中国科学: 地球科学 2010 年 第 40 卷 第 10 期: 1446 ~ 1458
www.scichina.com earth.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

论 文

东亚地区气溶胶光学厚度时空分布模拟与分析

韩霄[①④], 张美根[①*], 韩志伟[②], 辛金元[①], 王莉莉[①], 邱金桓[③], 刘艳菊[⑤]

① 中国科学院大气物理研究所, 大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029;
② 中国科学院大气物理研究所, 中国科学院东亚区域气候环境重点实验室, 北京 100029;
③ 中国科学院大气物理研究所, 中层大气与全球环境探测实验室, 北京 100029;
④ 中国科学院研究生院, 北京 100049;
⑤ 北京市理化分析测试中心环境污染分析与控制研究室, 北京 100089
* 联系人, E-mail: mgzhang@mail.iap.ac.cn

收稿日期: 2009-09-02; 接受日期: 2010-02-05
国家重点基础研究发展计划(编号: 2006CB403702, 2007CB407303)和中国科学院北京分院/北京市科学技术研究院创新团队计划项目资助

摘要 基于多尺度空气质量模式系统(RAMS-CMAQ)模拟的 2005 年东亚地区主要气溶胶(如硫酸盐、硝酸盐、铵盐、有机碳、黑碳、土壤尘和海盐)质量浓度, 并利用质量-消光重建法(reconstruction mass-extinction)计算了气溶胶光学厚度(AOD), 以分析该地区 AOD 的空间分布与季节变化特征. 为了检验模拟结果的合理性, 将 AOD 的模拟值与相应的 AERONET 和 CSHNET 观测值进行了比较. 比较结果显示, 总体上(尤其在自然生态环境下)AOD 的模拟值与观测值相符, 模式能够较为合理地反映观测 AOD 的时空变化特性, 而在人为活动较多的城市或城乡地区, 模拟结果存在一定程度上的低估. 模拟结果分析表明, AOD 分布具有较强的时空变化: 总体上 AOD 值夏季小, 冬季大; 如果不考虑沙尘气溶胶的影响, 其最大值区(超过 0.8)出现在中国四川盆地、华南和华中的部分地区, 并可维持数月; 而在东亚北部地区、西部区域及南部海域, AOD 值则相对较低, 一般在 0.2 以下. 另外, 通过分析主要气溶胶物种对 AOD 的贡献发现, 硫酸盐、硝酸盐和铵盐是东亚地区 AOD 的主要贡献者, 在 AOD 高值区其贡献大都超过了 80%, 而黑碳气溶胶在中国北部人为活动密集区对 AOD 贡献较大, 在冬季尤为明显.

关键词
CMAQ
黑碳气溶胶
硫酸盐
AERONET
AOD

气溶胶是指漂浮在大气中的固态或液态微粒, 其空间分布广泛, 对气候与环境产生的影响不容忽视. 气溶胶粒子的自然来源主要有土壤沙尘、海盐、大气核化过程及有机物排放等, 而人为源主要有人类对化石燃料的燃烧、工业粉尘和农业耕作等[1]. 气溶胶可以通过自身光学特性的变化改变大气辐射收支平衡(直接效应), 或通过改变云体反照率和生命周期, 以及降水的形成等来间接改变大气辐射收支平衡(间接效应), 进而影响气候[2]. IPCC评估报告曾指出, "气溶胶辐射强迫效应仍然是在气候变化研究中最不确定的因子之一"[3]. 而此热点问题研究的难点来源于: ① 对气溶胶的微物理过程描述存在相对较大的不确定性. ② 气溶胶的空间分布有很强的地域特征. 如城市气溶胶主要由各种人为源排放, 自然源及气粒转化过程形成的二次生成物组成. 而沙尘, 花粉等原生粒子是野外地区气溶胶的主要组成物[4]. ③

引用格式: Han X, Zhang M G, Han Z W, et al. Model analysis of aerosol optical depth distributions over East Asia. Sci China Earth Sci, 2010, 53: 1079–1090, doi: 10.1007/s11430-010-3079-z

气溶胶与气候系统内的其他组分有着密切的相互关联, 如其对云和降水的作用与反作用.

目前, 已经有许多学者利用地基观测、大型观测场实验和卫星遥感技术[5~7]对气溶胶光学特性进行了测量, 这些工作促进了人们对气溶胶和气候之间相互作用的理解. 但这些观测手段仍然存在一些不足之处, 如地基观测代表性单一、卫星观测数据受反演方法的限制等. 另外, 这些观测手段还存在一个共同的特点: 观测手段本身很难把人为气溶胶对气候的影响与自然源气溶胶的效应加以区分[8]. 而这种影响在预测气候变化趋势中又非常重要. 因此, 为了提高对气溶胶辐射强迫效应的认识, 有必要发展和利用数值模拟方法对其空间分布和时间变化特性进行研究和探讨. 与一般观测方法相比, 模式可以模拟气溶胶的化学转化、传输、及清除过程[9], 并可区分来自于不同种类气溶胶粒子对辐射强迫的贡献.

Toon 等[10]是最早利用模式对气溶胶光学特性进行模拟的学者之一. 他们发展了一个全球气溶胶模式, 用来计算对流层、平流层气溶胶的尺度分布、化学组成和光学性质, 但其对尺度分布和气溶胶种类都考虑得较为简单. Tegen 等[11]利用全球传输模式模拟了 1950~1990 年间硫酸盐, 黑碳和有机碳气溶胶的变化趋势, 并分析了这种变化对气溶胶分布及天顶辐射强度变化的影响. 其结果表明, 这 40 年中北半球气溶胶质量增加较多, 其中东亚尤为明显. 同时他们还讨论了硫酸盐, 黑碳和有机碳气溶胶的增加对天顶辐射变化产生的影响, 及气溶胶辐射强迫计算中存在的不确定性. 随着许多研究工作的深入开展[12~15], 全球气溶胶模式的模拟能力在过去 10 年中有了很大的提高. 目前许多全球模式中已经可以全面考虑各种气溶胶粒子的微物理过程, 并且对降低气溶胶辐射强迫计算中存在的不确定性进行了很多尝试. 对气溶胶辐射强迫的计算同样需要更加细致的区域气溶胶分布, 化学组成和混合状态. 因此也有一些研究工作集中在区域气溶胶的模拟(如中国长江三角洲地区[16,17]、欧洲[18]、北美地区[19]及地中海沿岸[20]等). 这些工作显示了区域模式可以更好的模拟气象场及空气中气溶胶粒子的化学转化, 输送和清除过程.

