

大气气溶胶光学厚度的宽带消光遥感方法及其应用^{*}

邱金桓

(中国科学院大气物理研究所 北京 100029)

摘要 该文发展了遥感气溶胶光学厚度的一个宽带消光遥感方法,它应用地面上太阳直射表探测的宽波段太阳直射信息反演 $0.75\mu\text{m}$ 大气柱光学厚度。该方法的主要误差因子是气溶胶谱的不确定性。数值试验表明,气溶胶谱分布的误差所引起光学厚度解的误差一般小于 5%。1995 年 1—10 月进行的 1267 组对比实验表明,由本方法探测的气溶胶光学厚度与光度计探测的气溶胶光学厚度的标准差为 10.5%,两者平均结果的偏差只有 0.7%。该文还应用这个方法,从气象台站辐射观测资料反演得到北京、沈阳等 10 个地方 1980—1994 年间晴天气溶胶光学厚度资料,并分析其变化规律。

关键词 大气气溶胶, 光学厚度, 宽带消光, 气溶胶谱

1 引言

大气气溶胶对研究环境与气候变化,对空间对地遥感的大气订正等都具有非常重要的意义。它直接参与凝云致雾过程,影响着地球辐射收支平衡,还参与臭氧的非均相反应,影响着臭氧平衡。在年际气候变化研究中,火山气溶胶被认为是地球系统气候变化中一个重要的外源。大气气溶胶光学厚度是气溶胶的主要物理光学参数,是表征大气浑浊度的一个基本物理量,是确定气溶胶辐射气候效应和进行空间遥感大气订正的一个关键因子。光谱消光法是探测气溶胶光学厚度最经典也是最广泛应用的一种方法,它应用窄带太阳光度计测量太阳的直射光强以确定气溶胶光学厚度^[1-6]。世界上已有少量台站或大气监测站长期坚持采用光度计测量太阳的直射光强以确定大气柱气溶胶光学厚度,积累了十分宝贵的资料。但这类台站只占极少一部分,许多台站只有全波段或宽波段的太阳辐射长期观测历史。但这类台站极少,许多台站只有全波段或宽波段的太阳辐射长期观测历史。邱金桓曾从理论上提出了宽波段太阳直射辐射信息反演 $0.7\mu\text{m}$ 大气柱气溶胶光学厚度的一个方法^[7,8]。这篇文章进一步发展了这个方法,它采用 LOWTRAN-7 6 个大气模式,更深入地研究了太阳短波直射辐射对气溶胶的敏感性,发现从该辐射信息更普遍适用于反演

$0.75\mu\text{m}$ 气溶胶光学厚度,并发展了相应的迭代反演算法和参数化模式。这个方法基于宽带太阳消光信息,因此称作为宽带消光法。考虑到我国许多气象台站有长期太阳直射辐射观测历史,这方法的实际应用是很有意义的。该文应用这个方法和气象台站的太阳直射表观测资料,反演得到了北京等地 1980—1994 年间 $0.75\mu\text{m}$ 气溶胶光学厚度资料,分析了其变化规律。

2 原理和方法

在地面上 λ 波长的太阳直射光强 $S(\lambda)$ 可表为:

$$S(\lambda) = S_0 e^{-[\tau_a(\lambda) + \tau_m(\lambda)]m(\theta)} \quad (1)$$

式中, $S_0(\lambda)$ 为大气上界 λ 波长太阳光强; θ 为太阳天顶角; $m(\theta)$ 为空气质量; 对 $\theta < 75^\circ$, 通常可取 $m(\theta) = \sec(\theta)$; $\tau_a(\lambda)$ 为 λ 波长大气气溶胶光学厚度; $\tau_m(\lambda)$ 为分子光学厚度(包括吸收光学厚度和散光学厚度)。该文的研究主要局限于小于 75° 的太阳天顶角,后面取 $m(\theta) = \sec\theta = 1/\mu_0$, 为里 μ_0 为太阳的天顶角余弦。

在许多气象台站,太阳直射表测量的不是谱光强,而是总太阳直射辐射 S , 其表达式为:

$$\begin{aligned} S &= \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_0(\lambda) T_{\text{Total}}(\lambda, \mu_0) d\lambda \\ &= \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_0(\lambda) T_a(\lambda, \mu_0) T_m(\lambda, \mu_0) d\lambda \end{aligned}$$

* 国家自然科学基金资助项目。

$$= \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_0(\lambda) e^{-\tau_a(\lambda)/\mu_0} T_m(\lambda, \mu_0) d\lambda$$

式中, λ_1 和 λ_2 分别为太阳光谱的下限和上限; T_{Total} 是总谱透过率函数; T_a 是气溶胶的透过率函数; T_m 是分子的透过率函数。所有的透过率函数均采用 LOWTRAN-7 模式计算^[9]。

现在应用的太阳直射表一般具有 $0.3\mu\text{m}-4\mu\text{m}$ 光谱响应范围。太阳辐射能量的 97.8% 集中在 $0.3\mu\text{m}-4\mu\text{m}$ 波长范围内, 而小于 $0.3\mu\text{m}$ 和大于 $4\mu\text{m}$ 波长的太阳辐射到达地面以前基本上已被大气微量气体吸收。因此, 该文取 $\lambda_1=0.3\mu\text{m}$, $\lambda_2=4\mu\text{m}$ 。

6 个 LOWTRAN-7 定义的大气模式用于现在的理论研究, 它们是: (1) 热带大气; (2) 中纬度夏季大气; (3) 中纬度冬季大气; (4) 副极地夏季大气; (5) 副极地冬季大气; (6) 1976US 标准大气。

