

All - Glass Evacuated Collector Tubes GB/T 17049-1997

全玻璃 真空太阳集热管

殷志强 编著



学出版社

TK513.3
Y68

427393

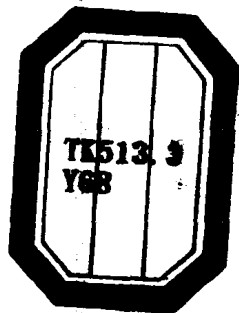
全玻璃真空太阳集热管

All-Glass Evacuated Collector Tubes

殷志强 编著



004273-3



科学出版社

1998

内 容 简 介

太阳能是 21 世纪占重要地位的能源。太阳光-热的转换效率高,应用广泛和需求量大。全玻璃真空太阳集热管是高效太阳集热器的主要部件,涉及能效薄膜、真空技术、玻璃材料和工程热物理等领域。

本书介绍了太阳能资源;全玻璃真空太阳集热管用玻璃、太阳选择性吸收表面和集热管内真空度;全玻璃真空太阳集热管的构造、工艺与它的光-热参数和检测方法,以及它的耐热与机械性能等。

本书可供能源研究与开发的科技、生产、检测工作者和大专院校有关专业的学生、研究生和老师参考。

图书在版编目(CIP)数据

全玻璃真空太阳集热管/殷志强编著. -北京:科学出版社,
1998.4

ISBN 7-03-006587-5

I. 全… II. 殷… III. 玻璃结构—真空—太阳集热器
IV. TK513.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 05133 号

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100071

北京双青印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1998 年 3 月第 一 版 开本: 850×1168 1/32

1998 年 3 月第一次印刷 印张: 6

印数: 1—3000 字数: 18 000

定价: 18.00 元

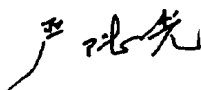
序

太阳能对人类是用之不竭，取之不尽的广泛存在、平等给予和可自由利用的能源，但太阳辐射功率密度低，还受阴、晴、昼夜和季节等影响。太阳能与常规能源结合，“多能互补”，晴朗天气太阳是主能源，这样，既可以节省常规能源，又可减少对环境的污染。

太阳能利用是一个综合性很强的学科。在太阳光-热转换，应用很广的是平板太阳集热器和真空管太阳集热器。真空管太阳集热器热损失小，将太阳光高效率地转换为热能，产生生活用的热水，以及采暖、干燥、制冷与海水淡化等多方面的应用。

20年来，清华大学殷志强教授等对全玻璃真空管太阳集热器的研究、开发、并转化为产品方面作了不懈努力。科学研究水平与产品质量和数量方面在国内、外享有良好的声誉。

本书介绍了全玻璃真空太阳集热管的原理、能效薄膜、材料科学和真空技术的基本理论与实践。提出了表示集热管光-热性能新的空晒性能参数，以及光-热性能参数之间的合理关系，有关的光-热性能测试技术与方法，将读者带到了太阳光-热转换的科学技术前沿。



严陆光 中国科学院院士
中国太阳能学会理事长

1998年2月11日

PREFACE

It is a pleasure, and an honour, to introduce this book by Professor Yin Zhiqiang on "ALL-GLASS EVACUATED COLLECTOR TUBES". I first met Professor Yin and his wife Xu Xiang when he worked in the Department of Applied Physics at the School of Physics, University of Sydney, in 1982 and 1983. Initially, our association was as scientific colleagues and we undertook collaborative research, and published joint papers. I was always impressed by Professor Yin's capacity for hard work, and his tenacity in solving difficult problems. As time progressed, we and our wives developed a firm friendship that remains, despite the intervening years and geographic separation, to this day.

Professor Yin's success in commercialising evacuated solar collector tubes in China has made him world famous, and deservedly so. The collector tubes that he has developed are one of only a very few designs of such tubes to become established in the market place, despite the large number of similar developments in the early 1980's. This success owes as much to Professor Yin's hard work as it does to his creativity, and to the way in which he has matched the science and technology of these devices to the demands of the market place. The future of his evacuated collector tubes holds much promise and I wish him, and his Company, well.

