

从全波段太阳直射辐射确定 大气气溶胶光学厚度*

II: 实验研究

邱金桓 杨景梅 潘继东

(中国科学院大气物理研究所, 100029 北京)

提 要

本文通过比较太阳直射表和太阳光度计探测的大气柱气溶胶光学厚度, 分析了从太阳直射表探测的全波段太阳直射光强信息确定大气柱气溶胶光学厚度的误差, 并应用北京观象台的太阳直射表观测资料, 反演得到了1990—1993年北京大气柱气溶胶光学厚度, 分析了该光学厚度月与年变化规律以及1991年菲律宾皮纳图博火山爆发对北京大气气溶胶含量的影响。本文还提出了关于有效水汽含量的一个经验关系式, 用于确定水汽对太阳辐射的吸收率。

关键词: 气溶胶光学厚度; 有效的水汽含量; 太阳直接辐射。

一、引 言

邱金桓从理论上提出了从全波段太阳直射辐射信息反演大气柱气溶胶光学厚度的一个新方法^[1], 考虑到我国许多气象台站具有长期太阳直射辐射常规观测历史, 这种新方法的实际应用是很有意义的。我们从1993年10月—11月采用太阳光度计和直射表在北京观象台进行了8天探测北京大气柱气溶胶光学厚度的对比实验, 本文依据对比实验结果分析了这一新方法的探测误差, 并应用这一方法从北京观象台1990—1993年太阳直射表的观测资料反演得到了这些年份的大气柱气溶胶光学厚度。

二、观测仪器与实验

太阳直射表和太阳光度计对比观测于1993年10月—11月在北京观象台进行。实验用的光度计具有 1° 的视场角, 工作波长为 $0.65\ \mu\text{m}$ 和 $0.75\ \mu\text{m}$, 太阳直射表为DFY-3TBS型号, 其光谱响应范围为 $0.3\text{—}4\ \mu\text{m}$, 视场角约为 4° , 灵敏度的年稳定性为 $\pm 1\%$, 共有97次对比实验结果。此外, 本文还把1988年4月间太阳光度计探测的气溶胶光学厚度与太阳直射表的探测结果作了比较, 所用的仪器如上所述, 只是观测地

1994年1月28日收到, 6月7日收到修改稿。

* 国家自然科学基金资助项目。

点不同, 光度计的观测于中国科学院大气物理研究所办公楼的房顶上进行, 太阳直射表的观测于北京观象台进行。

三、关于有效水汽含量的一个经验关系式

要从直接的太阳辐射信息确定大气柱气溶胶光学厚度, 需要考虑水汽对太阳辐射的吸收。根据水汽吸收带吸收特性的测量资料, Yamamoto 得出了水汽含量与对太阳辐射的吸收率的关系^[2], Lacis 和 Hansen 据此拟合出如下的参数化公式^[3]:

$$A(U) = \frac{2.9U}{(1 + 141.5U)^{0.635} + 5.925U}, \quad (1)$$

其中, U 为实际的水汽含量, 以厘米计, $A(U)$ 为水汽对太阳辐射的吸收率。

王维强利用了与 Lacis 和 Hansen 不同的吸收数据和太阳辐射谱资料, 给出了如下的水汽对太阳辐射吸收率的参数化公式^[4]:

$$\lg A(U) = -1.1950 + 0.4459 \lg U - 0.0345 (\lg U)^2. \quad (2)$$

由于水汽吸收受到温度和压力的影响, 尤其是压力的影响较大, 这使得对水汽吸收的处理较为复杂, 简单地可以用有效水汽吸收含量来代替实际的水汽含量, 两者按如下关系换算:

$$U = U^* \frac{P}{P_0} \sqrt{\frac{T_0}{T}}, \quad (3)$$

其中, T_0 、 P_0 为标准温度、压力, U^* 为实际水汽含量, U 为有效水汽含量。

在计算水汽吸收率时, 本文采用有效水汽含量来代替大气层中实际水汽含量, 而不考虑压强和温度对水汽吸收系数的影响。

为了实际计算的方便, 我们试图用地面气象要素, 来计算出整层大气有效水汽含量。周允华曾经根据青藏高原及其边缘地区的探空资料, 建立起一个反映该地区月平均水汽有效光学厚度同地面水汽压之间关系的经验方程^[5]。本文采用类似的方法, 利用北京地区地面及高空气象要素资料, 统计出北京地区晴空条件下, 有效水汽含量同地面水汽压之间的关系式。观测点上空, 整层大气实际水汽含量为

$$U^* = \frac{1}{g} \int_0^P q dP', \quad (4)$$

其中 g 为重力加速度, q 为比湿, 它和水气压 e 的关系为

$$q = \frac{\varepsilon e}{P - 0.378e}, \quad \varepsilon = \frac{\mu_v}{\mu_d}.$$

