

我国太阳能资源评估方法研究进展

申彦波^{1, 2}

(1 中国气象局公共气象服务中心, 北京 100081; 2 中国气象局风能太阳能资源中心, 北京 100081)

摘要: 太阳能资源评估是太阳能资源开发利用的基础性工作, 自20世纪50年代以来, 我国在这方面已经开展了大量的研究。对近60余年我国在太阳能资源评估方法研究方面的工作进行回顾和总结, 从统计反演法和物理反演法两个方面较详细地评述了每种方法中所涉及的计算参数和各自的优缺点, 并对当前太阳能资源评估工作中的难点和重点进行了分析和讨论, 认为关于云和气溶胶对太阳辐射影响的确定是两大难点, 而构建一个综合利用各种数据资源、集成的太阳能资源评估方法和数据库则是研究工作的重点。

关键词: 太阳能资源, 气候学方法, 卫星遥感资料, 辐射传输理论, 地理信息数据

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2017.01.008

Development of the Solar Energy Resource Assessment Methods in China

Shen Yanbo^{1, 2}

(1 China Meteorological Administration Public Meteorological Service Centre, Beijing 100081

2 Center for Wind and Solar Energy Resources, China Meteorological Administration, Beijing 100081)

Abstract: Study of the method of solar energy resource assessment is a basic work for the development and utilizing of solar energy. A lot of researches about this work have been carried out since 1950s. In this paper, we summarize previous works and partition them into 2 kinds, which are statistical method and physical method. Parameters in every method are introduced and the strongpoint and shortcoming about every method are commented. Difficulties and emphases in current solar energy resource assessment are analyzed and discussed. It is considered that the calculations of the influences of cloud and aerosol on surface radiation are two difficulties. Development should be focused on integrative method including all kinds of data in the future.

Keywords: solar energy resource, climatologic method, geographic information system, satellite remote sensing data, radiative transfer theory

0 引言

太阳是地球表层几乎唯一的能量来源, 人们所利用的绝大部分能源本质上都来源于太阳。当前, 随着常规能源的日益紧张、全球气候变化和环境恶化压力的逐渐增大, 大力开发包括太阳能资源在内的可再生清洁能源已成为国际社会的共识。从全球范围来看, 太阳能光伏发电、太阳能热发电、太阳能热利用等在近几年呈快速增长趋势, 未来, 以太阳能为主的可再生能源将占据世界能源消费的主导地位。

开发利用太阳能资源首先需要了解资源丰富程度、可开发量、地域分布、禀赋特征等, 这都属于太阳能资源评估工作的范畴。太阳能资源评估的实质

是采用观测或计算的方法确定到达地面的太阳辐射量(短波辐射, 包括总辐射、直接辐射和散射辐射), 评价其丰富程度, 进而估算不同太阳能利用方式的产出量(发电量、发热量等)。利用地面辐射观测资料进行一个地区的太阳能资源评估是最简单、直接也最准确的方法。然而, 全球的地面太阳辐射观测站点并不是很多且空间分布不均匀, 我国的地面辐射观测也基本如此, 此外, 即便在观测站点比较密集的地区, 观测数据也不能完全满足太阳能电站资源评估的需求。因此, 研究者往往需要通过间接的方法来计算到达地面的太阳辐射, 以求达到一定的空间分辨率和精确度。自20世纪50年代以来, 我国在太阳能资源的计算和评估方面已经开展了大量的研究, 提出了很多适用于我国的计算评估方法。本文是对近60余年来我国在太阳能资源计算与评估方面有关工作的回顾, 并根据各种方法物理原理的不同, 将其归纳为两类: 统计

收稿日期: 2016年8月26日; 修回日期: 2016年12月16日

作者: 申彦波(1978—), Email: shenyb@cma.gov.cn

资助信息: 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306048);
中国气象局软科学研究项目(重点项目2017[14])

反演法和物理反演法。

由于当前的太阳能利用主要接收向下短波辐射，根据传输方式的不同可分为直接辐射、散射辐射和总辐射，因此本文主要集中论述这三个辐射分量的计算方法，对于其他辐射分量，如大气和地球长波辐射、地球反射辐射、净辐射等，则不在论述范围之内。

1 统计反演法

统计反演法根据数学统计原理，在大量样本分析的基础上建立太阳辐射和与其有物理关联的要素之间的统计方程，再利用该统计方程计算无观测地区的太阳辐射。根据关联要素的来源，将该方法分为基于地面观测资料的统计反演法和基于卫星遥感观测资料的统计反演法。

1.1 基于地面观测资料的统计反演法

该方法通常称为气候学方法，指的是基于气候学原理，利用与太阳辐射有关的其他地面气象站观测的气候要素间接计算到达地面太阳辐射的方法。该方法的一般表达式为：

$$R=R_0f_1(a, b, c, \dots)f_2(x_1, x_2, \dots), \quad (1)$$

式中， R 是所要计算的到达地面的太阳辐射量，这里指总辐射、直接辐射或散射辐射； R_0 是计算每个辐射量时所用的初始值； x_1, x_2, \dots 是所用的气候学要素，可以为一个，也可以为多个，其函数形式可以为线性，也可以为非线性，视不同的方法而定； a, b, c, \dots 是每种函数形式所对应的系数，其个数视所用气候学要素的个数和具体的函数形式 f_2 而定，如气候学要素只用一个且是线性函数，则只需 a, b 两个系数，如气候学要素只用一个但是二次非线性函数，那么就需要 a, b, c 三个系数，……以此类推，所用气候学要素越多、函数的次数越高，则相应需要的系数

