

王炳忠 申彦波 编著

实用太阳能光谱应用模式

——SMARTS模式

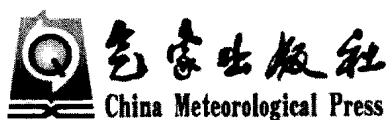


气象出版社
China Meteorological Press

实用太阳能光谱应用模式

——SMARTS 模式

王炳忠 申彦波 编著



内容简介

本书是作者在系统总结 SMARTS 模式原作者 Gueymard 所发表的一系列文章的基础上, 结合自己的体会和心得编写而成的。全书共分 4 章, 介绍了 SMARTS 光谱模式本身的构成和检验; 模式的使用方法: 包括输入文件的各种卡片内容和选定的细节; 程序执行后所得结果; 以及作者使用 SMARTS 模式过程中, 解决太阳能应用等一系列问题的实例。

本书可供具有大专以上文化程度, 从事太阳能应用、研究、设计、制造以及太阳辐射, 特别是光谱辐射测量、计算等方面的人员使用。

图书在版编目(CIP)数据

实用太阳能光谱应用模式: SMARTS 模式/王炳忠等编著.

北京: 气象出版社, 2010.12

ISBN 978-7-5029-5125-2

I. ①实… II. ①王… III. ①太阳能-太阳光谱-应用
IV. ①TK519

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 241034 号

出版发行: 气象出版社

地 址: 北京市海淀区中关村南大街 46 号

总 编 室: 010-68407112

网 址: <http://www.cmp.cma.gov.cn>

责任编辑: 王桂梅

封面设计: 博雅思企划

印 刷: 北京中新伟业印刷有限公司

开 本: 720 mm×960 mm 1/16

字 数: 186 千字

版 次: 2011 年 1 月第 1 版

印 数: 1—800

邮政编码: 100081

发 行 部: 010-68409198

E-mail: qxcbs@cma.gov.cn

终 审: 章澄昌

责任技编: 吴庭芳

印 张: 9

插 页: 2

印 次: 2011 年 1 月第 1 次印刷

定 价: 38.00 元

本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等, 请与本社发行部联系调换

序

近年来，大规模开发利用太阳能已成为国际上应对气候变化、调整能源结构的重要举措。我国太阳能利用历史悠久，近两年更是出现了蓬勃发展的局面，2009年一年的光伏发电装机规模即超过了之前所有装机规模的总和，“太阳能屋顶计划”、“金太阳”等应用示范工程以及国家和地方一些大型光伏发电示范项目的实施，更是对太阳能的大规模发展起到了重要的推动作用。

我国太阳能资源十分丰富，95%以上地区的资源都适宜于开发利用。然而，作为一种与气象因素密切相关的资源，在其开发利用中应充分考虑其特点。一方面，应十分重视资源测评工作。和煤炭、石油等资源一样，太阳能的开发利用亦应首先对其资源总量、分布特点和变化规律等有非常明确的了解。另一方面，对于工程应用而言，很多方面的设计都与资源状况密切相关，如不同安装方式（双轴跟踪、单轴跟踪和固定式）的选择、固定安装方式中的最佳倾角、不同设备（单晶硅、多晶硅和薄膜电池）的选型等，在这些问题上的不确定性将直接影响应用工程项目的投入和产出效益。然而，现实情况却是，各地对太阳能资源的测评以及以此为依据的规划工作做得还很不充分，作为承担具体项目的工程和设计部门对上述问题并不完全清楚，采用的方法缺乏针对性，项目实施的效果往往差异很大。

本书的两位编著者正是意识到上述问题，才根据自己多年的研究和实践经验，并借鉴国外已有的成熟方法，编写了《实用太阳能光谱应用模式——SMARTS 模式》。本书内容着眼于太阳能工程应用中的实际问题，首先详细介绍了一个简单实用的大气辐射传输模式——SMARTS 及

其使用方法，说明了该模式在任意平面、任意短波光谱波段太阳辐射计算方面的强大功能；然后介绍了该模式在六个方面的具体情况，其中有关最佳倾角的讨论、光谱图的绘制、不同朝向墙面曝辐量的计算以及不同种类光伏电池所需的光谱计算等，都是对工程应用具有直接指导意义的。

