

珠峰地区太阳辐射的光谱组成

(珠峰太阳辐射总结报告之二)

中国科学院西藏综合考察队 太阳辐射组

一九七二.九

珠峰地区太阳辐射光谱组成

(珠峰太阳辐射总结报告之二)

太阳辐射能对于地球上的多数过程都有着重要的意义，从瞬息变化的气象条件到千万年以来的地球变迁，都与太阳辐射和太阳的活动有密切的关系。在气象和气候学上正是太阳辐射与大气环流、下垫面的作用共同构成气候形成的三要素；在生物学方面，太阳辐射更是使植物得以进行光合作用的能量源泉，在高山地区，特别是冰川的积累和消融，主要的就取决于太阳辐射的变化。甚至宇航科学的发展，如飞机、卫星壳体的热平衡、太阳电池的工作状态等，也对太阳辐射的研究提出了新的要求，由于太阳辐射影响面之广度和深度，很早，对太阳辐射的研究就受到人们的很大重视。近年来，对太阳辐射的研究更是加强，它波及气象学、天文学、生物学、农学、医学、工程学以及空间科学等领域。

特殊的地区，特殊的环境，往往是进行某些研究、探索某种规律的必要场所。高山地区对太阳辐射的研究提供了不少有利条件，因此对高山地区的辐射测量和研究受到相当的重视（如欧洲的阿尔卑斯山、亚洲的帕米尔高原等）。

然而，对位于低纬度的世界最高最大的喜马拉雅山地区的辐射研究工作，相对而言则比较薄弱，1966~1968年中国科学院西藏科考队在无产阶级文化大革命的高潮中挺进珠穆朗玛峰，对这个地区进行了多学科的综合考察，太阳辐射研究工作也是其中之一。

研 究 概 况

“人类的历史，就是一个不断地从必然王国向自由王国发展的历史。”随着人们对自然认识的深化，对所研究的对象也必然越来越细，越来越深刻。高山地区除了大气对太阳辐射总的减弱较小，积分辐射比较强烈而外，高山地区的特殊大气状况也必然对太阳辐射的光谱组成产生显著的影响。为了探讨珠峰地区太阳光谱辐射的规律，在1966年和1968年的考察中采用了一系列的“截止”型玻璃滤光片对太阳辐射进行分段测量，1966年和1968年所采用的滤光片型号及其起止波长，滤光因子等见于表1。

表1 珠峰太阳辐射观测中的玻璃滤光片

年	1966				
滤光片型号		J B ₇	CB ₆	CB ₆	HWB ₄
相应的国外型号	GG ₁₃	XC ₁₇	OC ₁₄	KC ₁₅	MC ₃
起始波长(μ)	0.387	0.487	0.580	0.640	1.000
截止波长(μ)	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8
滤光因子 D _r	1.099	1.097	1.100	1.103	1.106

1968年					
	JB ₇	CB ₃	HB ₁₁	HB ₁₆	HWB ₄
GG ₁₃	XC ₁₇	OG ₁	RG ₂	RG ₈	MC ₃
0.387	0.487	0.523	0.644	0.716	1.000
2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8
1.099	1.097	1.090	1.098	1.110	1.106

这些滤光片中的三种(O G 1、R G 2、R G 8)曾被国际日射委员会推荐作为日射观测中的基本手段〔1〕

滤光片的日射观测是在热电式直接辐射表上进行的，为了消除滤光片的个体误差（例如样品的不均一，放置时与太阳光线的垂直程度等），1968年曾用了两套滤光片和两台相同的热电式直接辐射表同时观测，在整个观测期间还用 Ångström 补偿日射计随时对相对日射表进行校准。关于相对热电式直接辐射表以及观测的时间和地点在珠峰太阳辐射总结的另一篇报告中已有详细描述，这里从略。

1968年我们在珠峰观测用的一台补偿式日射计(N6582)在考察前后都经与留京的另一台(N6581)以及保存在中央气象局、北京大学地球物理系的两台同类型仪器进行对比校准，无论是考察前还是考察后，比较的相对误差均不超过0.5%。

关于“截止”型滤光片的观测计算，根据规定它的起止波长均以透射率为50%的为界。透过滤光片的辐射能量为：

$$S_{\Delta\lambda} = D_{\tau} S_i$$

式中 $S_{\Delta\lambda}$ 为滤光片起止波长之间的实际大气中的太阳直接辐射； S_i 为加滤光片后测得的辐射通量； D_{τ} 为所用滤光片的滤光因子，它等于该滤光片有效透射率 τ_e 的倒数。根据〔2〕，截止型滤光片的有效透射率就是该滤光片主透过带透射率的平均值。