也会越多。

1.1.1 总辐射

由于早期气候学研究的需要，在所要计算的3个地面辐射量中，关于总辐射气候学计算方法的研究开始得最早（我国从20世纪50年代开始）、成果最多也最成熟^[1-7]。其最常用的表达式为：

$$Q=Q_0(a+bx), \quad (2)$$

式中 Q 表示总辐射， x 表示所用气候学要素，由于大多数的研究都只用一个且为线性关系，所以对应的系数也只有 a, b 两个。以下对该方程右边的每一项分别论述。

1) 初始值 Q_0

在总辐射的气候学计算中，对于初始值可以有3种选择，分别是天文辐射、理想大气总辐射和晴天总辐射。这3种初始值的含义和计算方法以及优缺点如表1所示。事实上，这3种初始值在本质上是一致的，只是所考虑的对太阳辐射的影响因子有所不同，采用任何一个作为初始值都有其优点和缺点^[4-5]。实际应用中，应视计算区域和观测资料的具体情况而定。如辐射传输计算中所需大气信息（特别是温、湿、气溶胶等垂直廓线）比较充足，那么可以采用晴天总辐射，因为它与实际总辐射最为接近；但如果如果没有足够的观测资料，则当计算区域海拔较高（如青藏高原地区）时，宜采用理想大气总辐射；而当海拔较低（如我国东部地区）时，其对太阳辐射的影响可以忽略，采用天文辐射即可。

2) 气候学要素与函数形式

太阳辐射是地球上一切气象/气候要素变化的根源。因此，从本质上而言，气象台站所观测的所有气象/气候要素都与太阳辐射有着或多或少的关系。但是，气候学方法中最基本的原则是计算简单、物理意

表1 气候学计算中三个初始值的对比
Table 1 Comparison among three initial values in climatology method

初始值	天文辐射	理想大气总辐射	晴天总辐射
概念	大气层顶接收到的太阳辐射	天文辐射经过理想大气之后到达地面的太阳辐射之和	天文辐射经过晴天（无云）的实际大气之后到达地面的太阳辐射之和
计算方法	① 以每月15日的日总量代表月平均值 ② 米兰克维奇方法 ③ Seller逐日求和方法	考虑大气对天文辐射的两方面削弱作用： ① 大气中所含臭氧、氧、二氧化碳的选择吸收； ② 理想大气中空气分子散射。两方面均根据辐射传输理论计算	① 经验统计法； ② 外包线法，或称作乌克兰英采夫方法； ③ 辐射传输模式计算法； ④ 参数化方法 ⑤ 其他方法
优点	只与纬度和季节有关，能够直接准确地通过理论精确计算	① 可以通过理论计算精确地求得； ② 可以考虑干洁大气中的各种气体成分对太阳辐射的削弱作用； ③ 可以考虑海拔高度的影响。	① 可以考虑实际大气中的各种气体成分以及水汽和气溶胶等对太阳辐射的削弱作用； ② 可以考虑海拔高度的影响。
缺点	① 不包括大气中的各种气体成分以及水汽和气溶胶等对太阳辐射的削弱作用； ② 无法考虑海拔高度的影响。	不包括实际大气中水汽和气溶胶等对太阳辐射的削弱作用。	① 理论计算复杂，难度大； ② 计算所需大气信息较多，难以获得； ③ 计算结果误差较大。

义明确^[6-7]，为此，必须选择那些与太阳辐射关系最直接的参量作为替代的气候学要素。

日照是一个与地面太阳辐射直接相关的物理量。在一般情况下，日照时间的长短与到达地面的太阳辐射量呈正相关关系，因此，可以较好地反映太阳辐射量的大小。但在实际应用中，为了使方程(2)具有明确的物理意义，其中的气候学要素应该是一个无量纲的参量，所以并不直接采用日照时间，而是用日照百分率(下文用 s 表示)，即一个时段内测站实际日照时数与当地可能日照时数的百分比。云量是另一个与到达地面的太阳辐射量密切相关的物理量。云量的多少可以在很大程度上反映太阳被遮蔽的程度，它与太阳辐射量呈负相关关系。由于云量本身就是无量纲的，因此在方程(2)的计算中可以直接采用，下文用 n 表示。从气候统计的角度看， $s + \bar{n} = 1$ 。

在关于太阳辐射气候学计算方法的研究中， s 和 n 都曾被用于计算总辐射^[4-5]。采用 s 时，其与总辐射的函数关系一般取线性的，也有的研究者采用二次非线性的；而采用 n 时，既有只考虑总云量的，也有同时考虑总云量和低云量的，其函数关系也是既有线性的，也有非线性的；另外，还有研究者同时采用 s 和 n 作为计算因子。但在20世纪80年代以后我国的研究者通过对不同经验公式的具体计算和对比分析表明，在我国单独采用日照百分率、并且其与总辐射的函数关系取线性时的计算效果(精度和空间稳定性)最好，采用 s 和 n 双因子的计算效果与之相当或次之，而单独采用 n 的计算效果则明显不如前两者。因此，在有日照观测资料的地区，把云量作为计算总辐射的因子意义并不大。

