

许潇锋, 邱金桓, 牛生杰. 2009. 利用水平面太阳直接辐射日曝辐量反演大气气溶胶光学厚度的方法研究 [J]. 大气科学, 33 (2): 337–346.
Xu Xiaofeng, Qiu Jinhuan, Niu Shengjie. 2009. A study of retrieving aerosol optical depth from daily horizontal broadband direct solar radiation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (2): 337–346.

利用水平面太阳直接辐射日曝辐量反演 大气气溶胶光学厚度的方法研究

许潇锋^{1, 2} 邱金桓² 牛生杰¹

¹ 南京信息工程大学, 南京 210044

² 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

摘 要 本文发展了一个从宽带水平面太阳直接辐射日曝辐量(总辐射与散射辐射日曝辐量之差)反演光谱大气气溶胶光学厚度的方法, 包括建立一个“等效”的瞬时太阳天顶角模型, 并提出了一个基于气溶胶标高的云影响甄别方法。对该反演方法的数值模拟和误差分析表明: “等效”瞬时太阳天顶角模型的不稳定性引起的光学厚度反演误差平均为 3.66%; 光学厚度日变化对一段较长时间的平均光学厚度的影响不显著; 订正造成的散射辐射误差 $\leq 20\%$ 时, 光学厚度平均偏差 $\leq 4\%$ 。通过与 AERONET 产品的比对验证表明: 本文发展的光学厚度反演方法和云影响甄别方法都是有效的; 晴空反演的 $0.75\ \mu\text{m}$ 光学厚度与 AERONET 的相关系数超过 0.95, 平均误差约 0.02; 云甄别方法计算的季节和年平均光学厚度与 AERONET 具有较好的一致性。

关键词 水平面太阳直接辐射 气溶胶光学厚度 气溶胶标高

文章编号 1006–9895 (2009) 02–0337–10

中图分类号 P422

文献标识码 A

A Study of Retrieving Aerosol Optical Depth from Daily Horizontal Broadband Direct Solar Radiation

XU Xiaofeng^{1, 2}, QIU Jinhuan², and NIU Shengjie¹

¹ Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

² Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract A method of retrieving aerosol optical depth (AOD) is developed using daily horizontal broadband direct solar radiation, including an “equivalent” instantaneous solar zenith angle model. Furthermore, a cloud-contaminated reduction method, which is based on aerosol scaling height, is proposed to calculate monthly mean AOD. Numerical simulation and error analysis show that: 1) The mean value of AOD retrieving errors due to instability of the “equivalent” instantaneous solar zenith angle model is 3.66%; 2) AOD diurnal variation has little influence on the mean value of AOD for a relatively long time; 3) the AOD retrieving error is less than or equal to 4% when the error of diffuse solar radiation is less than or equal to 20%. A comparison between AODs retrieved from this method and the AERONET shows that the AOD retrieving method and the cloud-contaminated reduction method are both effective. The correlation coefficient and mean bias error between AODs from this method and the AERONET at

收稿日期 2007–10–10, 2008–01–02 收修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展规划项目 2006CB403702, 国家自然科学基金资助项目 40333029、40475014, 江苏省气象灾害重点实验室课题 KLME060208

作者简介 许潇锋, 男, 1980 年出生, 博士研究生, 主要从事气溶胶光学特性和大气辐射传输研究。E-mail: xxf8080@126.com

0.75 μm in clear days are 0.95 and 0.02, respectively. With the cloud-contaminated reduction method, the seasonal and yearly mean AODs show a good consistent with those from AERONET.

Key words horizontal direct solar radiation, aerosol optical depth, aerosol scaling height

1 引言

在诸多气溶胶光学特性参数中,气溶胶光学厚度(Aerosol Optical Depth,简称 AOD)是十分重要且被研究较多的一个。AOD 的获取主要分为卫星遥感和地基观测两大类(毛节泰等,2002)。地基测量比较通用的方法是运用太阳光度计测量整层大气的 AOD,其优点是反演精度高。如 NASA 发起支持的气溶胶自动观测网(AEROSOL ROBOTIC NETWORK,简称 AERONET)在世界各地分布有 500 多个台站,其反演的 AOD 产品误差在 0.01~0.02 之间(Holben et al.,1998),但多数台站资料累积时间还较短。卫星遥感的突出优点是可以获取全球范围的 AOD 时空分布(王雨等,2007;段民征等,2007),但反演精度仍低于光度计。自 1880 年以来(Stothers,1996),全球建立了大量的太阳辐射观测站,积累了长期的宽带太阳辐射资料,如何从这些辐射资料获取 AOD 的长期变化历史,逐渐成为科学家们关心的问题。对该问题的研究最早可追溯到 1922 年宽带混浊度系数的提出(Linke,1922),之后 Ångström (1929)和 Schüepp (1949)又分别引入了 1 μm 和 0.5 μm 波长混浊度系数概念。自 1972 年 Unsworth 和 Montein (1972)提出了从宽带太阳直接辐射反演宽带气溶胶光学厚度(Broadband AOD,简称 BAOD)的方法后,许多学者又致力于研究从宽带太阳直接辐射反演某一波长处气溶胶光学厚度的方法(宽带消光法)(邱金桓,1995;Gueymard,1998;Molineaux,1998;Qiu,1998,2001,2003)。在我国,宽带消光法取得了较为广泛的应用,如 Qiu et al. (2000) 分析了我国北方 1980~1994 年的 AOD 以及能见度的变化特征,并基于宽带消光法反演的气溶胶光学厚度计算了气溶胶的单次散射反照率(邱金桓,2006);罗云峰等(2000,2001,2002)利用 46 个甲种日射站的直接辐射资料分析了我国 1961~1990 年 AOD 的时空分布特征;宗雪梅等(2005a,2005b)研究表明,从逐时太阳直接辐射反演的光谱 AOD 与 AERONET 产品的相关系数达到 0.9 以上,并据此分析了 1993

~2002 年我国 16 个辐射观测站的 AOD 变化特征。

上述从宽带辐射反演 AOD 的方法都基于直接辐射表探测得到的宽带太阳直接辐射资料,然而自 1993 年以来在我国近百个太阳辐射观测站中,进行太阳直接辐射观测的仅有 17 个,但是进行总辐射和散射辐射日曝辐量观测(最早 1957 年)的却有 60 多个。这 60 多个站积累了长期的辐射资料,但目前它们还没有得到充分利用。为此,本文致力于发展一个应用太阳总辐射和散射辐射日曝辐量反演气溶胶光学厚度的方法。该方法的建立对重现我国广大地区的 AOD 长期变化趋势和时空分布特征具有积极的意义,并会为研究大气气溶胶与气候变化及周边生态环境的关系提供一些依据。

