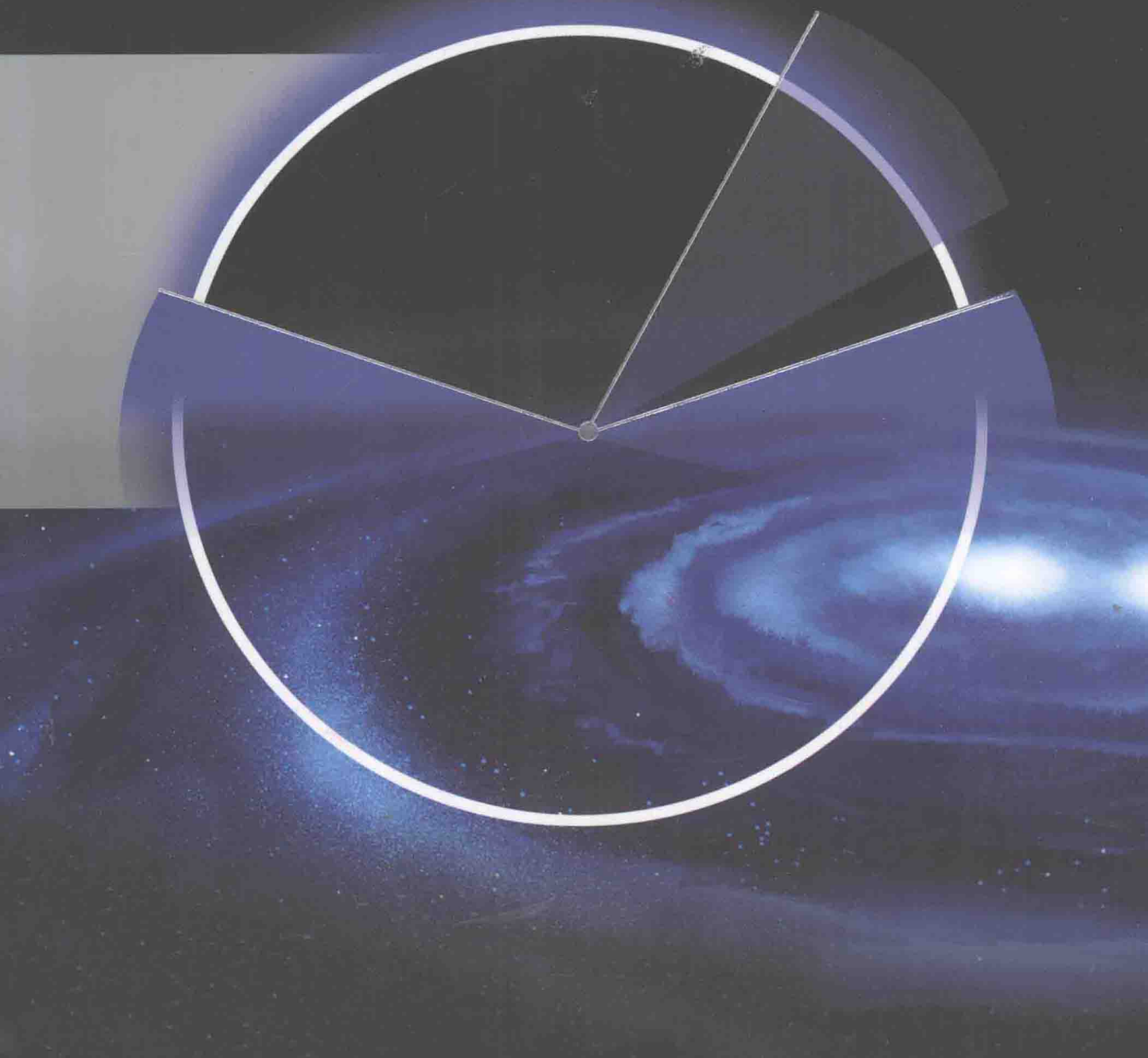


POMIANRIZHAOHETIANWENFUSHEYANJIU

坡面日照 和 天文辐射研究

孙 汉 群 著

河海大学出版社



江苏教育学院出版基金资助出版

坡面日照●天文辐射研究

POMIANRIZHAO

孙汉群/著

TIANWENFUSHEYANJIU

河海大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

坡面日照和天文辐射研究/孙汉群著. —南京: 河海大学出版社, 2005. 5

ISBN 7-5630-2091-8

I. 坡... II. 孙... III. ①日照-关系-地形-研究
②气象-辐射-研究 IV. ①P463.21 ②P422.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 037441 号

内 容 提 要

用数学分析方法系统地研究了坡面日照时间和天文辐射总量的计算方法和分布规律,以及坡面日照时间和天文辐射总量变化规律在太阳能利用和建筑设计等方面的应用。首先,从天球坐标出发重新推求了一组形式简单、几何意义直观的非水平面日出日没时角的计算公式,并修正了坡面日出日没时角的确定规则和方法,提出了简单实用的判别式方法;其次,以坡面特征赤纬为基础,分析和确定了坡面日出日没时角配置关系及其随太阳赤纬、坡向、坡度和纬度变化的规律,得到了计算坡面日照时间的具体计算公式和天文辐射总量的椭圆积分模式,同时分析和计算了坡面日照时间、天文辐射总量随太阳赤纬、坡度、坡向和纬度变化的规律;最后,讨论了任意坡向的最热坡度问题及其在太阳能利用方面的应用、墙面日照和辐射对建筑朝向选择的影响,确定了不同纬度建筑物适宜朝向的范围标准。

本书对从事气象、地理、农林、建筑设计、太阳能利用等方面研究的人员和相关专业的大中专学生具有一定的参考价值。

书 名 / 坡面日照和天文辐射研究

书 号 / ISBN 7-5630-2091-8/P·13

责任编辑 / 史 虹

特约编辑 / 陈吉平 潘 丽

责任校对 / 陈康宁 姚 文

封面设计 / 瀚清堂

出 版 / 河海大学出版社

地 址 / 南京市西康路 1 号(邮编:210098)

