第 29卷第 3期

#### 2009年 3月

许潇锋, 邱金桓, 牛生杰, 等. 2009 近 45年中国 12个一级站大气气溶胶光学厚度变化特征 [J]. 环境科学学报, 29(3): 488-495 Xu X F, Qiu JH, Niu S J *et al.* 2009. Optical depth of the atmospheric aerosol at 12 stations in China over the past 45 years [J]. Acta Scientiae Circum stantiae 29(3): 488-495

## 近 45年中国 12个一级站大气气溶胶光学厚度变化 特征

许潇锋12,邱金桓2\*,牛生杰1,汤莉莉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
 收稿日期: 2008-03-28 修回日期: 2008-05-29 录用日期: 2008-11-21

摘要:利用常规观测的总辐射和散射辐射日曝辐量资料,结合 NASA G BS的月平均平流层气溶胶光学厚度 (AOD)产品,反演计算了北京等 12 个台站 1961~2005年 0.754m 对流层 AOD 和气溶胶标高数据.基于这些数据,分析了各站 AOD 气溶胶标高和地面能见度的年、季、月变化特 征.结果表明:①就 12个站 45a总平均而言,光学厚度为 0.276年增长为 0.0034 气溶胶标高为 1.65km,年增加为 0.015km,能见度为 17.1km, 年变化值为 - 0.08km; AOD春夏较大,秋冬较小;气溶胶标高夏季最高,春季次之,冬季最低.②各站点 45a平均 AOD范围为 0.116~0.387 除 格尔木外,各站 AOD均有增长,年变化值为 0.0010~0.0079 ③ 20世纪 70 80年代 AOD增加明显; 20世纪 90年代以来,多数站点 AOD有所下 降,能见度有转好趋势.

关键词: 气溶胶光学厚度; 气溶胶标高; 能见度; 总辐射; 散射辐射

文章编号: 0253-2468 (2009) 03-488-08 中图分类号: X 513 文献标识码: A

# Optical depth of the atmospheric aerosol at 12 stations in China over the past 45 years

XU X iao feng<sup>1, 2</sup>, Q U Jinhu an<sup>2\*</sup>, N U Sheng jie<sup>1</sup>, TANG L ili<sup>1</sup>

1 Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

2 Institute of atmospheric physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Received 28 M arch 2008 received in revised form 29 M ay 2008; accepted 21 N ovem ber 2008

A bstract The tropospheric aerosol optical depths (AOD) at 0 75  $\mu$ m were retrieved by a new method using the daily global and diffuse insolations and the NASA GISS month ly mean stratospheric AOD data at 12 meteorological stations in China from 1961 to 2005. Analyses on the characteristics of AOD, aerosol scaling height (ASH) and surface visibility were made based on the month ly mean tropospheric AODs. It was found that the yearly mean AODs showed an increasing trend atmost stations during the last 45 years. The mean values of AOD, ASH and visibility from all stations were 0. 276, 1.65 km and 17, 1 km, respectively and their annual increments were 0.0034 a<sup>-1</sup>, 0.015 km a<sup>-1</sup> and -0.08 km a<sup>-1</sup>, respectively. AOD in spring and summer was greater than that in autumn and winter. The highest ASH appeared in summer while the low est in winter. For individual stations, the mean AOD over all 45 years ranged from 0.116 to 0.387. Increasing trends of AOD were observed at all stations except Geermu, with annual increments ranging from 0.0010 to 0.0079. AOD reached the highest level in most stations during the 1980s, with an average increment of 0.101 relative to that of the 1960s. Since 1990, a slight decreasing trend was found in AOD, along with an increase in visibility.

