

太阳直接辐射的分光测量*

项月琴 周允华 单福芝**

(中国科学院地理研究所)

提 要

利用热电式相对日射表和八种有色玻璃滤光片, 于 1975—1978 年先后在我国七个地区(共十个测点)进行了太阳分光辐射的测量, 获得了 2698 组资料。根据这些资料, 分析了太阳高度、季节、地理纬度和海拔高度以及气溶胶和水汽等大气成份对各波段的太阳分光辐射的影响。最后, 用大气质量、浑浊度系数和地面绝对湿度三个物理量作参数, 以表格的形式列出了各波段分光辐射的相对通量值。

随着国民经济的迅速发展, 工农业部门对日射测量工作也提出了新的要求, 例如太阳能的利用(特别是光-电转换效率的计算), 太阳辐射老化效应的研究, 太阳能的模拟, 光合作用的研究, 光合有效辐射和光合潜力的计算等, 不仅要求知道太阳辐射在全波段的积分通量值, 而且还需要了解某些特定波段的分光辐射能及其随时间、空间和随气象条件的变化规律。特别是近几年来, 我国地球资源遥感技术的发展, 要求对天空背景辐射光谱特性的了解更为迫切。

我国幅员辽阔, 海拔高度相差悬殊, 气候条件差异很大。因此, 太阳分光辐射的时空变化也就变得极为复杂。所以, 在我国开展太阳分光辐射的研究工作就显得尤为必要。

一、观 测 概 述

观测仪器采用苏制 AT-50 型热电式相对日射表和八种国产的锐截止型有色玻璃滤光片, 从而把太阳直接辐射从紫外到红外分成九个光谱段。计算辐射通量时, 考虑了相对日射表的温度效应^[1]。滤光片的透光性能是用分光光度计逐个测定的(见表 1 和图 1)。它们的长波截止波长为 2800 毫微米。

表 1 滤光片的型号和短波截止波长

滤光片型号	JB ₂	JB ₅	JB ₈	CB ₃	CB ₅	HB ₁₁	HB ₁₆	HWB ₄
短波截止波长 (毫微米)	400	434	472	523	574	630	700	980

观测都是在日面 5° 视角内无云的天气条件下进行的。清晨和傍晚半小时观测一次,

* 本文 1979 年 1 月 13 日收到。

** 参加本工作的还有田国良、谢贤群、鲍士柱、周树秀等同志。

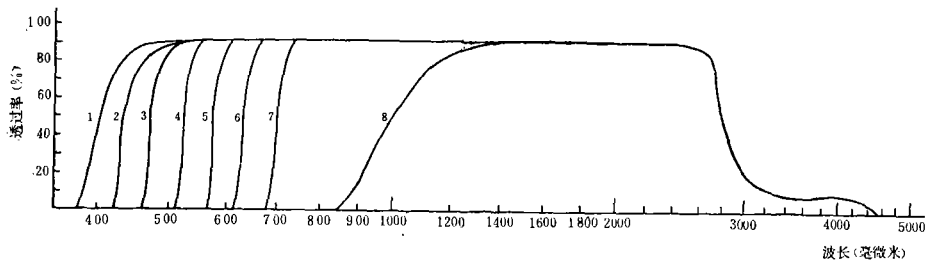


图 1 滤光片的透过率曲线

(1—JB₂; 2—JB₅; 3—JB₈; 4—CB₃; 5—CB₅; 6—HB₁₁; 7—HB₁₆; 8—HWB₄)

其余时间一小时一次。观测次序为：S→JB₂→JB₅→…→HB₁₆→HWB₄→S→HWB₄→HB₁₆→…→JB₅→JB₂→S(S为不罩滤光片时的直接辐射)。观测一次约需10分钟左右。计算时取其前后两次观测的平均值。

表2是各测点的地理位置、观测日期和观测次数。

表2 测点位置、观测日期及观测次数

测点		东经	北纬	海拔高度 (米)	观测日期	观测次数
北 京	春	116°20′	39°56′	51	78年4月14日—5月18日	181
	夏				78年6月26日—7月3日, 8月13日—8月29日	93
	秋				78年10月4日—11月4日	225
	冬				77年12月22日—78年1月2日	206
苏 州	120°38′	31°19′	6	75年10月1日—10月31日	55	
桂 林	110°18′	25°20′	162	78年9月20日—11月4日	234	
南 宁	108°21′	22°49′	72	78年9月13日—11月5日	230	
呼 伦 贝 尔 草 原	上库力	120°27′	58°15′	618	75年5月4日—6月8日	205
	完工	118°53′	49°11′	607	75年5月4日—6月26日	260
	巴克西	119°55′	49°19′	667	75年4月25日—6月20日	136
					76年4月17日—6月25日	191
	孟根楚鲁	119°48′	48°48′	654	75年5月2日—6月22日	193
					76年4月24日—7月6日	233
拉 萨	91°08′	29°42′	3620	75年10月4日—10月20日	145	
昌 都	96°59′	30°11′	3170	76年7月8日—7月24日, 8月26日—9月3日	111	

二、太阳直接辐射中紫外、可见和红外辐射的时空变化

设 S 为日射表测得的直接辐射通量, S'_λ 为套上短波截止波长为 λ 的滤光片后测得的辐射通量值, 则太阳直接辐射中波长小于 λ 的分光辐射通量 S_λ 可按下式计算:

$$S_{\lambda} = S - \frac{1}{\bar{\phi}} S'_{\lambda} - \Delta S \quad (1)$$

式中 $\bar{\phi}$ 为滤光片主带平均透过率, ΔS 为波长大于 2800 毫微米的太阳直接辐射通量, 它的量值很小, 我们利用文献^[2]第 399 页的表 1 来计算此值。