电 话 / (025)83737852(总编室) (025)83722833(发行部)

经 销 / 江苏省新华书店

印 刷 / 扬中市印刷有限公司

开 本 / 787 毫米×1092 毫米 1/16 16.5 印张 391 千字

版 次 / 2005 年 5 月第 1 版 2005 年 5 月第 1 次印刷

定 价 / 40.00 元(册)

专家对该书的评价

(一)

本书用数理方法全面系统地研究坡面上的天文日照和天文太阳辐射问题,提出了物理意义明确且使用比较方便的确定坡面上日出日没时角和计算其可照时间的新方法,以及可以适用于全球范围的计算坡面上一年中任何时段天文太阳辐射总量的精确的椭圆积分公式,并从理论上分析研究了坡面上可照时间和天文辐射总量随坡向、坡度、地理纬度和太阳赤纬变化的规律,以及坡面上等日照时间和等日照方位存在的条件、范围和具体计算公式。此外,还研究了不同坡向最热坡度与存在范围,探讨了最热坡度在太阳能利用方面的应用及墙面日照和辐射对建筑物朝向选择的影响,得到不同纬度对天文日照和天文太阳辐射建筑物的适宜朝向范围。

总之,本书涉及坡面日照和天文太阳辐射研究的各个方面,形成了一个较完整的理论体系,对深入了解坡面日照和天文太阳辐射条件形成及分布变化规律,促进相关学科领域的发展,具有重要的理论意义和应用价值,已达到国内外同类工作的先进水平。

南京大学大气科学系博士生导师 傅抱璞教授

2004-10-08

(二)

地形小气候学是一门传统的学科,对农业、能源和建筑等行业的发展有十分重要的作用。坡面辐射则是地形小气候研究中十分重要的课题。由于该领域的研究已有几十年的历史,故遗留下的问题难度相当大。孙汉群同志采用新方法从天球坐标出发,重新推导出了一组形式简单的非水平面日出日没时角的计算公式,修正了他人的坡面日出日没时角的确定规则和方法,提出了简单实用的判别式方法;研究了坡面日出日没时角的各种配置关系应满足的条件,提出了坡面日出日没时角配置关系随太阳赤纬、纬度、坡向和坡度变化的对称性理论。

在上述工作基础上,作者进一步讨论了坡面可照时间随太阳赤纬、纬度、坡向和坡度的变化,得到了许多新的结果,特别是对等日照时间和等日照方位问题的研究,得到了等日照时间和等日照方位存在的条件、范围和具体的计算公式。

作者提出的计算任意时段坡面天文辐射总量的椭圆积分模式,在坡面太阳辐射计算方面是一个创新。该方法具有理论严密、适用范围广的特点,解决了包括高纬度在内的坡面太阳辐射的理论计算问题。

作者还讨论了坡面天文日照和太阳辐射的分布规律在农业、太阳能利用和建筑日照设计等方面的应用,将最热坡度问题推广到任意坡向,并提出了对等辐照方位的概念,对建筑日照设计有重要的参考价值。

综上所述,孙汉群同志对坡面日照和太阳辐射的研究工作,在前人的基础上有一定的发展和创新,已达到国内先进水平。

孙汉群同志对坡面日照和太阳辐射的系统研究,说明作者不仅具有宽广的专业知识,还具有扎实的数理基础以及较强的科研工作能力。

全书结构合理,系统性强,数理推导严密,语言流畅,图文并茂,大量的图表可便于实际应用部门的使用。该书的出版将丰富坡面辐射研究的理论,对气象、地理、农业、建筑和能源等部门的实际应用也有重要的参考价值。特此推荐出版。

南京师范大学地理科学学院博士生导师 林振山教授

2004-09-30



目 录

第一章 绪论	1
参考文献	5
第二章 非水平面上的日出日没时角	7
第一节 非水平面日出日没时角计算公式的比较	7
第二节 天球坐标和球面三角法	9
第三节 新的非水平面日出日没时角的计算公式	10
第四节 非水平面上的极昼极夜问题	16
第五节 太阳赤纬和日地距离的计算	17
参考文献	18
第三章 坡面日出日没时角的确定	19
第一节 坡面日出日没时角的确定规则	19
第二节 确定坡面日出日没时角的判别式方法	27
参考文献	28
第四章 坡面特征太阳赤纬	29
第一节 坡面的第一特征太阳赤纬	29
第二节 坡面的第二特征太阳赤纬	33
第三节 坡面的第三、第四特征太阳赤纬	36
第四节 坡面特征太阳赤纬的相互关系	37
参考文献	38
第五章 坡面日出日没时角的配置关系及其变化规律	39
第一节 坡面日出日没时角的配置关系与条件	39
第二节 坡面日出日没时角的配置关系不随太阳赤纬改变	43
第三节 坡面日出日没时角的配置关系随太阳赤纬的变化及其规律	47
第四节 坡面日出日没时角的配置关系与坡向、坡度	65
第五节 坡面日出日没时角的配置关系与纬度	75
第六节 两次日照的坡面和坡面的两次日照	76
参考文献	82

目 录

第六章 坡面日照时间的计算及其变化规律	83
第一节 坡面日照时间的计算公式	83
第二节 全球坡面日照时间的时空分布及其变化规律	87
第三节 等日照时间和等日照方位的解析研究	137
参考文献	144
第七章 坡面天文辐射总量的计算及其变化规律	145
第一节 坡面天文辐射日总量的计算及其变化规律	145
第二节 坡面天文辐射总量的椭圆积分模式	167
第三节 坡面天文辐射月总量和年总量的纬度分布	175
第四节 坡面天文辐射月总量和年总量的坡向和坡度分布	192
参考文献	229
第八章 坡面天文辐射规律的应用	231
第一节 最热坡度与太阳能利用	231
第二节 对等辐照方位与建筑朝向的选择	248
参考文献	254
附录 主要符号列表	255

