第52卷 第2期　　气 象 学 报　　Vol. 52, No. 2
1994年5月　　ACTA METEOROLOGICA SINICA　　May, 1994

太阳散射辐射的分光测量及其能量分配*

王修兰

(中国农业科学院农业气象研究所,北京,100081)

近十余年来,国内外不少学者先后研究了散射辐射与总辐射的关系[1-6],建立了各种计算散射辐射的经验公式,但有关分光散射辐射分量的测量和研究为数甚少。为此,我们于1989—1990年在北京对300—2800nm光谱范围内的7个波段的散射分量进行测量,并研究了各分量与全谱段散射总量间的定量关系。

1 仪器与方法

本实验选用EKO公司的MS-800精密分光日射表(precision spectral pyranometer),它带有7个传感器:WG305(300—2800nm)、GG395(390—2800nm)、GG475(470—2800nm)、OG530(530—2800nm)、RG630(630—2800nm)、RG715(700—2800nm),每个传感器上附加MB-11遮光环(Shadow Band Stand),通过调节地理纬度和太阳赤纬测定各散射分量。与之配套的MP-52资料记录器可记录各谱段的散射辐照度:D_u(300—390nm)、D_b(390—470nm)、D_g(470—530nm)、D_o(530—630nm)、D_r(630—700nm)、D_n(700—2800nm)。数据由EP101打印机按预先设置的采样间隔,打印出该时段的累积辐照量。

仪器安装在中国农业科学院主楼顶气象观测平台上。实验开始前,用Eppley8-48辐射表作为对比标准,在阳光下进行了3d平行观测,对本仪器进行校准[7],准确度达5%。

实验于1989年3月—1990年6月,7时至日落,采样周期30或60min。并辅助以云、日光情况、气压等要素的观测,共测得13950个实验数据。

2 资料整理和计算

2.1 散射辐射测定值的订正

用遮光环测散射,需对测定值进行理论订正和补充订正。

理论订正:假定天空散射为均匀分布,遮光环不仅遮挡了直接辐射,同时也遮挡了环内的散射辐射,其理论订正系数C_1[8]为:

* 1992年4月8日收到原稿,1992年9月28日收到最后修改稿。沈阳农业大学赵军在1990年毕业实习期间参加部分工作。

$$C_1 = \left\{1 - \left[\frac{2b}{\pi r}\cos^3\delta(\sin\varphi \cdot \sin\delta \cdot \omega_s + \cos\varphi \cdot \cos\delta \cdot \sin\omega_s)\right]\right\}^{-1} \tag{1}$$

式中δ为太阳赤纬，ω_S为日落时刻太阳时角(以弧度表示)，φ为地理纬度，b为遮光环宽度，r为环半径。

MB-11遮光环$b = 40$mm，$r = 220$mm，由式(1)计算出北京地区各月的C_1列于表1。

表1 各月遮光环理论订正值

月	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
C_1	1.04	1.06	1.09	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.10	1.06	1.04	1.03

补充订正：实际天空散射辐射分布不均匀，云量对遮光环的订正值有较大的影响，根据柴田和雄等[9]研究得到云量与补充订正C_2的关系见表2。

表2 不同云量条件下的补充订正

总云量	0—3	4—7	8—10
C_2	0.07	0.04	0.03

考虑以上两种订正，j时段的实际散射D_j为：

$$D_j = (C_1 + C_2) \cdot D_{mj} \tag{2}$$

式中D_{mj}为j时段散射辐射观测值。

2.2 散射辐射日总量D的计算

$$D = D_1 + D_2 + D_3 \tag{3}$$

式中D_1为日出至第一次观测时之间的散射值，D_3为最后一次观测时至日落之间的散射辐射，以上两者可用差分法求得。

$$D_2 = \sum_{j=1}^{n} D_j \tag{4}$$

D_2为一天观测时段内散射辐照量，n为观测次数。

3 结 果

3.1 散射辐射及其分光散射分量

太阳高度、赤纬、云量、云状、大气透明度等对散射辐射及其分量都有很大的影响。

晴天，散射辐射及分量随太阳高度的增高而加大。图1为1989年4月7日(云量为0)散射辐照度D(305—2800nm)及紫外D_u、红外D_n、光合有效辐照度D_p(395—715nm)的日变化，其变化幅度，D最大，D_p次之，D_n较小，D_u最小。图2为该日D_b、D_g、D_o、D_r的日变化，其变化幅度随波长的增大而减小，即D_b最大，D_r最小。