为了研究的方便, 我们定义一个分光辐射的相对通量 $\eta_{\lambda} = \frac{S_{\lambda}}{S}$, 它对太阳高度和气象要素具有相对的稳定性。按此定义, 则位于 λ_1 至 λ_2 波段内的分光辐射相对通量 $\eta_{\Delta\lambda}$ 为:

$$\eta_{\Delta\lambda} = \frac{S_{\Delta\lambda}}{S} = \eta_{\lambda_2} - \eta_{\lambda_1} \quad (2)$$

式中 $S_{\Delta\lambda}$ 为 λ_1 至 λ_2 这一波段内的分光辐射通量。

图 2 给出了我们在各地实测的紫外($\lambda < 400$ 毫微米)、可见(400—700 毫微米)和红外($\lambda > 700$ 毫微米)三个波段的相对通量值的平均日变化曲线。

从图 2 可以看到这三个波段的相对通量时空变化的几个基本特点:

1. $\eta_{\Delta\lambda}$ 的日变化: 紫外和可见波段相对通量的日变化形势是早晚低而中午高, 红外波段正好相反, 中午低早晚高。它们在清晨和傍晚随时间的变化非常快, 而在中午前后的一段相当长的时段内则比较稳定, 变化不大。

2. $\eta_{\Delta\lambda}$ 随季节的变化: 北京的测量表明, 各波段的相对通量有明显的季节变化, 一般而言, 紫外和可见波段的相对通量是夏季大于冬季, 红外波段的则是冬季大于夏季(见图 2 和表 3)。

表 3 北京地区不同季节的紫外、可见和红外波段的相对通量 $\eta_{\Delta\lambda}(\%)$
(取 9—15 时的平均值)

季 节	$\eta_{\text{紫外}}$	$\eta_{\text{可见}}$	$\eta_{\text{红外}}$
春	4	39	57
夏	4	42	54
秋	3	39	58
冬	2	34	64

3. $\eta_{\Delta\lambda}$ 随纬度的变化: 由于测量是在不同的年份和月份里进行的, 又由于各地海拔高度和气候状况的差异, 所以仅根据目前的资料, 尚难对 $\eta_{\Delta\lambda}$ 的纬度变化作出准确的概括。但北京、苏州、桂林和南宁四测点的观测却正好都是在 10 月份前后进行的, 四测点海拔高度的差异也不太大, 因此有可能对它们作一大致的比较。由图 2 和表 4 可以看出: 一般而言, 红外波段的相对通量 $\eta_{\Delta\lambda}$ 随着纬度的增加而增加, 可见波段则相反, 它随着纬度的增加而减小。而紫外波段因相对通量的数值很小, 它随纬度的变化不明显。

4. $\eta_{\Delta\lambda}$ 随海拔高度的变化: 1975 年 10 月, 在苏州和拉萨进行了对比观测。这两个地方纬度大致相同, 而高度相差 3600 多米, 从表 5 可知, 拉萨紫外波段的相对通量是苏州的 1.7 倍, 可见波段差异不大。而在红外波段, 拉萨却比苏州要低些。就各波段的绝对能量而言, 拉萨的比苏州的高得多, 紫外、可见和红外三个波段的能量, 拉萨分别是苏州的 2.3 倍、1.3 倍和 1.3 倍。