第一章 绪 论

坡面日照和太阳辐射的研究具有重要的地学和生态学意义。自然地表形态以复杂多变和尺度不同的起伏为其基本特征。以我国为例,约占国土面积的三分之二是山地(包括丘陵),即使在平原,也存着一定程度倾斜的小丘。自然地表形态的这种起伏特征使得其上的物质和能量的分布和平地具有极大的差异,并由此形成复杂多样的地形小气候条件,而日照和太阳辐射则是其基本的控制因子。对不同坡向、坡度的气候要素而言,太阳辐射的差异可引起温度和湿度的差异,而它们的配合则在很大程度上决定了局地小气候和自然植被的特征,而后者又会对土壤、水文和地貌状况产生一定的影响。因此,坡面日照和太阳辐射的研究对于自然地表土壤—植被—大气系统的物质和能量转换的研究具有重要意义,对于揭示自然生态系统的非地带性规律也具有重要意义。

坡面太阳辐射的研究在农林、建筑设计和太阳能利用等方面也有着广泛的应用。

近年来,随着天气、气候数值模拟和预报模式的不断改进,坡面日照和太阳辐射的研究已应用于地表辐射过程的参数化,对提高天气、气候数值模拟和数值预报精度也具有重要意义。

关于坡面对日照和太阳辐射影响的研究,早在 20 世纪初就已经开始了^[1,2],当时的研究主要是建立在对坡面实际观测的基础上。1954 年,К. Я. Кондратьев^[5]首次给出了坡地上太阳辐射通量的理论计算公式,为坡面辐射问题的研究提供了理论基础。1958 年,傅抱璞^[6]根据这一公式导出了坡面日出日没时角的理论计算公式,并进而给出了确定坡面日出日没时角的一般原则和普遍法则。如果以 ω_{s1} 、 ω_{s2} (设 $\omega_{s2} \geq \omega_{s1}$) 分别表示由坡面日出日没时角的理论公式算出的两个根, $-\omega_0$ 、 ω_0 为水平面上的相应值, $S_{q\theta}$ 为坡面上的太阳辐射通量, ω 为时角,则^[7]:

1. 若当 $\omega_{s1} \leq \omega \leq \omega_{s2}$ 时, $S_{q\theta} \geq 0$, 则坡面上日出时角应用 ω_{s1} 、 $-\omega_0$ 中数值较大的一个来决定,而日没时角应用 ω_{s2} 、 ω_0 中数值较小的一个来决定。

2. 若当 $\omega < \omega_{s1}$ 与 $\omega > \omega_{s2}$ 时, $S_{q\theta} > 0$, 则有以下三种情形:

(1) 若 ω_{s1} 与 ω_{s2} 的绝对值均小于 ω_0 的绝对值,则有两组,一组是 $\omega_1' = -\omega_0$, $\omega_2' = \omega_{s1}$, 另一组是 $\omega_1'' = \omega_{s2}$, $\omega_2'' = \omega_0$ 。这表示坡面有两次日出和日没。

(2) 若 $\omega_{s1} > -\omega_0$, $\omega_{s2} > \omega_0$, 则 $\omega_1 = -\omega_0$, $\omega_2 = \omega_{s1}$; 反之, 若 $\omega_{s1} \leq -\omega_0$, $\omega_{s2} < \omega_0$, 则 $\omega_1 = \omega_{s2}$, $\omega_2 = \omega_0$ 。

(3) 若 $\omega_{s1} < -\omega_0$, $\omega_{s2} \geq \omega_0$, 则 ω_1 、 ω_2 不存在或日出和日没时间正好重合。在这种情况下,坡面实际上全天都不会受到太阳辐射。

3. 若 ω_s 不存在,则有以下两种情况:

(1) 若根据理论计算公式,无论 ω 为何值, $S_{q\theta}$ 均大于零,则表示坡面本身对太阳光线全天无遮蔽或刚好无遮蔽($S_{q\theta} = 0$),所以,坡面上日出日没时角就等于其水平面上的日出日没时角,即 $\omega_1 = -\omega_0$, $\omega_2 = \omega_0$;

(2) 若无论 ω 为何值, $S_{q\theta}$ 均小于零, 则表示太阳全天都处在坡面的后面, 因此坡面上全天都不会受到太阳的辐射。

根据上述原则, 傅抱璞详细分析了北半球在纬度小于 50°N 的范围内各个典型坡面(南坡、东(西)南坡、东(西)坡、东(西)北坡和北坡)上日出日没时角的配置关系及其变化情况, 并进而分析了上述各坡地上可照时间及辐射日总量的变化特征, 提出了最热坡度的概念及相应的计算公式。傅抱璞^[8]还通过泰勒级数展开法推求了适合于中国范围的一定倾角($\alpha < 60^{\circ}$)下坡向偏南的各坡地上在任何时期, 以及坡向偏北的各坡地上在夏半年的辐射总量计算公式, 分析了各个典型坡地上辐射季总量与年总量变化的特征。这一开创性的研究奠定了坡地辐射气候学的基础。

在坡地太阳辐射研究方面, 我国学者做了大量工作。翁笃鸣等^[9]曾利用图解法确定坡地上实际日出日没时角。朱志辉^[10]推求了一组坡地日出日没时角的理论计算公式, 由公式所给出的两个临界时角和太阳由背面转向前面以及相反转变的临界时角之间具有简单的对应关系。孙汉群等^[11]提出了确定坡地上日出日没时角的判别式方法。这些方法都避免了确定规则的繁琐和实际应用的不便。

国外在这方面也进行了若干研究。Liu 等^[12]推求了南向坡面(坡向指向赤道)日出日没时角的理论计算公式, 计算了相应的可照时间和太阳辐射日总量。Penrod^[13]发展了用正交投影和球面三角计算倾斜面(坡面)太阳辐射入射角的方法。Klein^[14]和 Iqbal^[15]提出了一种计算坡地上日出日没时角的理论公式和确定坡面(非水平面)日出日没时角的方法。但是, Klein 和 Iqbal 所推导的公式有一定的局限性, 不能应用于偏北象限的坡地, 在确定方法上也不够完全。特别是文献^[16], 出现了许多混乱和错误。

