



太阳短波辐射的 分布式模拟及评估研究

孙娴 姜创业 王娟敏 著

1



气象出版社
China Meteorological Press

太阳短波辐射的分布式 模拟及评估研究

孙 娴 姜创业 王娟敏 著

内 容 简 介

本书以准确计算、科学评估太阳能资源,为合理、有效地开发利用太阳能提供科学依据为目的,立足学科前沿,从太阳辐射机理入手,应用多种新技术、新方法,将地理信息科学、遥感科学与技术等现代空间信息技术与大气科学等多种学科有机融合,改进并提出新的太阳能估算模型,设计太阳能评估指标体系和评估方法,建立太阳能资源评估业务系统,并以陕西省为例,计算了全省太阳能资源分布,为有关部门开发利用太阳能资源提供科学依据。

本书内容丰富,图文并茂,学术性与实用性并举,可供从事太阳能应用、研究和设计等工作的专业人员使用,也可作为研究机构 and 高等院校相关专业的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

太阳短波辐射的分布式模拟及评估研究/孙娴,姜创业,王娟敏著. —北京:气象出版社,2015. 12
ISBN 978-7-5029-6301-9

I. ①太… II. ①孙… ②姜… ③王… III. ①太阳辐射-短波辐射-研究 IV. ①P442. 1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 301260 号

Taiyang Duanbo Fushe de Fenbushi Moni ji Pinggu Yanjiu

太阳短波辐射的分布式模拟及评估研究

孙 娴 姜创业 王娟敏 著

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.qxcbs.com>

责任编辑:吴晓鹏 陈 蕊

封面设计:博雅思企划

印 刷:中国电影出版社印刷厂

开 本:700 mm×1000 mm 1/16

字 数:236 千字

版 次:2015 年 12 月第 1 版

定 价:50.00 元

邮政编码:100081

发 行 部:010-68409198

E-mail: qxcbs@cma.gov.cn

终 审:黄润恒

责任技编:赵相宁

印 张:12.5

印 次:2015 年 12 月第 1 次印刷

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。

前言

IPCC 第五次评估报告 (AR5) 认为, 人类活动极可能导致了 20 世纪 50 年代以来的大部分全球地表平均气温升高。大气中 CO_2 浓度比工业革命前水平上升了 40%, 主要是由于化石燃料的燃烧。太阳能发电是摆脱对化石燃料的依赖, 减少温室气体排放的重要手段之一, 太阳能发电潜力巨大。近年来, 随着技术的进步, 太阳能资源的经济优势逐步显现, 其开发利用已进入商业化快速发展阶段。近 10 多年来, 全球太阳能光伏发电累计装机规模以平均每年近 30% 的速度增加, 截至 2013 年底全球累计光伏装机容量为 138.9GW, 其中 2013 年新增装机容量超过 38.4GW, 超过了 2012 年新增的 29.9GW 和 2011 年新增的 28.7GW。2013 年, 我国新增装机量达 11.3GW, 同比增长 122%, 其中光伏大型地面电站约为 7GW, 分布式发电约为 3GW。科技部发布的《太阳能发电发展“十二五”规划》中, 明确将太阳能发电作为我国“十二五”规划中可再生能源的重点规划内容之一。国际能源署发布的《2014 年世界能源展望》报告对 2040 年的全球能源图景进行了展望, 报告指出得益于成本下降和补贴政策, 可再生能源技术迅速发展, 成为全球低碳能源供应的重要支柱。到 2040 年, 可再生能源发电量将占全球新增发电量的近一半。在全球范围内, 风力发电量占可再生能源增长份额的比重最大 (34%), 其次是水力发电 (30%) 和光伏发电 (18%)。

在中国气象局成立 60 周年之际, 胡锦涛总书记首次将提高开发利用气候资源能力和气象预测预报能力、气象防灾减灾能力、应对气候变化能力提到同等重要的地位。2014 年 6 月 13 日, 习近平主席主持召开中央财经领导小组第六次会议, 研究我国能源战略, 提出了能源革命的口号, 包括能源消费革命、供给革命、技术革命和体制革命。因此, 为切实增加我国可持续发展的资源保障能力, 大力提升气象资源为可持续发展的服务能力和支撑能力, 加强风能、太阳能等可再生气象资源的开发利用技术研究工作, 开展太阳辐射能的精细化评估技术研究, 获得面向国家宏观决策的精细化资源评