Professor R. E. Collins
Head of School of Physics
The University of Sydney
10 February 1998



澳大利亚悉尼大学
理学院院长
迪·柯林斯教授

我非常愉快而又荣幸地将这本由殷志强教授编著的《全玻璃真空太阳集热管》一书介绍给您。我与殷教授和他的夫人徐祥女士初次相识是在 1982 年和 1983 年，那时他在悉尼大学理学院的应用物理系工作。最初，我们的交往是作为同事，共同研究，联合发表论文。殷教授勤奋工作的精神和他面对难题坚韧不拔的毅力始终给我留下了深刻的印象。随着岁月的推移，我们及我们的妻子建立了深厚的友谊，虽远隔重洋，仍保持至今。

殷教授在中国将真空太阳集热管实现商品化的巨大成功，使得他成为世界知名的太阳能专家，并理当受此殊荣。在 20 世纪 80 年代早期许多类似的开发工作中，只有相当少的设计为市场所认可，他所研制的真空集热管就是其中之一。如此的成功与殷教授的辛勤工作和他独特的创造力，以及他将科学技术与市场需求结合的思路是分不开的。真空集热管的未来充满了希望。我衷心地祝愿他的事业和公司蓬勃发展！

(杨东平译)

前 言

经国家经贸委资源节约综合利用司提出, 全国能源基础与管理标准化委员会归口, 清华大学、中国标准化与信息分类编码研究所负责, 由殷志强、薛祖庆、贾铁鹰、沈长治、严习元编写的《全玻璃真空太阳集热管》国家标准, 经国家技术监督局批准, 已于 1997 年 11 月 3 日发布, 1998 年 4 月 1 日实施。标准号为 GB/T-17049-1997。

本书的第一章、第三章和第八章分别由王炳忠、沈长治和严习元撰写, 薛祖庆、唐轩和张剑参加了第四章与第七章的撰写。

写这本书, 希望有助于从事生产的人员提高与控制产品质量和进一步的研究与开发。通过太阳选择性吸收表面的发展, 对有志于能效薄膜研究、开发的青年人有所帮助。

朱俊生、李宝山和陆维德对标准的制定给予帮助; 周小雯、邹怀松、李春梅在书的写作过程中付出了辛勤劳动; 王辰和黄悦协助书的出版, 在此一并表示衷心的感谢。

我从事全玻璃真空管太阳集热器的工作已有 20 个年头了, 藉此机会说句心里话。我国地大、人多, 常规能源短缺, 在城市与农村已开始利用太阳光-热转换获得生活用热, 并且改善了环境; 用我们自己的技术、装备制造的产品已逐步走向世界。在过去的岁月里, 那些对全玻璃真空管太阳集热器给予帮助、支持的同事、同行、政府有关部门、学校领导与社会有关人士始终铭刻在我的心里。最衷心地希望大家继续关注、爱护与支持全玻璃真空管太阳集热器的持续科技进步、拓宽其应用领域, 更好地满足社会需求, 将这个有良好开头的事业健康蓬勃地发展下去, 为人类带来更多的温暖。

殷志强

1998 年 2 月 10 日

目 录

序	严陆光 (i)
Preface	R. E. Collins (ii)
前言	殷志强 (iii)
引言	(1)
第一章 太阳辐射能资源	(3)
第二章 全玻璃真空太阳集热管构造与工艺	(24)
第三章 全玻璃真空太阳集热管用玻璃	(33)
第四章 全玻璃真空太阳集热管内的真空度	(55)
第五章 太阳选择性吸收表面	(71)
第六章 太阳吸收比与发射比及其测量	(118)
第七章 全玻璃真空太阳集热管的光-热性能及其测量	(135)
第八章 全玻璃真空太阳集热管的耐热与机械性能、外观与尺寸	(157)
参考文献	(166)
附录一 涂层的辐射特性浅析	(171)
附录二 冰雹	(181)
附录三 一些单位的转换	(186)

