

科学出版社
出版
中国地理学会环境遥感分会
中国科学院遥感与数字地球研究所
主办

JOURNAL OF REMOTE SENSING

遥感学报

2015年

Vol.19

第19卷

No.1

第1期

ISSN 1007-4619 CN11-3841 / TP CODEN YXAUAB



百种中国杰出学术期刊

遥感学报

Yaogan Xuebao

第 19 卷 第 1 期 2015 年 1 月

目 次

大气遥感专栏

- 大气 CO₂ 浓度卫星遥感进展 陈良富, 张莹, 邹铭敏, 徐谦, 李令军, 李小英, 陶金花 (1)
- 北京地区颗粒物质量消光吸湿增长模型研究
..... 陶金花, 王子峰, 徐谦, 李令军, 范萌, 陶明辉, 苏林, 陈良富 (12)
- 动态气溶胶模型的 PARASOL 多角度偏振卫星气溶胶光学厚度反演算法
..... 陈澄, 李正强, 侯伟真, 李东辉, 张玉环 (25)
- 大气 CO₂ 浓度时空变化卫星遥感监测的应用潜力分析 布然, 雷莉萍, 郭丽洁, 刘达, 曾招城 (34)
- 短波红外 CO₂ 反演过程约束研究及初步反演结果
..... 邹铭敏, 陈良富, 陶金花, 张莹, 范萌, 苏林 (46)
- 高空飞行器尾焰亚毫米波临边探测模拟与分析
..... 李小英, 陈良富, 国爱燕, 苏林, 贾松林, 陶金花, 张莹 (54)

综述

- 森林地上生物量遥感反演方法综述 刘茜, 杨乐, 柳钦火, 李静 (62)
- 关键陆表参数遥感产品真实性检验方法研究进展
..... 吴小丹, 闻建光, 肖青, 李新, 刘强, 唐勇, 窦宝成, 彭菁菁, 游冬琴, 李小文 (75)

技术方法

- 临边遥感大气辐射传输的宽光谱快速计算模型 郭晶, 杨春平, 曾丹丹, 叶玉堂, 饶长辉 (100)
- 元胞自动机最短路径算法优化 任志国, 郭健, 李爱光, 王卉, 阚映红 (108)
- 根据分形理论与五指标评价体系构建 NDVI 连续空间尺度转换模型
..... 栾海军, 田庆久, 余涛, 顾行发, 黄彦, 胡新礼, 杨闰君 (116)
- 结合多尺度几何分析和 KICA 的遥感图像变化检测 吴一全, 曹照清, 陶飞翔 (126)
- 尺度效应的叶面积指数产品真实性检验方法
..... 廖嫣然, 盖颖颖, 姚延娟, 范闻捷, 徐希孺, 闫彬彦 (143)

遥感应用

- 利用 AMSR-E 数据反演华北平原冬小麦单散射反照率 柴琳娜, 吴凤敏, 张立新, 施建成 (162)
- 基于亮温和 SVM 模型的干球温度推算方法 林奕桐, 叶骏菲, 汪嘉杨, 王永前 (172)

JOURNAL OF REMOTE SENSING

(Vol. 19 No. 1 January, 2015)

CONTENTS

Atmospheric Remote Sensing

- Overview of atmospheric CO₂ remote sensing from space
..... CHEN Liangfu, ZHANG Ying, ZOU Mingmin, XU Qian, LI Lingjun, LI Xiaoying, TAO Jinhua (11)
- Particulate matter mass extinction hygroscopic growth model in Beijing
TAO Jinhua, WANG Zifeng, XU Qian, LI Lingjun, FAN Meng, TAO Minghui, SU Lin, CHEN Liangfu (24)
- Dynamic model in retrieving aerosol optical depth from polarimetric measurements of PARASOL
..... CHEN Cheng, LI Zhengqiang, HOU Weizhen, LI Donghui, ZHANG Yuhuan (32)
- Temporal and spatial potential applications of satellite remote sensing of atmospheric CO₂ concentration
monitoring BU Ran, LEI Liping, GUO Lijie, LIU Da, ZENG Zhaocheng (45)
- CO₂ retrieval and preliminary retrieval results from space-based observations in shortwave infrared band
..... ZOU Mingmin, CHEN Liangfu, TAO Jinhua, ZHANG Ying, FAN Meng, SU Lin (53)
- Sub-millimeter wave limb sounding simulation of the plume flow of a high-flying vehicle
..... LI Xiaoying, CHEN Liangfu, GUO Aiyun, SU Lin, JIA Songlin, TAO Jinhua, ZHANG Ying (61)

Review

- Review of forest above ground biomass inversion methods based on remote sensing technology
..... LIU Qian, YANG Le, LIU Qinhua, LI Jing (74)
- Advances in validation methods for remote sensing products of land surface parameters
..... WU Xiaodan, WEN Jianguang, XIAO Qing, LI Xin, LIU Qiang,
..... TANG Yong, DOU Baocheng, PENG Jingjing, YOU Dongqin, LI Xiaowen (92)

Technology and Methodology

- Wide spectrum and rapid calculation model for atmospheric radiative transfer in limb remote sensing
..... GUO Jing, YANG Chunping, ZENG Dandan, YE Yutang, RAO Changhui (93)
- Optimal path algorithm enhancement based on cellular automaton
..... REN Zhiguo, GUO Jian, LI Aiguang, WANG Hui, KAN Yinghong (115)
- Establishing continuous spatial scaling model of NDVI on fractal theory and five-index estimation system
..... LUAN Haijun, TIAN Qingjiu, YU Tao, GU Xingfa, HUANG Yan, HU Xinli, YANG Yanjun (125)
- Change detection of remote sensing images by multi-scale geometric analysis and KICA
..... WU Yiquan, CAO Zhaoqing, TAO Feixiang (132)
- Validation methods of LAI products on the basis of scaling effect
..... LIAO Yanran, GAI Yingying, YAO Yanjuan, FAN Wenjie, XU Xiru, YAN Binyan (134)

Remote Sensing Applications

- Estimating single scattering albedo of winter wheat over the North China Plain using AMSR-E data
..... CHAI Linna, WU Fengmin, ZHANG Lixin, SHI Jiancheng (153)
- Calculation method for dry-bulb temperature on the basis of brightness temperature and SVM model
..... LIN Yitong, YE Junfei, WANG Jiayang, WANG Yongqian (177)



封面说明

About the Cover

盐城东台中巴地球资源卫星04星影像

CBERS-04 satellite image of Dongtai, Yancheng

中巴地球资源系列卫星 (CBERS) 由中国航天科技集团公司和巴西空间研究院联合研制, 是中巴两国在航天科技领域合作的重要体现, 被誉为“南南合作的典范”, 主要应用于国土、林业、水利、农情、环境保护等领域的监测、规划和管理。CBERS-04 卫星配备有分辨率为 5 m 的全色、10 m 的多光谱相机 (PAN), 20 m 的多光谱相机 (MUX), 40 m/80 m 的红外相机 (IRS) 以及分辨率为 67 m 的宽视场相机 (WFI), 满足了获取持续稳定的中分辨率普查数据的迫切需求。封面图片由中国资源卫星应用中心提供, 为 2014 年 12 月 8 日获取的盐城东台 5 m 全色与 10 m 多光谱融合影像, 图中可清晰辨识出池塘、河流、道路以及不同作物类型的农田。

The China-Brazil Earth Resources Satellite program (CBERS) is a technological cooperation program between China and Brazil which develops and operates earth observation satellites. CBERS-04 satellite will mainly be used in land use monitoring, forestry resource survey, water conservancy planning, crop yield estimation, environmental protection and many other fields. The CBERS-04 satellite carries four instruments: panchromatic imager (PAN) with 5 m spatial resolution for the panchromatic band and 10 m spatial resolution in the other bands; multispectral camera (MUX) with 20m spatial resolution; the infrared medium resolution scanner (IRS) with 40 m and 80 m spatial resolution, and a wide-field imaging camera (WFI) with 67 m spatial resolution. The cover image is the fusion of panchromatic and multispectral images captured by CBERS-04 satellite, which shows Dongtai, Yancheng on December 8, 2014. In the image, ponds, rivers, roads and fields with different crops can be clearly identified.

