

塔克拉玛干沙漠春季大气气溶胶光学特性研究

王栋梁 邱金桓

(中国科学院大气物理研究所)

提 要

本文利用多波段光度计在新疆塔克拉玛干沙漠探测的1986年4月11日至5月10日的太阳直接辐射强度和天空亮度资料,分析了塔克拉玛干沙漠晴空大气和沙暴期间大气气溶胶的光学厚度、谱分布以及折射率的变化特性。

一、引 言

沙漠化问题、城市的沙尘污染以及沙尘对气候的影响等问题已引起了国际上多方面的重视。国外学者对非洲的 Sahara 沙漠进行了大量研究^[1-3],但对亚洲沙漠的研究还十分有限^[4-7],特别是对亚洲沙漠地区的实地大气气溶胶的观测研究则更少。

每年春季是我国以及东亚地区沙尘暴最频繁的季节,我国北方城市春季几乎年年遭受沙暴的侵害,研究春季沙漠地区大气气溶胶的光学特性,尤其是沙暴过程中的气溶胶光学特性及其远距离输送规律,对于了解沙尘暴对我国环境和气候的影响都很有意义。1986年4月11日至5月10日,我们于新疆塔克拉玛干沙漠地区采用多波段的光度计探测大气柱气溶胶光学厚度、谱分布及其折射率。本文主要讨论了这些物理量的变化特点及其与天气条件的依赖关系。

二、观测仪器和观测背景

实验用的光度计具有 1° 视场角,其滤光片的中心波长为450, 550, 650, 750和850 nm,滤光片的半宽度为10—15 nm。仪器采用稳定、低噪音的硅光二极管作受光器,它的光谱敏感范围为380—1100 nm。

光度计安装在一个一米高的三角架上,放置在铁千里克气象站前面的平地上进行观测。该站海拔高度约850 m,位于我国最大的沙漠塔克拉玛干沙漠东侧,四面沙漠环绕,是研究塔克拉玛干沙漠大气气溶胶光学特性的较理想的位置。

1986年8月15日收到,1986年12月2日收到修改稿。

三、观测结果和分析

本文采用 Bouguer-Langley 方法确定仪器常数 D_1, D_2 确定后, 每一时刻的大气光学厚度可由

$$\tau_1 = \frac{1}{m} [\ln C_1 - \ln I_1] \quad (1)$$

算出, 其中 m 为大气质量数, I_1 为仪器的指示值。

从总的大气光学厚度中扣除空气分子的光学厚度, 即可得到大气气溶胶的光学厚度, 记为 τ_{a1} 。

根据埃斯屈朗的研究^[3], 大气气溶胶光学厚度随波长的变化可写为

$$\tau_{a1} = \beta \lambda^{-\alpha} \quad (2)$$

其中, β 称为埃斯屈朗浑浊度, α 为波长指数。对于 $n(r) = cr^{-(\nu^*+1)}$ 的 Junge 谱分布, 不难推得 α 和 ν^* 须满足

$$\nu^* = \alpha + 2 \quad (3)$$

其中 ν^* 称为 Junge 谱参数。本文采用最小二乘法由 (2) 和 (3) 式从五波长的气溶胶光学厚度值确定 α 和 ν^* 值。

气溶胶折射率虚部的探测。采用邱金桓等人提出的方法^[9,10], 由光度计测量约 40° 的天空亮度信息计算气溶胶加权相函数, 再由后者反演折射率虚部。计算时, 折射率实部取 1.55, 并根据文献 [11], 地表反照率取为 0.3。根据文献 [9] 和 [10], 虚部解对实部和反照率的取值是不敏感的, 后面将进一步讨论这个问题。

下面分别讨论大气柱气溶胶光学厚度、谱分布和折射率的变化特性。

1. 大气柱气溶胶光学厚度

表 1 列出从 1986 年 4 月 11 日至 5 月 10 日由光度计探测的 550nm 波长的大气柱气溶胶 (或云) 光学厚度的日平均值, 由当地气象站观测的气象能见度、风速和云况以及由 5 个波长的光学厚度值拟合得到的 Junge 谱参数 ν^* 。1986 年 4 月及 5 月上旬, 塔克拉玛干沙漠地区一共出现了二次沙暴, 一次发生在 4 月 6 日至 8 日, 另一次发生在 4 月 22 日至 23 日, 前者较小。因此, 4 月 11 日至 20 日以及 4 月 25 日至 5 月 7 日, 都是尘暴活动的平静时期。如表 1 所示, 在该平静时期, 地面上水平能见度一般都大于 25km, 比较好, 地面上水平风速一般小于 7m/s, 而无云晴天下的 550nm 波长大气柱气溶胶光学厚度约在 0.1 至 0.7 之间变化, 均值为 0.410, 4 月 22 日沙暴以前和以后的均值分别为 0.386 和 0.441, 后者略大。较好的水平能见度和较大的光学厚度表明, 塔克拉玛干沙漠地区春季空中悬浮有大量的沙尘粒子。