引言

太阳能利用包括直接与间接利用，直接利用包括太阳光-热转换、光-电转换和生物质能等；间接利用包括风能、小水电、波浪、海洋温差和潮汐发电等，如图 0.1 所示。

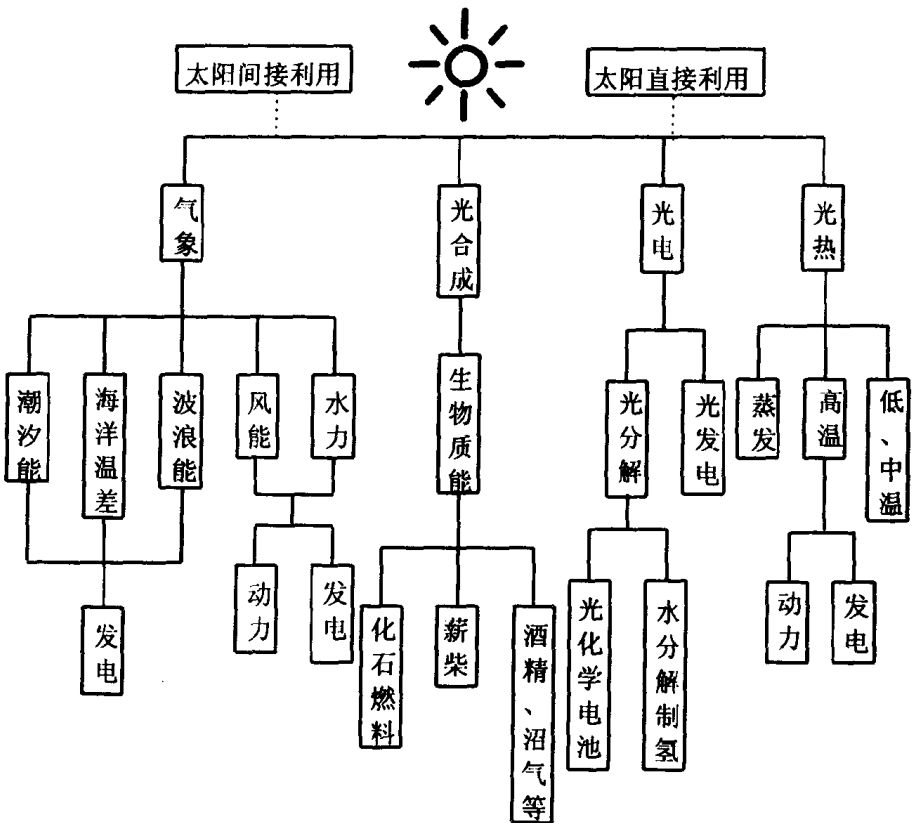


图 0.1 太阳能利用

生活用热包括采暖是耗能大项，在欧洲占一些国家的总能耗 25 % 以上。大部分可以用太阳光-热转换来获取，而且光-热转换的效率 高，太阳能低、中温利用包括生活热水；主、被动太阳房；太阳灶；温室种植、养殖；太阳能干燥；太阳能采暖；工业用热；太阳能除湿、空调、制冷；四季常青运动场和太阳池等，如图 0.2 所示。