Keywords aerosol optical depth, aerosol scaling height visibility, global radiation; diffuse radiation

Supported by the National Basic Research Program of China (No. 2006 CB403702), the National Natural Science Foundation of China (No. 40333029, 40765001) and the Jiangsu Key laboratory of Meteorological Disaster (No. KIME 05006)

作者简介: 许潇锋(1980-),男,博士, E-mail xxf8080@ 126 com; \* 通讯作者(责任作者), E-mail hqi@ mail iap ac cn

Biography: XU X isofeng(1980-), male Ph D., E-mail xxf8080@ 126. cm; \* Corresponding author, E-mail jhqi@ mail iap ac cn © 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目 (Na 2006CB403702); 国家自然科学基金 (Na 40333029, 40765001); 江苏气象灾害重点实验室基 金 (Na KIME05006)

#### 1 引言 (Introduction)

大气气溶胶是引起气候变化的一个重要因子, 它通过直接和间接作用影响地--气系统的辐射平衡 和水循环(Charson et al, 1991;张小曳, 2007).一方 面,气溶胶通过散射和吸收太阳辐射以及地面辐射 直接影响地--气系统的辐射平衡(Sokolik et al, 1996);另一方面,大量气溶胶粒子作为云凝结核改 变云的光学特性和生命期,间接影响气候 (Rosen feld, 2000, Toon, 2000).气溶胶还参与臭氧的 非均相反应,影响臭氧平衡(邱金桓等, 1997).同 时,气溶胶颗粒物可导致大气污染,危害人类健康, 具有重要的环境效应(李成才等, 2003).

气溶胶光学厚度 (AOD) 是气溶胶最重要的参 数之一,是表征大气混浊度的重要物理量,也是确 定气溶胶气候效应的一个关键因子 (Durkee et al, 1991). AOD 探测方法的研究近年来得到了快速的 发展,探测 AOD 可以采用地基探测和卫星遥感方法 (毛节泰等, 2002). 地基观测主要采用太阳分光光 度计,其精度较高,但由于费用昂贵,站点相对较 少,卫星遥感技术具有覆盖面积广、信息获取方便 快捷等特点,但受地表状况变化的影响较大,相比 于这 2种方式,从常规探测的宽波段太阳辐射反演 AOD 的方法凭其廉价的费用、广泛的站点分布、成 熟的观测规范、长期的观测历史等优点,成为获取 气溶胶光学厚度的另一有效途径(邱金桓等, 2002). 许多学者 (Unsworth et al, 1972, Qiu, 1998; Monlineaux et al, 1998 Guewnard, 1998 李刚等, 2001)已经研究证明了从这些常规辐射资料反演 AOD的可行性,并建立了相关模式.通过这些模式, 邱金桓等(1997)分析了中国 10个地方大气气溶胶 1980~1994年的变化特征;周秀骥等(1998)应用该 方法反演的 AOD 数据模拟研究了中国地区气溶胶 直接辐射强迫的大小及气候响应的季节变化特征; 罗云峰等 (2002)利用 46 个甲种日射站的逐日太阳 直接辐射日总量和日照时数等资料,分析了 1961~ 1990年中国地区气溶胶光学厚度的变化特征及平 均分布特征; 宗雪梅等 (2005)分析了 1993~ 2002 年我国 16个辐射观测站的 AOD 变化特征. 然而, 以 上用于分析的 AOD 数据主要是基于直射表探测的 直接辐射反演而来的. 常规台站除了有直射辐射资 料外,还有长期大量的总辐射和散射辐射资料,其 历史可以追溯到。1957年.为了更充分利用这些资料

挖掘气溶胶信息,作者已经发展了一个从总辐射和 散射辐射日曝辐量反演 AOD 的方法,并利用 AERONET的 AOD产品作了验证,详细过程已另文 描述(许潇锋等,2009).基于该方法,本研究中拟反 演获得北京等 12个台站 1961~2005年 0.75µm 的 AOD 数据,并结合 NASA G BS 的月平均平流层 AOD 数据(Sato *et al*, 1993, Hansen *et al*, 2005)和 常规观测的地面能见度等资料,分析这些站点的对 流层 AOD 气溶胶标高(ASH, Aerosol Scaling Height)和能见度(Visbility)的年、季和月变化特征. 旨在为研究我国近几十年来大气气溶胶对气候的 辐射强迫作用提供参考依据.