关于坡面可照时间的研究, 傅抱璞^[17]指出, 赤道东(西)方位坡面上可照时间不随季节变化, 只与坡度有关, 也就是说, 零纬度东(西)朝向的某一坡度上全年可以得到每日都相等的可照时间; 在北半球的南坡上, 对于坡度等于纬度的坡地, 其夏半年的每日可照时间也相等。这一规律在农林、建筑设计和太阳能利用等方面具有重要的应用价值。朱志辉^[18]在研究任意纬度、任意方位和任意倾斜面上可照时间的时空分布规律的基础上发现, 除了赤道之外的其他纬度也存在着坡地可照时间不随季节变化的现象, 全年都具有相同的数值。相应的可照时间和坡向称为等日照时间和等日照方位。但是, 文献^[18]对于等日照时间和等日照方位的更一般的规律(如等日照时间和等日照方位应满足的条件)缺乏相应的研究。

关于坡地上太阳辐射总量的研究, 一般都限于 60°N 以南^[19,20], 而朱志辉^[21,22]曾经用精确累加法把坡地上各时段天文辐射总量的计算扩展到任意纬度, 得到了全球范围坡地太阳辐射总量时空分布规律的系统图像, 并指出: 各方位的天文辐射日总量具有向极收敛性; 南、北半球具有近似对称性, 各方位的月总量也具有向极收敛性和南北半球的近似对称性; 东西向的铅直面, 全年的太阳辐射总量不随纬度变化, 各纬度具有相同的数值。这些规律的发现, 对理论和实际应用来说, 均具有重要意义。

关于相对于太阳辐射总量的最热坡度研究, 傅抱璞所给出的计算公式最具普遍意义, 其他的研究都以这些公式为基础。李怀瑾等^[23]计算和分析了我国最佳倾斜面上日射时总量和日总量的分布特征, 左大康等^[24]得到了南向坡面上相对于坡面直接辐射月平均日总量的最热坡度(最佳倾角)公式和相对于坡面总辐射月平均日总量的最热坡度公式。一般情况下的最热坡度(最佳倾角)只能通过计算得到^[25,26]。

坡面上实际直达太阳辐射的计算,基本上是通过转换因子将水平面上的相应数值转换到坡面上。文献[14,15]中转换因子是用特征赤纬法计算的,特征法在某些情况下很不准确,另外,这些文献中也只是给出坡向面向赤道(单方位)方向的坡面转换因子。文献[19]给出了坡地方位在 $0^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 之间三个纬度的转换因子分布图。李怀瑾等^[27]计算了某些特定日期的转换因子,扩展了方位和倾角的范围,但只给出了南向四个坡度的分布图。文献[24]应用精确累计法计算全球范围内各倾角和各方位每月的转换因子,这种转换因子能够真正代表转换因子的月值,避免了特征赤纬法的缺点,因此不受纬度、坡度和方位的限制。

关于坡地太阳辐射规律在农林、建筑设计和太阳能利用等方面的应用,也有许多研究。翁笃鸣^[28]对农田可照条件作了分析,朱志辉^[29,31]对上海、郑州等城市墙面日照和太阳辐射的变化及其规律作了分析,卜毅^[32]对建筑日照的设计问题作了有益的探讨。最佳倾角模式在太阳能利用方面具有重要意义。例如,李克煌^[33]按最佳倾角模式设计的开封市太阳能采暖降湿热风系统,可使全年获得的太阳辐射量比水平面上的多得多。

综观坡度太阳辐射研究,可以看出,坡地上日出日没时角的确定是这一问题的关键,其他的研究都以此为基础。但是,现有的计算坡地上日出日没时角的理论公式和确定方法都存在着一定的局限性。首先,现有的计算坡地上日出日没时角的理论公式都是根据康德拉捷夫关于坡地上太阳辐射量的公式导出的,形式比较复杂,几何意义也不直观^[34];其次,现有的确定坡地上日出日没时角的方法规则比较繁琐,在实际应用中容易产生混乱和错误,而图解法又没有相应的表达式,不便于讨论一般规律。现有的确定方法也只能确定某一天的日出日没时角配置关系,坡地上全年的日出日没时角的配置关系不能预先确定(特殊的坡向除外),因此任意纬度、任意坡地日出日没时角的配置关系和相应的可照时间和辐射总量的计算没有固定的表达式,也不能根据坡面参数和太阳赤纬来预先确定坡地上可照时间和辐射量的变化规律。特别是任意纬度、任意坡地太阳辐射总量的计算,只能根据逐日累加方法来进行。这对于进一步的理论研究和实际应用来说,是不便的。另外,还存在着和确定规则相例外的情形:如果由理论计算公式求得的两个时角都落在水平面的两个时角的同一侧,则坡地上的日出日没时角不能根据相应的规则确定,否则将得到错误的结论。

计算机的应用为坡面日出日没时角的确定、坡面可照时间和天文辐射总量的计算提供了非常有力的工具,根据计算结果也能在一定程度上分析坡面可照时间和天文辐射总量的分布和变化规律。但是,由于坡面可照时间和天文辐射总量涉及的因素很多,仅仅根据计算结果很难确定它们之间的相互关系和内在联系,也很难得到反映这种关系的解析表达式。而且,由于受计算方法、计算能力和计算误差等方面的影响,计算结果的正确性、全面性、可靠性以及根据计算结果的分析而得出的规律性,还需要从理论上加以严格的证明,或者需要给出这种规律性的解析表达式,以方便实际应用。

有鉴于此,本书根据天球坐标的基本关系重新推求了非水平面上的太阳高度角(或天顶距)公式及非水平面上的日出日没时角公式^[35]。这些公式所给出的日出日没时角和太阳由背面转向前面以及相反转变的临界时角之间具有简单的对应关系,因而坡地上日出日没时角的确定就变得非常简单:只要根据水平面和非水平面上日出日没时角的大小关系按照水平面和非水平面都有日照(在 $-\omega_0$ 和 ω_0 之间, $\sin h_{q0} > 0$)的原则即可确定($\sin h_{q0} > 0$ 的条件可根据 ω_{s1} 、 ω_{s2} 的大小关系来确定。一般情况下,如果 $\omega_{s1} \leq \omega_{s2}$,则在