总辐射日曝辐量与散射辐射日曝辐量之差,即所谓的水平面太阳直接辐射日曝辐量。从该日曝辐量反演 AOD 有以下 4 个问题需要解决:(1)“等效”的瞬时太阳天顶角模式;(2)AOD 日变化的影响;(3)散射辐射订正误差的影响;(4)云的影响。为了分析这些问题,本文首先发展了一个应用水平面太阳直接辐射日曝辐量反演 AOD 的方法,其中包括建立一个适用于该日曝辐量的“等效”瞬时太阳天顶角模式;然后,基于气溶胶标高提出了一个云影响甄别的方法;最后,对 AOD 反演方法和云甄别方法进行了误差分析和比对验证。

2 反演 AOD 方法

2.1 瞬时水平面太阳直接辐射反演 AOD

瞬时水平面太阳直接辐射 S_l 表示水平面上接收到的太阳直接辐射,它与直射表探测的直接辐射 S 满足如下关系:

$$S_l = S\mu_0, \quad (1)$$

式中, $\mu_0 = \cos \theta_0$, θ_0 表示太阳天顶角。 S_l 可以通过总辐射表探测的瞬时总辐射 E_g 和散射辐射表探测的瞬时散射辐射 E_d 计算得到:

$$S_l = E_g - E_d. \quad (2)$$

从 S_l 按如下方法可以反演得到宽带气溶胶光学厚度 τ_{BAOD} :

$$\tau_{\text{BAOD}} = -\frac{1}{m_a} \left[\ln \frac{S}{RS_0} - \ln(t_m) \right] =$$

$$-\frac{1}{m_a} \left[\ln \frac{S_l}{RS_0\mu_0} - \ln(t_m) \right],$$

$$R = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) d\lambda / S_0, \quad (3)$$

式中, m_a 是气溶胶大气光学质量, S_0 是太阳常数, $S(\lambda)$ 是太阳光谱, λ_1 、 λ_2 是总辐射表光谱响应范围, 文中分别取 $0.3 \mu\text{m}$ 和 $3.0 \mu\text{m}$, t_m 是分子大气宽带透过率(Qiu, 2001)。

根据中值定理, 存在一个波长 λ_E ($\lambda_1 \leq \lambda_E \leq \lambda_2$), 使光学厚度 $\tau_a(\lambda_E)$ 满足以下关系:

$$\tau_a(\lambda_E) = \tau_{\text{BAOD}}, \quad (4)$$

式中, λ_E 为“等效”波长, 具体公式参阅 Qiu(2001)。Qiu(2001) 研究表明 λ_E 在 $0.619 \sim 1.575 \mu\text{m}$ 范围内变动, 并指出平均波长约为 $0.75 \mu\text{m}$ (Qiu, 1998)。

取 Junge 型气溶胶分布, 光学厚度与波长的关系可以表达如下:

$$\tau_a(\lambda) = \beta \lambda^{-\alpha}, \quad (5)$$

式中, α 表示 Ångström 波长指数, β 为混浊度系数。

结合式(4)、(5), 任一波长 λ 的气溶胶光学厚度 $\tau_a(\lambda)$ 可由下式求出:

$$\tau_a(\lambda) = \tau_{\text{BAOD}} \left(\frac{\lambda_E}{\lambda} \right)^\alpha. \quad (6)$$

2.2 水平面直接辐射日曝辐量反演 AOD

水平面直接辐射日曝辐量 D_l 表示水平面上接收的太阳直接辐射的日累积量, 可通过总辐射日曝辐量 D_g 和散射辐射日曝辐量 D_d 求得:

$$D_l = D_g - D_d. \quad (7)$$

根据一天内最小太阳天顶角和仪器最小可探测辐照度, 可确定仪器测量时间 Δt , 进而得到水平面直接辐射日平均值 $\overline{S_l}$:

$$\overline{S_l} = D_l / \Delta t. \quad (8)$$

由于水平面直接辐射是时间的连续函数, 在 Δt 内必然存在某一时刻的水平面直接辐射 $S_l(\mu_{0,E})$ 满足:

$$S_l(\mu_{0,E}) = \overline{S_l}, \quad (9)$$

$$D_l = S_l(\mu_{0,E}) \Delta t, \quad (10)$$

式中, $\mu_{0,E}$ 为该时刻的太阳天顶角余弦。至此, 我们把一个日曝辐量“等效”成了一个瞬时辐射量。根据 2.1 节介绍的从瞬时水平面直接辐射反演 AOD 的方法, 将瞬时辐射 $S_l(\mu_{0,E})$ 代入方程(3)~

(6), 就可反演得到气溶胶光学厚度 $\tau_a(\lambda)$ 。在以上从 D_l 反演 $\tau_a(\lambda)$ 的过程中, 求取对应于 $S_l(\mu_{0,E})$ 的瞬时太阳天顶角余弦 $\mu_{0,E}$ 是关键, 2.3 节将对此作重点介绍。

2.3 “等效”的瞬时太阳天顶角模型

由上节可知, 从水平面直接辐射日曝辐量反演气溶胶光学厚度需要计算“等效”瞬时辐射 $S_l(\mu_{0,E})$, 而计算 $S_l(\mu_{0,E})$ 最为关键的就是求取“等效”瞬时太阳天顶角 $\mu_{0,E}$ 。Qiu(2003) 曾基于直射表探测的直接辐射日曝辐量建立一个“等效”太阳天顶角方案, 但经计算表明该方案不适用于水平面直接辐射日曝辐量, 所以本文依据 MODTRAN 模拟结果 (Berk et al., 1999), 重新建立了一个适用于水平面直接辐射日曝辐量的“等效”瞬时太阳天顶角模型 $\mu_{0,E}$ 。

建立 $\mu_{0,E}$ 模型前, 首先作两个假设: (1) 稳定的平面平行各向同性大气; (2) 气溶胶类型为 Junge 型, 且不随时间变化。在此基础上, 根据 MODTRAN 模拟的水平面直接辐射日曝辐量数据 (Berk et al., 1999), 运用最小二乘法建立如下适用于该日曝辐量的“等效”瞬时太阳天顶角模型 $\mu_{0,E}$:

$$\mu_{0,E} = f_1 f_2 (\mu_{\max} + \mu_{\min} / 2), \quad (11)$$

其中,

$$f_1 = 0.8654 - 0.2809\mu_{\max} + 0.6886\mu_{\max}^2 - 0.4372\mu_{\max}^3 + (-1.0231 + 4.7591\mu_{\max} - 7.7417\mu_{\max}^2 + 3.7383\mu_{\max}^3) \exp(-\beta) + (1.2113 - 5.1043\mu_{\max} + 7.2868\mu_{\max}^2 - 3.1996\mu_{\max}^3) \cdot \exp(-2\beta) + (-0.3932 + 0.8139\mu_{\max} - 0.6508\mu_{\max}^2 + 0.1163\mu_{\max}^3) \exp(-3\beta)$$

$$f_2 = 1 - 0.098 \exp(-U/2),$$

式中, $\mu_{\max}$ 、 $\mu_{\min}$ 分别表示一天内最大和最小太阳天顶角余弦, β 表示 Ångström 混浊度系数, U 表示整层大气可降水量。