散射辐射及其分量夏季大，冬季小。表3中列举了日平均云量为2.7—2.8、日光情况为0①时，3月30日、6月22日、9月6日、12月25日散射辐射及其分量的日辐照，代表春夏秋冬四季。

① 将日光情况分为0,1,2,3四个等级，分别代表⊙²,⊙,⊙⁰,⊙。

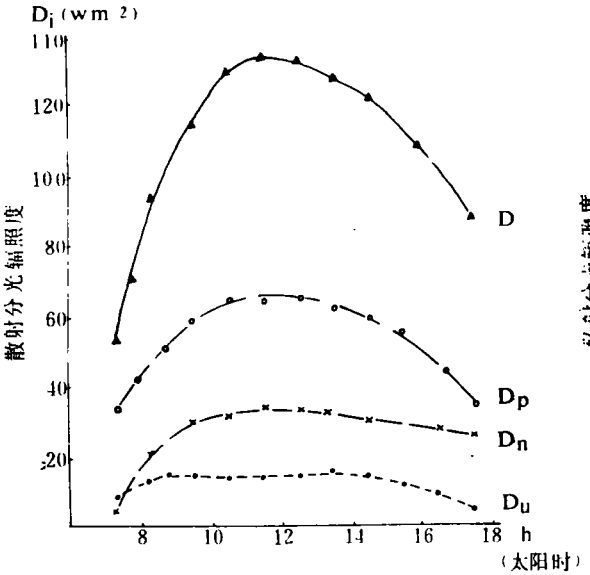

图 1　散射辐射及分光散射的日变化
(1989 年 4 月 7 日,晴)

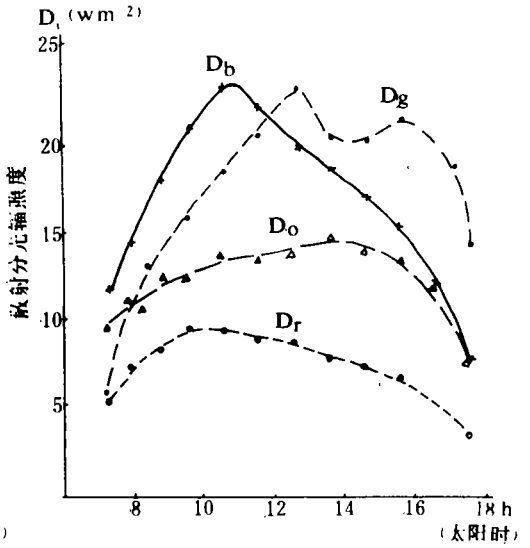

图 2　光合有效辐射各分量的日变化
(1989 年 4 月 7 日,晴)

表 3　不同季节散射辐射及分光散射的日辐照(MJ/m²)

月/日	云	日光	D	D_u	D_p	D_n	D_b	D_g	D_o	D_r
3/30	2.7	0	6.12	0.77	3.08	2.26	0.83	0.96	0.75	0.54
6/22	2.7	0	10.30	0.93	5.83	3.54	1.63	1.75	1.48	0.97
9/6	2.8	0	4.26	0.48	2.85	0.93	0.91	0.86	0.66	0.42
12/15	2.8	0	2.85	0.48	1.50	0.87	0.29	0.50	0.41	0.30

