

现代地理学的理论与实践

Modern Theoretical
and Practical Studies
on Geography

STUDIES ON RADIATION IN
THE EPIGEOSPHERE

地球表层辐射研究

左大康 周允华 顾月琴 著
朱志辉 谢贵卿

科学出版社

现代地理学的理论与实践
Modern Theoretical and
Practical Studies
on Geography Series

地球表层辐射研究

左大康 周允华 项月琴 著
朱志辉 谢贤群

科学出版社

1991

内 容 简 介

本书是中国科学院地理研究所主编的《现代地理学的理论与实践》系列专著之一。本册为地球表层辐射方面的系统研究成果,全书共十二章,分别阐述了大气对流层内的和平原、高原、坡地、洋面及植物群丛的辐射能量收支状况;探讨了气候学估算方法和时空分布规律;研究了地表太阳辐射的光谱结构,提出了紫外辐射、光合有效辐射和光量子通量的计算方法;利用日射测定学原理监测并讨论了不同地区的大气沙尘污染水平,亦探讨了利用辐射测量反演作物群丛几何结构参数及估算作物产量的可能性;研究了我国农业光合生产潜力和气候生产力。

本书可供地理、气候、农业、生态、生物和建筑等方面的科技人员和大专院校有关专业师生参考。

现代地理学的理论与实践

Modern Theoretical and Practical
Studies on Geography Series

地球表层辐射研究

周允华 项月琴 著
左大康 朱志辉 谢冀群

责任编辑 吴三伟

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100707

上海市印刷三厂印刷

江苏省句容排印厂排版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1991年6月第一版 开本: 787×1092 1/16
1991年6月第一次印刷 印张: 29 3/4
印数: 1-1000 字数: 710 000

ISBN 7-03-002615-2/P·525

定价: 25.00 元

《现代地理学的理论与实践》

编辑委员会

主任委员：左大康

委 员：（以姓氏笔画为序）

王 平 左大康 叶舜赞 刘昌明

陆大道 张丕远 郑 度 胡序威

章 申 龚国元 廖 克 谭见安

《现代地理学的理论与实践》序

地球表层是人类生存与活动的唯一场所。随着社会经济的发展,人口的大量增加,生产规模与城市化规模的不断扩大和自然资源的加速开发利用,人类对自然环境的影响越来越大,人类面临的社会经济发展中环境问题愈来愈紧迫,人口、资源、环境之间的矛盾更加尖锐复杂。当今,研究人与自然环境的相互作用,研究它们之间的矛盾,研究不同类型地区人口、资源、环境与社会经济如何协调发展,使社会经济持续稳定协调发展,避免人类赖以生存的环境遭受破坏,这是世界各国共同关注的问题,也是我国亟待研究的课题。当然这些重大问题的研究不只是地理学家的任务。就地理工作者而言,我们可以从“人地系统”及其调控着手进行研究。如研究不同类型地区人地关系的发展过程、现况和存在的问题,研究社会经济发展的不同阶段内人与自然环境协调发展的目标、具体指标与调控措施,以及人口、资源、环境与社会经济协调发展的模式。

当前人类活动正加剧着全球变化的进程,使人类生存环境日趋恶化,国际地圈-生物圈计划(IGBP)正是在这种背景下提出来的。该计划的重点是研究地球系统变化的规律和原因,包括自然的和人为的原因;研究地圈和生物圈相互作用的物理、化学和生物的过程以及人与环境的相互影响,并希望能进行人为调节和预测其变化趋势。

全球变化既受自然过程的制约,又与人类社会经济活动密切相关。我国人口众多,在今后相当长的时间内,人口还会增加,预计人类活动对环境影响的速度和强度还会持续增长。因此,正确估计人类活动对现在和未来环境变化影响的程度以及叠加在自然变化上的幅度,将有重要的意义。为此,地理工作者可以从“人地系统”研究出发,选择若干环境变化的敏感地区,进行多学科的综合研究。其主要研究内容为历史的和现代的环境变化,环境稳定性和变化因素的研究,环境变化中物理、化学和生物过程的研究,以及过程中的物质能量迁移转化研究,某一环境要素的变动所引起的环境变化的研究。此外,还要进行环境变化预测和对策的研究。应用系统分析方法,建立预报模型,并根据对未来环境变化的估计,对社会经济的发展、资源、环境等重大问题提出对策或建议。选择敏感地区进行研究,将对全球环境变化有着预警意义。

在不同的地理环境中有不同的动力过程、不同的物质和能量迁移变化特征。自然地理学可以从地理环境的结构、形成与演变角度研究不同的地域分异规律。人文地理学则可以从资源、能源、自然条件和社会经济条件等方面研究不同地域生产综合体的形成与发展,并根据地域发展的不平衡情况,研究不同的工农业生产布局、城镇布局和生产力的地域组合。区域和区域开发是地理学研究的一个重要领域,也是地理学面向经济建设可以发挥优势的一个场所。我们只要能对区域内自然、社会、经济的全局性问题有深入的研究,对区域发展有决定意义的环节有透彻的了解,就有可能在分析的基础上理论联系实际地做好区域开发的综合研究。