图 1 表示晴天下 550nm 波长大气柱气溶胶光学厚度的日变化特点。塔克拉玛干地区北京时间 10 点相当于北京上午 8 点。如图 1 所示, 晴天下塔克拉玛干沙漠地区大气柱光学厚度的日变化具有一个共同的特点。即从上午至下午, 大气柱光学厚度一般先变小, 然后又变大, 转折时刻不尽相同。这个特点是与当地的气象条件, 特别是与温度场和风速

表 1 550nm 波长光学厚度及 ν^* 的日平均值

日 期	北京时间	观测次数	云 况	风 速 (m/s)	$\tau_a(\lambda)$ $\lambda = 550\text{nm}$	水平能见度 (km)	ν^*
4 月 11 日	13:25—17:30	16		0—3	0.62	30	2.12
12 日	9:55—17:00	17		2—7	0.445	8—30	2.19
13 日	10:30—18:00	3		0—8	0.102	>30	2.62
14 日	16:30—18:00	2		0—2	0.280	25	2.18
15 日	10:00—18:00	3		0—2	0.415	30	2.22
17 日	10:00—18:00	4		0—3	0.31	30	2.26
18 日	10:00—18:00	8	cidens	1—7	0.752	20—30	2.02
19 日	10:00—12:00	2		0—4	0.40	25	2.05
21 日	10:00	1		8	0.39	20	2.08
22 日	10:05—16:00	3	cidens	0—4	3.23	15—25	1.93
22 日	17:40—18:20	2		11—12	4.73	0.8—2	1.97
24 日	10:10—17:30	3	cidens	0—8	1.61	6—30	1.98
25 日	9:10—19:00	9		7—10	1.22	9—15	1.99
26 日	10:16—18:16	4		0—6	0.37	20—30	2.03
27 日	10:30—18:30	3		0—5	0.60	25—30	2.13
28 日	10:00—12:10	2	Ac, As	0	4.42	30	2.17
29 日	10:00—13:00	6		0—7	0.43	30	2.18
30 日							
5 月 2 日	10:45—13:00	5		2—6	0.29	30	2.24
3 日							
5 日	10:05—18:00	9		0—6	0.29	20—30	2.05
7 日	10:00—18:15	17		0—3	0.22	30	2.02

结构密切相关。沙漠地区,白天和夜间的温差很大,由于夜间的辐射冷却,清晨边界层内通常形成一个很厚的逆温层。如图 2 所示的清晨 7:30 的探空温度曲线,不管是晴天,还是发生沙尘暴的 4 月 22 日,2.5km 高度以下都存在一个很明显的逆温层,逆温层的高度一般在 1km 至 2.5km 之间,而且正如图 3 所示,清晨地面的水平风速一般也较小。逆温层的存在抑制了沙尘粒子的向上输送,清晨大气柱气溶胶光学厚度一般变化较小,许多学者的激光探测结果表明^[12],逆温层顶附近通常堆积有较多的粒子。随着日照加热,逆温逐渐消失,边界层内风速加大(见图 3),在日出以后的一段时间内,气溶胶光学厚度不仅没有随着风速的增大而变大,反而变小,而且如图 3 所示,水平能见度也往往变好,这种现象可能是由于逆温层顶或地表附近的沙尘粒子被风吹散而引起的,国内外许多学者在非沙漠地区观测到类似的现象^[13,14]。随着逆温的消失,大气变得不稳定,出现上升气流,由风吹起的沙尘粒子向上抬升,因此,日出一段时间大气柱气溶胶光学厚度开始变大。若采用激光雷达和光度计综合探测沙漠地区的气溶胶特性,必能更加清楚地揭示这个变化过程。

下面进一步分析沙尘暴期间气溶胶光学厚度变化特点。

由地面天气图知道,22 日至 23 日塔克拉玛干沙漠地区正处于一个低压中心,22 日 17:00,沙漠上刮起大风,形成了一个很强的沙尘暴,并持续到 23 日中午。图 3、4、5 分别表示沙尘暴期间大气柱光学厚度、地面风速和水平能见度的变化特点。从这些图以及气象资料可以看出,21 日上午 10 点前,天空无云,气溶胶光学厚度约为 0.4,此后天空出现卷层云,