μ_v 和 μ_d 分别为水汽和干空气的平均摩尔质量。

我们用有效水汽含量来表示大气中气压和温度的变化所产生的等效吸收作用。有效水汽含量 U 为

$$U = \frac{1}{g} \int_0^P \frac{P'}{P_0} \sqrt{\frac{T_0}{T'}} q dP', \quad (5)$$

P' 和 T' 分别为气压变量和温度变量, P_0 为标准大气压, 取 1013 hPa, T_0 为标准温度, 取 273 K。

我们利用 1984 年北京地区定时(08 时), 总云量为零情况下, 地面及高空气象要素资料, 根据(5)式, 计算出有效水汽含量 U 。

计算结果表明, 有效水汽含量同地面水汽压 e 之间, 存在着良好的对应关系, 这种关系受季节的影响不大, 比较稳定。它满足如下经验公式:

$$\lg U = -0.8186 + 0.9294 \lg e. \quad (6)$$

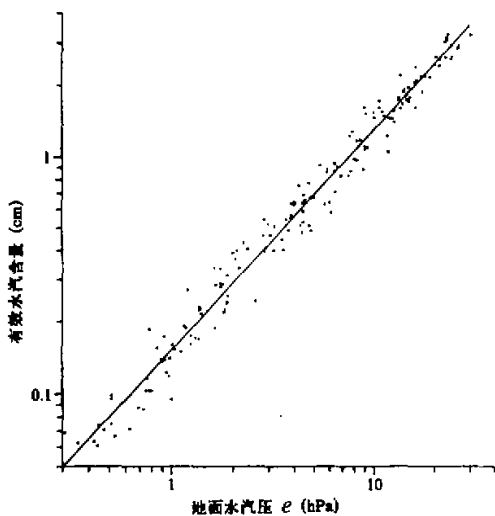


图 1 有效水汽含量与地面水汽压的依赖关系

图 1 为 U 和 e 的关系图, 直线是根据经验公式(6)画出的。从图中可以看出: $\lg U$ 和 $\lg e$ 之间, 有良好的线性关系。公式(5)和经验公式(6)的计算结果是相当吻合的, 相关系数高达 0.989, 标准偏差为 0.14cm。

从图 1 还可以看出, 有个别情况, 实际 U 值较计算结果在较大程度上偏低。这种情况大多发生在干燥的春季, 当时地面水汽压很小, 有效水汽含量随高度迅速递减, 使得整层大气实际有效水汽含量较平均值偏低。在这种情况下, 计算结果的相对误差较大。但由于 U 值很小, 所以绝对误差也很小, 小于 0.07cm, 在处理一般大气光学

厚度问题时, 这样的绝对误差是允许的。有时实际 U 值较计算结果在较大程度上偏高。在这种情况下, 实际有效水汽含量在某一高度上保持不变, 或递减得非常缓慢。可能是这一高度上有一层地面难以观察到的薄云, 使得整层大气实际有效水汽含量, 较平均值偏高。但即使这样, 计算结果的相对误差均小于 33%。

以上这些个别的极端情况在统计资料中不超过 2%。在大多数情况下, 用经验公式(6)计算出的结果是准确合理的。

四、对比试验结果与误差分析

下面根据图 2—图 5 以及表 1—表 3 分析太阳光度计和直射表探测的北京大气柱气

溶胶光学厚度的对比实验结果。根据参考文献[1], 太阳直射表测的太阳直射辐射 S 可近似表示为

$$S = RS_0 F(\bar{\tau}_a, U, X, v^*, \mu_0) e^{-\bar{\tau}_a \sec \theta} \quad (7)$$

式中, S_0 为太阳常数, R 为太阳直射表的波长响应范围内太阳的辐射对太阳总辐射的比值, v^* 为 Junge 气溶胶谱参数, $\bar{\tau}_a$ 为 $0.7 \mu\text{m}$ 波长的气溶胶光学厚度, θ 为太阳天顶角, U 为有效水汽含量, X 为臭氧总量。本文在计算臭氧对太阳辐射的吸收率时, 采用河北省香河县中国科学院大气物理研究所 1979—1989 年月平均的臭氧总量的观测资料, 在计算水汽对太阳辐射的吸收率时, 如果不作进一步的说明, 均采用 Wang 提出的一个关于水汽吸收率的经验表达