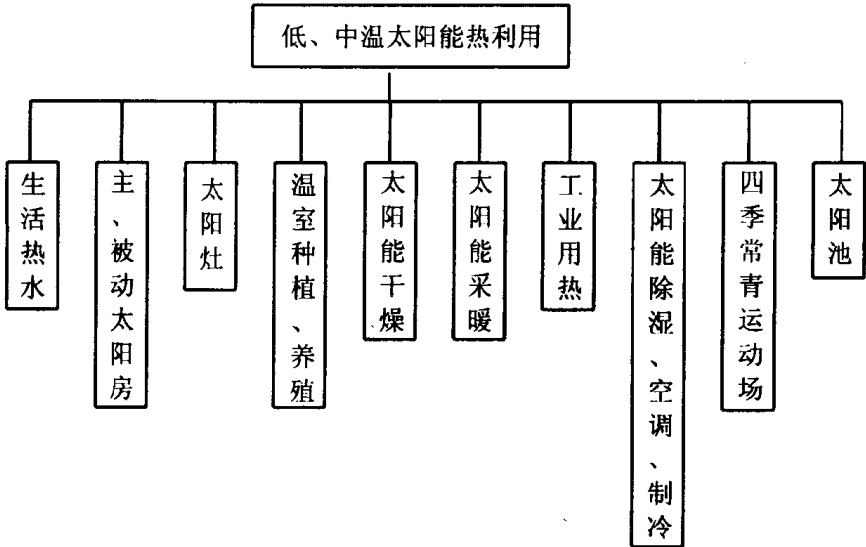


图 0.2 太阳能低、中温利用

平板太阳集热器和真空管太阳集热器是应用最广的太阳光-热转换装置。全玻璃真空管太阳集热器具有集热性能好、热损失小、可靠性强、寿命长与成本低等优点。虽然我国的工业基础薄弱，但由于科技与生产人员的坚持不懈与辛勤劳动，在太阳选择性吸收表面—固态能效薄膜，硼硅玻璃，高真空科学与技术 and 工程热物理等研究、开发与应用；改革开放带来的经济迅速发展以及人民生活水平日益提高；产、学、研结合的倡导，都为全玻璃真空太阳集热管的开发、生产与应用的可持续发展提供了良好的条件。

第一章 太阳辐射能资源

§ 1.1 太阳能的源泉

太阳是距地球最近的一颗恒星。它是一个硕大的炽热球体，直径约 $1.39 \times 10^6 \text{ km}$ ，是地球直径的 109 倍。它的体积为 $1.42 \times 10^{21} \text{ m}^3$ ，是地球的 130 万倍。质量 $1.982 \times 10^{27} \text{ t}$ ，比地球大 33 万倍。

在太阳球心至平均半径 $1/4$ 处的球体内，其质量占总量的 40%，体积的 15 % 和所产生能量的 90 %。这里的温度大约 $1.5 \times 10^7 \text{ }^\circ\text{C}$ ；至平均半径的 70 % 处，降至 $5 \times 10^5 \text{ }^\circ\text{C}$ ；再向外，至表层进一步降至 $6 \times 10^3 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右。太阳的结构相当复杂，通常把太阳划分成大气和内部两个部分，而太阳大气可细分成三个层次：我们日常所能见的部分称光球，它是太阳大气的下层，光球之上是厚约数千公里的色球，最外面还有一层密度很小的日冕，其形状很不规则，且经常变化，它是太阳大气的最外层（图 1.1）。

太阳不停顿地向四周空间放射出巨大的能量，其总量平均每秒钟即达 $3.865 \times 10^{26} \text{ J}$ ，相当于每秒钟烧掉 $1.32 \times 10^{16} \text{ t}$ 标准煤所释放出来的能量。而地球所接收到的能量仅是太阳发出总量的 22 亿分之一。尽管如此，每秒钟也有 $1.765 \times 10^{17} \text{ J}$ 之多，折合标准煤约为 $6 \times 10^6 \text{ t}$ 。这是何等巨大的能量啊！假设整个太阳都是由煤构成的，按这么烧法，只要几千年也就烧光了，那么，太阳的能量到底是怎么产生的呢？