之所以如此，其原因在于采用云量计算时可能产生的误差较多，主要包括：①云量在气象台站是目测项目，其精度主要依赖于观测员的经验，很难得到保证，同时其空间和时间的连续性也会因为观测员的不同而受到很大影响；②不同云量和云状对地面辐射的影响往往是双向的，当天空为薄云时，太阳直接辐射也可以透过，同时很薄的卷云或卷积云还有可能会增加散射辐射，以这样的方式到达地面而使总辐射增加的部分在采用云量计算时无法被考虑；③云的几何性质(云高、云厚和云状等)和光学性质对太阳辐射的反射、散射和吸收也有较大影响，均无法通过云量来估量；④云的时空变化比较快，气象台站一天四次的观测不足以反映这种变化。

相比之下，日照时间在气象台站是器测项目，基本不受人为影响，所以日照百分率的精度要明显高于

云量，同时由于各个台站采用相同的仪器，也保证了其在空间和时间上的连续性，此外，由于日照时间反映的是太阳辐射到达地面后的一个参数，所以云的影响已基本(并非全部)包含于其中。但尽管如此，在没有日照观测资料的地区，云量仍然是计算总辐射的首选因子。对此，王炳忠等^[2-3]认为，如果单独使用云量计算，则应当用07、13、19时(北京时)3个时次的月平均总云量和低云量。

当然，由于日照时间并不能完全反映到达地面总辐射量的大小，所以在采用 s 计算总辐射时仍然会产生一定的误差。其误差的一个重要来源在于日照计自身的感应需要一定的辐照度，约为 $0.32\text{cal}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$ (在实际测量中定义为 $>120\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)，大约相当于太阳高度角 5° 时的辐射强度，也就是说，即使全日晴朗，从日照计求得的日照时数也不等于可照时数，而是92%左右，而当天空有云存在时，由此所产生的误差会更大。另外，由于日照时间只是测站一天日照的总时数，不能反映日照强度的变化，所以采用日照百分率无法计算出总辐射的日变化。

3) 经验系数 a 、 b

物理意义。物理意义充分是气候学方法计算地面太阳辐射的一个基本原则，因此，在总辐射计算中关于 a 、 b 系数物理意义的讨论也受到研究者的重视。对此，很多研究者从经验方程(2)出发，考虑日照百分率等于0或1这两种极端情况，认为系数 a 是太阳被完全遮蔽时的总辐射与计算初始值的比值，而 b 则是一个依赖于 a 的、非独立的系数^[6-7]。

从式(2)和表1可以看出， a 、 b 系数的物理意义与初始值和气候要素的选取有关，其中应包含所有初始值和气候要素中无法反映的对地面辐射强度有削弱作用的影响因子。例如当气候要素选取日照百分率而初始值为天文辐射时， a 、 b 系数应包含薄云(阳光能透过)、大气气体成分、水汽、气溶胶、海拔高度以及日照计灵敏度等的影响；若初始值取晴天总辐射， a 、 b 系数的物理含义就相对比较简单，不包括大气气体成分、水汽和气溶胶的影响。而当气候要素选取云量时，则云的几何性质和光学性质对太阳辐射的影响也应反映在 a 、 b 系数当中。总体而言， a 、 b 系数的物理意义十分复杂且并非固定不变，研究时应具体问题具体分析，云、大气、地形以及观测仪器等都需要加以考虑。

取值方法。在既有总辐射又有日照时间观测的气象台站(简称为日射站)， a 、 b 系数的确定通常根据实际总辐射和日照百分率采用回归的方法计算。但

在我国，这样的气象站非常有限且分布不均，因此在太阳辐射的气候学计算中，如何将日射站计算得到的 a 、 b 系数延伸到一般站，是个关键问题，计算精度在很大程度上取决于 a 、 b 系数空间分布的规律性。对于一定区域的 a 、 b 系数往往采用两种方法确定。一种称为区域平均取值法，即在所研究的广大地域范围内取一组统一的系数值；或将整个研究地区分成若干小的区域，将实测的总辐射、日照百分率或云量间的关系相近的各站划在同一小区域内，每个区域取一组统一的系数值，这样的取值意味着把每个区域内的云和大气状况（主要是水汽和气溶胶）看成是各处相同的。当然区域取得越小，其中各地云和大气状况就越接近，区域内总辐射的经验系数各处的波动相应地就越小，那么总辐射计算值的精度就会越高。但如果区域分得太小，由于分区线两侧经验系数的取值不同，将会造成许多人为的不连续，因此反而可能给全区域总辐射计算带来较大的误差。另一种是连续变化取值法，即根据各日射站点的经验系数，画出等值线分布图，内插得到各地的系数值。这种方法在日射站点较多的地区能使总辐射的计算达到一定的精度。但对观测站点稀疏、云和大气状况变化较大的地区，等值线的走向缺乏依据，这时需要寻求经验系数与地面常规气象要素间的数学联系，利用确定的数学公式求得各气象站的系数值，进而以各日射站的经验系数值为主要依据，参照各气象站的系数值作等值线分布图，然后再在该等值线图内内插求出各地的经验系数值，这样得到的经验系数能保持其空间变化的连续性和稳定性。有的研究者同时采用这两种方法，对系数 a 根据不同的区域取固定值，对系数 b 则通过内插取空间连续变化值。