太阳辐射在大气中的传输过程是十分复杂的，但本书的介绍却是简单易懂的；与常见的纯学术著作不同，本书直接面向工程应用，既有很强的学术性，又有很强的可读性；虽然关于模式的内容是翻译国外已有的成熟方法，但其中包含了两位编著者对于太阳能工程应用的深刻理解，不啻于一次再创作。相信本书的出版，将对提高我国太阳能工程应用的科学性和合理性起到积极作用。

国务院参事 石定寰
中国可再生能源学会理事长

2010年12月

前 言

大气辐射是大气物理中一门古老却在现代获得迅猛发展的学科。这是因为大气中的辐射过程是最重要的物理过程之一，大气辐射在当代地球气候变化中扮演着重要的角色。大气辐射传输模式是研究太阳辐射通过大气时因被大气中各种介质的吸收、散射和反射而衰减、演变的一种定量的方法。其实质就是利用现代数学工具，求解太阳辐射通过大气时的各种物理过程。由于大气成分复杂且多变，这里所谓的模式即使是最简单的，大多也包含众多的计算参数和程序，因此实际上，更确切地说，每个模式均是一个软件系统。

由于大气辐射传输模式涉及大量数学、物理等方面的知识，不是专门从事这方面研究的人员，即使一般气象人员也难以洞悉其原委。另一方面，专业人员所要解决的课题是如何进一步提高模式解决大气物理机制问题的能力。可见，专业研究人员的兴趣点不在各种具体应用领域，因而导致应用领域的需求处于无人关照的状态。

有些应用人员认为，模式计算的只能解决晴天状态下的辐照度或曝辐量，远离了实际，所以实用意义不大。不过，即使是晴天模式，能准确地研制出来也绝非易事。晴天只是恒定了影响太阳辐射透过大气众多参数中明显且重要的一项——无云，其他可能变化的参数尚多：诸如大气中的各种成分、水汽、温度、气溶胶以及太阳高度角等。目前，模式中解决气压、温度和湿度最接近实际状况的途径就是允许用户对其进行自定义也就是可以利用探空气球所获得的数据。至于其他变量，由于测量手段方面的问题或者测量站点数量有限，仍然只能选择使用几种固定模式的方法。

在验证一个模式是否成功的过程中，是要检验其在上述各种要素变化的条件下，计算预告值与实测值之间种种相差的情况。只有能够应对各种情况且误差较小的模式才能获得认可。至于云，本身就有云高、云厚、云量以及物理成分的不同，再加上云又是处在移动中，速度又有快慢之分，这些变化均是很难定量处理的。其实目前已有能够将云作为一个变量来处理的模式，但也必须像温度、气溶胶等分布要以某种标准大气作代表一样来处理云量。若想模拟出某一具体时刻有云情况下的辐照度，只要能够将当时云的特征用相关参数表达出来，还是有可能的。但若想利用模式计算出某一具体日期内云量变化情况下的曝辐量，那几乎是不可能的，或者误差会大到几乎没有实用价值。

以前也有一些适用于解决各种应用问题的晴天光谱模式，例如：**BRITE Monto Carlo**辐射传输模式(Bird等,1979, Bird,1984)。上述模式就曾用来建立**ASTM E891**，**ASTM E892**和**ISO 9845—1:1992**等各种与太阳能利用有关的标准。然而，以现代的观点检查上述模式，不仅其光谱分辨率有限，其基础数据自20世纪80年代以来从未更新过。所以，其准确度已不适宜于现代的情况了。也正因为如此，美国学者**Gueymard**从20世纪90年代起就开始研究开发适用于各项工程技术人员应用的、相对简单的光谱模式——**SMARTS**。**SMARTS**模式以其多功能性、易用性、执行迅速

和不同的细化得到了广泛的认可。迄今已经通过了世界范围近2000登记用户在诸多领域的使用和评估(Stoffel, 2009)。

另外,许多生物、化学和物理过程在某些波长上要比其他波长更活跃。在太阳能工程领域这一点特别真切和重要,因为在光伏装置、玻璃涂层应用中,光谱分布的差异起着越来越重要的作用。对于这些系统来说,光谱辐射数据要比使用宽带辐照度数据更适宜。目前,执行采用 SMARTS 模式对其进行修订并获批准的新标准 ASTM G173-03。此外,SMARTS 模式还参与了 ASTM G177-03 和 ASTM G197-08 等一系列与太阳能光伏应用有关标准的制定。