地理学研究的空间范围是地球表层。这个表层是水圈、生物圈、大气圈和岩石圈共同

作用的界面。在这个界面上有各圈层之间的相互联系和相互影响,有内力与外力的共同作用,有无机物与有机物的相互转化。很多自然现象、自然灾害和自然过程,如河床过程、坡面发育、风沙移动、滑坡、泥石流、水循环、化学元素迁移以及气候灾害等,都是在这个多圈层接触的界面上相互作用引起的。因此,要了解这些自然现象和自然灾害的形成、发展和变化,就必须研究在界面上产生这些现象和过程的条件,内因和外因;还必须研究过程进行中物质迁移和能量转换的形式、速度和强度,并揭示出什么临界条件下量变引起质变。只有进行上述的深入研究,才有可能预测自然现象、自然灾害的动态变化过程和可能出现的结果。

自然地理现象的形成与发展是一个多因素相互作用、相互制约的复杂动态过程,要弄清这些复杂的过程,要想得出定量的结论,必须开展地理学的实验研究。

例如,当前地理工作者面临许多国土整治和生产建设中提出的问题(如解决华北地区水资源短缺的对策问题,减少黄土高原土壤侵蚀量的途径问题等),而比较可靠的回答这些问题,必须开展地理学的实验研究。改造自然可以有多种方案,哪种方案在投资上、技术上,在经济效益和环境效益上都可行,也必须经过实验研究。大规模改造自然和重大工程项目的实施,都会对环境产生影响,都将会改变某些环境条件,从而导致其它环境因素发生变化。而研究对环境可能产生的有利和不利影响和防止环境恶化的措施,是“人地系统”研究的重要内容,要准确的回答这些问题,也需要进行综合性的实验研究。

根据研究的对象和内容,地理学的实验研究可以采取野外定位、半定位实验观测,积累系统的资料,为探索自然现象的物理、化学、生物过程及其因果关系提供科学数据,建立地理过程模拟实验室,可以较快地获得地理现象形成发展过程中的各种动态数据。在实验中可以人为地调整参变量,以加深对地理现象的认识和预测其未来的变化。室内的化学分析、物理分析和测年等工作也是地理学实验研究中重要的一个环节。模型是地理环境中系统行为的真实反映,但一定要在弄清地理现象本质和内部机理的基础上,才能建立用数学方程表示的模型。遥感遥测技术和地理信息系统都是深入认识地理现象、地理环境的最佳手段。因此,地理工作者当前面临的任务——需要重视和加强地理学的实验研究。

上述研究内容,有的是中国科学院地理研究所长期从事的研究领域,有的是正在进行的工作,有的是计划开展的研究项目,基本上反映了本所的研究方向和今后研究工作的主要目标。《现代地理学的理论与实践》中的各分册,就是中国科学院地理研究所长期科研工作中有关专题的一部分成果,亦是多年来的研究工作的总结。这些成果大体上反映了我们在这些领域的研究进展。

本书不足之处,敬希读者给予评论,以便我们在今后的工作中能得到改进和提高。

左大康

1990年6月

前 言

太阳辐射是地球能量的主要来源。它是地球表层进行的各种物理过程和生物过程的基本动力。地球上许多自然现象的发生和变化,主要由太阳辐射能的差异、转化和输送所引起。因此,要了解地理环境中各类自然现象的形成、发展和变化过程,就必须对这些过程进行的辐射能量的收支、积累、消耗和转化等方面进行深入的研究。地球表层辐射的研究主要是探讨辐射和地理环境间的关系。

从第一次国际地球物理年开始,我国陆续建立起一批日射观测台站,地表辐射研究也随之开展起来。1960年中国科学院地理研究所气候室成立了辐射气候学科组,对中国地表环境辐射进行了长期研究,30年来发表了论文近150篇。本书是我们多年来研究成果的总结。它系统地介绍了我们在这一领域中的研究成果,当然也反映出一些不足之处。

全书共十二章。第一、二章着重讨论了各类水平下垫面短波辐射、长波辐射和净余辐射的能量收支、计算方法及其时空分布规律;第三章讨论了东亚地区地球行星反射率、逸出辐射、地气系统和大气净辐射的计算方法和分布特征;第四章研究了地表太阳辐射光谱成分的理论计算及其实测结果,并对太阳直接辐射的分光能量测量问题进行了专门讨论;第五章对紫外辐射和光合有效辐射的气候学计算方法与计算结果作了详细的讨论;第六、七章对非水平面天文日照与天文辐射以及典型坡地日照与日射的计算方法和时空分布规律作了详尽的研究;第八章进一步给出了坡面辐射收支各分量的计算模式以及在建筑物理学、地学和生态学中的应用;第九章讨论了冬小麦田的辐射能量收支特点以及其它农田和草地的长波辐射与有效温度;第十章阐述了植物群丛结构、群丛内太阳辐射传输和等温群丛内长波辐射传输模式,并探讨了利用遥感光谱数据估算水稻产量的可能性;第十一、十二章讨论了辐射测量对监测大气污染的途径、方法和效果,以及农业生产的光合潜力和气候生产力。