1.1.2 直接辐射和散射辐射

直接辐射和散射辐射的气候学计算方法从本质上而言与总辐射一致，它们的区别只在于经验方程的形式，也就是所选取的气候学要素和函数形式对不同的计算量会有所不同。

由于太阳直接辐射到达地面的物理过程比较简单，因此其计算方法所存在争议也相对较少，我国大部分的研究者都认为采用日照百分率计算效果较好，只是有的采用一次函数关系，有的采用二次函数关系。对此，翁笃鸣^[1]认为，不论一次和二次方程均考虑了太阳直接辐射随日照百分率单调增长的特点，但二次函数关系还考虑了晴天日数增多时大气透明度条件的附加作用，物理根据更为充分，而一次函数关系中系数 a 在绝大多数情况下均为负值，给线性模式

的物理解释带来了困难。

到达地表面的太阳散射辐射，在晴天主要取决于太阳高度和大气透明度状况，有云时则还需考虑云量、云的几何性质和光学性质的重要作用。云的变化对散射辐射的影响是最主要但也是最复杂的，有研究认为高而薄的中高云使散射辐射随着云量的增多而增大，低而厚的低云使散射辐射随云量的增多呈先增大，到一定程度又减小的变化趋势。因此，大多数研究者都认为应采用云量来计算散射辐射，只是有的采用的是平均总云量，而有的则采用中高云量和低云量两个要素，函数关系的选取上，同直接辐射一样，也是既有一次的，也有二次的。

此外，值得一提的是，有研究者认为下垫面反射率也是影响散射辐射通量值的重要因子，当地面反射率增加时，会引起下垫面反射辐射的增加，进而使大气向下的散射辐射也会相应增大，这种效应在下垫面有雪盖时更为显著，例如当地表反射率从0.20增加到0.80时，散射辐射量可增加约5%。因此，在计算中应考虑引入地表反射率因子对经验方程进行适当的订正，这在地表反射率较大的地区更有必要。

1.1.3 三个辐射量之间的关系

散射辐射是由太阳辐射经过大气和云的散射而产生，直接辐射则是没有被任何物质所散射，直接到达地面的太阳辐射，它们是总辐射的两个分量，这3个量之间的关系是对其计算结果进行分析的一个重要依据。当天空全部为云遮蔽或部分有云但完全遮蔽太阳时，总辐射就是散射辐射；而只有当没有地球大气（也包括云）存在时，总辐射才是直接辐射。因此，在实际大气条件下，散射辐射总是存在，而直接辐射却有可能等于零。研究工作中，通常将直接辐射或散射辐射与总辐射的比值作为分析三者关系的一个物理量。有关结果表明^[2]，在平均云量多、大气透明度差的地区（例如川黔地区），散射辐射所占比例很大，而在平均云量少、大气透明度好的地区（例如西藏地区），则是直接辐射所占比例较大。

理论上，总辐射是直接辐射和散射辐射的和，很多研究者在总辐射的计算中也是据此将直接辐射和散射辐射两者相加而得到，或者在直接辐射或散射辐射的计算中，由总辐射减去其中之一而得到。但也有的研究者发现，在其计算结果中存在着直接辐射和散射辐射的和与总辐射并不相等的情形，分析表明这主要是由于在这3个量的计算结果中所存在的误差均不相同而引起的，因此认为在实际的应用中，应尽可能对3个量分别独立计算，这样得到的结果才比较客观，

不会把某两个量的计算误差带入到另一个量中，而将总辐射等于直接辐射和散射辐射之和的关系只用作对计算结果的检验。

1.1.4 气候学方法的优缺点

综上所述，采用气候学方法计算到达地面的太阳辐射有以下几方面的优点：①物理意义明确，计算中所采用气候学要素不管是日照百分率还是云量，它们与到达地面的太阳辐射量均密切相关；②计算简单，利于推广，由于所采用函数关系大多数仅为一次或二次，所以不论是经验系数的确定还是辐射量的计算都不复杂；③计算结果精度较高，就单点误差而言，总辐射和直接辐射通常都在10%以下，散射辐射较大一些，基本可以满足太阳能资源评估的需求。因此，地面太阳辐射的气候学计算可以说是迄今为止最成熟、应用也最广泛的方法。

尽管如此，该方法也还存在着以下几个方面的不足：①缺乏对地形影响的考虑，由于日射站通常都是建在相对平坦的地方，因此不存在地形遮蔽的问题，但在实际的区域计算中，不可避免地会遇到山地或丘陵等复杂地形，它们对于太阳辐射的遮蔽作用会给计算结果带来一定的误差；②经验系数的确定依赖于地面台站的辐射观测值，在日射站点稀疏而地形又比较复杂或者云和大气状况的时空变化较大的地区，采用内插方法得到的经验系数可能会给计算结果带来较大误差，而且这种误差还难以评估；③由于统计方法本身的局限性，计算结果难以准确反映出地面辐射极值的分布，无法满足实际开发利用的需求。