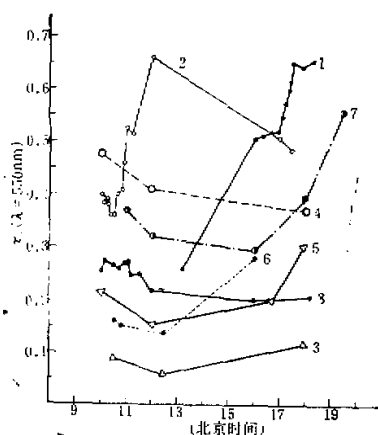


图1 550nm 波长大气柱气溶胶光学厚度日变化
1. 4月11日, 2. 4月12日, 3. 4月13日, 4. 4月15
日, 5. 4月17日, 6. 5月2日, 7. 5月5日, 8. 5月7日

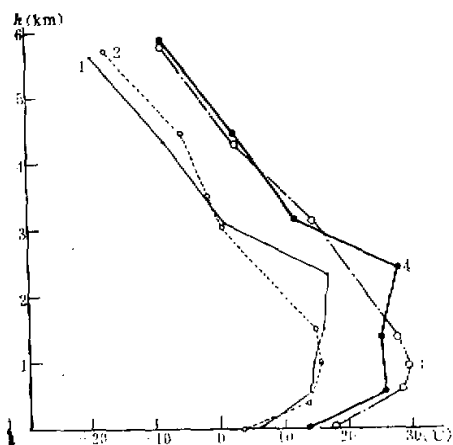


图2 温度曲线
1. 4月12日, 2. 4月13日, 3. 4月22日,
4. 5月7日

表2 地面水平风速 (m/s)

时 间 日 期	1	3	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	20	22	24
4月11日	2	1	2	2	0	0	0	0	4	2	1	0	0	0	3	2	2	1	5
12日	7	5	3	3	3	3	2	6	6	7	4	4	3	3	2	1	3	2	3
13日	4	5	4	2	4	3	4	6	8	4	4	6	5	5	3	0	0	0	0

表3 水平能见度 (km)

时 间 日 期	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
4月11日	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
12日	21	25	28	30	30	30	25	20	15	8	8	8
13日	20	25	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30

光学厚度约为 2. 22 日下午 4 点以后, 地面风速迅速增大, 高达每秒 14m, 水平能见度由 25km 很快降到 400m 以下. 23 日上午, 地面风速更大, 能见度降到 100m 以下, 天昏地暗, 根本看不见太阳. 23 日上午 11 点左右, 忽然下雨, 风速陡降, 水平能见度变好. 25 日云散天晴, 但是大气柱气溶胶光学厚度仍高达 1.3 左右, 直到 26 日, 才降到 0.4 左右, 与晴天下气溶胶光学厚度的均值差不多, 上述分析表明, 尽管沙尘暴发生时天空有云, 无法准确确定当时沙尘粒子的光学厚度, 如图 3 所示, 21 日和 22 日的观测结果表明, 当出现沙尘暴后,