估结果和面向工程应用的针对性资源参数显得非常迫切和重要。

实际地形下太阳辐射的时空分布是天文因子、大气物理因子、宏观地理和局地地形因子共同作用的结果，机理复杂，一直是地理学和大气科学研究领域的难点问题之一。本书系统地分析了各因子对太阳辐射的影响机理，从多学科交叉的研究思路出发，以分布式模型为核心技术，利用日射站水平面观测数据，建立了晴空指数等综合描述大气物理因子和气象因子等对太阳辐射影响参数的估算模型来解决天空因素对直接辐射的影响；依据太阳光线与起伏地形之间的几何关系，通过数值模拟山地天文辐射、地形开阔度来解决地形因子（坡度、坡向以及地形遮蔽）对太阳辐射的影响；依据坡面太阳辐射的不同形成机理，提出更加完善的山地太阳辐射分布式模型，实现山地太阳辐射时空分布的分布式模拟。以陕西省为例，以 $100\text{m} \times 100\text{m}$ 分辨率的 DEM 数据作为地形的综合反映，计算了实际地形下陕西省各太阳辐射分量的时空分布。同时，研究山地太阳辐射的形成机理，探讨不同 DEM 分辨率对山地太阳辐射计算的影响。

根据研究成果建立太阳能评估指标体系，对陕西省太阳能资源进行精细化评估，并开发了陕西省太阳能资源评估业务系统。本书探索了一套理论基础充分、计算结果可靠的水平面、山地太阳辐射空间扩展方法，可为各级政府宏观决策和各类光伏发电工程应用提供科学依据；对建立非均匀下垫面气象要素的分布式模型以及非均匀下垫面的能量平衡的模拟具有重要的理论意义和应用价值；还可以为相关研究和应用领域提供山区太阳辐射基础数据。

本书第 1—8 章由孙娴、姜创业主笔；第 9—10 章由王娟敏主笔；校对由雷杨娜、张文静负责。

感谢南京信息工程大学的邱新法教授、李梦洁给予的具体帮助；感谢南京师范大学林振山教授的意见和建议；在本书的编审过程中，气象出版社的吴晓鹏等编辑人员也提出了许多宝贵建议，给予了很大的支持和帮助，在此一并表示感谢。

由于作者水平所限，书中不妥和错漏之处恳请读者批评指正。

孙 娴

2015 年 1 月

目 录

前言

第 1 章 绪 论	(1)
1.1 研究背景及意义	(2)
1.2 国内外研究现状及进展	(10)
1.3 存在问题	(15)
1.4 研究思路、研究内容	(17)
1.5 研究框架	(19)
1.6 研究区域简介	(20)
参考文献	(22)
第 2 章 水平面太阳辐射估算模型	(29)
2.1 模型介绍	(30)
2.2 研究思路	(35)
2.3 资料来源及数据处理	(36)
2.4 水平面总辐射估算模型	(37)
2.5 水平面直接辐射估算模型	(47)
2.6 水平面散射辐射估算模型	(54)
2.7 小结	(59)
参考文献	(60)
第 3 章 山区太阳辐射地理参数及起始数据的模型研究	(63)
3.1 研究思路	(63)
3.2 山区可照时数的分布式模型	(64)
3.3 山区日照时数的分布式模型	(72)
3.4 山区天文辐射的分布式模型	(80)
3.5 山区地形开阔度的分布式模拟	(86)
3.6 地表反射率的遥感反演	(91)



3.7 小结	(92)
参考文献	(93)
第 4 章 山区直接辐射分布式模型	(95)
4.1 坡地上的直接辐射	(96)
4.2 山地太阳直接辐射分布式模型	(96)
4.3 山区直接辐射的时空分布特征	(97)
4.4 小结	(101)
参考文献	(102)
第 5 章 山区散射辐射分布式模型	(103)
5.1 坡面太阳散射辐射的计算	(104)
5.2 山区散射辐射的计算模型	(106)
5.3 山区散射辐射分布式计算模型	(106)
5.4 小结	(111)
参考文献	(112)
第 6 章 山区地表反射辐射分布式模型	(114)
6.1 坡地反射辐射	(114)
6.2 山区地形反射辐射的计算模型	(115)
6.3 山区地形反射辐射的时空分布特征	(115)
6.4 地表反射辐射局地分布规律	(119)
6.5 小结	(120)
参考文献	(120)
第 7 章 山区总辐射分布式模型	(121)
7.1 山区总辐射的计算模型	(122)
7.2 山区总辐射的时空分布特征	(122)
7.3 局地地形对山区总辐射的影响	(126)
7.4 生长季总辐射空间分布	(131)
7.5 日平均气温 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 、 10°C 期间全省山地太阳总辐射特征	(132)
7.6 小结	(134)
参考文献	(135)