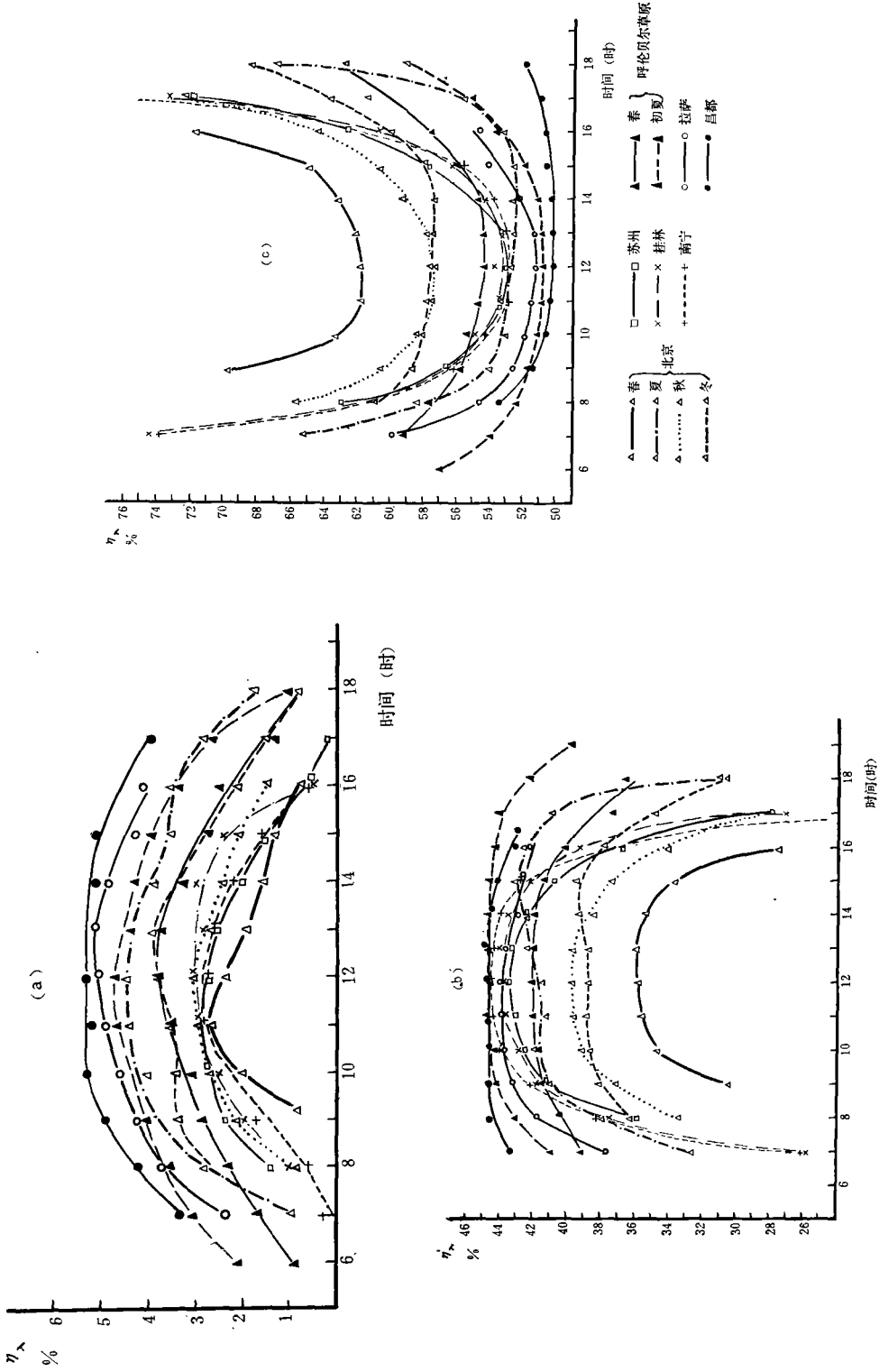


图 2 各测点的紫外、可见和红外波段相对通量的平均日变化
 ((a) 紫外波段; (b) 可见波段; (c) 红外波段。)

表 4 相对通量 $\eta_{\Delta\lambda}(\%)$ 随纬度的变化
(秋季, 9—15 时的平均)

地 点	纬 度	$\eta_{\text{紫外}}$	$\eta_{\text{可见}}$	$\eta_{\text{红外}}$
北 京	39°56'N	3	39	58
苏 州	31°19'N	3	42	55
桂 林	25°20'N	3	43	54
南 宁	22°49'N	2	44	54

表 5 太阳分光辐射随海拔高度的变化
(1975 年 10 月)

地 点	9—15 时的平均相对通量(%)			中午12时的平均辐射通量(卡/厘米 ² ·分)		
	$\eta_{\text{紫外}}$	$\eta_{\text{可见}}$	$\eta_{\text{红外}}$	$S_{\text{紫外}}$	$S_{\text{可见}}$	$S_{\text{红外}}$
拉 萨	5	43	52	0.07	0.63	0.77
苏 州	3	42	55	0.03	0.47	0.61

三、太阳分光辐射相对通量 η_i 与气象条件的关系

通过上面对紫外、可见和红外三波段的初步分析可以看到：太阳分光辐射的相对通量与观测时间、季节、纬度、海拔高度以及气团属性等各种因素有关。因此，在某地某地的测量结果就难于延用于另一时间和另一地点，这就给分光辐射资料的使用造成了极大的困难。解决的办法是通过辐射传输方程进行分析和简化，从而找出决定分光辐射变化的最主要因素，然后根据我们所获得的大量实测资料来确定出它们与这些要素之间的定量关系，从而使它们具有普遍的使用价值。

1. 太阳辐射传输方程及其简化：

太阳辐射穿过大气时要受到三种减弱：(1) 空气分子的散射；(2) 悬浮于空气中的固体和液体粒子，即气溶胶物质的散射和吸收；(3) 各种气体，主要是水汽、 O_3 和 CO_2 的选择吸收。根据辐射传输方程，到达地表的波长为 λ 的太阳直接辐射 I_λ 可写成：

$$I_\lambda = I_{0\lambda} e^{-\tau_{1\lambda} m - (\tau_{2\lambda} + \tau_{3\lambda} + \tau_{4\lambda} + \tau_{5\lambda}) m_h} \quad (3)$$

式中 $I_{0\lambda}$ 为大气上界的太阳光谱辐照， m 和 m_h 分别为观测时的绝对大气质量和相对大气质量， $\tau_{1\lambda}$ 为标准海平面上大气分子的光学厚度， $\tau_{2\lambda}$ 、 $\tau_{3\lambda}$ 、 $\tau_{4\lambda}$ 和 $\tau_{5\lambda}$ 分别为测点的气溶胶、水汽、 O_3 和 CO_2 的光学厚度。大气中 O_3 含量的变化比水汽及气溶胶含量的变化要小得多，可作为常数来处理，而 CO_2 的吸收主要发生在太阳辐射能量很弱的远红外区，这里也忽略不计。因此，(3) 式可简化为：

$$I_\lambda = I_{0\lambda} e^{-\tau_{0\lambda} m - (\tau_{2\lambda} + \tau_{3\lambda}) m_h} \quad (4)$$

式中 $\tau_{0\lambda}$ 为包括空气分子和 O_3 在内的大气光学厚度，它是波长的已知函数。研究表明^[3]：气溶胶光学厚度通常符合关系式 $\tau_{2\lambda} = \beta \lambda^{-\alpha}$ ，式中 α 称为波长指数，取决于气溶胶的体分布，平均值可取 1.3。 β 称为 Ångström 大气浑浊度系数，它取决于整层大气的气溶胶总含量。水汽的光学厚度 $\tau_{3\lambda}$ 可写成 $\tau_{3\lambda} = k_\lambda w$ ， k_λ 为水汽质量吸收系数， w 为可

降水量, 如果再取用经验关系式 $w = ae$, e 为地面绝对湿度, a 为经验常数^[4,5], 则(4)式可简化为:

$$I_{\lambda} = I_{0\lambda} e^{-(\tau_{0\lambda} + \beta^* \lambda^{-1.3} + ak_{\lambda} e^*)m} \quad (5)$$

式中 $\beta^* = \frac{p_0}{p} \beta$, $e^* = \frac{p_0}{p} e$, 它们是经气压订正后的大气浑浊度系数和地面绝对湿度, p 和 p_0 分别为测点气压和海平面标准大气压。这样, 对于波长小于 λ 的太阳直接辐射的相对通量 η_{λ} 可写成:

$$\eta_{\lambda} = \frac{\int_0^{\lambda} I_{0\lambda} e^{-(\tau_{0\lambda} + \beta^* \lambda^{-1.3} + ak_{\lambda} e^*)m} d\lambda}{\int_0^{\infty} I_{0\lambda} e^{-(\tau_{0\lambda} + \beta^* \lambda^{-1.3} + ak_{\lambda} e^*)m} d\lambda} \\ = \eta_{\lambda}(m, \beta^*, e^*) \quad (6)$$

