



太阳能原理与应用

TAIYANGNENG YUANLI YU YINGYONG

邓长生 编著



化学工业出版社

太阳能原理与应用

TAIYANGNENG YUANLI YU YINGYONG

邓长生 编著 



化学工业出版社

· 北京 ·

TK518
D266

图书在版编目 (CIP) 数据

太阳能原理与应用/邓长生编著. —北京: 化学工业出版社,
2009. 12

ISBN 978-7-122-06860-6

I. 太… II. 邓… III. 太阳能-应用-基础知识 IV. TK519

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 189318 号

责任编辑: 赵玉清

文字编辑: 颜克俭

责任校对: 郑捷

装帧设计: 刘丽华

出版发行: 化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印刷: 北京永鑫印刷有限责任公司

装订: 三河市万龙印装有限公司

720mm×1000mm, 1/16 印张 10 字数 139 千字 2010 年 1 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888(传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 25.00 元

版权所有 违者必究

序

当今，无论如何强调发展新能源和可再生能源的意义都不过分。我们的世界正面临着由于以化石燃料为基础而支撑的能源系统带来的一系列威胁：资源枯竭、环境污染、生态恶化、气候变化、贫富不均，直至由于能源问题而引发的国与国之间、地区之间的冲突、纠纷不断，直至战争。新能源和可再生能源具有资源可持续、清洁、分布均衡等特点，必将成为未来可持续能源系统的支柱。

我国的经济社会正在快速发展。在能源方面，我们既需要充足的能源供应以保障全面建设小康社会目标的实现，同时我们也面临着国内资源和环境的威胁，国际社会温室气体减排的压力。因此，国家把发展新能源和可再生能源作为长期能源战略的重要组成部分，而且制订了以《可再生能源法》为基础的一系列政策措施。几年来，新能源可再生能源在我国得到了快速发展，其广阔的前景正日益显现出来。

清华大学长期致力于能源科学研究和人才培养，形成了新型核能、太阳能、风能、生物质能以及新能源战略和政策等领域的新能源科研和教学体系，取得了一批有影响的科技成果。以这些科研和教学经验为基础，并吸收了国内外同行的大量研究成果，在化学工业出版社的支持下，几位教师编写了这套新能源丛书。

丛书按能源种类分册，内容涉及发展新能源的战略和政策，各类新能源资源核技术的特点、技术和产业发展现状、未来的发展趋势展望等。丛书内容丰富、通俗易懂，从中可以较清晰地了解发展新能源的意义，各种新能源技术的基本原理和发展路线、发展前景等，对于广泛和系统了解和认识新能源，这是一套很好的读物。

当然，新能源的发展是一个很复杂的系统工程，是一个很长的产业链、政策链和基础设施链，牵涉到技术、体制、政策、社会和个体的行

为。所以，要起到有份额的作用，还有很长的路要走，尤其和我国国情有十分紧密的联系。在此期间，各种技术的发展有可能不一致，会有很大的差异性。我们目前的认识，在技术发展有新突破、政策上有新措施的情况下将会有很大的变化。今天我们认为有前途的方向可能将来会“边缘化”，一些新的方向可能“异军突起”。总之，我们作为科技工作者应该结合国情不断变化地在技术创新方面下功夫，走出我国自己的新能源和可再生能源发展的道路来。相信这套丛书的发行，会在提高社会各界对新能源的了解，普及新能源知识，促进我国新能源快速发展方面做出应有的贡献。

虽然丛书中有有关可再生能源的描述，社会上的专家不见得完全意见一致，有些同志会有不同的看法，这是很正常的。一个新生事物的发展总不可避免的有各种看法，在争议中成长。但是，了解它是第一位的，只有不断深入的了解，不断实践才会逐渐接近真理，这套丛书的作用就在于此。

清华大学教授

工程学院院长

倪维斗

2009.12.4

前 言

随着我国经济的高速发展，能源和环境问题成为制约我国经济社会可持续性发展的一个越来越突出的问题。寻找化石燃料的替代能源成为当务之急，也是重要的战略性课题。太阳能具有清洁、可再生、量大等特点，是世界各国发展新能源的重点之一。

我国近年来大力发展太阳能技术和应用，但是广大公众和从业人员对太阳能技术和应用还不是很了解。一本较全面介绍太阳能技术和应用的简略的小册子就显得很有必要。本书全面介绍了太阳能技术和应用，从基本概念、基本技术和应用入手，叙述力求简明扼要、通俗易懂。