实际上透过滤光片的太阳直接辐射 $S_{\Delta\lambda}$ 为：

$$S_{\Delta\lambda} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_{\lambda} d\lambda = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_{\lambda} S_{\lambda} d\lambda$$

式中 λ_1 、 λ_2 为滤光片真实的起止波长，即 λ_1 以后滤光片开始透过辐射，而在 λ_2 处，滤光片的透过率又降为零； S_{λ_1} 为透过滤光片后波长 λ_1 处的太阳辐射。 $S_{\lambda_2} = \tau_{\lambda} S_{\lambda}$ ， τ_{λ} 为滤光片在波长 λ 处的透过率， S_{λ} 为波长 λ 处的实际大气中（进入滤光片之前）的太阳辐射。

在实际计算中则采用下式：

$$S_{\lambda} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_{\lambda} S_{\lambda} d\lambda = \bar{\tau}_{\lambda} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_{\lambda} d\lambda$$

式中 λ_1 、 λ_2 为滤光片透过率为50%的起止波长， $\lambda_1 > \lambda_1'$ ， $\lambda_2 > \lambda_2'$ 。所以实际上为：

$$S_{\lambda} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_{\lambda} S_{\lambda} d\lambda \approx \bar{\tau}_{\lambda} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_{\lambda} d\lambda$$

上式作为一种近似计算。根据分析计算和长期的观测实践证明，这种处理方法是可取的。根据我们用不同型号的滤光片，对珠峰（5000米）实际大气内太阳分光辐射照度曲线的积分计算结果，证明上述计算的平均误差一般约为±1.0%。

利用上述“截止”型玻璃滤光片，我们可将太阳直接辐射分成下列光谱段（表2）

表2 珠峰太阳辐射观测中的光谱分段

年	1966				
光谱段(μ)	<0.487	0.487—0.587	0.587—0.640	0.640—1.00	>1.00
光色	紫、青	兰、绿、黄绿	黄 澄	红、红外	红外

年	1968						
光谱段(μ)	<0.387	0.387—0.487	0.487—0.523	0.523—0.644	0.644—0.716	0.716—1.000	>1.00
光色	紫外	紫青	兰绿	黄澄	红	红外	红外