过去 30 年间, 大多数模式模拟的结果都证明了气溶胶强迫效应大小的分布基本与其光学性质分布一致, 且其北半球光学厚度的大值区集中在非洲北部和中部, 东亚, 欧洲和美国东北部地区. 其中除非洲北部和中部地区主要以沙尘和生物质排放为主外, 美国、欧洲和东亚地区均为人口密集区, 气溶胶粒子也以人为源为主. 就东亚地区来说, 随着人口增长和经济的快速发展, 该地区的气溶胶光学特性会被来自于农业和工业活动的人为源气溶胶排放所影响[21], 并进而影响着辐射强迫和局地气候. 因此, 有必要对东亚地区气溶胶的光学特性进行详细的研究. 王喜红等[22]曾利用三维区域欧拉型输送模式配以一个辐射传输模式估算出东亚地区硫酸盐气溶胶柱含量和直接辐射强迫, 并分析了其地理分布和季节变化特征. 王喜红等[23]又进一步研究了东亚地区云和地表反照率变化对硫酸盐直接辐射强迫可能产生的影响. 吴涧等[24]在第三版区域化学模式中加入了沙尘排放, 传输和辐射模式, 用以研究沙尘在东亚地区的直接辐射强迫效应. 高丽洁等[25]利用一个中尺度气象模式及三维欧拉输送模式对 2000 年中国地区硫酸盐气溶胶分布进行了模拟, 并具体分析了其在不同区域和季节下产生的辐射强迫特征. 从上述研究成果来看, 对东亚地区气溶胶光学和辐射特性的模拟研究已取得实质性进展, 但仍存在一些不足, 如模式系统中气溶胶物种比较单一, 难于与气溶胶光学特性观测结果比较, 另外模式模拟能力也需进一步提高.

本文以区域大气模式RAMS提供气象场数据, 利用多尺度空气质量模式CMAQ[26]对 2005 年东亚地区上空多种气溶胶质量浓度进行了模拟, 并利用“质量-消光重建法”对气溶胶光学厚度(AOD)进行了计算. 模式模拟的气溶胶种类包括硫酸盐、硝酸盐、铵盐、黑碳、有机碳、沙尘和海盐. 为了检验模式结果的准确性, 模拟AOD还分别与气溶胶自动监测网(AERONET)及中国地区太阳分光监测网(CSHNET)的观测数据进行了对比. 在文章的最后, 我们还对东亚地区AOD时空分布和硫酸盐、硝酸盐、铵盐及黑碳气溶胶对AOD的贡献比例进行了分析.

1 模式系统简介

多尺度空气质量模式CMAQ是由美国环境保护局发展的欧拉型模式. 该模式可在考虑大气和陆面过程影响的同时, 对区域或城市尺度中的空气污染物及其产物的传输, 转化和沉降进行模拟. 目前的

CMAQ版本使用了第二版区域酸沉降模块(RADM2)[27]来模拟气相、水合化合物, 硫氧化物等化学物质核化形成气溶胶等化学机制. 同时还使用了区域颗粒物模块(RPM)[28]来模拟气溶胶在大气中的演变过程. 气溶胶粒子的尺度分布假设为 3 个模态: 爱根核、聚集态和粗粒子, 且每个模态都符合对数分布特征. 另外选用了RAMS对气象场进行模拟并提供CMAQ所需的气象资料, 相比默认使用的MM5 模式, RAMS对边界层及下垫面有更强的模拟能力. RAMS-CMAQ先后应用于东亚区域和城市地区对流层臭氧, 硫酸盐, 气溶胶及其他污染物的模拟研究, 并通过了多方面观测数据的检验[29~31].

模拟区域(见图 1)中心点为(35°N, 116°E), 水平方向面积为 6654 km × 5440 km, 水平网格距为 64 km; 在垂直方向采用不等距网格, 模式顶高度约为 23 km, 分为 15 层, 有近一半分布于 2 km 以下, 以便更好地模拟大气边界层结构.

模式人为源排放取自为MICS-Asia II(第二期东亚大气化学输送模式比较计划)而编制的亚洲地区0.5°×0.5°月平均污染源清单[32], 主要包括SO_2、氮氧化物、非甲烷烃和氨气. 森林大火、森林砍伐、草原燃烧、农业耕作以及农作物废弃物燃烧释放的生物类污染物取自基于AVHRR卫星资料估算的全球0.5°×0.5°月平均排放清单[33]. 飞机释放和闪电产生的氮氧化物取自EDGAR[34]的 1°×1°月均排放清单. 土壤排放的氮氧化物及植物排放的碳氢化合物取自于GEIA的 1°×1°月均排放清单[35]. 此外, 火山排放的二氧化硫亦取自MICS-Asia II. RAMS的大尺度天气背景场取自NCEP 6h间隔的1°×1°再分析资料. RAMS边界条件中, 海表温度和积雪覆盖率分别取周平均值和月平均观测值.

本文使用了质量-消光重建法(RM)[36]计算气溶胶光学厚度. RM方法的半经验公式如下:

$$\beta = 0.003\times f(RH)\times[SO_4^{2-}+NO_3^{-}+NH_4^{+}] +0.004\times[OM]+0.01\times[BC]+0.001\times[FS] +0.0006\times[CM], \quad (1)$$

其中, β为气溶胶总消光系数; 式中中括号表示质量浓度, 单位为mg/m^3. SO_4^{2-}, NO_3^{-}和NH_4^{+}分别代表硫酸盐、硝酸盐和铵盐; OM代表有机碳类气溶胶; BC代表黑碳气溶胶; FS代表大气中的细粒子; CM代表各种粗粒子. 公式(1)中除黑碳气溶胶所乘系数是假设粒子谱为正态分布时计算的比吸收系数, 其余各类气溶胶所乘系数均为相同假设下各自比散射系数, 单位均为m^2/mg, 计算波长为 550 nm. $f(RH)$为相对湿度订正因子, 用于对硫酸盐、硝酸盐和铵盐气溶胶粒子光学性质随粒子湿增长而发生变化的订正, 被定义为

$$f(RH) = \beta(RH) / \beta(0\%), \quad (2)$$

其中, $\beta(RH)$和$\beta(0\%)$分别表示湿粒子和干粒子的消光系数. $f(RH)$的值可查表获得[36].

将总消光系数对相应层厚度ΔZ 进行积分, 就可得到模式 AOD. 计算公式为

$$\mathrm{AOD} = \int_z^{z+\Delta z} \beta(z)\mathrm{d}z. \quad (3)$$

2 AOD 观测资料

为了检验模式结果的合理性, 将模拟的 AOD 值与 AERONET 和 CSHNET 的观测值进行了比较. AERONET 是美国 NASA 为了对地球卫星遥感系统提供观测对比而发起的全球气溶胶遥感监测网. 该监测网可提供可见光波段内精度达 0.01~0.02 的全球 AOD 观测数据. 本文选择了 3 个具有较长观测时间序列的站点资料以检验模拟结果. 3 个站点的信息见表 1.