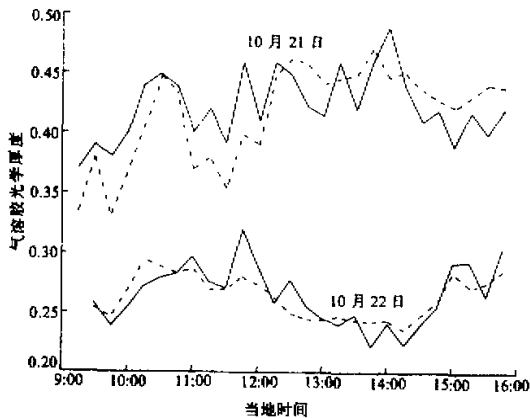


图2 1993年10月21日和22日气溶胶光学厚度对比观测结果

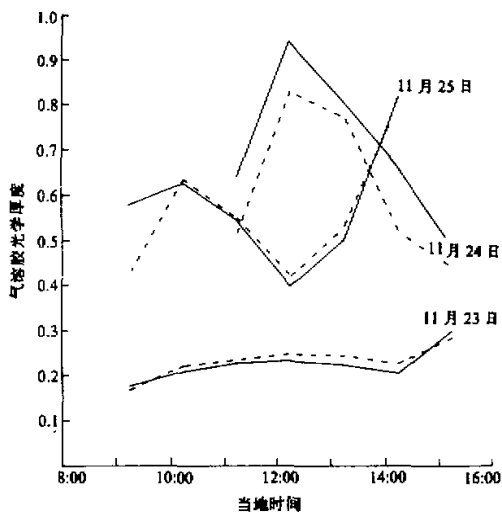


图3 1993年11月23日—25日气溶胶光学厚度对比观测结果

波长相应测值的平均, 可视为 $0.7 \mu\text{m}$ 的气溶胶光学厚度, 在图中由实线代表, 虚线代

式^[4], 并采用本文提出的经验表达式(6)以确定有效的水汽含量。根据太阳光度计观测的 $0.75 \mu\text{m}$ 和 $0.65 \mu\text{m}$ 两个波长的气溶胶光学厚度资料, 1993年10月和11月北京大气柱气溶胶 Junge 谱参数 v^* 的日平均值在 2.3—3.0 之间变化, 若不作说明, 本文均取 $v^* = 2.5$ 。

本文采用迭代方法求解方程(7)以确定 $0.7 \mu\text{m}$ 的气溶胶光学厚度 $\bar{\tau}_a$ ^[1], 求解时, 太阳常数取为 1367 Wm^{-2} , R 取 0.982。

图2表示10月21日和22日对比实验结果, 图3和图4表示11月23日—28日的对比实验结果, 其中光度计探测的光学厚度为 $0.65 \mu\text{m}$ 和 $0.75 \mu\text{m}$ 两个

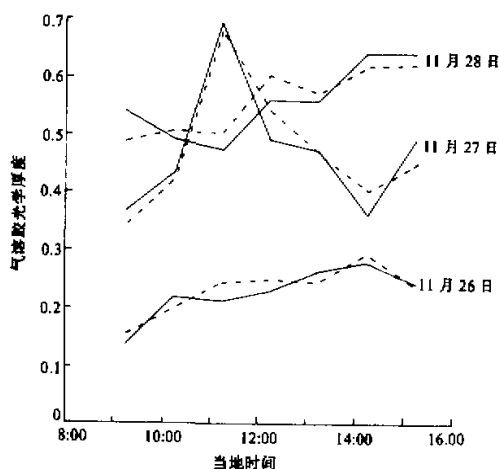


图4 1993年11月26日—28日气溶胶光学厚度对比观测结果

邻两天的光学厚度相差约 0.2, 这主要归因于北京地区边界层气溶胶含量很大的日变化, 在 10 月 21 日 14:00 时刻, 地面能见度为 6 km, 而在 10 月 22 日, 同时刻的地面能见度为 18 km, 表明近地面气溶胶粒子的浓度远低于前一天。在某些天的某些观测时间内, 如 10 月 21 日 09:15—12:15, 光度计观测的光学厚度值系统偏大于太阳直射表探测的结果, 但最大的偏差不大于 24%, 偏大的原因后面另作分析。