第 8 章	山区太阳短波辐射的形成机理	(138)
8.1	研究思路	(138)
8.2	地形因子对山区直接辐射的影响规律	(139)
8.3	太阳短波辐射空间尺度效应研究	(145)
8.4	山区地形转换因子的空间尺度效应研究	(153)
8.5	小结	(155)
	参考文献	(156)
第 9 章	太阳能资源评估研究	(157)
9.1	太阳能资源总储量、可获得量评估	(157)
9.2	太阳能资源丰富程度评估	(158)
9.3	太阳能资源稳定程度评估	(159)
9.4	光伏发电系统峰值日照时数评估	(163)
9.5	保障率	(164)
9.6	光伏发电系统方阵倾角	(165)
9.7	小结	(174)
	参考文献	(175)
第 10 章	陕西省太阳能资源评估业务系统介绍	(176)
10.1	系统设计	(177)
10.2	系统功能实现	(181)
10.3	小结	(191)
	参考文献	(191)

第1章 绪 论

太阳能辐射是地球气候形成的最重要因子,也是各种可再生能源中最重要
的基础能源,生物质能、风能、海洋能、水利能等都来自太阳能。太阳能作为一
种清洁的能源,又是可再生能源,有着矿物能源不可比拟的优越性。经测算表
明:太阳每秒能够释放出 3.86×10^{23} kJ 的能量,而辐射到地球表面的能量虽然
只是它二十二亿分之一,但也相当于全世界目前发电总量的 8 万倍。因此太阳
能资源十分丰富,是可再生能源中最引人注目、开发研究最多、应用最广的清洁
能源。作为 21 世纪最有潜力的新兴能源之一,太阳能产业的发展潜力巨大。

能源是经济社会发展的重要基础。近年来,随着全球经济的快速发展,
世界能源需求快速增长,化石能源大量消费导致的资源短缺和环境污染及气候
变化等问题日益突出。根据联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)相继发
布的相关评估报告,全球气候变暖已是一个不争的事实,未来 100 年全球气候
还将持续变暖,并将对自然生态系统和人类生存环境产生巨大影响。我国是受
气候变化影响最为严重的国家之一,也是温室气体排放大国,适应和减缓气候
变化面临着巨大的政治和外交压力。大力开发利用清洁的气候资源,减少对化
石能源的依赖,减轻环境污染,减缓全球气候变化,共同推进人类社会可持续发
展,已成为世界各国的共识。为此,世界上许多国家和政府都把加快开发利用
风能、太阳能作为调整能源结构、减少温室气体排放的有效途径之一。开发利
用太阳能等可再生能源是可持续发展能源战略决策、有效减少温室气体排放、
应对气候变化的关键。而太阳能资源准确科学评估是其开发利用的前提和重
要保障。

因此,从气候学角度研究太阳辐射能在大气中的传输及在地球表面的交换
和分布规律,是气候学研究的首要任务之一,一直受到气候界的重视。目前,太
阳能资源准确计算、精细化评估及标准化建设等方面的研究和业务化明显滞后
社会发展需求。随着太阳能应用技术不断进步,各级政府的支持政策必将进一
步完善,准确、科学地计算评估太阳能资源将成为大规模开发利用太阳能资源



的关键技术之一。建立新的太阳能估算模型、评估指标和评估方法,研发太阳能评估系统,具有重要的现实意义。



1.1 研究背景及意义

1.1.1 开发利用可再生能源是应对气候变化的要求

全球气候变化是当前国际社会普遍关注的重大全球环境问题之一,限制和减少化石燃料产生的 CO_2 等温室气体的排放,已成为国家社会减缓全球气候变化的重要组成部分。

2014 年联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)发表了“第五次全球气候变化评估报告”。这份报告综合了全世界科学家 6 年来的科学研究成果,报告明确指出:气候系统变暖是毋庸置疑的,从 1850 年以来的过去 30 年里,每 10 年的地球表面温度都依次比前一个 10 年的温度更高。在北半球有此项评估的地方,从 1983 年至 2012 年的时期可能是过去 1400 年里最热的 30 年。全球地表气温平均值从 1880 年至 2012 年升高了 $0.85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。研究认为:全球平均温度升高很可能是人为排放温室气体浓度增加所导致的。在 1970 年至 2010 年间,人为温室气体排放继续增加,尽管气候减缓政策的数量不断增加,但 2000 年至 2010 年间仍出现了更高的绝对增加。在未来几十年内,全球人为温室气体排放将会继续增加,这将导致进一步的增暖,报告预测,2081 年至 2100 年期间的全球地表温度有可能比 1851 年至 1900 年高 $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,21 世纪海平面将至少上升 26~55 cm。因此限制和减少化石燃料燃烧产生的 CO_2 等温室气体的排放,已成为国际社会减缓全球气候变化的重要组成部分。