定义:

$$R = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_0(\lambda) d\lambda \bigg/ \int_0^{\infty} S_0(\lambda) d\lambda \quad (3)$$

$$= \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_0(\lambda) d\lambda \bigg/ S_0$$

$$t_m = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_0(\lambda) T_m(\lambda, \mu_0) d\lambda \bigg/ \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_0(\lambda) d\lambda \quad (4)$$

$$G[\lambda_0, \mu_0, \tau_a(\lambda_0)] = e^{\tau_a(\lambda_0)\mu_0} S \bigg/ \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_0(\lambda) T_m(\lambda, \mu_0) d\lambda \quad (5)$$

式中, R 为小于 $0.3\mu\text{m}$ 和大于 $4\mu\text{m}$ 的太阳辐射与太阳常数 S_0 之比值; t_m 代表 $0.3\mu\text{m}-4\mu\text{m}$ 之间分子总透过率。于是方程 (2) 可变为:

$$S = RS_0 G[\lambda_0, \mu_0, \tau_a(\lambda_0)] t_m \exp[-\tau_a(\lambda_0)] \quad (6)$$

依据中值定理, 方程 (2) 又可变为

$$S = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_0(\lambda) e^{-\tau_a(\lambda)/\mu_0} T_m(\lambda, \mu_0) d\lambda$$

$$= \exp[-\tau_a(\lambda_a)/\mu_0] \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_0(\lambda) T_m(\lambda, \mu_0) d\lambda, \quad (7)$$

式中 $\tau_a(\lambda_a)$ 可视为辐射等效的平均气溶胶光学厚度; λ_a 为对应该厚度的波长。

结合方程 (6), 方程 (5) 可化为:

$$G[\lambda_0, \mu_0, \tau_a(\lambda_0)] = \exp[\tau_0(\lambda_0)/\mu_0 - \tau_a(\lambda_a)/\mu_0]. \quad (8)$$

显然, 如果 $G[\lambda_0, \mu_0, \tau_a(\lambda_0)] = 1$, 则 $\tau_a(\lambda_0) = \tau_a(\lambda_a)$ 。如果对任意的大气条件 λ_a 都接近于一个常数波长 λ_0 , G 必定近似等于 1, 结果 λ_0 波长的气溶胶光学厚度可根据方程 (5) 从太阳的直射信息加以提取。

下面在 Junge 气溶胶谱分布下从表 1 分析 λ_a 的变化范围。假设气溶胶的折射率不随波长改变, 则在 Junge 谱分布下, 气溶胶谱和光学厚度可表为:

$$n(r) = cr^{-(v^*+1)} \quad (9)$$

$$\tau_a(\lambda) = \beta \lambda^{-(v^*-2)} \quad (10)$$

式中, v^* 是 Junge 谱参数; β 是混浊度系数 (即 $1\mu\text{m}$ 波长的气溶胶光学厚度)。表 1 中, $\bar{\lambda}_a$ 和 $\Delta\lambda_a$ 是 480 种情形下 λ_a 的标准差和平均值, 其定义为:

$$\bar{\lambda}_a = \sum_{i=1}^{480} \lambda_a^{(i)} / 480, \quad (11)$$

$$\Delta\lambda_a = \sqrt{\sum_{i=1}^{480} (\lambda_a^{(i)} - \bar{\lambda}_a)^2 / 480}, \quad (12)$$

式中, $\lambda_a^{(i)}$ 是第 i 个 λ_a 值。该 480 个 λ_a 值的输入参数是: θ 为 0° , 50° 和 75° ; $v^* = 1.9 + 0.01i$, $i = 1, \dots, 16$; $\beta = 0.05i$, $i = 1, \dots, 10$ 。

表 1 值 $\bar{\lambda}_a$ 和 $\Delta\lambda_a$

Table 1 Values $\bar{\lambda}_a$ and $\Delta\lambda_a$

大气模式	$\bar{\lambda}_a$ (cm)	$\Delta\lambda_a$ (cm)
1	0.738	0.044
2	0.747	0.047
3	0.772	0.052
4	0.755	0.048
5	0.783	0.054
6	0.762	0.050

如表所示, 对 LOWTRAN-7 中的 6 个大气模式, 在 480 种情形直 λ_a 的平均值在 $0.738-0.783$ 之间变化, 标准差 $\Delta\lambda_a$ 都小于 0.054。因此, $0.75\mu\text{m}$ 气溶胶光学厚度近似等于辐射等效的平均气溶胶光学厚度, 而且当 $\lambda_0 = 0.75\mu\text{m}$ 时, 公式 (5) 中定义的函数 G 近似等于 1 并弱相关于气溶胶的谱特性, 从 S 信息可确定 $\lambda_0 = 0.75\mu\text{m}$ 波长的气溶胶光学厚度。

令 $\tau_a = \tau_a(\lambda = 0.75\mu\text{m})$, 则在 Junge 谱分布

条件下， G 为 μ_0 ， $\bar{\tau}_a$ 和 v^* 的函数，记为 $G(\mu_0, \bar{\tau}_a v^*)$ 于是 S 可表为：

$$S = RS_0 G(\mu_0, \bar{\tau}_a, v^*) t_{me} - \bar{\tau}_a / \mu_0. \quad (13)$$