云量、云状、日光情况等天空状况对散射辐射及其分量的影响见表 4,表中总云量及日光情况为日平均值,列出了主要云状。表 4 表明:(1)由晴—多云,随着云量的增加,散射及其分量逐渐增大,当云量接近 8 时,散射及各分量的日辐照达到最大;(2)中、高云系使散射增大较多,而低云因云层厚度大,使日辐照减弱。

表 4　不同天空状况的散射辐射及分光散射的日辐照(MJ/m²)

年/月/日	天气	总云量	云状	日光	D	D_u	D_p	D_n	D_b	D_g	D_o	D_r
1989/4/7	晴	0		0	4.78	0.61	2.72	1.45	0.85	0.85	0.62	0.37
1989/4/8	少云	2.5	高积	0	7.71	0.74	4.17	2.80	1.06	1.31	1.00	0.80
1989/4/22	多云	7.6	高积	1.4	13.64	1.06	6.49	6.09	1.44	2.15	1.53	1.37
1990/4/11	阴	10	高积	2.0	12.51	0.94	5.80	5.77	1.26	1.94	1.37	1.23
1990/4/13	阴	10	层积	2.8	9.56	0.61	4.78	4.17	1.11	1.62	1.05	1.00

3.2 散射分光日照比及其分量

图 3 为 3 月晴天(云量为 0)逐时 D_u、D_p、D_n 与 D 的相关图,由图可见 D_i 与 D 之间几乎呈线性变化,其回归直线的斜率 $DR_i = D_i/D$,称散射分光辐照比,用它可评价散射辐射在各波段的能量分配。

3.2.1　DR_i 的年变化

表5为1989—1990年春(3—5月)、夏(6—8月)、秋(9—11月)、冬(12—2月)逐日分光辐照比的季节及年平均值。表中m为平均值,σ为标准差,n为观测次数。

表5 逐日平均分光辐照比

季节		DR_u	DR_b	DR_g	DR_o	DR_r	DR_n	DR_p
春	n				773			
	m_i	0.086	0.130	0.167	0.125	0.095	0.396	0.518
	σ_i	0.035	0.025	0.008	0.016	0.008	0.066	0.077
夏	n				244			
	m_i	0.093	0.150	0.175	0.140	0.096	0.347	0.561
	σ_i	0.036	0.018	0.013	0.013	0.011	0.046	0.025
秋	n				227			
	m_i	0.124	0.163	0.178	0.145	0.086	0.304	0.571
	σ_i	0.059	0.042	0.033	0.018	0.016	0.096	0.059
冬	n				131			
	m_i	0.109	0.114	0.172	0.122	0.092	0.393	0.499
	σ_i	0.043	0.029	0.009	0.022	0.011	0.077	0.041
年均	m_i	0.099	0.139	0.170	0.131	0.093	0.368	0.533

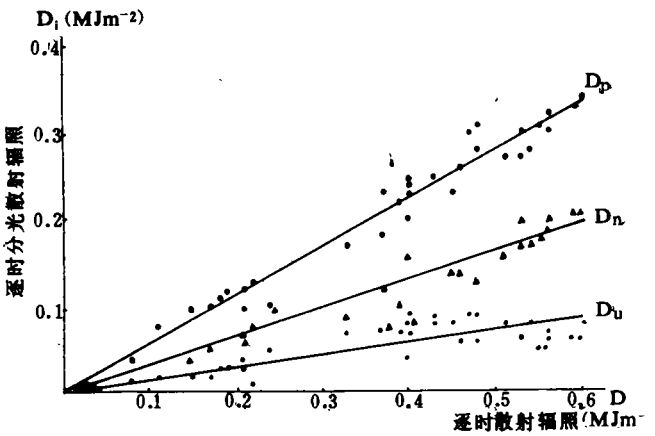

图3 逐时分光散射辐照与散射辐照的关系(1989年3月)

