

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

宗雪梅 邱金桓 王普才

中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

摘要 应用宽带消光法从1993~2002年中国16个辐射观测站小时累积太阳直接辐射资料, 反演了逐时气溶胶光学厚度值, 并统计日、月、年的平均值, 用作气溶胶光学厚度变化特征分析。结果表明, 16个辐射站总的年平均气溶胶光学厚度在0.32~0.36之间变化, 沈阳和郑州两站的气溶胶光学厚度有明显增加的趋势, 而哈尔滨、兰州、广州、北京等站气溶胶光学厚度则有明显减弱的趋势。就季节变化而言, 一般气溶胶光学厚度最大值出现在春季。月平均气溶胶光学厚度与月平均能见度有较好的负相关关系。

关键词 宽带消光法 气溶胶光学厚度 能见度

文章编号 1006-9585 (2005) 02-0201-08 **中图分类号** P402 **文献标识码** A

Characteristics of Atmospheric Aerosol Optical Depth over 16 Radiation Stations in the Last 10 Years

ZONG Xue-Mei, QIU Jin-Huan, and WANG Pu-Cai

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

Abstract Hourly aerosol optical depths were retrieved by using broadband extinction method from hourly cumulation direct radiation data in 16 stations during 1993—2002, and daily, monthly, yearly aerosol optical depths were calculated repeatedly at the same time in order to analyze variation characteristics of aerosol optical depth. It is shown that the yearly averages of aerosol optical depths for all stations varied from 0.32 to 0.36. Increasing trends over Shenyang and Zhengzhou, decreasing trends over Harbin, Lanzhou, Guangdong and Beijing have been found in the period. The maximum aerosol optical depth occurs usually in spring. Monthly average of aerosol optical depth has a good negative correlation with visibility.

Key words broadband extinction method, aerosol optical depth, visibility

1 引言

大气气溶胶是悬浮在大气中的各种固态和液态的粒子, 其半径大约为0.1~10 μm 。大气气溶胶对太阳辐射的散射、吸收作用直接影响地球大

气的辐射平衡, 并通过成云作用及非均相化学反应参与大气中的各种化学过程, 影响其他温室气体成分的源汇, 对全球气候变化有着重要的作用。此外, 大气气溶胶还是环境研究、大气订正中的重要因子之一。气溶胶光学厚度作为气溶胶最基本的光学特性, 是研究气溶胶作用的基础。长时

收稿日期 2004-04-02 收到, 2005-02-02 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40175008、40175009、40333029

作者简介 宗雪梅, 女, 1972年2月出生, 博士生, 主要从事大气遥感方面的研究。E-mail: zongxm@mail.iap.ac.cn

期、大范围气溶胶光学厚度资料的缺乏是目前的主要问题。解决这一问题有两个比较可行的途径,一是卫星遥感方法,国外有很多研究成果^[1~3],国内也做了大量的研究工作,如毛节泰等^[4]、张军华等^[5]、李成才等^[6]都对如何从卫星资料反演气溶胶光学厚度进行过深入的研究。二是宽带消光法, Gueymard^[7]、邱金桓^[8,9]提出并发展了宽带消光法,试图从多年常规辐射站的辐射观测资料中间接提取气溶胶光学厚度的信息。利用这种方法,邱金桓等^[10]分析了中国 10 个地方大气气溶胶 1980~1994 年间的变化特征。罗云峰等^[11~14]利用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 30 年中国地区气溶胶光学厚度的变化特征及平均分布特征。

由于气溶胶的时空变化比较大,气溶胶的组成成分比较复杂,气溶胶光学厚度的时空分布也具有很大的不确定性,因此为了了解最近年份气溶胶光学厚度的变化规律,我们利用宽带消光法从近 10 年(1993~2002 年)的太阳直接辐射资料中提取出光学厚度的信息,并系统分析了这个时期气溶胶光学厚度的变化特征。

2 资料和方法

我国从 1993 年开始才进行逐时太阳直接辐射观测,本文就是利用全国 16 个辐射站(哈尔滨、乌鲁木齐、喀什、额济纳旗、格尔木、兰州、沈阳、北京、拉萨、成都、昆明、郑州、武汉、上海、广州、三亚)1993~2002 年小时累积太阳直接辐射资料和相应的常规气象观测资料,并配合 TOMS version-7 臭氧观测资料,反演了逐时气溶胶光学厚度,然后按照一定的约束原则^[9,15],选择气溶胶光学厚度计算结果做日平均,在逐日平均光学厚度的基础上计算月、季、年平均气溶胶光学厚度,将其用作不同时间尺度气溶胶光学厚度变化特征的分析。利用小时累积太阳直接辐射资料反演气溶胶光学厚度,较系统地研究近 10 年气溶胶光学厚度的变化特征,这还是第一次。

