

光合有效辐射(PAR)估算的研究进展

董泰锋, 蒙继华, 吴炳方, 杜鑫, 钮立明

(中国科学院遥感应用研究所, 北京 100101)

摘要: 光合有效辐射(Photo-synthetically Active Radiation, PAR)是研究全球变化与陆地生态系统变化的核心之一,不仅是衡量生态系统光合作用变化、碳收支变化的重要数据来源,也是反映全球气候变化主要驱动因子。本文在回顾PAR估算方法的基础上,综合分析了传统方法中的气候学方法、模型参数方法,及在此基础上发展起来的基于遥感的转换系数、模型化参数法的优缺点,并对PAR估算方法研究做出了展望。气候学法、模型参数法等传统方法一直是进行PAR估算的常用手段。然而,随着对生态系统研究的日益深入,基于遥感的估算方法已经成为一种新的手段,凭借遥感覆盖范围广的优势,它使得获取区域乃至全球PAR估算成为可能。因此,如何利用遥感数据获取长时间序列PAR,成为目前关注的重点之一。已有研究表明,查找表方法之类的定量化估算方法将成为主要的估算方法,它不仅在机理上解释了PAR的传输过程,而且增强了估算方法的可靠性、可操作性与普适性。

关键词: PAR; 估算; 影响因素; 遥感

1 引言

光合有效辐射(Photo-synthetically Active Radiation, PAR)是指波长范围为400~700 nm能为植被进行光合作用的那部分太阳辐射。PAR是形成生物量的基本能源,控制着陆地生物有效光合作用的速度,直接影响到植被的生长、发育、产量与产量质量^[1];同时,PAR也是重要的气候资源,影响着地表与大气环境物质、能量交换^[2]。因此,PAR的估算,对于定量估算光合作用,有助于探索绿色植被的起源、生物利用太阳能的机理等重大理论问题,有助于提高全球生态系统的碳估算精度,维护国家利益,也直接关系到农业产量的形成并是进一步提高产量的依据,这对全球大气CO₂浓度升高、全球变暖、粮食安全等全球环境和人类生存问题的研究及解决有着重要的实际应用价值^[3]。Montheith^[4]在早期的研究中提出了著名的Montheith公式,认为在非胁迫条件下,净初级生产力NPP(Net Primary Production)与植被吸收的光合有效辐射(APAR)呈明显的线性关系。在众多的生态过程模型、作物生产模型中,植被净初级生产量是PAR的函数,光合有效辐射是这些模型的重要数据源,并可为模型提供校

正与验证数据^[5]。

目前PAR有两种不同的量度系统:一种是能量系统,测定光合辐射度 Q_{PAR} ,单位为 $W \cdot m^{-2}$,主要用于辐射、气象与气候方面的研究;另一种是量子系统,测定光合有效量子密度 U_{PAR} ,即光量子通量密度(Photosynthesis Photon Flux Density, PPFD),单位为 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$,主要应用于农业、生态等方面领域的研究领域。两者之间的量子转换系数公式表示为:

$$U_{PAR} = \mu \times Q_{PAR} \quad (1)$$

式中: μ 通常取值为4.55^[6],而实际上 μ 受到多种因素的影响,因此 μ 一直是一个研究热点。

基于光合有效辐射的重要性,众多科学研究者展开了大量的PAR估算工作。本文从经验到机理的发展角度出发,把估算方法分成传统的光合有效辐射估算方法以及在此基础上发展起来的遥感估算方法两部分,并对主要方法进行了归纳。

2 传统估算方法

传统的PAR估算方法,主要是依托于气象站、通量观测站(如FLUXNET)所获得的观测数据

收稿日期:2010-08; 修订日期:2011-01.

基金项目:国家科技支撑计划项目(2008BADA8B00-2);中国科学院知识创新工程重大项目(KSCX-YW-09-01)。

作者简介:董泰锋(1985-),汉,广东人,博士研究生,主要从事农业遥感研究。E-mail: dtf040105@163.com

通讯作者:蒙继华, E-mail: mengjh@irsa.ac.cn

进行PAR研究。传统的PAR估算方法主要分成以气候学方法为代表的统计方法和基于大气辐射传输理论的参数化模型两种方法。

2.1 统计方法

由于常规的气象站没有PAR的专门观测项目,因此PAR的估算长期主要依赖于经典气候学方法。在气候学方法中,PAR被认为是太阳下行辐射或是短波辐射的一部分,也就是说与总太阳辐射或是短波辐射存在着一定的转换关系,其表达式为:

$$PAR = \eta_Q \times Q \quad (2)$$

式中: η_Q 是光合有效系数,即PAR占太阳总辐射的比例。因此在气候学方法中,首先是必须确定 η_Q ,并通过估算太阳下行辐射得到PAR。Montheith的研究表明 η_Q 趋于常值,是太阳总辐射的50%^[7],而黄秉维先生则提出 η_Q 为0.47^[8]。但大量的研究表明 η_Q 不是一个恒定的值,而是一个在天文因子、气象因子的共同作用下不断产生变化的过程。

国内,董振国等^[9]、王炳忠等^[10]、周允华等^[11-12]、张运林等^[13]的研究表明 η_Q 在时间、空间上均呈现明显变化特征,且受到气压、海拔、云等因素的影响;李韧等^[14]在五道梁地区进行的 η_Q 研究中考虑日照百分率,有效地提高了 η 的 Q 估算精度;姚济敏等^[15]在研究中发现:在沙尘天气下,尘埃颗粒大小、水汽显著地影响 η_Q 的稳定性;在空间分布上,李刚等^[16]发现内蒙古草原的PAR与温度基本是一致的;白建辉等^[17]认为不能忽略散射因子对于PAR的影响;国外方面,Möötus等^[18]通过实验认为直射辐射与PAR的比值是大气透射率、太阳高度角的函数;Alados等^[19-20]建立 η_Q 关于露点温度、晴朗系数(太阳直射与总太阳辐射的比值,Clean Indies, CI)等因子的计算公式,但随后的验证工作中发现该经验模型存在着明显的区域性;而González等^[21]利用BIRD模型进行晴空 η_Q 的研究,发现 η_Q 主要是受到大气含水量与大气厚度的影响,随大气含水量的增多而增多,随大气厚度的增多而降低。