由表可见,从平均状况来看,DR_u 最小0.099,DR_p 最大0.533。其季节变化表现为:波长较短的 DR_u,DR_b,DR_o 秋季大,冬春小;波长较长的 DR_r,DR_u 则相反,夏季大,秋季小。这与大气透明度的年变化及大气中水汽含量的多少有关。秋季大气透明度较大,浑浊度较小,致使短波成分的散射比重增大,长波成分散射比重减弱。同时,夏秋季节大气中水汽含量较多,水汽对红外波段吸收较强,故 DR_u 夏秋较小。

单位波长年均占有的能量(表6)以 DR_g 最强(28.3×10^{-4}/nm),DR_n 最弱(1.8×10^{-4}/nm),这与分光总辐照比 QR_i 的分配规律是一致的,只是在紫外、蓝绿光区的 DR_i 高于 QR_i[10]。季节变化曲线(图4)相差不甚明显,说明能量分配在一年中相对较为稳定,其中 DR_b($\pm3.1\times10^{-4}$/nm)、DR_u($\pm2.1\times10^{-4}$/nm)变化略显,秋季大,冬春小;DR_n 变化很小($\pm0.2\times10^{-4}$/nm),春季略高于秋季。QR_i 的季节变化略逊于 DR_i,其中 QR_g、QR_b 变化稍大(夏季高于冬季);QR_n 变化很小(冬季略高于夏季)。

表 6　各光谱区单位波长所占有的能量

光谱区	u	b	g	o	r	n
$(DR_i/\mathrm{nm})\times10^{-4}$	11.0±2.1	17.4±3.1	28.3±0.7	13.1±0.5	13.3±0.7	1.8±0.2
$(QR_i/\mathrm{nm})\times10^{-4}$	4.4±0.4	13.1±1.1	20.5±1.3	15.7±0.7	12.4±0.9	2.3±0.1

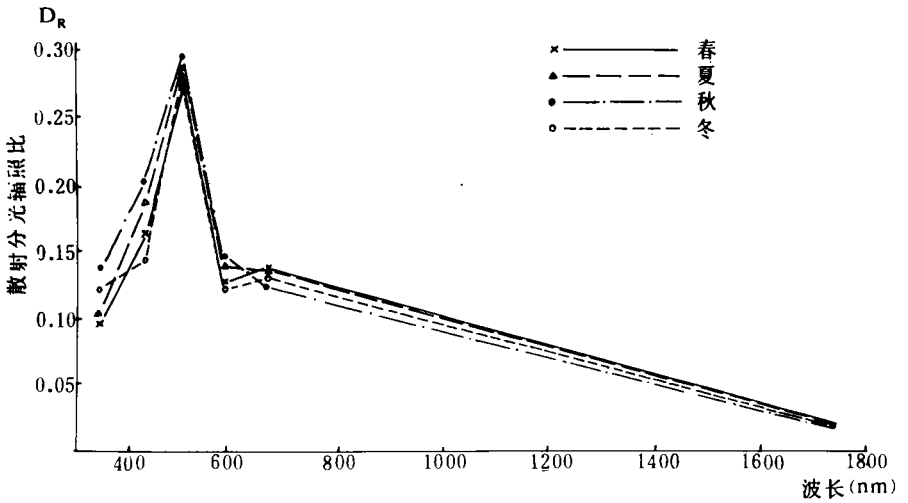

图 4　散射辐射在不同光谱区的能量分配(纵轴单位为 10^{-2}/nm)

3.2.2　太阳高度对 DR_i 的影响

太阳高度对 D 的影响很大，但对 DR_i 的影响却要小得多。为了排除天气因子和赤纬的影响，用 6 月晴天观测资料中散射系数(即散射与总辐射之比)小于 0.2 的测定值，统计了不同太阳高度角(偏差 ± 1°)DR_p，DR_n，DR_u 的变化，由图 5 可见，当太阳高度角由 30° 升至 70° 时，DR_p，DR_n 分别由 0.631、0.236 降至 0.601，0.214，而 DR_u 则由 0.123 升至 0.185。这是由于随着太阳高度的降低，天空散射能谱分布的峰值向较长波长方向转移所致。