也就是说相对通量 η_{λ} 仅仅取决于绝对大气质量 m 、订正的大气浑浊度系数 β^* 和订正的地面绝对湿度 e^* 。因此, 我们可以根据实测资料定出 η_{λ} 跟 λ 及跟 m 、 β^* 和 e^* 的定量关系。这样, 不管是在什么地点, 什么季节和什么时刻, 只要知道了 m 、 β^* 和 e^* 三个参数, 就可以根据公式(2) 求出任一波长间隔 $\Delta\lambda$ 内的太阳直接辐射的分光通量值 $S_{\Delta\lambda}$:

$$S_{\Delta\lambda} = S \cdot (\eta_{\lambda_2} - \eta_{\lambda_1}) \quad (7)$$

式中直接辐射的积分通量 S 可通过常规仪器或从气象台站常规的日射观测资料中得到。

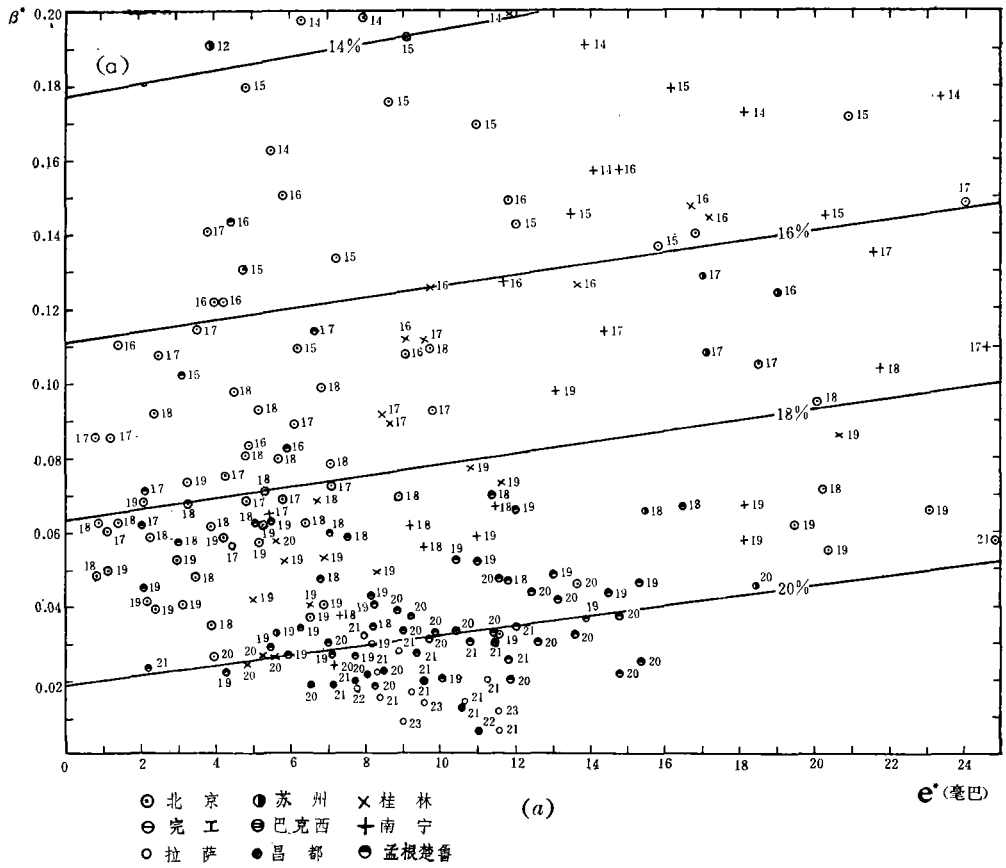
2. 对简化的辐射传输方程的检验:

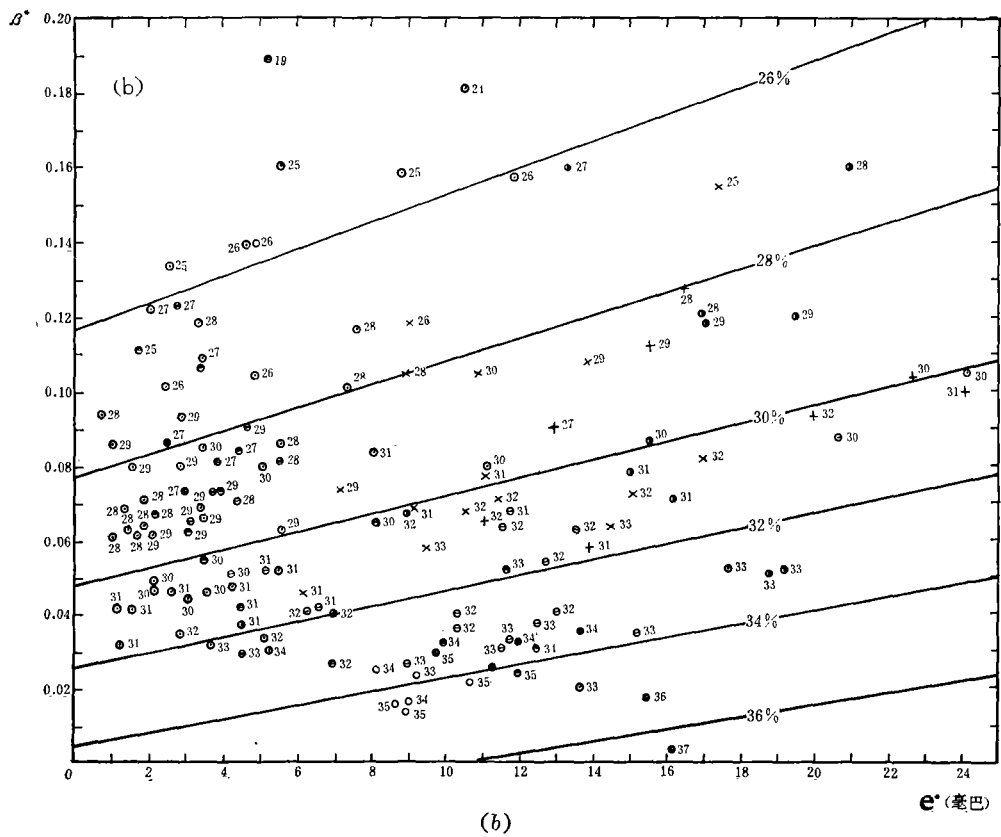
分光辐射相对通量 η_{λ} 的表达式(6) 是一个近似式, 因为: (1) 它把波长指数 α 取成定常值 1.3, 意味着把气溶胶都取为同一种体分布形式。实际上, 体分布显然是随地理位置和气候属性而变化的; (2) 用地面绝对湿度 e 代替了大气可降水量 w , 并取用了同一个经验常数 a , 实际上, 在不同的地点和不同的季节, 经验常数 a 的取值显然是不同的, 甚至有人认为 w 和 e 两者之间根本就没有关系^[6]。因此, 在我国的具体条件下, 能否把各地的和各季节的 η_{λ} 都表达成 m 、 β^* 和 e^* 三个变量的函数, 或者说, 不管在何时何地, 只要当三个参数 m 、 β^* 和 e^* 相同, η_{λ} 值是不是就唯一确定了? 这还必须通过实践来检验。