下面，为了简化计算，在 Junge 谱分布条件下建立一个关于 S 的参数模式，即：

$$S = RS_0 G(\mu_0, \bar{\tau}_a, v^*) t_{me} - \bar{\tau}_a / \mu_0, \quad (14)$$

$$G(\mu_0, \bar{\tau}_a, v^*) = [1 + b\bar{\tau}_a + c\bar{\tau}_a^2] f_1, \quad (14.1)$$

$$b = (0.383 - 0.93\mu_0 + 0.55\mu_0^2)(v^* - 2) - (0.4 - 0.67\mu_0 + 0.36\mu_0^2)(v^* - 2)^2 \quad (14.1a)$$

$$c = (0.89 - 2.1\mu_0 + 1.23\mu_0^2)(v^* - 2) + 0.006(1 - 14.7\mu_0 + 143\mu_0^2)(v^* - 2)^2 \quad (14.1b)$$

$$f_1 = 1 + 0.175(v^* - 2)(1 - 1.08U)\bar{\tau}_a / (1 + 0.36U + 10\mu_0^3\sqrt{U}), \quad (14.1c)$$

$$t_m = t_{ms}(1 - A_{H_2O})(1 - A_{O_3})(1 - A_{air})f_2, \quad (14.2)$$

$$t_{ms} = \int_{\lambda_1}^{\lambda^2} S_0(\lambda) T_{ms}(\lambda, \mu_0) d\lambda = \exp[-(0.00859 + 0.0883/\mu_0 - 0.006/\mu_0^2) \frac{p}{1013}], \quad (14.2a)$$

$$A_{H_2O} = \int_{\lambda_1}^{\lambda^2} S_0(\lambda) [1 - T_{H_2O}(\lambda, \mu_0)] d\lambda \left| \int_{\lambda_1}^{\lambda^2} S_0(\lambda) d(\lambda) \right. = 10^{-0.911 + 0.306 \log_{10}(U/\mu_0) - 0.0119 [\log_{10}(U/\mu_0)]^2}, \quad (14.2b)$$

$$A_{O_3} = \int_{\lambda_1}^{\lambda^2} S_0(\lambda) [1 - T_{O_3}(\lambda, \mu_0)] d\lambda \left| \int_{\lambda_1}^{\lambda^2} S_0(\lambda) d(\lambda) \right. = \frac{0.0345 X}{\mu_0(1 + 2.2X/\mu_0)} + \frac{0.0218 X}{\mu_0(1 + 0.042X/\mu_0 + 0.000323X^2/\mu_0)}, \quad (14.2c)$$

$$A_{air} = \int_{\lambda_1}^{\lambda^2} S_0(\lambda) [1 - T_{air}(\lambda, \mu_0)] d\lambda \left| \int_{\lambda_1}^{\lambda^2} S_0(\lambda) d(\lambda) \right. = 0.000014 p / \mu_0, \quad (14.2d)$$

$$f_1 = 1 - 0.000255 \sqrt{pUX} / \mu_0^{1.5} - 0.0000903 U \sqrt{pX} / \mu_0, \quad (14.2e)$$

(14) 式中 P 为地面大气压 (mb)； X 为臭氧总量 (cm)； A_{O_3} 为臭吸收率， A_{air} 是均匀混合空气的吸收率， $\bar{\tau}_a$ 为 $0.75\mu m$ 气溶胶光学厚度， A_{H_2O} 为水汽的吸收率， U^* 为柱水汽含量 (cm)，其表达式

$$U = U^* \frac{P}{P_0} \sqrt{\frac{T_0}{T}}. \quad (15)$$

(15) 式中， U^* 为正确的柱水汽含量。考虑水汽吸收系数对大气温度和压力的依赖^[10]，这里以 U^* 代替 U 计算水汽的吸收率。

表 2 给出参数化公式 (14) 的精度。表中， δ_p 是 576 种情形下由参数化公式计算的太阳辐射 S 的标准差。该 576 个 S 值的输入参数是： θ 为 0° ， 50° 和 75° ； $v^* = 1.9 + 0.01i$ ； i 为 $1, \dots, 16$ ； $\beta = 0.05i$ ， i 为 $1, \dots, 12$ 。对表中所示的 6 个大气模式，标准差均为小于 0.486% ，精度是很高的。

表 2 参数化公式的标准差

Table 2 Standard error of parameteriaed direct solar radiation

大气模式	δ_p (%)	大气模式	δ_p (%)
1	0.486	4	0.272
2	0.356	5	0.364
3	0.217	6	0.222

如上所述， $G \approx 1$ 。因此，采用迭代方法从方程 (14) 确定气溶胶光学厚度。迭代方法如下：

- (1) 令 $G^{(0)}(\mu_0, \bar{\tau}_a, v^*) = 1$ ；
- (2) $n = 1$ ；
- (3) $\bar{\tau}_a^{(n)} = [\log(RS_0 t_m G^{(n-1)}) - \log(S)] / \mu_0$ ；
- (4) 根据方程 (14.1) 并假设一个 v^* 值 (记为 v_0)，计算 $G^{(n)}(\mu_0, \bar{\tau}_a^{(n)}, v^*)$ ；
- (5) 令 n 为 $n + 1$ ，重复 3 和 4 步；
- (6) 当 $abs(1 - \bar{\tau}_a^{(n-1)} / \bar{\tau}_a^{(n)}) < \epsilon$ 时，迭代终止，该文取 $\epsilon = 0.005$ 。

3 数值试验与分析

由太阳的宽带直射辐射确定气溶胶光学厚度的主要问题是气溶胶谱的误差。下面侧重根据数值试验分析气溶胶谱的误差效应。

先从表 3 分析 Junge 谱分布条件下光学厚度解的误差。表 3 中 δ_a 为 576 个光学厚度解的标准差， v_0 为反演时假设 Junge 谱参数。该 480 个数值反

演的输入参数是： $\beta=0.005i, i=1, \dots, 12; v^*=1.9+0.2j, j=j=1, 2, \dots, 16; \theta$ 为 $0^\circ, 50^\circ$ 和 75° 。