2 资料与方法 (Data and method)

21 资料来源

我国在 1990年前后对辐射观测站网进行了大 调整,调整后只有 17个站仍维持总辐射、散射辐射 和直接辐射的常规测量.为了研究我国气溶胶光学 厚度的长期变化特征,本研究中选取了其中有长期 记录的 12个站点进行分析,12个站点为哈尔滨、沈 阳、北京、郑州、上海、武汉、广州、兰州、昆明、格尔 木、拉萨和乌鲁木齐.所用资料为国家气象局建设 的这 12个太阳辐射观测站 1961~2005年总辐射和 散射辐射日曝辐量资料,以及这些台站观测的同期 的地面水平能见度等资料.

22 方法

利用总辐射和散射辐射日曝辐量反演 AOD 的 详细反演过程作者已另文描述 (许潇锋等, 2008), 这里仅对反演方法作一简单介绍,步骤如下.

首先,计算水平面太阳直接辐射日曝辐量 D:

$$D_1 = D_g - D_d$$
 (1)

式中, *D*<sub>s</sub> *D*<sub>d</sub> 分别表示总辐射和散射辐射的日曝 辐量.

将水平面直接辐射日曝辐量  $D_1$ 转化为等效瞬时水平面直接辐射  $S_1(\mu_{0E})$ :

$$S_1(\mu_{0E}) = D_1 / \Delta t \tag{2}$$

式中, △t表示仪器探测时间, 塭ε表示等效太阳天顶 角余弦.

根据比尔-朗伯定律,计算宽带气溶胶光学厚 度 T<sub>EA OD</sub>:

$$T_{BAOD} = -\frac{1}{m_a} \left[ \ln \frac{S_1(\mu_{0E})}{RS_0 \mu_{0E}} - \ln(t_m) \right]$$
(3)

式中,  $m_a$  是气溶胶大气光学质量,  $S_0$  是太阳常数,  $t_a$  是分子大气宽带透过率.

最后,利用 Q iu(2001)提出的等效波长原理,得 到等效波长  $\lambda_{\epsilon}$  (约 0 75 $\mu$ m)处的气溶胶光学厚度 T<sub>a</sub>( $\lambda_{\epsilon}$ ):

$$\mathsf{T}_{a}(\lambda_{E}) = \mathsf{T}_{BAOD} \tag{4}$$

通过以上方法,反演得到了北京等 12个站点 1961~2005年075<sup>µm</sup>等效日平均气溶胶光学厚度 值.本研究中将主要研究对流层 AOD 的变化特征. 为此,结合 NASA GISS的月平均平流层 AOD 数据 计算了该 12个站的对流层 AOD.

假设对流层气溶胶消光系数随高度指数衰减, 根据 0 55<sup>µ</sup>m 对流层光学厚度 T<sub>a</sub> (0 55<sup>µ</sup>m)、地面能 见度 (*V*)和地面气压 (*p*)资料, 气溶胶标高可按下式 计算:

$$Z_{a} = \frac{T_{a} (0.55 \mu_{\rm m})}{3.912 / V - 0.0116 \rho / 1013.23}$$
(5)

基于以上反演的 AOD 数据,本研究中分析了该 12个站点对流层 AOD的月、季和年变化特征,并研 究了它们与能见度的关系,还分析了气溶胶标高的 变化特征.

23 数据处理方法

基于反演的这 12个台站的气溶胶光学厚度, 气 溶胶标高以及能见度数据, 本研究利用统计分析方 法分析了它们的变化特征, 统计中所使用的软件是 SPSS.

3 结果 (Results)

本节对 AOD, 气溶胶标高和能见度数据的分析 主要从 3个方面进行: ①将 12个站作为整体, 分析 其平均结果; ②逐个站点分析; ③与文献结果进行 比较.