CSHNET 是中国地区建立的第一个气溶胶标准监测网, 用以对气溶胶光学特性及其时空分布进行观测, 并尝试降低定量研究气溶胶对局地气候和环境变化的影响中存在的不确定性. 该观测网建于 2004 年 8 月, 统一使用 LED 光度计对位于不同生态系统站点的气溶胶光学特性进行观测. 这些生态系统包括了半干旱地区、农业、森林地区、城市地区等.

表 1 用于模式检验的 AERONET 站点信息

站点名称	地点	经度(E)	纬度(N)	海拔高度(m)
北京	中国北京城区内	116.38°	39.98°	92.0
白浜町(Shirahama)	日本和歌山南部海岸	135.36°	33.69°	10.0
香河	中国小城镇农业地区	116.96°	39.75°	36.0

除多云天气外, 在每天上午 10 点到下午 2 点之间, 每隔约 0.5 h 进行一组 3 次的连续观测. 本文同样选择了具有较长观测时间序列的站点资料与模拟结果比较. 有关站点的信息列于表 2.

表 2　用于模式检验的 CSHNET 站点信息

站点名称	生态种类	经度(E)	纬度(N)	海拔高度(m)
拉萨	高原灌木	91.33°	29.67°	3688
海北	高原草甸	101.32°	37.45°	3230
海伦	农业	126.63°	47.43°	240
三江	湿地	133.52°	47.58°	55
安塞	农业	109.31°	36.85°	1068~1309
封丘	农业	114.40°	35.00°	68
桃源	农业	111.45°	28.92°	45~78
沈阳	城郊农业	123.63°	41.52°	31
长白山	森林	128.63°	42.40°	736
北京森林	森林	115.43°	39.96°	1130
西双版纳	森林	10127°	21.90°	570
鄂尔多斯	半干旱沙漠	110.18°	39.48°	1300
沙坡头	沙漠	104.95°	37.45°	1350
三亚	海洋	109.53°	18.22°	3
胶州湾	海湾	120.18°	35.90°	6
太湖	湖泊	120.22°	31.40°	6
上海	城市	121.75°	31.12°	5
兰州	城市	103.82°	36.07°	1520
北京	城市	116.37°	39.97°	44
香河	城郊农业	116.96°	39.75°	20

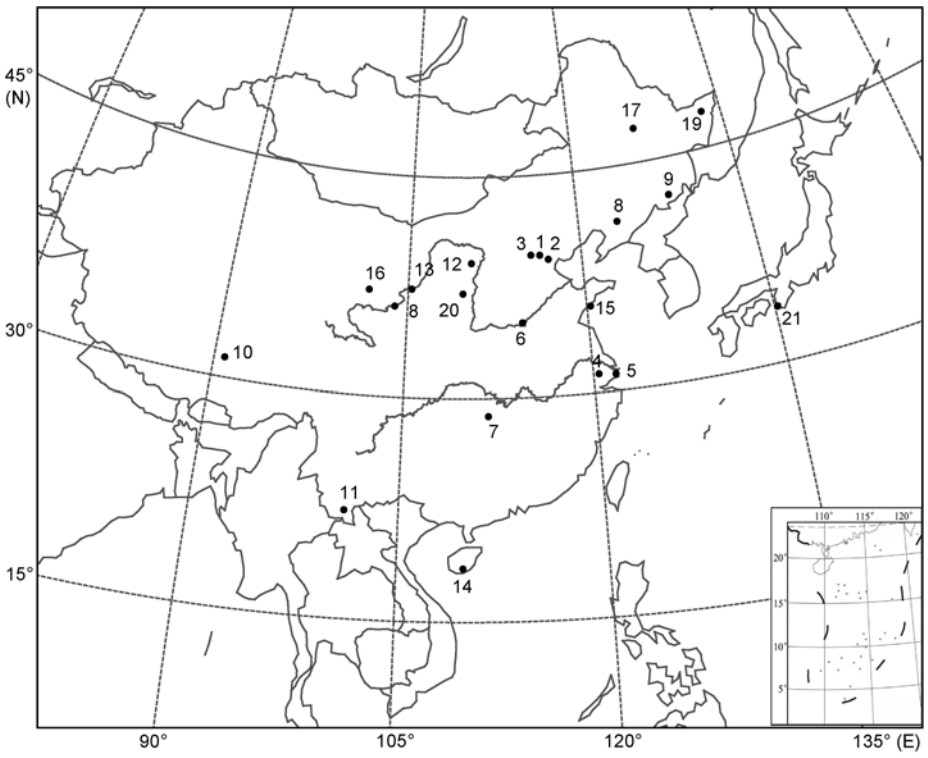

图 1　观测站点地理分布图

图中标记数字分别代表: 1, 北京; 2, 香河; 3, 北京森林; 4, 太湖; 5, 上海; 6, 封丘; 7, 桃源; 8, 沈阳; 9, 长白山; 10, 拉萨; 11, 西双版纳; 12, 鄂尔多斯; 13, 沙坡头; 14, 三亚; 15, 胶州湾; 16, 海北; 17, 海伦; 18, 兰州; 19, 三江; 20, 安塞; 21, 白浜町

本文使用了 675 nm(AERONET)和 650 nm (CSHNET)波长的 AOD 观测结果用于模式比较, 与观测值相应的模拟值取自相应观测站最近的模式网格点上的值. AERONET 和 CSHNET 站点在模式区域的位置见图 1.

3 结果与分析

3.1 AOD 模拟值与 AERONET 及 CSHNET 观测值对比

图 2 给出了 AOD 模拟值与相应 AERONET 站点观测值比较结果的月平均散点图. 图中实线为模拟值与观测值之间 1∶1 比值线, 虚线分别为 1∶2 及 2∶1 比值线. 图 3 给出了模拟 AOD 与 AERONET 观测值的日均值时间序列变化图. 表 3 列出了模拟日均值与 AERONET 站点日均值对比的统计参数. 从表 3 的统计参数来看, 模拟结果的样本均值稍低于 AERONET 观测结果, 说明模拟值在这 3 个站点处存在一定程度的偏低. 比较标准差参数, 模式基本可以反应出 AOD 波动的幅度, 其中 Shirahama 站模拟值与观测值的标准差最为接近. 相关系数方面, 3 站均通过了显著性水平为 1%的 t 检验, 值分别为 0.68, 0.54 和 0.69. 表明模式可以较好的模拟 AOD 的变化趋势.