如表3所示，当 $v_0=v^*$ ，对所有的6个大气模式， $\delta_a \leq 1.53\%$ ，这意味着参数化公式(14)的误差所引起的光学厚度解的误差是小的，当 $v_0=3, \delta_a \leq 4.87\%$ ，而当 $v_0=2.5, \delta_a \leq 5.8\%$ 。在480个值试验中，所选的气深胶谱覆盖着很宽的条件，但取 $v_0=3$ 用于反演时，光学厚度解的误差一般小于5%，解是相当理想的。

表3 在Junge下气溶胶光学厚度解的标准差
Table 3 Standard error of aerosol optical depth solutions under Junge size distribution

大气模式		δ_a (%)		
1	1.33	4.41	5.58	
2	1.23	4.46	4.84	
3	0.76	4.52	4.25	
4	0.63	4.29	4.65	
5	1.53	4.87	4.17	
6	0.28	4.29	4.63	
v_0	v^*	3.0	2.5	

既然光学厚度解对Junge谱分布不敏感，该文提取的方法有希望适用于非Junge谱的情形。这从表4所示的非Junge谱的数值试验中清楚地看出来。

表4中， δ 代表20个LOWTRAN-7气溶胶谱(非Junge谱)下气溶胶光学厚度解的标准差，反演时气溶胶谱假设为 $v_0=3$ 的Junge谱。这20个谱中， $0.75\mu\text{m}$ 气溶胶光学厚度在0.075-0.85之间变化。如表所示，当太阳天顶角 θ 为 $0^\circ, 30^\circ, 50^\circ, 60^\circ$ 和 75° 时，20个解的标准差分别为3.451%，5.08%，2.29%，4.379%和6.56%。总共100个解的标准差为4.459%。这表明由气溶胶谱的不确定性引起的 $0.75\mu\text{m}$ 光学厚度解的误差一般小于5%，解的精度是较理想的。

表4 在20个LOWTRAN-7气溶胶模式下气溶胶光学厚度解的标准差

Table 4 Standard error of aerosol optical depth solutions for 20 aerosol models defined in LOWTRAN-7

θ (deg)	(C)1994-2023	China Academic Journal Electronic Publishing House	www.cnki.net
δ (%)	3.451	5.080	2.293 4.397 6.557

4 对比试验

对比观测使用光度计和太阳直射表，地点在中国科学院大气物理研究所办公楼楼顶。从1995年1月-6月，进行25天观测，对比数据共1267组。光度计有8个滤光片，中心波长分别为0.4, 0.44, 0.52, 0.612, 0.67, 0.78, 0.88, $1.03\mu\text{m}$ 。太阳射表具有具有 $0.3-4\mu\text{m}$ 光谱响应范围和 $6^\circ 12' 29''$

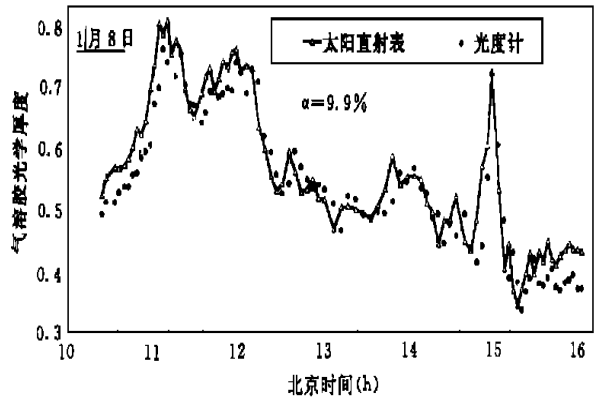


图1 1995年1月8日的对比观测结果

Fig.1 A comparison between aerosol optical depths asured by pyrhelimeter and sunphotometer in January 8, 1995 of the view angle.

下面从图1图2和表5分析对比观测结果。这些图表中， τ_{as} 为光度计观测的 $0.75\mu\text{m}$ 气溶胶光学厚度，视为正确的光学厚度， τ_{ap} 是采用该文的方法由太阳辐射表观测的 $0.75\mu\text{m}$ 气溶胶光学厚度， α 是 τ_{ap} 对 τ_{as} 的标准差。在从太阳直接辐射反演 $0.75\mu\text{m}$ 光学厚度过程中，取 $v_0=3$ ，臭氧含量取自北京香河站1979-1989年观测的月平均值， R 取0.982。

图1表示在冬季1月8日的对比观测结果。在这一天，气溶胶光学厚度日变化很大，范围在0.349-0.78之间，但光度计和辐射表的观测结果有很好的一致， τ_{ap} 和 τ_{as} 之间的相关系数是92.3%，标准差是9.6%。

图2表示在春季4月1日观测结果。在13:00前，光学厚度是稳定的，13:00后，出现了云层并产生了大约1.4的极大值。在变化过程中，两种方法的探测结果吻合相当好，只有7.6%的标准差。

表5给出25天的1267组数据的统计结果，其中 N 是一天中的观测次数， $\bar{\tau}_{as}$ 是 N 组辐射表探测

表 5 1267 组观测数据的统计结果

Table 5 Statistic results of 1267 sets of aerosol optical depths measured by pyrhelimeter and sunphotometer