3 1 12 个站平均的 AOD 和气溶胶标高

本节将 12个站平均的 AOD 和气溶胶标高分别 作为整体进行分析.由于 2003年后兰州站的地址迁 移,本节仅对 1961~2003年的数据进行分析,其中 2000年以来的年代平均 AOD 为 2000~2003年的 平均.

3 1.1 年平均 AOD 图 1所示为 1961~2003年 12站平均的逐年和年代平均 AOD 的变化.12个站 总平均 AOD 为 0 276 增长率为 0 0034a<sup>-1</sup>,最小、 数大值分别为 0 183(1964年)、0 347(1989年).20 世纪 60年代 AOD 最小,平均为 0 201;20世纪 70, 80年代 AOD增加显著,分别比 60年代增加 0 055, 0 109, 而能见度分别下降 2 86km、4 33km; 1961~ 1989年 AOD年增长达 0. 0051a<sup>-1</sup>; 20世纪 90年代 以来, 平均 AOD变化较小, 而能见度有所好转, 比 80年代平均增加了 1. 37km.



图 1 1961~2003年 12站平均的逐年和年代平均 AOD 的变化 (圆圈为年平均 AOD, 粗实线为 5年滑动平均, 虚线为线性 趋势, 立柱为年代平均)

Fig 1 Yearly- and decade-m ean AOD s from 12 stations during 1961 ~ 2003 (Circle thick line broken line and column represent yearly-m ean, 5-year running linear trend and decade-m ean, respectively)

3 1.2 季节平均 AOD 和气溶胶标高 图 2a 2b分 别为 AOD 和气溶胶标高季节平均值的逐年和年代 际变化. 如图 2a所示, 平均 AOD 在各个年代均表现 为春夏较大, 秋冬较小, 且秋季最小. 春、夏、秋、冬 的总平均 AOD 分别为 0 323 0 308 0 230 0 250 AOD 年 增长分别为 0 0025 0 0040 0 0034 0.0034a<sup>-1</sup>. 从各个年代的季节平均 AOD来看, 季节 间差异有变小趋势.

如图 2b所示, 气溶胶标高按夏、春、秋、冬依次 减小, 平均标高分别为 2 23 1 97 1 34 1 06 km, 年增长分别为 0 022 0 020 0 015 0 018 km・a<sup>-1</sup>. 秋冬季标高明显低于春夏季, 其原因可能与季节间 逆温层高度的差异有关. 从年代际季节平均标高来 看, 20世纪 60 70年代变化较小, 平均 < 0 1km; 20 世纪 80年代四季标高均有明显增长, 相比 60年代, 各季增长 0 24~ 0 44 km, 平均增加 0 31km; 20世 纪 90年代各季标高比 80年代平均增加 0 17km, 且 秋冬季增长高于春夏季; 2000年以来, 春夏季标高 平均增长 0 15km, 秋季略有下降, 冬季基本不变,

29卷



图 2 季节平均的 AOD(a)和气溶胶标高(b)逐年和年代际变化(立柱从左至右依次为春、夏、秋、冬) Fig 2 Seasonalmean(a) AOD and (b) aerosol scaling height(Columns represent the values for spring summer autumn and winter in that order)

3 2 逐站 AOD、气溶胶标高和能见度

本节将分别分析 12个站的 AOD、气溶胶标高 和能见度的变化特征. 兰州站时间范围为 1961~ 2003年,其余站点为 1961~ 2005年. 321 年平均 AOD 和气溶胶标高 图 3、图 4分 别给出了 12个站的不同年代的 AOD, ASH 的平均 值.表 1给出了各站 1961~2005年 AOD 和 ASH 的 平均值、标准差、年变化值以及相关系数.



