重矩阵. Wang等(2012)提出了一种基于ANN的机器学习算法, 算法的优势是可同时反演DSSR、净辐射和太阳直射辐射. Tang等(2006)将MODIS卫星数据的窄波段大气层顶反射率转为宽波段辐射通量, 并建立与地表辐射的经验关系来估算了DSSR. 不同于Tang等(2006)的算法, Kim和Liang(2010)基于机器学习算法直接利用MODIS的窄波段大气层顶反射率数据估算了地表短波辐射. Takenaka等(2011)利用辐射传输模式的输出结果作为神经网络的训练数据, 训练了一个具有3层的简单且紧凑的神经网络.

图4 神经单元(左)和由多重神经单元组成的神经网络基本结构(右)
据Qin等(2011)

络. 在该神经网络中, 考虑了多种影响DSSR的因素, 如太阳天顶角、大气水汽含量、水/冰云光学厚度、水/冰云粒子有效半径、云顶压强、地表反照率等, 并实现多参数的输出, 如PAR等. 图5为该方法计算的DSSR及其直射和漫射成分. 估算结果与Chiba等SKYNET地基网络的共四个站的观测数据进行验证, 相关系数为0.87~0.93, RMSE为79.4~102.3W m⁻². 同时, JAXA的H-8地表短波辐射产品的算法是在Frouin和Murakami(2007)原理的基础上, 结合机器学习方法实现产品的快速化生产.

复杂地形影响DSSR的时空分布, 而DSSR的时空异质性反过来作用于地表景观(如冰雪量和土壤含水量等)(徐希孺等, 2017). 已有研究如Miesch(2000)构建2-D(2-Dimension, 二维)复杂地形模型, 采用蒙特卡罗方法估算DSSR, 发现崎岖地形的忽略会导致10%的计算误差. 作为二维模型的进一步拓展, Chen等(2006)基于蒙特卡罗方法构建3-D辐射传输模型, 记录太阳光子的传播方向和过程(有无被大气所吸收或者被地表反射), 根据太阳光子的传播路径, 判断其为直接辐射、散射辐射、反射的直接辐射和散射辐射以及多次反射辐射中的一种, 以计算三维崎岖地形的地表下行短波总辐射及上述5种分量, 结果与全球环流模式(General Circulation Models, GCMs)中的辐射传输模块相比较, 误差为5~20W m⁻². Liou等(2007)将这一方法应用于青藏高原地区的地表辐射估算中, 发现相比于平坦地表, 山地区域1km尺度范围的变化会导致DSSR的瞬时差异最高达到600W m⁻².

图5 基于MTSAT-1R数据估算的地表下行短波辐射

(a) 总地表下行短波辐射; (b) 散射部分; (c) 直射部分; 据Takenaka等(2011)

相对于平坦地形,复杂地形的DSSR增加了邻近斜坡的二次反射(Dozier, 1989),这部分辐射又被反射到其他地表或回到大气,此外复杂地表的下行短波辐射不包含来自半球空间的天空漫散射.针对此问题,Lai等(2010)以中国台湾地区为研究区,定量的估算了山地海拔、斜坡和山地遮蔽对于地表太阳直射和散射的影响,分析得出斜坡的影响最大,当太阳天顶角变小时,直射减少,反之,直射增加;海拔的增加会增加直射减少漫射;当太阳天顶角较大时,山地遮蔽会减弱直射和漫射.然而,针对平面地表的一维辐射传输模式较难以解决这一问题.为了解决复杂地形的地表反射率问题,Dozier(1989)发展山地辐射传输模型,并将模型应用于DSSR反演中.由于反演过程中需要计算复杂区域内所有像元的漫散射和邻近地形的反射辐射,导致计算量剧增降低了DSS的计算速度和效率.因此,可结合机器学习法提高复杂地表下的DSSR估算效率.

3.5 方法对比和误差分析

从2000年开始Terra和Aqua极轨卫星搭载的MODIS广泛用于大气云、水汽参数反演和DSSR的估算. MODIS数据的空间和波谱分辨率较高,可以获取较高精度的云、水汽参数和DSSR.然而,相较静止轨道卫星MODIS的观测频率低,白天只能获取2次观测资料.2010年以后GOES-R、H-8和FY-4新一代静止卫星相继发射成功,在数据获取方式、数据质量、时空和波谱分辨率方面有了巨大的改进,为准确获取高时空分辨率的DSSR提供了重要数据源.在计算方法方面,DSSR的估算主要使用经验法、参数化法、查找表法和机器学习法.查找表法和机器学习法的精度较

高,但当输入参数较多时,查找表法的运算速度会降低.有机结合查找表法和机器学习法是保障DSSR计算精度和速度的重要途径.表2为基于参数法、查找表、机器学习方法的研究实验的精度情况,表中的定量验证结果是以地基数据验证为标准完成的.从表2中可以看出,机器学习法的RMSE略小于查找表法;当研究区域较小时,如覆盖一个地面站时,参数化法的RMSE低于机器学习法和查找表法(Masuda等, 1995; Tang等, 2006);当研究区域扩大至覆盖91个中国CMA辐射地面站时,机器学习方法的RMSE小于参数化法.