Date	N Times	$\bar{\tau}_{as}$	$\bar{\tau}_{ap}$	v^*	$v_0=3$		$v_0=2.5$		$v_0=3.5$		$v_0=v^*$		
					Δ (%)	α (%)	Δ (%)	α (%)	Δ (%)	α (%)	Δ (%)	α (%)	
Jan.9	09	0.559	0.577	2.39	3.1	9.6	-4.6	8.7	17.0	20.7	-5.8	9.3	
	9	126	0.150	0.145	2.90	-2.8	8.9	-4.7	8.8	-3.1	10.2	-3.2	8.6
	11	119	0.272	0.291	3.13	7.3	8.4	0.7	4.2	17.0	18.1	10.1	10.8
Mar.21	14	0.595	0.611	2.44	2.6	9.5	0.3	4.9	6.1	19.0	0.1	4.6	
	25	14	0.269	0.253	2.48	-5.9	12.9	-6.3	11.3	-7.7	15.8	-6.2	11.4
	27	17	0.257	0.241	2.41	-6.4	11.9	-5.9	11.1	-9.2	13.6	-6.0	11.1
	30	9	0.860	0.897	2.25	4.3	9.5	0.7	4.9	11.2	21.2	8.5	16.4
	31	51	0.246	0.244	2.41	-0.9	11.8	-0.2	11.0	-4.0	13.4	-0.3	11.4
Apr.1	35	0.571	0.532	2.36	-6.7	7.6	-6.1	6.9	-8.8	10.2	-6.2	6.9	
	2	82	0.298	0.268	2.53	-10.0	12.3	-9.6	11.4	-12.8	15.3	-9.4	11.4
	3	51	0.519	0.518	2.57	-0.2	8.4	-2.3	5.4	2.1	15.7	-2.0	6.1
	4	60	1.086	1.150	2.77	5.8	12.3	0.2	3.6	16.2	29.7	4.2	11.7
	6	21	0.581	0.528	2.31	-9.1	12.7	-11.4	12.7	-6.8	13.0	-12.5	12.9
	9	70	0.294	0.266	2.59	-9.3	10.7	-9.2	10.0	-11.7	13.5	-8.9	10.0
	11	90	0.319	0.338	2.84	5.9	13.3	6.0	11.2	4.3	16.4	7.6	15.2
	12	28	0.415	0.449	2.51	8.2	13.4	6.3	9.8	9.2	18.0	5.9	9.4
	14	19	1.072	1.090	2.89	1.6	6.9	-0.5	2.4	6.1	16.5	1.1	5.5
	16	97	0.447	0.436	2.54	-2.4	5.6	-1.6	4.1	-5.2	8.5	-1.7	4.2
May14	55	0.359	0.380	2.65	5.9	9.6	8.1	10.2	1.5	9.5	7.7	10.2	
	25	36	0.383	0.365	2.35	-4.9	12.6	-1.6	12.2	-10.3	14.9	-1.1	12.2
	26	39	0.363	0.337	2.40	-7.1	8.5	-4.0	5.5	-12.3	13.5	-3.7	5.2
	Jun.4	68	0.410	0.368	2.69	-10.2	12.5	-4.4	9.1	-17.5	18.5	-6.6	9.8
		25	31	0.337	0.285	2.40	-14.3	14.8	-10.5	11.0	-20.2	20.4	-10.0
	Total	1267	0.415	0.412	2.65	-0.7	10.5	-2.2	8.7	1.4	16.2	-1.1	10.1

的光学厚度平均值， $\bar{\tau}_{ap}$ 是平均的光度计测值， Δ 是两者之间百分比偏差， α 是两种方法观测的光学厚度的标准差， v^* 是由光度计确定的 Junge 谱参数， v_0 是反演过程中估计的 Junge 谱参数。在表 $\bar{\tau}_{ap}$ 值是取 $v_0=3$ 的结果。

从表 5 可以看出

(1) 当取 $v_0=3$ 时，就一天的对比结果而言，标准差 α 在 5.50%—14.8% 间变化，除 3 天外，增均差 Δ 在 $\pm 10\%$ 内，就总的 1267 组对比结果而

言， α 是 10.5%， Δ 是 -0.7%。因此，用该文方法得到的 $0.75\mu\text{m}$ 光学厚度的误差一般小于 11%，而且大量数据的平均值可得到更好的精度。

(2) 就总的 1267 组对比结果而言，当 $v_0=2.5$ 时， Δ 和 α 分别是 -2.2% 和 8.7%；当 $v_0=v^*$ 时， Δ 和 α 分别是 -1.1% 和 10.1%，其精度同 $v_0=3$ 时大至相同。在 $v_0=3.5$ 时， α 是 16.2%，精度较差，但 Δ 仍较小，仅为 1.4%。 v^* 的日平均值在 2.31—3.25 之间变化，1267 组

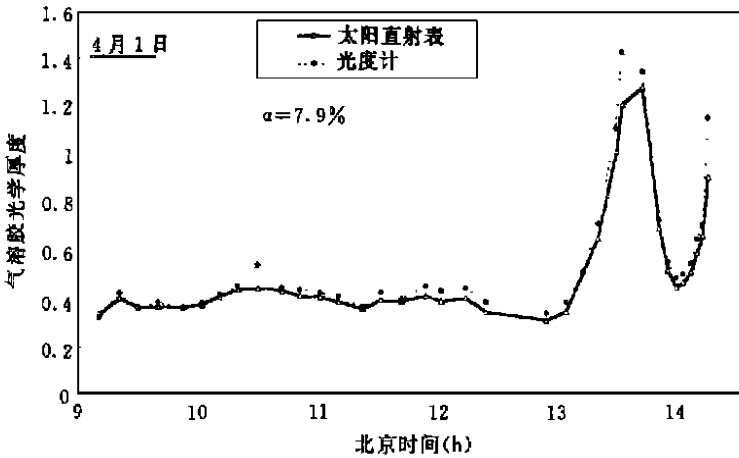


图2 1995年4月1日的对比观测结果

Fig.2 Same as in Fig.1 but for April 4, 1995

v^* 的平均值为 2.56。看来选择 $v_0=3$ 或 2.5 较合适。图 1 是 1995 年 1 月 8 日的对比观测结果。

(3) 当气溶胶光学厚度较小时, 如在 1 月 9 日 $\bar{\tau}_{as}=0.15$, 当 v_0 在 2.5-3.5 之间变化, Δ 在 -2.8%和 -4.7%之间; $\bar{\tau}_{ap}$ 对 v_0 的变化并不敏感。但当气溶胶光学厚度大时, 如 4 月 4 日 $\bar{\tau}_{as}=1.086$, 当 v_0 在 2.5-3.5 之间变化, Δ 在 0.2%-16.2%之间变化 $\bar{\tau}_{ap}$ 对 v_0 的变化较敏感。所以, 在光学厚度较大的情况下, v_0 的合适选取是有用的。