表 1 给出上述 8 天中太阳直射表探测的光学厚度对光度计探测的光学厚度的均方偏差 E_R 、日平均光学厚度值的相对偏差 D 和绝对偏差 $\Delta\tau_a$, E_R 、 D 和 $\Delta\tau_a$ 的表达式如下:

$$E_R = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (1 - \tau_{a1}^{(i)} / \tau_{a2}^{(i)})^2}, \quad (8)$$

$$D = 1 - \sum_{i=1}^N \tau_{a1}^{(i)} / \sum_{i=1}^N \tau_{a2}^{(i)}, \quad (9)$$

$$\Delta\tau_a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \tau_{a1}^{(i)} - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \tau_{a2}^{(i)}. \quad (10)$$

上述公式中, N 为一天的对比观测次数, $\tau_{a1}^{(i)}$ 为第 i 次太阳直射表观测的光学厚度, $\tau_{a2}^{(i)}$ 为相应的光度计观测结果。表中模式 I 对应采用 Wang 的水汽吸收率参数化模式的情形, 模式 II 为采用 Lacis 和 Hasen 的水汽吸收率参数化模式的情形。从表 1 可以看出如下几点:

(1) 采用 Wang 水汽吸收率模式的结果优于 Lacis 和 Hasen 模式的结果。根据 Lacis 和 Hasen 公式计算的水汽吸收率总是大于 Wang 公式计算的吸收率, 因此, 采用 Lacis 和 Hasen 公式并由方程(4)反演得到的气溶胶光学厚度解总是偏小。如在 11 月 22 日, Wang 模式的气溶胶光学厚度解比光度计探测的光学厚度平均偏小 0.001, 然而根据

表太阳直射表探测的 $0.7 \mu\text{m}$ 气溶胶光学厚度。如图所示, 在上述 8 天中, 一共进行了 97 组对比实验, 气溶胶光学厚度的变化范围为 0.15—0.83, 在观测时间内, 最小的太阳天顶角的余弦为 0.265, 太阳光度计和太阳直射表探测的 $0.7 \mu\text{m}$ 波长气溶胶光学厚度具有很好的吻合。从图 2 看, 在 10 月 21 日和 22 日, 从 09:15—16:00 气溶胶光学厚度具有很大的变化, 变化范围分别为 0.33—0.5 和 0.15—0.3, 由光度计和直射表探测的气溶胶光学厚度变化趋势是相当一致的。从图 2—图 4 看, 相邻几天的气溶胶光学厚度相差很大, 如图 2 中相

Lacis 和 Hasen 模式计算的结果平均偏小达到 0.012。采用 Wang 的水汽吸收率模式看来是合适的。

(2) 在采用 Wang 水汽吸收率公式的情形下, 太阳直射表探测的光学厚度对光度计探测结果的均方偏差在上述 8 天中均小于 12.1%, 总的均方偏差小于 7.5%, 日平均的光学厚度相对偏差小于 13%, 总平均的光学厚度相对偏差小于 5%, 两种方法的探测结果具有很好的吻合。

(3) 由直射表探测的光学厚度一般小于光度计探测的结果, 就日平均的结果而言, 采用 Wang 模式时偏小在 0.001 范围内, 而采用 Lacis 和 Hasen 模式时为 0.025, 就 8 天总的平均而言, 两者偏小分别为 0.005 和 0.018。

表 1 太阳直射表探测的光学厚度对光度计探测的光学厚度的均方偏差 E_R 、
日平均光学厚度值的相对偏差 D 和绝对偏差 $\Delta\tau_a$

日期	模式 I (Wang)			模式 II (Lacis 和 Hasen)		
	$E_R(\%)$	$D(\%)$	$\Delta\tau_a$	$E_R(\%)$	$D(\%)$	$\Delta\tau_a$
10 月 21 日	12.0	-3.6	-0.012	13.1	-8.8	-0.025
10 月 22 日	6.2	-0.6	-0.001	7.0	-5.1	-0.01
11 月 23 日	6.5	0.7	0.0014	8.5	-7.6	-0.0015
11 月 24 日	13.1	-11.2	-0.058	15.5	-13.8	-0.063
11 月 25 日	12.0	-4.1	-0.022	12.8	-7.2	-0.037
11 月 26 日	6.2	-1.4	-0.0075	6.7	-4.3	-0.022
11 月 27 日	13.0	5.6	0.012	9.0	-2.2	-0.0045
11 月 28 日	7.9	1.0	0.0045	7.6	-2.5	-0.012
平均	9.6%	-2.36%	-0.011	10.9%	-7.5%	-0.024