珠峰地区太阳直接辐射的光谱组成

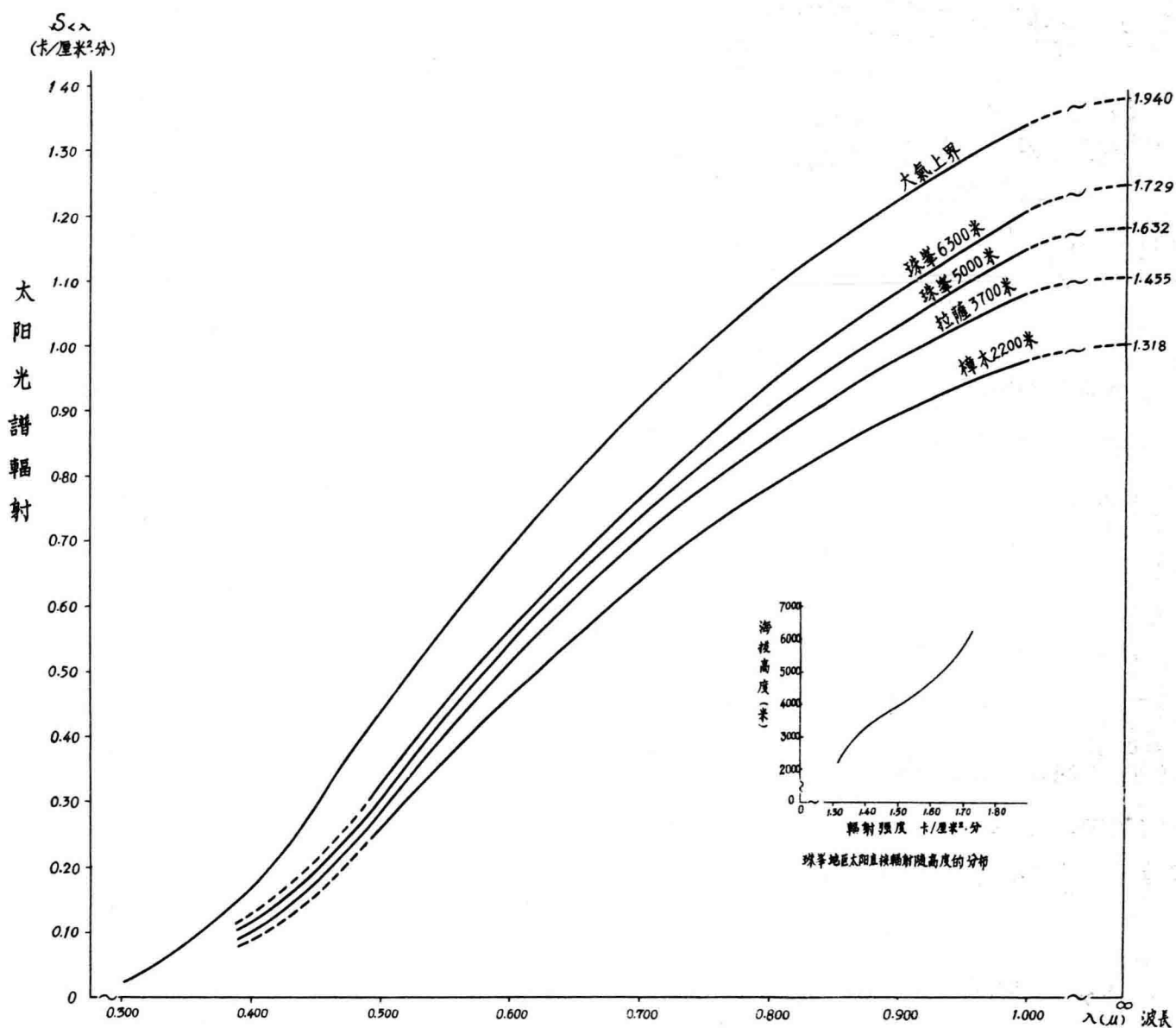
随着海拔高度的增加,太阳光路渐短,它所受到的减弱也就变小,因此,对同一地区、同一条件而言,太阳直接辐射的强度是随高度的增加而增强。在珠峰地区,太阳直接辐射的积分强度(即能达到观测高度上的所有波长的总积分辐射)随高度的变化,视天气条件的不同变化在 $0.005 - 0.010$ 卡/厘米²·分·100米之间。

图1表示了1966—1968年4—5月珠峰地区不同高度的测点在晴天条件下太阳直接辐射(垂直于入射方向)的光谱分布情况,为了便于比较,我们在各测点的资料中选取9时30分(地方真太阳时)的数据以绘制此图。图中大气上界的太阳光谱分布取自〔3〕。从图1中我们可以清楚地看出珠峰地区太阳光谱辐射变化的规律,随着高度的增加,不仅太阳积分直接辐射增加,而且短于任意波长(λ)的积分辐射($S_{<\lambda}$)也相应地增强。

由于不同光谱的太阳辐射所受到大气的减弱的不同,因而不同波长的太阳辐射随高度的变化也不尽相同。某一光谱段的太阳辐射在大气中的减弱可用以下简单的公式来表达:

$$S_{m,\Delta\lambda} = S_{0,\Delta\lambda} q_{\Delta\lambda}^m$$

式中 $S_{m,\Delta\lambda}$ 为 $\Delta\lambda$ 光谱段在大气质量为 m 情况下的太阳直接辐射(垂直于光线); $S_{0,\Delta\lambda}$ 为相应光谱段内的大气外界的太阳辐射; $q_{\Delta\lambda}$ 为该光谱段内的大气光谱透明度。表3列举了几个有代表性的光谱段光谱透明度的变化情况。



、圖一 珠峯地區不同高度上垂直于入射方向的太陽直接輻射的光譜分布 (4-5月平均 時間:9時30分)

表3 珠峰地区大气光谱透明度 (q_{λ}) 的变化

地区	高度 (米)	光 谱 段				
		m 相 对 大气质量	$< 0.387\mu$ (紫外)	0.387 -0.523μ (紫、兰、绿)	0.523 -0.716μ (黄澄红)	$> 1.0\mu$ (红外)
珠 峰	5000	1.24	0.733	0.803	0.929	0.778
樟 木	2200	1.24	0.603	0.719	0.845	0.588