综上所述, 用该文方法探测的气溶胶光学厚度的误差一般在 $\pm 11\%$ 以内。

5 应用

应用上述的气溶胶光学厚度宽带消光遥感法, 从气象台站辐射观测资料反演得到北京等 10 个地方 1980-1994 年间晴天气溶胶光学厚度资料。这 10 个地方是北京、昆明、喀什、上海、广州、郑州、沈阳、武汉、格尔木和乌鲁木齐。下面根据图 3-图 6 和表 6 分析这 10 个地方 $0.75\mu\text{m}$ 气溶胶光学厚度的变化特征。

为避免云的影响, 对北京、喀什、郑州、沈阳、格尔木和乌鲁木齐 6 个地方, 取一年中所有 14:00 时刻云量为零时太阳直射表观测资料, 且只选用 12:00 以后最大的太阳短波直接辐射值, 对另 4 个台站, 由于云量为零的天数较少, 特别是在夏季, 因此我们选取一年中所有云量小于 3 的太阳直射表观测资料, 但删除气溶胶光学厚度较大的个例。

从太阳直接辐射反演 $0.75\mu\text{m}$ 气溶胶光学厚度, 须知道有效水汽量。有效水汽含量采用杨景梅等人提出的关于该含量与地面水汽压的经验关系式从气象台站的地面水汽压观测资料求得^[11]。

图 3 和图 4 给出北京等地 1980-1994 年间晴天大气柱气溶胶总光学厚度年平均值, 其中图 3 表

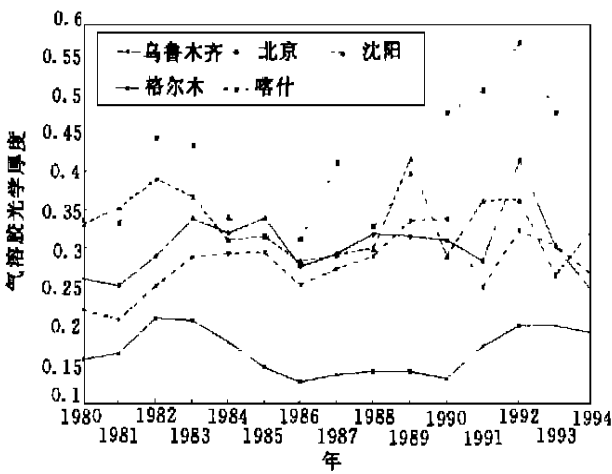


图3 北京等地 1980-1994 年间大气气溶胶总光学厚度年平均值

Fig.3 Yearly-averaged optical depths of atmospheric aerosol over Beijing, Shenyang, Wulumuqi, Germu

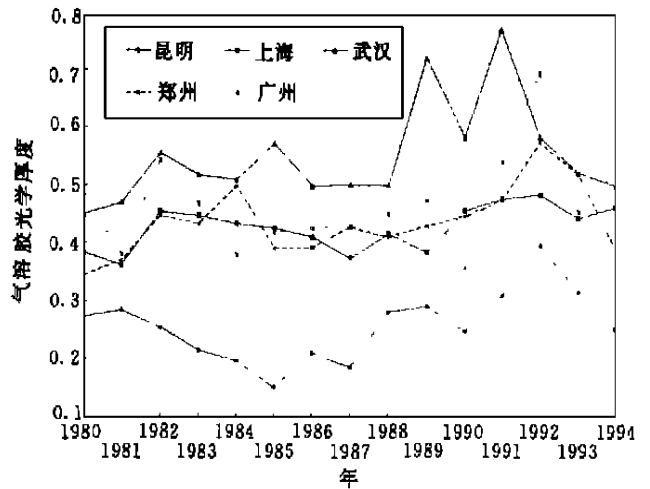


图4 昆明等地 1980-1994 年间气溶胶溶胶总光学厚度年平均值

Fig.4 Yearly-averaged optical depths of atmospheric aerosol over Zhengzhou, Wuhan, Shanghai, Kunming and Guangzhou aereas during 1980-1994

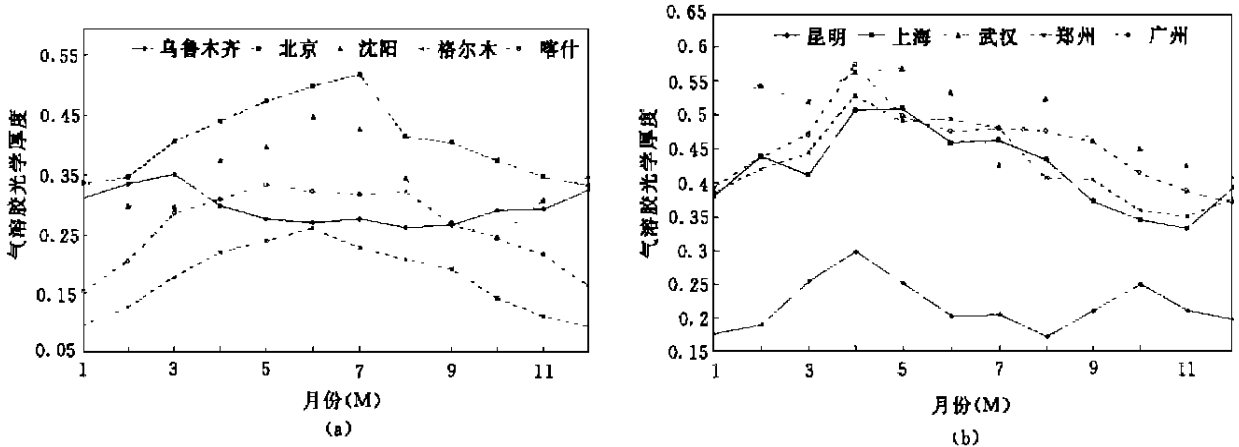


图 5 北京等 10 个地点 1980 至 1994 年间总月平均气溶胶光学厚度

Fig. 5 Total monthly average aerosol optical depths over 10 sites in China during 1980—1994