本书共分5章，第1章介绍了太阳能的产生和我国的太阳能资源；第2章介绍太阳能热利用，包括太阳能热水器、热动力等；第3章介绍太阳光伏，包括各种太阳电池技术和应用；第4章介绍太阳能利用的技术经济分析；第5章对太阳能技术和应用的发展趋势做了概略性的总结。

由于作者时间和水平有限，书中不当之处在所难免，恳请读者批评指正。

编者
2009年8月于清华园

作者简历

邓长生 (1966.12~)。清华大学核能与新能源技术研究院研究员。中国材料研究学会理事，中国可再生能源学会氢能分会理事，北京粉体技术协会副理事长。1998 年获得英国谢菲尔德大学工程材料博士学位，后在牛津大学从事博士后工作，2003 年开始在清华大学核能与新能源技术研究院精细陶瓷研究室工作，主要从事新能源应用的材料，包括陶瓷纳米材料和复合材料研究。近年来从事高温超导薄膜材料、新型低成本染料敏化太阳能电池材料和器件以及固体氧化物电解池高温电解水蒸气制氢材料与系统等研究。发表论文三十篇，合著专著三部。

目 录

1 太阳能资源 / 1

1.1 太阳与太阳辐射	1
1.2 地球大气对太阳辐射的衰减	2
1.3 太阳辐射测量	9
1.4 中国的太阳能资源	10

2 太阳能热利用 / 13

2.1 基本原理	13
2.2 平板型集热器	14
2.2.1 基本结构和材料选择	14
2.2.2 平板集热器类型	16
2.2.3 平板型集热器的性能	18
2.2.4 太阳能热利用系统性能比较	21
2.3 聚光型集热器	22
2.3.1 聚光器基本原理	22
2.3.2 聚光集热器的类型	23
2.3.3 聚光器材料	26
2.3.4 聚光集热器的性能	27
2.4 太阳能热利用系统	28
2.4.1 太阳能热储存	28
2.4.2 太阳能热水装置系统	29

2.4.3	太阳热动力	30
2.4.4	太阳能热利用的其他形式	43
2.4.5	太阳能集热器-建筑一体化	51

3 太阳电池 / 55

3.1	太阳电池基本原理和性能检测	55
3.1.1	太阳电池基本原理	55
3.1.2	太阳电池分类	57
3.1.3	太阳电池性能检测	59
3.2	晶体硅太阳电池	62
3.2.1	概述	62
3.2.2	高纯硅材料制备技术	63
3.2.3	太阳能级高纯硅制备新工艺	69
3.2.4	单晶硅和多晶硅制备	73
3.2.5	晶体硅太阳电池制备	77
3.3	薄膜太阳电池	82
3.3.1	薄膜太阳电池分类	82
3.3.2	多晶硅薄膜太阳电池	82
3.3.3	非晶硅/微晶硅薄膜太阳电池	86
3.3.4	铜铟镓硒薄膜太阳电池	93
3.3.5	碲化镉太阳电池	95
3.3.6	薄膜太阳电池比较	98
3.4	聚光型太阳电池	99
3.4.1	聚光系统	100
3.4.2	聚光型太阳电池	102
3.5	其他新型太阳电池	105
3.5.1	染料敏化太阳电池	105
3.5.2	有机太阳电池	108
3.6	太阳电池应用	112
3.6.1	太阳光伏发电系统	112

3.6.2	太阳能光伏-建筑一体化应用	117
3.6.3	太阳能电池其他应用	121

4 太阳能利用的技术经济分析 / 125

4.1	评价指标	125
4.2	太阳能热水器	128
4.3	太阳光伏系统	132

5 太阳能利用的发展趋势 / 137

5.1	太阳能热利用	137
5.1.1	太阳能热水系统	137
5.1.2	太阳能热电	137
5.2	太阳能光伏	139
5.2.1	晶体硅太阳能电池	139
5.2.2	薄膜太阳能电池	139
5.2.3	第三代太阳能电池	140
5.3	太阳热/光伏的混合技术	141
5.4	其他	142

参考文献 / 145

1 太阳能资源

1.1 太阳与太阳辐射

太阳是地球上能源的根本。除了核能和地热能，地球上几乎所有的能源形式都直接或者间接地和太阳有关。通俗地讲，离地球约 1.5 亿公里的太阳就是一个火球。太阳从质量组成而言，主要是由地球上最轻的元素氢组成，占 78.7%；此外，氦占 19.8%，剩余的 1.5% 由种类繁多的金属和其他元素组成。太阳直径 139 万公里，总质量约 $1.99 \times 10^{27} \text{ t}$ ，因此太阳的平均密度为 1.4 g/cm^3 。