大气中对太阳辐射减弱起主要作用的是：空气分子的散射，气溶胶微粒的减弱，臭氧、水汽等对辐射的选择吸收。可以认为分子散射和气溶胶的减弱是波长的一种连续函数。如果大气中没有选择吸收的物质，那么大气的光谱透明度就应随着波长的增加而有规律的增加。但是，由于大气中臭氧、水汽等辐射吸收物质的存在，却使这种关系遭到破坏。从表3中可以看出，在太阳光谱的紫外部分（ $\lambda < 0.387\mu$ ）大气透明度是很差的，这主要是由于臭氧对太阳紫外辐射吸收的结果。在紫外辐射区分布着一系列强烈的臭氧吸收带（主要有 $0.220 - 0.320\mu$ 的哈特雷带， $0.300 - 0.345\mu$ 的汉琴斯带），高层大气中的臭氧层，在这两个主要吸收带几乎吸收了波长短于 0.300μ 的全部太阳紫外辐射。

在从 $0.523 - 0.716\mu$ 的黄澄红太阳光谱区，虽然也有一个臭氧吸收带（ $0.440 - 0.750\mu$ 的夏皮尤带），但它的吸收很弱，而大气分子散射和气溶胶减弱的迅速下降不但补偿了臭氧的吸收，而且导致大气在这个光谱带出现最大的透明效应。大气透明度在 $\lambda > 1.0\mu$ 的红外光谱区的再度下降，显然与水汽对太阳辐射的选择吸收有关。特别是在位于喜马拉雅山南坡的樟木，这里气候温和，降水充沛（年降水量达2500毫米以上），在我们观测的几天中每天午后都出现阵性降水。由于这里大气中含量很高的水汽对太阳红外辐射的吸收，所以，在这个地

区红外太阳辐射的光谱透明度最小。如果粗略地认为在 $>1.0\mu$ 的太阳红外光谱区大气的分子散射和气溶胶的减弱可以忽略不计, 那么, 在与地面垂直的方向上, 樟木地区约有 40% 的波长 $>1.0\mu$ 的太阳辐射能 ($\sim 0.25 - 0.30$ 卡/厘米²·分) 被水汽所吸收。

水汽、臭氧等对太阳辐射的吸收不但减弱了太阳辐射, 同时也改变着太阳光谱的组成比例。表 4 列出了珠峰地区不同高度上部分光谱段中的太阳辐射强度及其在太阳总辐射中所占的比例。由表 4 可以看出, 随着高度的增加, 虽然紫外辐射强度也有所增强, 但它在入射的总的直接太阳辐射中所占的比例却没有什麼变化, 如波长短于 0.487μ 的紫外、紫、青色太阳直接辐射在 6300 米处为 2200 米的 1.25 倍。然而由于 6300 米太阳直接辐射的增强, 它与全波长的太阳直接辐射之比, 在实际均均在 17%—18% 之间。

表 4 珠峰地区不同高度上太阳光谱辐射的变化

观测地点 (高度) (米)	纬度 (N°)	经度 (E°)	太阳高度 (R°)	< 0.387 μ		< 0.487 μ		0.487—0.640 μ	
				$S_{\Delta\lambda}$ (卡/厘米 ² ·分)	$S_{\Delta\lambda}/S_{0-1000}$ (%)	$S_{\Delta\lambda}$ (卡/厘米 ² ·分)	$S_{\Delta\lambda}/S_{0-1000}$ (%)	$S_{\Delta\lambda}$ (卡/厘米 ² ·分)	$S_{\Delta\lambda}/S_{0-1000}$ (%)
樟木 (2200)	28.0	86.0	53.8			0.236	17.9	0.299	22.7
拉萨 (3600)	29.1	91.1	54.8	0.088	6.0	0.257	17.7		
珠峰 (5000)	28.2	86.8	52.3	0.101	6.2	0.271	16.6		
珠峰 (6300)	28.0	87.0	51.5			0.296	17.1	0.354	20.5

0.487—0.716 μ		0.640—1.0 μ		> 0.716 μ		> 1.0 μ	
$S_{\Delta\lambda}$ (卡/厘米 ² ·分)	$S_{\Delta\lambda}/S_{0-1000}$ (%)	$S_{\Delta\lambda}$ (卡/厘米 ² ·分)	$S_{\Delta\lambda}/S_{0-1000}$ (%)	$S_{\Delta\lambda}$ (卡/厘米 ² ·分)	$S_{\Delta\lambda}/S_{0-1000}$ (%)	$S_{\Delta\lambda}$ (卡/厘米 ² ·分)	$S_{\Delta\lambda}/S_{0-1000}$ (%)
		0.447	33.9			0.336	25.5
0.477	32.8			0.721	49.5	0.370	25.4
0.506	31.0			0.855	52.4	0.467	28.6
		0.564	32.6			0.515	29.8