从我们使用的八种滤光片中, 任意的选取了气象学中常用的三种滤光片 CB₃、HB₁₁ 和 HB₁₆(相应于 Schott 滤光片 OG₁、RG₂ 和 RG₈) 的测量结果, 并任意选取了三个绝对大气质量 1.5、2.0 和 2.5 (实际选取时都有 ± 0.2 的取值范围), 从而点出了三张以 $\beta^* \sim e^*$ 为座标的 η_{λ} 的点聚图¹⁾(图 3)。

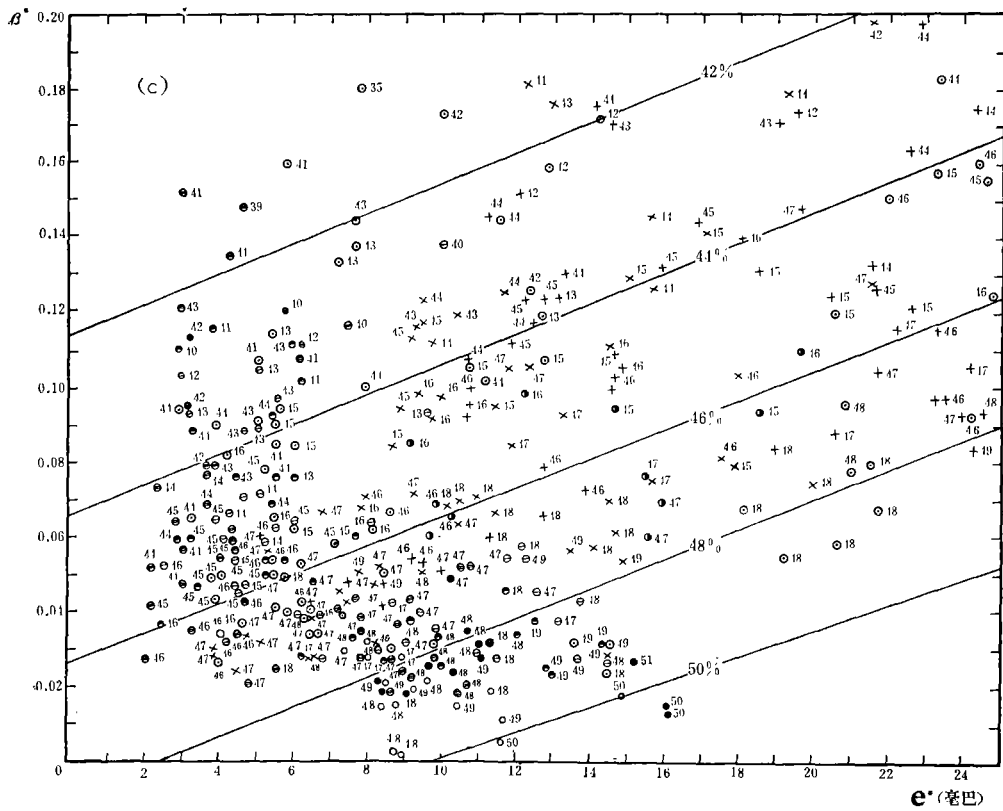
这些图惊人地表明: 我们所测得的资料, 不管是平原的还是高原的, 不管是高纬的还是低纬的, 也不管是哪一个季节或哪一个观测时间的, 只要 m 、 β^* 和 e^* 三个参数相同, 则 η_{λ} 的值就是唯一确定的。这就表明了我们所测得的全部分光辐射的相对通量 η_{λ} 值确实都能非常良好地统一在 m 、 β^* 和 e^* 三个参数之下。这就有力地说明了在我们测量的精度范围内, (6) 式中所包含的各种近似是允许的。因此, 近似式(6) 也是成立的。

1) 根据原始资料作列线图时, η_{λ} 值取小数点后一位。由于图中数字太密, 为保持图幅的清晰起见, 清绘时 η_{λ} 值的小数部份四舍五入。





(b)



(c)

图3 在相同的 m 值下, $\eta_{\lambda}(\%)$ 和 β^*, e^* 的关系

((a) $m=2.0$, $\lambda=523$ 毫微米; (b) $m=2.5$; $\lambda=630$ 毫微米; (c) $m=1.5$, $\lambda=700$ 毫微米)