图 4 给出了 AOD 模拟值与 CSHNET 站点观测值之间比较结果的月平均散点图. 图 5 给出了模拟 AOD 与 CSHNET 观测结果的日平均时间序列变化图. 表 4 则列出了各个 CSHNET 观测站点处模拟日均值与观测日均值之间的统计参数. 所有站点的相关系数也通过了显著性水平为 1%的 t 检验, 证明模拟值与观测值之间的相关系数是显著的.

与 CSHNET 观测站点比较时发现, 不同生态类型站点处 AOD 模拟值与观测值比较结果的统计参数有较为明显的差异. 由表 4 中所列 3 种统计量可以发现, 整体来看处于自然环境地区的站点, 如森林、农业生态系统等, 模拟结果与观测结果在大小、波动性和变化趋势上都有较好的一致性; 而城市和沙漠地区的模拟结果与观测结果之间的一致性相对稍差.

如果分析 CSHNET 自然生态系统站点的比较结果, 可以发现其模拟值与观测值之间的相关系数平均能够达到 0.6 左右, 这表明 AOD 模拟值能够在一定程度上较好的反应出观测值的变化趋势; 而相比农业生态站点, 模拟 AOD 在森林生态站点及三江湿地站点中的样本均值及标准差则更加接近于观测统

表 3 日均模拟结果与AERONET日均观测结果对比统计参数[a)]

站点名称	N	C_O	C_R	σ_O	σ_R	R
北京	247	0.60	0.43	0.58	0.45	0.68
白浜町	285	0.27	0.21	0.15	0.16	0.54
香河	264	0.58	0.43	0.52	0.42	0.69

a) N表示统计样本数; C_O, C_R分别代表观测结果和模拟结果的样本平均值; σ_O, σ_R分别代表观测结果和模拟结果的标准偏差; R代表模拟结果与相应观测结果之间的相关系数

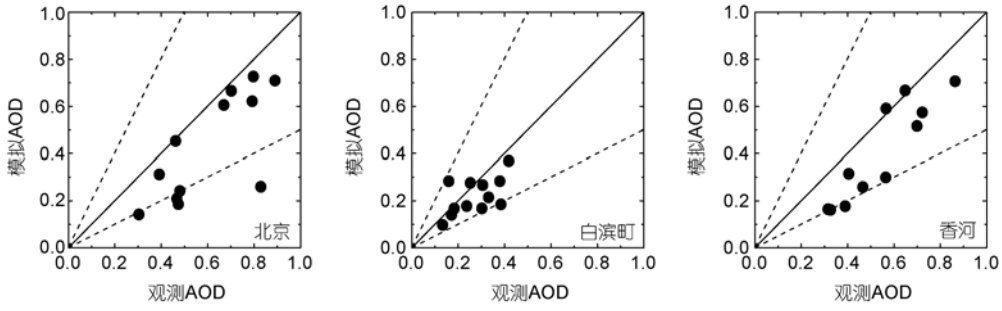

图 2 2005 年模拟 AOD 与 AERONET 站点观测 AOD 月均值散点图

图中实线为模拟值与观测值之间 1∶1 比值线, 虚线分别为 1∶2 及 2∶1 比值线

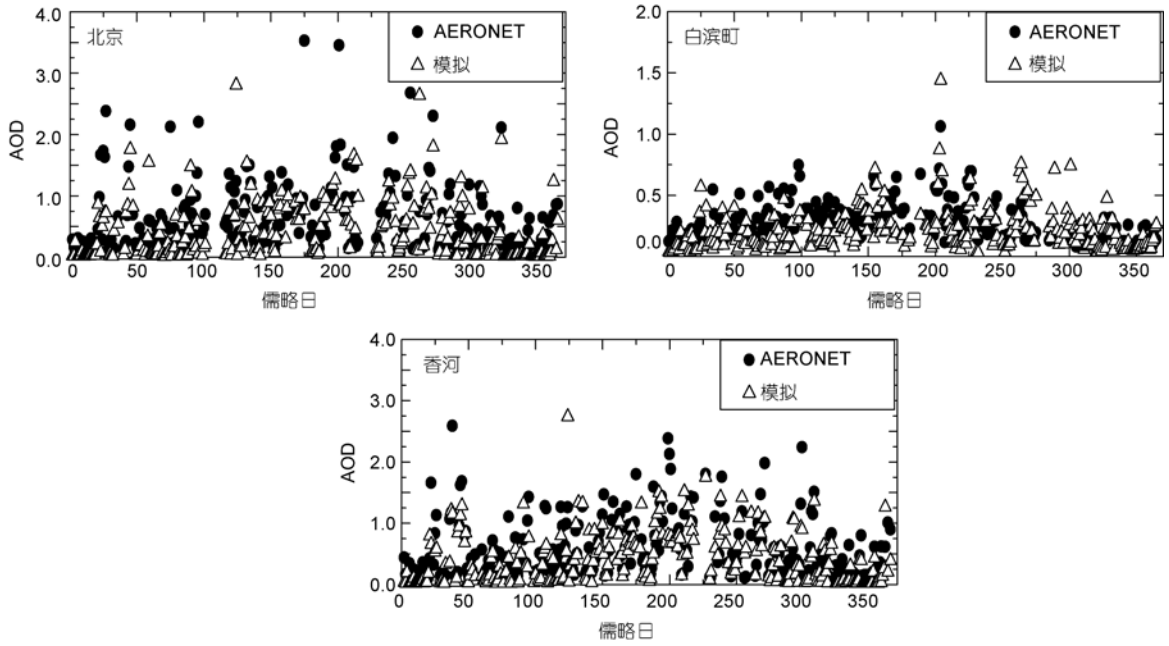

图 3　2005 年 AERONET 站点观测 AOD 与模拟 AOD 日均值变化图

表 4　日均模拟结果与 CSHNET 日均观测结果对比统计参数总结

站点名称	N	C_O	C_R	σ_O	σ_R	R_R	站点名称	N	C_O	C_R	σ_O	σ_R	R
拉萨	183	0.11	0.18	0.04	0.08	0.22	西双版纳	124	0.27	0.25	0.16	0.22	0.46
海北	96	0.09	0.11	0.06	0.12	0.49	鄂尔多斯	167	0.18	0.11	0.13	0.14	0.70
海伦	144	0.12	0.07	0.06	0.08	0.54	沙坡头	170	0.27	0.17	0.11	0.17	0.44
三江	119	0.13	0.09	0.08	0.10	0.76	三亚	79	0.27	0.14	0.13	0.17	0.51
安塞	76	0.22	0.16	0.11	0.15	0.53	胶州湾	224	0.56	0.33	0.33	0.29	0.47
封丘	79	0.43	0.26	0.19	0.20	0.64	太湖	64	0.34	0.25	0.09	0.18	0.42
桃源	109	0.53	0.36	0.2	0.28	0.51	上海	118	0.44	0.21	0.18	0.18	0.42
沈阳	179	0.34	0.18	0.18	0.20	0.59	兰州	125	0.45	0.25	0.14	0.25	0.27
长白山	103	0.09	0.19	0.06	0.17	0.57	北京	147	0.28	0.19	0.25	0.23	0.74
北京森林	186	0.17	0.21	0.15	0.29	0.79	香河	118	0.29	0.17	0.20	0.20	0.82

计量. 这说明在森林、湿地环境中模拟AOD的数值较农业生态环境更接近于观测值. 造成这种现象的原因可能是因为在农业生态站点存在较多的人为农业活动, 如产生大量有机碳气溶胶的生物质及化石燃料的燃烧[37], 土壤耕作等. 从农业生态站点AOD均值及标准差普遍高于森林及湿地站点也可以看出, 人为农业活动增大了气溶胶的排放, 并使其变化剧烈.