遥感学报

JOURNAL OF REMOTE SENSING

YAOGAN XUEBAO (双月刊 1997年创刊)

第19卷 第1期 2015年1月25日

(Bimonthly, Started in 1997)

Vol.19 No.1 January 25, 2015

主 管 中国科学院	Superintended by	Chinese Academy of Sciences
主 办 中国科学院遥感与数字地球研究所 中国地理学会环境遥感分会	Sponsored by	Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS The Associate on Environment Remote Sensing of China
主 编 顾行发	Editor-in-Chief	GU Xing-fa
编 辑 《遥感学报》编委会 北京市朝阳区大屯路中国科学院遥感与数字地球研究所 邮编: 100101 电话: 86-10-64806643 http://www.jors.cn E-mail: jrs@radi.ac.cn	Edited by	Editorial Board of Journal of Remote Sensing Add: P.O.Box 9718, Beijing 100101, China Tel: 86-10-64806643 http://www.jors.cn E-mail: jrs@radi.ac.cn
出 版 科 学 出 版 社	Published by	Science Press
印刷装订 北京科信印刷有限公司	Printed by	Beijing Kexin Printing Co. Ltd.
总 发 行 科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 国内邮发代号: 82-324 邮政编码: 100717 电话: 86-10-64017032 E-mail: sales_journal@mail.sciencep.com	Distributed by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel: 86-10-64017032 E-mail: sales_journal@mail.sciencep.com
国外发行 中国国际图书贸易总公司 北京 399 信箱 邮政编码: 100044 国外发行代号: BM 1002	Overseas distributed by	China International Book Trading Corporation Add: P.O.Box 399, Beijing 100044, China

中国标准连续出版物号: ISSN 1007-4619

CN 11-3841/TP

CODEN YXAUAB

定价: 70.00元



官网



微站

ISSN 1007-4619



9 771007 461156

01>

北京地区颗粒物质量消光吸湿增长模型研究

陶金花¹, 王子峰¹, 徐谦², 李令军², 范萌¹,
陶明辉¹, 苏林¹, 陈良富¹

1. 中国科学院遥感与数字地球研究所 遥感科学国家重点实验室, 北京 100101;

2. 北京市环境保护监测中心, 北京 100048

摘要:颗粒物吸湿增长特性是卫星遥感反演近地面颗粒物需要解决的关键问题。本文基于北京地区 2007-08—2009-08 共两年的地基观测资料, 计算了该地区颗粒物平均质量消光效率, 结果表明该地区颗粒物平均质量消光效率随相对湿度增加而连续平滑增长。相对湿度从 20% 增长到 85% 左右时, 质量消光效率增长较为平缓, 当相对湿度达 85% 后, 质量消光效率急剧增长。在平均质量消光效率基础上, 进一步计算了不同湿度下的气溶胶吸湿增长因子, 该因子在不同湿度下的变化趋势基本一致, 都在 6 月达到最大值, 1 月达到最小值。1 月至 6 月, 呈上升趋势, 7 月至 12 月, 呈波动性缓慢下降趋势, 12 月值略高于 1 月。最后, 基于平均质量消光效率的吸湿增长因子, 针对北京地区常用的 3 种吸湿增长模型进行拟合, 研究表明 3 种模型在北京地区的适用性都比较好, 差别不大, 模型 3 稍优于模型 2, 模型 2 稍优于模型 1。

关键词:气溶胶, 颗粒物, 吸湿增长模型, 平均质量消光效率, 吸湿增长因子

中图分类号: TP701 **文献标志码:** A

引用格式: 陶金花, 王子峰, 徐谦, 李令军, 范萌, 陶明辉, 苏林, 陈良富. 2015. 北京地区颗粒物质量消光吸湿增长模型研究. 遥感学报, 19(1): 12-24

Tao J H, Wang Z F, Xu Q, Li L J, Fan M, Tan M H, Su L and Chen L F. 2015. Particulate matter mass extinction hygroscopic growth model in Beijing. Journal of Remote Sensing, 19(1): 12-24 [DOI: 10.11834/jrs.20153311]

1 引言

大气中颗粒物的消光特性随大气湿度变化的规律, 即颗粒物吸湿增长规律, 是通过卫星遥感手段监测近地面可吸入颗粒物浓度需要解决的关键问题之一(李成才等, 2005; Gupta等, 2006; Wang等, 2010)。要解决这个问题需要掌握颗粒物消光特性随空气相对湿度的变化规律, 建立准确的颗粒物吸湿增长模型。

大气水汽是影响气溶胶颗粒形态及性质变化的重要因素之一。大气颗粒物中的硫酸盐、硝酸盐、铵盐、海盐及部分有机物等水溶性物质具有吸湿性, 粒子吸湿后会发粒径增长, 从而导致粒子数谱分布发生整体移动(刘新罡, 2008), 并使粒子

的复折射指数或折射率不断改变(Malm等, 2000; 张立盛和石广玉, 2002; 潘小乐, 2007)。根据 Mie 散射理论, 气溶胶消光系数主要取决于其谱分布及折射指数, 因此对湿度的变化极其敏感。对于卫星遥感反演近地面颗粒物来说, 湿度对粒子消光特性的影响问题已经成为关键问题之一。由于气溶胶颗粒构成组分的亲水性质不同, 实际大气中的气溶胶粒子往往具有不同的亲水增长能力(Stelson 和 Seinfeld, 1982; Sloane 和 Wolfe, 1985; Tang, 1996, 1997; Tang 和 Munkelwitz, 1994), 吸湿后引起的折射率和消光系数的变化均存在差异。北京地区颗粒物污染状况备受关注, 该地区不同季节颗粒物来源、组分及气象条件不同。由此导致不同季节的颗粒物吸湿增长情况也不同, 所以若要解决该地区颗粒物

收稿日期: 2013-11-28; 修订日期: 2014-05-21; 优先数字出版日期: 2014-05-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(编号: 41101327); 中国科学院战略性科技先导专项(编号: XDB05020100); 广州市科技计划项目(编号: 2013J4100002)

第一作者简介: 陶金花(1978—), 女, 副研究员, 主要从事大气颗粒物遥感反演方法方面的研究。E-mail: taojh@radi.ac.cn

浓度卫星遥感监测问题,必须要解决该地区不同时间范围的颗粒物消光系数随大气湿度的变化问题,建立该地区不同时间范围的颗粒物吸湿增长模型。

已经有一些国内外学者对气溶胶粒子的吸湿特性进行过研究,也取得了一定成果。针对不同的研究目标,其研究内容和方法也不同。综合看来,研究工作主要集中在实验室分析、外场实验和数值模拟等3个方面:(1)实验室分析大多针对单一化学物种,通过实验仪器观测研究气溶胶吸湿增长因子随相对湿度的变化情况;(2)外场实验是通过在真实环境下布设仪器,测量分析真实环境状态下气溶胶粒子的吸湿增长特性(Day 和 Malin, 2001; Im 等, 2001; Ferron 等, 2005; Sheridan 等, 2002; Carrico 等, 2000, 2003; Gassó 等, 2000; Pan 等, 2009; Kotchenruther 等, 1999);(3)数值模拟实验多为假设各化学组分粒径谱分布的数值模拟方法。卫星遥感监测的是卫星过境环境状态下的颗粒物消光特性,因此需要掌握真实环境状态下的颗粒物吸湿增长情况,外场观测是解决此问题的必要手段。尽管国际上对气溶胶亲水特性的外场观测已有较多研究,但有关中国地区气溶胶亲水特性的研究报道还很少。杨军等人(1999)利用 Mie 散射原理和重庆实测气溶胶资料,详细计算了边界层内单个气溶胶粒子的光学特性参数以及气溶胶粒子群的散射、吸收、消光系数、不对称因子、散射比、光学厚度等参数,进而采用二流近似和累加法计算边界层内太阳短波辐射增温率。结果表明,当相对湿度在 65%—95% 时,相对湿度对气溶胶粒子群体光学参数和大气增温率的影响很大,因此对实际大气气溶胶而言,不考虑相对湿度对光学特性的影响将会给计算结果带来较大误差(杨军等, 1999)。Xu 等人(2002)于 1999 年 11 月在长江三角洲地区临安区域大气本底监测站观测获得了吸湿增长因子 $f(U = 80\% \pm 1\%)$ 为 1.7—2.0 的结果;程雅芳(2007)基于外场实验观测值,利用 3 组分光学平衡球形气溶胶模型研究了水汽对广州新垦地区气溶胶光散射、单次散射反照率的影响。结果表明随着相对湿度从 30% 增长到 80%—90%, 散射系数可以增强 1.54—2.31 倍,大气气溶胶的直接辐射强迫增大 2.7 倍。在北京地区仅有很少的研究。颜鹏等人(2008)于 2005 年 12 月 7 日—22 日期间在中国气象局科技大楼测点(CAMS)对北京市区冬季气溶胶散射系数随湿度的变化关系进行了观测试验。观测结果显示北京市区气溶胶散射系数亲水增长因子 $f(U)$ 在观测期间

湿度从低到高的变化过程中,主要表现出“平滑连续”的增长特点。总体上,当相对湿度 U 从小于 40% 增大到 93% 左右时,平均气溶胶散射系数亲水增长因子可达 2.10,而平均散射系数亲水增长因子 $f(U = 80 \pm 1\%)$ 为 1.26 ± 0.15 。潘小乐(2007)于 2006-03-18—2006-04-19 在中国气象科技大楼楼顶对相对湿度对气溶胶的散射特性影响开展了观测研究,结果发现气溶胶亲水增长因子 $f(RH = 80\%)$ 有两个明显的特征值,高值约为 1.4,主要反映了水汽对城市地区污染型气溶胶颗粒散射能力的影响;低值在 1.2 左右,它主要与北京城区清洁天气条件下的气溶胶颗粒物理化特性有关。刘新罡等人(2008)于 2006-08-10—2006-09-10 期间在北京大学综合观测站用“光学综合法”进行了共 30 天的观测,计算的气溶胶散射吸湿增长因子在相对湿度 80% 以下较为平缓,而在相对湿度 80% 以上时,该因子有突破性增长。