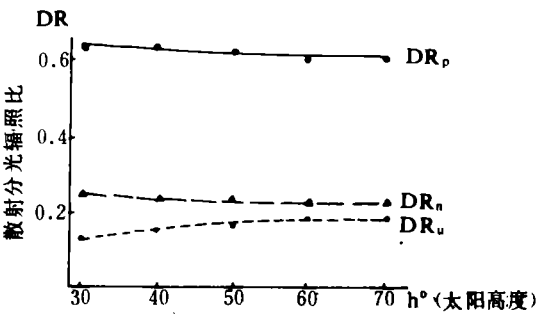

图 5　散射分光辐照比与太阳高度的关系

3.2.3　天气状况对 DR_i 的影响

云、日光情况、大气透明度等天气状况不仅制约散射辐射的强弱，也制约着 DR_i，而且天气状况比太阳赤纬、太阳高度对 DR_i 的影响更重要。

根据日平均云量及日光情况资料，把天气类型划分为晴(高云量≤2，日光为 0)、少云—多云(2＜云量≤8、日光 0—2)、阴(云量＞8、日光 2—3)三种。各种天气状况下的 DR_i 列于表 7，从晴到阴，DR_u 由 0.145 降至 0.062，DR_p 由 0.565 降至 0.488，DR_n 由 0.290 升至 0.450。由此表明：云量逐渐增加时，DR_u、DR_p 随之减小，DR_n 随之增大，在 DR_p 中除

表7 不同天气条件下逐日分光辐照比

天气	n	DR_u	DR_b	DR_g	DR_o	DR_r	DR_n	DR_p
晴	445	0.145	0.166	0.172	0.144	0.083	0.290	0.565
少一多云	599	0.078	0.132	0.174	0.128	0.097	0.392	0.530
阴	337	0.062	0.108	0.163	0.116	0.101	0.450	0.488

DR_r 外，其余几种光谱区也随之减小。这是由于散射辐射主要来源于空气分子散射和气溶胶(水汽、灰尘)散射，分子散射与波长的4次方成反比，而气溶胶散射就平均状况而言与波长的1.3次方成反比。因此，晴天大气干洁，分子散射比重增加，短波成分较为丰富，DR_u、DR_p 较大；随着云量的增长，气溶胶含量增多，气溶胶散射比重加大，致使短波成分相应减少，长波成分相对增加，DR_u 和 DR_r 随之增大。另外，由于云的存在，也促使较长波长的散射增加，短波散射减弱。

3.3 分光散射分量的估算

根据散射日辐照 D，可由式(5)估算各波段的分光散射分量 D_i

$$D_i/D = m_i \pm \sigma_i \tag{5}$$

式中 m_i 和 σ_i 随季节、天气而变化，不同季节的 m_i 和 σ_i 列于表5，σ 的正、负号由天气条件决定，DR_u、DR_p、DR_b、DR_g、DR_o 晴天为正，阴天为负；而 DR_n、DR_r 则相反，晴天为负，阴天为正。

4 结论

太阳散射辐射分光测量资料表明：

(1)散射辐射及其分光散射分量具有很大的日变化和年变化。早晚小、中午大，冬季小、夏季大，其变化幅度 D_p 最大，D_n 次之，D_u 最小。同时散射辐射及其分量随云量的增加、大气透明度的减小而增大。

(2)散射辐射在各光谱区的能量分配一年中相对较为稳定，其逐日散射分光辐照比年均为：DR_u0.099，DR_p0.553(其中 DR_b0.139，DR_g0.170，DR_o0.131，DR_r0.093)，DR_n0.368。

(3)太阳赤纬、太阳高度及天气条件对散射分光辐照比有一定影响。一年中 DR_u 和 DR_p 秋季较大，冬春较小；DR_n 冬春较大，秋季很小。一天中，中午前后 DR_p，DR_n 较小，早晚稍大；DR_u 则相反，中午稍大，早晚稍小。随着云量的增加，DR_u，DR_p 随之减小，而 DR_n 反随之增大。

(4)根据气象台站测定的散射辐射日总量，利用式(5)和表5可估算各光谱区的散射辐射分量。

参考文献

[1] Ideriah F J K. On the relationship between diffuse and global solar radiation. Solar Energy, 1983, 31(1): 119—124.