492



Fig 3 Decademean AOD



图 4 各站不同年代的平均气溶胶标高(60s表示 20世纪 60年代 平均,以此类推;00s表示 2000~2005年平均)

Fig 4 Variations of decade mean ASH

表 1 各站 1961~2005年的 AOD平均值、标准差、年3	<b>፤化值</b>
----------------------------------	------------

Table 1 Mean value, standard deviation and annual increment of AOD and ASH at the 12 stations from 1961 ~ 2005

站点 —		气溶胶光学厚度			气溶胶标高 /km	
	平均值	标准差	年变化值	平均值	标准差	年变化值
哈尔滨	0 202	0. 039	0 0010	1. 30	0 287	0 004
乌鲁木齐	0 214	0. 051	0 0028	1. 93	0 496	0 025
格尔木	0 131	0. 018	- 0 0006	1. 35	0 221	0 004
兰州	0 379	0. 057	0 0014	2.06	0 573	0 041
沈阳	0 283	0. 062	0 0033	0.82	0 436	0 029
北京	0 306	0. 086	0 0050	1. 25	0 235	0 011
拉萨	0 116	0. 043	0 0010	1. 48	0 572	0 007
昆明	0 208	0. 048	0 0011	1. 99	0 449	- 0 006
郑州	0 387	0. 113	0 0079	1. 61	0 255	0 005
武汉	0 381	0. 116	0 0052	1. 94	0 697	0 037
上海	0 335	0. 081	0 0046	1. 60	0 666	0 046
广州	0 376	0. 094	0 0057	2.42	0 471	- 0 001

由图 3 图 4和表 1可知: ①平均来看,拉萨光 学厚度最小(0 116),郑州光学厚度最大(0 387). 广州站的平均气溶胶标高最高(2 42km),沈阳标高 最低 (0 85km). 上海气溶胶标高增加最快 (0 046  $km^{\bullet} a^{-1}$ ), 其次为兰州 (0. 041 $km^{\bullet} a^{-1}$ ). 格尔木的 AOD 基本不变, 平均为 0 131, 标高也最稳定, 标准 差仅 0 221km ②除格尔木外,其余站 AOD 均有增 加趋势,年变化值 0 0010~0.0079,其中郑州增长 最快,广州次之.同时,有10个城市的气溶胶标高表 现为增长,年变化值率为 0 004~0 046km• a<sup>-1</sup>. ③ 与 20世纪 60年代相比,除格尔木外,20世纪 80年 代各站 AOD 和 ASH 均有较多增长,其中,有 6个站 AOD 增长≥0 14 武汉增加最多,其次是上海和北 京: 气溶胶标高以乌鲁木齐增加最多, 其次为上海 和兰州.相比于 20世纪 80年代, 1990年以来, 平均 AOD 下降的有 7个站点,下降范围 - 0.007~ - 0.053 其中 4 个站下降超过 0.027. 武汉下降最 多:平均能见度增加的有 7个站点,增长范围 0.33 ~ 5 94km; ASH 增加的有 9个站点, 增加范围 0 04 ~ 0 67km. 可见, 20世纪 90年代以来, 多数站点的 AOD有所下降, 能见度有转好趋势. 其原因可能与 2 个因素有关: 一是国家加强了环境保护; 二是我国 春季的沙尘暴事件有波动下降的趋势, 20世纪 90 年代强沙尘事件最少 (周自江等, 2003).

3 2 2 月平均 AOD 与能见度 图 5所示为 12个 站所有年平均的月平均 AOD 与能见度的分布. 如图 所示, 按 AOD 季节特征, 12个站可以分为 3类: 第 1 类为 AOD 冬春较大、夏秋较小, 如西北的乌鲁木齐、 兰州; 第 2类为春季 AOD 明显高于其它季节, 如南 部的武汉、上海、广州; 其它城市属于第 3类, AOD 春夏较大、秋冬较小. 李霞等 (2005)利用光度计反 演分析了乌鲁木齐 AOD 特征后指出, 冬季燃煤采 暖, 静风频率高、降水少, 春季沙尘天气影响等是造 成冬春 AOD 较大的原因. 上海、武汉和广州站在春 季 AOD 较大可能与受北方沙尘天气影响, 以及气温 回暖、湿度增加促进气溶胶气-粒转化等因素有关. 北京等城市夏季 AOD 较大可能与湿度大、气温高、 降水较少 等促进 气溶胶增长的因素有关 (Qiu *et al*, 2000, 宗雪梅等, 2005).