$\omega_{s1} \leq \omega \leq \omega_{s2}$ 之间, $\sin h_{q2} \geq 0$; 反之, 则有 $\sin h_{q2} < 0$ 。

日照时间和太阳辐射总量的计算, 只有当坡地上全年的日出和日没时角的配置关系能够预先确定之后才是容易的。为进一步分析坡地上日出日没时角的配置关系及其随时间的变化, 本书提出了坡地特征赤纬的概念, 特别是坡地的第二特征赤纬, 是坡地上的日出日没时角的配置关系发生转变的临界赤纬。第二特征赤纬成对出现且具有对称性, 它们只是坡向和纬度的函数, 与坡度无关, 对于相同的纬度和坡向, 不管其坡度如何, 都具有相同的第二特征赤纬, 因而其日出日没时角的配置关系发生变化的时间都相同。

对坡地上日出日没时角的配置关系及其变化的研究发现, 存在三类不同的情况: 第一类, 坡地上的日出日没时角配置关系全年不变, 具有单一形式, 出现这一情况的条件是 $|\sin \beta \cos \varphi| > \sin 23.5^\circ$; 第二类, 南、北坡地上的情形, 以春秋分为分界, 冬夏半年的时角配置具有不同的形式; 第三类, 以两个第二特征赤纬为分界, 在两个第二特征赤纬之间和两个第二特征赤纬的外侧时角的配置关系分别具有不同的形式。第二类情况可看作第三类情况下第二特征赤纬为零的特例。第二、三类情况的条件是 $|\sin \beta \cos \varphi| \leq \sin 23.5^\circ$ 。研究第一类情况下时角的配置关系和第二、三类情况下时角的配置关系及其变化规律, 可确定不同时角配置关系及其变化情况下应满足的条件。根据这一条件可以确定坡地上全年的日出日没时角配置关系及其变化情况, 为坡地上日照时间和太阳辐射总量的计算提供更为一般的方法。

根据坡地上日出日没时角的配置关系及其变化规律, 可以从理论上确定日照时间的年变化规律。文献[36]根据这一规律研究了坡地上的等日照时间和等日照方位问题, 揭示了出现等日照时间和等日照方位的纬度、坡度和坡向之间的数学关系 $\tan \varphi (1 + \cos \alpha) = \cos \beta \sin \alpha$, 确定了等日照时间和等日照方位的范围, 得到了等日照时间的具体计算公式。文献[36]还分析了一段时间的等日照现象, 揭示了它们的数学关系和范围。

根据坡地上日出日没时角的配置关系及其变化规律, 计算任意纬度、任意方位和任意坡度的坡地在任意时段太阳辐射总量的问题, 可归结为求相应的椭圆积分问题。椭圆积分模式是一种在理论上比较严密的计算方法, 根据椭圆积分模式, 坡地太阳辐射总量的分布规律可得到相应的证明^[37]。

本书提出的非水平面上日出日没时角的理论计算公式和坡地上日出日没时角的确定方法, 特别是对坡地上日出日没时角配置关系及其变化规律的研究, 为坡地日照时间和太阳辐射总量的理论分析、计算和实际应用提供了更为有效的方法。如果说过去的研究基本上是以大量的实际计算为基础来揭示坡地太阳辐射的规律性, 那么本书则完全是从理论上(通过数学分析的手段)来分析和揭示坡地太阳辐射的规律, 这种规律可以用一定的公式或方程来表示。本书通过对等日照时间和等日照方位的研究得到了等日照时间和等日照方位的纬度、坡度和坡向之间的数学关系, 以及等日照时间和等日照方位的存在域, 从而将这一问题的研究提高到一个新的理论高度。书中提出的计算任意时段坡面天文辐射总量的椭圆积分模式为分析和计算坡面太阳辐射总量及其变化规律提供了有效的途径, 具有重要的理论意义和实际应用价值。