本书的写作始于1989年。参加写作的有左大康、周允华、项月琴、朱志辉和谢贤群等人。具体分工如下:前言、第三章、第十二章由左大康执笔;第二章第一—四节、第四章、第五章和第九章以及第十章第六节由周允华执笔,第十章第一—五节和第十一章由项月琴执笔,第一章第一—二节、第六章、第七章和第八章由朱志辉执笔,第一章第三节和第二章第五节由谢贤群执笔。

本书欠妥之处,敬希读者批评指正。

作 者

1990年8月

目 录

《现代地理学的理论与实践》序	(v)
前言	(vii)
第一章 水平地表太阳辐射	(1)
第一节 入射到水平地表的总辐射	(1)
一、计算方法	(1)
二、起始参量和控制因子	(7)
三、我国总辐射时空分布	(8)
第二节 入射到水平地表的直接辐射和漫射辐射	(12)
一、计算方法	(12)
二、太阳辐射各分量之间的关系	(15)
第三节 地表反射率的计算和时空分布	(16)
一、地表反射率的计算方法	(16)
二、我国地表反射率的时空分布特征	(21)
第二章 水平地表长波辐射和净余辐射	(26)
第一节 平原地区地面长波辐射的测量和经验计算	(26)
一、长波辐射表的标定和测量误差	(26)
二、北京地区大气逆辐射的经验计算	(30)
三、有效辐射的经验计算	(34)
第二节 青藏高原地面长波辐射的测量和经验计算	(37)
一、青藏高原晴朗天空的大气逆辐射	(37)
二、青藏高原有云天空的大气逆辐射	(41)
三、青藏高原的有效辐射	(45)
四、青藏高原的天空有效温度	(46)
五、对晴天大气逆辐射经验公式的讨论	(49)
第三节 辐射图解的比较	(56)
一、不同辐射图解的计算结果	(56)
二、辐射图解的基础方程和压力、温度效应	(57)
三、水汽和CO ₂ 在光谱重叠区内的热辐射	(58)
四、大气发射率的比较	(60)
第四节 地表净余辐射的计算	(62)
一、中国地区的地表净余辐射	(62)
二、利用卫星云图对青藏高原辐射平衡场的研究	(65)
三、冬季青藏高原地面加热场	(77)
第五节 青藏高原和西太平洋辐射平衡各分量的实测结果	(79)
一、青藏高原地表辐射平衡实测结果	(79)

二、西太平洋洋面辐射平衡实测结果	(92)
第三章 东亚地区地气系统和大气辐射能量收支	(104)
第一节 东亚地区地球行星反射率	(104)
第二节 地面对流层系统逸出辐射	(107)
一、晴天对流层的长波辐射	(108)
二、云天地面对流层系统逸出辐射	(112)
第三节 东亚地区地气系统和大气净余辐射	(116)
第四章 地表太阳辐射光谱成分	(119)
第一节 地表太阳辐射光谱成分的理论计算和实测结果	(119)
一、理想大气条件下的计算结果	(119)
二、浑浊大气条件下的计算结果	(121)
三、光谱辐射的一个简单计算模式	(124)
四、昼光的光谱分布和相关色温的实测结果	(128)
第二节 太阳直接辐射分光能量的测量	(136)
一 仪器精度和滤光片性能	(136)
二、太阳直接辐射的分光测量结果	(141)
三、分光辐射相对通量与气象条件的关系	(147)
第五章 紫外辐射和光合有效辐射的研究	(167)
第一节 紫外辐射的研究	(167)
一、紫外辐射的观测结果	(167)
二、紫外辐射的气候学计算方法	(170)
三、紫外辐射的气候学计算结果	(173)
第二节 光合有效辐射(PAR)的研究	(184)
一、PAR 光谱界限和计量单位的确定	(184)
二、PAR 的测量仪器	(186)
三、PAR 直接辐射能量的测量和计算结果	(189)
四、PAR 散射辐射、总辐射能量的测量和计算结果	(194)
第三节 光量子通量和光气候的研究	(202)
一、光量子通量的测量和计算	(202)
二、光气候研究	(216)
第六章 非水平面天文日照与天文辐射计算	(232)
第一节 日地运动参量的 Fourier 逼近	(232)
第二节 太阳位置方程	(238)
一、入射角方程	(239)
二、平纬和平经方程	(240)
三、特征时角方程	(241)
第三节 极昼极夜分布与坡面日照计算	(242)
一 极昼、极夜的时空分布	(242)
二、坡面日照计算	(245)
第四节 坡面天文辐射计算及其水平面特例	(246)
一、坡面天文辐射计算	(246)