气溶胶光学厚度不但与地面能见度有关联,还 与气溶胶消光系数的垂直分布密切相关.因此,AOD 与能见度可表现为多种变化形式,如图 5所示.其中,乌鲁木齐、兰州和格尔木站的 AOD与能见度为负相关,相关系数分别为 – 0 91、 – 0 91和 – 0 87, 其相伴概率 *p* < 0 001;其它站点两者相关性未通过 信度为 0 05的显著性检验.



图 5 各站的月平均 AOD 与能见度的分布

Fig. 5 M on thely mean AOD and visibility at the 12 stations

3 3 对比

本研究中将反演的 AOD 与已有文献结果进行 了比较,表 2 表 3给出了对比结果,表中的光学厚 度为整层大气 AOD

### 表 2 本研究中反演的 1993~2002年的平均 AOD 与宗雪梅等 (2005)计算结果比较

Table 2 Comparison of average AOD from 1993 – 2002 between this paper and Zong et al( 2005)

	*		,		
站点	文献	本文	站点	文献	本文
哈尔滨	0 295	0. 203	拉萨	0 123	0 127
乌鲁木齐	0 284	0. 284	昆明	0 231	0 243
格尔木	0 155	0. 131	郑州	0 507	0 513
兰州	0 464	0. 426	武汉	0 455	0 478
沈阳	0 338	0. 323	上海	0 45	0 424
北京	0 45	0. 397	广州	0 438	0 499

表 3 本研究中反演的 1980~ 1994 年的平均 AOD 与邱金桓等 (1997)计算结果对比

Table 3 Comparison of average AOD from 1980 – 1994 between this paper and Q in *et al* (1997)

P=	P = = = = = = = = = = = = = = = = = = =				
站点	文献	本文	站点	文献	本文
乌鲁木齐	0 306	0 293	昆明	0. 259	0. 274
格尔木	0 169	0 161	郑州	0. 437	0. 433
沈阳	0 333	0 354	武汉	0. 551	0. 533
北京	0 41	0 376	上海	0. 428	0. 426
			广州	0. 468	0. 468

表 2给出了本研究中计算得到的 12个台站 1993~2002年总平均 AOD 与宗雪梅等 (2005)结果 的比较.除个别站点外,大多数站点的光学厚度符 合较一致,其中 8个站的差异 < 0 03,12站平均相 差 0 012表 3给出了本研究中计算得到的 9个站

的比较.除沈阳、北京站外,两者相差均 < 0 02 9个 站平均相差 0 005 作者还将反演的北京站 AOD与 AERONET 产品进行了比较,结果表明,两者 2002~ 2005年总平均相差 < 0 02 本研究中反演得到的拉 萨、沈阳站 2004~ 2005年平均 AOD(0 138,0 295) 与辛金元等(Xin et al, 2007)利用手持太阳光度计 观测结果(0.14,0 29)相差均 < 0 01.以上对比表 明,本研究的反演结果与文献结果符合较一致.同 时我们注意到,本文结果整体要比文献结果有所偏 小,其原因可能与所用太阳辐射资料不同有关.邱 金桓等(2002)指出,利用日曝辐量反演的 AOD,是 一个辐射加权平均,更多体现一天内小光学厚度的 信息.

4 结论 (Conclusions)

1)就 12站整体平均而言, AOD, 气溶胶标高、能 见度分别为 0 276, 1.65km、17.1km, 年变化值分别 为 0 0034a<sup>-1</sup>、0 015km•a<sup>-1</sup>、-0 08km•a<sup>-1</sup>. AOD 春夏较大, 秋冬较小. 气溶胶标高夏季最高, 春季次 之, 冬季最低.