在波长短于 1.00μ 的太阳光谱段中，情况也基本上相似于紫外辐射，如在 $0.640—1.00\mu$ 的红色和近红外光谱区，就太阳辐射的绝对值而言，6300米比2200米要高出 $0.117\text{卡/厘米}^2\cdot\text{分}$ ，但就其在太阳直接辐射中的比例而言，不但没有增加，反而稍有下降。

在太阳辐射的红外光谱区（ $\lambda > 0.716\mu$ ， $\lambda > 1.00\mu$ ），无论是辐射的绝对能量，还是它在太阳总辐射中的比重都随高度显著增大，如6300米测得的 $\lambda > 1.0\mu$ 的太阳红外辐射要比2200的樟木地区大 $0.179\text{卡/厘米}^2\cdot\text{分}$ ，而它在太阳直接辐射中所占的比例也比樟木高4%以上。红外辐射随高度的增加主要是大气中水汽含量随高度迅速下降，而水汽吸收的太阳辐射（红外）也随之下降的缘故。大气中水汽的来源主要是靠地表的蒸发而向上输送，在珠峰5000米以上，下垫面主要为岩石、砾石和冰川，冰川的大部分又为表碛所复盖，加上气温较低，这里蒸发条件是不利的，因此，5—6千米以上的空气层中水汽含量很低。根据在珠峰地区的探空资料，这里整层大气的含水量经常低于0.1厘米，所以水汽对太阳辐射的吸收就要比樟木、拉萨要小得多，除此而外，又由于在5000米的高度以上大气较为清洁，由下垫面向上输送的粗粒物质也相对的少，根据我们对这里混浊状况的计算，在珠峰5000米以上气溶胶粒子明显地比平原地区小，（其平均半径小于 0.06μ ），这种气溶胶的微粒具有对较短波长的辐射有较强的减弱，而对较长的波长的辐射减弱较小的性质。综合这两个因素的影响，我们可以认为，在珠峰地区太阳的红外辐射随高度的增加而增强的速度要超过较短波长辐射随高度的增加而增加的速度，这一结论也从表5中得到了证实。

表5 珠峰地区太阳紫外、紫、兰辐射和红外辐射随高度的相对变化
（以樟木的辐射为1.0）

表 5

地 区 波 长	樟 木 (2200米)	拉 薩 (3600米)	珠 峰 (5000米)	珠 峰 (6300米)
$<0.487\mu$	1.00	1.09	1.15	1.25
$>1.00\mu$	1.00	1.10	1.39	1.54

在珠峰地区，红外辐射随高度的变化主要是由于吸收物质（水汽）随高度变化的结果。而变化较小的紫外和较短波长的辐射（表5）表明，在这一光谱区中，吸收物质随高度没有明显的变化。事实上，对太阳短波紫外辐射具有强烈吸收的臭氧主要分布于25—30公里以上的高层大气中，因此，臭氧的吸收辐射尽管在珠峰这样的高度上也并不比平原地区少。在这里紫外辐射随高度的增强主要就是因为空气分子的散射和气溶胶减弱随高度而下降的结果。

在同一高度上，太阳辐射的光谱组成主要取决于太阳辐射所经过的大气路径，太阳光路愈长，所受到的减弱也就愈大。图2表示出珠峰5000米晴天太阳光谱辐射随太阳高度角的变化。在一天中除太阳辐射的绝对通量发生变化而外，各光谱成份的比例也或多或少地改变着。表6为珠峰5000米测点的各太阳光谱辐射在总积分通量中比例的日变化。

从表6我们看到，在珠峰地区，太阳辐射的光谱比例在一天中变化是很小的。在光谱的紫外部分（ $<0.387\mu$ ）表现了较为明显的日变化，其变化幅度也不过2.2%，红外辐射比例在观测时间中的变化也不超过3%。