1.2 基于卫星遥感观测资料的统计反演法

20世纪下半叶以来，随着辐射传输理论的发展和卫星遥感观测技术的逐渐成熟及其观测资料在时空连续性方面的明显优势，越来越多的研究者开始研究利用卫星遥感资料计算地面太阳辐射量的方法。基于卫星遥感观测资料的统计反演法有两种思路。

其一是建立卫星测值与所计算地面辐射量之间的回归关系，然后根据地面辐射量的观测值确定回归系数。采用这种方法的前提是要从理论上确定卫星测值与所计算的地面辐射量之间存在着物理上的联系，只有这样，才能保证所建立的回归关系具有充分的物理根据。陈渭民等^[8-9]推导了静止卫星测量的可见光和红外辐射与到达地面太阳总辐射之间的物理关系，并据此选择统计因子，建立多个卫星资料估计地面总辐射的统计模式，经比较分析得到一个最佳的估计模式：

$$Q = a_0 C_{\text{VIS}} + a_1 C_{\text{VIS}}^2 + a_2 C_{\text{IR}} + a_3 C_{\text{IR}}^2 + a_4 \mu_0 + a_5 \mu_0^2 + a_6, \quad (3)$$

式中 C_{VIS} 和 C_{IR} 分别是卫星在可见光和红外光通道的测值； μ_0 是太阳天顶角的余弦； a_0, a_1, \dots, a_6 是经验系数，根据地面辐射观测资料确定。通过多个地面站点的观测数据给出经验系数的分布图，对无站点处采用内差的方法确定，进而利用GMS (Geostationary Meteorological Satellite) 卫星资料根据上式给出某一区域地面总辐射的空间分布。

其二称之为云量反演法，基本思路是首先利用卫星遥感资料反演得到云对太阳辐射的影响因子（可以是云量，也可以是由云量派生出的其他因子），然后利用上述气候学方法计算到达地面的太阳辐射。

在早期的工作中研究者首先根据红外和可见光云图来确定云量，如利用TIROS-N的卫星云图，根据地物目标确定经纬度，得到总云量分布，进而根据气候学方基本原理建立其与地面总辐射的函数关系，计算得到总辐射分布。国际卫星云气候计划 (ISCCP) 从1984年开始提供全球的总云量卫星遥感资料，该资料可以直接用于气候学方法中对地面总辐射的计算。翁笃鸣等^[10]通过经验拟合并根据边界条件对经验函数作调整，得到地面总辐射与ISCCP总云量的如下关系：

$$Q = Q_0 (1 - cn^2), \quad (4)$$

式中 c 是统计系数， n 是ISCCP所提供的总云量。

利用卫星遥感资料还可以得到行星反射率，由于一定时间、空间尺度平均的行星反射率决定于平均云量（一定时间、空间尺度的地表和大气反射率均可以看作是不变的），所以行星反射率的观测值可用来确定相应的云量因子，如下所示：

$$A_c = \frac{\alpha_p - \alpha_{\min}}{\alpha_{\max} - \alpha_{\min}}, \quad (5)$$

式中 α_p 是行星反射率， α_{\min} 和 α_{\max} 分别是最小和最大行星反射率；该因子即反映了云对于太阳辐射的遮蔽程度，因而也可采用它根据气候学方法计算地面太阳辐射。采用这种方法，钟强等^[11]建立了地面总辐射与行星反射率的相关关系：

$$Q = Q_0 [1 - (1 - K) A_c], \quad (6)$$

式中 K 是全天有云时的总辐射与晴天总辐射的比值。

上述基于地面观测和卫星遥感观测资料的统计方法在本质上一致的，区别只在于前者采用的资料是自下而上的，计算结果依赖于地面观测台站的数量及空间分布；而后者采用的资料则是自上而下的，计算结果依赖于卫星传感器的性能以及扫描地球的时空分辨率。

2 物理反演法

太阳辐射在经过大气层到达地面的过程中，会受到云、气溶胶、水汽和各种气体成分的散射、吸收、

反射等作用而被削弱，这些因素的时空变化在不同程度上使到达地面的太阳辐射发生变化。现代辐射传输理论的发展为详细考虑太阳辐射在大气中的传输、削弱过程提供了基础。根据辐射传输理论计算地面太阳辐射量的方法被称作物理反演法，这是当前国际上进行太阳能资源计算和评估的主流方法^[12-13]。

由于地面气象台站在观测项目和空间分布（垂直和水平）上均无法为辐射传输理论的应用提供足够的输入资料，而卫星遥感的观测资料恰恰具有这两方面的优势，因此研究者应用物理反演法计算地面太阳辐射时往往需要利用卫星遥感资料。

采用物理反演法计算地面太阳辐射通常的做法是将云和大气对太阳辐射的削弱作用分开进行考虑，即首先计算晴天（clear-sky）条件下的太阳辐射，然后引入云的削弱因子计算全天空（all-sky）条件下的太

$$S_{as} = H_0 \cdot \cos\theta \cdot \tau_{Gas} \cdot \tau_{Ozon} \cdot \tau_{WV} \cdot \tau_{AA} \cdot [0.5(1-\tau_R) + B_a(1-\tau_{AS})] / [1-M + M^{1.02}] / E_R, \quad (9)$$

$$S_G = r_g \cdot r_s \cdot (D_{clear} + S_{as}) / (1-r_g \cdot r_s), \quad (10)$$