此外,散射对于作物光合作用重要性^[22]也引起了科学工作者对散射PAR与太阳总辐射比值研究的兴趣,Jacovides等^[23]在研究CI对总PAR影响的基础上,发现散射PAR与晴朗系数CI也存在着较好的相关性,并建立散射PAR与CI二次多项模型。

除了进行 η_Q 的估算,还需要进行太阳总辐射

的估算。其中主要是统计方法是在辐射观测数据缺乏的情况下,通过各种气象数据如温度、降水、日照等进行太阳下行辐射的模拟。如经典的Angstrom方程^[24-25]中太阳下行辐射是日照时数的函数。朱旭东等^[25]利用Angstrom方程,结合气象数据模拟太阳下行辐射与PAR转换系数,从而得到中国近50年的PAR时间序列,较好地分析PAR的时空变化;Winslow等^[26]发展了VP-RAD太阳下行辐射估算模型,模型中主要利用最大温度、最小温度、平均温度、日较差、总降水量以及经纬度、高程等信息进行太阳总辐射的拟合,并进行1987全球日平均PAR的估算。其结果与Pinker等^[27-28]利用卫星数据反演的PAR相比较,前者要比实测值小,而后者则相对偏高。

除了气候学方法,另外一些学者展开了其他统计方法的研究,如López等^[29]利用前向神经网络方法建立PAR与温度、相对温度、露点温度的统计模型;Nojd等^[30]则通过长时间序列的最小温度、最大温度与降雨量建立PAR经验性估算模型;此外,Grant等^[31]建立380 nm处的紫外总辐射、散射、气溶胶、水汽含量与PAR的统计估算模型。

统计方法简单明了,计算量较小,但并不能在机理上解释PAR的传输过程;同时,统计方法的估算需要大量的观测数据,这些数据必须要有质量保证,模型才能达到一定的精度;此外, η_Q 具有明显的区域性,其外推性较差。

2.2 模型参数法

模型参数法是从太阳辐射传输的机理过程上建立PAR的估算方法。从整个地-气系统上看,太阳顶层辐射到达地表是一个复杂的传输过程,主要是受气溶胶、水汽、臭氧等大气成分的吸收、散射以及地表多次反射的作用。

自1978年Leckner基于辐射传输原理发展了第一个简单的参数化模型后,BIRD^[32]、CPCR2^[33-34]、Heliosat^[35]等类似的参数化模型得到快速发展。在该类模型中,太阳下行辐射主要分成两部分,一部分考虑了大气层外太阳辐射量受大气衰减而没有考虑散射到达地面的太阳辐照度,另一部分考虑了大气层外太阳辐射量受大气与地表的影响而发生散射的太阳辐照度。而光合有效辐射是太阳下行辐射中可见部分,因此如果能够获得大气光学厚度、透射率以及地表的反射率,则可以通过模型获

得光合有效辐射^[36]。

根据光谱分辨率的宽窄与波段数目,该类模型可以分为两种类型^[37]:宽波段模型(Broadband Model)与光谱模型(Special Parametric Model)。宽波段模型一般只把整个光谱范围分成较少的几个波段,如 Gueymard^[33-34]于20世纪90年代发展的PAR MODEL以及CPCR2模型,其中PAR MODEL模型只有400~700 nm一个波段,适合于光合有效辐射的估算,而CPCR2模型中分成了290~700 nm与700~2700 nm两个波段,只有第一波段合适于PAR的估算。Arboledas等^[38]考虑了气溶胶、大气分子对太阳散射的作用,分别对两个模型的散射部分进行Angstroms系数修正,并运用于晴朗天气下的PAR估算,结果表明,改进后模型有效地提高了散射PAR的估算精度,尤其是改进后的PAR MODEL效果更为明显。

宽波段模型可以有效地提高总PAR与直射PAR的估算精度,但散射PAR则存在较大误差^[37]。原因是大气质量在不同波段具有不同的反应,而宽波段模型正是忽略了这种差异而以均值或经验值代替。

光谱模型相对于宽波段模型而言,主要区别是模型中波段分辨率不同,并对气溶胶类型进行细化。如Bird与Riordan^[32]的SPCTRAL2模型(又称BIRD模型)及其改进模型^[37],Gueymard^[39]的SMARTS模型等。在该类模型中,不仅提高了波段分辨率,也细化其中的气溶胶模式,强化了大气参数对太阳辐射过程的影响,从而有效地提高了在不同地区不同时间的太阳辐射的估算精度。同时,该类模型也适应于PAR的估算,Alados等^[37]利用MARTS2与SPCTAL2两个模型开展西班牙两个观测站点的PAR估算,根据模型中不同的气溶胶模式,进行筛选估算,以精度最好的作为结果。由于SPCTAL2具有多样的气溶胶模式,因此估算精度高些,研究也说明选择合适的气溶胶类型对PAR估算,尤其是散射PAR起重要影响。

由于云、地形相对气溶胶、大气含水量更难模拟,所以一般PAR的估算只局限于晴朗天气下,并在模型假设地表是平坦的。但实际上,PAR的传输过程中,除了气溶胶对PAR起着重要的作用外,云以及地表环境也是PAR传输过程的重要影响因素,尤其是对散射PAR作用。Alados等^[40]展开了多