SMARTS 的最新版本得到了美国国家可再生能源实验室(NREL)的支持,并且共同研发出一种特别适用于新用户的Excel界面,为新用户编制输入文件提供了极大的方便。此外,NREL 为 SMARTS 专门提供了网页,可在 NREL 的首页 <http://www.nrel.gov/> 中搜索 SMARTS;也可以直接进入网址 <http://rredc.nrel.gov/solar/models/SMARTS/>。SMARTS 的程序和文件可以自由地从这些网页中下载,但要求注册登记以获得使用的许可。

正因为光谱数据日益变得重要,我们决定将它介绍给我国有关太阳能各个学科及与太阳辐射相关其他领域的工作者。以便大家使用。

全书共分4章,第1章在详细阅读 Gueymard 本人或与他人合作发表的文章的基础上,综合介绍了 SMARTS 模式的内容与特点;对于模式的公式内容,考虑到读者对象,我们有意进行了回避;对模式的评价部分虽然 Gueymard 在每篇独自的有关文章中几乎均有所叙述,并列有比较能够说明问题的图表,但由于涉及 Gueymard 本人,介绍时未予采纳。而是选择以他人为主或与其他人合作的文章中的个例来说明问题。第2章的内容主要系根据 SMARTS 模式的“快速启动指南”和“用户手册”中有关运行程序所必需的输入文件的编制、输出文件的选择以及程序运行等方面的内容而编写的。第3章是使用该模式进行计算的一些实例,列举出来,供大家学习使用中参考。第4章是我们利用该模式具体解决的一些问题的实例和认识。第1章由申彦波编写,第2、第3和第4章由王炳忠编写。最后,由王炳忠对全书进行统稿。

由于本书作者只是模式的使用者,对太阳辐射传输模式知之不多,在模式介绍中如有谬误及欠妥之处,当由本书作者负责。我们期待着本书的出版能对太阳能事业的发展有所裨益。本书作者恳请有关专家和广大读者不吝赐教、斧正。

作者在此谨向 Gueymard 博士致以衷心的感谢和诚挚的敬意。

本书作者电子信箱: wangbz@cams.cma.gov.cn;

shenyb@cma.gov.cn。

编著者 识
2010年11月

目 录

序

前 言

第 1 章 SMARTS 模式	(1)
1.1 引言	(1)
1.2 SMARTS 模式概述	(2)
1.2.1 演变历史	(3)
1.2.2 模式原理	(3)
1.2.3 太阳光谱	(5)
1.2.4 标准大气	(6)
1.2.5 散射辐射	(9)
1.3 SMARTS 模式的检验和确认	(10)
1.3.1 大气辐射测量计划(ARM)对模式的检验	(10)
1.3.2 在 NREL 对模式的实测检验	(11)
1.3.3 在 ASTM 标准中的使用	(14)
第 2 章 SMARTS 实用程序应用指南	(16)
2.1 对软、硬件的要求	(16)
2.2 SMARTS 使用说明	(16)
2.2.1 软件包的下载、安装和内容	(16)
2.2.2 运行方式	(17)
2.3 输入文件的准备	(20)
2.3.1 卡片 1: COMNT	(21)
2.3.2 卡片 2: ISPR	(21)
2.3.3 卡片 3: IATMOS	(22)
2.3.4 卡片 4: IH2O	(23)