二、水平面天文辐射时空分布	(250)
第七章 典型坡地日照、日射的背景规律	(253)
第一节 恒定日照时间(EID)与恒定日照方位(ESA)	(253)
一、任意倾斜面每日日照时间分布规律的启示	(253)
二、EID 和 ESA 的存在域	(257)
三、EID 和 ESA 的分布特征	(259)
第二节 非水平面天文辐射的全球分布	(260)
一、日值 S_{0i} 的全球分布	(261)
二、月均日值 $\overline{S_{0im}}$ 的全球分布	(264)
三、年均日值 $\overline{S_{0iy}}$ 的全球分布	(269)
第三节 转换因子的计算和分布	(274)
第八章 倾斜面实际辐射的模式研究	(293)
第一节 坡面辐射收支各分量的计算模式	(293)
一、入射到坡面上的直接辐射模式	(293)
二、周围地表对坡面的反射模式	(294)
三、入射到坡面上的天空漫射模式	(295)
四、相应于坡面总辐射和直接辐射的最佳倾角模式	(297)
五、坡面净辐射模式	(299)
六、任意地形辐射场模拟	(300)
第二节 坡面辐射研究的某些应用	(300)
一、在建筑物理学中的应用	(300)
二、倾斜面日射与太阳能系统	(306)
三、坡面辐射研究的地学、生态学意义	(311)
第九章 农田辐射能量收支	(314)
第一节 冬小麦田的辐射能量收支	(314)
一、冬小麦田辐射收支基本特征	(314)
二、冬小麦田净余辐射和总辐射的关系	(320)
三、净余辐射表的测量精度	(328)
第二节 农田向上长波辐射和有效温度	(328)
一、农田和草地长波辐射有效温度	(329)
二、农田和草地的视放射率	(332)
三、作物层温度的基本特性	(335)
第十章 植物群丛结构和辐射传输	(341)
第一节 叶层元素的光学特性和群丛结构	(341)
一、叶层元素的光学特性	(341)
二、群丛结构	(343)
三、群丛结构的测量	(345)
第二节 太阳辐射在植物群丛内的传输	(350)
一、太阳直接辐射在植物群丛内的传输	(350)
二、天空散射辐射在植物群丛内的传输	(354)
三、太阳总辐射在植物群丛内的传输	(356)

第三节 冬小麦群丛几何结构和辐射测量	(358)
一、观测概述	(358)
二、冬小麦群丛几何结构特征分析	(363)
三、总辐射在冬小麦群丛内的分配	(368)
第四节 作物群丛对太阳辐射能的截获和遥感估产	(375)
一、地面实验概况	(376)
二、MIA 地区水稻的叶面积指数轨线	(377)
三、水稻群丛对 PAR 日截获率 I_{PARd} 的模拟计算	(379)
四、从扬花到成熟期内水稻对 PAR 的截获总量和产量的估算	(381)
五、用遥感光谱数据估算叶面积指数 L_0	(382)
六、结论	(385)
第五节 从群丛内太阳直接辐射透过率反演叶面积指数和叶片角度分布	(386)
一、用数值算法反演叶面积指数和叶片角度分布	(386)
二、从一个简易模式推算叶面积指数和视平均叶倾角	(393)
三、水平非连续群丛的反演方法	(399)
第六节 等温群丛的长波辐射传输模式	(414)
一、作物群丛内向下长波辐射的传输	(415)
二、作物群丛内向上长波辐射的传输	(417)
三、群丛内有效辐射和长波净耗损	(418)
四、叶片水平分布和均匀分布的群丛内长波辐射计算结果	(419)
第十一章 辐射测量在大气污染监测中的应用	(428)
第一节 大气浑浊度概念	(428)
一、太阳辐射传输方程	(428)
二、Linke 浑浊因子	(428)
三、Ångström 大气浑浊度参数	(430)
四、Linke 干浑浊因子 D 和湿浑浊因子 W	(433)
第二节 大气浑浊度在大气污染监测中的应用	(434)
一、利用 Linke 浑浊因子研究北京的大气质量的长期变化趋势	(434)
二、利用 Ångström 大气浑浊度参数研究大气沙尘污染	(437)
三、利用 Ångström 大气浑浊度系数研究干旱草原开垦后的土壤风蚀	(441)
四、利用大气浑浊度研究青藏高原地区的大气尘埃负荷	(446)
第十二章 农业生产的光合潜力和气候生产力	(453)
第一节 光能利用率和光合潜力	(453)
一、光能利用率	(453)
二、光合潜力	(456)
三、冬小麦的实际光能利用率和光合潜力指数	(459)
第二节 作物的光温潜力与气候生产力	(460)
一、光温生产潜力	(460)
二、水分订正函数 $\eta_2(W)$ 的确定和气候生产力	(464)
三、光、温、水的评价	(468)

第一章 水平地表太阳辐射

太阳辐射是自然环境中各种物理过程的主要能量来源,是天气、气候形成和演变的基本动力。在研究地表辐射平衡、热量平衡、太阳辐射能的生物转换、光热转换、光电转换、以及自然界的其它许多现象和变化过程时,都必须首先了解太阳辐射状况。按照辐射学术语,到达地表的太阳辐射由太阳直接辐射和天空漫射辐射两部分组成。漫射辐射不仅包括大气中的分子散射和微粒散射,还包括云的反射。但在我国,有时也把漫射辐射称为散射辐射,这属于一种习惯用法,本书不打算取得统一,而是允许交替使用。总辐射(直接辐射与漫射辐射的总和)被地面反射的部分称为反射辐射。由于直接辐射、漫射辐射、总辐射和反射辐射的光谱成分主要在短波区域(波长小于 $4\mu\text{m}$),因此它们都称为短波辐射。以下主要根据我们多年的研究工作,介绍太阳辐射各分量的计算方法和分布规律。