气溶胶散射吸湿增长因子随环境湿度、实验区域、气溶胶类型等不同而差别较大,取值可在 1.2 至 4.1 之间变化(刘新罡, 2008; 潘小乐, 2007)。一般来讲,海洋型气溶胶的散射吸湿增长因子要明显偏大,而城市型、陆地型气溶胶的散射吸湿增长因子居于中间;生物质燃烧源所排放的气溶胶其散射吸湿增长因子则是最小的,这与生物质燃烧产物中碳黑质量分数偏大有明显关系(刘新罡, 2008)。大量的观测实验表明,环境大气中气溶胶粒子的散射吸湿增长因子可近似为相对湿度函数(Kotchenruther 等, 1998, 1999; Im 等, 2001; Magi 和 Hobbs, 2003),即吸湿增长模型。由于不同地区的气溶胶成分不同,各吸湿增长模型在不同地区的适应性也不同。针对北京及周边地区,已有部分学者对此做过研究。李成才(2005)和刘新罡(2008)等分别在北京市采用模型 $f(RH) = 1/(1.0 - RH/100)$ 取得了较好效果,可以有效拟合北京地区的颗粒物散射吸湿增长因子。Song 等人(2008)考虑了季节变化对气溶胶吸湿特性的影响,在东亚地区(包含北京),采用模型 $f(RH) = b_0 + b_1 \left(1 - \frac{RH}{100}\right)^{-1} + b_2 \left(1 - \frac{RH}{100}\right)^{-2}$ (b_0 、 b_1 、 b_2 分别为经验系数),针对年际状况和 4 个季节分别给出不同的取值。何秀等人(2010)在北京地区以模型 $f(RH) = \frac{1}{1 - RH} \times a + b$ 为基础(a 、 b 为拟合系数),分别针对 4 个季节,拟合了 4 个经验公式,用于近地面 PM_{10} 反演,并取得了较好

效果。

环境状态下的气溶胶吸湿特性依赖于气溶胶的组分、含量以及各组分的混合状态等因素,而这些因素随时间和空间变化很大,因此气溶胶吸湿增长的研究成果具有很强的地区依赖性,在某一地区的研究成果直接应用于另外区域会给最终结果带来一定的不确定性。目前在北京地区的环境状态下气溶胶的吸湿特性研究还有很大不足。在已有的几个外场实验中,它们的观测时间非常有限,一般在几天至一两个月内,所获得的结果只能代表观测期内的吸湿特性,具有时间局限性。因此,有必要对未开展过研究的时间段进行颗粒物消光系数随水汽等参数变化的规律及模型研究。本文借助于中国科学院遥感与数字地球研究所奥运村园区内的“北京地区空气质量超级监测站”观测平台获取的两年多的地面观测资料,对北京地区气溶胶吸湿增长情况进行了研究。首先,采用颗粒物平均质量消光效率描述环境大气中气溶胶粒子的整体消光特性随湿度的变化规律,并基于平均质量消光效率的吸湿增长因子描述空气相对湿度对粒子整体

消光的特性影响。其次,在地面观测的基于平均质量消光效率的吸湿增长因子数据的基础上,拟合了3种北京地区不同月份的吸湿增长模型,并评价了3种模型在北京地区的适用性。

2 仪器与实验方法介绍

2.1 监测站点及仪器

中国科学院北京地区空气质量超级监测站,是中国科学院北京奥运空气质量保障计划的重要监测站点之一,具有很强的监测能力。该站点位于北京市区内的偏北位置(39.9°N,116.1°E),距马路约100 m,距占地 $68 \times 10^6 \text{ m}^2$ 的大型城市森林公园约1 km,周边无大型排放源,其监测结果基本可以代表北京城市地区。该站自2007年6月建成运行,目前已经连续收集了多年的监测数据。

本文所用到的仪器见表1,包括能见度仪、振荡天平(PM_{10})以及自动气象仪等。为了减少因大气状况变化而引入的不确定性,所有参与比对分析的数据均为同时获取,并采用小时平均值。

表1 实验仪器

Table 1 Experimental equipments

仪器名称	厂家	测量目标	仪器参数
能见度仪	中国科学院 安徽光学精密机械研究所	大气水平能见度	准确度: $\pm 10\%$ ($\leq 2 \text{ km}$); $\pm 15\%$ ($> 2 \text{ km}$) 测量范围: 10—50000 m
TEOM 大气颗粒物分析仪	中国科学院 安徽光学精密机械研究所	PM_{10} 质量浓度	测量精度: $\pm 1.50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。 测量范围: 0—5 mg 测量下限: 1 μg
气象仪	中国科学院 安徽光学精密机械研究所	相对湿度	

值得注意的是震荡天平是持续将周围的空气抽入内部并加热,去除空气中的水分,并将其中直径小于 $10 \mu\text{m}$ 的粒子提取出来称重,由此得到 PM_{10} 的干质量浓度,仪器的采样频率为 15 min。需要注意的是,由于有些挥发性的气溶胶在加热采样过程中可能会挥发,因此颗粒物的干质量浓度测量结果可能小于环境真实水平(Koelemeijer 等,2006)。

2.2 方法与模型介绍

2.2.1 气溶胶消光系数反演模型

采用前向散射能见度仪获取大气水平能见度数据,进而反演近地面气溶胶消光系数。

大气消光系数 $\sigma_a(\lambda)$ 和能见度 r 存在如下关系:

$$\sigma(\lambda) = \frac{3.912}{r} \quad (1)$$

大气消光系数是气溶胶和分子散射消光系数以及的水汽和 O_3 的吸收作用(Tomasi,1982)总和,但后三者 $0.55 \mu\text{m}$ 作用较小,故在此忽略不计,因此气溶胶消光系数和能见度可以表示为式(2)。

$$\sigma_a(0.55) = \frac{3.912}{r} \quad (2)$$

基于超级站前向散射能见度仪的数据,按照式(2)方法计算近地面气溶胶消光系数。由于本文所用能见度仪测量的能见度上限为 50 km,当大气

清洁、能见度接近或超过 50 km 时,该能见度仪的信号比会因大气散射信号的减弱而降低,测量结果可能会有较大误差。因此在实际使用中,将能见度超过 49 km 的数据去掉以减少潜在的不确定性。

2.2.2 吸湿增长因子计算方法

为了从光学特性的角度考察颗粒物的吸湿变化,以往研究中通常使用散射吸湿增长因子 $f(RH)$ 描述粒子的吸湿增长,其定义为湿气溶胶粒子的散射系数 $\sigma_{\text{scat}}(RH)$ 与干气溶胶粒子的散射系数 $\sigma_{\text{scat}}(dry)$ 之比。一般认为当相对湿度小于 40% 时,大气中的气溶胶颗粒均以固态颗粒物状态存在,粒径 D 吸湿增长很小,即 $D(dry) = D(RH < 40\%)$,因而不存在水汽的影响。本文采用自然观测的方式开展吸湿增长模型的研究。采用平均质量消光效率和基于平均质量消光效率的吸湿增长因子来定量描述颗粒物的吸湿增长(Wang 等, 2010),即环境条件下混合气溶胶的平均质量消光效率 E_λ (单位: m^2/mg) 为:

$$E_\lambda = \frac{\sigma_a(\lambda)}{C_{\text{PM}}} \quad (3)$$

式中, λ 为波长,在本文中均取 $0.55 \mu\text{m}$,下文都将其省略; C_{PM} 为颗粒物质量浓度, $\sigma_a(\lambda)$ 为气溶胶消光系数。若假定一段时间内环境中气溶胶粒子的化学组成及谱分布不变,则 E 即表示单位数量粒子的平均消光效率,可近似认为 E 仅随相对湿度发生变化,相当于该粒子群中各纯化学物种消光效率吸

湿增长的平均效应,反映气溶胶粒子群整体吸湿增长状况。此处需要指出的是,能见度仪间接测量的 $\sigma_a(\lambda)$ 是气溶胶粒子整体的消光贡献,而 PM_{10} 只是分别代表了其中空气动力学直径小于 $10 \mu\text{m}$ 部分粒子的质量浓度。直接利用 PM_{10} 质量浓度计算平均质量消光效率一定程度上“高估”了这部分粒子的消光能力,因此引入了一定的不确定性。

在 E 的基础上,基于平均质量消光效率的吸湿增长因子 $f_E(RH)$ 定义如下:

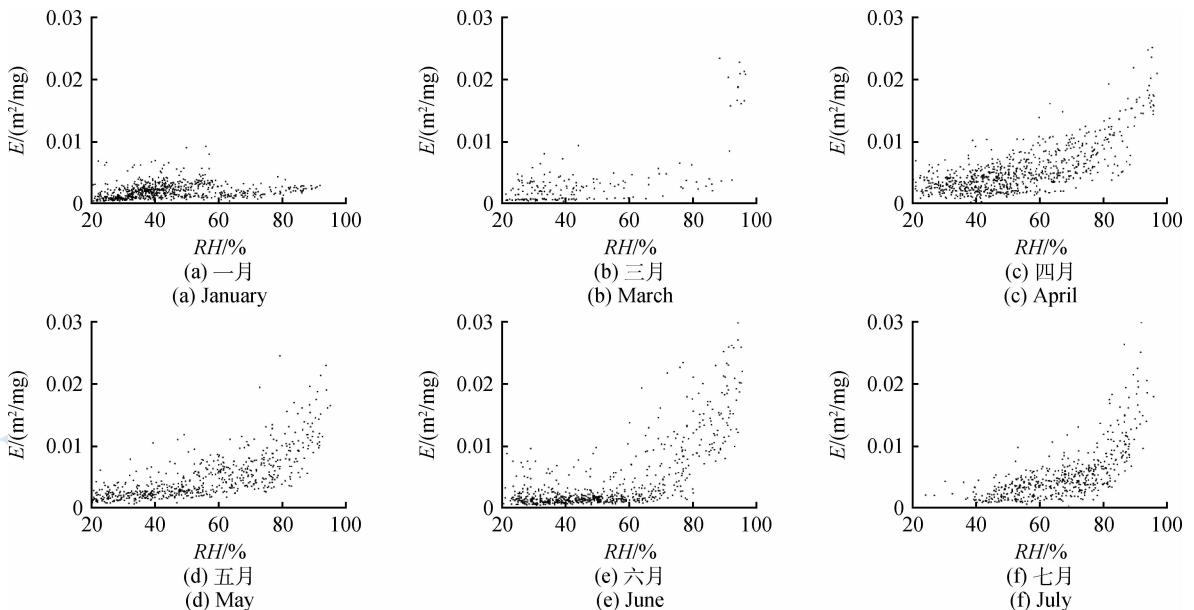
$$f_E(RH) = \frac{E(RH)}{E(dry)} \quad (4)$$