2.3.5	卡片 5: IO3	(24)
2.3.6	卡片 6: IGAS	(25)
2.3.7	卡片 7: qCO ₂	(27)
2.3.8	卡片 8: AEROS	(28)
2.3.9	卡片 9: ITURB	(29)
2.3.10	卡片 10: IALBDX	(31)
2.3.11	卡片 11: WLMN WLMX SUNCOR SOLARC	(35)
2.3.12	卡片 12: IPRT	(36)
2.3.13	卡片 13: ICIRC	(38)
2.3.14	卡片 14: ISCAN	(40)
2.3.15	卡片 15: ILLUM	(41)
2.3.16	卡片 16: IUUV	(42)
2.3.17	卡片 17: IMASS	(42)
2.4	输入卡片综合列表	(44)
2.5	输入变量代码列表	(46)
2.6	加权的紫外辐照度	(49)
2.7	有关气溶胶和光学厚度的说明	(50)
2.8	用户定义的数据文件	(52)
2.9	Excel 列表编制输入文件和运行方式	(53)
第 3 章	SMARTS 程序计算实例	(70)
3.1	例 1	(70)
3.1.1	输入文件	(71)
3.1.2	输出文件	(74)
3.2	例 2	(81)
3.2.1	输入文件	(81)
3.2.2	输出文件	(84)
3.3	例 3	(87)

3.3.1 输入文件.....	(87)
3.3.2 输出文件.....	(89)
第4章 SMARTS 的具体应用	(93)
4.1 理想大气中的总辐射量和月最佳代表日	(93)
4.1.1 理想大气中的总辐射量	(93)
4.1.2 辐射量的月最佳代表日	(96)
4.2 从资源角度对最佳倾角的讨论	(97)
4.2.1 方法.....	(98)
4.2.2 结果.....	(99)
4.2.3 讨论.....	(102)
4.3 光谱图的绘制.....	(104)
4.3.1 不同大气质量对太阳光谱的影响.....	(104)
4.3.2 不同能见度对太阳光谱的影响.....	(105)
4.3.3 不同水汽对太阳光谱的影响.....	(106)
4.3.4 总日射和散射日射的光谱.....	(107)
4.4 光照度和光合有效辐射的计算	(108)
4.4.1 光照度计算.....	(108)
4.4.2 光合有效辐射的计算	(110)
4.5 不同朝向墙面曝辐量的计算	(111)
4.6 不同种类光伏电池所需的光谱计算.....	(113)
参考文献	(116)
附录 1	(122)
附录 2	(124)
附录 3	(127)
附录 4	(133)

第1章 SMARTS 模式

1.1 引言

太阳光谱辐照度模式是很多学科所需要的, 诸如大气科学、生物学、辐射防护学和能源技术(光伏系统、高性能玻璃、天窗、选择性涂层等)。Nann and Bakenfelder (1993)在其著作中介绍了大约12种辐射模式, 可供太阳能和建筑业使用。太阳辐射由于经过大气介质的透射、吸收和散射而改变了地外光谱。这样一来, 大气成分的构成和相对浓度就变得十分重要了。深入研究地球大气的物理特性和光学特性, 以及它们对太阳辐射传播的影响导致了定义标准大气, 包括1976年美国标准大气(COESA, 1976)和后来补充的其他地理-季节大气模型(McClatchey等, 1970)。在太阳辐射模式中按照其繁简程度大体上可以分为三种类型:

(1)高分辨模式。辐射通过任何介质后的光谱变化均依赖于介质的量子特性, 计算光谱的优先原则就是使用这些量子特性, 即所谓的逐线积分模式(LBL, line-by-line)。其中一个例子就是快速大气信号编码(FASCODE)(Anderson等, 1996), 它是由美国空军研究室(AFRL)开发的。这些模式起初主要在窄带区, 它要求大量的计算资源及存储空间。像HITRAN(高分辨)(Rothman等, 1992)这样的逐线模式要访问由许多种类分子的量子参数数据库(多于1百万条光谱线)。LBL模式特别复杂, 不适宜在这里讨论。

(2)波段模式或简称带模式。这种模式要比LBL模式简单许多。它使用了对消光过程的物理说明和对不同大气层次辐射传输方程的严格求解。具体说来, 如20世纪80年代发展起来的LOWTRAN系列(Kneizys等, 1980)及其后不断完善的MODTRAN系列(Anderson 1994)。MODTRAN(中分辨)和LOWTRAN(低分辨)是商业上可提供的带模式的典型例子。中、低分辨当然是相对的, “低”分辨率为20个波数^①(相当于在300 nm附近为0.2 nm, 在4000 nm附近为32 nm); “中”分辨率为2个波数(相当于在300 nm附近为0.02 nm, 在4000 nm附近为0.3 nm)。这些模式致力于复杂情况下计算: 包括云、雾、烟、许多标准的和用户定义的气溶胶特性、多到33个不同