式中， S_{clear} 是晴天条件下的水平面散射辐射， S_{as} 表示天空散射， S_G 表示地气间多次散射； τ_{AA} 和 τ_{AS} 分别是气溶胶粒子的吸收透过率和散射透过率； B_a 是气溶胶前向散射率比， M 是相对大气质量； r_g 为地表反照率， r_s 为天空反射率。

将（7）式中的直接辐射和（8）式中的散射辐射求和即可得到晴天条件下的水平面总辐射。

除此之外，国际上还有Watt Model, Hoyt Model, Lacis and Hansen Model, Iqbal Model C等不同的参数化模型，各模型所侧重考虑的影响因子不尽相同，每种因子的参数化方案也有所差别。

2.2 全天空总辐射

全天空条件下，云是太阳辐射的主要削弱因子之一。关于云的影响的参数化处理，国际上主要根据卫星遥感的行星反射率进行计算，其基本方法如式（4）所示。目前常见的如HELIOSAT Method和DLR Method等均是利用METEOSAT卫星的观测资料进行云影响因子的参数化计算。

赵东^[16]在综合考虑云量和云光学厚度的基础上，给出了适用于中国的各辐射量的云参数化方案。对于水平面直接辐射：

$$D_{Cloud} = D_{clear} (1 - 0.1765 \cdot C_{cldf}^{1.0287} \cdot C_{cot}^{0.4957}); \quad (11)$$

对于水平面散射辐射：

$$S_{cloud} = \frac{0.6244 \cdot A_{aot}^{0.2796} \cdot C_{cldf}^{0.6222} \cdot C_{cot}^{0.1301} \cdot D_{clear}}{1 - 0.6244 \cdot A_{aot}^{0.2796} \cdot C_{cldf}^{0.6222} \cdot C_{cot}^{0.1301} \cdot D_{clear}}; \quad (12)$$

阳辐射。

2.1 晴天总辐射

对于晴天总辐射的计算目前常用的是Bird模型^[14-15]，该模型将总辐射分为直接辐射和散射辐射两部分分别进行计算，其中直接辐射的表达式为：

$$D_{clear} = H_0 \cdot \cos\theta \cdot \tau_R \cdot \tau_{Gas} \cdot \tau_{Ozon} \cdot \tau_{WV} \cdot \tau_{Ac} / E_R, \quad (7)$$

式中， D_{clear} 是晴天条件下的水平面直接辐射， H_0 是太阳常数， θ 是太阳天顶角， τ_R 为瑞利散射透过率， τ_{Gas} 为混合气体的吸收透过率， τ_{Ozon} 为臭氧吸收透过率， τ_{WV} 为水汽吸收透过率， τ_{Ac} 为气溶胶粒子的透过率， E_R 为日地距离校正系数。

散射辐射的计算比较复杂，分为天空散射和地气间多次散射两个部分，即：

$$S_{clear} = S_{as} + S_G, \quad (8)$$

对于水平面总辐射：

$$G_{cloud} = \frac{D_{clear}}{1 - 0.6244 \cdot A_{aot}^{0.2796} \cdot C_{cldf}^{0.6222} \cdot C_{cot}^{0.1301}}; \quad (13)$$

式中， A_{aot} 是气溶胶光学厚度， C_{cldf} 是云量， C_{cot} 是云光学厚度。

事实上，云对于太阳辐射的影响是非常复杂的，不同的云量、云高、云厚以及云的物理组成成分等对太阳辐射的削弱作用都是有差异的，因而在太阳能资源的物理反演中该因素所带来的不确定性可能是最大的。

以上是基于卫星遥感资料、利用参数化方法对太阳能资源进行物理反演的基本思路。当前，国际上太阳能资源开发利用规模较大、技术水平较高的国家，大多采用这种思路进行精细化的太阳能资源评估。例如，美国可再生能源实验室（NREL）发展的气候辐射模式CSR，德国航天中心（DLR）发展的晴天直接辐射计算方法，HELIOSAT计划对地面总辐射的计算方法，由联合国环境规划署（UNEP）和全球环境基金（GEF）联合资助的SWERA项目对发展中国家的太阳能资源评估所采用的方法等，均是以上述思路为基础进行地面太阳辐射的计算和太阳能资源的分析。

除了上述参数化方案以外，国际上还有根据分光光谱辐射传输模型进行太阳能资源物理计算的方法，如SPCTRAL模型，SEDES2模型及SMART2模型等，这些模型的主要目的是为太阳能工程设计服务，输入参数较多，计算相对复杂。

3 复杂地形下的计算方法

如前所述, 由于气象台站所处地形通常都相对平坦, 所以在采用气候学方法计算地面辐射量时基本不存在由于地形起伏而引起的误差。但事实上, 我国是一个多山、多丘陵的国家, 很多地区地形复杂, 引起地表辐射量变化的因素除了太阳、云和大气等, 还有地形自身和相互之间对太阳辐射的遮蔽, 以及坡地的反射作用等^[17]。因此, 关于复杂地形下到达地面太阳辐射量的计算和研究显得非常重要。