反演方法采用邱金桓^[8,9]发展的宽带消光法,获得等效波长的气溶胶光学厚度,这个等效波长约在 750 nm 左右。这种方法的计算结果,宗雪梅等^[15]曾与 AERONET 北京站太阳光度计的探测

结果做过对比分析,二者具有很好的一致性。

3 结果分析

先后分析气溶胶光学厚度年平均变化特征和季节平均变化特征,从中可以看出其近 10 年来的变化趋势。然后对 16 个辐射站的月平均光学厚度与能见度的关系做一相关分析。

3.1 年平均气溶胶光学厚度的特征分析

3.1.1 年平均气溶胶光学厚度的变化特征

我们对 16 个辐射站年平均气溶胶光学厚度求一个总的平均值,结果列于表 1,其反映了我国年平均气溶胶光学厚度的变化特征。从表中可以看出,1993 年和 2000 年年平均气溶胶光学厚度值较大,1995 年光学厚度值较小。总体看来,气溶胶光学厚度年平均值在 0.32~0.36 之间变化。

3.1.2 逐站年平均气溶胶光学厚度的变化特征和趋势分析

首先,分别计算 16 个辐射站气溶胶光学厚度 10 年总的平均值,结果见图 1。从图中可以看出,成都的气溶胶光学厚度最大,达到 0.6863,最小值出现在拉萨,只有 0.1233。气溶胶光学厚度 10 年平均值小于 0.2 的有 3 个站,分别是额济纳旗、格尔木和拉萨。而大于 0.4 的有 6 个站,分别为兰州、北京、郑州、武汉、上海、广州。这与罗云峰等^[13]分析的我国大气气溶胶光学厚度平均分布特征有类似之处,但是拉萨、喀什、昆明和乌鲁木齐 4 站远远小于罗云峰等^[14]反演的结果。可能主要是云的影响,反演年份不同也可能产生结果上的差异。

然后,分别分析 16 个辐射站逐站年平均气溶胶光学厚度的变化特征,从中可以看出各个辐射站气溶胶光学厚度的年变化趋势。

把 16 个辐射站的气溶胶光学厚度月平均值,以月为单位形成一个时间序列,求其线性倾向值和相关系数,再换算成年平均变化率(表 2)。从表中可以看出,通过 99% 信度检验的沈阳和郑州两站的气溶胶光学厚度,有明显增加的趋势,年平均递增率分别为 2.124% 和 1.272%。哈尔滨、兰州和广州 3 站气溶胶光学厚度则有明显减弱的趋势,总的年平均递减率为 1.463%。通过 95% 信度检验的北京和拉萨气溶胶光学厚度都呈现出

表 1 气溶胶光学厚度年平均值
Table 1 Yearly average AOD

年份 Year	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
AOD	0.363	0.336	0.320	0.354	0.341	0.331	0.339	0.364	0.338	0.345

注：AOD 指气溶胶光学厚度年平均值。Note: AOD means Aerosol Optical Depth.

表 2 16 个辐射站年平均变化率和相关系数
Table 2 Yearly average variability and correlative coefficients of 16 radiance stations

站名 Stations	样本数 Sample number	年平均值 Yearly value	年平均变化率 Yearly average variability / %	相关系数 Correlative coefficients	标准差 Standard deviation	检验 Test
哈尔滨 Harbin	113	0.2952	-1.161	-0.30901	0.10501	* *
乌鲁木齐 Urumqi	120	0.2839	0.2643	0.06546	0.11727	
喀什 Kashi	120	0.2667	0.5549	0.1583	0.10076	
额济纳旗 Ejin Qi	120	0.1333	-0.2838	-0.15483	0.05271	
格尔木 Golmud	119	0.1547	0.06610	0.02584	0.07414	
兰州 Lanzhou	120	0.4642	-1.512	-0.29654	0.14131	* *
沈阳 Shenyang	117	0.3376	2.124	0.37947	0.15173	* *
北京 Beijing	120	0.4503	-1.452	-0.21797	0.18879	*
拉萨 Lhasa	90	0.1233	-0.5563	-0.22416	0.07023	*
成都 Chengdu	88	0.6863	-1.280	-0.19989	0.27214	
昆明 Kunming	91	0.2315	1.101	0.17238	0.18193	
郑州 Zhengzhou	120	0.5075	1.272	0.27336	0.13081	* *
武汉 Wuhan	119	0.4552	0.7300	0.16977	0.12268	
上海 Shanghai	114	0.4503	0.8811	0.13925	0.18206	
广州 Guangzhou	101	0.4380	-1.716	-0.25952	0.18142	* *
三亚 Sanya	86	0.2115	-0.2272	-0.06045	0.10889	

* 表示通过 95%信度相关系数检验，* * 表示通过 99%信度相关系数检验。
* Indicates passing 95% reliability correlative coefficients test, * * indicates passing 99% reliability correlative coefficients test.