根据国际能源署(IEA)的统计结果,全球 CO_2 排放量在经历了 2009 年的下降(降幅 1%)及 2010 年激增(增幅 5%)之后,2011 年全球 CO_2 排量增加了 3%,与前一年相比,达到了总排量 340 亿吨的历史最高点。全球五大 CO_2 排放国家依次为(括号内为 2011 年各国排放量在总排放量中所占百分比):中国(29%)、美国(16%)、欧盟(11%)、印度(6%)、俄罗斯(5%),紧随其后的是日本(4%)。2011 年全球煤炭消耗量增长 5%(所排放的 CO_2 占总排量的 40%),而全球消耗的天然气和石油产品仅分别增长 2%和 1%(BP,2012)。在过去的十年里, CO_2 年均排放量增长了 2.7%。由此可见,在经历了全球经济危机两年的严重影响和 2010 年的复苏之后,2011 年 CO_2 排放量增长率达到 3%,全球 CO_2 排放将继续前十年的趋势。2011 年中国的 CO_2 排放量猛增 9%,达到 97 亿吨。据中国国家统计局(NBS,2012)报告,该增长量与火力发电(主要是燃煤发电站)(14.7%的增长率)、钢铁生产(也有大型煤炭用户)(7.3%的增长率)和

水泥生产(10.8%的增长率)的增长趋势一致(国际能源署(IEA)),CO₂ Emissions from Fuel Combustion 2012)。可见中国能源消费结构中煤炭比例偏高,CO₂ 排放增长较快,其中二氧化硫、氮氧化物、一氧化碳、烟尘等大气污染物造成的酸雨、呼吸道疾病等已经严重威胁地区经济发展和人民生活健康。

为积极应对气候变化,减少化石能源的排放,中国政府做出了一系列重大举措:2009年9月,胡锦涛主席在联合国气候变化峰会上明确提出到2020年中国非化石能源将占能源消费总量的15%左右;2009年12月哥本哈根气候变化大会上,温家宝总理正式对外宣布到2020年单位GDP CO₂ 排放量比2005年下降40%~45%。2014年5月我国出台了《2014—2015年节能减排低碳发展行动方案》,明确提出单位国内生产总值CO₂ 排放今明两年分别下降4%和3.5%以上。2014年9月在联合国气候峰会上,中国国家主席习近平特使、国务院副总理张高丽全面阐述了中国应对气候变化的政策、行动及成效,并宣布中国将尽快提出2020年后应对气候变化行动目标,碳排放强度要显著下降,非化石能源比重要显著提高,森林蓄积量要显著增加,努力争取CO₂ 排放总量尽早达到峰值。因此,开发利用风能、太阳能等可再生能源是应对气候变化的迫切需求。

1.1.2 开发利用可再生能源是可持续发展的要求

能源安全是国家经济安全的重要方面,它直接影响到国家安全、可持续发展和社会稳定。中国作为能源消费大国,能源问题在中国经济社会的可持续发展中具有特别重要的战略地位。随着中国经济的持续高速发展,对能源需求不断增长,而包括煤炭、石油、天然气在内的常规能源的短缺,能源供需矛盾必将更加突出,中国的能源安全面临严重威胁。同时,我国因化石能源大量消费带来的环境压力,远高于其他国家。能源问题已成为我国可持续发展中面临的最大难题与挑战。进入21世纪,随着世界人口增长和经济的不断发展,对于能源供应的需求量日益增加,全球经济增长引发的能源消耗达到了前所未有的程度,常规化石燃料不仅在满足人类生活发展方面已经捉襟见肘,而且因化石燃料过度消耗引起的全球变暖以及生态环境恶化给人类带来了更大的生存威胁。

全球燃料能源消耗量在1971—2002年的平均增长率是2%,在2001—2004年为3.7%。美国能源部能源信息管理综合分析及预测办公室(EIA)2013年估计,世界能源消费量从2010年到2040年每年将以1.5%的增势变化,石油在燃料中所占份额最大,但增速逐渐减缓,以每年0.9%的速率增加;而煤的消费量在未来三四十年将以1.3%的速率增加。可以看出,化石燃料的消费量在未来几十年增长量逐渐减缓,而核能和可再生能源则成为消耗量最快的能源,预计二者将以2.5%的速率增长。