根据爱因斯坦相对论，通过热核反应，质量可转化为能量，其公式为

$$E = mc^2 \quad (1.1)$$

这里， E 为能量， m 是质量， c 是光速。

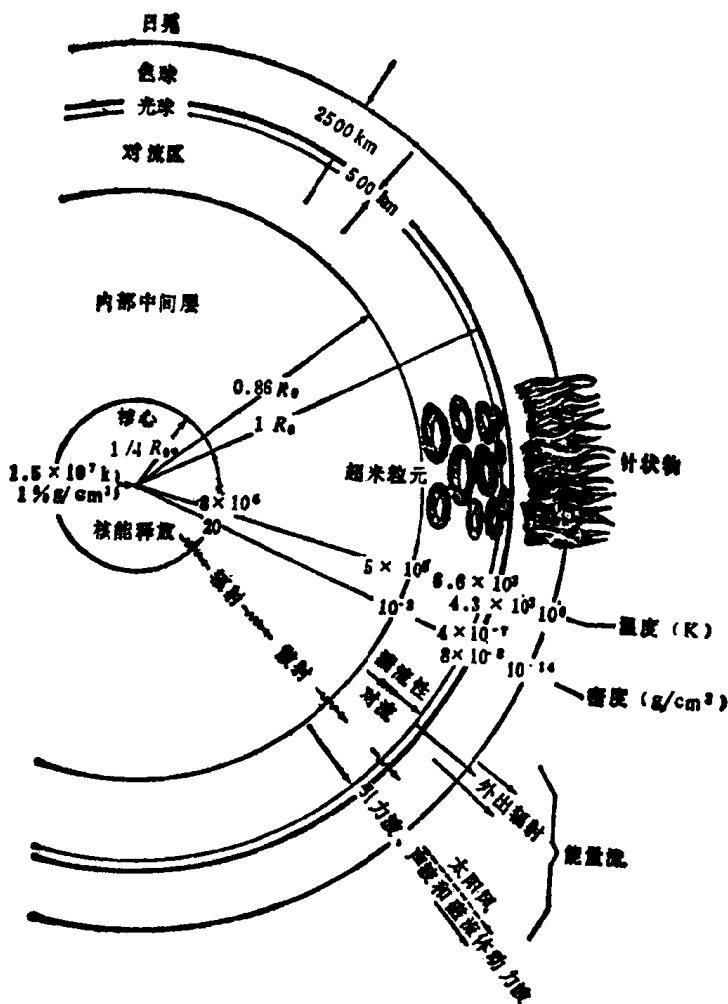


图 1.1 太阳的构造

由上式可以推知，1 g 质量可转化成 9×10^{13} J 的能量。这相当于 1.2857×10^4 t 标准煤燃烧所放出的能量。既然太阳是具有极大质量的天体，按目前消耗的速率计算，还足以维持 6×10^{10} a (年)。从人类的有限生存年代而言，真可称得上是“取之不尽，用

之不竭”了。

当然，质量转变为能量是有条件的，不是随意的。在什么场合下才能进行这种转变呢？要通过热核反应。在太阳的中心部位，温度为 $15 \times 10^6 \text{ }^\circ\text{C}$ ，压力要比地球大气压力高 4000 亿倍，在这样的高温、高压条件下，热核反应可顺利地持续进行。

太阳在单位时间内以辐射形式发射出的能量称为太阳的辐射功率，也叫做辐射通量，它的单位是 W（瓦[特]）。

投射到单位面积上的辐射通量称辐照度，单位是 W/m^2 （瓦每平方米）。

在单位时段内，从单位面积上接收到的辐射能称为曝辐射量，单位为 J/m^2 （焦耳每平方米）。

§ 1.2 太阳和地球

一、天球不是球

无论在什么地方，我们看到的天空都象是一个巨大的天穹，太阳、月亮、星体都分布在天穹的内表面上。我们看这个天穹像是个半球，我们总是处在这个球的中心。尽管这个天球实际上并不存在，在它上面的星体与我们的距离也是千差万别，但为了研究天体运动规律的方便，天文学上仍然把它作为一种工具，利用球面上一些假设的点和线来确定天体的视位置。

图 1.2 所示出的就是一个天球，图中通过观察者的眼睛，即天球的中心 O 与铅直线相垂直的平面为地平面，地平面无限延展可将天球分割成上下两个半球。地平面与天球的交线是一个大圈，叫做真地平或地平圈。通过观察者头顶的铅直线向两端无限伸长，与天球的交点称天顶和天底。天球每日旋转一圈，称作周日运动。在旋转过程中，天球上有两个不动点，叫天极。连接两天极的直线称天轴。通过观察者眼睛与天轴相垂直的平面叫天球赤道面。该平面与天球的交线称天赤道。

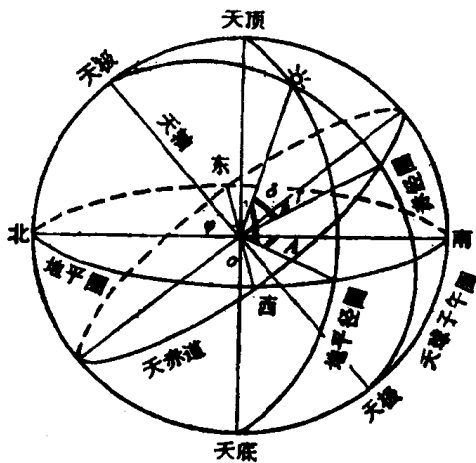


图 1.2 天球

为了决定天球上各点的位置，需要建立坐标系。天球坐标系有多种，其中以天赤道做主圈的，叫做赤道坐标系。在此坐标系中，通过天极与天赤道正交的大圈，称时圈，又叫赤经圈。通过天顶的时圈为天球子午圈。与天赤道相平行的小圈为赤纬圈。以地平圈做主圈的坐标系，叫做地平坐标系，相应地有地平经圈和地平纬圈。