本书还讨论了坡面辐射规律在建筑设计和太阳能利用等方面的应用问题^[38~40]。

本书讨论的是无地表障碍和无天空遮蔽情况下坡面的太阳辐射问题, 实际情况是相当复杂的, 因此需要根据相应的地形遮蔽程度和大气对太阳辐射的衰减作用进行相应的

处理^[41~43]。但是,实际情况下的太阳辐射以天文辐射为基础,天文辐射的时空分布规律基本上反映了实际太阳辐射的时空分布规律。

参考文献

- [1] Kimball H H, Hand I F. Daylight illumination on horizontal vertical and sloping surfaces. *Monthly Weather Review*, 1922, 50: 615~628
- [2] Pers M R. Calcul du flux d'insolation sur une facade en pente. *LaMét*, 1935, (11): 429~435
- [3] Городов А Н. Расчет прямой радиации на различно ориентированные наклонные поверхности для широты 42° Материалы по ароклим. Районир. суброии СССР, 1938, (2)
- [4] 大后美保. 农业气象の研究. 东京: 共立出版株式会社, 1948
- [5] Кондратьев К Я. Лучистая энергия солнца. Москва: Гидрометеониздат Изд, 1954
- [6] 傅抱璞. 坡地对日照和太阳辐射的影响. *南京大学学报(自然科学版)*, 1958, (2): 23~46
- [7] 傅抱璞. 山地气候. 北京: 科学出版社, 1983
- [8] 傅抱璞. 论坡地上的太阳辐射总量. *南京大学学报(自然科学版)*, 1958, (2): 47~82
- [9] 翁笃鸣, 陈万隆, 沈觉成, 等. 小气候和农田小气候. 北京: 农业出版社, 1981. 115~116
- [10] 朱志辉. 等日照时间和等日照方位. *中国科学(B辑)*, 1987, (12): 1340~1347
- [11] 孙汉群, 傅抱璞, 于强. 关于坡地上的日出日没时角问题. *南京大学学报(自然科学版)*, 1993, 29(地学专集): 154~157
- [12] Liu B Y H, Jordan R C. Daily insolation on surfaces tilted toward the equator. *ASHRAEJ*, 1961, 3(10): 53~59
- [13] Penrod E B. Solar load analysis by use of orthographic projections and spherical trigonometry. *Solar Energy*, 1964, 8(4): 127~133
- [14] Klein S A. Calculation of monthly average insolation on tilted surfaces. *Solar Energy*, 1977, 19(4): 325~329
- [15] Iqbal M. An introduction to solar radiation. Canada: Academic Press, 1983
- [16] Marcus T A, Morris E N. Buildings, climate and energy. London: Pitman Publishing Limited, 1980. 262~2667
- [17] Fuh Baw-puh. The influence of slope on sunniness. *Scientia Sinica*. 1959, 8(7): 700~726
- [18] Zhu Zhi-hui. Equal insolation-duration(EID) and equal-sunshine azimuth(ESA). *Scientia Sinica (Series B)*, 1988, 31(8): 984~993
- [19] Nichalls R L, Child T N. Solar radiation charts. *Solar Energy*, 1978, 22: 91~97

- [20] Frolich C, Brusa R W. Solar radiation and its variation in time. *Sol Phys*, 1981, 74:209~215
- [21] 朱志辉. 非水平面天文辐射的全球分布. *中国科学(B辑)*, 1988, (10):1100~1110
- [22] Zhu Zhi-hui. Glohal distribution of extra-terrestrial irradiation on no-horizontal surfaces. *Science in China (Series B)*, 1989, 32(6):757~768
- [23] 李怀瑾, 朱超群. 我国最佳倾斜面上日射时总量和日总量分布特征. *南京大学学报(自然科学版)*, 1982, (2):550~561
- [24] 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
- [25] 朱志辉. 广州倾斜面太阳辐射的气候学研究. *热带地理*, 1987, 7(2):99~107
- [26] 朱志辉. 长春市倾斜面太阳辐射特征. *地理科学*, 1989, 9(1):43~50
- [27] 李怀瑾, 施永年. 非水平面上日射强度和日射日总量的计算方法. *地理学报*, 1981, 36(1):79~89
- [28] 翁笃鸣. 农田可照条件的理论分析. *气象科学*, 1982, (1,2):73~88
- [29] 朱志辉. 墙面太阳辐射的理论计算与模式估计. *地理学报*, 1987, 42(1):28~41
- [30] 朱志辉. 坡地辐射场研究及其地理学应用. *地理研究*, 1989, 8(2):91~100
- [31] 朱志辉. 郑州墙面太阳辐射的气候学研究. *河南大学学报(自然科学版)*, 1987, (1):75~80
- [32] 卜毅. 建筑日照设计. 北京: 中国建筑工业出版社, 1988
- [33] 李克煌. 气候资源学. 开封: 河南大学出版社, 1990
- [34] 翁笃鸣, 罗哲贤. 山区地形气候. 北京: 气象出版社, 1990
- [35] 陆瑜蓉, 高国栋. 物理气候学. 北京: 气象出版社, 1987
- [36] 孙汉群, 傅抱璞. 等日照时间和等日照方位的解析研究. *地理学报*, 1997, 52(5):412~420
- [37] 孙汉群, 傅抱璞. 坡面天文辐射总量的椭圆积分模式. *地理学报*, 1996, 51(6):559~566
- [38] 孙汉群, 傅抱璞. 对等辐照方位与建筑朝向的选择. *地理学报*, 1999, 54(1):83~89
- [39] 孙汉群. 任意坡向辐射日总量最热坡度的解析研究. *南京大学学报(自然科学版)*, 2003, 39(6):781~787
- [40] 于强, 傅抱璞, 彭乃志, 等. 辐射日总量的最热坡度解析模式及其全球分布规律. *地理学报*, 1994, 49(6):526~532
- [41] 傅抱璞, 虞静明, 卢其尧. 山地气候资源与开发利用. 南京: 南京大学出版社, 1996
- [42] 吉野正敏. 局地气候原理. 南宁: 广西科学技术出版社, 1989
- [43] 潘守文. 小气候考察的理论基础及其应用. 北京: 气象出版社, 1989
- [44] 孙汉群. 坡面太阳辐射研究评述. *江苏教育学院学报(自然科学版)*, 1999, 16(1):15~19
- [45] 曾燕, 邱新法, 缪启龙, 等. 起伏地形下我国可照时间的空间分布. *自然科学进展*, 2003, 13(5):545~548
- [46] Li Zhan-qing, Weng Du-ming. A computer model for calculating the duration of sunshine in mountainous areas. *Chinese Science Bulletin*, 1988, 33: 1624~1629

第二章 非水平面上的日出日没时角

第一节 非水平面日出日没时角计算公式的比较

非水平面上的日出日没时角或称倾斜面上的日出日没时角,是指在不考虑水平面对太阳光线的遮蔽情况下,以一定倾角和方位与水平面相交的非水平面(倾斜面)上所具有的日出日没时角。非水平面上日出日没时角的确定是山地气候学中的一个基本问题,对坡面日出日没时角的确定和坡面日照时间及太阳辐射总量的计算具有重要意义。

长期以来,非水平面上的日出日没时角的理论计算公式都是由非水平面上的太阳高度角公式或太阳天顶距公式^[1]求得的。非水平面上的太阳高度角公式和天顶距公式^[2,3]可以表示成

$$\sin h_{\varphi} = u \sin \delta + v \cos \delta \cos \omega + w \cos \delta \sin \omega \quad (2-1)$$

$$\cos \theta = u \sin \delta + v \cos \delta \cos \omega + w \cos \delta \sin \omega \quad (2-2)$$