下面根据表 2 和表 3 所示的探测结果进一步分析太阳直射表探测大气柱气溶胶光学厚度的误差因子。正如参考文献[1]所指出的, 从全波段的太阳直接辐射信息反演大气柱气溶胶光学厚度, 主要的误差源自于水汽吸收率、太阳常数和仪器标定、Junge 气溶胶谱参数 ν^* 以及臭氧吸收率的确定误差, 下面分别加以讨论。

1. 水汽吸收率的误差

水汽吸收率的误差主要源自于两个方面, 一是参数化的吸收率计算模式的误差, 二是有效水汽含量的确定误差。如果仅考虑水汽吸收率 $A(U/\mu_0)$ 误差, 则从参考文献[1]的方程(13)不难导出气溶胶光学厚度解的误差表达式为

$$\Delta\tau_a = \frac{-\mu_0 \Delta A(U/\mu_0)}{1 - A(U/\mu_0)}, \quad (11)$$

$$\Delta\tau_a \approx -\mu_0 \Delta A(U/\mu_0), \quad (12)$$

由于采用不同的水汽吸收数据和太阳辐射谱资料, Lacis 和 Hasen 的吸收率公式(3)和 Wang 的吸收率公式(4)的偏差小于 0.02, 根据公式(8), 由此引起的气溶胶光学厚度解的误差小于 0.02, 对于大于 0.1 的光学厚度, 相对误差小于 20%。根据表 1, 就 8 天的 97 组对比试验的平均结果而言, 采用两个吸收率公式所确定的光学厚度解的偏差约

为 0.013。

从表 2 可以看出采用近似公式(6)计算有效的水汽含量所引起的气溶胶光学厚度解的误差,表中 U 为根据公式(5)并采用探空资料计算的有效水汽含量, ΔU 为根据公式(6)并采用地面水汽压计算的有效水汽含量对前者的相对偏差,从表中所示的 8 天中, U 在 0.2318—0.5727cm 之间变化, ΔU 在 -14.3%—62.1% 之间变化,而太阳直射表探测的光学厚度对太阳光度计探测的光学厚度的均方偏差不大于 13.8%,平均光学厚度的相对偏差在 $\pm 12\%$ 以内,与表 1 模式 I 的结果相比,误差的增大是小的。如前一节所述,经验公式(6)的标准偏差为 0.14cm,又根据参考文献[1], $\pm 0.2\text{cm}$ 的水汽含量的误差所引起的光学厚度解的误差小于 0.01,因此公式(6)的误差所引起的光学厚度解的误差估计一般小于 0.007,采用公式(6)确定有效水汽含量是合适的。此外,从图 1 可以看出,由经验公式(4)计算的有效水汽含量的误差呈随机变化,因此,由太阳直射表探测的月平均和年平均的气溶胶光学厚度的误差估计是小的。

表 2 有效水汽含量的误差对气溶胶光学厚度解的效应

日 期	$U(\text{cm})$	$\Delta U(\%)$	$E_R(\%)$	$D(\%)$
10 月 21 日	0.5727	16.1	12.9	-6.1
10 月 22 日	0.4008	10.8	6.8	-3.7
11 月 23 日	0.213	-14.3	6.0	1.2
11 月 24 日	0.2557	22.1	13.8	-12.0
11 月 25 日	0.475	-6.1	12.0	-3.8
11 月 26 日	0.4805	-8.5	6.1	-0.9
11 月 27 日	0.2245	1.6	11.7	5.4
11 月 28 日	0.2318	62.1	9.7	-2.32

2. 太阳常数和仪器标定误差

太阳直射表的标定误差可以归结为太阳常数的误差,因此下面仅根据表 3 讨论太阳常数的误差对光学厚度解的效应。表 3 中, δ_s 为太阳常数的百分比误差, $\overline{\tau_{a1}}$ 为日平均的光学厚度值, D 和 E_R 同表 1 的意义,即 D 代表太阳直射表探测的日平均的光学厚度值对光度计探测结果的相对偏差, E_R 代表均方误差。如表所示,只要太阳常数的误差(或太阳直射表的标定误差)在 $\pm 2\%$ 以内,对于 10 月 21 日和 11 月 27 日,日平均的光学厚度解的误差均小于 5%,但当太阳常数的误差为 5% 时,误差可达 10%,因此对于太阳常数 $\pm 2\%$ 的误差,由它引起的光学厚度解的误差是小的。