^① 波数亦称波率, 指的是某波长的辐射在单位长度内能有多少个波, 故称波数, 其符号为 σ 。它与波长(λ)之间的关系是 $\sigma = 1/\lambda$, 单位: m^{-1} , 但常用单位为 cm^{-1} 。

层次的大气结构选择以及6种地外光谱选择等复杂多样的组合状况。这类模式可供计算大气透射比、长波辐亮度 $[W/(m^2 \cdot sr)]$ 、太阳（月亮）辐亮度 $[W/m^2 \cdot sr]$ 和透射的太阳直射辐照度 (W/m^2) 。吴北婴等（1999）对此曾有详细的介绍，可资参阅。

(3)简单的参数化模式。它是以大气要素的透射比和吸收函数参数化为基础的大气辐射传输模式。这种模式强烈依赖于光子通过大气路径的长度，除了各要素的光学路径之外，包括分子（瑞利散射）、臭氧、水汽、混合气体、痕量气体和气溶胶透射比。这些透射比函数的乘积改变了地外光谱，进而产生了地面透射光谱。这种简单的参数化模式自20世纪80年代就已出现。例如，SPCTRAL2(Bird,1984; Bird等, 1986)和SUNSPEC(McCluney等,1993, Gueymard, 1993)等就得到了广泛的使用。这些模式均以Leckner划时代的贡献为基础(Leckner, 1978)。大多数有关各种气体吸收的基本概念就始于Leckner的工作，现在对这种方法的反复细致检验仍能得到证明。目前，已能提供更高分辨率的数据，可以改进这些光谱区中气体吸收随波长快速变化的细节。最后，显现出必须对模式采取更详细的性能评估，以保证在大多数大气条件下模式的有效性。这样的评估是开发辐射模式工作的重要组成部分，但只有少数几个简单光谱模式被评估为合格。SMARTS模式就是属于简单参数化模式。

1.2 SMARTS 模式概述

SMARTS是简单的阳光大气辐射传输模式(Simple Model for Atmospheric Transmission of Sunshine)的缩写，是由美国佛罗里达太阳能咨询中心的C. Gueymard经过10多年的努力，不断修订、完善研究出来的。这里所谓的模式，实际上是一系列计算机软件的综合体。SMARTS是一个基于Fortran语言的光谱模式，可预告^①入射到地表任意平面上的太阳直射、散射和总日射辐照度。它覆盖了太阳光谱的整个短波波段（280~4000 nm），因此包括了UVB, UVA, 可见和近红外波段。对于诸多可能的应用来说，除了常规的预告光谱辐照度之外，还可以用来模拟宽带辐射仪器（诸如直接日射表或总日射表等）测量的辐照度。此外，它还能用来预告辐射的光合有效成分，任意朝向和倾斜平面上的辐照度，直射、散射和总辐射的发光效率，UV指数以及经各种作用谱加权作用后所产生的相应的辐照度值。

一方面，由于Gueymard介绍“SMARTS运算规则 and 性能评估”的著作(Gueymard, 1995)本身就有近百页，内容相当翔实，涉及方方面面，这里不可能全面介绍；另一方面，由于内容涉及多方面的气象理论、知识，也不可能在这样一本重点在于实用

① 模式的计算值可以理解为模式对某种特定大气情况下辐照度的预告值。

的书给予详细地解释。所以对模式本身的阐释，只能择其要者予以说明，感兴趣者可以参看原著。

1.2.1 演变历史

在从网站下载的 SMARTS 文件的 Documentation 子文件夹中，有一 History.txt 文件，其中保存有对各个版本修订内容的具体说明，现略去具体增删内容，仅保留梗概列述于下：

1993 年：SMARTS1 版(Gueymard 1993a);

1994 年 2 月：SMARTS2 版(Gueymard 1994);

1994 年 6 月：SMARTS 2.5 版;

1994 年 6 月：SMARTS 2.5.1 版;