3 基于气溶胶标高的云影响甄别方法

运用太阳辐射反演气溶胶光学厚度时, 天空随机出现的云会导致反演结果出现一定误差, 因此, 为确保反演结果真实可靠, 应当尽量挑选无云的時刻进行反演。本文使用的反演资料是水平面直接辐射日曝辐量, 除非每天都有连续的云量观测资料, 否则仅根据目前一般气象台站的云量记录 [02、

08、14、20 时(北京时,下同)的总云量]很难保证一整天都是晴空,因此,反演的 AOD 或多或少都会受到云的影响。若对我国很多台站取 08、14、20 时的总云量都为 0 作为无云日的标准,可用作反演 AOD 的原始资料较少,其代表意义相对较差,而不加区别的对全部反演的 AOD 进行分析,得到的结论也不可取。因此为保留足够多的反演数据,同时把云的影响减到最小,本文发展了一个基于气溶胶标高的云影响甄别方法。

假设对流层气溶胶消光系数随高度呈指数衰减,根据 550 μm 波长的气溶胶光学厚度 τ_a (0.55 μm) 和水平能见度 V (单位: km) 的关系,气溶胶标高 Z_a (单位: km) 可以表示如下:

$$Z_a = \frac{\tau_a(0.55 \mu\text{m})}{3.912/V - 0.0116p/1013.23}, \quad (12)$$

式中, p 是地面气压。

在统计学中,一个正态分布函数存在“ 3σ 规则”,即对于正态随机变量而言,其值落在区间 $[\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma]$ (μ 是平均值, σ 是标准差) 的概率 $> 99\%$ 。

在 1 个月内, AOD 的变化常常很剧烈,一般不符合正态分布,但是气溶胶标高的变化相对稳定。通过对 2001~2005 年逐月气溶胶标高的计算发现,标高满足正态分布的月份达到 64%,所以本文近似认为 1 个月内的逐日气溶胶标高基本符合“ 3σ 规则”。

若一天内整层大气的光学厚度不变,水平面太阳直接辐射在正午前后达到最大,对日曝辐量的贡献也最多,所以中午前后天空有云对日曝辐量的影响将明显大于早晚有云的情况。基于该特点,本文的云甄别方法采用如下的辐射加权日平均云量 $\bar{C}_f$,

$$\bar{C}_f = \frac{\int_{t_0}^{t_1} C_f(t) S_l(t) dt}{\int_{t_0}^{t_1} S_l(t) dt}, \quad (13)$$

式中, t_0 、 t_1 分别表示日出、日落时间, $S_l(t)$ 是利用反演的光学厚度计算的各时刻的水平面直接辐射, $C_f(t)$ 是根据 08、14、20 时总云量插值计算的各时刻的总云量(范围: 0~1, 本文所指云量均为该范围)。

根据以上介绍的气溶胶标高的“ 3σ 规则”,结合辐射加权日平均云量和相对湿度资料,本文发展了一个基于气溶胶标高的云影响甄别方法,并运用该方法计算月平均气溶胶光学厚度。该方法包括式(14)、(15) 两条约束: 式(14) 是对标高的约束,

式(15) 用于雾的甄别。具体方法如下:

$$Z_a(n) \leq Z_{a,M} + 3\sigma_Z f_c, \quad (14)$$

$$f_c = (1 - \bar{C}_f) \exp(-0.1\bar{C}_f),$$

式中, $Z_a(n)$ 为每日气溶胶标高, $Z_{a,M}$ 为月平均标高, σ_Z 为月平均标高的标准差, $\bar{C}_f$ 为每日辐射加权百分比云量。当天空无云 ($\bar{C}_f = 0$, $f_c = 1.0$) 时, $Z_a(n)$ 最大可取值不超过 $Z_{a,M} + 3\sigma_Z$; 当 $\bar{C}_f = 100\%$ 、 $f_c = 0.0$ 时, $Z_a(n)$ 不超过 $Z_{a,M}$ 。 $\bar{C}_f$ 越大, f_c 越小, $Z_a(n)$ 的取值范围越小。

除了云,地面出现的雾和沙尘也会使反演的光学厚度很大。同云一样,雾的出现会造成反演结果的较大误差,所以为了进一步区分雾或沙尘,又进行了雾的甄别。通常当地面有雾时,能见度低,相对湿度大;而出现沙尘天气时,能见度低,相对湿度也低。基于该特征,对于雾的甄别,运用如下光学厚度约束,

$$\tau_a < 1 + 2(1 - 0.9f_{\text{hum}}/100), \quad (15)$$

其中, f_{hum} 表示日平均相对湿度。相对湿度越大,对 τ_a 限制越严格,当 $f_{\text{hum}} = 100\%$ 时, $\tau_a \leq 1.2$ 。

根据以上两条约束,本文使用如下迭代方法计算月平均 AOD:

- (1) 计算月平均标高及其标准差;
- (2) 按照云甄别方法,选择满足条件的日平均标高和对应的光学厚度 τ_a ;
- (3) 利用上一步的筛选结果重新计算月平均标高及其标准差;
- (4) 重复(2)、(3) 过程,直至得到稳定解。

最后,利用上述步骤选定的 τ_a 计算月平均光学厚度。

4 误差分析

从太阳辐射反演气溶胶光学厚度需要考虑水汽和臭氧的吸收,即需要知道水汽和臭氧总量,还需要假设一种气溶胶谱分布形式。本文中臭氧含量取常数 0.35 cm,由此导致的 AOD 反演误差在一般光学厚度情况时很小,可忽略不计;整层大气水汽总量利用杨景梅等(2002)发展的模式从地面水汽压计算得到,当水汽含量误差为 ± 0.5 cm 时,运用该模式引起的 AOD 反演误差 $\leq \pm 0.023$ (Molinaux et al., 1998);气溶胶谱分布取 Junge 型,由此引起的 0.75 μm 气溶胶光学厚度的反演误差 $< 5\%$ (Qiu, 1998)。