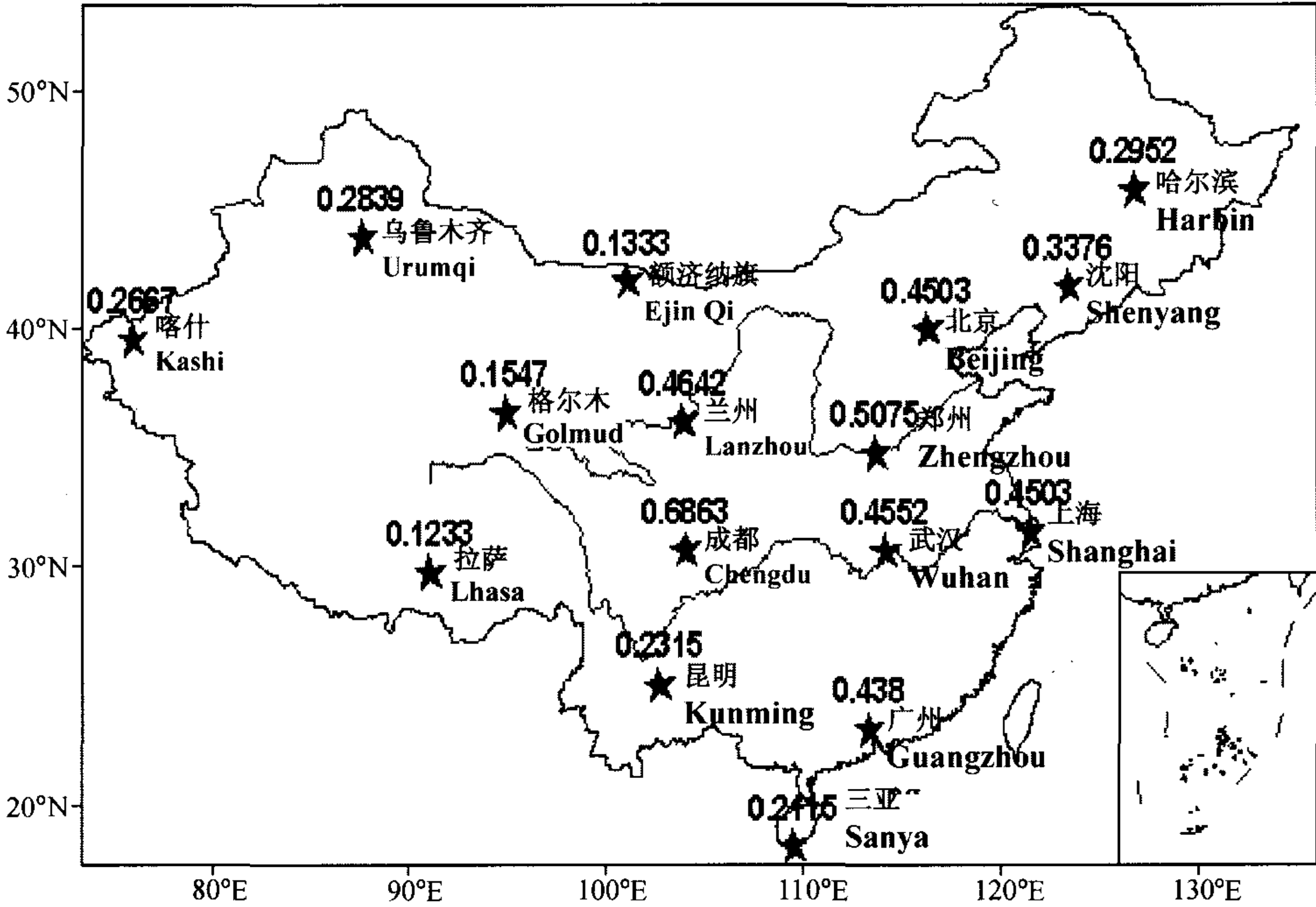


图 1 16 个辐射站 10 年平均气溶胶光学厚度分布
Fig. 1 Distribution of decennary AOD over sixteen stations