1994 年 8 月：SMARTS 2.5.2 版;

1994 年 8 月：SMARTS 2.5.3 版;

1994 年 10 月：SMARTS 2.6 版;

1994 年 11 月：SMARTS 2.6.1 版;

1994 年 12 月：SMARTS 2.6.2 版;

1995 年 1 月：SMARTS 2.6.3 版;

1995 年 10 月：SMARTS 2.7 版;

1996 年 11 月：SMARTS 2.8 版;

2002 年 2 月：SMARTS 2.9.x 版;

由上述内容可以看到，SMARTS 辐射传输模式已经经过了近 20 年的发展历程，在此期间，Gueymard 不断对自己的模式进行补充、完善和修订。SMARTS2.9.5 是目前所能发现的最新版本。这里所介绍的内容，主要针对的就是这一版本。

1.2.2 模式原理

所有简单的参数化模式均是以 Leckner(1978)具有里程碑式的工作为基础的。Leckner 将地面上某波长(λ)阳光的直射辐照度写作：

$$E_{\lambda} = E_{s_0\lambda} \tau_{\lambda} \quad (1.1)$$

式中 $E_{s_0\lambda}$ 为日地平均距离处的地外光谱辐照度， τ_{λ} 为总的光谱透射比，它可以分解为其组成成分： $\tau_{\lambda} = \tau_{r\lambda} \tau_{OZ\lambda} \tau_{g\lambda} \tau_{w\lambda} \tau_{a\lambda}$ 。其中 $\tau_{r\lambda}$ ， $\tau_{OZ\lambda}$ ， $\tau_{g\lambda}$ ， $\tau_{w\lambda}$ 和 $\tau_{a\lambda}$ 分别为瑞利散射、臭氧吸收、混合气体吸收(CO_2 等)、水汽吸收和气溶胶衰减的光谱透射比；而

相应的积分值为:

$$E = \int E_{s_0\lambda} d\lambda \quad (1.2)$$

透射比函数可以通过到地面大气的路径即相对大气质量^①(m , 本书公式中以 AM 来表示)来表示。

至于透射比各种成分的计算方法, 各种模式则自有认为更适合的公式。由于各种模式研制的年代不同, 所依据的理论和相关数据也有差异, 最后所得出的公式颇为不同, 也是合乎情理的。下面仅以 Leckner 和 SMARTS 为代表, 列出各种透射比的表达式(表 1.1)。其他简单模式的处理方法也与此相近或相似, 就不再一一列举了。

表 1.1 Leckner(简称 L)和 SMARTS(简称 S)对各种透射比表达式的比较(引自 Myers 等, 2004)

消光过程	表 达 式	来源
瑞利散射	$\tau_{r\lambda} = \exp(-0.008\ 735\lambda^{-4.08}mp/p_0)$	L
	$\tau_{r\lambda} = \exp\{(p/p_0)/[a_0(\lambda/\lambda_1)^4 + a_1(\lambda/\lambda_1) + a_2 + a_3(\lambda/\lambda_1)^{-2}]\}$	S
臭氧吸收	$\tau_{OZ\lambda} = \exp(-k(\lambda)lm)$	L
	$\tau_{OZ}(\lambda) = \exp[-m_{OZ}u_{OZ}A_{OZ}(\lambda)]$	S
水汽吸收	$\tau_{w\lambda} = \exp\left\{-\frac{0.3k_{w\lambda}X_w m}{(1+25.25k_{w\lambda}X_w m)^{0.45}}\right\}$	L
	$\tau_w(\lambda) = \exp[-(m_w u_w)^n B_w(u_w, \lambda)B_m(m_w, \lambda)B_p(p, \lambda)]$	S
气溶胶消光	$\tau_{a\lambda} = \exp(-\beta\lambda^{-\alpha}m)$	L
	$\tau_a(\lambda) = \exp[-m_a\beta_i(\lambda/\lambda_1)^{-\alpha_i}]$	S
混合气体吸收	$\tau_{g\lambda} = \exp\left\{-\frac{1.41k_{g\lambda}m}{(1+118.3k_{g\lambda}m)^{0.45}}\right\}$	L