式中: h_{φ} 为非水平面上的太阳高度角; θ 为太阳的天顶距; δ 为太阳赤纬; ω 为时角; u 、 v 、 w 为与非水平面(坡面)所在的纬度 φ 、坡度 α 和坡向 β ($\beta \in [-\pi, \pi]$,以正南方为 0° ,向西为正,向东为负)有关的参数。 u 、 v 、 w 与纬度 φ 、坡度 α 和坡向 β 的关系为

$$u = \sin \varphi \cos \alpha - \cos \varphi \sin \alpha \cos \beta \quad (2-3)$$

$$v = \cos \varphi \cos \alpha + \sin \varphi \sin \alpha \cos \beta \quad (2-4)$$

$$w = \sin \alpha \sin \beta \quad (2-5)$$

只要令式(2-1)中或式(2-2)中的左边等于零,即可得到非水平面上日出日没时角的理论公式。傅抱璞^[2,3]推求了非水平面上的日出日没时角的理论公式,得到

$$\omega_s = \arccos \left[\frac{-u \tan \delta \pm w \sqrt{1-u^2(1+\tan^2 \delta)}}{1-u^2} \right] \quad (2-6)$$

$$\omega_s = \arcsin \left[\frac{-u \tan \delta \mp v \sqrt{1-u^2(1+\tan^2 \delta)}}{1-u^2} \right] \quad (2-7)$$

式(2-6)和式(2-7)分别用来确定两个根的绝对值和符号。 ω_s 就是非水平面上的日出或日没时角。

朱志辉^[4]也推求了非水平面上的日出日没时角的理论公式,得到

$$\omega_s = 2 \arctan \left[\frac{-w \cos \delta \pm \sqrt{(w^2 + v^2) \cos^2 \delta - u^2 \sin^2 \delta}}{u \sin \delta - v \cos \delta} \right] \quad (2-8)$$

而 Klein^[5]和 Iqbal^[6]的计算公式为

$$\omega_s = \arccos \left[\frac{-AB \pm \sqrt{A^2 - B^2 + 1}}{A^2 + 1} \right] \quad (2-9)$$

式中 A 和 B 分别为

$$A = \frac{\cos \varphi}{\sin \beta \tan \alpha} + \frac{\sin \varphi}{\tan \beta} \quad (2-10)$$

$$B = \tan \delta \left(\frac{\sin \varphi}{\sin \beta \tan \alpha} + \frac{\cos \varphi}{\tan \beta} \right) \quad (2-11)$$

傅抱璞等^[7]还将非水平面上的日出日没时角的理论计算公式表示为

$$\omega_s = 2 \arctan \left[\frac{w \pm \sqrt{\Delta}}{v - u \tan \delta} \right] \quad (2-12)$$

其中 $\Delta = w^2 + v^2 - u^2 \tan^2 \delta$ 。式(2-12)和式(2-8)是一致的。

上述关于非水平面上的日出日没时角的理论公式都由非水平面上的太阳高度角公式或天顶距公式经过一定的数学处理推导而来,均可用于非水平面上的日出日没时角的计算。

虽然式(2-6)~式(2-9)形式上比较复杂,但计算过程比较简单,即都是通过中间参数 u, v, w 或 A, B 来计算非水平面上的日出日没时角的。正如文献[2]所指出的那样,式(2-8)的另外一个优点就是它的两个值和太阳由背面转向前面以及相反转变的临界时角之间具有固定的关系。但文献[2]只是通过大量的计算来说明这一特点,而没有从理论上加以证明。

水平面上日出日没时角的情况比较简单,日出时角为负,日没时角为正。而非水平面上的日出日没时角的情况比较复杂,日出时角和日没时角可能都为正值或都为负值,在根据理论计算公式计算非水平面上的日出日没时角时,既要确定它们的值,又要确定它们的符号。在这方面,式(2-8)比较明确,计算时可以同时确定非水平面上日出日没时角的数值和符号。

但是,这三组公式都存在物理意义和几何意义不直观的缺点。特别是这三组公式都有可能发生复数解的情况,需要单独考虑。

利用三角函数关系 $\sec^2 \delta = 1 + \tan^2 \delta$ 和 $\sec \delta = 1 / \cos \delta$,可将式(2-6)和式(2-7)简化为

$$\omega_s = \arccos \left[\frac{-uv \sin \delta \pm w \sqrt{\cos^2 \delta - u^2}}{\cos \delta (1 - u^2)} \right] \quad (2-13)$$

$$\omega_s = \arcsin \left[\frac{-uv \sin \delta \mp v \sqrt{\cos^2 \delta - u^2}}{\cos \delta (1 - u^2)} \right] \quad (2-14)$$

上述两式根号中均为 $\cos^2 \delta - u^2$,因此容易判断 ω_s 存在的条件。如果把 u 当成正弦三角函数的值来处理,当其对应的角度小于或等于 $\pi/2 - \delta$ 时,才能从式(2-6)和式(2-7)或上述公式中求出 ω_s 。

利用 $u^2 + v^2 + w^2 = 1$ ^[2],可将式(2-8)简化为

$$\omega_s = 2 \arctan \left[\frac{-w \cos \delta \pm \sqrt{\cos^2 \delta - u^2}}{u \sin \delta - v \cos \delta} \right] \quad (2-15)$$

因此 ω_s 存在的条件和式(2-6)、式(2-7)一致。

确定非水平面上日出日没时角公式中哪一个时角是太阳由背面转向前面的临界时角以及相反转变的临界时角具有重要意义,它可以使得坡地上日出日没时角的确定变得较为容易,避免了判别规则的烦琐和实际运用的混乱。

但是,仅仅知道了非水平面上日出日没时角中哪一个是由背面转向前面的临界时角以及相反转变的临界时角还不够,只有知道了非水平面上太阳高度角的正弦曲线的开口方向,坡地上日出日没时角的确定问题才会迎刃而解。