另外, 表 4 所列的统计参数还表明在城市生态环境中模拟结果的准确性不及自然生态环境. 其样本均值相对偏小, 相关系数平均只达 0.45 左右. 这说明城市地区的模拟结果比较难以把握AOD变化趋势. 其主要原因可能来自于城市频繁的人为活动造成的大量随机性气溶胶颗粒排放[38,39]. 这种排放远大于自然生态环境, 使得城市地区AOD浓度及光学特性的变化剧烈程度亦远大于自然环境地区, 而且模式模拟网格间距又相对较大, 对这种剧烈变化的响应就稍显不足; 另外一个原因可能来自于特殊地形环境影响, 如兰州站模拟与观测之间的相关系数只有 0.27, 这可能不仅仅是因为兰州市内工业、交通和居民生活等大量人为气溶胶排放造成AOD模拟困难, 同时其复杂的山谷地形形成了逆温、静风等不利于大气扩散的气象条件, 使其上空边界层内气溶胶难以扩散, 也在一定程度上增加了模拟难度.

需要说明的是, 虽然 RAMS-CMAQ 考虑了沙尘气溶胶的起沙与输送、扩散和沉降等过程, 但由于缺

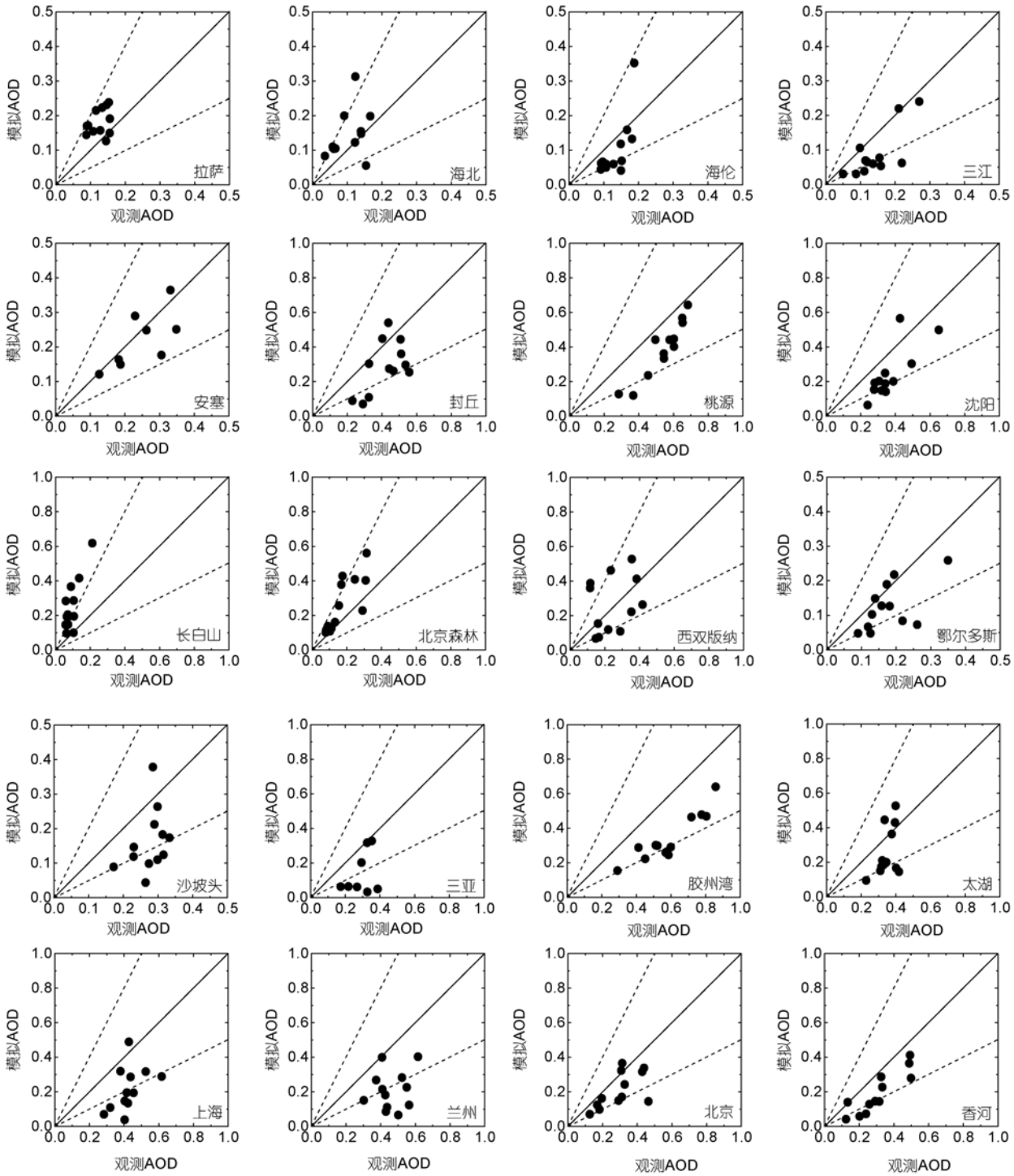

图 4　2005 年模拟 AOD 与 CSHNET 站点观测 AOD 月均值散点图

实线与虚线含义同图 2

乏对沙尘气溶胶模拟结果的全面检验，因而在计算 AOD 时未计入沙尘气溶胶的贡献，这可能会使得模拟结果在中国西部、北部及蒙古国等受沙尘粒子影响较为明显的地区产生低估，且以扬沙或沙尘暴多发的春季为主．这点可以从鄂尔多斯及沙坡头两个沙漠生态型站点看出．如图 5 所示，鄂尔多斯站点的观