利用以上方法进行估算时,都需重点考虑云、气溶胶和水汽对DSSR的影响.气溶胶光学厚度、云相态、水云和冰云光学厚度等物理特性的估算精度会不同程度地影响DSSR及其直射和漫射部分的估计值.同时,还存在一些物理问题待克服,例如,目前大部分云物理参数反演过程中利用的辐射传输模式的云层主要是以平行平面假设为准,没有充分体现自然界中云的平行和垂直方向的非均匀性,这些因素会导致云参数反演的不确定性.近年来发展了三维辐射传输理论和机器学习方法相结合的云三维结构的模拟研究(Okata等, 2017),有效推动了该领域的发展.然而,三维辐射传输的模拟过程中假设条件较多,需要进一步改进和发展.

同时,在反演DSSR的过程中,下垫面的不确定性也是反演误差的来源之一,一方面由地表反照率的不确定性所导致(Wu等, 2018b).地表反照率越小,地表吸收的太阳能就会越多,这样会加速地面升温,传输到大气的地面辐射也随之增加.反之传输给大气的地表辐射就减少.因此地表反照率是影响地表能平衡的决

表 2 基于3种方法研究DSSR精度验证对比

方法	研究实验	验证数据	时间尺度	RMSE(W m ⁻²)
参数化法	Masuda等, 1995	禹城地基数据	30分钟均值	晴空: 28.4 有云: 41.1
	Tang等, 2006	禹城地基数据	30分钟均值	晴空: 16.3 有云: 30.2
	Qin等, 2015	7个SURFAD地面站	瞬时	45.8~91.2
		2个NCP地面站		晴空: 49.6 有云: <100
		91个中国CMA辐射地面站	日均值	35.0
		44个Baseline地面辐射观测站(BSRN)	日均值	34.0~35.8
	Tang等, 2016	3个Haihe River Basin实验站	10分钟及30分钟	95.6~101.1
		91个中国CMA辐射地面站	日均和月均值	22.1~34.2
查找表法	Huang等, 2011	5个中国西北气象观测站	瞬时	春夏: 77.7~136.5 秋冬: 60.6~123.1
			每小时均值	春夏: 76.9~119.2 秋冬: 60.4~112.7
	Zhang等, 2014	7个 SURFAD地面站	每小时均值	86~140
	Zhang H L等, 2018	7个SURFAD地面站	每小时均值	水云: 80~178 冰云: 93~211
	马润等, 2019	GT MBA、SolRad-Net	瞬时	晴空: 62.9~105.3 全天空: 94.1~123.8 云天: 110.6~151.4
机器学习法	Zhang Y等, 2018	GC-Net地面站	每小时均值	55.6~87.4
	Wang等, 2012	7个 SURFAD地面站	瞬时、晴空	总辐射: 41.0 直射: 59.1
	Takenaka等, 2011	4个SKYNET地面观测站	瞬时	RMS: 79.4~102.2

定性因素. 对于已知地表覆盖类型或者较为平坦的地表进行DSSR反演, 地表反照率对DSSR的散射部分具有一定的影响. 卫星遥感作为观测大范围地表反照率的有效手段(董金玮等, 2018), 为发展多种地表反照率估算算法提供支持. 近年来已衍生出多种基于遥感数据的地表反照率估算方法(徐希孺等, 2017)和地表反照率产品, 如MODIS和GLASS反照率产品. 然而, 地表反照率不是遥感直接观测量, 而是通过理论模型反演获取得到. 受限于遥感数据源、物理模型、反演方法等因素影响, 导致地表反照率遥感反演存在一定的误差, 从而导致DSSR的反演误差. 另一方面, 由复杂地形的影响所导致. 目前大部分遥感辐射产品以及再分析资料未充分考虑复杂地形对辐射估算的影响, 给遥感像元尺度的DSSR反演引入了较大不确定性(Wang等, 2018). 但目前能直接用于遥感反演的相关模型比较少.

针对复杂地形通常利用DEM数字高程模型提取地表特征, 如坡度、坡向、地形遮蔽、天空可视比例等来量化地形对下行辐射的影响(Dozier, 1989; Dubayah, 1992; Dubayah和Loechel, 1997). 已有研究如Wang等(2018)考虑直射遮蔽、周围地形贡献及天空遮蔽, 开发了一种可以直接用于遥感反演的复杂山区短波辐射模型(SWTRM), 基于该模型, 给定水平地表辐射量可直接得到地形影响下的山区辐射量. Zhang Y L等(2015)针对山区地形, 也提出了一种结合多种物理模型的瞬时DSSR反演算法, 空间分辨率可以达到30m. 另外, 云和地形的耦合也是造成短波辐射不确定的一个重要因素, 相关研究比较少, 有待深入分析. DSSR估算结果的验证误差另一方面也取决于地基站点数据的精度、时间尺度、空间尺度和数量(Che等, 2005, 2007). 本文总结了全球和区域范围的地表短波辐射地基验证数据(表3). 表2中也列举出了选取的不