非水平面上日出日没时角理论计算公式的复杂性使得坡地上可照时间和天文辐射总量的计算变得困难。例如,坡地上太阳辐射总量的计算只能采用逐日累加法和泰勒展开法。

鉴于现有非水平面上日出日没时角计算的理论公式存在几何意义不直观、形式复杂、不便于讨论坡地上太阳辐射规律等缺点,本书从天球坐标出发来重新推求非水平面上的日出日没时角公式。所得结果表明,这一公式不仅可以克服上述公式的缺点,而且也能为坡地太阳辐射问题的研究提供了一种有用的工具。

第二节 天球坐标和球面三角法

为了推求新的非水平面上的日出日没时角公式,有必要了解天球和天球坐标的知识。

假定地球不动,处在原点位置,宇宙中各个天体围绕着地球在一个球面上运动,这个假想的以地球的球心为球心、以任意半径为半径的球体称为天球(地心天球),如图2-1和图2-2所示。

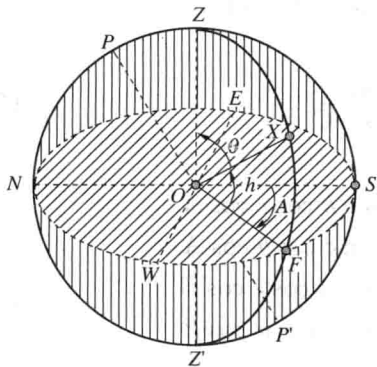


图 2-1 地平坐标系:高度和方位

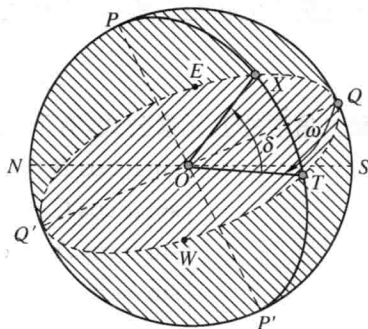


图 2-2 第一赤道坐标系:时角和赤纬

如图2-1所示,以观测者在地球上的位置为标准,通过观测者和地心 O 的连线向上与天球相交之点称为天顶 Z ,向下与天球相交之点称为天底 Z' , ZOZ' 称为天顶轴,与天顶轴垂直的平面 $ESWN$ (东南西北四正点所在的平面)称为地平面,地平面与天球相截形成的大圆称为地平圈。通过 O 点延长地轴与天球相交于 P 、 P' 两点,与地球北极对应的点 P 为北天极,与地球南极对应的为南天极 P' , POP' 为天轴。如图2-2所示,与天轴垂直的面 $EQWQ'$ 称为天赤道面。通过天极、天顶在天球上所截的大圆称为子午圈,其面称

为天子午面。子午面与地平面相垂直。子午圈与地平圈相交于 S 和 N 点,分别称为南点和北点。观测者面向北方,距南点 90° 之点叫东点 E ,与东点相对的点称为西点 W 。

假如天体位置在天球 X 点处,通过天顶 Z 、天底 Z' 和天体 X 作一大圆(地平经圈)与地平圈相交于 F ,则天体与地平面的张角 $\angle XOF$,称为天体的高度角 h ,而天体与天顶的张角 $\angle XOZ$ 称为天顶距 θ 。南点 S 、球心 O 和天体所在的地平经圈与地平圈交点 F 所形成的夹角 $\angle SOF$,称为方位角 A ,南点 $A=0^\circ$,向西为正,向东为负。

垂直于天赤道的大圆称为赤经圈,也叫时圈。时圈和天赤道相交于 T 点。子午圈和天体时圈在天极的张角称为时角,用 ω 表示。时角的度量以和天子午圈与天赤道南面的交点 Q (上点)为起点,向西为正,向东为负,所以正午时的时角为 0 。时角可以用天赤道上的弧 QT 来表示,也可以用 $\angle QOT$ 来表示。天体与天赤道之间的夹角 $\angle TOX$ 称为赤纬 δ 。赤纬从天赤道算起,在天赤道上 $\delta=0$,向北天极为正,向南天极为负。赤纬 δ 的大小也可以用时圈上的弧 TX 来表示。而天体到天极的张角,称为天极距 P 。如图 2-2 所示。

根据天球和天球坐标,可以得到水平面上和非水平面上的太阳高度角公式以及相应的日出日没时角公式。由此得到的非水平面上的相应公式和水平面上的公式是统一的。

球面中由大圆构成的三角形的边和角具有一定的制约关系。设球面三角形的三个顶点和顶角分别为 A 、 B 、 C ,三个对边分别为 a 、 b 、 c ,如图 2-3 所示。根据球面三角形的余弦公式,有下列关系:

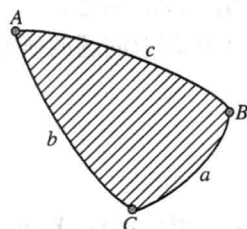


图 2-3 球面三角形

$$\begin{cases} \cos a = \cos b \cos c + \sin b \sin c \cos A \\ \cos b = \cos a \cos c + \sin a \sin c \cos B \\ \cos c = \cos a \cos b + \sin a \sin b \cos C \end{cases} \quad (2-16)$$

根据球面三角形的正弦公式,有下列关系:

$$\frac{\sin a}{\sin A} = \frac{\sin b}{\sin B} = \frac{\sin c}{\sin C} \quad (2-17)$$

根据球面三角形的五元素公式,有下列关系:

$$\begin{cases} \sin a \cos B = \cos b \sin c + \sin b \cos c \cos A \\ \sin a \cos C = \cos c \sin b + \sin c \cos b \cos A \\ \sin b \cos A = \cos a \sin c + \sin a \cos c \cos B \\ \sin b \cos C = \cos c \sin a + \sin c \cos a \cos B \\ \sin c \cos A = \cos a \sin b + \sin a \cos b \cos C \\ \sin c \cos B = \cos b \sin a + \sin b \cos a \cos C \end{cases} \quad (2-18)$$

第三节 新的非水平面日出日没时角的计算公式

在天球坐标系中,坡面是非水平面。如图 2-4 所示,坡度为 α 、坡向为 β (坡面的法线