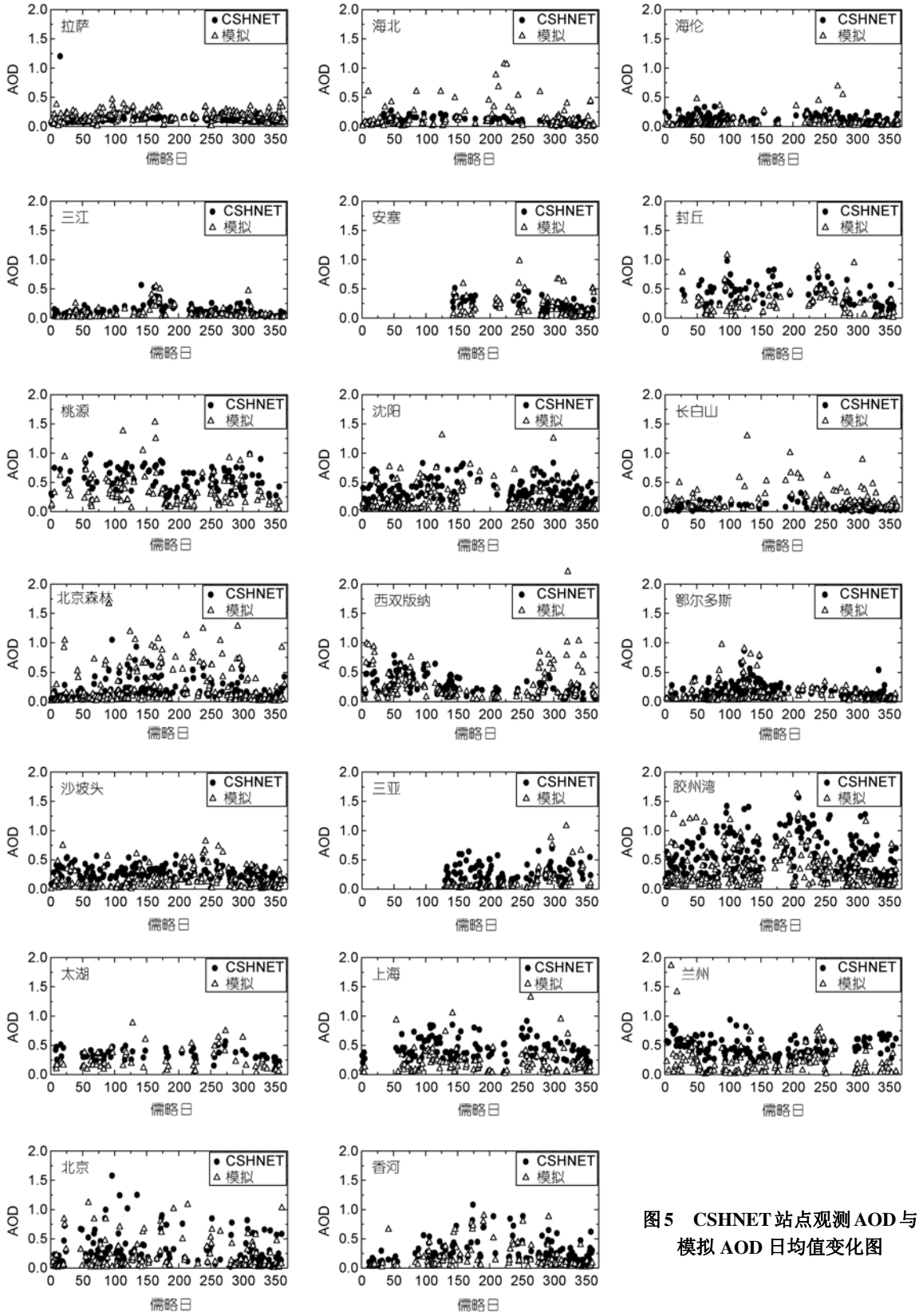

图 5　CSHNET 站点观测 AOD 与模拟 AOD 日均值变化图

测 AOD 在春季(3 月中旬至 5 月)有一个明显的高峰期, 这应该是受当地沙尘气溶胶的影响所致, 而模拟 AOD 在这个阶段整体偏小, 未与观测 AOD 产生一致变化. 但在夏、秋、冬季, 模拟 AOD 与观测 AOD 之间的差别明显减小, 说明在该站点受沙尘影响较小的季节中, 模拟 AOD 依然能够与观测 AOD 之间具有较好的一致性.

总体来说, 如果以 AERONET 及 CSHNET 的 AOD 观测值作为检验模式模拟质量的标准, 可以发现: 图 2 和 4 中, 模拟值与观测值组成的散点大部分都能够落在 2 倍比值区间内, 再考虑表 3 和 4 的统计数据结果, 可以看出模拟值在一定程度上能够较好的反应出实际 AOD 的分布情况; 从图 3 和 5 中可以发现模拟 AOD 在大部分站点处能够较好的符合观测 AOD 的全年变化趋势; 而进一步分析表 4 中的统计数据可以发现, 模拟结果的准确性在自然环境中优于存在频繁人为活动的城市或农业地区, 说明由密集的人为活动随机排放到大气中的气溶胶粒子不容易被目前的模式系统所模拟, 因此模拟 AOD 在城市或农业地区可能被低估, 而通过提高模式模拟精度也许可以在一定程度上解决该问题. 另外, 兰州站点的比较结果说明复杂地形也是影响模拟结果质量的一个重要因素.

3.2 模拟 AOD 时空分布特征分析

图 6 给出了 2005 年 1, 4, 7 和 10 月东亚地区模式模拟 AOD 的地理分布月均图. 为了了解不同季节和区域中 AOD 产生的来源及特点, 图中同时标出了硫酸盐、硝酸盐及铵盐 3 种水溶性气溶胶粒子产生的消光系数对整体 AOD 贡献百分比的等值线地理分布情