式中, $E(RH)$ 表示相对湿度 RH 时的湿粒子平均质量消光效率, $E(dry)$ 表示干燥条件下 ($RH < 40\%$) 的粒子平均质量消光效率。

3 颗粒物吸湿增长因子计算

3.1 颗粒物平均质量消光效率计算

通过观测获得了 2007-08—2009-08 共 2 年的大气能见度 r 、相对湿度和 RH 和 PM_{10} 质量浓度 $C_{\text{PM}_{10}}$ 数据,数据全部处理为小时均值。依据 2.2.1 节介绍的方法由大气能见度 r 求取近地面气溶胶消光系数 σ_a ;然后在 σ_a 和 $C_{\text{PM}_{10}}$ 基础上,依据 2.2.2 节介绍的方法计算 E ;最后,将同一时刻的 E 与 RH 匹配;为了更清楚地了解颗粒物吸湿增长在一年中的变化情况,对监测结果按月份统计(缺少二月份的数据),各月份的 E 随 RH 的变化如图 1。



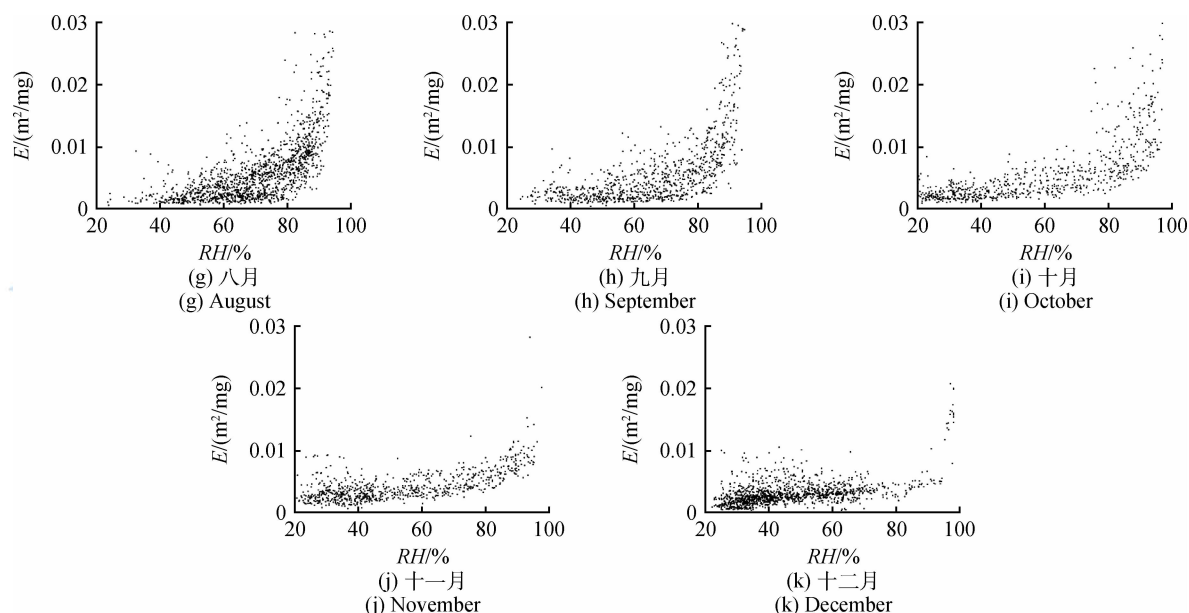


图1 北京地区各月(不含2月) E 随 RH 的变化

Fig. 1 Change of the average mass extinction efficiency with the relative humidity of each month(except February) in Beijing

在数据处理过程中,首先对原始数据进行去噪处理。原始数据中虽然能在较高的相对湿度处(如90%以上)看到 E 随相对湿度快速增大的现象,但由于少量 E 存在异常高值,使得大部分数据点随相对湿度的变化不够明显,影响对 E 随湿度变化的整体趋势的拟合精度。针对这种异常值,首先统计 E 的概率分布,利用其99%分位数和1%分位数分别作为有效 E 的上下限,将不在这一区间的数据去除。另外,在相对湿度接近饱和(如大于98%)时, E 会出现一些较为异常的低值,这可能是由具有高湿度环境的特殊天气引起的(如降雨等)针对这种异常值,采用将相对湿度超过98%的数据去除。处理后的数据 E 变化范围缩小,能更充分地反映粒子吸湿增长的变化幅度。

从图1中可以看出,颗粒物 E 随空气 RH 的增加呈平滑连续增长趋势,没有明显的跳跃点,不同月份的增长情况有一定的差别。总体上看,在 RH 从20%增长到85%左右时, E 增长较为平缓,在从 RH 约85%开始, E 开始急剧增长,在湿度接近饱和时, E 增长可达 $0.03 \text{ m}^2/\text{mg}$ 。

从图1中可以看出,冬季(12月、1月)样本分布比较集中,主要集中在低湿度范围,整体表现出较弱的吸湿性。绝大多数样本本集中在70%以下,只有很少部分样本测量时 RH 超过70%。在 RH 从20%增长到70%过程中,颗粒物 E 增长缓慢,且整体变化不大,当 RH 达到90%时,也呈现出急剧增长

趋势,但这样的样本数量极少。和冬季相比,春季(3月、4月、5月)样本分布较冬季明显发散,吸湿性进一步增强。在较高湿度下获得的样本数量有所提高,虽然最大湿度能接近饱和,但大部分样本在相对湿度低于85%时获得。相对于春季,夏季(6月、7月、8月)整体表现出较强的吸湿性,空气相对湿度进一步提高,很多时候能接近饱和,较大相对湿度下(RH 超过80%)所获得的样本数继续增多,8月份尤其显著。秋季(9月、10月、11月)空气相对湿度较冬季有所提高,图1中表现为较大相对湿度下的样本数比冬季增多,但明显少于夏季,样本分布较冬季发散,但较夏季集中。从图1中还可以看出,8月、9月、10月有明显的潮解点,表现为在湿度约85%左右有一个样本分布的拐点。

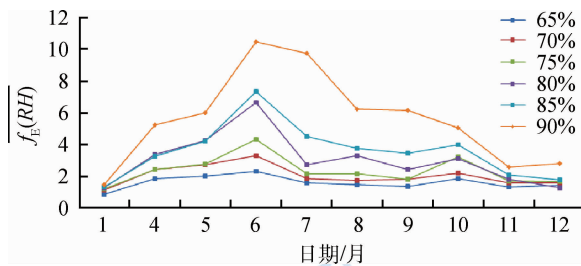
3.2 基于平均质量消光效率的吸湿增长因子计算

在上述观测结果基础上,计算所有相对湿度小于40%的平均质量消光效率的平均值作为干燥条件下($RH < 40\%$)的所有粒子的平均质量消光效率,根据式(4),分别计算各相对湿度为65%、70%、75%、80%、85%和90%时各月份的吸湿增长因子 $f_E(RH)$ (由于3月份样本数过少,数据代表性差,因此去掉)的最大值、最小值、平均值和相对标准偏差,结果见表2。不同湿度条件下各月平均质量消光效率的吸湿增长因子变化曲线见图2。