表 3 常用的全球及区域性地基观测数据^{a)}

地面网	地基站	数量(个)	误差大小	监测的主要参数
全球辐射观测地面网	GEBA(Global Energy Balance Archive)	>2000	月均值和年均值RMSE: 5%和2% (Gilgen等, 1998)	地表总辐射、直射和散射、反射及吸收辐射、长波辐射收支、地表反照率
	BSRN(Baseline Surface Radiation network)	≥40	直射, 散射, 长波下行辐射及总辐射 STD: 5、2、10、5W m ⁻² (Ohmura等, 1998)	地表太阳直射辐射、天空散射辐射、地表下行长波辐射、地表总辐射
	SURFRAD(Surface Radiation Budget Network)	7	相对误差在±2和±5%之间	上行、下行太阳辐射
	FLUXNET	>900	/	二氧化碳、水汽含量、能量交换 (Liang等, 2010)
地区辐射观测地面网	ARM(Atmospheric Radiation Measurement)	3	/	大气参数
	GC-net(Greenland Climate Network)	18	观测误差5~15%	地表太阳辐射及相关气象参数
	Aeronet(Aerosol Robotic Network)	>500	观测误差6~13W m ⁻²	气溶胶监测、地表太阳辐射

a) “/”表明这项内容未查到相关资料

同地基验证数据。地面站数据主要使用太阳辐射计等测量仪器进行各辐射参数的观测, 地面观测站数据自身也存在观测误差, 例如太阳辐射计等观测设备的维护、校正不当等引入的误差, 需定期维护设备确保观测数据的质量。验证的时间尺度包含月、日和小时均值以及瞬时DSSR结果的比较。由于瞬时误差的累积, 较大时间尺度的验证结果RMSE可能会高于瞬时的结果。地基站点数据数量较少和空间尺度较大也会引起验证的不准确性。

综上, 以上四种方法在不同外部条件下各自具有不同的优势和劣势(表4)。经验法、参数化法和机器学习法需地面数据或再分析资料作支撑, 且经验法和机器学习法的准确性大部分依赖于支撑数据的精度。DSSR反演的误差来源有: (1) 云、气溶胶和水汽等的数据误差; (2) 辐射传输模式中对于平行平面大气的假设所导致的误差; (3) 地表反照率和复杂地形的不确定性; (4) 数据处理引起的误差。如数据插值网格的选择等。

4 总结和展望

随着近十年卫星载荷和算法的不断发展, DSSR的估算精度在全球尺度和区域尺度上已经有了明显的改进, 基本形成了区域和全球尺度的DSSR立体观测能力, 然而仍有一些问题有待解决。本文针对今后DSSR

的研究, 从卫星资料、误差来源和计算方法方面进行了总结和展望。

卫星观测资料方面, 可以基于新一代静止卫星开发覆盖全球范围内的DSSR产品。综合利用GOES-R、H-8、FY-4和欧洲计划将要发射的MTG(Meteosat Third Generation)新一代静止卫星, 为全球尺度的高时空分辨的DSSR产品生产奠定了基础。同时, 可以使用MODIS等极轨卫星资料, 其高纬度地区具有高频率的观测优势, 能够有效弥补静止卫星覆盖不了高纬度地区的缺点。同时, 可以考虑利用激光雷达观测获得云垂直结构信息, 将其引入到算法构建中, 提高DSSR产品的计算精度。估算算法方面, 查找表法的精度从大范围尺度来看较高, 但其计算速度受输入参数数量的影响会大幅降低, 难以满足实时观测的需求, 无法应对海量的卫星数据。因此, 应有效结合机器学习方法和查找表方法, 以推动高精度DSSR产品的研制。

在误差来源方面, DSSR的不确定性由大气条件(气溶胶光学厚度、云光学厚度、云粒子有效半径、大气水汽含量、臭氧含量等)和地表条件(地表反照率、地表高程)等因素共同决定。其中云、气溶胶光学厚度、大气水汽总量和地表反照率对DSSR影响更为显著。上述关键参数的反演精度需要匹配高精度DSSR估算的需求, 有效利用极轨卫星多光谱信息和静止卫星高时间分辨率的优势, 反演高时空分辨率辐射参数, 以反映DSSR日变化特征, 研制辐射收支组分产品, 满

表 4 4种DSSR估算方法优势和劣势的比较

方法	优势	劣势
经验法	(1) SSR估算效率较高 (2) 局部地区估算精度较高	(1) 区域局限性较难在全球范围应用 (2) 空间上误差变化较为剧烈 (3) 缺乏物理机制 (4) 不能够获得时空连续的模拟结果
参数化法	(1) 具有一定的物理基础 (2) 能够获得时空连续的模拟结果 (3) 简化辐射传输模拟过程, 操作较为简便	(1) 在物理机制的确定上仍存在缺陷 (2) 参数化公式数值计算的初始值及边界条件的确定存在不确定性 (3) 精度密切依赖于输入的地基或卫星光谱资料以及传输算法 (4) 模拟的结果在时空上均具有很大的不确定性
查找表法	(1) 反演精度较高 (2) 物理机制充分 (3) 能够获得全天候、全球范围的DSSR估算结果	(1) 涵盖复杂的物理机制和大气传输过程, 应用较为复杂 (2) 辐射传输模拟的局限性 (3) 计算效率较低
机器学习法	(1) 效率较高 (2) 利用数学工具最优化训练方式, 具有灵活性的特点 (3) 能够应用于全球范围 (4) 未来在提高辐射产品时空分辨率及精度方面具有较大的发展潜力	(1) 缺乏物理机制 (2) 数学模型和计算机技术的局限性