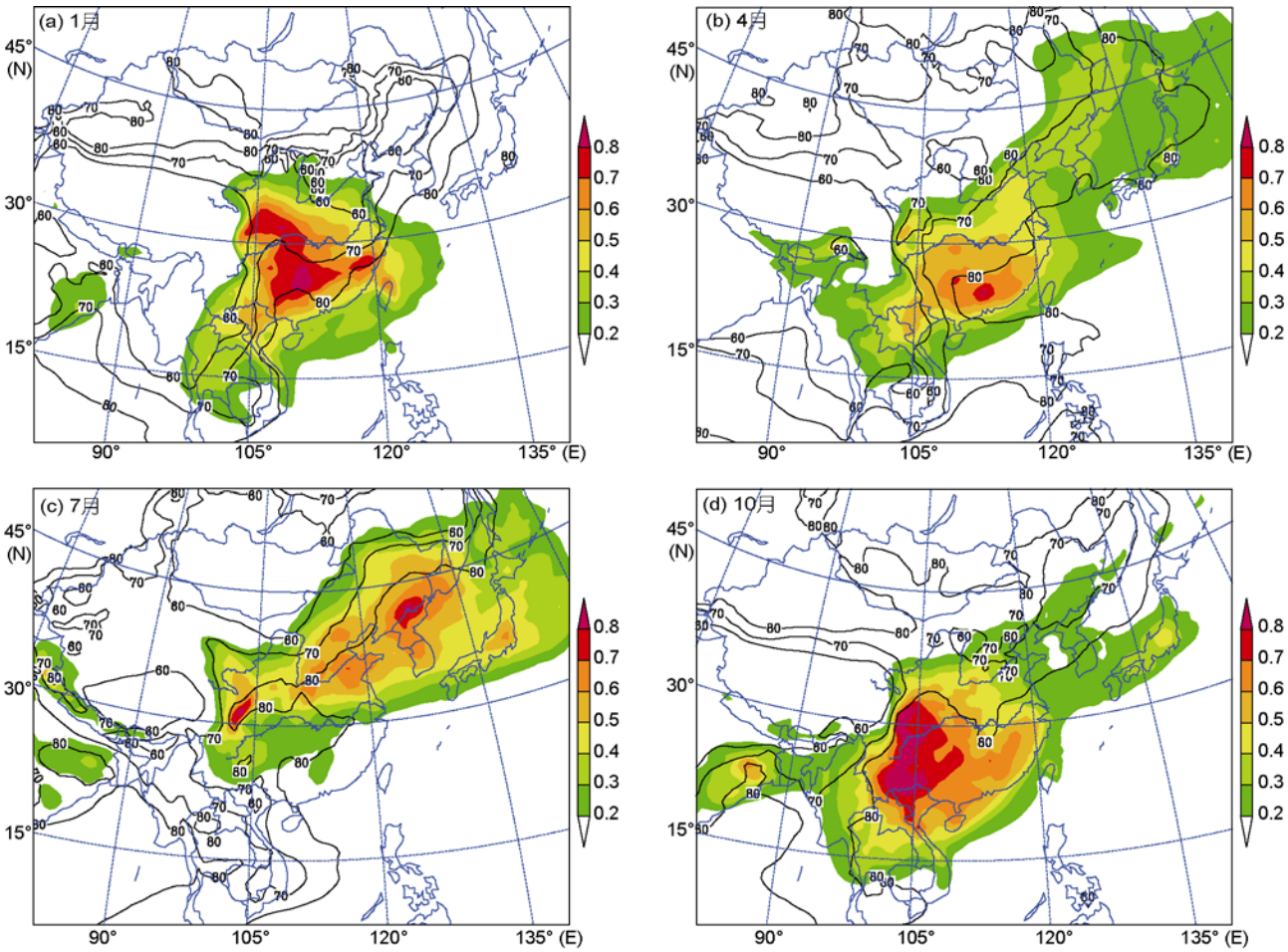

图 6 2005 年东亚地区 1, 4, 7, 10 月 AOD 模拟月均值分布及硫酸盐、硝酸盐、铵盐 3 种可溶性气溶胶对 AOD 贡献百分比等值线图

况.

由图 6 可以发现, 在不考虑沙尘气溶胶粒子影响的情况下, 东亚地区 AOD 高值区主要集中在 105°E 以东的大陆地域, 其值主要在 0.2~0.8 之间波动. 低于 0.2 的 AOD 低值区主要集中在东亚北部区域, 西部和南部海域. 就季节变化来讲, 整个东亚地区 AOD 夏季较低, 冬季较高, 最低和最高值分别出现在 7 月和 1 月. 具体来说, 一些明显的 AOD 高值区为中国四川盆地、贵州省、华南和华中(除河南省)地区. 这些地区的最高月平均 AOD 都能够超过 0.8, 并可出现在除夏季外的其他全部季节. 此外, 在中国华北(除内蒙古省)、华东及河南省, 越南和老挝北部的 AOD 值也相对较高, 并在 10 月及冬季期间较为明显.

从图 6 中硫酸盐、硝酸盐及铵盐 3 种水溶性粒子贡献比重等值线可以看出, 这 3 种水溶性气溶胶是东亚地区 AOD 最主要的贡献者, 在绝大部分地区其贡献百分比不低于 50%. 从月均情况来看, 除 1 月外, 3 种水溶性粒子对多数 AOD 高值区的贡献都超过了 80%. 归纳原因可能为: 一是这 3 种水溶性粒子的质量浓度在气溶胶粒子总质量浓度中所占比例较重; 其次水溶性粒子在水汽的作用下产生的湿增长效应可以使其消光效率成倍增长. 因此在水汽较重的地区(如中国四川盆地、贵州及华南地区)和季节, 3 种水溶性粒子的消光效应亦会非常明显. 另外, 观察这 3 种气溶胶粒子贡献达 80%的等值线, 可发现其地理位置有比较明显的季节变化特征: 夏、秋季该等值线一般在中国长江以北, 而冬、春季则一般在中国长江以南, 这说明硫酸盐、硝酸盐及铵盐粒子对中国东南部 AOD 的贡献在夏、秋季所占份额大于冬、春季, 且冬、春季该地区对 AOD 产生贡献的气溶胶粒子种类