北京观象台的太阳直射表每两年与国际标准仪器标定一次,而它的年变化率在 $\pm 1\%$ 以内,因此,标定误差引起的气溶胶光学厚度解的误差估计会小于 5%。

3. Junge 气溶胶谱参数 v^* 的误差

从表 3 还可以看出选取不同的 Junge 谱参数对气溶胶光学厚度解的效应。如表所示,当 v^* 值选取 2、2.5 和 3 三个值时,对于 10 月 21 日,日平均的光学厚度解的变化不超过 10%, E_R 的变化小于 2%,并以选取 $v^* = 3$,两种方法探测的日平均光学厚度解具有最好的吻合,对于 11 月 27 日光学厚度解的变化小于 11%, E_R 在 9.9% 和

表 3 不同的太阳常数和 Junge 谱参数下的气溶胶光学厚度解

日 期		10 月 21 日			11 月 27 日		
ν^*	$\delta_s(\%)$	$\bar{\tau}_{st}$	$D(\%)$	$E_R(\%)$	$\bar{\tau}_{st}$	$D(\%)$	$E_R(\%)$
2.5	0	0.419	-4.6	12.0	0.226	3.8	11.4
2	0	0.397	-9.2	12.1	0.214	-1.9	9.9
3	0	0.438	0.0	13.8	0.236	8.3	14.1
2.5	2.0	0.43	-1.9	12.5	0.235	7.8	14.0
2.5	-2.0	0.407	-7.2	13.0	0.218	-0.3	9.8
2.5	5.0	4.475	2.1	13.5	0.248	13.7	18.9

14.1%之间变化, D 在-1.9%和 8.3%之间变化, 由此可以看出, 只要 ν^* 值在 2 和 3 之间变化, 选取 $\nu^* = 2.5$ 所引起的误差不超过 5%。

4. 其他误差因子

其他的一些误差因子是臭氧总量的误差以及 O_2 、 CO_2 等一些气体的吸收率确定误差, 根据参考文献[1], 这些误差引起的气溶胶光学厚度解的误差相对是小的。

五、应 用

本节主要分析太阳直射表探测气溶胶光学厚度的初步应用结果。我们应用北京观象台常规的太阳直射表观测资料

反演得到了 1990 年—1993 年晴天大气下大气柱气溶胶光学厚度, 结果见图 5 和图 6 以及表 4—表 7。由于在北京春季和夏季白天完全无云的天气是很少的, 如在 1990 年和 1991 年的 7 月和 8 月, 从 08:15—16:15 没有一天完全无云的天气。从表 4 看, 就月平均的气溶胶光学厚度而言, 统计 14:15 时刻的月平均气溶胶光学厚度是有代表性的, 表中 τ_1 为 08:15—16:15 共 9 个时刻气溶胶光学厚度的平均值(1

小时 1 个观测值), τ_2 为 14:15 时刻的气溶胶光学厚度, 就某一天而言, 两者可能具有较大的误差, 如在 1 月 10 日, τ_2 比 τ_1 偏大 0.169, 但就月平均的结果而言, 两者的偏差还是较小的, 如表所示的 1992 年 1 月, τ_2 比 τ_1 偏大为 0.05, 其他月份的统计结果具有类似的情形。后面分析的结果均指 14:15 时刻的探测值。

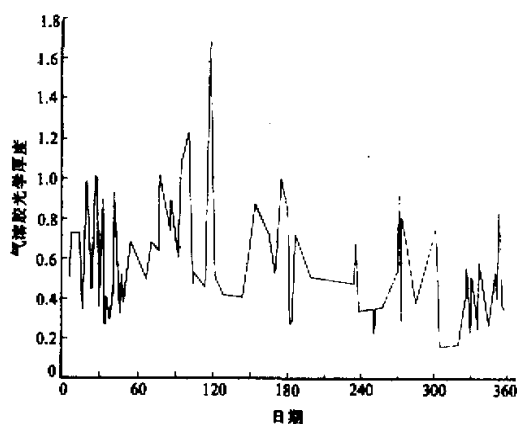


图 5 1992 年气溶胶光学厚度的日变化

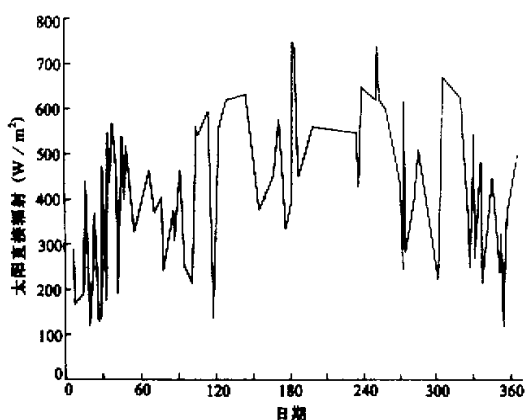


图 6 1992 年太阳直接辐射的日变化

图 5 表示 1992 年所有 1415 时刻云量为 0 的气溶胶光学厚度值, 其变化是很大的, 范围为 0.19—1.78。图 6 表示对应的太阳直射表读数, 地面上太阳的直接辐射在 112—780 W m^{-2} 之间变化, 变化幅度高达 7 倍多, 它主要是由于北京大气柱气溶胶光学厚度激烈变化引起的。根据国外的一些研究, 晴天大气气溶胶光学厚度的变化一般在 0.02—0.2 之间, 而北京的光学厚度一般大于 0.2, 表 5 给出不同光学厚度范围内出现的频数(