3. 气象条件对太阳分光辐射相对通量的影响

从图 3 可以清楚地看到, 当绝对大气质量 m 相同时, 分光辐射相对通量值 η_{λ} 随着订正的大气浑浊度系数 β^* 的增加而减小, 随着订正的地面绝对湿度 e^* 的增加而增加。也就是说, 空气越浑浊, 或越干燥, 则太阳直接辐射中短波成份所占的比例就越小, 而长波成份所占的比例就越大。反之, 空气越清洁, 或越潮湿, 则短波的比例就越大, 而长波的比例就越小。气象条件对分光辐射影响的这种特性是很好理解的, 因为气溶胶对短波的散射要比对长波的散射强, 所以天空越浑浊, 直接辐射中短波成份也必然越小; 而水汽的吸收则是发生在红外波段, 因此, 随着湿度的增大, 长波段的成份也就随之减小了。

从图 3 还可以看到: 空气湿度对 η_{λ} 的影响要比气溶胶的影响小得多。表 6 列出了我们在各地观测期间 β^* 和 e^* 的平均值和均方差。在仔细考察了表 6 中 β^* 和 e^* 的取值范围, 并结合图 3 比较了 β^* 和 e^* 的变化对 η_{λ} 的影响以后, 就可以发现: 一般而言对不同的地区, 或对同一地区的不同季节, 由于浑浊度的差异造成的 η_{λ} 的差异要比由于湿度的差异造成的 η_{λ} 的差异大得多。特别是在同一地区的同一季节里, β^* 的日变化和逐日变化幅度要比 e^* 的变化幅度大得多, 特别是在同一地区的同一季节里, β^* 的日变化和逐日变化幅度要比 e^* 的变化幅度大得多, 因此, 就气象状况对分光辐射相对通量 η_{λ} 的影响而言, 就更应重视气溶胶的影响。

表 6 各测点观测期间 β^* 和 e^* (毫巴) 的平均值和均方差

测 点		$\bar{\beta}^* \pm \delta\beta^*$	$\bar{e}^* \pm \delta e^*$
北 京	春	0.204 ± 0.105	2.7 ± 1.3
	夏	0.132 ± 0.081	22.0 ± 3.8
	秋	0.097 ± 0.068	6.2 ± 2.4
	冬	0.114 ± 0.082	2.7 ± 1.3
苏 州 桂 林 南 宁		0.115 ± 0.057	16.7 ± 4.2
		0.099 ± 0.058	11.7 ± 4.1
		0.111 ± 0.062	17.7 ± 6.7
呼 伦 贝 尔 草 原	春	0.079 ± 0.034	4.4 ± 2.2
	初 夏	0.043 ± 0.020	10.5 ± 3.2
拉 萨 昌 都		0.024 ± 0.015	9.3 ± 1.2
		0.025 ± 0.013	11.0 ± 2.6

四、以 m 、 β^* 、 e^* 为参数的分光辐射相对通量 η_{λ} 表

我们将 1975—1978 年在全国十个测点用八种滤光片获得 2698 组 η_{λ} 资料, 按不同的 m 、 β^* 和 e^* 进行分级, β^* 分为 0.040、0.090、0.150 和 0.250 四级, 它们的实际取值范围是 $\beta^* \leq 0.069$, 0.070—0.109, 0.110—0.199 和 $\beta^* \geq 0.200$, 分别代表清洁、比较清洁、浑浊和很浑浊的四种大气状况。 e^* 分为 5.0 毫巴、15.0 毫巴和 25.0 毫巴三级, 它们的取值范围分别是 $e^* < 10.0$ 毫巴、10.0—20.0 毫巴和 $e^* > 20.0$ 毫巴, 可分别代表干燥、中等湿度和潮湿三种湿度状况。由此统计得到的平均 η_{λ} 值列在本文最后附表中。表中最后一行还列出了垂直于入射方向的全波段直接辐射积分通量的平均值 S 。

需要指出的是，在较大的大气质量、潮湿和很浑浊的大气情况下，由于我们实际观测资料较少，所以表中这部份数据的代表性可能要差一些。

利用附表查算 η_{λ} 时，需要预先知道 m, β^* 和 e^* 三个参数，前两个参数可根据观测时间和地面常规气象资料计算出来，而参数 β^* 却难于得到。我们曾对呼伦贝尔草原春季和初夏的大气浑浊度作过分析和讨论^[7]，但就全国而言，目前尚无一份系统完整的大气浑浊度测量资料以资参考。补救的办法是：可利用附近气象台站的或者使用者实测的直接辐射积分通量 S 来代替 β^* 这个参数，也就是说，根据 S 和 m, e^* 这三个参数，也可以从附表中查出相应的 η_{λ} 值。

一些研究者曾对太阳直接辐射的光谱分布作过不少研究。在理论计算方面，O. Avastru^[8]的考虑最为详尽，他的计算结果已被人们广泛引用。在实验测量方面，F. Ambrosetti 等人曾于 1958—1966 年在瑞士洛迦诺山(阿尔卑斯山南麓，海拔 580 米)用 RG₈ 滤光片(透光界限为 700 毫微米)获得了大量的实测资料。G. Szeicz^[9]曾对上述两研究者的结果作过比较，在比较 η_{700} 的值时，他取用了太阳高度角 h 、550 毫微米处的大气光学厚度 τ 和可降水量 w 三个物理量作参数，对 τ 和 w 的计算他分别取用了下列关系式：

$$\tau = \tau' + \tau'' + \tau''' \tag{8}$$

$$\log w = 0.29 \sqrt{e} + 0.1 \tag{9}$$

式中 τ' 、 τ'' 和 τ''' 分别为标准海平面上的大气分子、气溶胶和 O_3 在 $\lambda=550$ 毫微米处的光

表 7 我们的 $\eta_{700}(\%)$ 的实测值与洛迦诺山的实测值和 O. Avastru 的理论计算值的比较(洛——洛迦诺山，A——O. Avastru)