表 2 各月不同湿度下的吸湿增长因子

Table 2 Hygroscopic growth factor of each month under different humidity

$f(RH)$	1 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
65%	最小值	0.51	0.64	1.07	0.41	0.57	0.31	0.41	0.69	0.15
	最大值	1.49	3.52	3.46	7.59	2.66	5.78	3.69	2.95	4.11
	平均值	0.90	1.87	2.03	2.32	1.62	1.48	1.37	1.85	1.44
	RSD	0.39	0.39	0.37	1.00	0.38	0.68	0.61	0.39	0.47
70%	最小值	0.68	1.28	1.54	0.85	0.78	0.41	0.50	1.14	0.22
	最大值	1.77	3.61	4.68	9.45	3.31	3.68	4.66	4.03	2.79
	平均值	1.14	2.42	2.73	3.31	1.87	1.75	1.84	2.21	1.62
	RSD	0.32	0.33	0.33	0.74	0.39	0.52	0.55	0.37	0.35
75%	最小值	0.88	1.55	1.15	1.52	1.13	0.33	0.56	1.24	1.17
	最大值	1.55	4.07	5.97	13.33	3.94	4.78	4.45	8.76	4.10
	平均值	1.22	2.45	2.76	4.32	2.18	2.16	1.84	3.24	1.73
	RSD	0.39	0.34	0.45	0.69	0.32	0.54	0.56	0.64	0.36
80%	最小值	0.80	2.32	1.73	1.37	1.64	0.57	0.87	1.01	1.03
	最大值	2.25	4.34	11.21	12.39	5.28	10.38	4.42	7.25	2.93
	平均值	1.29	3.4	4.24	6.64	2.73	3.29	2.42	3.12	1.84
	RSD	0.43	0.19	0.68	0.56	0.36	0.56	0.40	0.50	0.29
85%	最小值	1.10	1.45	2.26	5.02	2.36	1.43	0.91	2.03	1.50
	最大值	1.59	4.86	6.95	10.06	7.21	8.21	12.91	17.27	2.97
	平均值	1.34	3.27	4.21	7.34	4.5	3.77	3.45	3.98	2.11
	RSD	0.14	0.39	0.33	0.27	0.29	0.36	0.59	0.81	0.22
90%	最小值	1.36	4.08	4.1	4.68	4.9	1.35	1.25	2.13	1.94
	最大值	1.68	7.13	8.57	18.1	21.81	23.76	13.66	9.93	3.83
	平均值	1.50	5.25	6.00	10.42	9.72	6.22	6.13	5.06	2.60
	RSD	0.09	0.20	0.25	0.33	0.50	0.56	0.47	0.38	0.19

图 2 不同湿度条件下各月吸湿增长因子平均值 $f_E(RH)$ 的变化Fig. 2 Monthly changes of averaged hygroscopic growth factor $f_E(RH)$ in different humidity

结合表 2 和图 2 可以看出,不同湿度条件下的 $f_E(RH)$ 曲线变化趋势基本一致,各种湿度下的基于平均质量消光效率的吸湿增长因子 $f_E(RH)$ 在一年中不同月份变化很大,不同湿度下的 $f_E(RH)$ 都在 6

月达到最大值,最小值位于 1 月;1 月—6 月, $f_E(RH)$ 呈上升趋势,7 月—12 月,呈波动性缓慢下降趋势,12 月的 $f_E(RH)$ 略高于 1 月。从表 2 还可以看出,各种湿度下相对标准偏差变化范围也比较大,从 0.09—1 不等,没有明显的规律性。结合图 1,也可以看出,在低湿度区域,数据分布的比较密集,相同湿度下的分布范围相对较窄,相对标准偏差较小,而在高湿度区域,尤其在春夏季节,相同湿度下的数据分布范围较宽,导致相对标准偏差较大。

从图 2 中看出,在湿度从 65%—95% 的变化过程中,冬春季节在各种湿度条件下的吸湿增长因子普遍较低,造成较低的原因可能有两个:(1)从排放源和气溶胶成分来讲,北京冬季气溶胶的主要来源有煤炭燃烧、汽车排放、扬尘(张仁健等,2002)以及沙尘。土壤扬尘通常具有较低的亲水增长能力(Malm 等,1994),采暖季煤炭燃烧所产生的黑炭

气溶胶也具有极强的憎水性,这些黑炭、沙尘等非水溶性成分含量较高很可能是造成北京冬春季气溶胶具有较低吸湿增长因子的原因之一。(2)北京地区冬季的空气相对湿度本身较低,大多数在 70% 以下,而常见吸湿性粒子的潮解点一般在 80% 以上,因此冬季的空气湿度很少能达到吸湿性粒子的粒径迅速增长条件,这也可能是造成北京冬春季气溶胶具有较低的吸湿增长因子的原因之一。从图 2 中还可以看出,北京夏季的吸湿增长因子普遍较高,造成吸湿增长因子较高的原因可能有两个方面:(1)从排放源和气溶胶成分来讲,北京夏季扬尘以及燃煤排放明显小于冬春季节,也基本没有沙尘。据胡敏等人(2005)研究结果,北京夏季的燃煤排放放在 5%—30%,而冬季为 20%—45%。从而导致气溶胶成分中硫酸盐、硝酸盐等吸湿性成分比例提高,这很可能是造成北京夏季气溶胶具有较高的吸湿增长因子的原因之一。(2)从气象条件来讲,北京夏季空气湿度大,为可溶性颗粒物提供了吸湿增长条件,这也可能是造成北京夏季气溶胶具有较高吸湿增长因子的原因之一。另外,秋季与夏季差别不大,可见北京地区夏秋季节的颗粒物吸湿增长特性整体上比较一致。

3.3 与已有研究成果的比较

关于北京地区气溶胶吸湿增长的研究成果并不多,表 3 列出了已有研究成果与本文结果的对比。

在时间上,由于本文在时间上采取的按月划分方法,为了让二者对比的时间最接近,对于已有研究成果中存在的监测时间跨月份问题,则在本文中选取 2 个相邻月份的平均值进行对比。另外,在相对湿度上,表 3 中用于比较的结果是相对湿度为 80% 条件下的基于平均质量消光效率的吸湿增长因子。从表 2 中可以看出,本文研究结果与已有研究结果在数值上存在较大差异,除冬季二者在数值上近似外,其他月份本文研究结果都高于已有研究结果,引起二者差异的原因可能有以下几点:(1)在已有研究成果中,基本都是短时间的观测结果,很多是选取代表性的天气状况,而本文的观测是长期连续的,是各种天气状况下的综合吸湿增长结果。(2)虽然都是通过外场观测获得颗粒物的吸湿增长因子,但不同研究成果所用的观测方法各不相同,所获取的物理量也不尽相同。本文获得的是基于平均质量消光效率的吸湿增长因子 $f_E(RH)$,其他方法获得的是一般是散射吸湿增长因子 $f(RH)$,二者是描述颗粒物吸湿增长的不同量,但具有相似的物理含义,都可以描述颗粒物的吸湿增长状况。(3)观测地点也不相同,虽然都在北京市范围内,但有的站点部署在相对清洁的郊区,有的部署在市区,污染相对较高,也可能引起结果差异。(4)关于空气的“干燥条件”,不同研究中的定义不同,有些定义为 35%,有些定义为 40%。以上几点都可能是引起本文研究成果与其他已有研究成果的差异。

表 3 北京地区气溶胶吸湿增长模型现有研究成果

Table 3 Previous research results of aerosol hygroscopic growth model in Beijing

文献	监测时间	地点	已有研究成果			波长/nm	本文成果	
			相对湿度% (干燥条件%)	散射吸湿 增长因子	方法		监测时间	基于平均质量消光效率的吸湿增长因子
刘新罡 (2008)	2006-08-19— 2006-09-10	北京市区 (城市型)	80(35)	1.63 ± 0.19	基于并联浊度计的综合法	550	8 月和 9 月 平均值	3.07
刘新罡 (2008)	2007-08-15	北京市区 (城市型)	80(35)	1.54	并联浊度计法	550	8 月	3.72
颜鹏 等 (2008)	2005-12— 2006-01	北京上甸子 (清洁)	80(40)	1.22	并联浊度计法	525	12 月与 1 月 平均值	1.30
颜鹏 等 (2008)	2005-12-07— 2005-12-22	北京城区 (城市型)	93(40)	2.1	并联浊度计法	525	12 月	1.31
颜鹏 等 (2008)	2005-12-07— 2005-12-22	北京城区 (城市型)	80(40)	1.26 ± 0.15	并联浊度计法	525	12 月	1.31
潘小乐 (2008)	2006-03-18— 2006-04-19	北京城区 (城市型)	80(40)	1.0—1.7	并联浊度计法	525	四月平均	3.41
潘小乐 (2008)	2006-04-7— 2006-05-15	宝坻区新安镇 (天津农村)	80(40)	1.2—2.0	并联浊度计法	525	四月与五月 平均值	3.82

4 气溶胶吸湿增长模型建立

在前述得到的吸湿增长因子数据基础上,根据目前国际上已有的4种吸湿增长模型,针对北京市的气溶胶吸湿增长特点,拟合前3种模型(模型1、模型2和模型3),最后根据拟合结果评价这3个模型在北京地区的适用性。

4.1 气溶胶吸湿增长模型介绍

如前所述,目前国际上关于气溶胶吸湿增长模型的研究主要指气溶胶的散射吸湿增长因子 $f(RH)$ 随相对湿度 RH 的变化关系,二者的拟合方案比较多。大量的观测实验表明,环境大气中气溶胶粒子的散射吸湿增长可用以下4个模型进行拟合(Kotchenruther 等,1998,1999; Im 等,2001; Magi 和 Hobbs,2003)。