太阳结构上由大气和内部两大部分组成，太阳大气自里向外分为光球、色球和日冕 3 个层次；内部向外则分为对流层、中介层和核心 3 个层次。在太阳核心部分，氦占到 65%，而氢则下降到 35%。太阳内部温度高达 1500 万度，压力有 3400 多个标准大气压，物质在这个条件下呈等离子体状态。太阳核心和太阳大气之间存在很大的压力和温度梯度，由于太阳核心强大的重力吸引，使得太阳外层能紧密和核心连在一起。

太阳的能量通过太阳核心在高温高压下的核聚变反应产生。如图 1-1 所示，核聚变过程是通过 3 个氢原子合成为 1 个氦原子核（ α 粒子）进行的。

4 个氢原子核质量与一个氦核的质量差为： $4 \times 1.672 \times 10^{-24} - 6.644 \times 10^{-24} = 0.044 \times 10^{-24} \text{ (g)}$ 。按照爱因斯坦定律， $E=mc^2$ ，上述质量亏损转化成能量为 $6.3 \times 10^{11} \text{ J}$ 。每秒钟从太阳表面辐射出的能量约 $3.8 \times 10^{23} \text{ kJ}$ 。太阳的预测寿命是 100 亿年，迄今太阳的年龄大约 45 亿年。由于地球上人类的生存依赖于太阳辐射，因此，如果太阳辐射大大减弱甚

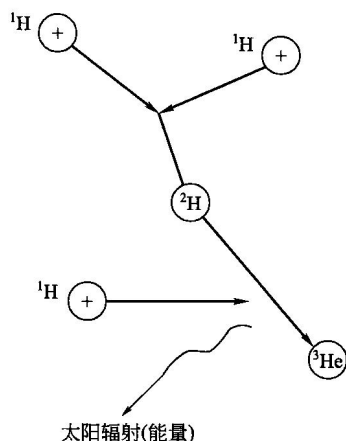


图 1-1 太阳核心的
聚变反应过程

1 太阳能资源

至消失，人类将不能存活。由此人们说太阳能是相对于地球取之不尽用之不竭的绿色可再生能源。

太阳向宇宙以电磁波的形式辐射能量^[1]，电磁波波长从小于 0.1nm 的宇宙射线到波长为几十千米的无线电波。太阳辐射主要的能量集中在 $0.2\sim 100\mu\text{m}$ 的从紫外到红外的范围，而波长在 $0.3\sim 2.6\mu\text{m}$ 范围的辐射占太阳能的 95% 以上。科学家通过检测太阳辐射能谱分布，按照黑体辐射，分析得出太阳表面的温度大约有 6000K 。

1.2 地球大气对太阳辐射的衰减

我们居住的地球直径是 12720km ，从地球上看来太阳，太阳圆盘存在 0.5° 的张角。如图 1-2 所示，地球围绕太阳转动（公转），每圈约 365 天多一点；地球自身也自转，24h 一圈。地球自转轴指向北极星，它和公转平面法线之间存在一个 23.5° 的夹角。正是由于这个夹角的存在，地球上同一个地方才会存在一天中离太阳距离的变化，特别是太阳光线穿越大气层距离的变化，给我们带来四季的气候变化，如此周而复始。令人惊奇的是，由于地球自转轴相对于公转轴的倾斜角，在地球极地夏天接收的太阳辐射要高于赤道地区，而在热带地区却没有明显的四季之分，在极地地区夏天和冬天存在长时间的日照或者极短的日照这两种极端情况。