足辐射平衡的估算及水文和气候模式的驱动及改进的需求。相较晴空条件下的DSSR估算, 云天的情况更为复杂, 考虑不同相态云对地表辐射的影响, 需进一步发展云微物理参数化方案, 如冰晶散射模型及冰云的参数化, 减少云参数的反演误差, 保障云下DSSR的估算精度(Letu等, 2016, 2020)。东亚地区雾霾对于DSSR的估算也不容忽视, 也需要准确估算重污染背景下的气溶胶光学厚度, 开发污染背景下的多层云、气溶胶参数反演算法, 从而为DSSR的准确计算提供保障, 为地表能量平衡的研究提供全面可靠的数据产品。由于地形和山区照度角的影响, 且受限于一维辐射传输理论平面平行的假设, 复杂地形DSSR的估算一直是一个难点。一方面, 在反演的关键技术中需加入复杂山地的双向反射分布函数模型或考虑山区辐射的不同影响要素, 构建复杂地形影响的地表辐射的校正模型; 另一方面, 应开展三维辐射传输模式的研究工作(Liou等, 2007), 计算斜坡地形的DSSR。除此之外, 卫星-云-太阳的几何关系对估算地表辐射的影响一直被忽略(Wang等, 2017), 这也是卫星辐射产品在复杂地形区误差较大的原因之一, 有待提高相关算法的计算精度。

需要指出的是, 当前DSSR的遥感反演方法多集中在对总量的反演, 而其分量, 如直射、散射的准确反演目前仍有较大不确定性。DSSR的分量对地表反照率估算和复杂地形区地表辐射的纠正等都有重要意义, 今后需要加强有关研究。此外, 未来应在保证反演精度

前提下, 注重数据的高效处理, 提高反演效率, 如有机结合查找表法和深度学习等人工智能方法。

参考文献

董金玮, 匡文慧, 刘纪远. 2018. 遥感大数据支持下的全球土地覆盖连续动态监测. 中国科学: 地球科学, 48: 259–260

段克勤, 姚檀栋, 石培宏, 郭学军. 2017. 青藏高原东部冰川平衡线高度的模拟及预测. 中国科学: 地球科学, 47: 104–113

马润, 胡斯勒图, 尚华哲, 阿娜日, 赫杰, 韩旭, 王子明. 2019. 基于葵花-8卫星大气产品的地表下行短波辐射计算. 遥感学报, 23: 924–934

彭丽春, 李万彪, 叶晶, 成董, 李宇明, 曹立佳. 2015. 地表向下短波和长波辐射遥感参数化方案研究综述. 北京大学学报(自然科学版), 51: 772–782

闻建光, 柳钦火, 肖青, 刘强, 李小文. 2008. 复杂山区光学遥感反射率计算模型. 中国科学: 地球科学, 38: 1419–1427

徐希孺, 范闻捷, 李举材, 赵鹏, 陈高星. 2017. 植被二向性反射统一模型. 中国科学: 地球科学, 47: 217–232

Barkstrom B R. 1984. The earth radiation budget experiment (ERBE). Bull Amer Meteorol Soc, 65: 1170–1185

Berk A, Bernstein L S, Anderson G P, Acharya P K, Robertson D C, Chetwynd J H, Adler-Golden S M. 1998. MODTRAN cloud and multiple scattering upgrades with application to AVIRIS. Remote Sens Environ, 65: 367–375

Bishop J K B, Rossow W B. 1991. Spatial and temporal variability of global surface solar irradiance. J Geophys Res, 96: 16839–16858