除了以上提到的误差因素外, 根据从水平面直接辐射日曝辐量反演 AOD 的特点, 还分析了以下三种误差: (1) “等效” 瞬时太阳天顶角模型不稳定引起的反演误差; (2) AOD 日变化引起的反演误差; (3) 散射辐射订正误差引起的反演误差。

4.1 “等效” 瞬时太阳天顶角模型不稳定性

从水平面直接辐射日曝辐量反演气溶胶光学厚度的精确性, 直接依赖于“等效” 瞬时水平面直接辐射, 即“等效” 瞬时太阳天顶角 $\mu_{0,E}$ 的计算, 所以 $\mu_{0,E}$ 的准确程度直接影响本文反演方法的精确性。为检验 $\mu_{0,E}$ 的适用性, 本文利用 MODTRAN 模拟检验了 $\mu_{0,E}$ 在多种大气条件下的精确程度。

数值模拟选择了 MODTRAN 的五种大气状况: 美国标准、热带、中纬度夏季、中纬度冬季和亚极地冬季大气。每种大气模拟 6 个纬度 (0°N 、 10°N 、 20°N 、 30°N 、 40°N 、 50°N)、6 个日期 (1 月至 6 月每月的 15 日) 以及 143 个不同光学厚度值共 5148 种情况。其中光学厚度根据波长指数 α 和混浊度系数 β 组合得到, α 和 β 取值如下:

$$\alpha = (i - 1) \times 0.2, \quad i = 1, 2, \dots, 11,$$
$$\beta = 0.05, 0.1, 0.2, \dots, 0.9, 1.0, 1.5, 2.0.$$

误差分析前, 首先利用 MODTRAN 对上述各种情况模拟计算水平面直接辐射日曝辐量 D_1 、“等效” 瞬时水平面直接辐射 $\overline{S_1}$ 和对应的天顶角余弦, 然后运用本文方法从 D_1 计算得到“等效” 瞬时太阳天顶角余弦 $\mu_{0,E}$ 、水平面直接辐射 $S_1(\mu_{0,E})$ 和气溶胶光学厚度 $\tau_a(0.75 \mu\text{m})$, 最后计算了 $\mu_{0,E}$ 、 $S_1(\mu_{0,E})$ 和 τ_a 与 MODTRAN 模拟结果的误差。结果由表 1 给出。

由表 1 可知, 五种大气条件下, $\mu_{0,E}$ 的最大绝对误差不超过 0.013, 平均为 0.009; 引起的光学厚

表 1 五种大气条件下“等效” 瞬时太阳天顶角模型 $\mu_{0,E}$ 的误差及引起的光学厚度 τ_a 的反演误差

Table 1 The errors caused by instability of the “equivalent” instantaneous solar zenith angle model and the corresponding AOD retrieval errors under five atmospheric conditions

	$\mu_{0,E}$ 绝对误差 ($\times 10^{-2}$)	τ_a 相对误差 (%)
1976 美国标准大气	0.86	3.18
热带大气	0.70	3.63
中纬度夏季大气	0.62	2.70
中纬度冬季大气	1.05	4.00
亚极地冬季大气	1.27	4.81

度 τ_a 的最大反演误差为 4.81%, 平均为 3.66%。从模拟看出, $\mu_{0,E}$ 模型适用于多种大气条件, 因其不稳定性造成的 AOD 反演误差 $\leq 5\%$ 。

4.2 AOD 日变化

本文反演方法的建立基于一整天 AOD 不变的假设。实际情况中, AOD 的日变化幅度可以很大, 因此假设 AOD 不变引起的反演误差也是一个需要深入考虑的因素。

为了分析 AOD 日变化对反演结果的影响, 本文设计了如图 1 所示的四种 AOD 日变化形式, 并使它们在 $0.55 \mu\text{m}$ 的日平均光学厚度值都为 0.5 (真值)。

首先, 利用平面平行辐射传输模式 SBDART (Ricchiazzi et al., 1998) 对图 1 的四种 AOD 变化 (A: 中午高早晚低; B: 早晚高中午低; C: 逐渐减小; D: 不变) 分别模拟得到了四个水平面直接辐射日曝辐量 D_1 , 然后从四个 D_1 分别反演得到了相应的光学厚度 $\tau_a(0.55 \mu\text{m})$, 结果由表 2 给出。模式主要输入参数有: 波长范围 $0.3 \sim 3 \mu\text{m}$, 乡村气溶胶类型, 中纬度冬季大气。

表 2 四种 AOD 日变化情况下模拟的水平面直接辐射日曝辐量 D_1 和反演的光学厚度 τ_a

Table 2 The simulated daily horizontal direct solar radiations and the retrieved AODs under the four AOD diurnal variations

类型	$D_1 (\times 10^4 \text{ J/m}^2)$	$\tau_a (0.55 \mu\text{m})$
A	384.67	0.5687
B	501.73	0.3780
C	467.32	0.4270
D	412.00	0.5055

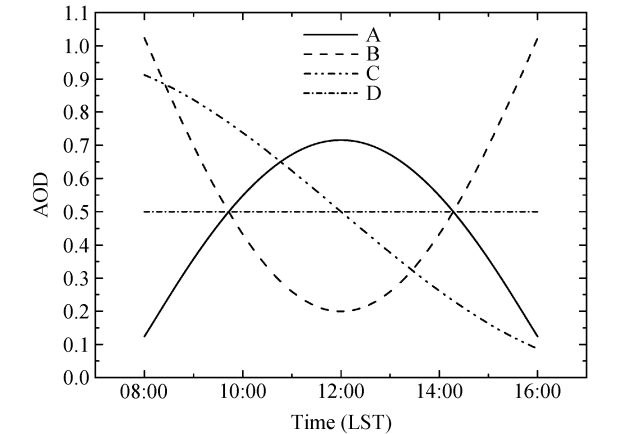


图 1 四种 AOD 的日变化形式
Fig. 1 Diurnal variations of four kinds of AODs

表 3 多种散射辐射误差时 AOD 反演误差及标准差

Table 3 The mean errors and standard deviations of retrieved AOD within different error ranges of diffuse radiation

	散射辐射误差范围				
	-10%~10%	-20%~20%	-30%~30%	-40%~40%	-50%~50%
AOD 误差	1.2%	3.1%	5.7%	8.9%	12.7%
标准差	13.6%	24.1%	35.2%	46.8%	59.1%