在有限资源和环保严格要求的双重制约下,发展节能环保的可再生能源已



成为实现经济和社会可持续发展的关键。充分开发并合理利用太阳能是世界各国政府可持续发展的能源战略决策。统计表明:在近年世界能源消耗增长趋势中,太阳能位居首位。随着技术的进步,目前,太阳能资源的经济优势逐步显现,其开发利用已进入商业化快速发展阶段。光伏发电是目前太阳能发电的主要方式,其基本原理是通过光电效应将太阳光子转换为电子形成电流。2008—2013年,全球太阳能光伏累计装机容量年均复合增长率超过50%。欧洲光伏工业协会(EPIA)的数据显示,截至2013年底全球累计光伏装机容量约为140 GW,其中2013年比2012年新增装机容量超过38 GW,超过了2012年新增的30 GW(图1.1)。

据世界各权威机构预测,2030年全球的常规能源利用将达到峰值,此后新能源和可再生能源的比例将逐渐提高,而太阳能资源的开发利用必将扮演重要的角色。到21世纪50年代,全球能源消费结构必将发生根本性的变化。世界观察研究所的报告指出:正在兴起的“太阳经济”将成为未来全球能源的主流,太阳能被称为“世界增长最快的能源”。再生能源将在整个能源构成中占50%,其中太阳能以其储量的“无限性”、存在的普遍性、利用的清净性和经济性占有明显的优势达到14%。开发利用太阳能,使之成为能源体系中重要的替代能源可以说是人类能源战略上的终极理想。

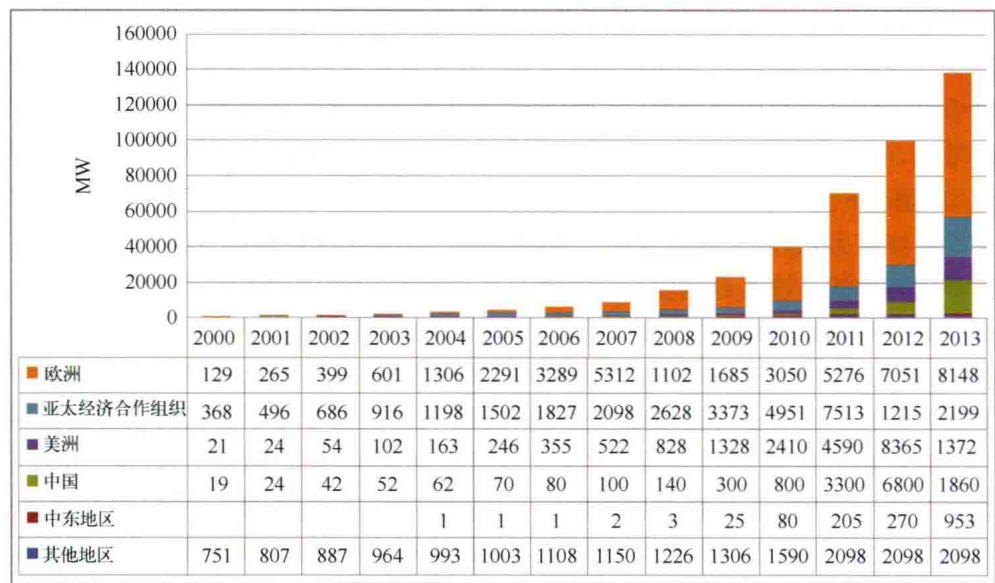


图 1.1 全球太阳能光伏发电累计装机规模发展趋势 (MW)

太阳能是世界上资源最丰富的绿色可再生能源,与其他常规能源相比,具有以下几个特点:①取之不尽,用之不竭。据估算,一年之中投射到地球的太阳

能,其能量相当于137万亿吨标准煤所产生的热量,大约为目前全球一年内利用各种能源所产生能量的两万倍;②在转换过程中不会产生危及环境的污染;③遍及全球,可以分散地、区域性地开采(朱瑞兆等,1998)。

我国政府一直非常重视太阳能的开发利用,1998年实施的《中华人民共和国节约能源法》明确提出“国家鼓励开发利用太阳能”。2006年《中华人民共和国可再生能源法》正式实施,太阳能作为“十一五”期间重点发展方向,将在政策、税收等享有优惠。可再生能源发展“十二五”规划目标为到2015年,风电将达到1亿千瓦,年发电量1900亿千瓦时;太阳能发电将达到1500万千瓦,年发电量200亿千瓦时。国务院办公厅2014年印发《能源发展战略行动计划(2014—2020年)》,提出加快发展太阳能发电,有序推进光伏基地建设,加快建设分布式光伏发电应用示范区,稳步实施太阳能热发电示范工程。到2020年,光伏装机达到1亿千瓦左右。2014年12月,发布的《中国可再生能源发展路线图2050》提出2020年、2030年、2050年国内可再生能源高比例发展情景,2050年风电、太阳能发电有望主宰电力系统。在太阳能发展规划上,基本情景下预计2020年光伏发电装机1亿千瓦,2030年4亿千瓦,2050年10亿千瓦;在积极情景下预计,2020年光伏发电装机2亿千瓦,2030年8亿千瓦,2050年20亿千瓦。