Bisht G, Bras R L. 2010. Estimation of net radiation from the MODIS

- data under all sky conditions: Southern Great Plains case study. *Remote Sens Environ*, 114: 1522–1534
- Bisht G, Venturini V, Islam S, Jiang L. 2005. Estimation of the net radiation using MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) data for clear sky days. *Remote Sens Environ*, 97: 52–67
- Buffat R, Grassi S. 2015. Validation of CM SAF SARA solar radiation datasets for Switzerland. Marrakech: 2015 3rd International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC). 1–6
- Cano D, Monget J M, Albuissou M, Guillard H, Regas N, Wald L. 1986. A method for the determination of the global solar radiation from meteorological satellite data. *Sol Energy*, 37: 31–39
- Cess R D, Dutton E G, Deluisi J J, Jiang F. 1991. Determining surface solar absorption from broadband satellite measurements for clear skies: Comparison with surface measurements. *J Clim*, 4: 236–247
- Che H Z, Shi G Y, Zhang X Y, Arimoto R, Zhao J Q, Xu L, Wang B, Chen Z H. 2005. Analysis of 40 years of solar radiation data from China, 1961–2000. *Geophys Res Lett*, 32: L06803
- Che H Z, Shi G Y, Zhang X Y, Zhao J Q, Li Y. 2007. Analysis of sky conditions using 40 year records of solar radiation data in China. *Theor Appl Climatol*, 89: 83–94
- Chen M, Zhuang Q, He Y. 2014. An efficient method of estimating downward solar radiation based on the MODIS observations for the use of land surface modeling. *Remote Sens*, 6: 7136–7157
- Chen Y, Hall A, Liou K N. 2006. Application of three-dimensional solar radiative transfer to mountains. *J Geophys Res*, 111: D21111
- Damiani A, Irie H, Horio T, Takamura T, Khatri P, Takenaka H, Nagao T, Nakajima T Y, Cordero R R. 2018. Evaluation of Himawari-8 surface downwelling solar radiation by ground-based measurements. *Atmos Meas Tech*, 11: 2501–2521
- Diak G R, Gautier C. 1983. Improvements to a simple physical model for estimating insolation from GOES data. *J Clim Appl Meteorol*, 22: 505–508
- Dozier J. 1989. Spectral signature of alpine snow cover from the Landsat thematic mapper. *Remote Sens Environ*, 28: 9–22
- Dubayah R. 1992. Estimating net solar radiation using Landsat thematic mapper and digital elevation data. *Water Resour Res*, 28: 2469–2484
- Dubayah R, Loebel S. 1997. Modeling topographic solar radiation using GOES data. *J Appl Meteorol*, 36: 141–154
- Ertekin C, Evrendilek F. 2007. Spatio-temporal modeling of global solar radiation dynamics as a function of sunshine duration for Turkey. *Agric For Meteorol*, 145: 36–47
- Fritz S, Rao P K, Weinstein M. 1964. Satellite measurements of reflected solar energy and the energy received at the ground. *J Atmos Sci*, 21: 141–151
- Frouin R, Murakami H. 2007. Estimating photosynthetically available radiation at the ocean surface from ADEOS-II Global Imager data. *J Oceanogr*, 63: 493–503
- Gasca M, Sauer T. 2000. Polynomial interpolation in several variables. *Adv Comput Math*, 12: 377–410
- Gautier C, Diak G, Masse S. 1980. A simple physical model to estimate incident solar radiation at the surface from GOES satellite data. *J Appl Meteorol*, 19: 1005–1012
- Gilgen H, Wild M, Ohmura A. 1998. Means and trends of shortwave irradiance at the surface estimated from global energy balance archive data. *J Clim*, 11: 2042–2061
- Gui S, Liang S L, Wang K C, Li L, Zhang X T. 2010. Assessment of three satellite-estimated land surface downwelling shortwave irradiance data sets. *IEEE Geosci Remote Sens Lett*, 7: 776–780
- Gupta S K, Ritchey N A, Wilber A C, Whitlock C H, Gibson G G, Stackhouse Jr P W. 1999. A climatology of surface radiation budget derived from satellite data. *J Clim*, 12: 2691–2710
- Gupta S, Kratz P, David S J, Paul W, Paul W A. 2002. The langley parameterized shortwave algorithm (LPSA) for surface radiation budget studies. Hampton: NASA Langley Research Center
- Gupta S K, Kratz D P, Wilber A C, Nguyen L C. 2004. Validation of parameterized algorithms used to derive TRMM-CERES surface radiative fluxes. *J Atmos Ocean Technol*, 21: 742–752
- Hao D L, Wen J G, Xiao Q, Wu S B, Lin X W, You D Q, Tang Y. 2018. Modeling anisotropic reflectance over composite sloping terrain. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 56: 3903–3923
- Hanson K. 1971. Studies of cloud and satellite parameterisation of solar irradiation at the Earth's surface. Proc. Miami Workshop on Remote Sensing. 133–148
- Hänsch R, Schulz K, Sörgel U. 2018. Machine learning methods for remote sensing applications: An overview. Berlin: Earth Resources and Environmental Remote Sensing/GIS Applications IX. Inter Soc Opt Photo, 10790: 1079002
- Huang G H, Li X, Huang C L, Liu S M, Ma Y F, Chen H. 2016a. Representativeness errors of point-scale ground-based solar radiation measurements in the validation of remote sensing products. *Remote Sens Environ*, 181: 198–206
- Huang G H, Li Z Q, Li X, Liang S L, Yang K, Wang D D, Zhang Y. 2019. Estimating surface solar irradiance from satellites: Past, present, and future perspectives. *Remote Sens Environ*, 233: 111371
- Huang G H, Li X, Ma M G, Li H Y, Huang C L. 2016b. High resolution surface radiation products for studies of regional energy, hydrologic and ecological processes over Heihe river basin, northwest China. *Agric For Meteorol*, 230–231: 67–78
- Huang G H, Liang S L, Lu N, Ma M G, Wang D. 2018. Toward a broadband parameterization scheme for estimating surface solar