模型1(式(5))是Kasten(1969)提出的,该模型是基于气溶胶与水汽的平衡增长理论推导而得到,是一个半经验模型, g 是经验参数。该模型对描述海洋型气溶胶随湿度的增长表现很好,但对生物质燃烧等有机成分为主的气溶胶增长表现不好(Kotchenruther 和 Hobbs,1998),不适宜气溶胶的溶解性增长(Kotchenruther 等,1999)。美国IMPROVE监测网采用此公式,取 $g=1$,即 $f(RH)=1/(1-RH/100)$ 对两者关系进行拟合。李成才(2005)也采用式(5)(取 $g=1$)拟合了北京市的吸湿增长情况。

$$f(RH) = \left(1 - \frac{RH}{100}\right)^{-g} \quad (5)$$

模型2(式(6)),对于拟合含碳气溶胶粒子群的散射吸湿增长因子效果较好,且经过巴西气溶胶实验(Kotchenruther 和 Hobbs,1998)、南非气溶胶实验(Magi 和 Hobbs,2003),表明有效,其中, a, b 为拟合因子。

$$f(RH) = 1 + a\left(\frac{RH}{100}\right)^b \quad (6)$$

模型3(式(7))是Song等人(2008)在考虑气溶胶消光特性的吸湿增长时,在模型1的基础上进行了一定的改进,考虑季节变化对气溶胶吸湿特性的影响,其中, b_0, b_1, b_2 分别为经验系数,针对年际状况和4个季节分别给出不同的取值。

$$f(RH) = b_0 + b_1\left(1 - \frac{RH}{100}\right)^{-1} + b_2\left(1 - \frac{RH}{100}\right)^{-2} \quad (7)$$

模型4(式(8))实际上是由模型1、模型2加之“切换函数”而来,能够更好的模拟颗粒物潮解点以上的散射吸湿增长因子(刘新罡,2008),其中, a, b, c, d 和 g 均为拟合系数。

$$f(RH) = \left[1 + a\left(\frac{RH}{100}\right)^b\right] \left\{1 - \frac{1}{\pi} \left\{\frac{\pi}{2} + \arctan\left[10^{24}\left(\frac{RH}{100} - \frac{d}{100}\right)\right]\right\}\right\} + c\left(1 - \frac{RH}{100}\right)^{-g} \left\{\frac{1}{\pi} \left\{\frac{\pi}{2} + \arctan\left[10^{24}\left(\frac{RH}{100} - \frac{d}{100}\right)\right]\right\}\right\} \quad (8)$$

上述4种气溶胶散射吸湿增长因子 $f(RH)$ 的经验模型可分为两类,一种是气溶胶散射吸湿增长因子 $f(RH)$ 随着相对湿度的增长而平滑增长,如模型1、模型2和模型3;另外一种就是气溶胶散射吸湿增长因子 $f(RH)$ 随着相对湿度跳跃式溶解性增长,即颗粒物化学组分潮解点以上的散射吸湿增长因子,如模型4。已有研究证实,北京地区气溶胶吸湿增长因子属于平滑增长,无跳跃式溶解性增长(刘新罡,2008)。鉴于 $f(RH)$ 和 $f_e(RH)$ 的相似含义,本文将采用上述方法获得的 $f_e(RH)$,在模型1、模型2和模型3的基础上,拟合 $f_e(RH)$ 随相对湿度 RH 的变化关系,并对3个模型在北京地区的适用性进行评价。

4.2 基于平均质量消光效率的北京地区吸湿增长模型建立

由于 $f(RH)$ 与 $f_e(RH)$ 的意义相似,本文在平均质量消光效率的基础上拟合模型1、模型2和模型3,根据拟合结果评价3个模型在北京地区的适应情况,确定适合于北京地区的基于平均质量消光效率的吸湿增长模型。为了对拟合的结果模型进行验证,随机抽取了样本中的部分数据(约10%—20%)留作验证数据,用剩余数据进行模型拟合。

根据2.2节的分析,首先计算 $RH < 40\%$ 时的平均质量消光效率的所有样本点的平均值作为“干燥”条件下的平均质量消光效率 $E(dry)$;采用式(4),逐一计算各样本点的吸湿增长因子 $f_e(RH)$;在获得的各样本点的 $f_e(RH)$ 基础上,分别针对模型1、模型2和模型3进行拟合,获得 $f_e(RH)$ 随相对湿度 RH 的变化关系,3个模型的拟合结果见图3。从图3可以看出,3个模型的拟合曲线走势基本一致,差别不大。3个模型在各月份的拟合结果与实际气溶胶吸湿增长因子的变化趋势均比较吻合,拟合模型在整体上都能够较好的反映吸湿增长因子随湿度

的变化情况,特别是在春、夏、秋3季,3个模型都能准确的反映吸湿增长因子在中低湿度时的平缓增

长和在高湿度时的快速增长,体现了对不同湿度条件的良好适用性。

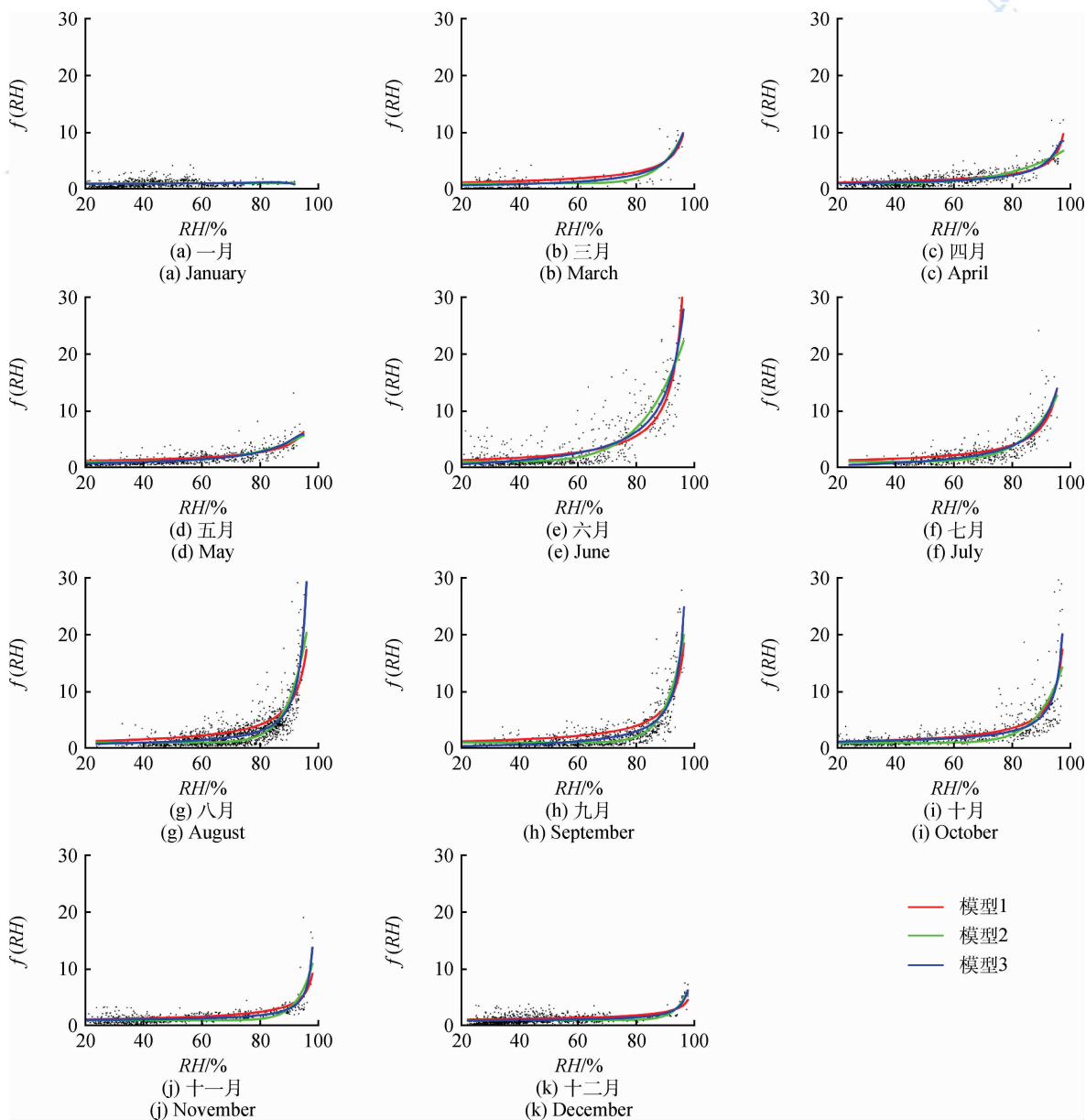


图3 3个模型的拟合结果

Fig.3 Fitting results of the three models

尽管各条拟合曲线都较好地反映了吸湿增长因子随相对湿度变化的整体趋势,但在6、7、8、9等月份,曲线两侧数据点的散布范围较宽,说明数据中包含了较多的不确定性,这可能是由于将不同环境条件下气溶胶作为性质相同的粒子来考虑,引入了较多的不确定因素。不同月份拟合结果的对比可以看出,冬季的拟合相关水平显著低于其他3个季节,说明粒子中可能存在较多的非水溶性组分,这些非水溶性成分对湿度变化不敏感,导致总体消

光能力对湿度的依赖性较差,这可能是导致冬季拟合水平较低的原因之一。

从图3上无法准确判别各模型的优劣,对其进行具体定量分析,结果见表4和图4。1月份的修正确定系数 R^2 过低,明显不合理,因此从分析中剔除,剩余4月—12月;在数值上,3个模型在一年中的变化趋势基本一致,在各月份的拟合 R^2 都位于0.4—0.8;4、5、6月,3个模型在数值上基本一致,差别不大。7月、8月、9月,模型1明显低于模型2和

表 4 模型 1、模型 2 和模型 3 的拟合结果与验证结果表
Table 4 Fitting result of the model 1, model 2 and model 3 and the validation results