第一节 入射到水平地表的总辐射

一、计算方法

1957 年以前,我国的日射站网尚未建立,只在北京和南京有部分总辐射观测记录。1957 年以后虽然建立了日射站网,但站点数量不多,不能满足分布规律研究和实际应用的需要,仍需采用间接方法进行计算。1962 年以前,我国的总辐射计算大都引用国外公式而未加修正。

左大康等^[1]在 60 年代初根据我国日射站的实测资料最先提出计算我国总辐射的统一公式,首次绘制了具有气候学意义的中国地区年、月总辐射分布图,并对其分布规律进行了详细的分析讨论。他们的公式为

$$Q = Q_0(0.248 + 0.752S_1) \quad (1.1)$$

式中: Q 为总辐射(月值); Q_0 为晴天总辐射(月值),按平原(除青藏高原以外的广大地区)和高原(海拔 2500m 以上地区)分别计算; S_1 为日照百分率。对 26 个台站的验证结果表明,除个别台站外,月总辐射计算值与实测值的偏差(绝对值)小于 10%,年平均偏差(绝对值)小于 5%。这样的精度是比较满意的,因此他们的计算结果和分布图在 1965 年的《中华人民共和国自然地图集》和 1966 年的《中国气候图集》中被正式采纳,并用于有关辐射平衡的研究工作^[2,3]。左大康等^[4]还研究了太阳短波入射各分量之间的关系,其意义在于揭示总辐射的构成规律,并由总辐射计算其两个分量。

在同一时期,萧文俊^[5]以公式(1.1)的形式拟合出我国四大气候区的分区经验系数。

翁笃鸣^[6]在 1964 年提出以下形式的分区经验公式:

$$Q = S_0(a + bS_1) \quad (1.2)$$

式中 S_0 为天文辐射; a, b 为经验系数, 按华南、华中、华北和西北四大区分别给出。H.L. Penman 在 1948 年曾使用(1.2)式的形式, 朱岗昆等在计算中国蒸发时, 曾直接使用 Penman 的原公式。尹宏^[7]在计算中国东部总辐射时, 曾比较过 Penman 公式的精度, 并根据北京和南京的实测资料拟合出经验系数。

殷宗昭曾采用以下 Савинов-Angström 型公式计算中国地区的总辐射,

$$Q = Q_0[1 - (1 - k)n] \quad (1.3)$$

式中 n 为总云量; k 为全天有云时的总辐射与晴天总辐射的比值。殷宗昭等^[8]还讨论了在我国情况下系统 k 的修正。

高国栋、陆渝蓉等在 1976 年和 1978 年提出了与(1.2)式相类似的计算式^[9]:

$$Q = a + bS_0S_1 \quad (1.4)$$

不同之处是对每个辐射测站分别求取 a, b 系数, 然后分冬、夏半年绘制 a, b 系数分布图, 再用内插法确定其它地点的系数。用这种方法得到的系数比分区值更为合理。

王炳忠等^[10]主张采用理想大气总辐射, 其公式为

$$Q = Q_i(a + bS_1) \quad (1.5)$$

式中 Q_i 为理想大气总辐射。他们同时考虑了经验系数 b 与绝对湿度的关系。

以上各种方法大多数在计算公式中只考虑遮蔽因子, 然后用分区或分站的办法进一步考虑大气透明程度的影响, 所以系数 a, b 对于不同的气候区甚至不同的站点具有不同的数值。我们认为^[11, 12], 可以在计算公式中统一考虑遮蔽因子和透明因子的综合影响。把大气的影响表示成多个因子的线性叠加^[11]:

$$Q/S_0 = b_0 + \sum_{i=1}^m b_i x_i \quad (1.6)$$

式中 Q/S_0 为总辐射与天文辐射的比值(依赖于大气的影响); x_i 为第 i 个具有显著影响的因子; b_0, b_i 为经验系数, 共 $m+1$ 个。这样就可利用逐步回归方法筛选出显著因子, 并建立经验公式。

第一阶段筛选的目的是从初步准备的 12 个因子中找出对 Q/S_0 影响显著而又稳定的因子。这 12 个因子分别为: 代表天空遮蔽特征的月平均相对日照和月平均总云量; 代表水汽影响的整层水汽含量和月平均绝对湿度; 代表尘埃影响的每月扬沙、沙暴、浮尘、霾和烟幕日数以及前三项日数之和; 代表与大气影响有关的地理因子高度和纬度。根据筛选结果, 决定采用以下 6 个基本因子:

- x_1 : 海拔高度(km);
- x_2 : 月平均相对日照(以两位小数表示);
- x_3 : 月平均绝对湿度(hPa);
- x_4 : 月平均总云量(成数);
- x_5 : 月的浮尘日数(日数);
- x_6 : 月的烟幕日数(日数)。