- irradiance: Development and preliminary results on MODIS products. *J Geophys Res-Atmos*, 123: 180–193
- Huang G H, Ma M G, Liang S L, Liu S M, Li X. 2011. A LUT-based approach to estimate surface solar irradiance by combining MODIS and MTSAT data. *J Geophys Res*, 116: D22201
- Iqbal M, Valnicek B. 1983. INDEX-An Introduction to Solar Radiation. London: Academic Press
- Jacobowitz H, Stowe L L, Tighe R J, Arking A, Campbell G, Hickey J R, House F, Ingersoll A, Maschhoff R, Smith G L. 1984. The Earth radiation budget derived from the NIMBUS 7 ERB experiment. *J Geophys Res*, 89: 4997–5010
- Jiang B, Liang S L, Ma H, Zhang X T, Xiao Z Q, Zhao X, Jia K, Yao Y J, Jia A L. 2016. GLASS daytime all-wave net radiation product: Algorithm development and preliminary validation. *Remote Sens*, 8: 222
- Justus C G, Paris M V, Tarpley J D. 1986. Satellite-measured insolation in the United States, Mexico, and South America. *Remote Sens Environ*, 20: 57–83
- Key J R, Schweiger A J. 1998. Tools for atmospheric radiative transfer: Streamer and FluxNet. *Comput Geosci*, 24: 443–451
- Key J R, Yang P, Baum B A, Nasiri S L. 2002. Parameterization of shortwave ice cloud optical properties for various particle habits. *J Geophys Res*, 107: 4181
- Kim H Y, Liang S L. 2010. Development of a hybrid method for estimating land surface shortwave net radiation from MODIS data. *Remote Sens Environ*, 114: 2393–2402
- Klink J C, Dollhopf K J. 1986. An evaluation of satellite-based insolation estimates for Ohio. *J Clim Appl Meteorol*, 25: 1741–1751
- Kneizys F X. 1988. Users guide to LOWTRAN 7. Hanscom: Air Force Geophysics Laboratory
- Lai Y J, Chou M D, Lin P H. 2010. Parameterization of topographic effect on surface solar radiation. *J Geophys Res*, 115: 1104
- Letu H, Ishimoto H, Riedi J, Nakajima T Y, Labonnote L C, Baran A J, Nagao T M, Sekiguchi M. 2016. Investigation of ice particle habits to be used for ice cloud remote sensing for the GCOM-C satellite mission. *Atmos Chem Phys*, 16: 12287–12303
- Letu H, Nagao T M, Nakajima T Y, Riedi J, Ishimoto H, Baran A J, Shang H, Sekiguchi M, Kikuchi M. 2019. Ice cloud properties from Himawari-8/Ahi next-generation geostationary satellite: Capability of the Ahi to monitor the dc cloud generation process. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 57: 3229–3239
- Letu H, Yang K, Nakajima T Y, Ishimoto H, Nagao T M, Riedi J, Baran A J, Ma R, Wang T, Shang H, Khatri P, Chen L, Shi C, Shi J. 2020. High-resolution retrieval of cloud microphysical properties and surface solar radiation using Himawari-8/AHI next-generation geostationary satellite. *Remote Sens Environ*, 239: 111583
- Li Z Q, Leighton H G. 1993. Global climatologies of solar radiation budgets at the surface and in the atmosphere from 5 years of ERBE data. *J Geophys Res*, 98: 4919–4930
- Li Z Q, Leighton H G, Masuda K, Takashima T. 1993a. Estimation of SW flux absorbed at the surface from TOA reflected flux. *J Clim*, 6: 317–330
- Li Z Q, Leighton H O, Cess R D. 1993b. Surface net solar radiation estimated from satellite measurements: Comparisons with tower observations. *J Clim*, 6: 1764–1772
- Liang S L, Strahler A H, Walthall C. 1998. Retrieval of land surface albedo from satellite observations: A simulation study. *IEEE Inter Geos Rem Sens Symp*, 38: 1286–1288
- Liang S L, Stroeve J, Box J E. 2005. Mapping daily snow/ice shortwave broadband albedo from Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): The improved direct retrieval algorithm and validation with Greenland in situ measurement. *J Geophys Res*, 110: D10109
- Liang S L, Wang K C, Zhang X T, Wild M. 2010. Review on estimation of land surface radiation and energy budgets from ground measurement, remote sensing and model simulations. *IEEE J-STARS*, 3: 225–240
- Liang S L, Zhao X, Liu S H, Yuan W P, Cheng X X, Zhang Z Q, Liu X T, Cheng Q, Tang J, Qu H R, Bo Y H, Qu Y C, Ying H Z, Yu R, Townshend K. 2013a. A long-term global land surface satellite (GLASS) data-set for environmental studies. *Int J Digital Earth*, 6: 5–33
- Liang S L, Yuan W P, Xiao Q, Zhao X, Ma M G, Zeng X D, Liu S H, Cheng X. 2013b. Generation and applications of global land surface satellite (GLASS) products. *Bull Chin Acad Sci*, 28: 122–131
- Liou K N, Lee W L, Hall A. 2007. Radiative transfer in mountains: Application to the Tibetan Plateau. *Geophys Res Lett*, 34: L23809
- Lu N, Liu R G, Liu J Y, Liang S L. 2010. An algorithm for estimating downward shortwave radiation from GMS 5 visible imagery and its evaluation over China. *J Geophys Res*, 115: D18102
- Ma R, Letu H, Yang K, Wang T X, Shi C, Xu J, Shi J C, Shi C X, Chen L F. 2020. Estimation of surface shortwave radiation from Himawari-8 satellite data based on a combination of radiative transfer and deep neural network. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 1–13
- Ma Y T, Pinker R T, Zhang B, Zhang Y C, Rossow W B. 2007. Comparison of UMD/SRB V3.1 ISCCP D1 fluxes with those of ISCCP-FD: Source of differences, GEWEX Radiative Flux Assessment. New York: Third Workshop, NASA GISS
- Masuda K, Leighton H G, Li Z. 1995. A new parameterization for the determination of solar flux absorbed at the surface from satellite measurements. *J Clim*, 8: 1615–1629