经过近年来的发展,中国已经成为全球可再生能源大国。截至2012年12月底,全国可再生能源发电装机达到3.13亿千瓦,其中水电装机24890万千瓦,比上年增长6.8%;风电(并网)6083万千瓦,比上年增长31.6%;太阳能发电(并网)328万千瓦,同比增长47.8%。2012年全国共消纳可再生能源电量9680亿千瓦时,比上年提高30.32%。在2013年全年新增发电装机容量中,可再生能源发电新增装机容量占53.8%,较上年同期大幅上升13.2个百分点。我国大规模发展太阳能光伏发电虽然起步较晚,但自2006年以来装机容量年增长速度均达到100%以上(图1.2),远远超过国际平均水平。近几年随着“太阳能屋顶计划”、“金太阳”等示范工程以及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。2013年中国新增光伏装机容量为12GW,同比增长了232%,接近欧洲2013年新增装机容量总和,跃居全球最大的光伏市场。截至2013年底,中国累计装机容量达到19GW。目前,我国大规模的光伏电站主要建设在西北、西南等太阳能资源丰富的地区,此外,在东部地区(如江苏)也有较大规模的屋顶光伏电站。除了太阳能光伏发电,太阳能直接热利用在我国也深入千家万户,当前我国太阳能热水器安装量占世界总安装量的80%左右。

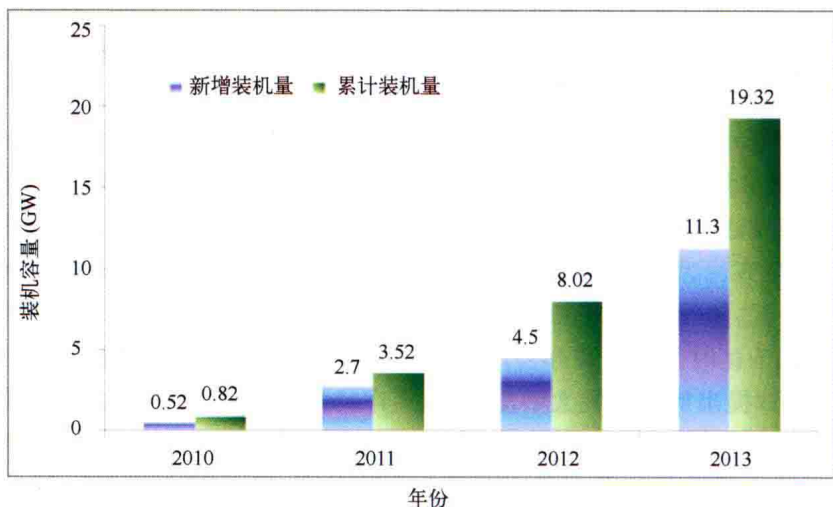


图 1.2 我国光伏发电年装机容量变化趋势

1.1.3 太阳辐射资源评估是其开发利用的前提和重要保障

《中国气象事业发展战略研究》中明确指出中国气象事业必须要牢固树立“公共气象、安全气象、资源气象”理念,大力提升气象资源为可持续发展的服务能力和支撑能力,加强风能、太阳能等可再生气象资源的开发利用,为建立资源节约型社会和环境友好型经济、为子孙后代能够享受充分的资源和良好的生态环境做出实质贡献,充分发挥气象事业对可持续发展深远的前瞻性作用。

国家为规划、布局风能太阳能等可再生能源的发展,需要从宏观层面掌握更为客观、可靠的太阳能资源总体分布和蕴藏量;太阳能电站选址需要对太阳能资源量和气象灾害风险进行精细化的科学评估;太阳能发电的间歇、波动、不稳定性对国家和区域电网的安全运行将造成极大的挑战,太阳能大规模并网发电需要提前做出准确的发电量预测;太阳能开发项目的科学设计需要对风能、太阳能资源监测、评估,进一步规范。