天数除以总天数)。如表 5 所示, 在 1990 年、1991 年和 1992 年, 无云的总天数分别为 139、121 和 84 天, 光学厚度小于 0.2 的频数分别为 0.101、0.041 和 0.024, 均不足 11%, 在 0.2—0.5 范围内的频数为 0.576、0.132 和 0.393, 在 0.5—1 内频数为 0.302、0.364 和 0.512, 光学厚度大于 1 的频数也分别为 0.022、0.050 和 0.071。

表 4 1992 年 1 月气溶胶光学厚度

日 期	1	2	3	9	10	13	14	16	22	25	31	平均
τ_1	0.532	0.380	0.584	0.294	0.582	0.371	0.515	0.280	0.637	0.601	0.286	0.511
τ_2	0.498	0.420	0.684	0.268	0.751	0.415	0.566	0.298	0.774	0.625	0.320	0.511

表 5 不同光学厚度变化范围内出现的频数

光学厚度变化范围	<0.2	0.2—0.5	0.5—1	>1	总天数
1990 年	0.101	0.576	0.302	0.022	139
1991 年	0.041	0.132	0.364	0.050	121
1992 年	0.024	0.393	0.512	0.071	84

表 6 给出 1990 年—1993 年月平均的气溶胶光学厚度。如表所示, 在北京地区春季和夏季气溶胶光学厚度较大, 春季较大的光学厚度主要由于经常出现的风沙天气所致, 夏季则可能由于较大的湿度引起的气溶胶的吸湿增长。

表 7 给出 1990—1993 年大气柱气溶胶光学厚度的年平均值(以 $\bar{\tau}_{a1}$ 表示), 1415 时刻无云天气下年平均的太阳直接辐射(以 $\bar{R}$ 表示)以及由一台红宝石激光雷达探测的 13—30 km 高度内北京平流层气溶胶光学厚度(以 $\bar{\tau}_{a2}$ 表示), 其中 1991 年的 $\bar{\tau}_{a2}$ 数据仅为 7 月—12 月的探测结果的平均。激光雷达一般只能探测平流层积分后向散射厚度, 这

里的 $\bar{\tau}_{a2}$ 是在气溶胶的消光对后向散射比为 40 的假设下, 从探测的积分后向散射厚度导出的。从表 7 可以看出, 由太阳直射表探测的北京大气柱气溶胶光学厚度和由激光雷达探测的北京 13—30 km 高度气溶胶光学厚度年均值变化趋势非常一致, 从 1990—1992 年, 两者都呈上升趋势, 从 1992—1993 年, 又都呈下降趋势, 1992 年大气柱气溶胶光学厚度比皮纳图博火山爆发前的 90 年增大 0.14, 太阳直射表探测的晴天太阳直接辐射下降约 20%, 北京地区每月 15 日 14:00 时刻太阳天顶角余弦 μ_0 的年均值为 0.6836, 对 $\mu_0=0.6836$, 光学厚度 0.14 的增加能引起太阳直接辐射下降约 18.5%, 与观测结果相当吻合。由激光探测的 13—30 km 高度的气溶胶光学厚度于 1992 年高达 0.09, 比火山爆发前估计增大约 0.08(常态下平流层气溶胶光学厚度约为 0.01), 这是由于 1991 年 6 月间皮纳图博火山爆发引起的平流层火山灰粒子的大量增多造成的。根据孙金辉等人的研究^[8], 由于该火山爆发, 北京平流层气溶胶粒子的峰值浓度比火山爆发前增大约两个数量级。比较表 7 中 $\bar{\tau}_{a1}$ 和 $\bar{\tau}_{a2}$ 数值, 从 1990 年—1992 年, 北京地区对流层的气溶胶光学厚度也呈上升趋势, 但年增幅估计小于 0.06, 而从 1992 年—1993 年, 对流层气溶胶光学厚度反而略有下降, 对流层气溶胶光学厚度的变化有待于进一步研究, 估计主要是由边界层气溶胶含量的变化引起的。