减弱的趋势,北京的年平均递减率为 1.452%,拉萨的年平均递减率为 0.5563%。其余各站气溶胶光学厚度的变化都不太明显。

图 2 是沈阳、郑州、乌鲁木齐、喀什、哈尔滨、兰州、北京和拉萨等 8 个辐射站的年平均气溶胶光学厚度变化(其他 8 个辐射站图略)。图中

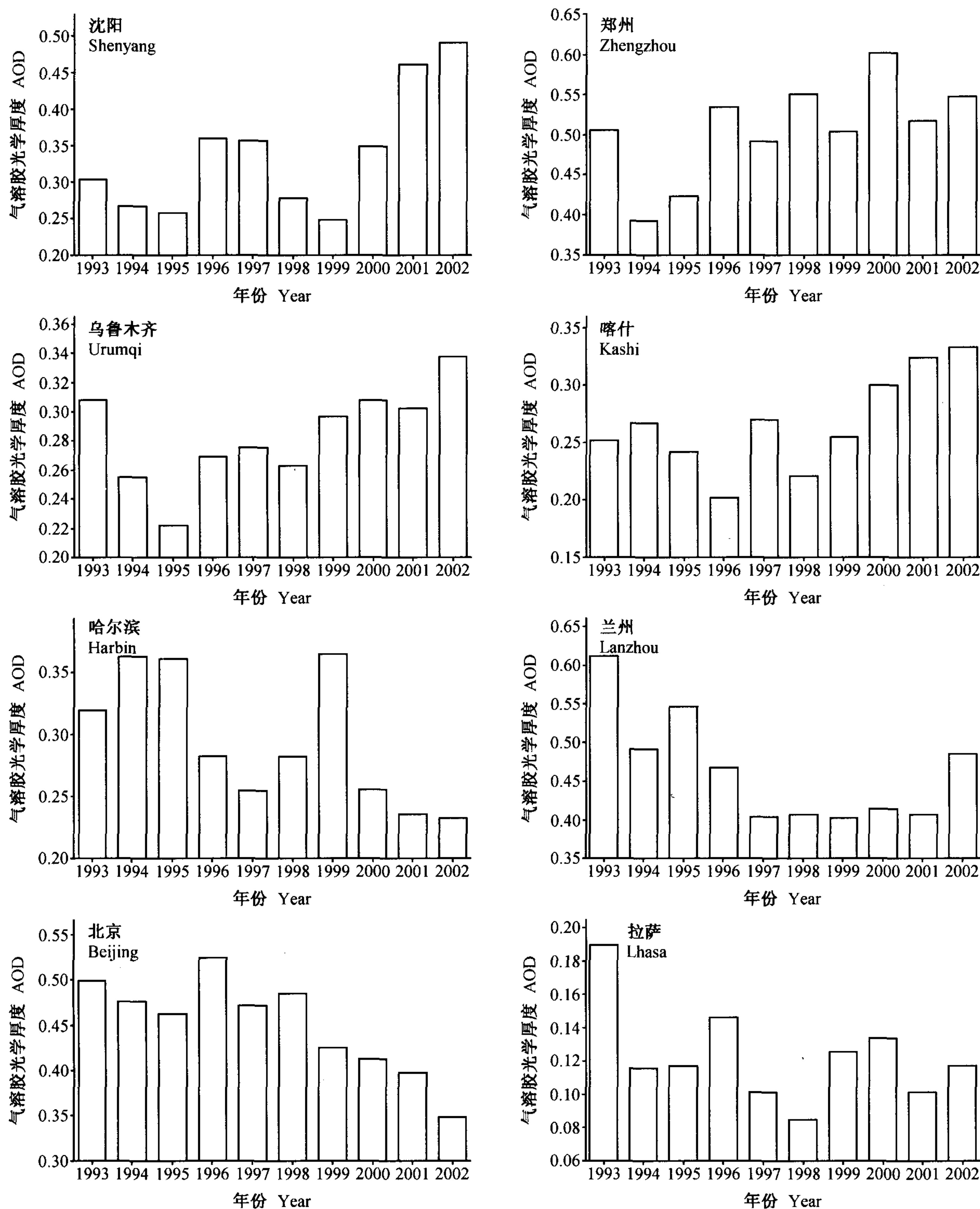


图 2 8 个辐射站年平均气溶胶光学厚度变化

Fig. 2 Variation of yearly average AOD over eight radiance stations

直观地反映了前文得出的总体增加或者减弱的趋势。此外，还可以看出，乌鲁木齐（见图）、喀什（见图）、武汉（图略）、上海（图略）等站总体上也呈现出增加的趋势，但增加幅度不大。我们还注意到一个有趣的现象就是年平均气溶胶光学厚度增加之前有一个逐年减小的趋势，如乌鲁木齐、喀什、武汉等站，大约在 1995 或 1996 年有一个年平均气溶胶光学厚度的最小值，然后才呈现出逐年增加的趋势。除郑州、上海两站出现两年一次的振荡外，最近 5 年，武汉的年平均气溶胶光学厚度变化不大，其余各站的年平均气溶胶光学厚度都是逐年增加的。拉萨站除 1993 年年平均气溶胶光学厚度较大以外，其余年份的年平均气溶胶光学厚度变化不大，此外，上述分析中的哈尔滨、兰州、广州、北京等站年平均气溶胶光学厚度明显减弱的趋势在图中表现得很明显，尤其是北京站自 1998 年以来年平均气溶胶光学厚度逐年下降的趋势比较强。最近 4~5 年，成都和昆明两站的年平均气溶胶光学厚度也表现出减弱的趋势。