因此,为切实增加我国可持续发展的资源保障能力,全面细致的开展我国太阳辐射能的评价工作,了解其空间分布情况,是有效开发利用太阳能资源的重要基础保障和前提,已刻不容缓。目前,全世界具有多年太阳辐射观测资料序列的观测站仅一千多个,其中,我国约有一百多个。另外,太阳辐射观测站大都位于平地上,且在一定距离上没有遮蔽影响,其观测资料都为水平面观测值。我国地形复杂,山地占三分之一,山区(包括山地、高原和丘陵)约占国土面积的三分之二。在山区,受坡度、坡向、地形起伏和地形相互遮蔽的影响,使太阳短波辐射状况产生很大差异,呈现出复杂的空间分布。因此,仅仅依靠数量有限,

空间分布不均,且都设置在水平开阔地段观测资料来描述太阳辐射的空间分布是相当困难的(翁笃鸣,1997),考虑地形因素影响对我国太阳能的评估更有实际意义。尽管国内外都开展了短期野外考察和研究,取得了部分山地的实测太阳辐射资料和相应的科研成果,但仍难以对复杂地形下太阳辐射的时空分布做出全面、准确的认识。

目前,全国已开展了风能资源详查及评估的研究工作,而在太阳辐射能资源评估方面,深入细致的研究工作尚未开展。因此,探索新方法,模拟太阳辐射的精细空间分布问题,具有十分重要的理论意义和广阔的应用前景。

开展太阳能资源的监测、研究和评估,是气象能源开发利用的重要的基础性工作,对我国的气象能源开发利用战略决策具有重要的意义,可以为气象能源开发利用提供技术手段。

1.1.4 地表时空多变要素的研究是现代地学发展的需要

同时,地球科学研究问题复杂化和综合化以及应用领域的发展,迫切需要动态的、高时空分辨率、空间栅格化的辐射、降水、气温等气象要素数据(Mackey et al, 1996; Daly et al, 1997; Thornton et al, 1997; 于贵瑞等, 2004; 何洪林等, 2004; 刘新安等, 2004)。自 20 世纪 70 年代末开始,一系列陆面过程分布式模型得到了迅速发展,对地球表面时空多变要素数据的需求提出了更高的要求。复杂地形下地表时空多变要素的研究进展缓慢,是限制许多陆面过程模型发展的重要原因(Li and Avissar, 1994; Arola and Lettenmaier, 1996)。现有太阳辐射研究成果的不足主要体现在不能适应现代地球科学发展的要求,无法为相关研究和应用领域提供复杂地形条件下栅格化的太阳辐射数据。目前,全球地面气象观测系统还难以提供所要求的高时空分辨率网格数据的要求,简单地依靠卫星遥感技术也不能完全解决这些问题(李小文等, 2002)。因此,利用现有的地面观测资料,基于 GIS 和遥感等技术、数学模拟等手段,充分考虑地形和地理因子的影响而开展的气象要素空间扩展方法研究成为近年来国内外的地学研究的重要任务之一(Runing et al, 1987; Daly et al, 1994; 于贵瑞等, 2004)。

通常空间域上气象要素的扩展方法以内插法为主。而太阳辐射和环境过程的关系是非线性的,像素或格点上的变化规律不能推广到整个面上,其根本原因在于内插法不能充分考虑气象要素的空间分布与诸多地理环境要素间的复杂函数关系,空间预测能力差。因此,采用内插或简单的经验拟合方法,试图利用有限的单点地面资料生成适合模型所需空间分辨率的面域(区域)高质量数据是十分困难的(Suckling, 1985; Goodchild et al, 1996; 王守荣等, 2002)。近年来,许多学者利用地统计学中的空间插值技术和基于地形因子的统计方法(Kumar et al, 1997; Thornton and Running, 1999; 何洪林等, 2004),生产栅格



化的太阳辐射空间分布数据,但由于受辐射资料站点数量太少等原因的限制,数据精度尚存在有待改进之处,尤其是山地太阳辐射形成机理和计算模型的研究方面尚需深入探讨。

1.1.5 非均匀地表环境研究一直是地学界的重要课题之一

地表的非均匀性是当今科学的研究热点和难点。局地地表的非均匀性问题,制约着地球科学的发展。地表时空多变要素信息的提取是制约定量遥感的发展的主要原因(李小文,2005)。地表的非均匀性以及观测资料的缺乏对陆面过程模拟具有重要的影响(牛国跃,1997;张强,1998;孙淑芬和金继明,2000)。研究表明:由于不能真实地描述地表参数的非均匀性,给陆面过程模式的计算造成很大的误差(Flippo, 1997a, 1997b)。这也正是当前国内外在陆面过程模式与大中尺度大气模式耦合等研究领域中亟待解决的国际前沿问题(刘晶淼等,2003)。