图3绘出了几个光谱段（ $<0.487\mu$ ， $0.487—1.0\mu$ ， $>1.0\mu$ ）辐射比例的日变化曲线。在 $<0.487\mu$ 的紫外光谱区和 $>1.0\mu$ 的红外光谱区，6300米的比例要高于5000米，而在 $0.487—1.0\mu$ 光谱区

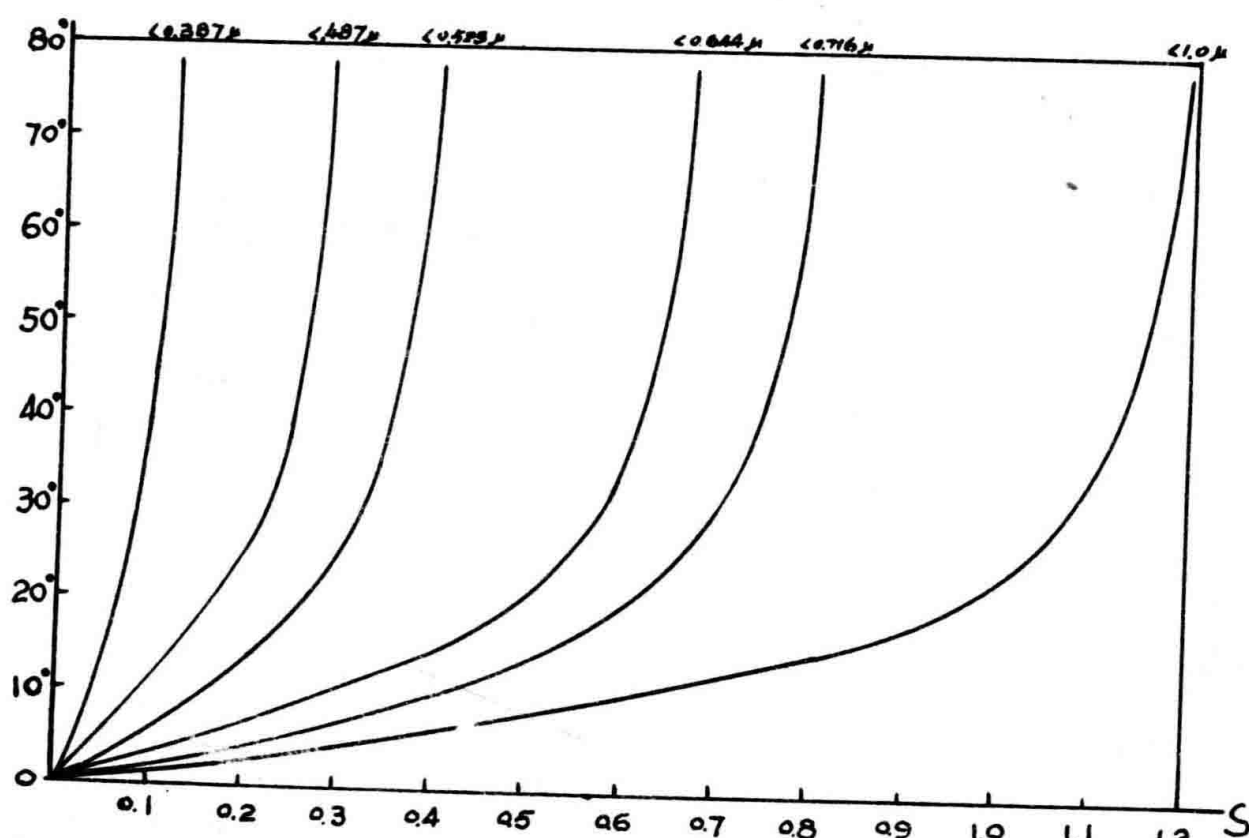


图2. 珠峰(5000米)太阳光谱辐射(S)随太阳高度的变化。 $\text{kcal/cm}^2\cdot\text{分}$

表6 珠峰(5000米)太阳光谱辐射分量比例的变化
(1968年5月4—6日)