综上所述，近 10 年气溶胶光学厚度的变化已经不是罗云峰等^[11]描述的总体增加的趋势，而是有些地方有增加的趋势，如沈阳、郑州、乌鲁木齐、喀什、武汉、上海等站；有些地方也有明显减弱的趋势，如哈尔滨、兰州、广州、北京等站；还有些地方变化趋势不明显，只在某些年份有增加或减弱的趋势，如额济纳旗、格尔木、成都、昆明、三亚等站。年平均气溶胶光学厚度减弱的趋势说明，近些年来，我国相当一部分地区能见

度明显好转，近地面气溶胶粒子明显减少。环境污染状况得到较好的改善。

3.2 季平均气溶胶光学厚度的特征分析

图 3 是 16 个辐射站气溶胶光学厚度季节平均。从图中可以看出，大部分站点气溶胶光学厚度的最大值都出现在春季（3~5 月），而哈尔滨、乌鲁木齐、兰州、成都的气溶胶光学厚度最大值出现在冬季。冬春季节是沙尘暴多发时段，所以出现气溶胶光学厚度的最大值是可以理解的。沈阳、北京、郑州气溶胶光学厚度最大值出现在夏季，昆明气溶胶光学厚度最大值出现在秋季，这可能与夏秋两季丰沛的水源有关，水汽对气溶胶光学厚度的影响不能不说是一个重要的量。

3.3 月平均气溶胶光学厚度与能见度的相关分析

气溶胶光学厚度一般与近地面层的气溶胶粒子有很大的关系，而能见度正是反映了这些低层气溶胶粒子的光学特性，所以气溶胶光学厚度与能见度之间有一定的关系，因此，我们对月平均气溶胶光学厚度与能见度做相关分析。考虑到清晨多雾，边界层多逆温以及人类活动相对集中的原因，我们只选择 14 时总云量为零的能见度资料进行月平均能见度统计。

表 3 给出了月平均气溶胶光学厚度和月平均能见度的相关系数。从表中可以看出，哈尔滨、乌鲁木齐、喀什、额济纳旗、格尔木、兰州、北京等站相关系数都很大，相关系数都在 70% 以上，乌鲁木齐和兰州两站的相关系数甚至大于 90%，说明气溶胶光学厚度和能见度之间有很好的负相