现作以下说明:

(1) 以上 6 个基本因子是为总辐射 Q 、直接辐射 S' 和天空漫射辐射 D 的月值计算所共同确定的。单纯对 Q/S_0 的计算而言, 一般只需 3 个基本因子。表 1.1 列出筛选过程中某些因子的相关系数。

(2) 整层水汽含量 W 和月平均绝对湿度 x_3 之间存在着很好的线性关系。从表 1.1 可知,各月相关系数平均为 0.98。在筛选过程中也发现,当二者之一被选入时,完全可用另一个代替而保持几乎同样的显著性。这一特点允许我们用 x_3 代替 W ,因为前者具有更多的可供利用的资料,而且不必计算、使用方便。

(3) 对于影响 Q/S_0 和 S'/S_0 的遮蔽因子而言,日照百分率 x_2 的效果最好,而云量 x_4 的效果较差(见表 1.1)。 x_4 不能以同样的显著性取代 x_2 ,但 x_4 仍可作为显著的辅助因子影响 S'/S_0 和 D/S_0 (见本章第二节)。

表 1.1 几个因子的相关系数 r

月 份	W 与 x_3	Q/S_0 与 x_2	Q/S_0 与 x_4	S'/S_0 与 x_2	S'/S_0 与 x_4	x_2 与 x_4	D/S_0 与 x_4	D/S_0 与 x_5	纬度与 x_3
1	0.97	0.92	-0.85	0.92	-0.85	-0.92	-0.09	0.08	-0.80
2	0.97	0.94	-0.83	0.93	-0.87	-0.91	-0.23	0.43	-0.82
3	0.98	0.92	-0.76	0.90	-0.81	-0.86	-0.25	0.66	-0.80
4	0.99	0.92	-0.75	0.90	-0.84	-0.83	-0.11	0.69	-0.82
5	0.98	0.91	-0.76	0.91	-0.83	-0.83	-0.08	0.63	-0.79
6	0.98	0.90	-0.84	0.91	-0.87	-0.88	0.08	0.50	-0.75
7	0.98	0.79	-0.66	0.88	-0.73	-0.74	0.24	0.48	-0.61
8	0.97	0.78	-0.70	0.88	-0.80	-0.83	0.38	0.39	-0.63
9	0.98	0.85	-0.72	0.86	-0.73	-0.82	0.05	0.56	-0.78
10	0.98	0.94	-0.88	0.92	-0.88	-0.93	-0.13	0.61	-0.83
11	0.99	0.93	-0.84	0.92	-0.88	-0.92	-0.07	0.25	-0.81
12	0.98	0.91	-0.83	0.90	-0.84	-0.91	-0.01	0.18	-0.83
平 均	0.98	0.89	-0.79	0.90	-0.83	-0.87	$\overline{ r }=0.14$	0.46	-0.77

(4) 由于我国还没有浑浊度观测的系统资料,我们用有关的天气日数代替。试验表明,它们已达到了粗略表征大气尘埃状况的预期效果。特别是浮尘日数 x_5 ,它不但稳定地影响各月的直接辐射,而且除个别冬季月份外,对于 D/S_0 也都具有显著影响。烟幕日数 x_6 的影响只在冬季显著。

第二阶段筛选的目的是根据上面选出的 6 个基本因子,用逐步回归方法建立 Q/S_0 的最优表达式,其形式同(1.6)式,式中 $b_1, b_2, \dots, b_6$ 分别为对应于基本因子 $x_1, x_2, \dots, x_6$ 的回归系数, b_0 为常数项。每月的公式系数由表 1.2 给出。可以发现, Q/S_0 的经验公式只包含高度(x_1)、相对日照(x_2)和绝对湿度(x_3)共 3 个因子。水汽的影响在冬、春季节很明显;到了夏、秋季节,因各地的水汽差异幅度变小,所以 x_3 不能作为显著因子进入公式,它的影响由其它系数的变化体现出来。这些公式的拟合情况及其与单因子(x_2)拟合情况的对比由表 1.3 给出,表中 R 为复相关系数, YN = 剩余标准差 $\sigma \times 1000$ 。由表 1.3 可知,引入辅助因子的结果有助于增大 R ,降低 σ ,尤其在 7、8 两月。

表 1.2 给出了适合整个中国大陆的统一的计算公式,克服了分区计算的不便。进一步验证表明,统一公式的计算精度不低于分区公式的精度^[11]。梁国昭^[13]取台北、台南、花莲三站 1970—1974 年各月实测总辐射平均值与表 1.2 所列统一公式的同期计算值比较后认为,用统一公式计算台湾总辐射也是可行的。