太阳高度角	$\tau=0.2$						$\tau=0.3$				$\tau=0.5$			
	$w=5$ 毫米			$w=21$ 毫米			$w=5$ 毫米		$w=21$ 毫米		$w=5$ 毫米		$w=21$ 毫米	
	我国	洛	A	我国	洛	A	我国	A	我国	A	我国	A	我国	A
10°	31	35	30	33	41	34	26	25	29	29	15	16	17	19
15°	37	39	36	40	44	40	34	32	37	36	26	24	29	28
20°	40	42	40	43	45	43	37	36	40	40	31	30	34	33
30°	43	44	43	46	47	47	41	41	44	44	36	36	39	39
42°	45	46	45	48	48	48	43	43	47	47	40	40	43	43
90°	48	47	47	50	50	50	46	46	49	49	43	43	46	46

表 8 我们的 $\eta_{400}(\%)$ 的实测值与 O. Avastru 理论计算值的比较

大气质量	$\tau=0.2$						$\tau=0.3$						$\tau=0.5$					
	$w=5$ 毫米		$w=21$ 毫米		$w=30$ 毫米		$w=5$ 毫米		$w=21$ 毫米		$w=30$ 毫米		$w=5$ 毫米		$w=21$ 毫米		$w=30$ 毫米	
	我国	A	我国	A	我国	A	我国	A	我国	A	我国	A	我国	A	我国	A	我国	A
1.0	5	5	5	5	5	5	4	4	4	4	5	5	4	4	4	4	4	4
1.5	4	4	4	4	4	4	4	3	4	3	4	4	3	3	3	3	3	3
2.0	3	3	3	3	3	3	3	2	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2
2.5	3	2	3	2	3	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1
3.0	2	2	2	2	2	2	2	1	2	1	2	2	1	1	1	1	1	1
4.0	2	1	2	1	2	1	1	1	1	1	1	1						

附表 以 m, β^*, e^* 为参数的太阳光辐射相对通量 η_λ 表

β^*		0.040																										
		5.0					15.0					25.0																
e^* (毫巴)	m η_λ (%)	0.8	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	6.0	0.8	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	6.0	0.8	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	6.0
		400	5	5	4	3	3	2	2	1	1	1	6	5	4	4	3	2	2	1	1	5	4	4	3	2	2	2
434	10	10	9	8	6	6	5	4	3	11	10	9	8	6	6	5	4	4	4	11	9	8	7	6	5	4	4	4
472	15	14	13	11	10	9	7	6	5	16	14	13	12	10	9	8	6	5	15	13	12	11	10	8	7	6	6	6
523	23	22	20	18	16	15	13	11	10	24	22	20	19	17	16	14	12	10	23	21	19	18	17	14	12	11	11	11
574	30	29	27	25	23	21	19	17	14	31	30	28	26	25	23	20	18	15	32	29	27	26	24	21	18	16	16	16
630	38	38	36	33	31	29	26	23	20	39	37	35	33	31	28	25	22	20	40	38	36	34	32	29	26	23	23	23
700	49	48	45	43	42	40	37	35	31	50	48	46	44	43	39	37	33	51	49	47	45	44	40	38	35	35	35	35
980	73	73	71	70	68	67	65	63	62	74	74	73	72	71	68	66	64	75	74	74	74	73	72	68	67	65	65	65
S(卡/厘米 ² ·分)	1.50	1.41	1.28	1.18	1.09	1.01	0.87	0.77	0.69	1.46	1.38	1.23	1.12	1.03	0.95	0.82	0.72	1.30	1.17	1.05	0.97	0.90	0.77	0.66	0.58	0.58	0.58	0.58

续表

β^*		0.090																										
		5.0					15.0					25.0																
e^* (毫巴)	m η_λ (%)	0.8	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	6.0	0.8	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	6.0	0.8	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	6.0
		400	4	4	3	2	2	1	1	1	0	5	4	3	3	2	2	1	1	1	5	4	3	3	2	2	1	1
434	9	7	6	6	5	4	3	1	1	10	8	7	6	5	4	3	2	10	8	7	6	5	4	3	2	2	2	
472	13	12	10	9	8	6	4	3	3	14	12	11	10	9	7	5	3	14	13	11	10	9	7	5	4	4	4	4
523	20	18	16	15	13	11	9	6	6	21	19	17	16	14	12	10	7	22	20	18	16	15	12	10	8	8	8	8
574	28	25	23	21	20	16	14	10	10	29	27	25	23	21	17	15	11	30	27	25	23	21	18	15	12	12	12	12
630	35	33	31	28	26	23	20	17	17	37	35	33	31	28	25	21	18	38	36	33	31	29	26	22	19	19	19	19
700	45	43	41	39	37	33	30	27	27	49	46	44	42	40	36	32	29	50	47	45	43	41	37	33	30	30	30	30
980	71	69	68	66	65	62	60	58	58	73	72	70	68	67	64	62	59	74	72	71	69	68	65	62	60	60	60	60
S(卡/厘米 ² ·分)	1.28	1.17	1.06	0.96	0.87	0.71	0.58	0.48	0.48	1.26	1.12	1.00	0.89	0.79	0.63	0.52	0.43	1.19	1.05	0.93	0.82	0.72	0.57	0.46	0.38	0.38	0.38	0.38