太阳在天球上的位置，在地平坐标系中，以地平经度和地平纬度表示。地平纬度就是平常所讲的高度角，表示太阳在地平圈以上的角距离。地平经度就是方位角，以距正南方的角距离表示，向西为正，向东为负。在赤道坐标系中，则以赤经和赤纬表示。

二、地球 —— 绕太阳旋转的“陀螺”

地球是绕太阳公转的，但其公转轨道并不是一个正圆，而是一个椭圆。太阳就处在椭圆两焦点之中的一个位置上（图 1.3）。所以太阳与地球之间的距离就不是一个固定的数值，而是随季节的不同有所变化，在 1 月 3 日前后，日地距离最近，称近日点，而在 7 月 4 日左右，日地距离最大，称远日点，这两个距离相差 5×10^6

km，占日地平均距离的 1/30。

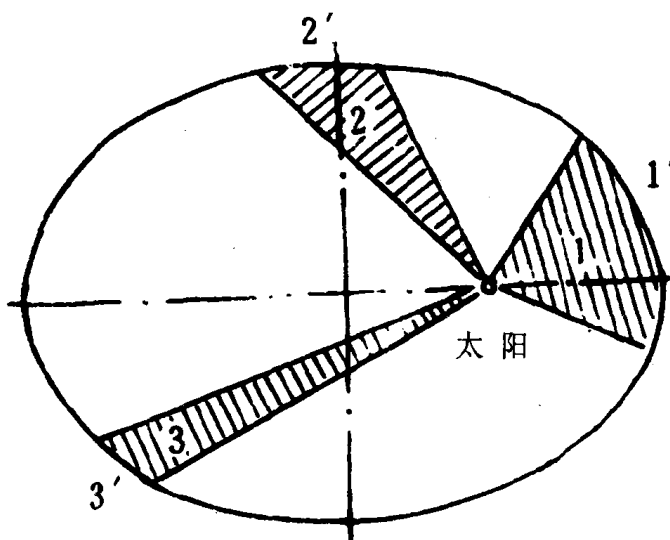


图 1.3 开普勒第二定律

日地距离不同，会对从太阳到达地面的辐照度有影响，这是由平方反比定律决定的。这条定律告诉我们，被照射物体表面的辐照度，与该物体至辐射源之间的距离平方成反比。对此，可以这样理解：一个向四周均匀辐射的辐射源，其总辐射通量为 φ ，在距离该源 r 处的辐照度应等于 φ 被以 r 为半径的球面积来除，即

$$E_r = \varphi / 4\pi r^2 \quad (1.2)$$

而在距离源 R 处的辐照度 E_R ，同理可以写出

$$E_R = \varphi / 4\pi R^2 \quad (1.3)$$

于是，可以得到

$$E_r : E_R = \frac{1}{r^2} : \frac{1}{R^2} = R^2 : r^2 \quad (1.4)$$

因此，不同日期观测到的日射辐照度是不能简单地相比的。最好的办法是统一订正到日地平均距离处。在实际应用中，为了方

便，一般不用上述公式计算，而是从事先编制好的逐日的 $\frac{R^2}{R^2}$ 值表中去查找。

应当指出，大多数以能源为目的的测量无需进行此类订正；需要订正的只是那些涉及严格逐日比较的测量项目，例如浑浊度测量等。

地球除绕太阳公转外，还绕地轴不停地自西向东自转，形象地说，犹如一只陀螺，每转一周就是一昼夜。

地球公转的轨道平面与天球相交的大圆称黄道。由于地轴与黄道面不相垂直，而呈 $66^{\circ}33'$ 的交角。因此，当地球处在公转轨道的不同位置时，由于阳光对地面的入射角度不同，于是形成了四季的更迭，从图 1.4 可以看到，地球处于 1 的位置时，阳光垂直照射赤