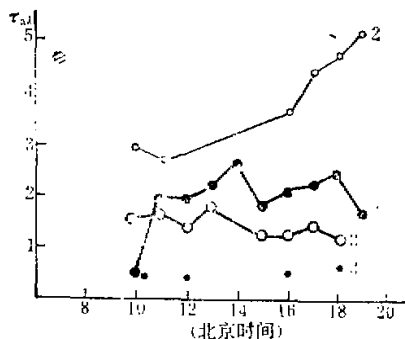


图3 光学厚度

1. 21 日, 2. 22 日, 3. 25 日, 4. 26 日

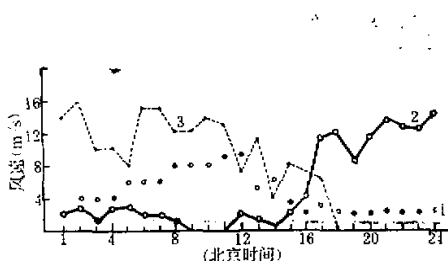


图4 地面水平风速

1. 21 日, 2. 22 日, 3. 23 日

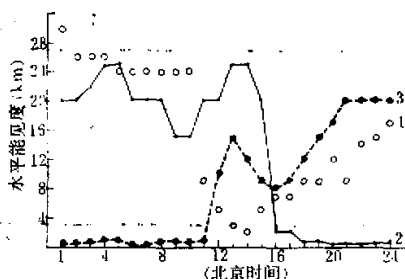


图5 水平能见度

1. 21 日, 2. 22 日, 3. 23 日

总光学厚度迅速由 3 左右增大至 5.3, 而且 23 日上午沙暴更强, 根本看不见太阳, 无法观测, 光学厚度估计要大得多, 其增量估计大于 3, 即大气柱光学厚度比平时增大一个数量级, 表明大气柱粒子数浓度比平时也约增大一个数量级, 而水平能见度的变化表明, 近地面气溶胶粒子浓度比平时增大二个数量级以上。

2. 气溶胶粒子的谱分布

对实际大气气溶胶谱分布, 若以 Junge 谱加以拟合, 其谱参数 ν^* 值一般在 2 至 4 之间变化, ν^* 值越小, 谱越宽, 大粒子含量越多, 如表 1 所示, 由 5 个波长的光学厚度拟合的塔克拉玛干沙漠气溶胶谱的 ν^* 值都较小, 晴天无云时, ν^* 值一般在 1.96 至 2.67 之间变化, 算术平均值为 2.12, 表明该地区大气中含有大量的大粒子, ν^* 值近于 2 意味着波长指数 α 值近于零, 气溶胶光学厚度基本上与波长无关, 属于中性消光, 在我们进行观测的日子里, 4 月 13 日的水平能见度最好, 气溶胶光学厚度最小, ν^* 值最大, 表明大气中小粒子相对含量较多, 从图 6a 看, 光学厚度随波长的增大而变小, 属正常消光, 沙暴期间的 4 月 22 日, ν^* 值最小, α 出现负值, 属反常消光, 如图 6b 所示, 光学厚度值随波长的增大而增大, 这正是狂风将大量较大的沙尘粒子吹向空中的结果。

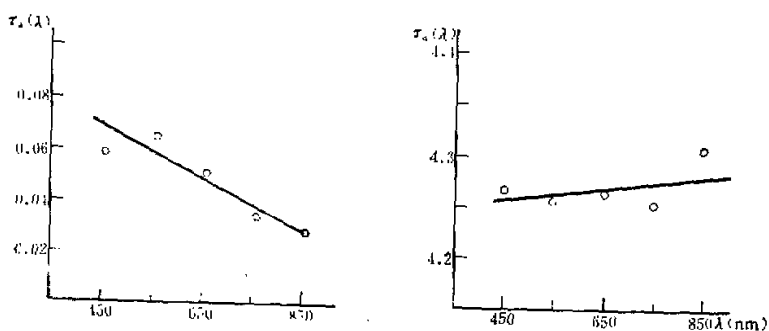


图 6 光学厚度随波长的变化
(a) 4月13日, 12:30 (b) 4月22日, 17:40

表 4 折射率虚部的平均值及标准差

波长 (nm)	450	550	650	750	850
虚 部	0.0198	0.00880	0.00693	0.00512	0.00585
标准差	0.0060	0.0032	0.0027	0.0026	0.0033

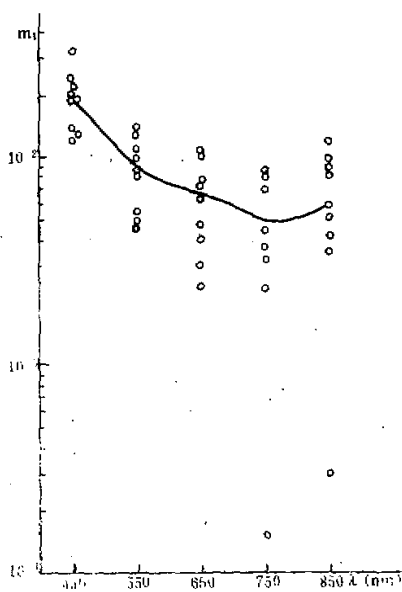


图 7 折射率虚部值

3. 气溶胶折射率

图 7 表示 9 组折射率虚部值及其均值 (曲线), 不同波长的折射率虚部之均值也列于表 4. 对于 450, 550, 650, 750 和 850nm 五个波长, 虚部的均值分别为 0.0198, 0.00880, 0.00693, 0.00512 和 0.00585, 其标准差分别为 0.0060, 0.0032, 0.0027, 0.0026 和 0.0033. 从 450 至 750nm, 虚部值随波长的增大而变小, 但从 750 至 850nm, 又略有增大, 这个变化特性与 Patterson 等人于 Sahara 沙漠取样探测的结果相吻合^[5], 只是我们的探测结果略大一些, 对于 550 至 850nm 波长, 偏大小于 0.003, 对 450nm 波长, 偏大估计小于 0.006.