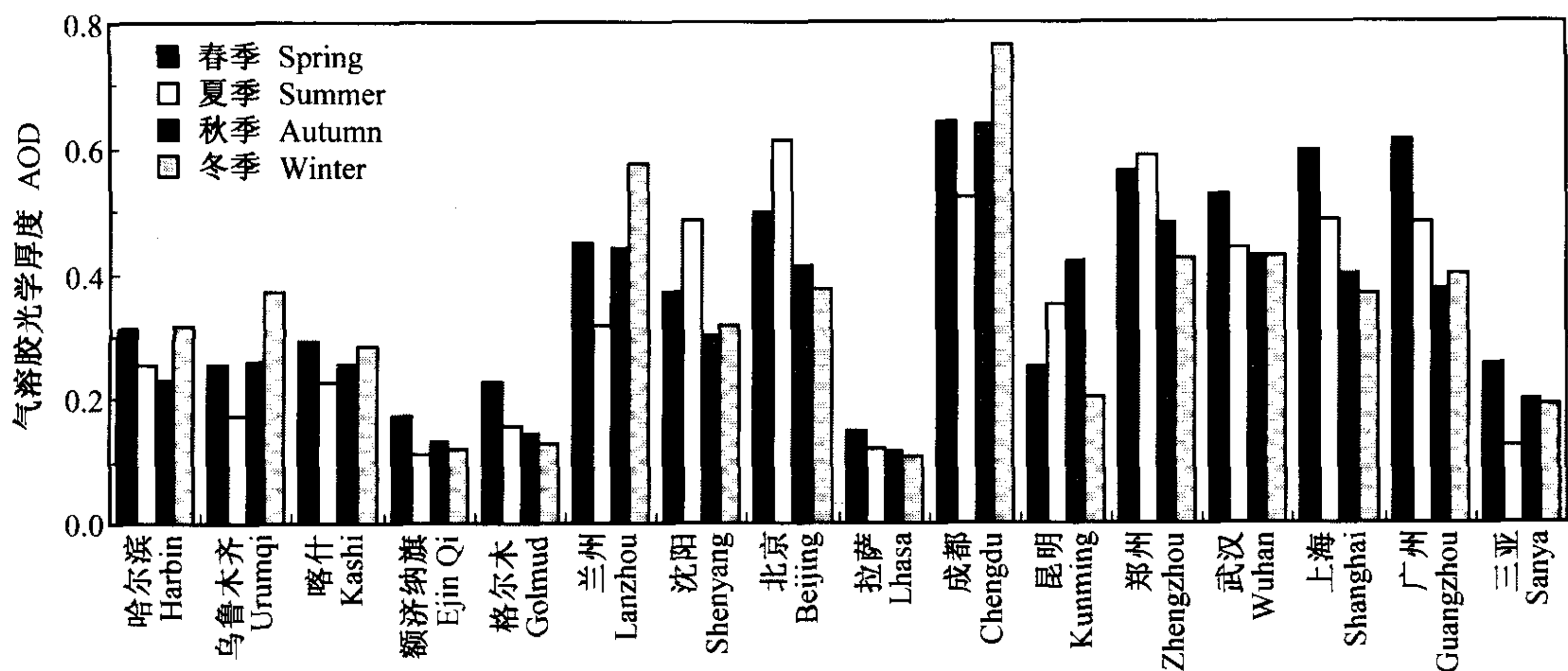


图 3 16 个辐射站季平均气溶胶光学厚度变化
Fig. 3 Variation of seasonal average AOD over sixteen radiance stations

表 3 月平均气溶胶光学厚度和能见度的相关系数
Table 3 The correlative coefficients between monthly average AOD and visibilities

站点 Stations	相关系数 Correlative coefficients	站点 Stations	相关系数 Correlative coefficients	站点 Stations	相关系数 Correlative coefficients	站点 Stations	相关系数 Correlative coefficients
哈尔滨 Harbin	-0.8174	格尔木 Golmud	-0.8514	拉萨 Lhasa	-0.1647	武汉 Wuhan	-0.0034
乌鲁木齐 Urumqi	-0.9782	兰州 Lanzhou	-0.9312	成都 Chengdu	-0.6762	上海 Shanghai	0.2852
喀什 Kashi	-0.7407	沈阳 Shenyang	-0.1284	昆明 Kunming	-0.6593	广州 Guangzhou	-0.2715
额济纳旗 Ejin Qi	-0.8909	北京 Beijing	-0.7316	郑州 Zhengzhou	0.2335	三亚 Sanya	-0.4426