注：太阳天顶角 $\leq 75^\circ$ ，光学厚度 ≤ 2.0 。

由表 2 知，不同的 AOD 日变化形式，得到了不同的水平面直接辐射日曝辐量，由此反演的光学厚度也各不相同。图 1 中类型 D 的光学厚度不随时间变化，反演的 τ_a 与真值 (0.5) 相差仅 1%。在四种 AOD 日变化形式中，类型 A 反演的光学厚度比真值偏大约 14%，类型 B 偏小约 24%，类型 C 偏小约 15%。四种情况下 τ_a 的平均值为 0.47，比真值 (0.5) 仅偏小约 6%。由此可知，虽然 AOD 的日变化对单日反演结果影响较大，但若考虑各种 AOD 日变化情况机会均等，其对大量反演结果的平均值影响并不明显，所以一段较长时间内（如季、年）的光学厚度平均值是可信的。

4.3 散射辐射订正误差

本文所用反演资料是总辐射表和散射辐射表测量的日曝辐量资料，其准确与否直接影响反演结果的可信程度。目前，我国气象台站装备的总辐射表有 DFY-4 型和 TBQ-2 型，总不确定度为 $\pm 5\%$ ；散射辐射表由 DFY-4 型总辐射表和 DFP-1 型遮光环两部分组成，遮光环圈的宽度为 65 mm，直径为 400 mm。由于遮光环不仅遮住太阳直接辐射，同时还遮掉了遮光环带上的天空散射，因而使用遮光环测得的散射辐射比实际偏小，必须乘以一个大于 1 的遮光环订正系数，才能得到准确的散射辐射。目前，我国各气象台站对散射辐射的订正采用的是每站每旬固定一个订正常数的方法（中国气象局，1996）。这种方法只考虑了月平均云量，没有考虑实时的天空状况，因而在有些情况下订正过程难免出现较大误差。由此可见，由于订正误差造成的散射辐射误差也是影响本文反演方法准确度的一个重要因素，为此对该误差因素作了模拟分析。

由于订正造成散射辐射存在误差时，水平面直接辐射 S_l 可表示为

$$S_l = E_g - (1 + f)E_d, \tag{16}$$

式中， f 表示散射辐射的相对误差，本文模拟的散射辐射误差范围为 $-50\% \sim 50\%$ 。

模拟时，首先利用 SBDART 模式计算各种光学厚度与太阳天顶角组合情况的总辐射和散射辐射，并据此建立一个查找表。假设不存在其他误差，基于该表计算各种散射辐射误差导致的光学厚度反演误差。表 3 给出了太阳天顶角 $\leq 75^\circ$ ，光学厚度 ≤ 2.0 时，在各种散射辐射误差范围，AOD 平均反演误差及其标准差的变化。

由表 3，散射辐射误差越大，反演的光学厚度的平均误差也越大。若散射辐射不存在系统的偏差，由于反演误差的对称性（反演的 AOD 偏小或偏大的概率均等），大量 AOD 的平均反演误差并不显著。如表所示，散射辐射绝对误差 $\leq 20\%$ 时，AOD 平均反演误差 $\leq 4\%$ ，即使散射辐射误差范围达到 $-50\% \sim 50\%$ ，光学厚度平均误差也 $\leq 13\%$ 。由以上分析知，若订正后的散射辐射不存在系统偏差，则反演的 AOD 的一段较长时间（如季、年）平均值不会出现较大误差。

5 对比验证

5.1 晴空 AOD 对比

由于没有更详细的云量观测资料，本文以 08、14、20 时观测的天空总云量都为 0 作为晴空日的判据，利用北京观象台 2001~2005 年水平面直接辐射日曝辐量（取自总辐射、散射辐射日曝辐量）资料，结合地面水汽压和地面水平能见度资料，反演得到了 199 个晴空日的 $0.75 \mu\text{m}$ 波长气溶胶光学厚度 ($\tau_{a,D}$)。对比标准选用对应时间段 AERONET (<http://aeronet.gsfc.nasa.gov/>) 北京站光度计反演的日平均光学厚度产品 ($\tau_{a,A}$)。为了合理比较两者的一致性，本文借鉴了 Chu 等 (2002) 在验证 MODIS 陆地上空大气气溶胶产品时提出的误差范围 $\Delta\tau_a = \pm 0.2\tau_{a,A} \pm 0.05$ ，若 $\tau_{a,D}$ 相比 $\tau_{a,A}$ 处于该误差范围内，就认为两种反演结果是一致的。

$\tau_{a,D}$ 与 $\tau_{a,A}$ 的对比包括两个方面：所有晴空日反演的 AOD 的对比；晴空日 AOD 分段平均的对比。

对比结果如图 2 所示。

图 2a 是所有晴空日反演的 AOD 的比较, 如图所示, 有 92.0% 的 $\tau_{a,D}$ 处于误差范围 $\Delta\tau_a = \pm 0.2\tau_{a,A} \pm 0.05$ 内, 两者相关系数达到 0.96, 线性拟合系数近似为 1.0, 均方根偏差为 0.066, 平均偏差为 -0.024 , 所有 $\tau_{a,D}$ 和 $\tau_{a,A}$ 的平均值为 0.18 和 0.20。

按照不同光学厚度范围 (0.0~0.1, 0.1~0.3, 0.3~0.5, 0.5~0.7, 0.7~0.9, >0.9), 将所有的 $\tau_{a,A}$ 与对应 $\tau_{a,D}$ 分成六段, 分段计算平均值 (图 2b)。图 2b 中各分段平均值都落在误差范围 $\Delta\tau_a = \pm 0.2\tau_{a,A} \pm 0.05$ 内, 均方根偏差为 0.039, 平均偏差为 -0.020 , 图中除在光学厚度 0.0~0.1 区间两者偏差较大外 (相对偏差约 36%), 相对偏差都 $\leq 13\%$; 大于 0.1 的 $\tau_{a,A}$ 与对应 $\tau_{a,D}$ 的平均值为 0.29 和 0.27, 相对偏差仅 7.5%; 光学厚度较大 (≥ 0.7) 时, 相对偏差 $\leq 5\%$ 。总的来看, 晴空时运用