① 大气质量, 又称大气光学质量: 来自天体单位横截面的光在大气中经过一定长度倾斜路径到达地表时, 其经历空间中所含大气物质的质量。通常光线穿过大气到达海平面的路径长度的度量, 按垂直方向的路径长度的相对值表示。

续表

消光过程	表 达 式	来源
混合气体吸收	$\tau_g(\lambda) = \exp[-(m_x u_x A_x(T, \lambda))]$	S
痕量气体吸收	未考虑	L
	$\tau_g(\lambda) = \exp[-(m_x u_x A_x(T, \lambda))]$	S

注：表中 p 为本站气压； p_0 为标准气压； T 为气温； a_0, a_1, a_2 和 a_3 为拟合系数； m_x 为 x 消光过程光学质量的订正值； u_x 为 x 吸收介质的含量； A_x 为 x 吸收介质的吸收系数； B 为水汽带函数或缩放比例； m_w 为大气中的水汽质量； α_i 和 β_i 为 Ångström 参数； $\lambda < 500 \text{ nm}$ 时 $i=1$ ， $\lambda \geq 500 \text{ nm}$ 时 $i=2$ ， λ_1 为标准波长($1 \mu\text{m}$)。某要素是波长的函数，有的作者用下标 λ 表示，有的作者用带括号的(λ)表示，不过后者更规范。

SMARTS 模式的特征是其多功能性：可在多种学科中应用。之所以能够如此，是因为它具有以下几项特点：

- (1) 使用了准确的和有规律更新的光谱透射比函数。
- (2) 在现有透射比模式之上提供改进的光谱分辨率。
- (3) 以相当简单的输入产生可与 MODTRAN 相比的光谱辐照度。

(4) 使用内置函数可以很容易地和直接地将其预告值与光谱辐射计或宽带辐射表测量值进行比较。

1.2.3 太阳光谱

太阳光谱是模式的基础数据之一，不同模式所采用的太阳光谱数据不同，也是利用模式计算结果产生差异的原因之一。过去正式公布并得到相关组织承认的太阳光谱数据并不多，可以查找到的有：WRC81(WMO CIMO, 1981)，WRC85(Wehrli, 1985)和ASTM E 490-00a三种。当然能找到的相关文献的数据绝不止这些，但只能认为它们均属一家之言。

Gueymard曾经将上列3种太阳光谱进行比较，从图1.1中不难看出它们之间的差异。图1.1中WRC81显然是过于简单了，它忽略了太阳光谱中的许多变化细节。不过，为了便于对比和用户选择，Gueymard还是将所能搜集到的（被其他模式所用过的）太阳光谱，借助选项提供出来（详见第2章表2.2）。