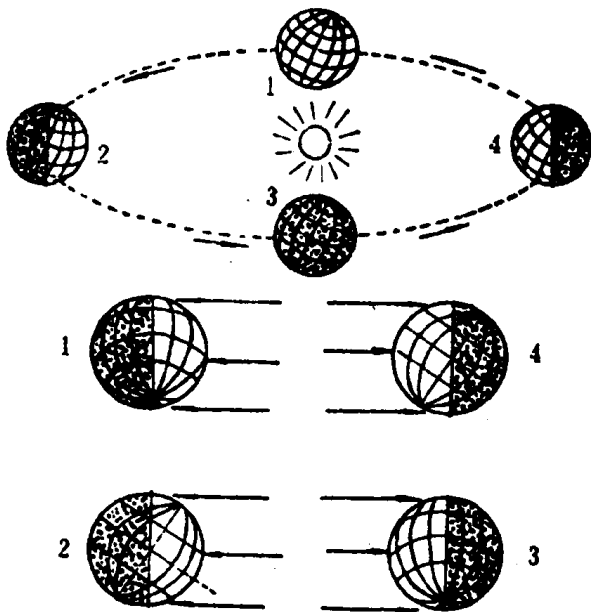
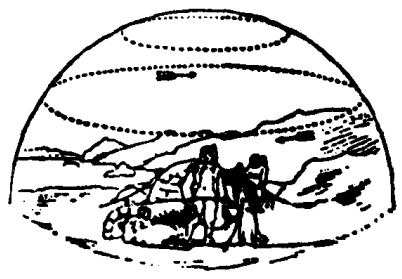


图 1.4 地球公转与太阳高度的变化

道（指当地中午，下同），地面上昼夜相等，时为春分；位于 2

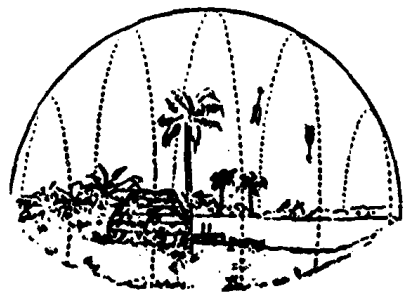
时，阳光垂直照射北回归线（北纬 $23^{\circ}27'$ ），北半球昼长夜短，时为夏至；位于 3 时，阳光复又垂直照射赤道，时为秋分；位于 4 时，阳光垂直照射南回归线（南纬 $23^{\circ}27'$ ），时为冬至。



(a) 极地



(b) 中纬度



(c) 赤道

图 1.5 极地、中纬度和赤道地区两分日天体的运行轨迹

正是由于地球在公转轨道上的位置不同，太阳的视运行轨道就有高低之分，不过具体情况还与所处地理纬度的不同而有变化。现以北极、中纬度和赤道三地为例，展示二分日上述三地太阳视运行轨迹的差别（图 1.5）。

三、时间 —— 人类认识太阳的开始

时有两种含意，即时刻和时间：时刻表示的是时的位置，即时的迟或早；时间则表示的是时的长度，即时的久或暂。

时间的单位有年、月、日、时、分、秒等多种。天文学中日是基本单位，其他均由此而派生。太阳日的长度等于太阳连续两次自东向西经过子午圈的时间。

由于地球公转一周，时为一回归年，其长度以太阳日计为 365.2422 d。

根据开普勒第二定律，在相等的时间内，行星与太阳的连线所扫过的面积是相等的（图 1.3），可知，地球公转的速度是不均匀的，实际上就是说，太阳日会因季节而不相等。

天文学家为了弥补上述不便，就假想天上另有一个“太阳”，它以回归年为周期，以固定不变的速度，在黄道上做周年运动；其轨道是一正圆，而不是椭圆，这一假想太阳，称为平太阳。

这样一来，就存在着平太阳日与真太阳日，平太阳时与真太阳时的区别。平太阳时取决地球对平太阳的自转速度和周期，平太阳时刻取决于平太阳相对子午圈的方向和角距离，这是我们用钟表来记时的基础。真太阳时所依据的则是真太阳。真太阳时与平太阳时的差值，称为时差。通常，真太阳时就是通过时差求出来的，即

$$\text{真太阳时} = \text{平太阳时} + \text{时差}$$

精确的时差可从每年出版的天文年历中查到。日射测量中所要求的没有那么高，可将每年各日的时差视为常数。

太阳时是以太阳视圆面中心对当地子午圈的时角来量度的。由于各地的子午圈随当地的地理经度的不同而异，各地的时刻也因此