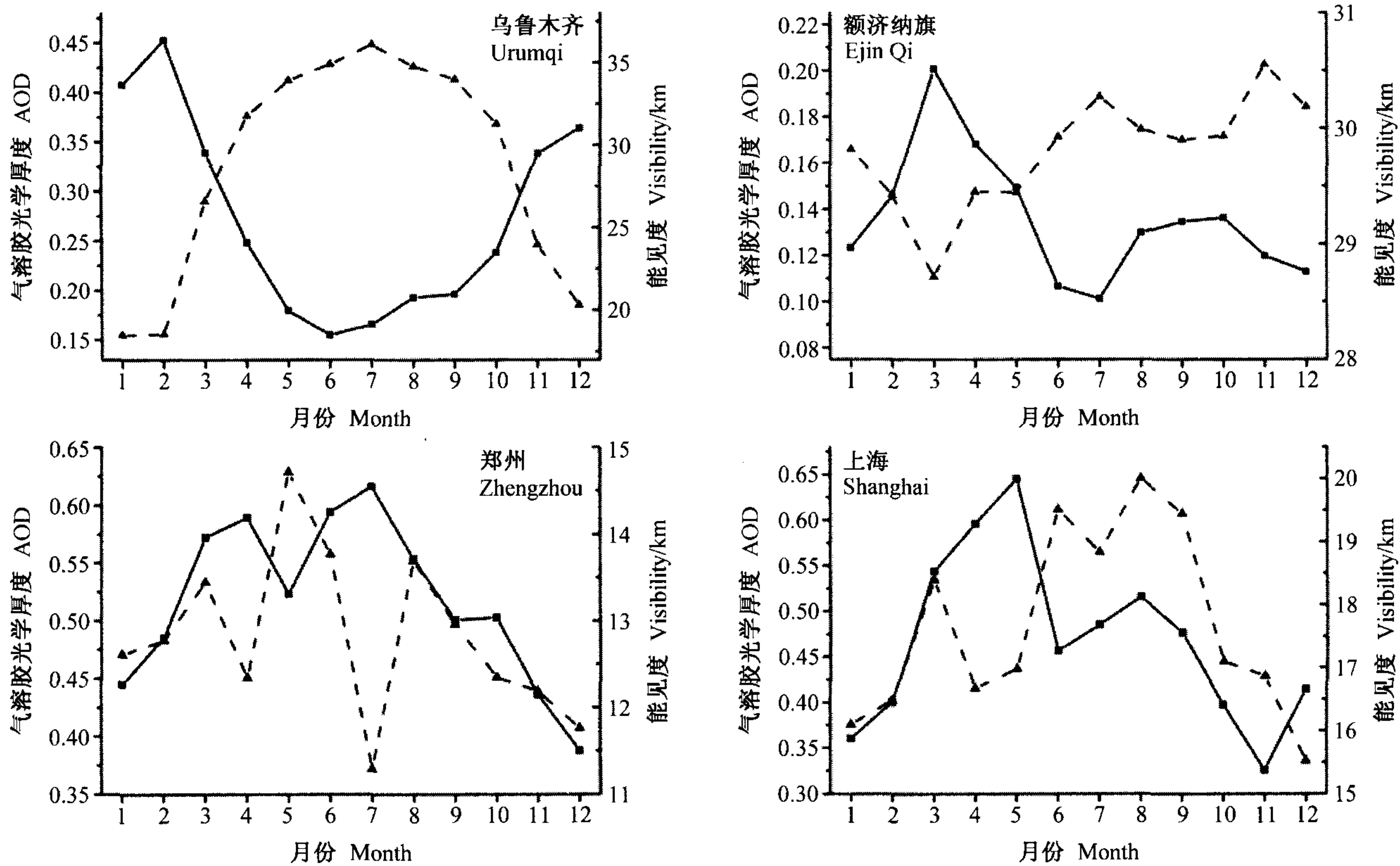


图 4 4 个辐射站月平均气溶胶光学厚度（实线）和能见度（虚线）变化
Fig. 4 Variations of monthly average AOD (solid line) and visibility over four radiance stations (dashed line)

关关系。成都、昆明两站的相关系数也比较大，这两站气溶胶光学厚度和能见度的负相关关系也是比较明显的。其余各站相关系数很小，甚至出现正值，主要是我国中部和南部的站点。

图 4 是乌鲁木齐、额济纳旗、郑州、上海等 4 个辐射站的月变化（其他站点图略）。从图中可以看出，相关系数较大的站点，月平均气溶胶光学厚度与能见度有很好的反相关系。一般来说，气溶胶光学厚度的高值对应于能见度的低值，月平均气溶胶光学厚度的增加或者减小与能见度的减小或者增加的趋势相对应。但有些站的有些月份却没有这种反相关系，如郑州 1~3 月和 8~12

月，上海 1~3 月和 8~11 月等表现出变化一致的关系，产生郑州和上海两站月平均气溶胶光学厚度和能见度相关系数为正的结果。

月平均气溶胶光学厚度与能见度之间的负相关关系表明，气溶胶光学厚度主要受来自低层气溶胶粒子的影响，能见度较小时，低层气溶胶粒子较多，消光系数较大，所以气溶胶光学厚度也较大。反之亦然。因此气溶胶光学厚度与能见度有较好的相关关系，而二者之间较小的负相关系数或者正相关系数产生，可能是由于气溶胶光学厚度的主要影响不是来自低层，而是高层的气溶胶粒子产生较大作用的原因。高空从外地输送或

者本地上升输送的气溶胶粒子如果停留在高层, 不沉降到低层, 对地面水平能见度没有影响, 但却改变了总的气溶胶光学厚度值, 这样气溶胶光学厚度与反映低层粒子状况的能见度的关系就会不明显, 甚至出现正相关。