表 6 1990—1993 年月平均气溶胶光学厚度

$\bar{\tau}_a$ 年 \ 月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1990	0.307	0.526	0.504	0.472	0.522	0.429	0.525	0.461	0.320	0.527	0.365	0.339
1991	0.427	0.446	0.673	0.500	0.628	0.545	0.391	0.676	0.507	0.454	0.402	0.479
1992	0.685	0.533	0.747	0.753	0.509	0.652	0.524	0.501	0.480	0.457	0.367	0.428
1993	0.399	0.402	0.519	0.536	0.529	0.447	0.694	0.309	0.556	0.437	0.395	

表 7 1990—1993 年年平均的气溶胶光学厚度和太阳的直接辐射

年份	1990	1991	1992	1993
$\bar{\tau}_{a1}$	0.441	0.502	0.580	0.468
$\bar{\tau}_{a2}$		0.0657	0.0903	0.035
$\bar{R}(W/cm^2)$	501	457	416	485

六、结 论

(1) 太阳直射表探测的光学厚度和太阳光度计探测结果有较好的吻合, 在 112 组对比试验中, 均方偏差仅为 8.2%, 从全波段的太阳直接辐射信息反演气溶胶光学厚度的方法是可行的;

(2) 本文提出的一个关于北京地区有效水汽含量的经验表达式, 仅由地面的水汽压即可确定大气柱有效水汽含量, 大大简化了计算, 由它引起的光学厚度解的误差一般小于 0.007;

(3) 太阳直射表探测大气柱气溶胶光学厚度的误差主要来源于水汽吸收率、太阳常

数和仪器标定、气溶胶谱分布的确定误差,特别是水汽吸收率误差;

(4) 由太阳直射表探测的北京大气柱气溶胶光学厚度和由激光雷达探测的北京 13—30 km 高度气溶胶光学厚度年均值变化趋势非常一致,从 1990—1992 年,两者都呈上升趋势,从 1992—1993 年,又都呈下降趋势,1992 年大气柱气溶胶光学厚度比皮纳图博火山爆发前的 1990 年增大 0.14,相应的太阳直接辐射下降约 20%,而由激光探测的 13—30 km 高度的气溶胶光学厚度与 1992 年高达 0.09,比火山爆发前约增大 0.08。

参 考 文 献

- [1] 邱金桓, 1994, 从全波段太阳直射辐射确定大气气溶胶光学厚度, I: 理论, 大气科学, 19(4), 385—394.
- [2] Yamamoto, G., 1962, Direct absorption of solar radiation by atmospheric water vapor, carbon dioxide and molecular oxygen, *J. Atmos. Sci.*, 19, 182—188.
- [3] Lacis, A.A. and Hansen, J.E., 1974, Aparameterization for the absorption of solar radiation in the earth's atmosphere, *J. Atmos. Sci.*, 31, 118.
- [4] Wang, W., 1976, A parameterization for the absorption of solar radiation by water vapor in the earth's atmosphere, *J. Appl. Meteor.*, 15, 21—27.
- [5] 周允华, 1984, 青藏高原地面长波辐射经验计算方法, 地理学报, 39, 148—161.
- [6] 周秀骥, 1990, 高等大气物理学, 气象出版社, 661—708.
- [7] 邱金桓, 孙金辉, 1994, 沙尘暴的光学遥感和分析, 大气科学, 18(1), 1—10.
- [8] 孙金辉, 邱金桓, 夏其林, 张金定, 1993, 激光探测平流层火山云, 科学通报, 38, 631—633.

A New Method of Determining Atmospheric Aerosol Optical Depth from the Whole Spectral Direct Solar Radiation, Part II: Experimental Study

Qiu Jinhuan, Yang Jingmei and Pan Jidong

(Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract

Based on a comparison of the columnar atmospheric aerosol optical depth measured by a pyrliometer and that a the sunphotometer, this paper analyzes the error in the optical depth determined from the whole direct solar radiation detected by a pyrliometer. According to 1990—1993 atmospheric aerosol optical depth over Beijing area retrieved from solar radiation data measured by the pyrliometer at meteorological observing station in Beijing, the monthly and annual characteristics of the depth and the effect of the volcanic eruption of Mt. Pinatubo in 1991 on the atmospheric aerosol content in Beijing are studied. Furthermore, this paper proposes an experimental formula of effective H_2O amount to determine the H_2O absorptivity of the solar radiation.

Key words: aerosol optical depth; effective H_2O amount; direct solar radiation.