本文方法从水平面直接辐射日曝辐量反演的气溶胶光学厚度是可信的, 与光度计反演结果有较好的一致性。

5.2 云甄别方法有效性验证

图 3 所示为北京观象台几种不同辐射加权月平均云量和光学厚度情况下, 云甄别前后效果对比。图 3 中 2003 年 12 月和 2004 年 2 月的平均云量 (C_m , 范围 0~1) 和光学厚度都较小, 平均云量分别为 0.21 和 0.26, AERONET 月平均 AOD ($\tau_{a,Ae}$) 分别为 0.31 和 0.38。不使用云甄别方法, 取所有样本计算的月平均 AOD ($\tau_{a,Bc}$) 分别为 0.61 和 0.76, 约为 AERONET 的 2 倍。运用云甄别方法后, 有效样本分别为 24 和 22 天, 计算的月平均 AOD ($\tau_{a,Af}$) 分别为 0.31 和 0.38, 与 AERONET 相差都 ≤ 0.03 。2004 年 6 月和 2005 年 7 月几乎每天都有云, 无云日分别为 1 和 0 天, 平均云量达到

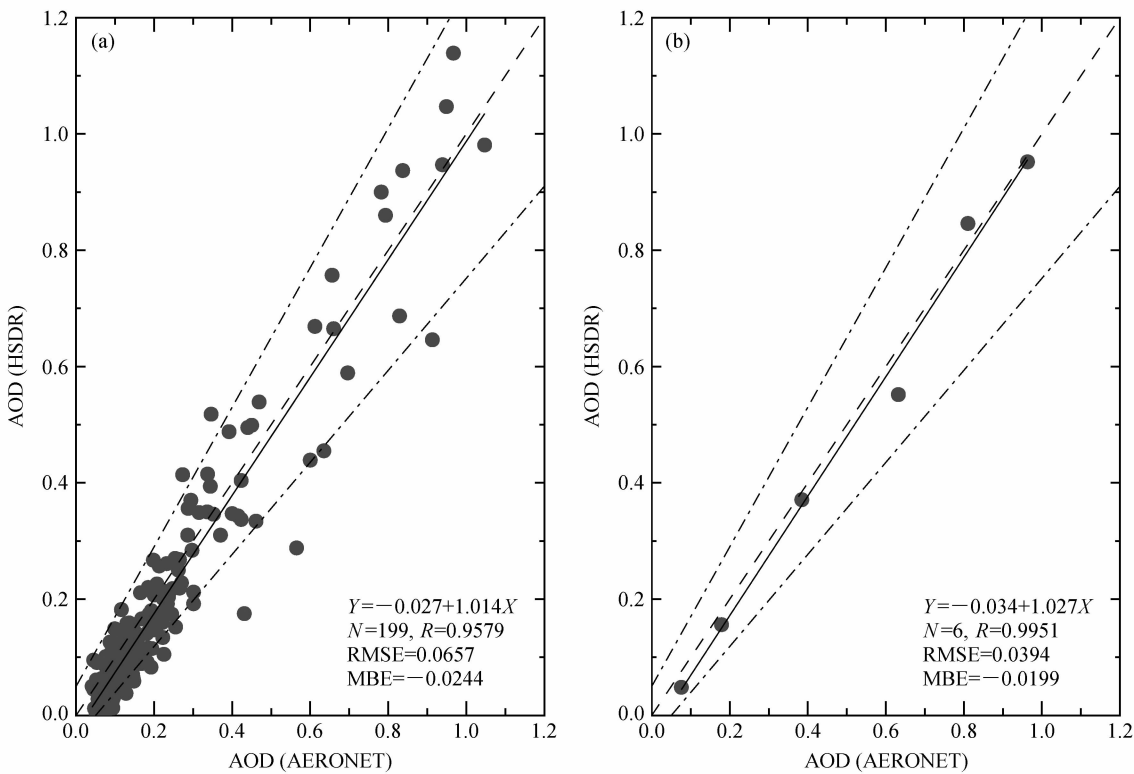


图 2 水平面直接辐射日曝辐量 (HSDR) 反演的气溶胶光学厚度 $\tau_{a,D}$ 与 AERONET 产品 $\tau_{a,A}$ 的对比: (a) 所有晴空日反演结果对比; (b) 图 a 数据的分段平均对比。实线: $Y=a+bX$ 拟合线, 虚线: $Y=X$, 点划线: $\Delta\tau_a = \pm 0.2\tau_{a,A} \pm 0.05$; N : 样本数, R : 相关系数, $RMSE$ 为均方根偏差, MBE 为平均偏差

Fig. 2 Comparisons between AODs retrieved from daily horizontal broadband direct solar radiation (HSDR) and AERONET: (a) AODs from clear days; (b) mean values of AODs in different ranges. The solid, dashed and dash-dotted lines represent $Y=a+bX$, $Y=X$ and $\Delta\tau_a = \pm 0.2\tau_{a,A} \pm 0.05$, respectively. N , R , $RMSE$ and MBE mean the number of samples, the correlation coefficient, the root mean square error and the mean bias error, respectively