月份 /月	拟合 样本数	验证 样本数	模型 1						模型 2						模型 3						验证 结果	
			拟合结果			验证 结果	拟合结果			验证 结果	拟合结果			验证 结果	拟合结果			验证 结果				
			a				a				a				a				a			
			值	标准差	R^2		值	标准差	R^2		值	标准差	R^2		值	标准差	R^2		值	标准差		R^2
4	681	116	0.63	0.007	0.661	0.598	7.06	0.257	5.15	0.204	0.647	0.659	0.54	0.058	0.43	0.021	-0.01	0.001	0.654	0.565		
5	568	101	0.79	0.010	0.596	0.724	7.63	0.388	4.06	0.221	0.589	0.724	-0.06	0.118	0.88	0.054	-0.02	0.004	0.604	0.731		
6	623	110	0.98	0.008	0.732	0.607	23.15	0.930	7.59	0.343	0.740	0.669	-1.09	0.169	1.27	0.066	-0.01	0.003	0.752	0.630		
7	460	75	0.81	0.012	0.560	0.558	16.72	1.057	8.83	0.435	0.636	0.561	-0.90	0.200	0.96	0.071	-0.02	0.005	0.628	0.561		
8	1203	216	0.86	0.007	0.554	0.648	34.75	1.587	15.24	0.468	0.644	0.647	0.11	0.165	0.42	0.052	0.03	0.003	0.669	0.701		
9	774	138	0.85	0.007	0.666	0.738	30.17	1.266	15.14	0.506	0.754	0.753	-0.54	0.149	0.68	0.044	0.00	0.002	0.745	0.775		
10	609	100	0.77	0.009	0.577	0.686	18.06	1.140	12.02	0.822	0.533	0.664	0.57	0.168	0.45	0.046	0.00	0.002	0.589	0.679		
11	651	119	0.54	0.008	0.546	0.515	14.32	0.772	19.85	0.982	0.586	0.454	0.76	0.051	0.20	0.015	0.00	0	0.672	0.511		
12	1084	161	0.46	0.007	0.435	0.455	8.60	0.508	18.27	1.492	0.411	0.436	0.85	0.036	0.18	0.014	-0.00	0	0.479	0.476		

模型3,模型2和模型3在数值上基本一致。10月、11月和12月,模型3明显高于模型1和模型2。3个模型在6月和9月有较好的拟合效果,6月份的拟合 R^2 位于0.732—0.752,九月份模型2和模型3的拟合 R^2 位于0.745—0.754,模型1偏低,为0.67。3个模型都在12月份的拟合结果较差, R^2 位于0.411—0.479。总体上看,模型3(平均 $R^2 = 0.644$)的拟合结果稍优于模型2(平均 $R^2 = 0.616$),模型2的拟合结果稍优于模型1(平均 $R^2 = 0.592$)。

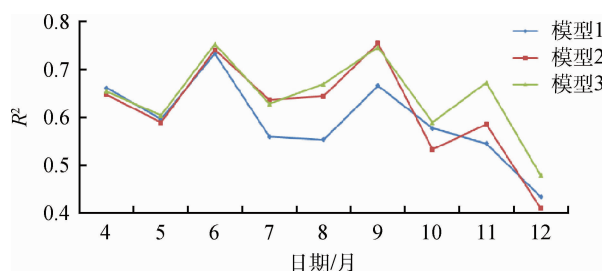


图4 模型1、模型2和模型3拟合结果

Fig. 4 Fitting results of model 1, model 2 and model 3

为了检验各模型的模拟能力,利用留用的样本数据对3个拟合模型逐月进行验证,结果见表4和图5。3个模型的模拟值与观测值的相关系数 R^2 在一年中的变化趋势基本一致,模型之间差别不大,分别求 R^2 的年平均,模型1为0.614,模型2为0.619,模型3为0.625。从验证结果可见,模型3稍优于模型2,模型2稍优于模型1。

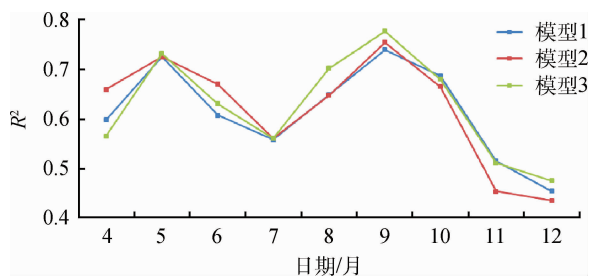


图5 模型1、模型2和模型3验证结果

Fig. 5 Verification results of model 1, model 2 and model 3

5 结论

本文基于北京地区两年的地基观测资料,研究了该地区的气溶胶吸湿增长特性,结果如下:(1)北京地区颗粒物平均质量消光效率随相对湿度 RH 增加呈连续平滑增长趋势。 RH 从20%增长到85%左右时,质量消光效率增长较为平缓,当 RH 达85%

后,质量消光效率急剧增长。(2)不同湿度下的气溶胶吸湿增长因子在一年中的变化趋势基本一致,都在6月达到最大值,在1月达到最小值。1月至6月,该因子呈上升趋势,7月至12月,呈波动性缓慢下降趋势,12月值略高于1月。(3)3种吸湿增长模型在北京地区的适用性都比较好,差别不大,无论从模型拟合结果来看,还是从模型验证结果来看,都是模型3稍优于模型2,模型2稍优于模型1。

本文在计算平均质量消光效率的时候采用的是 PM_{10} 质量浓度,该量是动力学直径小于 $10\mu m$ 的气溶胶颗粒质量浓度的总和,直接用其计算所有气溶胶的平均质量消光效率,忽略了 $10\mu m$ 以上的气溶胶颗粒影响,这在一定程度上“高估”了气溶胶粒子的平均消光能力,会引入一定的不确定性。

本文所建的基于平均质量消光效率的气溶胶吸湿增长模型是用于描述气溶胶在一年中各月份的平均吸湿增长情况,是各种天气条件下的综合吸湿增长结果,可用于卫星遥感反演近地面颗粒物浓度等应用。

参考文献 (References)

- Carrico C M, Rood M J, Ogren J A, Neususs C, Wiedensohler A and Heintzenberg J. 2000. Aerosol optical properties at Sagres, Portugal during ACE-2. *Tellus B*, 52 (2): 694 – 715 [DOI: 10. 1034/j. 1600 – 0889. 2000. 00049. x]
- Carrico C M, Kus P, Rood M J, Quinn P K and Bates T S. 2003. Mixtures of pollution, dust, sea salt, and volcanic aerosol during ACE-Asia; radiative properties as a function of relative humidity. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108 (D23): 8650 [DOI: 10. 1029/2003JD003405]
- Cheng Y F. 2007. The aerosol radiative properties at Xinken in Pearl River Delta—An observation based model study. Beijing: peking University (程雅芳. 2007. 珠江三角洲新垦地区气溶胶的辐射特性-基于观测的模型研究. 北京: 北京大学)
- Day D E and Malm W C. 2001. Aerosol light scattering measurements as a function of relative humidity: a comparison between measurements made at three different sites. *Atmospheric Environment*, 35 (30): 5169 – 5176 [DOI: 10. 1016/S1352 – 2310(01)00320 – X]
- Ferron G A, Karg E, Busch B and Heyder J. 2005. Ambient particles at an urban, semi-urban and rural site in Central Europe: hygroscopic properties. *Atmospheric Environment*, 39 (2): 343 – 352 [DOI: 10. 1016/j. atmosenv. 2004. 09. 015]
- Gassó S, Hegg D A, Covert D S, Collins D, Noone K J, Ostrom E, Schmid B, Russell P B, Livingston J M, Durkee P A and Jonsson H. 2000. Influence of humidity on the aerosol scattering coefficient and its effect on the upwelling radiance during ACE-2. *Tellus B*, 52 (2): 546 – 567 [DOI: 10. 1034/j. 1600 – 0889. 2000. 00055. x]
- Gupta P, Christopher S A, Wang J, Gehrig R, Lee Y and Kumar N.