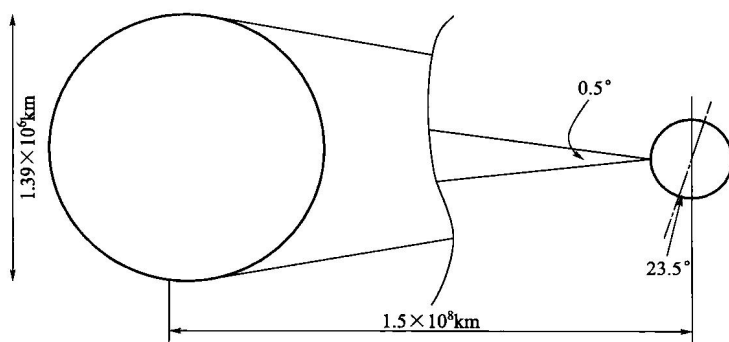


图 1-2 地球和太阳之间的位置关系

太阳辐射穿越太阳和地球之间的空间，到达地球大气层，经大气后照射到地球表面。这个过程太阳辐射能会经历两个阶段的衰减。首先，在传播经过大约 1.5 亿公里的路程中，太阳辐射按照距离平方的倒数关系衰减；其次，再经过大气层的衰减。在经过第一个阶段衰减后到达地球大气层顶部时的能量基本上是一个常数，即人们通常说的太阳常数 I_{sc} 。太阳常数是：当地球与太阳间的距离处于两者之间的平均距离，即 $1.495 \times 10^8 \text{ km}$ 时，大气层外侧即大气上界单位面积单位时间内垂直于太阳光方向上接收的太阳所有波段的辐射能之和。由于大气顶部太阳辐射涵盖了很宽的波长范围，这个数值的准确检测是很复杂的，目前世界普遍采用的值是美国国家航空航天局和美国材料试验学会（NASA/ASTM）的检测给出的值： $8.117 \text{ J}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$ ，或 $1353 \text{ W}/\text{m}^2$ 。太阳常数随季节因太阳-地球距离有所变化，但变化不大，只有约 3.4%，对于太阳能利用系统的设计不构成较大的影响。到达地球大气外层的太阳年总能量为 $1.5 \times 10^{15} \text{ MW} \cdot \text{h}$ 。

覆盖地球的大气层主要由氮气（78%）和氧气（21.9%）组成，还有其他的气体包括 CO_2 、 H_2O 、惰性气体等组成。大气中还含有尘埃。但是，大气是一个成分、密度或者压力和温度都随大气高度变化的介质。从地球表面向上，地表开始 0~14km 为对流层，在对流层顶部 14~18km 有一个厚度 4km 的对流层顶，再往上从 18~50km 是平流层，50~90km 是中间层，90~350km 是厚度 260km 的电离层。在接近平流层顶部离地表大约 20~27km 高度是臭氧层。一般认为，地球大气主要集中在地球上方 40km 的厚度。不同的层化学组成不同，温度也不同。由于人类生产和生活的影响，现在地球大气成分和工业革命以前相比，已经发生了很大的变化。其中 CO_2 浓度从工业革命前的 $280 \text{ mg}/\text{kg}$ 升高到目前的 $370 \text{ mg}/\text{kg}$ 左右，甲烷气（ CH_4 ）则从 $700 \mu\text{g}/\text{kg}$ 增加到 $1700 \mu\text{g}/\text{kg}$ ，此外，氧化亚氮的含量也从 $270 \mu\text{g}/\text{kg}$ 上升到 $310 \mu\text{g}/\text{kg}$ 。特别是大气中以前不存在的卤素碳化物，在 1950 年之后也明显增加。这些气体造成温室效应，使地球大气温度上升。

太阳光穿过这些层的时候会通过吸收、散射等衰减，不同的大气组分会对太阳光不同的波段产生衰减。太阳辐射中的带电粒子被电离层吸收，X 射线（波长 $< 1 \text{ nm}$ ）和从极短紫外线（1~200nm）到中紫外线

(200~315nm)的短波光受到超高层大气中的分子和臭氧的散射和吸收；在可见光和红外线部分，水分子和二氧化碳会形成较多的吸收。太阳辐射到达地面的最短波长为 300nm。

当太阳光电磁波撞击大气中的颗粒时，部分太阳光的能量被颗粒散射向所有的方向，形成散射辐射。自然界中所有大小的颗粒都能散射太阳光辐射。如果颗粒是球形的，且其大小远小于入射光波长时，散射过程称为瑞雷 (Rayleigh) 散射，这种散射是各向均匀的。空气中大多数分子包括氮气、氧气、二氧化碳等都是大小远小于太阳光波长 (紫外线到可见光部分)，因此这种散射占主要。如果颗粒大小和入射波长相近，则称为米也 (Mie) 散射，这种散射形成的散射辐射在入射光线前进方向能量大于向后方向的散射辐射。空气中的水滴 (如云层)、尘埃和气溶胶等大小则可能和太阳光波长相近，是这种散射的主要来源。