2)就单个站点而言,45a平均 AOD 为 0 116~ 0 387,拉萨最小,郑州最大;除格尔木外,各站 AOD 均有增加趋势,年变化值为 0.0010~0 0079a<sup>-1</sup>.各 站平均气溶胶标高为 0 85~2 42 km,广州最高,沈 阳最低;除昆明和广州外,气溶胶标高均有增加,年 增长 0 004~0 046 km• a<sup>-1</sup>,上海增长最快.

3) 20世纪 60 年代光学厚度较小, 各站平均 AOD为0 091~0. 309, 80年代 AOD 增长最多, 各站 比 20世纪 60年代平均增加0 041~0 260, 20世纪 90年代以来, 多数站点的平均 AOD 有所下降, 地面 能见度有转好趋势.

4)与文献结果对比表明,本研究中反演的光学 厚度与文献结果符合较一致.

责任作者简介:印金桓(1943-),男,博士,研究员,博士生导师,国家级有突出贡献的专家,主要从事大气遥感和大气辐射传输研究,在国内外学术刊物和国际学术会议上发表论文 120多篇. E-mail jhq i@mail iap ac cn

#### 参考文献 (References):

Charlson R. J. Langner J. Rodhe H, et al. 1991. Perturbation of the northern hem isphere radiative balance by backscattering from anthropogenic sulfate aerosols[J]. Tellus A, 43(4): 152–163 Durk ee P.A, Pfeil F, Frost E, et al. 1991. G lobal analysis of aerosol 2457-2471

- Gueym ard CA. 1998. Turbidity detem ination from broadband imadiance measurements A detailed multicoefficient approach [J]. J Appl M eteor, 37: 414-435
- Hansen J. Sato M, Ruedy R, et al. 2005. Efficacy of climate forcings
  [J]. JG eophys Res. 110 D18104
- 李成才,毛节泰,刘启汉. 2003 用 MOD F 遥感资料分析四川盆地 气溶胶光学厚度时空分布特征 [J]. 应用气象学报, 14(1): 1-7
- LiC C, Mao JT, Alexis KaiHon Lau 2003 Characteristics of aerosol optical depth distributions over sichuan basin derived from MOD IS data[J]. Journal of Applied Meteorological Science 14(1): 1-7 (in Chinese)
- 李刚,季国良. 2001. 中国西北地区大气气溶胶散射光学厚度分析 [J]. 高原气象, 20(3): 283-290
- LiG, JiG L 2001 Analyses on aerosol scattering optical depth in the arid region of North-W est China[J]. Plateau M eteorology 20(3): 283-290 (in Chinese)
- 李霞, 陈勇航, 胡秀清, 等. 2005 乌鲁木齐大气气溶胶的光学特性 分析 [J]. 中国环境科学, 25: 22-25
- LiX, Chen Y H, Hu X Q, et al. 2005 Analysis of aerosol optical characteristics in U hmuqi[ J]. Chin a Environmental Science 25 22-25( in Chinese)
- 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 Y F, Lu D R, Zhou X J et al. 2002 Analyses on the spatial distribution of aerosol optical depth over China in Recent 30 Y ears [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences 26(6): 721-730 (in Chinese)
- 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
- M ao JT, Zhang JH, W ang W H. 2002 Summary comment on research of atmospheric aerosol in China[J]. A ctaM eteorological Sinica 60 (5): 625-634 (in Chinese)
- Molineaux B, Ineichen P, O'Neill N. 1998 Equivalence of pytheliometric and monochromatic aerosol optical depths at a single key wavelength [J]. ApplOpt 37(30): 7008-7018
- 邱金桓, 潘继东, 杨理权, 等. 1997. 中国 10个地方大气气溶胶 1980 ~ 1994年间变化特征研究[J]. 大气科学, 21(6): 725-733
- Q in JH, Pan J D, Yang L Q, et al. 1997. Variation of atmospheric aerosol over 10 sites in China during 1980–1994 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences 21 (6): 725–733 (in Chinese)
- Q iu JH. 1998. A method to determine atmospheric aerosol optical depth using total direct solar radiation [J]. J Atmos Sci 55: 744-757
- Q in J H, Y ang L Q. 2000 Variation characteristics of atmospheric aerosol optical depths and visibility in North China during 1980– 1994[J]. A mospheric Environment 34(4): 603–609
- Q in J.H. 2001 Broadband extinction method to determine atmospheric aerosol optical properties [J]. Tellus 53B(1): 72-82
- 邱金桓,杨理权. 2002 从宽带太阳直接辐射小时或日曝辐量反演 气溶胶光学厚度研究 [J]. 大气科学, 26(4):449-458