时间 (真太阳时)	大气质量 m		<0.387	$\frac{0.387}{0.487}$	$\frac{0.487}{0.525}$	$\frac{0.525}{0.644}$	$\frac{0.644}{0.716}$	$\frac{0.716}{1.000}$	>1.000	S_{0-100} ($\text{kcal/cm}^2\cdot\text{分}$)
	相对	绝对								
8	1.80	0.99	5.5	9.9	6.2	16.7	8.1	23.9	29.7	1.561
9	1.57	0.75	5.9	10.3	6.5	16.8	7.8	24.0	28.7	1.615
10	1.16	0.64	6.3	10.5	6.0	16.2	8.0	23.7	28.5	1.642
11	1.05	0.58	6.2	10.6	6.5	16.9	8.0	23.3	28.5	1.657
12	1.02	0.56	6.9	9.7	7.4	16.0	8.0	23.6	28.4	1.664
13	1.05	0.58	7.4	9.8	6.5	16.4	8.1	23.5	28.3	1.652
14	1.16	0.64	7.0	9.8	6.6	16.7	8.1	23.5	28.3	1.634
15	1.37	0.75	6.3	9.6	6.8	16.7	8.4	23.6	28.6	1.598
16	1.81	0.99	6.4	9.4	6.3	16.6	7.8	24.7	28.8	1.536
17	2.87	1.57	5.2	8.2	6.6	16.8	8.3	25.9	29.0	1.404

中 5000 米的反而高于 6300 米的。

光谱分量比例的日变化较小，这是珠峰这样的特高山地区区别于平原地区的显著的特点之一。

在平原地区，空气密度大，大气中水汽、气溶胶含量高，因此太阳光路愈倾斜，所受到的减弱就愈强。随着分子散射和气溶胶散射的增强，太阳光谱中的红外辐射的比例也愈益增大。根据 Ka-
дaтyш/对巴甫洛夫斯克的观测计算〔4〕，波长