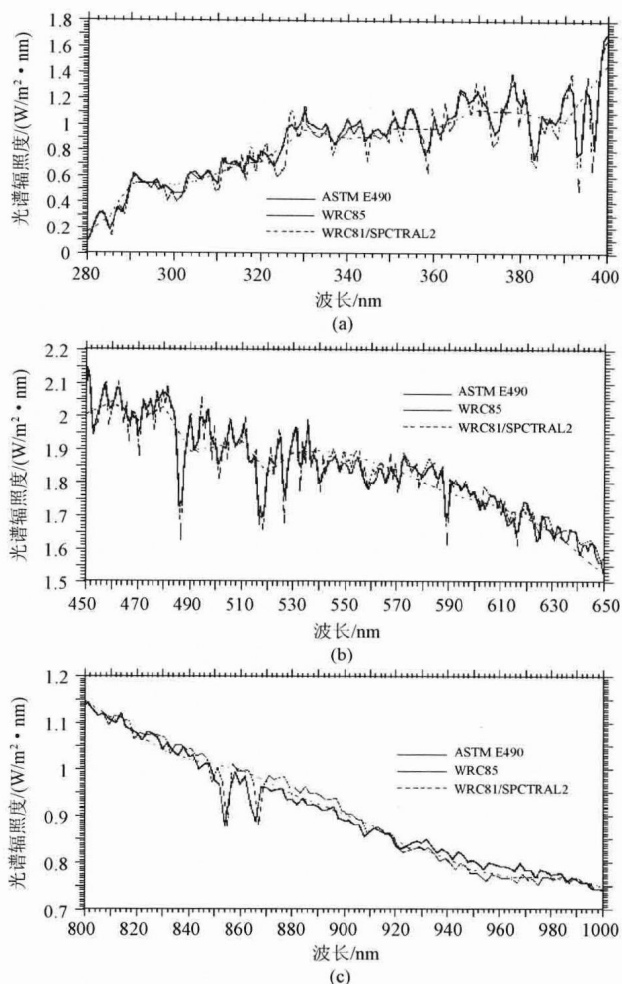


图1.1 SMARTS所用的太阳光谱与其他光谱在不同波段内的比较(引自Gueymard, 1995)

(a)280~400 nm; (b)450~650 nm; (c)800~1000 nm

1.2.4 标准大气

所谓标准大气是人为规定的、特性随高度平均分布的大气。它包括大气压、温度和密度以及大气成分及其他大气物理参数的垂直分布。这种分布是理想化的，按一种最接近实际大气的模型规律分布的模式大气。它能粗略反映中纬度地区多年的大气年平均状况，并得到国家或国际组织的承认。它的典型用途是飞机与空间

飞行器的性能计算及设计、遥感探测的背景大气、气压高度标准、弹道制表及气象模式、气象制图的基准等。目前,比较知名的大气标准有:美国标准大气1976(United States Committee on Extension to the Standard Atmosphere, 1976),其50 km以下的内容已为国际标准化组织(ISO)选用,且同国际民航组织(ICAO)和世界气象组织(WMO)标准大气的相应部分一致。我国已将其30 km以下部分选作中国的国家标准(GB 1920—80)。

除了这些标准大气外,为配合实际应用,早在20世纪70年代,美国一些学者针对不同纬度和不同季节又提出了一些标准大气:热带、中纬度夏季、中纬度冬季、亚北极夏季和亚北极冬季等5种(McClatchey等, 1970)。在LOWTRAN和MODTRAN模式中除了上述各种标准大气外,还提供了用户自定义的选择。它主要是为了配合有探空数据的站点,可以使用当地、当日探空气球所获得的数据,表述大气实际状况进行太阳辐射传输量值的预告。

SMARTS模式则提供了10种标准大气供选用。这些标准大气由不同的温度、气压和大气各种主要气体成分含量的垂直剖面组成。包括由Anderson等(1996)介绍的,在MODTRAN系列模式中使用的6种标准大气:美国标准大气(USSA)、中纬度夏季(MLS)、中纬度冬季(MLW)、亚北极夏季(SAS)、亚北极冬季(SAW)和热带(TRL)以及4种增补的标准大气:亚热带夏季(STS)、亚热带冬季(STW)、极地夏季(AS)和极地冬季(AW)。所有剖面均以1 km的垂直增量来定义。表1.2列出了对流层底部4 km所有上述标准大气的参数。由于在此层次内,大气的各项参数(温度、相对湿度、可降水量、不均匀混合气体的含量)会随气压急剧地变化,因此需要内插。表1.2中还列出了臭氧和NO₂柱总量^①,但仅有海平面的数值。由于这些成分主要聚集于平流层,其含量在4 km以下没什么变化。为了提高其准确度,使用以标准大气数据线性拟合为基础的因子 C_t ,可以从高度 $H(\text{km})$ 的值订正其海平面上的总含量,即

$$C_t = 1 - 0.00898H \quad (1.3)$$

对于大多数情况来说,大气中所有消光过程均使用单一的光学质量(即对大气分子的光学质量)来评估总的倾斜光程。可是,在大气模式中需要单独考虑每种大气成分的光学质量,因为每一种消光过程均对应于一个特殊的垂直浓度剖面。分开考虑光学质量会改善模式的准确度,特别是在大天顶角的情况下,因为在80°以上时,它们的差异相当大。对于太阳在天顶时(即 $AM=1$),预告其他角度的公式,SMARTS采用式(1.4)来表达:

$$m_i = [\cos Z + a_i Z^{a_2} (a_3 - Z)^{a_4}]^{-1} \quad (1.4)$$

① 柱总量:单位面积上自地面至大气顶整个气柱内,某种气体成分的总量。