3.1 基本思路

复杂地形下的总辐射通常分为直接辐射和散射辐射两个部分分别计算^[18]。

直接辐射的计算主要归结为通过转换因子将水平面上的数值转换到倾斜面上, 即认为:

$$\frac{D_s}{D_H} \approx \frac{Q_{OS}}{Q_{OH}}, \quad (14)$$

式中, D_s 是坡地上的直接辐射; D_H 是水平面上的直接辐射, 可通过以上介绍的方法计算得到; Q_{OS} 和 Q_{OH} 分别是坡地上和水平面上的天文辐射, 两者均可以通过理论计算精确得到。由此即可得到:

$$D_s \approx \frac{Q_{OS}}{Q_{OH}} \cdot D_H \text{ 或 } D_s \approx \frac{D_H}{Q_{OH}} \cdot Q_{OS}, \quad (15)$$

式中, $\frac{Q_{OS}}{Q_{OH}}$ 称为坡地系数, 反映的是坡地对太阳辐射的影响程度; $\frac{D_H}{Q_{OH}}$ 称为大气透明度系数, 反映的是大气对太阳辐射的削弱程度, 可以根据气候学统计方法用日照百分率的函数关系得到。

坡地散射辐射的计算比较复杂, 需要考虑三个方面因素的影响: 一是坡地与太阳相对位置的影响, 实质上是由环日散射所引起的坡地散射辐射各向异性特点, 由于这一部分的计算比较复杂, 也有的研究者将其假定为各向同性, 直接采用水平面上的散射辐射(通过气候学方法得到)而进行简单的近似; 二是坡地自身及周围地形对计算点的遮蔽影响, 如前所述, 这种影响主要体现在坡地日出、日没时角的变化上; 三是周围山地反射的影响, 任何非水平面都会接受到一部分地面反射, 它们也以散射辐射形式到达, 其大小主要决定于周围山地的地表反射率。

天文辐射。这里所说的天文辐射是在复杂地形条件下, 地球表面无大气时到达地表的总辐射, 此时由于地形的起伏会引起海拔高度和遮蔽角的不同, 进而造成日出、日没时角的差异, 从而使其与前述气候学方法中所用的天文辐射在数值上会有所不同。对于任一时段天文辐射总量的计算有四种不同的方法: ①泰

勒展开法, 适合于中国范围内坡度小于 60° 时坡向偏南各坡面上任何时期以及坡向偏北各坡地夏半年内的太阳辐射总量; ②精确累计法, 适用于全球范围内任意纬度、任意方位和任意倾角坡面, 但需要对每一天的辐射情况进行逐日分析和计算; ③特征赤纬法, 适用于每天都有太阳照射的月份; ④椭圆积分法, 适用于全球任意坡向坡度的坡地。上述这些方法所考虑的地形都是孤立坡面, 在天文辐射的计算中主要注重对日出、日没时角变化的研究, 而没有涉及周围地形的反射辐射及其对于所计算坡地遮蔽的影响, 这要到后面利用地理信息数据之后才得以考虑。但是, 同前述气候学方法中的初始值类似, 这些关于天文辐射计算方法的研究也是其后复杂地形条件下实际辐射量计算的基础。

地形参数是复杂地形下太阳辐射计算的基本要素, 包括坡向、坡度和高度。在最初的研究中, 无法考虑复杂的地形参数, 往往只是设立特定的坡度和坡向, 计算孤立坡地或规则地形条件下的太阳辐射。尔后, 为了研究的需要, 李占清等^[18]根据海拔高度计算复杂地形下的坡度和坡向, 并建立了计算机模型。20世纪90年代之后, 随着地理信息系统技术的发展, 研究者开始采用数字高程模型(DEM)数据提取有关的地形参数, 从而使问题变得相对比较简单。

日出、日没时角是另外一组复杂地形下太阳辐射计算的基本参数, 它们分别指太阳照射开始和结束时太阳在赤道平面上的投影与正午时刻太阳在赤道平面上的投影之间的夹角。坡地上的可照时间和太阳辐射量不仅与坡向和坡度等地形参数有关, 而且还要根据纬度和一年中的不同时期来确定日出和日没时角的表示式。晴天条件下, 在平坦的地方, 一天的日出、日没时角分别只有一个且只与纬度和每天的日期有关; 在孤立的坡地, 一天的日出、日没时角也分别只有一个, 但其大小还与坡度和坡向有关, 可以通过理论计算精确得到; 但在复杂的地形条件下, 由于坡地之间相互遮蔽的影响, 每个坡地都可能存在若干个可照时段, 此时需要对每个可照时段分别计算其日出、日没时角, 问题就变得比较复杂, 通常借助计算机来完成。

3.2 地理信息数据的利用

地形参数是复杂地形下太阳能资源计算的基本要素, 包括坡向、坡度和高度。现代地理信息系统的发展为获得高分辨率的地形参数提供了可能, 从数字高程模型(DEM)中得到的坡向、坡度和高度, 其分辨率能够达到米甚至更高。利用这样的数据进行太阳能资源评估可以很好地反映地形的影响, 同时在输出结

果的图形表现形式上也可以得到很大的提高^[19]。

4 总结与展望

本文对国内近60余年太阳能资源计算方法的发展

情况进行了归纳总结，总体概括为统计反演法和物理反演法两大类，每一类又包含有不同的方法，各种方法的核心内容和优缺点汇总于表2。

表2 各类太阳能资源计算方法的核心内容和优缺点
Table 2 Core content, advantages and disadvantages in all kinds of solar energy resource calculation methods