云天气下PAR的估算,为了提高估算精度,模型考虑到太阳辐射在薄云、中云、高云等的不同透射率;而Wang等^[41-42]在德国Berchtesgaden国家公园的PAR估算中,考虑到该地区地形复杂,在MUARC散射模型中强调大气环境与地形对PAR的影响,结果有效提高总PAR、直射PAR以及散射PAR的估算精度,而其中散射PAR精度则在60%以上;Bosch等^[43]通过PAR与气溶胶、大气可降水量、地表气压、地表反照率分析,并在对SMART2模型参数简化的基础进行总PAR与直射PAR的估算,并得到很好的估算精度。

模型化参数法较合理地解释太阳辐射的传输过程,同时可以进行直射PAR与散射PAR的估算,有效地提高PAR的估算精度。然而该类模型由于所需参数较多,部分参数难以获取,而以固定值替代;其次,模型进行简化,把大气-地表看成是各向同性,忽略了地表的实际情况。这些影响到估算精度,尤其是散射PAR的结果。不过,参数化模型的发展为遥感的PAR估算提供了坚实的理论基础。

3 遥感估算方法

然而,随着对生态系统的深入研究,对光合有效辐射在空间与时间上的研究也成为生态系统深入研究的重点。而无论基于站点的气候学统计方法还是基于站点的模型参数方法,都无法满足研究者对空间精度的需要。目前大多基于遥感的GPP/NPP模型所需要的PAR是利用站点PAR或是气象数据进行空间插值所得,如MODIS的GPP/NPP产品中所需要的PAR是由NASA数据同化办公室(NASA DAO)的气象数据插值获取^[44],影响到GPP/NPP的估算精度。随着遥感技术的不断发展,遥感成为获较高分辨率PAR的一种可行性方法。而从遥感的反演过程中可以看到,利用遥感进行PAR的估算方法研究的总体思路是建立遥感反演模型,解决光合有效辐射从地面观测向卫星遥感测量的时空尺度转化问题,是实现生态系统模型中自上而下的遥感反演模型与自下而上的过程模型有机结合的关键步骤^[36]。

早期基于PAR的遥感估算的主要思想延续了传统方法中的统计方法与模型参数法,随后又发展了以辐射传输模型为基础的查找表法。所以,可以

把基于遥感的PAR估算方法分成转换系数法、模型参数法、查找表法以及其他方法。

3.1 转换系数法

转换系数法是气候学方法的延续。因此,重点是放在利用遥感进行太阳下行辐射或是短波辐射的估算研究。通常,太阳下行辐射的估算有两种方法:①通过建立太阳下行辐射或短波辐射与气象因素关系的统计方法;②基于大气辐射传输模型的机理性方法。近几十年来,国际成立了不同的全球、区域内的辐射收支平衡的实验组织,如ERBE、ISCCP、GEWEX、CERES等,这为估算区域短波辐射提供了有效数据源。Potter等^[45]在ISCCP C1基础上得到太阳总辐射,并乘于转换系数0.5而发布ISCCP-P的PAR产品;Pinker等^[27-28]在宽波段模型基础上,利用ISCCP C数据获取400~500 nm、500~600 nm以及600~700 nm 3个宽波段的太阳辐照度,从而发布了第一个以月为单位的全球范围内250 km的PAR数据产品ISCCP-PL;此外,GEWEX以相似的估算方法发布了1°分辨率的PAR数据产品^[46]。Runnström等^[47]利用AVHRR中的CLAVR云数据,对云覆盖地区数据进行校正,估算内蒙古区域内的短波辐射,并乘以0.48得到该地区的PAR。Rubio^[48]利用Meteosat卫星数据,基于辐射传输模型估算云量下的太阳辐射总量,然后利用Alados等^[40]所提出关于 η_Q 的统计模型,估算了西班牙地区的PAR,与实测量接近于1:1的线性关系;Gu等^[49]利用静止卫星GEOS-7可见光波段获取1 km/半小时的短波辐射与PAR,两者的误差在1.6%与6.5%,并成功地运用于北温带大气-森林生态系统研究(Boreal Ecosystem-Atmosphere Study, BOREAS)中的森林后环境监测。

转换系数法在一定程度上弥补了气候学方法中缺乏空间尺度的缺点。然而,该类方法也存在较多缺点:①太阳有效辐射转换系数并不是一个固定常数,但在利用遥感估算时往往只用简单的固定值,影响到估算精度,如ISCCP-P^[45]、ISCCP-PL^[27-28]的相对误差分别达到28.1%、13.7%;②空间分辨率低,几种不同的PAR数据产品空间分辨率过低,不适合进行生态系统的深入分析。从而致使ISCCP-P、ISCCP-PL等数据产品得不到广泛运用。

3.2 模型化参数法

随着MODIS、AVGATION等遥感数据的出现,更好的丰富了区域性与全球范围信息的获取,

促进了较高空间分辨率PAR的估算。在研究方法上,逐渐避开转换系数方法,而是直接利用遥感数据进行PAR的估算。目前,主要有两类不同的估算方法:①模型参数法;②基于查找表(LUT, Look-up Table)的估算方法。

基于遥感的模型参数化方法与传统方法的参数方法原理是一样的,太阳下行辐射是直射光辐照度(Beam Irradiance)与散射辐照度(Diffuse Irradiance)的总和。两者都受到了大气环境因素、如气溶胶、云等的影响,因此只要利用遥感数据获取气溶胶厚度、大气含水量、云等大气环境参量,便能估算PAR所在的不同波段的太阳下行辐射,从而通过积分得到PAR^[36]。