表 6 气溶胶光学厚度的平均值和年变化率

Table 6 Average values and annual variation rates of aerosol optical depths during 1980—1994

地点	北京	沈阳	乌鲁木齐	格尔木	喀什
平均值	0.410	0.332	0.305	0.166	0.278
$\Delta\tau_a$	0.0118	-0.0018	0.0023	0.0008	0.0051

地点	郑州	武汉	上海	昆明	广州
平均值	0.434	0.546	0.424	0.253	0.464
$\Delta\tau_a$	0.0071	0.0084	0.0047	0.0060	0.0068

示乌鲁木齐、北京、沈阳、格尔木和喀什的情形，图 4 表示昆明、上海、武汉、郑州和广州的情形。表 6 给出北京等地 1980—1994 年间总平均的气溶胶光学厚度和光学厚度的年变化率 $\Delta\tau_a$ 。1982 年 4 月爆发的墨西哥奇琼火山和 1991 年 6 月爆发的菲律宾皮纳图博火山是本世纪二次最大的火山爆发。从图 3 图 4 和表 6 可以看出如下几点：

(1) 从图 3 和图 4 看，本世纪最大的二次火山爆发，即 1982 年 4 月爆发的墨西哥奇琼火山和 1991 年 6 月爆发的菲律宾皮纳图博火山，对这 10 个地方的气溶胶光学厚度有明显影响，1980—1994 年间光学厚度变化有一个共同的特点，普遍存在两个光学厚度峰，一个约处于 1982 年，另一处于 1991 (或 1992) 年，第二个峰更突出，皮纳图博火山对光学厚度有更大的影响。

(2) 如表 6 所示，除沈阳外，其它 9 个地点的气溶胶光学厚度在 1980—1994 年间的年变化率均为正值，呈增加之趋势，年增幅在 0.0008 (格

尔木) 至 0.0118 (北京) 之间变化，北京在这一期间增幅最大。在沈阳，年变化率为 -0.0018，呈减少之势。在 1985—1990 年间，格尔木和广州两地光学厚度年变化率分别为 -0.0007 和 -0.0035，呈下降之势，而其它 8 个地方均为正值，呈上升之势，特别是北京、昆明和武汉三地，年变化率均大于 0.02，光学厚度在这一期间增加很快。

(3) 在 1980—1994 年间，武汉气溶胶光学厚度的平均值为 0.551，在 10 个地方中为最大，广州、郑州、上海和北京的平均值也都大于 0.4，气溶胶污染也是比较严重的，格尔木和昆明两地光学厚度相对较小，特别是格尔木，平均值仅为 0.1687，约为武汉的三分之一。

图 5 给出北京等 10 个地方 1980—1994 年间总的月平均的气溶胶光学厚度。如图所示，有如下 4 种不同的月变化情形：

(1) 如图 5 (a) 所示的北京、格尔木、喀什 3 个地方，4—8 月的春夏期间，气溶胶光学厚度较大，而在秋冬季节较小。

(2) 如图 5 (a) 所示的乌鲁木齐，气溶胶光学厚度的月变化较不明显，但冬季较大。

(3) 如图 5 (a) 所示的沈阳，夏季和冬季气溶胶光学厚度较大。

(4) 如图 5 (b) 所示，黄河以南的昆明等 5 个地方，春季气溶胶光学厚度比较大。

在黄河以北的北京、沈阳、格尔木和喀什 4 个地方，夏季期间气溶胶光学厚度比较大，估计是由于夏季较大的湿度引起的气溶胶吸湿增长的缘故。

6 结论

(1) 理论分析和数值试验表明, 到达地面的太阳直射短波辐射可表为几个因子的乘积, 其中一个因子即 $0.75\mu\text{m}$ 波长的大气透过率, 一个因子对气溶胶谱不很敏感, 其它因子与气溶胶无光。根据这一特性提出了从太阳直射辐射确定该波长气溶胶光学厚度的新方法及相应的迭代求解方法, 同时发展了关于一个相当精确的参数化公式。对于各类的 Junge 气溶胶谱和非 Junge 谱, 如果选取 $v^* = 3$ 的 Junge 谱用于反演, 光学厚度解的误差一般小 5%。

(2) 1267 组对比实验表明, 由此方法探测的气溶胶光学厚度与光度计探测的气溶胶光学厚度的标准差为 10.5%, 两者平均结果的偏差只有 0.7%。用此法探测的月平均和年平均的气溶胶光学厚度具有更高的精度。

3) 1982 年奇琼火山和 1991 年的 Pinatubo 火山爆发对中国的大气柱气溶胶光学厚度有很大影响, 后一火山的效应更大, 和爆发前的 1990 年相比较, 北京等 10 个地方在火山爆发后的 1992 年气溶胶光学厚度明显增大, 增幅在 0.041—0.295 之间变化。

(4) 除沈阳外, 北京等 9 个地方在 1980—1994 年间气溶胶光学厚度都有增加的趋势, 增幅在 0.0008—0.0118 之间变化, 特别是北京, 年增幅高达 0.0118。在两次火山之间平静的时期, 除格尔木外, 气溶胶光学厚度也呈增加趋势, 增幅在 0.0001—0.028 之间变化。