续表

β^*		0.150																												
		5.0					15.0					25.0																		
e^* (毫巴)	λ (毫微米)	0.8	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	6.0	0.8	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	6.0	0.8	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	6.0		
	m $\eta(\%)$																													
	λ (毫微米)	4	3	2	1	1	0	0	0	0	4	3	2	1	1	0	0	0	0	3	2	1	1	2	1	1	0	0		
400		8	7	6	5	4	3	2	1	0	9	7	6	5	4	3	2	1	0	6	5	4	3	2	1	1	0	0		
434		12	10	9	8	7	5	3	2	1	13	11	10	8	7	6	4	2	1	0	7	6	5	4	3	2	1	0	0	
472		18	17	15	13	11	9	6	3	2	20	18	15	13	12	9	6	4	2	1	0	10	9	7	6	4	3	2	1	0
523		25	23	21	18	17	13	9	6	3	27	25	22	19	17	13	10	7	28	26	23	20	18	14	12	10	7	5		
574		33	30	28	25	23	18	13	10	6	35	33	29	26	24	20	15	12	36	34	31	28	25	21	18	15	11	8		
630		43	41	38	35	33	29	24	17	11	47	44	41	38	36	31	25	20	48	45	42	40	37	33	27	21	16	13		
700		70	67	65	63	61	58	56	54	51	71	69	67	65	64	60	58	56	71	70	69	67	65	61	59	57	55	52		
980		1.14	1.00	0.88	0.76	0.66	0.49	0.38	0.29	0.22	1.11	0.97	0.84	0.72	0.62	0.46	0.34	0.25	1.06	0.92	0.79	0.67	0.57	0.42	0.30	0.23	0.18	0.14		
S(卡/厘米 ² ·分)																														

续表

β^*		0.250																												
		5.0					15.0					25.0																		
e^* (毫巴)	λ (毫微米)	0.8	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	6.0	0.8	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	6.0	0.8	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	6.0		
	m $\eta(\%)$																													
	λ (毫微米)	3	2	1	1	0	0	0	0	0	3	3	1	1	1	0	0	0	0	3	3	1	1	1	1	0	0	0		
400		7	5	4	3	2	1	0	0	0	7	6	4	3	2	2	1	1	0	4	3	2	1	1	1	0	0	0		
434		11	9	7	6	5	3	2	1	0	11	10	8	7	5	4	2	1	0	6	5	4	3	2	1	1	0	0		
472		17	15	12	10	9	6	3	2	1	18	16	13	11	9	6	4	3	2	1	0	8	7	6	4	3	2	1	0	0
523		23	21	18	15	13	8	5	3	2	25	22	19	16	14	9	6	4	26	22	19	16	14	10	6	4	3	2		
574		31	28	24	20	17	12	9	6	3	33	29	26	22	18	13	9	7	33	30	26	23	19	14	10	6	4	3		
630		42	37	32	28	24	19	14	10	6	44	40	35	31	27	21	16	12	45	41	36	32	28	22	17	13	8	5		
700		68	64	59	54	49	41	35	30	23	70	66	62	59	55	49	43	38	71	67	64	60	57	50	45	40	35	28		
980		0.93	0.74	0.59	0.47	0.39	0.29	0.21	0.14	0.10	0.88	0.71	0.56	0.44	0.36	0.27	0.19	0.12	0.85	0.67	0.53	0.41	0.34	0.25	0.17	0.11	0.08	0.06		
S(卡/厘米 ² ·分)																														

学厚度(单位： w ——毫米， e ——毫巴)。为了便于比较，我们也利用(8)式和(9)式把 m 、 β^* 和 e^* 换算成 h 、 τ 和 w 三个参数，并取 $\tau'' = \beta(0.55)^{-1.3}$ ，将 400 和 700 毫微米的 η_λ 的比较结果列于表 7 和表 8 之中。

从上述两表可以看到，不管是 η_{400} 还是 η_{700} ，我们的测量结果和 O. Авасте 的理论计算结果都符合得非常好。洛迦诺山的 η_{700} 的实测值在太阳高度较大的时候，和我们的实测结果符合得也很好。但当太阳高度小于 20° 时，洛迦诺山的却比我们的和 O. Авасте 的系统偏高。

致谢：本工作承呼伦贝尔盟气象局及其所属台站、南宁市气象台、桂林市气象台、苏州地区气象台大力支持，特别是中国科学院综合考察委员会张炯远和李继由同志分别提供了拉萨和昌都地区的全部分光辐射观测资料，作者谨致衷心的感谢。

参 考 文 献

- [1] 周允华、鲍士柱、单福芝，热电式相对日射表温度效应的测量，《气象》，1978年第2期。
- [2] *Annals of the International Geophysical Year*, V, (1958)
- [3] A. K. Ångström, *Tellus*, 16 (1964), 64—75.
- [4] 特维尔斯戈伊，《气象学教程》第一册，第167页。
- [5] N. Robison, *Solar Radiation*, Chapter 4, 195 (1964).
- [6] E. E. Reber and J. R. Swope. *J. Appl. Met.*, 11(1972), №8, 1322—1325.
- [7] 周允华、项月琴、谢贤群，呼伦贝尔草原大气浑浊度的测量和尘埃输送的初步探讨，《大气科学》，1978年第4期。
- [8] O. Авасте, X. Молдау, К. С. Шифрин, Тарту, АН Эстонской ССР, Институт Физики и Астрономии, 3 (1962), 23—70.
- [9] G. Szeicz, *J. Appl. Ecology*, 11(1974), №2, 617—636.

THE SPECTRAL MEASUREMENT OF THE SOLAR DIRECT RADIATION

Xiang Yue-qin Zhou Yun-hua Shan Fu-zhi

(*Institute of Geography, Academia Sinica*)

Abstract

By means of thermoelectric Actinometer mounted with eight coloured glass filters, the spectral intensities of the solar direct radiation were measured in ten stations, distributed in seven different regions in china, for various periods of time during 1975—1978. Based on 2698 series of data obtained from the observations, the effects of the solar elevation, season, geographical latitude and altitude above sea level as well as aerosol and water vapor on the solar spectral radiation are analysed. The relative fluxes of the solar spectral radiation in various spectral bands are tabulated with air mass, the atmospheric turbidity coefficient and absolute humidity at the surface as three physical parameters.