到达地球表面的部分太阳辐射被反射进入大气，然后回到太空中。这部分称为行星反射率，即反射/散射的太阳辐射与进入大气层入射太阳辐射之比。而被大气吸收的太阳辐射在大气对流层中气候变化中起决定性作用。目前，行星反射率平均值在大约 30%，极大值和极小值分别出现在 1 月和 7 月。在地球南北半球反射率的差异主要受天空云层和地面影响，北半球雪覆盖较多，云层活动也较剧烈，因此对太阳辐射的散射较强。此外，太阳高度、云层类型和分布以及地表反射率也影响行星反射率。在较低的纬度吸收的太阳能最大值在 $300\text{W}/\text{m}^2$ 左右。行星反射率随着纬度下降。在纬度低于 30° 地区，行星反射率相对比较稳定，在 25% 左右，因此，这些地区地面接收的太阳辐射较高，具有丰富的可利用的太阳能，太阳辐射从赤道向极地地区逐渐降低。

通常云层覆盖地球上空 50% 的面积，其活动特性使其成为决定太阳能辐射的关键因素。云层颗粒和太阳辐射的短波辐射和长波辐射发生较强的作用，特别是云层颗粒对可见光具有高的散射效率。

为了定量描述计算地表接收的太阳辐射，以作为太阳能应用的设计依据，人们需要采用简化的模型来对大气衰减进行定量的描述。科学家提出了均质大气概念，即虚拟大气中各处的空气密度相同，成分也与实际大气相同，均质大气单位面积上的垂直空气柱内包含的空气质量与实

际大气的完全一样，这样，对日射的衰减可以利用均质大气来进行，即利用日光经过大气的长度来计算到达地面的日射强度。这个大气长度以实际大气质量对应的均质大气的厚度来代替。如图 1-3 所示，大气光学质量 m 就是用来计算日射经过大气长度的一个物理量：以太阳位于天顶时光线从大气上界至某一水平面的距离为单位，去度量太阳位于其他位置时从大气上界至该水平面的单位数，并设定标准大气压和 0°C 时海平面上太阳垂直入射时的 $m=1$ ，两者之商即是所谓的大气光学质量，或大气质量。

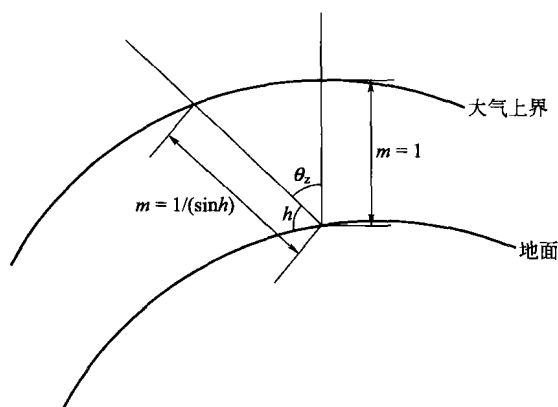


图 1-3 大气质量定义示意

$$m = \frac{1}{\sin h} \quad (1-1)$$

式(1-1)中 h 为太阳高度角，即测量地点太阳射线与地面间的夹角。以大气质量 $m=1$ 的太阳辐射记为 AM1，大气上界为 AM0，一般地面上太阳能利用标准采用 AM1.5 (AM 是大气质量 air mass 的缩写)。太阳高度角对于一个地点而言是影响地面接收到的太阳辐射强度最重要的参数。高度角越大，太阳光线穿过大气的距离越短，因此被衰减的越少，到达地面的太阳辐射越强，造成地面温度也越高；反之，则越低。这就是我们夏天感到太阳强、温度高而冬天太阳弱、温度低的主要原因。

到达地球表面的太阳辐射还要受到地球表面的反射。地表反射率虽

然不同于行星反射率，但也是行星反射率的重要组成部分。决定太阳辐射反射的地表特征主要包括：①地表类型；②太阳高度和地表相对于太阳的几何关系；③太阳光谱分布和光谱反射。