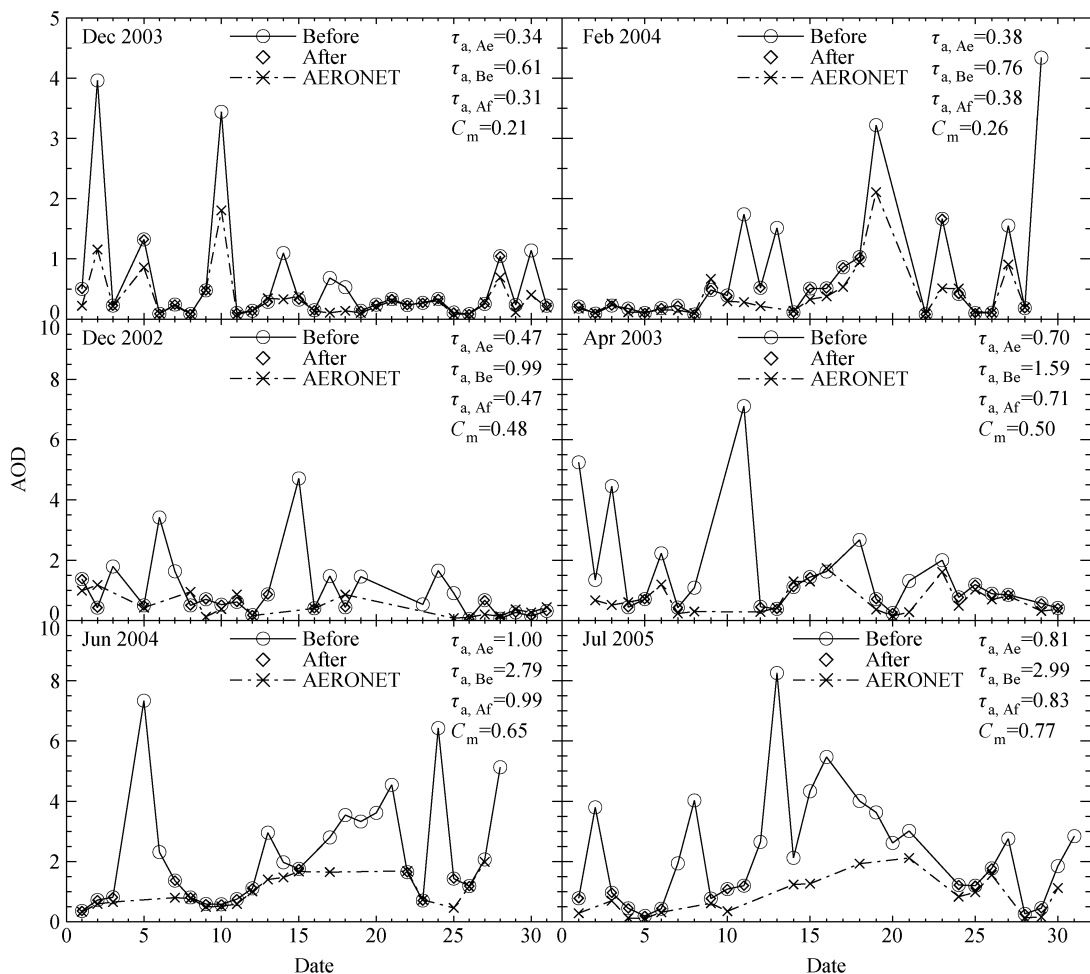


图3 多种月平均云量和光学厚度情况下云甄别前后效果对比。Before: 云甄别前所有样本; After: 云甄别后样本; AERONET: AERONET 样本; $\tau_{a, Ae}$ 表示 AERONET 月平均 AOD, $\tau_{a, Be}$ 、 $\tau_{a, Af}$ 分别表示云甄别前、后的月平均 AOD; C_m 表示月平均云量

Fig. 3 The effect of cloud-contaminated reduction method under some conditions with different monthly mean values of cloud amount and AOD. "Before" and "After" represent the selected samples before and after cloud-contaminated reduction method, respectively; "AERONET" represents AERONET-selected samples; $\tau_{a, Ae}$, $\tau_{a, Be}$ and $\tau_{a, Af}$ represent monthly mean AODs from AERONET, raw data, cloud-contaminated reduction method, respectively; C_m represents monthly mean cloud amount

0.65 和 0.77, AERONET 月平均 AOD 较大, 分别为 1.00 和 0.81。不使用云甄别方法, 所有样本计算的月平均 AOD 分别为 2.70 和 2.29, 几乎是 AERONET 值的 3 倍。运用云甄别方法后, 有效样本分别为 14 和 13 天, 计算的月平均 AOD 分别为 0.99 和 0.83, 与 AERONET 相差都 ≤ 0.02 。2002 年 12 月和 2003 年 4 月平均云量都约为 0.5。未使用云甄别方法, 计算的月平均 AOD 分别为 0.99 和 1.59, 约为 AERONET 的 2 倍。运用云甄别后, 计算的月平均 AOD 与 AERONET 相差 ≤ 0.01 。由以上分析可知, 在不同月平均云量和月平均光学厚度情况下, 利用本文发展的云甄别方法计算月平均

AOD, 都能得到较好的效果。

表 4 为云甄别前后, 北京观象台四年 (2002~2005 年) 的季节和年平均 AOD 与 AERONET 产品的对比, 如表所示, 对所有反演的 AOD (所有日) 进行统计分析, 计算的季节平均 AOD 是 AERONET 的 2~3 倍, 年平均是 AERONET 的 2.6 倍; 仅对晴空日 (08、14、20 时云量都为 0) 进行统计, 计算的季节平均 AOD 是 AERONET 的 0.32~0.86 倍, 年平均是 AERONET 的 0.56 倍。晴空日计算结果偏小主要是因为晴空日样本数少且多数情况光学厚度较小, 如夏季, 晴空日不到总样本数的 3% 且多数 < 0.2 。运用云甄别方法后, 在有

表 4 云甄别前后四年（2002~2005）的季节和年平均 AOD 与 AERONET 产品的对比

Table 4 Comparisons among the four-year（2002 - 2005）mean values of seasonal and yearly AODs calculated from raw data, cloud-contaminated reduction method and AERONET, separately

	AERONET	云甄别日	晴空日	所有日	N ₁	N ₂	N ₃
春	0.74	0.70	0.47	1.82	166	33	257
夏	0.79	0.84	0.25	2.54	162	10	341
秋	0.51	0.54	0.44	1.15	242	87	325
冬	0.42	0.30	0.20	0.84	175	89	239
年	0.61	0.60	0.34	1.60	772	234	1192

注：云甄别日：运用云甄别方法后计算值；晴空日：选择 08、14、20 时总云量都为 0 的样本计算的平均值；所有日：所有反演结果平均值；N₁、N₂、N₃ 表示云甄别日、晴空日、所有日的样本数。

效提高样本使用率（从晴空日的 < 20% 提高至 65%）的基础上，计算的四年总平均与 AERONET 仅相差 0.01。计算的季节平均 AOD 与 AERONET 相比，春、夏、秋季偏差都≤0.06，冬季偏差虽然仍达 0.12，但与所有日和晴空日计算结果相比，有了显著的改善。

总的来看，运用云甄别方法后，多年季节和年平均 AOD 的计算得到了较大改善，与 AERONET 计算值具有较好的一致性。

6 结论

我国有长期大量的水平面直接辐射日曝辐量资料。为了从这些资料获取气溶胶光学厚度信息，本文建立了一个利用该日曝辐量反演气溶胶光学厚度的方法，包括发展一个适用于该日曝辐量的“等效”瞬时太阳天顶角模型，并提出了一个基于气溶胶标高的云影响甄别方法。通过对本文方法的误差分析和比对验证，得到如下一些结论：

- （1）“等效”瞬时太阳天顶角模型不稳定性引起的 AOD 反演误差平均为 3.66%；AOD 日变化对单个反演结果有较大影响，但对较长时间的平均值影响不显著；订正造成的散射辐射误差≤20% 时，AOD 的平均反演偏差≤4%。
- （2）晴空反演的 AOD 与 AERONET 产品的关系系数超过 0.95，平均偏差约 0.02。
- （3）云甄别方法计算的多年季节和年平均 AOD 与 AERONET 产品具有较好的一致性。

参考文献（References）

Angstrom A. 1929. On the atmospheric transmission of sun radiation and on dust in the air [J]. Geografiska Annaler, 11: 156 - 166.

Berk A, Anderson G P, Bernstein L S, et al. 1999. MODTRAN 4 radiative transfer modeling for atmospheric correction [J]. Proceedings of SPIE, 3756: 348 - 353.