Carte diaracteristics [J]. Atmos Environ (Part A), 25 (11); 0 in JH, Yang LQ, 2002 A study of retrieving aerosol optical depth C1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. Aft rights reserved. http://www.cnki.net from day- or hour-exposed broadband so kar direct radiation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 26 (4): 449−458 (in Chinese)

- Rosenfeld D. 2000. Suppression of rain and snow by urban and industrial air pollution[J]. Science, 287(5459): 1793-1796
- SatoM, Hansen JE, M cCorm ick M P, et al. 1993 Stratospheric aerosol optical depths; 1850–1990 [J]. J G eophys Res; 98 (22): 987–922
- Sokolik IN, Toon O B 1996 Direct Radiative Forcing by Anthropogenic airborne Mineral Aerosols [J]. Nature 381(6584): 681-683
- Toon O B. 2000 Atmospheric science how pollution suppresses rain [J]. Science, 287(5459): 176
- Unsworth M H, Monteith J L. 1972 A erosol and solar radiation in Britain[J]. Quart J Roy M eteor Soc 98 (418): 778-797
- X in JY, Wang Y S, LiZ Q, *et al.* 2007 A od and angstrom exponent of aerosols observed by the Chinese sun hazem etern etwork from August 2004 to September 2005[J]. JG eophys Res, 112, D05203, doi 10. 1029/2006 JD 007075
- 许潇锋,邱金桓,牛生杰. 2009 利用水平面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 X F, Q in JH, N in S J 2009 A study of retrieving aerosol optical depth from daily horizontal broadband direct solar radiation [J].

Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 33 (2): 337-346 (in Chinese)

- 张小曳. 2007. 中国大气气溶胶及其气候效应的研究 [J]. 地球科学 进展, 22(1): 12-16
- Zhang X Y. 2007. A erosol over China and their climate effect[J]. Advances in Earth Science, 22(1): 12-16(in Chinese)
- 周秀骥,李维亮,罗云峰. 1998 中国地区大气气溶胶辐射强迫及区 域气候效应的数值模拟 [J]. 大气科学, 22(4):418-427
- Zhou X J LiW L, Luo Y F. 1998 Numerical sinulation of the aerosol radiation forcing and regional climate effect over China[J]. Chinese Jou mal of Atmospheric Sciences 22(4): 418-427(in Chinese)
- 宗雪梅, 邱金桓, 王普才. 2005 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 X M, Q iu J H, Wang P C. 2005. Characteristics of atmospheric aerosol optical depth over 16 radiation stations in the Last 10 Y ears [J]. Climatic and Environmental Research, 10(2): 201-208(in Chinese)
- 周自江,章国材. 2003 中国北方的典型强沙尘暴事件 (1954~2002年) [J]. 科学通报, 48(11): 1224-1228
- Zhou Z J Zong G C 2003 Classic strong dust storm events over North China during 1954—2002 [J]. Chinese Science Bulletin, 48(11): 1224—1228(in Chinese)