方法分类	方法名称	方法核心	主要优点	主要缺点
统计反演法	基于地面观测资料的统计反演法	建立地面观测要素与各辐射量的统计关系	① 物理意义明确; ② 计算简单, 利于推广; ③ 计算结果精度较高	① 缺乏对地形影响的考虑, 难以准确反映出地面辐射极值的分布; ② 经验系数的确定依赖于地面台站的辐射观测值; ③ 时间分辨率较低
	基于卫星遥感资料的统计反演法	建立卫星观测要素与地面辐射量的统计关系	① 物理意义明确; ② 空间分布连续, 分辨率高	① 计算结果依赖于卫星传感器的性能以及扫描地球的时空分辨率; ② 经验系数的确定依赖于地面台站的辐射观测值; ③ 时间分辨率较低
物理反演法	基于卫星遥感资料的参数化物理反演法	对影响太阳辐射的各因素进行参数化计算	① 时空连续性好; ② 高时空分辨率; ③ 物理过程清晰	① 计算复杂; ② 数据输入量大; ③ 缺乏地面校准时, 误差较大
	基于分光辐射传输模型的物理反演法	对太阳辐射进行分光谱计算	① 计算过程更为精细; ② 可以计算不同光谱波段的太阳辐射	① 计算复杂; ② 数据输入量大

随着太阳能资源大规模开发利用, 复杂地形下的太阳能工程也越来越多, 对太阳能资源评估技术的精细化程度要求也越来越高, 为此, 要不断发展新的方法, 获得能够满足工程应用的高时空分辨率、高精度的太阳能资源评估数据。国际上的太阳能资源评估以基于卫星遥感资料的物理反演方法为主, 同时以高质量的地面辐射观测数据对评估结果进行校准, 有效提高了太阳能资源评估的时空分辨率和精确度; 我国目前的太阳能资源评估对统计反演法和物理反演法并重, 但由于现有的地面辐射观测在空间分布、观测项目设置和观测数据质量等方面均存在着一定问题, 从而影响评估结果的校准和订正, 在一定程度上制约了评估结果时空分辨率和精确度的有效提高。

参考文献:

- [1] 翁笃鸣. 试论总辐射的气候学计算方法. 气象学报, 1964, 34(3): 304-315.
- [2] 王炳忠, 张富国, 李立贤. 我国的太阳能资源及其计算. 太阳能学报, 1980, 1(1): 1-9.
- [3] 王炳忠. 中国太阳能资源利用区划. 太阳能学报, 1983, 4(3): 221-228.
- [4] 祝昌汉. 再论总辐射的气候学计算方法(一). 南京气象学院学报, 1982, 1: 15-24.
- [5] 祝昌汉. 再论总辐射的气候学计算方法(二). 南京气象学院学报, 1982, 2: 196-206.
- [6] 王炳忠, 申彦波. 自然环境条件对太阳能资源计算影响的再思考. 应用气象学报, 2012, 23(4): 505-512.
- [7] 申彦波, 张顺谦, 郭鹏, 等. 四川省太阳能资源气候学计算. 应用气象学报, 2014, 25(4): 493-498.
- [8] 陈渭民, 缪美好, 高庆先. 由GMS资料估算夏季青藏高原地区地面总辐射. 南京气象学院学报, 1997, 20(3): 326-333.
- [9] 陈渭民, 边多, 郁凡. 由卫星资料估算晴空大气太阳直接辐射和散射辐射. 气象学报, 2000, 58(4): 457-469.
- [10] 翁笃鸣, 高庆先, 刘艳. 应用ISCCP云资料反演青藏高原地面总辐射场. 南京气象学院学报, 1997, 20(1): 41-46.
- [11] 钟强, 睦金城. 利用Nimbus-7行星反射率观测资料估算青藏高原地区的总辐射. 气象学报, 1989, 47(2): 165-172.
- [12] 申彦波. 近20年我国太阳能资源评估中卫星遥感资料的应用. 气象, 2010, 36(9): 111-115.
- [13] 钟强. 地面辐射气候学研究进展——从卫星反演地面辐射能收支的若干问题. 地球科学进展, 1996, 11(3): 238-244.
- [14] 陈仁升, 康尔泗, 李新, 等. 任意地形实际天气条件下小时入射短波辐射模型. 中国沙漠, 2006, 26(5): 773-779.
- [15] 李云艳, 孙治安, 曾宪宁, 等. 晴天地表太阳辐射的参数化. 南京气象学院学报, 2007, 30(4): 512-518.
- [16] 赵东. 中国太阳能长期变化及计算方法研究. 南京: 南京信息工程大学, 2009.
- [17] 傅抱璞. 论坡地上的太阳辐射总量. 南京大学学报, 1958, 2: 47-82.
- [18] 李占清, 翁笃鸣. 丘陵山地总辐射的计算模式. 气象学报, 1988, 46(4): 461-468.
- [19] 曾燕, 邱新法, 刘绍民. 起伏地形下天文辐射分布式估算模型. 地球物理学报, 2005, 48(5): 1028-1033.