(5) 在我国武汉、北京、沈阳、广州、郑州几个城市, 气溶胶污染都较为严重, 1980—1994 年间气溶胶光学厚度的总平均值都大于 0.4, 特别是武汉, 其均值高达 0.551。格尔木和昆明两地相对比较干净, 特别是格尔木, 气溶胶光学厚度的均值仅为 0.1687。

(6) 在黄河以南的昆明等 5 个地方, 春季气溶胶光学厚度比较大。除乌鲁木齐和沈阳外, 北京等地方春夏期间气溶胶光学厚度普遍较大, 秋冬较

小, 但乌鲁木齐和沈阳两地, 冬季气溶胶光学厚度比较大。

参考文献

- [1] Angstrom, A. Techniques of Determining the Turbidity of the atmosphere. *Tellus*, 1961, **13**: 214—223.
- [2] Diermendant, D. A Survey of Light-scattering Technique Used in the Remote Monitoring of Atmospheric Aerosol. *Rev. Geophys. Space Phys.*, 1980, **18**: 341—360.
- [3] 毛节泰等. 大气透明度光谱和浑浊度的观测. *气象学报*, 1983, **41** (3): 322—331.
- [4] 邱金桓, 孙金辉, 夏其林, 张金定. 北京大气气溶胶光学特性的综合遥感和分析. *气象学报*, 1988, **46**: 49—58.
- [5] King M. D., D. M. Byrne, B. M. Herman, J. A. Reagan. Aerosol Size Distributions Obtained by Inversion of Spectral Optical Depth Measurements. *J. Atmos. Sci.*, 1978, **35**: 2153—2167.
- [6] Shaw G. E., Reagan J. A., Herman, B. M., Investigations of Atmospheric Extinction Using Direct Solar Radiation Measurements Made with a Multiple Wavelength Radiometer. *J. Appl. Meteorol.*, 1973, **12**: 374—380.
- [7] 邱金桓. 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*, 1995, **19**: 385—394.
- [8] 邱金桓, 杨景梅, 潘继东. 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. *大气科学*, 1995, **19**: 586—596.
- [9] Kneizys F. X., Shettle E. P., Abreu L. W., Anderson G. P., Chetwynd J. H., Gallery W. O., Selby J. E. A., Clough S. A. Atmospheric Transmittance/Radiance: the LOWTRAN7 Model, 1989.
- [10] Wang, W. A Parameterization for the Absorption of Solar Radiation by Water Vapor in the Earth's Atmosphere. *J. Appl. Met.*, 1976, **5**: 21—27.
- [11] 杨影梅, 邱金桓. 我国可降水量同地面水汽压关系的经验表达式. *大气科学*, 1996, **5**: 620—626.

作者简介

邱金桓, 男, 1943 年 11 月出生, 研究员, 博士生导师。1968 年毕业于北京大学地球物理系, 1982 年获硕士学位。现任中国科学院大气物理研究所大气物理与大气探测研究部主任, 中国科学院大气物理所“中层大气和全球环境探测”开放实验室副主任。中国气象学会大气探测与气象仪器委员会副主任委员。主要从事大气遥感和大气辐射传输研究。已在国内外学术刊物和国际学术会议上发表论文 70 多篇。

Wide-band Extinction Method to Measure Aerosol Optical Depth and its Application

Qiu Jinhuan

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

Abstract Based on sensitivity of the direct solar short radiation on the aerosol property, a so-called wide-band extinction method is proposed to determine the $0.75\mu\text{m}$ aerosol optical depth using the radiation, and its accuracy is analyzed according to numerical simulations and comparative measurements. As shown in numerical simulations using Junge and LOWTRAN aerosol size distributions, the depth solution error of $<5\%$ can generally be expected if a typical Junge distribution of $\nu^* = 3$ is taken instead of true distribution. The method is tested in comparative observations with the result that aerosol optical depths measured by pyrheliometer conform well with those by sunphotometer. As far as total 1267 sets of comparative experiments are concerned, the standard deviation is 10.5% , and the deviation of the mean optical depth only -0.7% . Monthly-mean or yearly-mean result would have much better accuracy.

The present method is used in determining $0.75\mu\text{m}$ aerosol optical depths from the direct solar radiation detected by the pyrheliometer over 10 sites in China during 1980–1994. The 10 sites are meteorological observatories of Beijing, Shenyang, Wulumuqi, Germo, Keshi, Zhengzhou, Wuhan, Shanghai, Kunming and Guangzhou. Some conclusions are:

(1) Except Shenyang, aerosol optical depths over other 9 sites have an increasing trends with the annual increasing rates changing from 0.0008 (Germo) to 0.118 (Beijing).

(2) Pinatubo volcanic eruption in 1991 had very great influence on aerosol optical depth. Compared to that before 1990, the aerosol optical depths in 1992 over the ten sites increased obviously from 0.041 to 0.295.

(3) In Wuhan, Beijing, Shenyang, Guangzhou and Zhengzhou cities, aerosol pollution was rather serious. The total means of the aerosol optical depths during 1980–1994 were all more than 0.4, and especially in Wuhan, 0.551. Germo and Kunming were relatively clear, and in particular in Germo it was only 0.1687.

(4) In the five sites of Kunming etc. in the southern of Yellow River, the aerosol optical depths were relatively big in spring. Except Wulumuqi, in the sites in the northern of Yellow River, they were relatively high in spring and summer and low in autumn and, in Wulumuqi and Shenyang, they were comparatively high in winter.

Key words Atmospheric aerosol, Optical depth, Wide-band extinction, Aerosol size distribution.