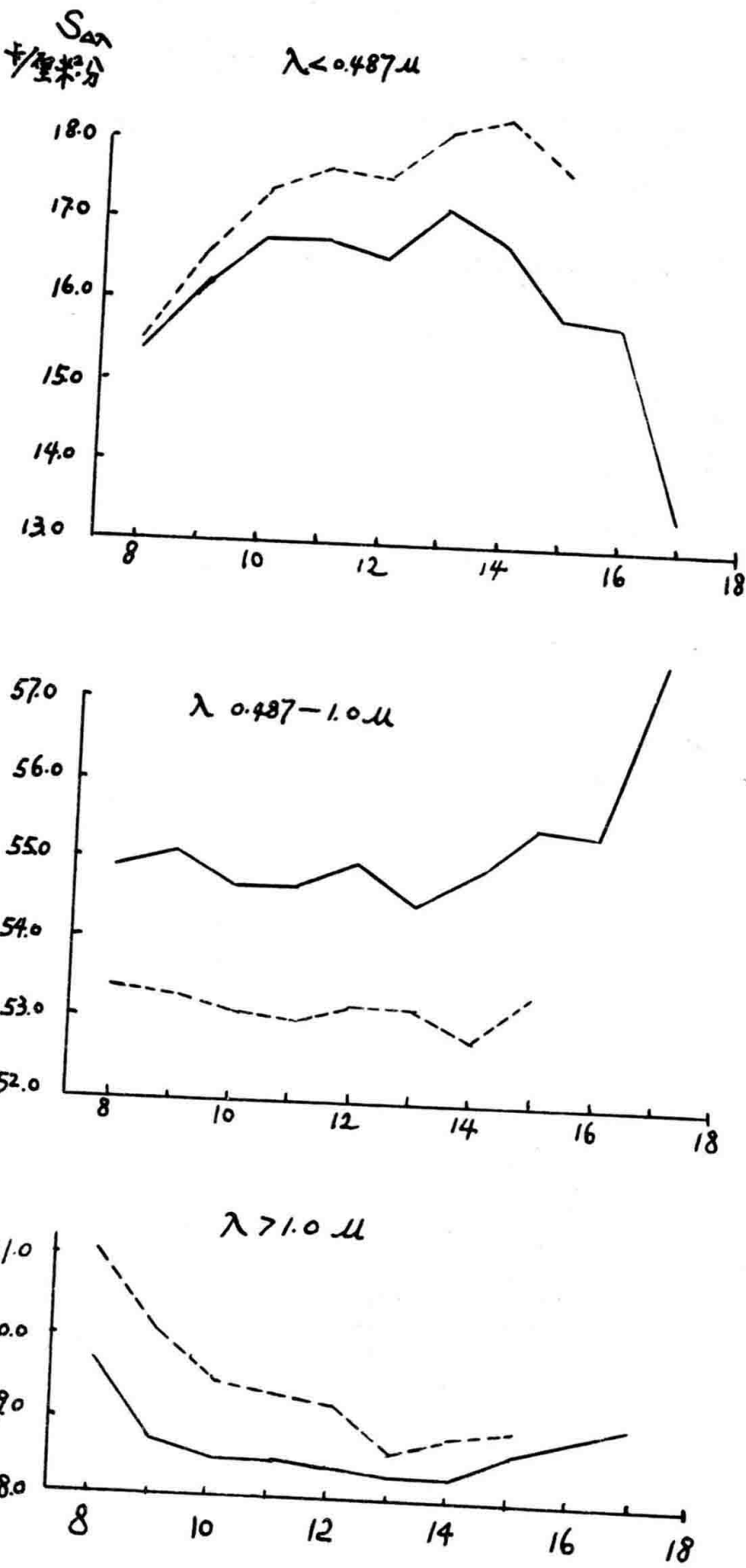


图 3, 珠峰太阳光谱辐射日变化曲线

$> 0.35 \mu$ 的红外太阳辐射在太阳总辐射中所占的比例。当太阳高度角为 50° 时为 57.0% ，而当太阳高度角降低到 20° 时，则增加到 64.0% ，二者变化达 7.0% ，在珠峰地区（5000米）当太阳高度角从 72° 降低到 20° 时，同样光谱区的太阳辐射的比例仅增加了 3% （从 60% 增至 63% ）。

在珠峰地区，太阳直接辐射的各光谱分量的绝对能量，在一天中的变化也同样反映了高山地区的特色。表7列举了几个光谱段的太阳辐射能相对于正午（12时）的变化。从表中我们可以看到，紫外辐射的变化幅度要比红外辐射大得多，这一方面是在太阳光路中高层大气的臭氧层随着太阳天顶距的增大而增厚，因而吸收的太阳紫外辐射也增加，另一方面是大气的分子和气溶胶对短波辐射有较强的减弱作用。对太阳辐射的红外部分（ $> 0.716 \mu$ ），主要的减弱物质是水汽。表中不同时间的红外辐射相对于正午12时的变化很小这一事实说明在珠峰地区上空水汽含量小而且稳定。

表7 珠峰 5000 米太阳紫外、红外辐射相对于正午（12时）的变化

时间(真太阳时)	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
太阳高度(h°)	53.8	47.0	59.9	71.8	78.1	71.6	59.7	46.7	33.6	20.4
大气质量(相对)M	1.80	1.37	1.16	1.05	1.02	1.05	1.16	1.37	1.81	2.87
光谱辐射比例 (S_{λ}/S_{12})										
$< 0.38 \mu$	0.75	0.83	0.90	0.90	1.00	1.06	0.99	0.88	0.85	0.63
$> 0.716 \mu$	0.97	0.98	0.99	0.99	1.00	0.99	0.98	0.96	0.95	0.89

结 论

1. 珠峰地区垂直（于光线）表面的太阳直接辐射随高度的增高而增强。4—5月间一些高度上（9时30分）平均太阳光谱辐射的变化可见于图1；

2. 太阳光谱透明度（ q_{λ} ）在太阳的紫外和红外辐射区均较低。前者是由于高层大气的臭氧吸收及大气分子、气溶胶减弱的综合结果，而后者则主要是水汽吸收所导致的；

3. 不同光谱的绝对辐射强度均随高度的增高而增强，但是它们在太阳总积分辐射通量中所占的比例变化则不尽相同；紫外辐射，可见光辐射区的比例随高度变化不大，红外辐射的比例则随高度明显增高，这是高原上大气中水汽含量随高度迅速下降的结果；

4. 在珠峰地区，太阳红外辐射随高度而增加的速度大大超过紫外辐射和可见辐射区，因此它是导致该地区太阳积分辐射通量随高度增强的主要因素；

5. 太阳直接辐射的各光谱分量，无论在其绝对能量方面或是在太阳总积分能量中的比例都没有显著的日变化，这一事实很好地反映了珠峰地区在晴天条件下大气稳定、清洁透明并且水汽含量很低的基本性质。

文 献

- (1) IGY Instruction Manual, Part VI: Radiation Instruments and Measurements, Annals of IGY, V(1957).
- (2) A.K. Angström and A.J. Drummond, Journal of Meteorology, Vol. 18, No. 3, 1961.
- (3) H.P. Thekaekara, A.J. Drummond, Nature Physical Science, Vol. 229, No. 6, 1971.
- (4) К. Л. Кондратьев "Актинометрия" 1965.