- Meza F, Varas E. 2000. Estimation of mean monthly solar global radiation as a function of temperature. *Agric For Meteorol*, 100: 231–241
- Miesch M S. 2000. The coupling of solar convection and rotation. *Sol Phys*, 192: 59–89
- Miller E J, Madden M, Reining R, Linn J, O'Connor L. 2003. NOAA's GOES R—Next generation satellite. *Proc Oceans 2003*, 3: 1573–1579, doi: 10.1109/OCEANS.2003.178105
- Min M, Wu C, Li C, Liu H, Xu N, Wu X, Chen L, Wang F, Sun F, Qin D, Wang X, Li B, Zheng Z, Cao G, Dong L. 2017. Developing the science product algorithm testbed for Chinese next-generation geostationary meteorological satellites: Fengyun-4 series. *J Meteorol Res*, 31: 708–719
- Müller R W, Matsoukas C, Gratzki A, Behr H D, Hollmann R. 2009. The CM-SAF operational scheme for the satellite based retrieval of solar surface irradiance—A LUT based eigenvector hybrid approach. *Remote Sens Environ*, 113: 1012–1024
- Nakajima T, King M D. 1990. Determination of the optical thickness and effective particle radius of clouds from reflected solar radiation measurements. Part I: Theory. *J Atmos Sci*, 47: 1878–1893
- Nakajima T, Tanaka M. 1986. Matrix formulations for the transfer of solar radiation in a plane-parallel scattering atmosphere. *J Quant Spectr Radiat Trans*, 35: 13–21
- Nakajima T Y, Nakajima T. 1995. Wide-area determination of cloud microphysical properties from NOAA AVHRR measurements for fire and astex regions. *J Atmos Sci*, 52: 4043–4059
- Okata M, Nakajima T, Suzuki K, Inoue T, Nakajima T Y, Okamoto H. 2017. A study on radiative transfer effects in 3-D cloudy atmosphere using satellite data. *J Geophys Res Atmos*, 122: 443–468
- Ohmura A, Gilgen H, Hegner H, Müller G, Wild M, Dutton E G, Forgan B, Fröhlich C, Philipona R, Heimo A, König-Langlo G, McArthur B, Pinker R, Whitlock C H, Dehne K. 1998. Baseline surface radiation network (BSRN/WCRP): New precision radiometry for climate research. *Bull Amer Meteorol Soc*, 79: 2115–2136
- Pinker R T, Laszlo I. 1992. Modeling surface solar irradiance for satellite applications on a global scale. *J Appl Meteorol*, 31: 194–211
- Pinker R T, Frouin R, Li Z. 1995. A review of satellite methods to derive surface shortwave irradiance. *Remote Sens Environ*, 51: 108–124
- Qin J, Chen Z, Yang K, Liang S, Tang W. 2011. Estimation of monthly-mean daily global solar radiation based on MODIS and Trmm products. *Appl Energy*, 88: 2480–2489
- Qin J, Tang W, Yang K, Lu N, Niu X, Liang S. 2015. An efficient physically based parameterization to derive surface solar irradiance based on satellite atmospheric products. *J Geophys Res-Atmos*, 120: 4975–4988
- Rutan D A, Kato S, Doelling D R, Rose F G, Nguyen L T, Caldwell T E, Loeb N G. 2015. Ceres synoptic product: Methodology and validation of surface radiant flux. *J Atmos Ocean Tech*, 32: 1121–1143
- Schmetz J. 1989. Towards a surface radiation climatology: Retrieval of downward irradiances from satellites. *Atmos Res*, 23: 287–321
- Schiffer R A, Rossow W B. 1985. Isccp global radiance data set: A new resource for climate research. *Bull Amer Meteorol Soc*, 66: 1498–1505
- Schmit T J, Gunshor M M, Menzel W P, Gurka J J, Li J, Bachmeier A S. 2005. Introducing the next-generation advanced baseline imager on GOES-R. *Bull Amer Meteorol Soc*, 86: 1079–1096
- Shang H Z, Letu H, Nakajima T Y, Wang Z M, Ma R, Wang T X, Shi J C. 2018. Diurnal cycle and seasonal variation of cloud cover over the Tibetan Plateau as determined from Himawari-8 new-generation geostationary satellite data. *Sci Rep*, 8: 1105
- Shang H Z, Letu H, Pan X L, Wang Z M, Liu Q H, Chen L F. 2019. Diurnal haze variations over the North China plain using measurements from Himawari-8/AHI. *Atmos Environ*, 210: 100–109
- Stoyanov V, Stoyanov I, Iliev T. 2018. Modeling of solar radiation with a neural network. *J Eng Stud Res*, 24: 45–50
- Stuhlmann R, Rieland M, Paschke E. 1990. An improvement of the IGMK model to derive total and diffuse solar radiation at the surface from satellite data. *J Appl Meteorol*, 29: 586–603
- Takenaka H, Nakajima T Y, Higurashi A, Higuchi A, Takamura T, Pinker R T, Nakajima T. 2011. Estimation of solar radiation using a neural network based on radiative transfer. *J Geophys Res*, 116: D08215
- Tang B, Li Z L, Zhang R. 2006. A direct method for estimating net surface shortwave radiation from MODIS data. *Remote Sens Environ*, 103: 115–126
- Tang W J, Qin J, Yang K, Liu S M, Ning L, Niu X L. 2016. Retrieving high-resolution surface solar radiation with cloud parameters derived by combining MODIS and MTSAT data. *Atmos Chem Phys*, 16: 2543–2557
- Tang W J, Qin J, Yang K, Niu X L, Min M, Liang S S. 2017b. An efficient algorithm for calculating photosynthetically active radiation with MODIS products. *Remote Sens Environ*, 194: 146–154
- Tang W J, Yang K, Qin J, Li X, Niu X L. 2019. A 16-year dataset (2000–2015) of high-resolution (3 h, 10 km) global surface solar radiation. *Earth Syst Sci Data*, 11: 1905–1915
- Tang W J, Yang K, Sun Z, Qin J, Niu X. 2017a. Global performance of a fast parameterization scheme for estimating surface solar radiation from MODIS data. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 55: 3558–