该方法较早地运用于海洋PAR估算,并形成PAR的标准产品,如Frouin等^[50]利用SeaWiFS卫星反演全球范围内水面的PAR产品、MODIS海洋研究组以BIRD模型为基础估算PAR并发布了1 km的PAR标准产品MOD20^[51];Singh等^[52]同样以BIRD模型,并结合IRSP4遥感数据进行晴朗天气下一类水体PAR的估算,其误差是 $21.28 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。但陆地-大气界面比海洋-大气界面的情况复杂,在海洋-大气系统中,海洋的反照率很低,常把海洋的反照率假设恒定为0,而陆地表面地貌复杂,尤其是山区,地貌复杂,太阳下行辐射容易与地表产生多次散射作用,影响陆地太阳有效辐射的精度。Van Laake与Sanchez-Azofeifa^[53-54]对大气-地表辐射传输模型进行了简化,以MODIS大气产品(气溶胶MOD04、水汽产品MOD05、云量产品MOD06)为模型的驱动参数估算哥斯达黎加地区1 km分辨率PAR,估算结果与观测数据存在很好的一致性,所获得的PAR数据可以满足目前的生态模型需求。随后,Olofsson、Olofsson^[55]在该算法的基础上,进行晴朗、多云以及阴天下的瞬时PAR估算,利用线性插值法与正弦插值法相结合进行日总PAR的估算,并以北欧的Norunda与Asa两个观测站的观测数据进行验证,发现晴朗天气下精度较高,但多云与阴天下的精度明显降低的主要原因是模型中只考虑云覆盖下的透射率而忽略云的吸收作用以及MODIS反演云量厚度的不确定性;谢小萍等^[56]利用MODIS的各种产品设定BIRD模型中所需要的参数,并考虑太阳辐射在大气与地表中产生的多次散射,以及地形高程对太阳辐射传输过程的影响,进行山东省的PAR的估算,与禹城农业综合实验站获得的通量数据存

在较好的相关性,并发现PAR与气溶胶、水汽含量、云量、太阳高度角、地表反照度等存在敏感性,而气溶胶的影响最大;随后,陈良富等^[57-58]则利用MODIS1B数据进行大气气溶胶厚度、大气含水量反演,得到空间分辨率一致的模型变量,结合BIRD模型进行了长白山、千烟洲的PAR估算,并在这基础上进行了长白山、千烟洲的日净初级生产力研究。

此外,Su等^[59]以SBDART模型进行直射太阳辐射与散射太阳辐射的模拟,并以查找表(LUT)方式建立7、10波段的两种查找表,①直射辐照度与太阳方位角、气溶胶、大气可降水量、云等大气条件的查找表;②散射太阳辐射与太阳方位角、气溶胶等大气条件的查找表,并参考了海洋、植被、戈壁、雪等不同地物下对散射的影响。通过查找表进行晴朗与阴天下的直射PAR与散射PAR,估算精度控制在10%之内。

基于遥感的模型参数估算方法,空间分辨率得到了提高,然而也存在着不足:①输入的参数较多,很多参数目前利用遥感反演仍然存在不确定性,容易产生误差;②参数之间的分辨率不一致,容易产生误差,如LAAKE与Sanchez的算法^[53-54]中利用MODIS反演1km分辨率PAR,但却很大程度上依赖于10km的气溶胶产品^[53-54];③多数模型是在对大气辐射传输模型的简化,忽略了云的吸收作用、大气与地表的多次散射作用以及地表高程的影响。

3.3 查找表法

在大气辐射传输模型中,常假设地表是均匀朗伯体,遥感传感器所记录的是地面目标的总辐射亮度,主要包括了两部分:一部分是大气本身作为反射体(散射体)所产生的程辐射,该部分不包括地面信息;另一部分是经过大气衰减后的地面目标辐射亮度。三者的关系如下^[36]:

$$L_m = L_0 + \frac{\rho \times F_d \times T}{\pi \times (1 - s \times \rho)} \quad (3)$$

式中: L_m 是传感器接收到的太阳辐射亮度,是波长、太阳天顶角、卫星天顶角、方位角、大气的吸收、瑞利散射及气溶胶等光学厚度的函数; L_0 是地表反射率为零时,传感器获得的太阳辐射,又称为程辐射; s 为大气反照率; ρ 为地表反照率; T 为大气透射率; F_d 是地表反射率为零的到达地面的太阳辐射。

从公式(3)可以知道,对波长范围400~700 nm的 F_d 积分便可以得到垂直于地面的太阳有效辐

射。大气顶层反射率经过气溶胶、水汽、云量等的吸收校正后,可以近似于地表反射率。因此,PAR的估算方法可以通过建立大气顶层反射率与地表反射的关系获取PAR。同时,该方法也与大气纠正的思想是一致的,可以说PAR的估算是大气纠正的副产品。而查找表方法进行PAR的估算正是从大气纠正方法中得到拓展。