2006. Satellite remote sensing of particulate matter and air quality assessment over global cities. *Atmospheric Environment*, 40 (30): 5880 – 5892 [DOI: 10.1016/j.atmosenv.2006.03.016]
- He X, Deng Z Z, Li C C, Liu Q H, Wang M H, Liu X Y and Mao J T. 2010. Application of MODIS AOD in surface PM₁₀ evaluation. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 46(2): 178 – 184 (何秀, 邓兆泽, 李成才, 刘启汉, 王美华, 刘晓阳, 毛节泰. 2010. MODIS 气溶胶光学厚度产品在地面 PM10 监测方面的应用研究. 北京大学学报(自然科学版), 46(2): 178 – 184)
- Hu M, Zhao Y L, He L Y, Huang X F, Tang X Y, Yao X H and Chen Z Q. 2005. Mass size distribution of Beijing particulate matters and its inorganic water-soluble ions in winter and summer. *Environmental Science*, 26(4): 1 – 6 (胡敏, 赵云良, 何凌燕, 黄晓锋, 唐孝炎, 姚小红, 陈泽强. 2005. 北京冬、夏季颗粒物及其离子成分质量浓度谱分布. 环境科学, 26(4): 1 – 6)
- Im J S, Saxena V K and Wenny B N. 2001. An assessment of hygroscopic growth factors for aerosols in the surface boundary layer for computing direct radiative forcing. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D17): 20213 – 20224 [DOI: 10.1029/2000JD000152]
- Kasten F. 1969. Visibility forecast in the phase of pre-condensation. *Tellus*, 21(5): 631 – 635 [DOI: 10.1111/j.2153 – 3490.1969.tb00469.x]
- Koelemeijer R B A, Homan C D and Matthijsen J. 2006. Comparison of spatial and temporal variations of aerosol optical thickness and particulate matter over Europe. *Atmospheric Environment*, 40 (27): 5304 – 5315 [DOI: 10.1016/j.atmosenv.2006.04.044]
- Kotchenruther R A and Hobbs P V. 1998. Humidification factors of aerosols from biomass burning in Brazil. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 103 (D24): 32081 – 32089 [DOI: 10.1029/98JD00340]
- Kotchenruther R A, Hobbs P V and Hegg D A. 1999. Humidification factors for atmospheric aerosols off the mid-Atlantic coast of the United States. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 104 (D2): 2239 – 2251 [DOI: 10.1029/98JD01751]
- Li C C, Mao J T, Liu Q H, Yuan Z B, Wang M H and Liu X Y. 2005. Application of MODIS satellite products to the air pollution research in Beijing. *SCIENCE CHINA Earth Sciences*, 48 (s2): 209 – 219 (李成才, 毛节泰, 刘启汉, 袁自冰, 王美华, 刘晓阳. 2005. MODIS 卫星遥感气溶胶产品在北京市大气污染研究中的应用. 中国科学 D 辑: 地球科学, 35 (增刊): 177 – 186)
- Liu X G. 2008. Research on Aerosol Hygroscopic Properties by Measurement and Model-Taking Beijing and PRD for example. Beijing: Peking University (刘新罡. 2008. 大气气溶胶吸湿性质观测、模型研究——以北京、珠江三角洲地区为例. 北京: 北京大学)
- Magi B I and Hobbs P V. 2003. Effects of humidity on aerosols in southern Africa during the biomass burning season. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108 (D13): 8495 [DOI: 10.1029/2002JD002144]
- Malm W C, Sisler J F, Huffman D, Eldred R A and Cahill T A. 1994. Spatial and seasonal trends in particle concentration and optical extinction in the United States. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 99(D1): 1347 – 1370 [DOI: 10.1029/93JD02916]
- Malm W C, Day D E and Kreidenweis S M. 2000. Light scattering characteristics of aerosols as a function of relative humidity: Part I—a comparison of measured scattering and aerosol concentrations using the theoretical models. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 50(5): 686–700 [DOI: 10.1080/10473289.2000.10464117]
- Pan X L. 2007. Observation Study of Atmospheric Aerosol Scattering Characteristics as a Function of Relative Humidity. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences (潘小乐. 2007. 相对湿度对气溶胶散射特性影响的观测研究. 北京: 中国气象科学研究院)
- Pan X L, Yan P, Tang J, Ma J Z, Wang Z F, Gbaguidi A and Sun Y L. 2009. Observational study of influence of aerosol hygroscopic growth on scattering coefficient over rural area near Beijing mega-city. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(19): 7519 – 7530 [DOI: 10.5194/acp – 9 – 7519 – 2009]
- Sheridan P J, Jefferson A and Ogren J A. 2002. Spatial variability of submicrometer aerosol radiative properties over the Indian Ocean during INDOEX. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 107 (D19): 1029 – 1017 [DOI: 10.1029/2000JD000166]
- Sloane C S and Wolff G T. 1985. Prediction of ambient light scattering using a physical model responsive to relative humidity: Validation with measurements from detroit. *Atmospheric Environment* (1967), 19(4): 669 – 680 [DOI: 10.1016/0004 – 6981(85)90046 – 0]
- Song C H, Park M E, Lee K H, Ahn H J, Lee Y, Kim J Y, Han K M, Kim J, Ghim Y S and Kim Y J. 2008. An investigation into seasonal and regional aerosol characteristics in East Asia using model-predicted and remotely-sensed aerosol properties. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8(22): 6627 – 6654 [DOI: 10.5194/acp – 8 – 6627 – 2008]
- Stelson A W and Seinfeld J H. 1982. Relative humidity and temperature dependence of the ammonium nitrate dissociation constant. *Atmospheric Environment* (1967), 16(5): 983 – 992 [DOI: 10.1016/0004 – 6981(82)90184 – 6]
- Tang I N and Munkelwitz H R. 1994. Water activities, densities, and refractive indices of aqueous sulfates and sodium nitrate droplets of atmospheric importance. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 99(D9): 18801 – 18808 [DOI: 10.1029/94JD01345]
- Tang I N. 1996. Chemical and size effects of hygroscopic aerosols on light scattering coefficients. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 101 (D14): 19245 – 19250 [DOI: 10.1029/96JD03003]
- Tang I N. 1997. Thermodynamic and optical properties of mixed-salt aerosols of atmospheric importance. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 102 (D2): 1883 – 1893 [DOI: 10.1029/96JD03085]
- Tomasi C. 1982. Features of the scale height for particulate extinction in hazy atmosphere. *Journal of Applied Meteorology*, 21(7): 931 – 944 [DOI: 10.1175/1520 – 0450(1982)021 <0931:FOTSHF> 2.0.CO;2]
- Wang Z F, Chen L F, Tao J H, Zhang Y and Su L. 2010. Satellite-based estimation of regional particulate matter (PM) in Beijing using vertical-and-RH correcting method. *Remote Sensing of Envi-*

- ronment, 114(1): 50–63 [DOI: 10.1016/j.rse.2009.08.009]
- Xu J, Bergin M H, Yu X, Liu G, Zhao J, Carrico C M and Baumann K. 2002. Measurement of aerosol chemical, physical and radiative properties in the Yangtze delta region of China. *Atmospheric Environment*, 36(2): 161–173 [DOI: 10.1016/S1352-2310(01)00455-1]
- Yan P, Pan X L, Tang J, Zhou X J and Zeng L M. 2008. An experimental study on the influence of relative humidity on the atmospheric aerosol scattering coefficient at an urban site in Beijing. *Acta Meteorologica Sinica*, 66(1): 111–119 (颜鹏, 潘小乐, 汤洁, 周秀骥, 曾立民. 2008. 北京市区大气气溶胶散射系数亲水增长的观测研究. *气象学报*, 66(1): 111–119)
- Yang J, Li Z H and Huang S H. 1999. Influence of Relative Humidity on Shortwave Radiative Properties of Atmospheric Aerosol Particles. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 23(2): 239–247 (杨军, 李子华, 黄世鸿. 1999. 相对湿度对大气气溶胶粒子短波辐射特性的影响. *大气科学*, 23(2): 239–247)
- Zhang L S and Shi G Y. 2002. The Impact of Relative Humidity on the Radiative Property and Radiative Forcing of Sulfate Aerosol. *ACTA METEOROLOGICA SINICA*, 60(2): 230–237 (张立盛, 石广玉. 2002. 相对湿度对气溶胶辐射特性和辐射强迫的影响. *气象学报*, 60(2): 230–237)
- Zhang R J, Wang M X, Hu F and Xu Y F. 2002. Elemental Concentrations and Distributions of Atmospheric Particles before and in Heating Period in Beijing. *Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences*, 19(1): 75–81 (张仁健, 王明星, 胡非, 徐永福. 2002. 采暖期前和采暖期北京大气颗粒物的化学成分研究. *中国科学院研究生院学报*, 19(1): 75–81)

Particulate matter mass extinction hygroscopic growth model in Beijing

TAO Jinhua¹, WANG Zifeng¹, XU Qian², LI Lingjun², FAN Meng¹,
TAO Minghui¹, SU Lin¹, CHEN Liangfu¹

1. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Institute of Remote Sensing and Digital Earth,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2. Beijing Municipal Environmental Monitoring Center, Beijing 100048, China

Abstract: Hygroscopic growth characteristics of particulate matter are one of the key issues that need to be addressed in satellite remote sensing of ground-level particulate matter. To solve this problem, the characteristics of the extinction properties of particulate matter as they change with air relative humidity need to be understood, and an accurate hygroscopic growth model of particulate matter should be established. A hygroscopic growth model suitable for Beijing is constructed by using the measurements from instruments deployed on the ground.

First, the average particulate matter mass extinction efficiency is calculated based on continuous measurements from the ground sites in Beijing over a period of two years. Result shows that average mass extinction efficiency of particulate matter increases with relative humidity continuously. The increase in the average particulate matter mass extinction efficiency is moderate when relative humidity increased from 20% to 85%, whereas it increased rapidly when relative humidity increased to 85%. Second, the hygroscopic growth factors of particulate matter in different levels are calculated based on the average particulate matter mass extinction efficiency; the change trend with time of the hygroscopic growth factors are consistent, with the maximum value observed in June and the minimum value in January. From January to June, the hygroscopic growth factors increased before gradually decreasing from July to December. Their values in December were slightly higher than those in January. Third, three hygroscopic growth models commonly used in Beijing are fitted based on these hygroscopic growth factors. The three models showed good applicability in Beijing.

The third model is slightly better than the second model, and the second model is slightly better than the first. These models can be used in satellite remote sensing of ground-level particulate matter.

Key words: aerosol, particulate matter, hygroscopic growth model, average mass extinction efficiency, hygroscopic growth factor