表 1.2 计算 Q/S_0 的公式系数*

月份	系数	b_0	b_1	b_2	b_3
1		0.1889	0.02461	0.5909	-0.005296
2		0.1977	0.01957	0.5874	-0.005579
3		0.2218	0.01873	0.5476	-0.005897
4		0.2487	0.01338	0.5173	-0.005289
5		0.2225		0.5843	-0.003681
6		0.1186	0.02130	0.6476	
7		0.1907	0.01811	0.5730	-0.001993
8		0.1018	0.03406	0.6192	
9		0.1343	0.02752	0.5927	
10		0.1142	0.02203	0.6374	
11		0.1292	0.02746	0.6275	
12		0.1986	0.02717	0.5606	-0.003338

* 选入各因子的置信水平为 0.99。

表 1.3 用多因子计算 Q/S_0 , S'/S_0 及 D/S_0 的拟合情况及其与单因子拟合的比较

月 份	Q/S_0				S'/S_0				D/S_0			
	R		YN		R		YN		R		YN	
	多	单	多	单	多	单	多	单	多	单(云)*	多	单
1	0.95	0.92	45	55	0.96	0.92	39	57	0.54	0.09	35	41
2	0.96	0.94	46	55	0.96	0.93	41	50	0.64	0.23	37	47
3	0.95	0.92	43	54	0.94	0.90	38	48	0.80	0.25	35	55
4	0.95	0.92	39	50	0.94	0.90	36	45	0.80	0.11	35	58
5	0.94	0.91	40	47	0.93	0.91	38	42	0.72	0.08	33	47
6	0.92	0.90	44	49	0.94	0.91	39	47	0.60	0.08	30	38
7	0.88	0.79	41	53	0.92	0.88	35	42	0.72	0.24	27	37
8	0.87	0.78	43	55	0.92	0.88	39	45	0.70	0.38	28	36
9	0.90	0.85	44	53	0.91	0.86	39	48	0.63	0.05	31	40
10	0.96	0.94	41	47	0.96	0.92	40	53	0.61	0.13	33	42
11	0.95	0.93	44	51	0.96	0.92	34	50	0.59	0.07	36	44
12	0.94	0.91	46	56	0.96	0.90	37	57	0.58	0.01	35	43
平 均	0.93	0.89	43	52	0.94	0.90	38	49	0.66	0.14	33	44

* 单(云)表示因子为云量。

另外,中国各地的绝对湿度一般随着纬度的升高而减小,尤其在冬、春季节更为明显。由表 1.1 可知,冬半年水汽与纬度之间有良好的线性关系(相关系数超过 -0.80),因此高度和纬度可以概括地反映这些季节大气透明状况的地理分布特征。表 1.4 给出 11 月至 4 月由相对日照(x_2)、高度(x_1)和纬度(x_7 , 以度表示)计算 Q/S_0 的经验公式,其拟合情况也相当好。

烟幕日数(x_6)对 Q/S_0 的影响在冬季的 1 月是显著的,其公式为

$$Q/S_0 = 0.2064 + 0.02015x_1 + 0.5910x_2 - 0.007131x_3 - 0.001188x_6 \quad (1.7)$$

由此可粗略估计 1 月烟幕对总辐射的影响,最多可使 Q/S_0 减少 0.035 左右。

表 1.4 用 x_1, x_2 和 x_7 计算 Q/S_0 的公式系数

月份 系数	b_0	b_1	b_2	b_7	拟合情况	
					R	YN
1	0.07850	0.03041	0.5970	0.002393	0.95	45
2	0.04232	0.03017	0.5569	0.003956	0.96	44
3	0.03120	0.03284	0.5248	0.004393	0.96	40
4	0.03662	0.02956	0.5132	0.004390	0.96	37
11	0.09462	0.02997	0.5939	0.001483	0.95	43
12	0.09807	0.03358	0.5533	0.002382	0.94	44

表 1.2 的统一公式是按月给出的, 公式系数的季节差异定量地体现了中国的季风气候特征对太阳辐射的影响。但我们进一步认为^[12], 引入辅助因子后, 完全可以得到适合于任一月份和任一地点的统一公式, 因为基本因子本身大都具有明显的时空差异, 依靠这些因子的单独作用和联合作用, 有可能较好体现 Q/S_0 的时空变化。于是, 我们在文献[12]中提出以下回归模型:

$$Q/S_0 = b_0 + \sum_{i=1}^m \left(\sum_{j=1}^5 b_{ij} x_i^j + \sum_{k=i+1}^m c_{ik} x_i x_k \right) \quad (1.8)$$

式中 x_i 和 x_k 为第 i 个和第 k 个基本因子 (即根据物理分析和统计筛选得到的对 Q/S_0 有重要贡献的因子), b_0 和 b_{ij} 以及 c_{ik} 为待定系数, m 为基本因子总数。由 (1.8) 式可知, 提供筛选的因子除了基本因子外, 还包含它们的非线性组合, 即每一基本因子的 2 至 5 次项和一次交叉乘积。根据实际资料确定了具有显著影响的因子组合和相应系数之后也就确定了计算公式。