刘荣高等^[36]以查找表的方式,通过大气辐射传输模型(MODerate Resolution Atmospheric TRANsmission, MODTRAN)模拟大气可降水量与透射率、气溶胶厚度与透射率的查找表(LUT),获取MODIS1B数据的光学厚度以及透射率,从而建立PAR与TOA反射率、地表反射率的关系。其估算结果与气溶胶的空间分布一致,说明华北平原的PAR主要受到气溶胶的影响。Liang等^[60]同样以查找表的方式,但利用大气辐射传输模型(如MODTRAN、6S)模拟出不同的大气状况下,大气顶辐亮度与PAR的关系。然后是确立真实地表反射率,结合查找表获得真实TOA下的大气状况参数(如气溶胶厚度),从而估算出PAR。该过程最为重要参数就是地表反射率的确定。一般是通过大气纠正获取较为真实的地表反射率,但大气纠正方法受到多种影响,严重影响到云下真实地表反射率的反演,Liang避开了大气纠正的方法,选择合适时间窗口获取MODIS蓝波段表观反射率的时间序列,进行排序并认为一定比例下(10%)的表观反射率是真实的地表反射率,然后进行线性插值得到整个时间序列的真实地表反射率。该方法可以有效消除云下对获取真实地表反射率的影响,从而提高PAR的估算,但时间窗口的确定需要一定的把握。而刘荣高等^[61]在总结Liang获取真实地表反射率方法不足的基础上,直接利用MODIS的BRDF产品对相应时间内的MODIS反射率产品进行角度的归一化处理,以线性插值的方法消除有云存在的区域,得到更为真实的地表反射度。经过验证发现草原地区的PAR估算精度要比森林的好。Zheng^[62]在Liang方法基础上进行应用范围的扩大,不仅开展基于MODIS数据的PAR估算,还把该算法运用到AVHRR、GEOS等不同遥感数据中,并在进行基于GEOS的估算中考虑到了地形因素的影响。Zheng的扩展为建立长时间序列的PAR提供了可能性。

Liang等发展的查找表(LUT)方法是一种量化估算方法,直接遥感数据获取PAR,减少了数据

参量以及数据量,统一了不同参数的尺度问题,从而使PAR的估算走向了定量化阶段。不过,查找表往往以牺牲精度为代价来有效提高估算PAR的速度,该方法可以做到像元级别上PAR的反演,并需要以插值方法丰富查找表中的信息量;而实际中,查找表的不同信息中的关系并不是简单的线性关系,利用插值方法常常给模拟大气参数带来误差,最终影响到PAR的估算精度;最后,建立查找表一般利用文本进行管理数据,而文本并不能管理非常大的数据量,而数据量反而会影响数据的存储与查找速度。

3.4 其他估算方法

除上面的主要估算方法,还发展出其它一些遥感估算方法,如Eck与Dye^[63]在TOMS(Total Ozone Mapping Spectrometer)在紫外波段观测数据的研究中发现云在紫外波段与PAR所在波段(400~700 nm)有反射率比值相对稳定,因此可以利用云对PAR的影响建立紫外波段的反射率,并对晴朗天气下的PAR进行校正,建立370 nm通道的紫外反射率与PAR的线性估算模型,但误差达到7.2%;Kathrin Schiller^[64]利用METEOSAT的可见光、近红外以及短波3个通道作为神经网络模型的输入参数估算PAR。由于静止卫星可以实时地获取同一区域的辐照度,因此该方法所得到PAR精度较好。

3.5 日总量PAR的估算

遥感获取的只能是瞬时地表信息,而在生态过程模型研究中,则需要PAR的时间尺度一般是日单位或是更长的时间单位^[65],因此利用遥感获取日总PAR,需要进行时间尺度上的扩展。

研究表明瞬时太阳辐射与日总辐射存在比较固定的关系^[66-67],这为瞬时PAR的时间扩展提供了很好的理论基础。Chen等^[58]在Wanner等^[66]提出的方法上进行了时间尺度的扩展,方法中考虑日长、日地距离、地理纬度、太阳赤纬等天文因子;谢小萍等^[68]利用Jackson^[67]的插值方法得到日总PAR;Van Laake与Sanchez-Azofeifa^[54]则利用时间插补的方法,把所需要的大气参量以30分钟为单位,利用线性插值从太阳升起时间到太阳下降时间进行时间尺度上的拓展,从而以瞬时PAR的积累量作为PAR日总量。但瞬时PAR的变化与太阳高度角有关紧密的联系,该方法并不能很好地反映出PAR的日变化^[65]。Liang等^[69]则认为可以利用一个或是两个瞬时MODIS PAR,与实测数据建立回归关系得到

日总量;Olofsson等^[55]则根据晴朗天气、多云下的PAR值分布设定阈值,进行插值瞬时PAR的插值。高于1500 $\mu\text{mol}\cdot\text{J}^{-1}$ 用线性插值法,低于1500 $\mu\text{mol}\cdot\text{J}^{-1}$ 则用正弦插值法进行日PAR的插值;Wang等^[65]提出两种不同的方法:一种是在正弦曲线插值法,该方法是线性插值方法的基础上考虑了时间因素,而时间因素是儒略日及地理位置的函数;另一种是通过查找表方法(LUT)。LUT方法是用查找表方法进行模拟从日出到日落的每一时刻的瞬时PAR,并以一定的时间窗口(30分钟)获取瞬时PAR,最后进行累计得到日总PAR。查找表的参数需要遥感过境时的可见光系数与地表反射。结果发现利用LUT方法的精确度更高些。

不同的时间扩展方法存在着不同的优点与缺点。LUT方法比较好地模拟了日总量,在天气变化不大的条件下,与实际的日瞬时PAR变化存在一致性,主要原因是时间窗口的选择^[65];而线性插值方法与正弦时间插值方法较为简单,但有明显的误差,并不能很好地反映出PAR日变化,能够增加精度的方法就是具有较多的瞬时PAR。

4 总结与展望

生物的光合作用与呼吸作用是进行全球变化与陆地生态过程(碳循环、碳蓄积)研究的纽带,而光合有效辐射是光合作用的重要能源。从气候学为主的统计方法发展到以大气辐射传输原理的参数化模型,PAR的估算方法在机理性上得到不断的深化,估算精度也得到很大的提高。而遥感信息的加入,在空间上强化空间信息的连续性与差异性,消除了以往凭借“点”数据所带来的误差。从而更有助于在时间与空间两种不同角度进行深入研究。然而,在目前的研究过程中依然存在着一些问题,制约着PAR的估算与应用,也是因为存在着不足,成为了未来PAR估算方法与应用的主要发展趋势:

(1) 模型参数所存在的不确定性。在PAR的估算方法,能否得到准确的气溶胶、大气含水量、云量等大气参数,是获取精度较高PAR的重要前提。虽然无论是地面观测还是对地观测,大气参数的反演都已经取得了很好的发展,并运用于大气环境的监测中。然而,气溶胶、大气含水量等大气参数的传输过程是一个复杂的过程,其反演方法都受到环境的限制而进行估算方法的简化。因此,进行气溶

胶、大气含水量的估算仍然存在着诸多不确定性,也进一步影响到PAR的机理性研究与估算精度的提高。不过,气溶胶、大气含水量、云量等大气科学问题是全球变化下的重要主题,是目前国内外科学家所关注的前沿、热点问题,这将为PAR的估算精度提供了有效的保障。

(2) 模型的简化所带来的不确定性。大气辐射传输过程是一个复杂的过程,而在目前PAR的估算方法中主要是运用到多种大气辐射传输模型,如MODTRAN、6S。该类模型都对大气与陆表的复杂环境进行了简化。例如,把地表看成是一个均匀的郎伯体,简化了太阳辐射复杂的传输过程。而在实际,地表是个不均一的表面,并会随着时间的而产生相应的变化。地表的不均一性对于PAR,特别是散射,其影响是显著的,这必然影响着PAR的估算精度。如何合理进行模型的简化,并全面的考虑影响因素,是进行太阳辐射、PAR估算的一个重要研究方向。

(3) 由于遥感往往获取的只是瞬时信息,利用遥感进行PAR的估算也只是瞬时PAR,但在实际应用中一般是考虑到日总PAR才能满足需求。目前主要是利用线性或是非线性方法进行插值得到总PAR。但实际中瞬时PAR与总PAR并不是简单的线性或是非线性关系,并且是随着日变化、云量变化而产生变化。因此,如何更好地利用遥感进行日总PAR的估算也是目前急需的。多源遥感数据能在这方面得到较好的处理,特别是静止卫星与极轨卫星的结合,静止卫星主要是在时间分辨率所存在优势,可以在较短时间内获取同个区域的瞬时信息,而极轨卫星则覆盖范围较广。两者的结合,可以有效的提高对日变化、气溶胶、云量等因素的检测,从而得到精度更高的总PAR。

(4) 地面观测网络所获得的真实数据对于PAR的估算精度的验证是一个重要环节,关系到PAR产品运用于生态系统的研究中。然而,目前国内外,并没有建立专门的、标准化、布局合理的PAR观测网络。因此,在未来建立系统化的PAR地面观测网络是目前所亟需的。

(5) 如何得到长时间且较高分辨率的PAR数据是进行生态系统的深入研究,气候变化的重要数据来源。然而获取长时间的PAR数据,还是存在着一定的问题。首先是不同传感器数据之间所存在的差异。如进行AVHRR数据与MODIS数据之间的

衔接是关系能够获取合理的、连续性的长时间PAR数据的前提;此外,要得到长时间PAR数据需要处理海量的遥感数据,并且PAR反演算法本身比较耗费时间与计算机资源。如基于查找表的PAR估算方法,其计算量是比较大,花费的时间也是较大。所以如何提高PAR估算速度,也是目前所面临的一个问题。随着高性能计算机^[70]的快速发展,并在地球模拟、天气预报等得到较好的应用,这样可以有效的提高对计算资源的利用率,提高遥感数据的处理速度,并对数据存储进行优化。这对为获取并发布长时间序列PAR提供了可能性。

总之,PAR估算将会在模型机理性上与定量化得到进一步的发展;在应用上,随着PAR估算方法的成熟,PAR数据将会在生态系统模型、气候变化监测、生态安全、粮食安全得到更为广泛与深入的应用。