上面已经谈到, 反演时地表反照率 A 取为 0.3, 折射率实部 m_R 取为 1.55. 从表 5 可以看出折射率实部和反照率误差对虚部解 m_i 的效应. 对于 4 月 26 日 10:10 的观测资料, 当取 $A = 0.15$ 和 0.45 时, 450nm 波长的

虚部解与 $A = 0.3$ 的虚部解的偏差小于 0.007, 其它波长的偏差小于 0.002, 波长越短, 偏差一般越大, 这是由于 40° 的天空亮度对具有较大分子光学厚度的短波随反照率的变化较敏感的缘故^[9]。当实部在 1.5 至 1.6 之间变化时, 解的变化较小。因此, 本文的结果基本上可信。如果同时测量 90° 的天空亮度以确定地表反照率^[9], 探测精度将更高。

表 5 不同实部和反照率下的虚部解

A	m_R	m_I				
		450	550	650	750	850(nm)
0.15	1.55	0.018	0.0066	0.0057	0.0042	0.0045
0.45	1.55	0.031	0.0098	0.0087	0.0049	0.0069
0.3	1.55	0.024	0.0083	0.0075	0.0037	0.0064
0.3	1.5	0.025	0.0086	0.0078	0.0039	0.0052
0.3	1.6	0.022	0.0078	0.0072	0.0033	0.0057

四、结 束 语

1. 塔克拉玛干沙漠地区晴空大气柱气溶胶光学厚度一般在 0.06 至 0.7 之间变化, 就 550nm 波长而言, 光学厚度均值约为 0.41, 晴天水平能见度一般在 25km 以上, 说明空中含有较多的沙尘粒子导致较大的大气柱光学厚度。

2. 沙暴期间, 水平能见度可比平时降低 2 个数量级以上, 总光学厚度可增大一个数量级以上, 这表明近地面的粒子浓度可增大二个数量级以上, 整个大气柱粒子浓度可增大一个数量级。

3. 以 Junge 谱拟合塔克拉玛干沙漠地区气溶胶谱, 其 ν^* 值近于 2, 基本上属于中性消光, 尘暴期间可出现反常消光, 大气中含有大量的大粒子。

4. 随着波长的增大, 塔克拉玛干地区气溶胶折射率虚部倾向于变小, 从 450nm 至 850nm, 虚部均值约在 0.0198 至 0.00512 之间变化。

参 考 文 献

- [1] Carlson, T. N. and Prospero, J. M., 1972, *J. Appl. Meteorol.*, 11, 283—297.
- [2] Gringel, W. and Muhleisen, R., 1977, *Beitr. Phys. Atmos.*, 51, 121—128.
- [3] Carlson, T. N. et al., 1977, *J. Geophys. Res.*, 82, 3141—3152.
- [4] 周明煜等人, 1981, 环境科学学报, 第 1 卷, 207—219.
- [5] Yasumobu Iwasaka, et al., 1983, *Tellus*, 35, 189—196.
- [6] 邱金桓、赵燕曾、汪宏七, 1984, 大气科学, 8, 205—210.
- [7] Wang Mingxing et al., 1982, *Kexue Tongbao*, 27, 1193—1198.
- [8] Angstrom, A., 1964, *Tellus*, 16, 64—75.
- [9] Qiu Jinhuan and Zhou Xiujie, 1986, *Adv. Atmos. Sci.*, 3, 162—171.
- [10] Qiu Jinhuan, Simultaneous Determination of Aerosol Size Distribution and Refractive Index and Surface Albedo from Radiance—Part III: Parameterization, Submitted to *Adv. Atmos. Sci.*
- [11] G. W. 帕尔特里奇等人, 1981, 气象学和气候学中的辐射过程, 吕达仁等译, 科学出版社.
- [12] 激光在气象探测中的应用, 1973, 中国科学院大气物理所集刊, 第 1 号, 科学出版社.
- [13] Eiden, R., 1968, *Tellus*, 20, 380—398.
- [14] Murai, K., 1968, *Pap. Meteor. Geophys.*, 447—480.
- [15] Patterson, E. M. et al., 1977, *J. Geophys. Res.*, 82, 3153—3160.