- 3571
- Tarpley J D. 1979. Estimating incident solar radiation at the surface from geostationary satellite data. *J Appl Meteorol*, 18: 1172–1181
- Vulis I L, Cess R D. 1989. Interpretation of surface and planetary directional albedos for vegetated regions. *J Clim*, 2: 986–996
- Wang H, Pinker R T. 2009. Shortwave radiative fluxes from modis: Model development and implementation. *J Geophys Res*, 114: D20201
- Wang K C, Dickinson R E. 2013. Contribution of solar radiation to decadal temperature variability over land. *Proc Natl Acad Sci USA*, 110: 14877–14882
- Wang L C, Gong W, Hu B, Lin A, Li H, Zou L. 2015. Modeling and analysis of the spatiotemporal variations of photosynthetically active radiation in China during 1961–2012. *Renew Sustain Energy Rev*, 49: 1019–1032
- Wang T X, Shi J C, Husi L, Zhao T J, Ji D B, Xiong C, Gao B. 2017. Effect of solar-cloud-satellite geometry on land surface shortwave radiation derived from remotely sensed data. *Remote Sens*, 9: 690
- Wang T X, Yan G J, Mu X H, Jiao Z H, Chen L F, Chu Q. 2018. Toward operational shortwave radiation modeling and retrieval over rugged terrain. *Remote Sens Environ*, 205: 419–433
- Wang T X, Yan G, Chen L F. 2012. Consistent retrieval methods to estimate land surface shortwave and longwave radiative flux components under clear-sky conditions. *Remote Sens Environ*, 124: 61–71
- Wang Z, Husi L, Shang H Z, Zhao C F, Li J M, Ma R. 2019. A supercooled water cloud detection algorithm using Himawari-8 satellite measurements. *J Geophys Res-Atmos*, 124: 2724–2738
- Wen J G, Zhao X J, Liu Q, Tang Y, Dou B C. 2014. An improved land-surface albedo algorithm with DEM in rugged terrain. *IEEE Geosci Remote Sens Lett*, 11: 883–887
- Wu S B, Wen J G, You D Q, Zhang H L, Xiao Q, Liu Q H. 2018b. Algorithms for calculating topographic parameters and their uncertainties in downward surface solar radiation (DSSR) estimation. *IEEE Geosci Remote Sens Lett*, 15: 1149–1153
- Wu S B, Wen J G, You D Q, Hao D L, Lin X W, Xiao Q, Liu Q H, Etchegorry G, Philippe J. 2018a. Characterization of Remote sensing albedo over sloped surfaces based on DART simulations and *in situ* observations. *J Geophys Res-Atmos*, 123: 8599–8622
- Xin L, Koike T, Chen G D. 2002. Retrieval of snow reflectance from Landsat data in rugged terrain. *Ann Glaciol*, 34: 31–37
- Yang J, Zhang Z, Wei C, Lu F, Guo Q. 2017. Introducing the new generation of chinese geostationary weather satellites, Fengyun-4. *Bull Amer Meteorol Soc*, 98: 1637–1658
- Yang K, Koike T, Stackhouse P, Mikovitz C, Cox S J. 2006. An assessment of satellite surface radiation products for highlands with Tibet instrumental data. *Geophys Res Lett*, 33: L22403
- Yang K, Pinker R T, Ma Y, Koike T, Wonsick M M, Cox S J, Zhang Y, Stackhouse P. 2008. Evaluation of satellite estimates of downward shortwave radiation over the Tibetan Plateau. *J Geophys Res*, 113: D17204
- Yang L, Zhang X T, Liang S L, Yao Y J, Jia K, Jia A L. 2018. Estimating surface downward shortwave radiation over China based on the gradient boosting decision tree method. *Remote Sens*, 10: 185
- Yu Y C, Wang T X, Shi J C, Wang Z. 2019. A lut-based method to estimate clear-sky instantaneous land surface shortwave downward radiation and its direct component from modis data. In: *IGARSS 2019–2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IEEE*. 1861–1864
- Zhang F, Yan J R, Li J N, Wu K, Iwabuchi H, Shi Y N. 2018. A new radiative transfer method for solar radiation in a vertically internally inhomogeneous medium. *J Atmos Sci*, 75: 41–55
- Zhang H L, Huang C, Yu S S, Li L, Xin X Z, Liu Q H. 2018. A lookup-table-based approach to estimating surface solar irradiance from geostationary and polar-orbiting satellite data. *Remote Sens*, 10: 411
- Zhang X T, Liang S L, Wild M, Jiang B. 2015. Analysis of surface incident shortwave radiation from four satellite products. *Remote Sens Environ*, 165: 186–202
- Zhang X T, Liang S L, Zhou G Q, Wu H R, Zhao X. 2014. Generating Global Land Surface Satellite incident shortwave radiation and photosynthetically active radiation products from multiple satellite data. *Remote Sens Environ*, 152: 318–332
- Zhang Y, He T, Liang S, Wang D, Yu Y. 2018. Estimation of all-sky instantaneous surface incident shortwave radiation from moderate resolution imaging spectroradiometer data using optimization method. *Remote Sens Environ*, 209: 468–479
- Zhang Y, Li X, Bai Y. 2015. An integrated approach to estimate shortwave solar radiation on clear-sky days in rugged terrain using modis atmospheric products. *Sol Energy*, 113: 347–357
- Zillman J W. 1972. A Study of Some Aspects of the Radiation and Heat Budgets of the Southern Hemisphere Oceans. Meteorol. Study 26. Canberra: Commonwealth Bureau of Meteorology

(责任编辑: 李新)