参考文献

- [1] 左大康,周允华,项月琴,等. 地球表层辐射研究. 北京: 科学出版社, 1991.
- [2] Li Z Q, Moreau L, Cihlar J. Estimation of photosynthetically active radiation absorbed at the surface. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(D24): 29717-29727.
- [3] 孙菽芬. 陆面过程的物理、生化机理和参数化模型. 北京: 气象出版社, 2005.
- [4] Monteith J L. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *Journal of Application of Ecology*, 1972, 9 (4): 747-766.
- [5] Liang S, Pinker R, Running S, et al. PAR and Insolation. http://landportal.gsfc.nasa.gov/Documents/ESDR/PAR-ISR_Liang_whitepaper.pdf[2010-08].
- [6] 周允华. 光合有效辐射(PAR)的测量. 北京: 气象出版社, 1990: 3-14
- [7] Monteith J L. Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B: Biological Sciences*, 1977, B(281): 277-294.
- [8] 黄秉维. 现代自然地理学. 北京: 科学出版社, 1999.
- [9] 董振国, 于沪宁. 农田光合有效辐射观测与分析. *气象*, 1983(7): 23-25.
- [10] 王炳忠, 税亚欣. 关于光合有效辐射的气候学计算问题. *太阳能学报*, 1988, 9(1): 59-65.
- [11] 周允华, 项月琴. 光合有效量子通量密度的气候学计算. *气象学报*, 1996, 54(4): 447-455.
- [12] 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. 地理学报, 1987, 42(2): 116-128.
- [13] 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. 太阳能学报, 2002, 23(1): 118-123.
- [14] 李韧, 季国良, 杨文, 等. 青藏高原北部光合有效辐射的观测研究. 太阳能学报, 2007, 28(3): 241-247.
- [15] 姚济敏, 高晓清, 冯起, 等. 额济纳绿洲沙尘暴天气下光合有效辐射的基本特征. 太阳能学报, 2006, 27(5): 484-488.
- [16] 李刚, 辛晓平, 范闻捷, 等. 内蒙古草地关键光合过程参数的时空变化特征. 资源科学, 2008, 30(9): 1375-1381.
- [17] 白建辉. 华北地区光合有效辐射的计算方法研究. 气象与环境学报, 2009, 25(4): 1-8.
- [18] Möttus M, Ross J, Sulev M. Experimental study of ratio of PAR to direct integral solar radiation under cloudless conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 109(9): 161-170.
- [19] Alados I, Foyo-Moreno I, Alados-Arboledas L. Photosynthetically active radiation: Measurements and modelling. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1996, 78(1-2): 121-131.
- [20] Alados I, Alados-Arboledas L. Validation of an empirical model for photosynthetically active radiation. *International Journal of Climatology*, 1999, 19(10): 1145-1152.
- [21] González J A, Calbó J. Modelled and measured ratio of PAR to global radiation under cloudless skies. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 110(4): 319-325.
- [22] Gu L, Baldocchi D, Verma S B, et al. Advantages of diffuse radiation for terrestrial ecosystem productivity. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107, D56, doi: 10.1029/2001dj001242.
- [23] 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. *Agricultural and Forest Meteorology* 2007, 143(3-4): 277-287.
- [24] 童成立, 张文菊, 汤阳. 逐日太阳辐射的模拟计算. 中国农业气象, 2005, 26(3): 165-169.
- [25] 朱旭东, 何洪林, 刘敏. 近 50 年中国光合有效辐射的时空变化特征. 地理学报, 2010, 65(3): 270-279.
- [26] Winslow J C, Hunt E R, Piper S C. A globally applicable model of daily solar irradiance estimated from air temperature and precipitation data. *Ecological Modelling*, 2001, 143(3): 227-243.
- [27] Pinker R T, Laszlo I. Global distribution of photosynthetically active radiation as observed from satellites. *Journal of Climate*, 1992, 5(1): 56-65.
- [28] Pinker R T, Laszlo I. Modeling surface solar irradiance for satellite applications on global scale. *Journal of Applied Meteorology*, 1992, 31(2): 194-211.
- [29] Lopez G, Rubio M A, Martinez M, et al. Estimation of hourly global photosynthetically active radiation using artificial Neural Network models. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 107(4): 279-297.
- [30] Nojd P, Har P. Instantaneous PAR estimated using long records of daily temperature and rainfall. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 109(1): 47-59.
- [31] Grant R H, Slusser J R. Estimation of Photosynthetic Photon Flux Density from 368-nm Spectral Irradiance. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2004, 21(3): 481-487.
- [32] Bird R E, Riordan C. Simple solar spectral model for direct and diffuse irradiance on horizontal and tilted planes at the earth's surface for cloudless atmospheres. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 1986, 25(1): 87-97.
- [33] Gueymard C. An atmospheric transmittance model for the clear sky beam, diffuse and global photosynthetically active radiation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1989, 45(3-4): 215-229.
- [34] Gueymard C. A two-band model for the calculation of clear sky solar irradiance, illuminance, and photosynthetically active radiation at the earth's surface. *Solar Energy*, 1989, 43(5): 253-265.
- [35] Mueller R W, Dagestad K F, Ineichen P, et al. Rethinking satellite based solar irradiance modelling: The SOLIS clear-sky module. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 91(2): 160-174.
- [36] 刘高荣, 刘纪远, 庄大方. 基于 MODIS 数据估算晴空陆地光合有效辐射. 地理学报, 2004, 59(1): 64-73.
- [37] Alados I, Foyo-Moreno I, Olmo F J, et al. Improved estimation of diffuse photosynthetically active radiation using two spectral models. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 111(3): 1-12.
- [38] Alados-Arboledas L, Olmo F J, Alados I, et al. Parametric models to estimate photosynthetically active radiation in Spain. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, 101(2-3): 187-201.
- [39] Gueymard C. Critical analysis and performance assessment of clear sky solar irradiance models using theoretical and measured data. *Solar Energy*, 1993, 51(2): 121-138.
- [40] Alados I, Olmo F J, Foyo-Moreno I, et al. Estimation of photosynthetically active radiation under cloudy conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, 102