4 结论

用宽带消光法反演了 16 个辐射站 1993~2002 年的气溶胶光学厚度。主要分析了光学厚度的年、季平均变化特征及其趋势, 得出以下几点结论:

(1) 虽然总体年平均气溶胶光学厚度在 0.32~0.36 之间变化, 但是各个辐射站的年变化趋势却各有不同。沈阳和郑州两站的年平均气溶胶光学厚度有明显增加的趋势, 乌鲁木齐、喀什、武汉、上海等站年平均气溶胶光学厚度也有微弱的增加趋势。哈尔滨、兰州、广州和北京等站年平均气溶胶光学厚度则有明显减弱的趋势。

(2) 就季节变化而言, 一般春季出现气溶胶光学厚度的较大值。

(3) 哈尔滨、乌鲁木齐、喀什、额济纳旗、格尔木、兰州、北京、成都、昆明等站月平均气溶胶光学厚度与能见度的负相关关系十分明显。相关系数高达 0.65 以上。

参考文献

- [1] Stowe L L, Ignatov A M, Singh R R. Development, validation, and potential enhancements to the second-generation operational aerosol product at the National Environmental Satellite, Data, and Information Service of the National Oceanic and Atmospheric Administration. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102** (D14): 16923~16934
- [2] Kmshita K, Iwasaki R, Koyamada M, et al. Observation of Asian dusts during 1997—2000 by NOAA/AVHRR. Proceedings of the CERES International Symposium on Remote Sensing of the Atmosphere and Validation of Satellite Data, 2001: 1~12
- [3] Chu D A, Kaufman Y J, Iibordi G, et al. Global monitoring of air pollution over land from the Earth Observing System-Terra Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS). *J. Geophys. Res.*, 2003, **108** (D 21): 4661~4679
- [4] 毛节泰, 刘莉, 张军华. GMS5 卫星遥感气溶胶光学厚度的试验研究. *气象学报*, 2001, **59** (3): 352~359
- [5] 张军华, 斯召俊, 毛节泰, 等. GMS 卫星遥感中国地区气溶胶光学厚度. *大气科学*, 2003, **27** (1): 23~35
- [6] 李成才, 毛节泰, 刘启汉. 用 MODIS 遥感资料分析四川盆地气溶胶光学厚度时空分布特征. *应用气象学报*, 2003, **14** (1): 1~7
- [7] Gueymard C. Turbidity determination from broadband irradiance measurements: a detailed multi-coefficient approach. *J. Appl. Meteor.*, 1998, **37**: 414~435
- [8] Qiu Jinhuan. Broadband extinction method to determine atmospheric aerosol optical properties. *Tellus*, 2001, **53B**: 72~82
- [9] Qiu Jinhuan. Broadband extinction method to determine aerosol optical depth from accumulated direct solar radiation. *J. Appl. Meteor.*, 2003, **42**: 1611~1625
- [10] 邱金桓, 潘继东, 杨理权, 等. 中国 10 个地方大气气溶胶 1980—1994 年间变化特征研究. *大气科学*, 1997, **21** (6): 725~733
- [11] 罗云峰, 吕达仁, 李维亮, 等. 近 30 年来中国地区大气气溶胶光学厚度的变化特征. *科学通报*, 2000, **5** (5): 549~554
- [12] 罗云峰, 吕达仁, 何晴, 等. 华南沿海地区太阳直接辐射、能见度及大气气溶胶变化特征分析. *气候与环境研究*, 2000, **5** (1): 36~44
- [13] 罗云峰, 吕达仁, 周秀骥, 等. 30 年来我国大气气溶胶光学厚度平均分布特征分析. *大气科学*, 2002, **26** (6): 721~730

- Luo Yunfeng, Lü Daren, Zhou Xiuji, et al. Analyses on the spatial distribution of aerosol optical depth over China in recent 30 years. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2002, **26** (6): 721~730
- [14] 罗云峰, 李维亮, 周秀骥. 20 世纪 80 年代中国地区大气气溶胶光学厚度的平均状况分析. *气象学报*, 2001, **59** (1), 77~87
- Luo Yunfeng, Li Weiliang, Zhou Xiuji. Analysis of the 1980' s atmospheric aerosol optical depth over China. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2001, **59** (1): 77~87
- [15] 宗雪梅、邱金桓、王普才. 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. *大气科学*, 2005, **29** (4): 645~653
- Zong Xuemei, Qiu Jinhuan, Wang Pucui. A Comparison study of aerosol optical depths retrieved from broadband extinction method and aerosol robotic network observation observation. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2005, **29** (4): 645~653