由于 (1.8) 式主要是针对 Q 和 S' 提出的, 所以基本因子中去掉了云量, 而且基本因子的排列顺序也与文献[11]不同, 改为:

x_1 : 月 (或年) 平均相对日照 (以两位小数表示);

x_2 : 海拔高度 (km);

x_3 : 月 (或年) 平均绝对湿度 (hPa);

x_4 : 月 (或年) 的浮尘日数 (月值计算时以每月的相应日数表示, 年值计算时取每年的相应日数除以 12);

x_5 : 月 (或年) 的烟幕日数 (表示法同 x_4)。

根据以上方法得到的计算总辐射 Q 的月值公式为:

$$Q = S_0 (0.160 + 0.612x_1 + 0.0384x_1x_2 - 0.00313x_1x_3 - 0.000469x_2x_3) \quad (1.9)$$

计算 Q 的年值公式为:

$$Q = S_0 (0.191 + 0.579x_1 + 0.0477x_1x_2 - 0.00518x_1x_3 - 0.00198x_2x_3) \quad (1.10)$$

由于这些公式是根据可靠实测资料采用逐步回归方法建立的, 每引入一个因子都要根据置信概率 0.99 (或显著性水平 $\alpha=0.01$) 进行 F 检验, 选入与剔除因子由 F 统计量的临界值 F^* 控制, 当 $F > F^*$ 时方可引入; 同时, 每引入一个新因子后, 还要对已经引入的因子重新逐个检验, 将偏回归平方和变为不显著的因子剔除, 所以凡是引入而未被剔除的变量都是在给定的置信概率条件下显著的。表 1.5 列出建立这些公式时选入变量的种类 (按选入的先后次序), 以及复相关系数 R , R^2 和剩余标准差 σ 的逐步变化情况。由表 1.5 可

知,用公式(1.9)和(1.10)拟合任意月份和全年 Q/S_0 实际值的复相关系数 R 都达到 0.94, 相应的剩余标准差分别为 0.043 和 0.033, 用它们拟合实际资料分别能够解释全部方差的 88% 和 89%。

验证结果表明,用公式(1.9)和(1.10)拟合 1961—1970 年 66 个测站 Q 的累年平均月值和年值的相对误差平均分别为 5% 和 4%^[12]。进一步利用中国 64 个辐射站 1961—1980 年的实测总辐射资料与按公式(1.9)和(1.10)的计算值进行了统计分析,发现 1—12 月计算值与实测值的相关系数分别达到 0.95, 0.95, 0.96, 0.97, 0.97, 0.97, 0.91, 0.91, 0.94, 0.96, 0.96, 0.96, 年值相关系数为 0.95; 相关直线的斜率接近于 1, 1—12 月份分别为 1.00, 1.00, 1.01, 0.99, 0.97, 1.00, 0.98, 1.00, 0.98, 0.95, 0.95, 0.98, 年值为 0.98; 相关直线的截距与样本均值的比值很小, 1—12 月它们的绝对值分别为 0.02, 0.01, 0.03, 0.03, 0.02, 0.01, 0.03, 0.00, 0.01, 0.01, 0.02, 0.00, 年值为 0.01。这些结果再次表明,公式(1.9)和(1.10)具有相当满意的精度,因此可在中国地区广泛采用。

这两个公式的特点是,月值公式(1.9)适用于任一月份和全国任一地点,年值公式(1.10)适用于全国任一地点;而且包含的因子不多,形式简单,不必从图上内插系数,便于模式计算。

表 1.5 公式(1.9)和(1.10)选入因子过程中 R 和 σ 值的变化

公 式 (1.9)				公 式 (1.10)			
选入因子	R	R^2	σ	选入因子	R	R^2	σ
x_1	0.90	0.82	0.054	x_1	0.90	0.81	0.044
x_1x_2	0.93	0.87	0.046	x_1x_2	0.93	0.87	0.035
x_1x_3	0.94	0.88	0.043	x_1x_3	0.94	0.88	0.034
x_2x_3	0.94	0.88	0.043	x_2x_3	0.94	0.89	0.033

青藏高原对大气环流演变有重要影响,其辐射状况也比较特殊。项月琴^[14]曾利用公式(1.5)的形式研究青藏高原 1979 年夏季的总辐射,讨论了经验系数 a, b 的物理含义及其与地面常规气象要素的关系,并选择了以下确定 a, b 系数的经验公式:

$$a = 0.032 - 0.222 \ln(1 - u_1)$$

$$1/b = 1.352 + 0.143 \frac{1}{1 - u_2}$$

上两式中的参数 u_1 和 u_2 分别为

$$u_1 = 0.44S_1 + 0.56n_l/n_t$$

$$u_2 = 0.30S_1 + 0.70n_l/n_t$$

其中 S_1 为日照百分率, n_l/n_t 为低云量与总云量的比值。对青藏高原夏季资料的试验表明,效果较好。

由于青藏高原的日射测站与常规气象测站都很稀少,所以利用卫星云图资料是一条新的途径。项月琴^[15]讨论了利用 TIROS-N 卫星在青藏高原上空白天(地方时 12—15 时)拍摄的可见光云图照片估算地面总辐射的可能性,确定了从卫星照片上获得的高亮度云云量与地面总辐射的关系。在此基础上计算了 $2^\circ \times 2^\circ$ 经纬网格点上的月、旬总辐射,