- (1-2): 39-50.
- [41] Wang Q, Tenhunen J, Schmidt M, et al. Diffuse PAR irradiance under clear skies in complex alpine terrain. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 128(1-2): 1-15.
- [42] Wang Q, Tenhunen J, Schmidt M, et al. Estimation of total, direct and diffuse PAR under clear skies in complex alpine terrain of the National Park Berchtesgaden, Germany. *Ecological Modelling*, 2006, 196(1-2): 149-162.
- [43] Bosch J L, Lopez, Batlles F J, et al. Global and direct photosynthetically active radiation parameterizations for clear-sky conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, 149(1): 146-158.
- [44] Running S W, Nemani R, Glassy M, et al. MODIS Daily Photosynthesis (Psn) And Annual Net Primary Production (NPP) Product (Mod17). Algorithm Theoretical Basis Document, 1999.
- [45] Potter C S, Randerson J T, Field C B, et al. Terrestrial ecosystem production: A process model based on global satellite and surface data. *Global Biogeochem. Cycles*, 1993, 7(4): 811-841.
- [46] Pinker R T, Tarpley J D, Laszlo I, et al. Surface radiation budgets in support of the GEWEX Continental Scale International Project (GCIP) and the GEWEX Americas Prediction Project(GAPP), including the North American Land Data Assimilation System(NLDAS) Project. *J. Geophys. Res.*, 108(D22), 8844, doi:10.1029/2002JD003301.
- [47] Runnström M, Brogaard S, Olsson L. Estimation of PAR over Northern China from Daily NOAA AVHRR Cloud Cover Classifications. *Geocarto International*, 2006, 21(1): 51-60.
- [48] Rubio M A, Lo'pez G, Tovar J. The use of satellite measurements to estimate photosynthetically active radiation. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2005, 30(1-3): 159-164.
- [49] Gu J, Smith E A. High-resolution estimates of total solar and PAR surface fluxes over large-scale BOREAS study area from GOES measurements. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 1997, 102(D24): 29, 685-629, 705, doi:10.1029/96JD03706.
- [50] Frouin R, Franz B, Wang M, et al. Algorithm to estimate PAR from SeaWiFS data Version 1.2-Documentation, 2001.
- [51] Carder K, Chen R, Hawes S, et al. Instantaneous Photosynthetically Available radiation and Absorbed Radiation by Phytoplankton MODIS Ocean Science Team Algorithm Theoretical Basic Document, 2003.
- [52] Singh S, Raman K, Dwivedi R M, et al. An approach to compute Photosynthetically Active Radiation using IRS P4 OCM. *International Journal of Remote Sensing*, 2008, 29(1-2): 211-220.
- [53] Laake P E V, Sanchez-Azofeifa G A. Simplified atmospheric radiative transfer modelling for estimating incident PAR using MODIS atmosphere products. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 91(1): 98-113.
- [54] Van Laake P E, Sanchez-Azofeifa G A. Mapping PAR using MODIS atmosphere products. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 94(1): 554-563.
- [55] Olofsson P, Eklundh L, Lagergren F, et al. Estimation of absorbed PAR across Scandinavia from satellite measurements Part I: Incident PAR. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 110(2): 252-261.
- [56] 谢小萍, 高志强, 高伟, 等. 基于MODIS产品估算复杂地形下的光合有效辐射. *遥感学报*, 2009, 13(5): 778-791.
- [57] 陈良富, 高彦华, 李丽, 等. 基于MODIS晴空数据的森林日净第一性生产力估算. *中国科学D辑: 地球科学*, 2007, 37(11): 1515-1521.
- [58] Chen L, Gao Y, Yang L, et al. MODIS-derived daily PAR simulation from cloud-free images and its validation. *Solar Energy*, 2008, 82(6): 528-534.
- [59] Su W, Charlock T P, et al. Photosynthetically active radiation from clouds and the earth's radiant energy system (CERES) products. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112. G02022, doi:10.1029/2006JG000290.
- [60] Liang S, Zheng T, Wang D, et al. Mapping high-resolution incident photosynthetically active radiation over land from polar: Orbiting and geostationary satellite data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2007, 73(10): 1085-1089.
- [61] Liu R, Liang S, He H, et al. Mapping incident photosynthetically active radiation from MODIS data over China. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(3): 998-1009.
- [62] Zheng T. Mapping Photosynthetically Active Radiation(PAR) Using Multiple Remote Sensing Data[D]. College Park, Maryland: University of Maryland, 2007.
- [63] Eck T, Dye D. Satellite estimation of incident photosynthetically active radiation using ultraviolet reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 1991, 38(2): 135-146.
- [64] Schiller K. Derivation of Photosynthetically Available Radiation from METEOSAT data in the German bight with neural nets. *Ocean Dynamics*, 2006, 56(2): 79-85.
- [65] Wang D, Liang S, Liu R, et al. Estimation of daily-integrated PAR from sparse satellite observations: comparison

- son of temporal scaling methods. *International Journal of Remote Sensing*, 2010, 31(6): 1661-1677.
- [66] Wanner W, Li X, Strahler A H. On the derivation of kernels for kernel-driven models of bidirectional reflectance. *Journal of Geophysical Research*, 1995, 100(10): 21077-21089.
- [67] Jackson R D, Hatfield J L, Reginato R J, et al. Estimation of daily evapotranspiration from one time-of-day measurements. *Agricultural Water Management*, 1983, 7 (1-3): 351-362.
- [68] 谢小萍. 基于MODIS数据估算区域光合有效辐射和光能利用率的方法研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2009.
- [69] Liang S, Zheng T, Liu R, et al. Estimation of incident photosynthetically active radiation from Moderate Resolution Imaging Spectrometer data. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2006, 111, D15208, doi:10.1029/2005JD006730.
- [70] 薛勇, 万伟, 艾建文, 等. 高性能地学计算进展. *世界科技研究与发展*, 2008, 30(3): 314-319.

Overview on the Estimation of Photosynthetically Active Radiation

DONG Taifeng, MENG Jihua, WU Bingfang, Du Xin, NIU Liming
(Institute of Remote Sensing Applications, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: PAR (Photo-synthetically Active Radiation) is an important field of the research on global change and terrestrial ecosystem, and is not only an important factor for measuring photosynthesis but also a driving factor of global change. This paper comprehensively reviewed the PAR estimation methods, and included the traditional methods and the remote sensing methods. The climatological and the parameter methods are the most common traditional methods, and the conversion factors and parameters methods based on remote sensing are developed from the traditional methods. The climatological method are a common method for estimating PAR, however, with the development of the study on ecosystems, the methods based on remote sensing become a new kind of methods, which can cover a wide range. Estimation of regional and global PAR by remote sensing becomes possible. How to produce long time series PAR is one of the current concerns around the world. Previous studies have showed that quantitative methods will be the main kind of estimation methods, such as the LUT method. It not only explains the mechanism of PAR in the transmission process, but also enhances the reliability, operability and universality of the estimation methods.

Key words: PAR; estimation; influence factors; remote sensing

本文引用格式:

董泰锋, 蒙继华, 吴炳方, 等. 光合有效辐射(PAR)估算的研究进展. *地理科学进展*, 2011, 30(9): 1125-1134.