Chu D A, Kaufman Y J, Ichoku C, et al. 2002. Validation of MODIS aerosol optical depth retrieval over land [J]. Geophys. Res. Lett., 29 (12): 8007.

Gueymard C A. 1998. Turbidity determination from broadband irradiance measurements: A detailed multicoefficient approach [J]. J. Appl. Meteor., 37: 414 - 435.

Holben B N, Kaufman Y J, Eck T F, et al. 1998. AERONET—A federated instrument network and data archive for aerosol characterization [J]. Remote Sens. Environ., 66 (1): 1 - 16.

Linke F. 1922. Transmissions-Koeffizient Und Trubungsfaktor [J]. Beitr. Phys. Atmos., 10: 91 - 103.

段民征，吕达仁. 2007. 利用多角度 POLDER 偏振资料实现陆地上空大气气溶胶光学厚度和地表反照率的同时反演 I. 理论与模拟 [J]. 大气科学, 31 (5): 757 - 765. Duan Minzheng, Lü Daren. Simultaneously retrieving aerosol optical depth and surface albedo over land from POLDER's multi-angle polarized measurements. I: Theory and simulations [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 2007, 31 (5): 757 - 765.

罗云峰，吕达仁，李维亮，等. 2000. 近 30 年来中国地区大气气溶胶光学厚度的变化特征 [J]. 科学通报, 45 (5): 549 - 554. Luo Yunfeng, Lü Daren, Li Weiliang, et al. 2000. Variation of atmospheric aerosol optical depth over China in recent 30 years [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 45 (5): 549 - 554.

Luo Yunfeng, Lü Daren, Zhou Xiuji, et al. 2001. Characteristics of the spatial distribution and yearly variation of aerosol optical depth over China in last 30 years [J]. J. Geophys. Res., 106 (D13): 14501 - 14514.

罗云峰，吕达仁，周秀骥，等. 2002. 30 年来我国大气气溶胶光学厚度平均分布特征分析 [J]. 大气科学, 26 (6): 721 - 730. Luo Yunfeng, Lü Daren, Zhou Xiuji, et al. 2002. Analyses on the spatial distribution of aerosol optical depth over China in recent 30 years [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 26 (6): 721 - 730.

- 毛节泰, 张军华, 王美华. 2002. 中国大气气溶胶研究综述 [J]. 气象学报, 60 (5): 625–634. Mao Jietai, Zhang Junhua, Wang Meihua. 2002. Summary comment on research of atmospheric aerosol in China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 60 (5): 625–634.
- Molineaux B, Ineichen P, Oneill N. 1998. Equivalence of pyrheliometric and monochromatic aerosol optical depths at a single key wavelength [J]. Appl. Opt., 37 (30): 7008–7018.
- 邱金桓. 1995. 从全波段太阳直射辐射确定大气气溶胶光学厚度 I: 理论 [J]. 大气科学, 19 (4): 385–394. Qiu Jinhuan. 1995. A new method of determining atmospheric aerosol optical depth from the whole-spectral solar direct radiation. Part I: theory [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 19 (4): 385–394.
- Qiu J H. 1998. A method to determine atmospheric aerosol optical depth using total direct solar radiation [J]. J. Atmos. Sci., 55: 744–757.
- Qiu J H. 2001. Broadband extinction method to determine atmospheric aerosol optical properties [J]. Tellus, 53B (1): 72–82.
- Qiu J H. 2003. Broadband extinction method to determine aerosol optical depth from accumulated direct solar radiation [J]. J. Appl. Meteor., 42: 1611–1625.
- Qiu J H, Yang L Q. 2000. Variation characteristics of atmospheric aerosol optical depths and visibility in North China during 1980–1994 [J]. Atmos. Environ., 34 (4): 603–609.
- 邱金桓. 2006. 宽带太阳漫射辐射法反演辐射加权平均的气溶胶一次散射反照率研究 [J]. 大气科学, 30 (5): 767–777. Qiu Jinhuan. 2006. Broadband diffuse radiation method to retrieve radiation weighted mean aerosol single scattering albedo [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (5): 767–777.
- Ricchiazzi P, Yang S, Gautier C, et al. SBDART: A research and teaching software tool for plane-parallel radiative transfer in the earth's atmosphere [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 1998, 79 (10): 2101–2114.
- Schuepp W. 1949. Die bestimmung der komponenten der atmosphärischen trubung aus aktinometermessungen [J]. Arch. Meteor. Geoph. Biokl., B1: 257–346.
- Stothers R B. 1996. Major optical depth perturbations to the stratosphere from volcanic eruptions; Pyrheliometric period, 1881–1960 [J]. J. Geophys. Res., 101 (D2): 3901–3920.
- Unsworth M H, Monteith J L. 1972. Aerosol and solar radiation in Britain [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 98 (418): 778–797.
- 王雨, 傅云飞. 2007. 利用 MODIS 卫星资料对中国中东部和印度次大陆气溶胶特性的分析 [J]. 气候与环境研究, 12 (2): 137–146. Wang Yu, Fu Yunfei. 2007. Comparison on aerosol properties between central and East China and Indian subcontinent by using MODIS products [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 12 (2): 137–146.
- 杨景梅, 邱金桓. 2002. 用地面湿度参量计算我国整层大气可降水量及有效水汽含量方法的研究 [J]. 大气科学, 26 (1): 9–22. Yang Jingmei, Qiu Jinhuan. 2002. A method for estimating precipitable water and effective water vapor content from ground humidity parameters [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 26 (1): 9–22.
- 中国气象局. 1996. 气象辐射观测方法 [M]. 北京: 气象出版社, 29–32. China Meteorological Administration. 1996. Meteorological Radiation Observation Methods [M]. Beijing: China Meteorological Press, 29–32.
- 宗雪梅, 邱金桓, 王普才. 2005a. 宽带消光法反演气溶胶光学厚度与 AERONET 北京站探测结果的对比研究 [J]. 大气科学, 29 (4): 645–653. Zong Xuemei, Qiu Jinhuan, Wang Pucai. 2005. A comparison study of aerosol optical depths retrieved from broadband extinction method and aerosol robotic network observation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 29 (4): 645–753.
- 宗雪梅, 邱金桓, 王普才. 2005b. 近 10 年中国 16 个台站大气气溶胶光学厚度的变化特征分析 [J]. 气候与环境研究, 10 (2): 201–208. Zong Xuemei, Qiu Jinhuan, Wang Pucai. 2005. Characteristics of atmospheric aerosol optical depth over 16 radiation stations in the last 10 years [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 10 (2): 201–208.