表 1-1 列出了不同地表对太阳辐射的反射率。可以看到，新雪、旧雪表面分别高达 85% 和 70%；沙漠 30% 左右，绿色草地 8%~27%，森林则在 12%~18%。相比较而言，云层反射率在 20%~70% 之间，低空云层和积云层最高，达 70% 左右。平静的海平面反射率只有 2%。因此，经过大气和地表作用后的太阳辐射包括两种：直接辐射和散射辐射。直接辐射是地面接收到的来自太阳且中间不受任何干扰的辐射，这种辐射能经物体遮挡后形成明显的影子。散射辐射则是太阳辐射经空气中的水蒸气、二氧化碳、尘埃、气溶胶和云等散射的辐射。它没有方向性，即散射辐射射向各个方向，这种辐射经过物体遮挡不形成明显的影子。很显然，散射辐射与直接辐射的强度大小和所处的地点（经纬度）、季节、地面海拔高度以及时间相关。在晴朗的天气下，散射辐射占总辐射的 10%~20% 左右；但在多云天气，散射辐射可以高达 100%。一天中散射辐射占总辐射的比例也可能有较大的变化。总体而言，散射辐射在全年总辐射中的比例在赤道附近低于极地附近和极地地区。

表 1-1 各种表面对太阳辐射的反射率

表面类型	反射率/%	表面类型	反射率/%
新雪	85	水面	2~78
旧雪	70	高空云层	21
沙漠	29~31	中高空云层(3~6km高度)	48
绿色草地	8~27	低空云层	69
松树森林	6~19	积云	70
花岗岩	12~18		

综合上述因素，如果以进入大气的太阳辐射作为 100 单位的话，30% 以短波形式被反射回太空，47% 被大气、地球表面和海洋吸收，只有大约 23% 参与地球上的水文循环。通过大气对太阳辐射的吸收、散射后到达地球表面的辐射能量密度一般为 86~100mW/cm²。表 1-2 所列为太阳辐射在大气中的衰减。

表 1-2 太阳辐射在大气中的衰减

吸收物	吸收比例/%	反射回太空比例/%	散射向地球表面/%	直射到地球表面/%
臭氧分子	0.5~3			
上层尘埃	1~5	0.3~2	0.6~4	
空气分子	6~8	1	4	
水蒸气	3~9	0.1~1	0.4~4	
低层尘埃	0.5~5	0.2~7	0.4~14	
合计	11~30	0.6~11	5~26	33~83

图 1-4 显示海平面接受的太阳辐射强度随波长的分布。表 1-3 表明，地面上接收的太阳辐射能量主要集中在可见光和红外部分。

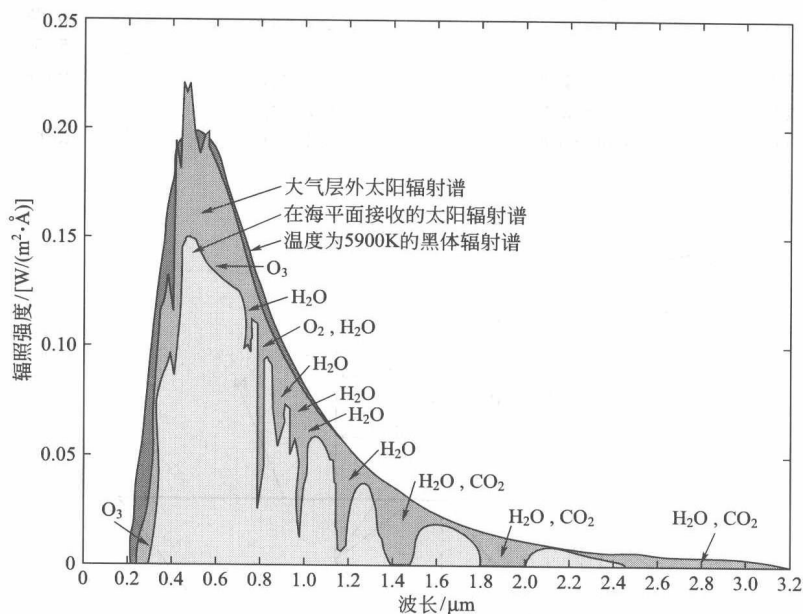


图 1-4 太阳辐射能随波长的变化

具体地表某个地点在特定时间接受的太阳辐射除了受上述地球上空大气和地表作用的影响，还决定于该地点所处的地理位置，即经纬度，或者说和太阳之间的相对位置。图 1-5 所示是地球上与水平面呈 β 角的一个倾斜面与太阳的相对几何关系。太阳光线以 h 高度角入射到该平面，太阳的光线向量在地面上的投影与南北方向线夹角 γ ，向量与天顶 Z 的呈夹角 θ_z ，称为天顶角。这些角度由该地点的经纬度和时间决定。