非均匀因素是造成包括太阳辐射等地表时空多变要素在时间、空间上分布非均匀性的根本原因。大气非均匀因素主要是指大气中的气体、水汽、气溶胶含量以及云随时间和空间变化的非均匀性。地表的非均匀性包括:(1)地形的起伏(2)下垫面物理性质(下垫面植被状况、土壤状况以及下垫面的干湿程度等)。地形对太阳辐射的影响相当复杂,坡向、坡度、遮蔽度、海拔高度以及地表性质等对辐射均有影响(Brown, 1994; Kumar et al, 1997; 翁笃鸣和罗哲贤, 1990; 傅抱璞, 1983)。在山区,周围地形的遮蔽作用会强烈地影响局地可照时间的分布(Roberto and Renzo, 1995; 傅抱璞, 1983; 李占清和翁笃鸣, 1987; 曾燕等, 2003);不同坡面上太阳光线入射角的不同,使其接受的太阳辐射在地面上还存在一个重新分配的过程,从而形成复杂的太阳辐射空间分布。同时,随着太阳在天空中运行轨迹的变化,地形之间相互遮蔽影响也在不断地相应变化之中,使得山区太阳辐射的计算变得非常复杂。

要研究这些非均匀要素对太阳辐射的影响,单靠目前的观测手段是难以达到要求的。利用地统计学中的空间插值技术进行太阳辐射数据的空间扩展,其精度受限于地面日射观测站的数量和空间分布;采用多元统计回归等统计学方法则无法反映局地地形因子对太阳辐射的影响。单纯采用遥感手段反演地表参数,由于遥感反演技术本身的复杂性,也存在较大的不确定性。一方面,很难克服大气效应和地表非均匀性对反演结果的影响(田庆九等,1998);另一方面因为遥感影像为瞬时影像,很难克服时间扩展对反演结果的影响,因而目前用遥感图像估算得到的辐射量是一个瞬时值,如何根据瞬间值推算出日辐射值,这是需要解决的时间尺度的转换问题。由于大气湍流和云的不确定性,时间尺

度的拓展问题并没有得到很好的解决(黄妙芬等,2004)。

自20世纪80年代后期以来,随着分布式模型在地学界,尤其是水文学界的大量应用,分布式模型的研究已经成为国际热点(Abbott,1986;Refsgaard,1996;万洪涛等,2001;王守荣,2002)。与传统的集总式模型不同,分布式模型因为可以清楚地考虑下垫面特性的空间变化,是研究下垫面空间分布不均匀对陆面过程影响的有力工具。依据复杂地形对太阳辐射影响机理建立的分布式太阳辐射模型,因为物理机理清晰,可以充分反映天文因子、大气物理因子、宏观地理和局地地形因子对太阳辐射共同作用的复杂过程,可以有效地克服地面日射观测站数量有限对模拟精度的影响,是解决地形下太阳辐射定量空间模拟的最佳途径。

综上所述,不论是从全球变化问题、还是从现代地学的发展看,地表时空非均匀要素的研究对提高和改善陆面过程等模式对地球系统的模拟能力,深入认识地球气候系统变化的物理机制具有重要的理论和实践意义。

1.1.6 太阳辐射能量是地球表面各种过程的主要驱动因子

太阳辐射是地球表层上的物理、生物和化学过程的最主要能源,是地球气候形成的最重要因子。因此太阳辐射作为大气的唯一热源,成为控制气候的基本能量。它在地球上的时间和空间分布,制约着地球上气候系统的运动,是气候形成和演变过程中重要的外参数(翁笃鸣,1997),也是植物光合作用、植物蒸腾作用、土壤蒸发等陆面过程的主要驱动因子(Roberto and Renzo,1995;Thornton and Running,1999;Fu and Rich,2000;Liu and Scott,2001)。

太阳辐射不但在气候系统能量交换中扮演十分活跃的角色,而且还伴随着热力和动力过程,与地表水分循环、生态系统、人类活动等密切相关(Roberto and Renzo,1995;Fu and Rich,2000)。全球环流模式(GCM)的敏感性试验表明(Barker and Li,1995;Ward,1995;Slingo,1989),太阳辐射能量在地表上分配的变化会根本改变云覆盖、温度、湿度、降水和大气环流特征的模拟场。此外,太阳辐射也是植物光合作用、植物蒸腾作用、土壤蒸发等陆面过程的主要驱动因子,也是生态系统、水文模型模拟、生物物理模型研究中的重要输入参数(Thornton and Running,1999;Liu and Scott,2001)。因此,地表辐射研究在世界气候研究计划(WCRP,1984)、世界海洋试验、热带海洋和全球大气试验以及全球能量和水循环试验(GEWEX)(Thornton and Running,1999)等重大项目中一直受到重视。