[2] Brook Lebaron and Inge Dirmhirn. Strengths and Limilations of the Liu and Jordan model to determine diffuse from global irradiance. Solar Energy, 1983, 31(2):167—172.

[3] Bruce Baker C. Evaluation of the estimation of diffuse irradiance from global and direct normal irradiance measurements. Solar Energy, 1984, 32(1):25—31.

[4] Weiss A and Norman J M. Partitioning solar radiation into direct and diffuse, visible and near-infrared com-

ponents. Agricultural and Forest Meteorology, 1985, 34: 205—213.

[5] Spitters C J T et al. Separating the diffuse and direct component of global radiation and its implications for modeling canopy photosynthis, part I components of incoming radiation. Agri. and Met., 1986, 38: 217—229.

[6] 周允华. 中国地区的太阳紫外辐射. 农业生态研究, 北京: 气象出版社, 1989, 176—187.

[7] 王修兰. 四种辐射仪器性能之比较. 中国农业气象, 1989, 2: 48—51.

[8] Drummond A J. On the measurement of sky radiation. Arch Met Geoph Biokl, Serie B, 1956, 7(3/4): 413—435.

[9] 柴田和雄等编. 太阳エネルギーの分布と测定, 学会出版センター, 1987, 48—49.

[10] 王修兰. 太阳总辐射的分光测量及其能量分配. 农业工程学报, 1990, (1): 48—54.

[11] 项月琴等. 太阳直接辐射的分光测量. 气象学报, 1980, 38: 51—63.

THE SPECTRAL MEASUREMENT OF THE SOLAR DIFFUSE RADIATION AND ITS ENERGY DISTRIBUTION

Wang Xiulan

(*Agrometeorological Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing*, 100081)

Abstract

By MS-800 model precision spectral pyranometer and MS-11 Shadow Band Stand, the solar diffuse radiation D (band of 300—2800nm) and its components of the spectral diffuse radiation D_u (300—390nm), D_b (390—470nm), D_g (470—530nm), D_o (530—630nm), D_r (630—700nm), D_n (700—2800nm) were measured during 1989—1990 in Beijing, China. Based on the data observed. the diffuse radiation energy distribution in various spectral bands and its change feature, as well as the effects of the solar declination, solar elevation and cloud etc. on it were discussed.

The data observed has been shown that a great daily variation and annual variation of the diffuse radiation and its spectral diffuse radiation have been appeared, but the diffuse radiation and its energy distribution for the various spectral bands in a year are more steady relatively. The mean annual values of the daily spectral diffuse irradiation ratioes (the mean values of the ratioes by the daily diffuse irradiation in the spectral intervals to the daily total diffuse irradiation) are: DR_u0.099, DR_p 0.533 (where DR_b 0.139, DR_g 0.170, DR_o 0.131, DR_r 0.093), DR_n 0.368. In a year, DR_u and DR_p are larger in autumn than in spring and winter, otherwise, DR_n is larger in winter and spring than in autumn. In a day, DR_p and DR_n are enhanced slightly with solar elevation decreasing, DR_u is converse. And DR_u and DR_p are decreased with cloud amount increasing, but otherwise DR_n is enhanced. In addition, we can use equ. (5) and table 5 to estimate the daily spectral diffuse irradiation from the daily diffuse irradiation is obtaied by meteorological observation.

Key words: Solar diffuse radiation, Spectral diffuse radiation, Spectral measurement, Energy distribution.