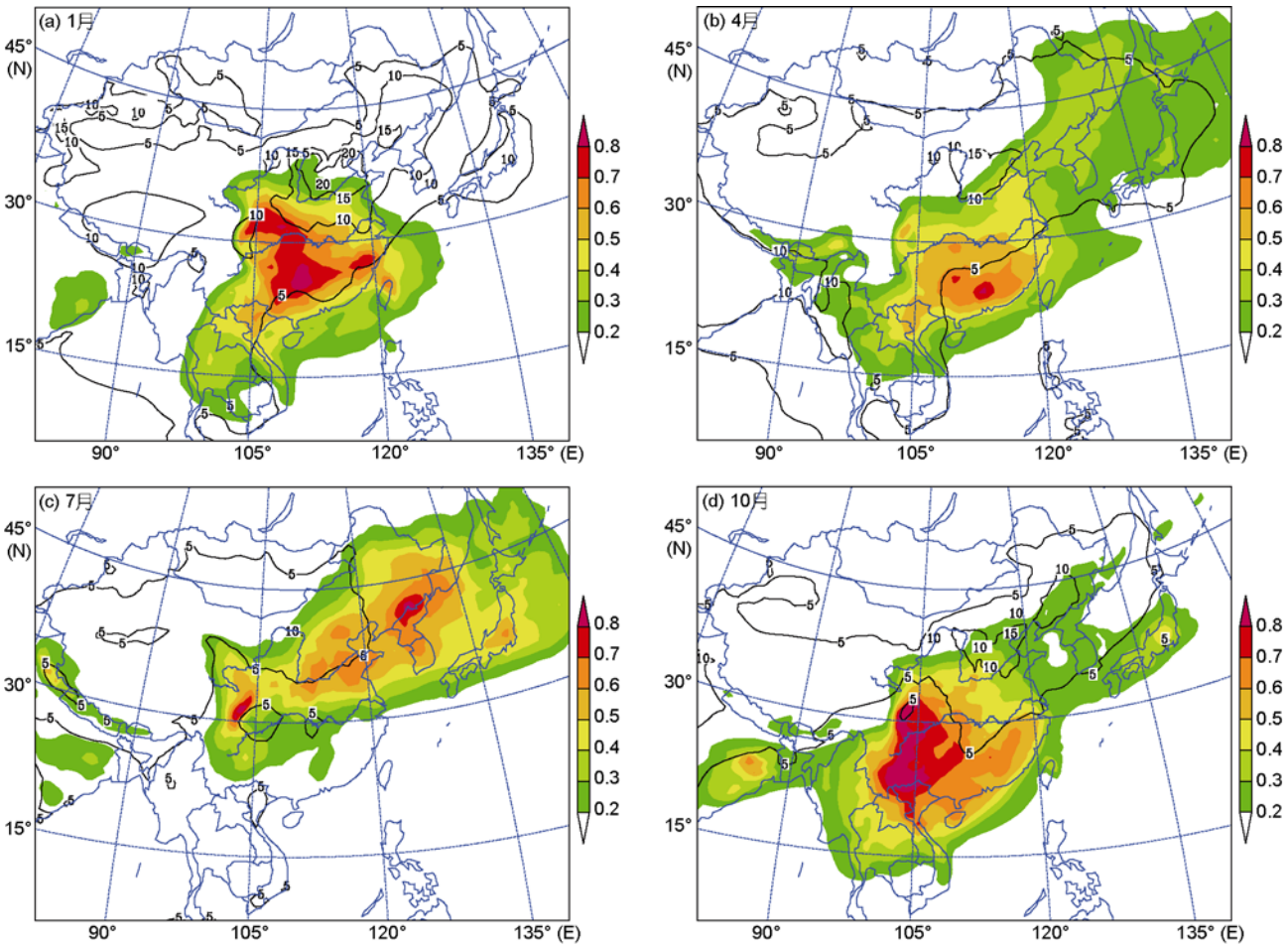

图 7　2005 年东亚地区 1, 4, 7, 10 月 AOD 模拟月均值分布及黑碳气溶胶对 AOD 贡献百分比等值线图

更为复杂.

图 7 则给出了同年 1, 4, 7 和 10 月东亚地区模拟 AOD 空间分布月均图, 并同时标出了黑碳气溶胶产生的消光系数对整体 AOD 贡献百分比的等值线地理分布情况. 从图 7 可以发现, 黑碳气溶胶粒子的贡献比重在 3%~20%之间, 且地理分布及季节变化特征比较明显: 其贡献主要集中在中国东北和除内蒙古省以外的华北地区, 这与硫酸盐、硝酸盐及铵盐 3 种水溶性气溶胶对 AOD 的主要贡献区域有所不同. 此外, 冬季为该地区黑碳气溶胶消光系数贡献比重较大的季节, 该季节中在中国河北、山西、辽宁省部分地区及京津地区等中国北方人口密集区其比重可达 15%~20%以上, 春、秋季贡献比重次之, 而夏季贡献比重则相对最小. 从上述贡献比重的地理分布及季节变化的特征来看, 造成这种现象的主要原因应来自于以人为采暖为主排放出的大量黑碳气溶胶粒子.

4 结论

本文利用 CMAQ-RAMS 模式系统计算和分析了 2005 年东亚地区上空 AOD 的时空分布特征. 使用的计算方法为质量-消光重建法(RM 法). 包含的气溶胶种类主要有硫酸盐、硝酸盐、铵盐、黑碳、有机碳、细粒子和海盐等. 为了检验模拟质量, 本文将模拟 AOD 与 AERONET 和 CSHNET 气溶胶地基观测网的观测 AOD 数据进行了对比, 并分析了模拟 AOD 的地理分布和季节变化特征. 另外, 文中还给出了主要气溶胶物种的消光系数对整体 AOD 做出的贡献比重, 并对此进行了分析. 本文的主要结论有:

(1) 通过将模拟结果与 AERONET 和 CSHNET 观测网的观测数据进行对比, 可以发现模拟 AOD 总体上能够较好地反映东亚地区 AOD 的时空分布特征.

(2) 对比统计数据来看, 在不同的生态环境背景下的模拟质量是不同的. 统计数据显示在自然生态环境中模拟的结果要优于存在密集人类活动的生态环境, 其原因可能是由模式分辨率及复杂的下垫面条件造成的误差.

(3) 从给出的东亚地区模拟 AOD 的地理分布月均图来看, 该地区 AOD 时空变化显著. 在不考虑沙尘气溶胶的情况下, 东亚地区 AOD 低值区集中在其北部、西部地区和南部海域, 几乎全年都低于 0.2. 105°E 以东的大陆地区 AOD 值较高, 变化范围约在 0.2~0.8 之间. 东亚地区的 AOD 高值区主要有: 中国四川盆地, 华南和华中部分地区, 这些地区的 AOD 高值可超过 0.8, 并维持数月.

(4) 从图 6 和 7 标出的硫酸盐、硝酸盐、铵盐 3 种水溶性气溶胶及黑碳气溶胶对整体 AOD 贡献比重来分析, 可以看出对整个东亚地区 AOD 产生主要贡献的气溶胶粒子种类为 3 种水溶性气溶胶. 其在该地区不同季节中的 AOD 贡献比重基本都能够超过 50%. 而黑碳气溶胶贡献比重随季节变化比较明显, 冬季达到最大, 夏季最小. 与可溶性气溶胶的贡献主要集中在中国南部不同, 黑碳气溶胶的贡献主要在中国北方地区.

在下一步工作中, 可加入沙尘模块用以修正受沙尘影响较为明显的地区的 AOD 模拟. 此外, 还可以引入卫星观测资料进行对比, 从而能够更全面地了解模拟结果的合理性. 关于模式系统本身, 未来除了改进现有的模拟质量外, 将考虑在现有基础上引入辐射传输模式, 对气溶胶的辐射强迫效应进行估算和分析, 从而进一步了解东亚地区大气气溶胶的辐射强迫效应特征.

致谢 本研究工作得到了中国生态系统研究网络(CERN)有关台站的大力支持, 审稿人提出修改建议, 特此感谢.

参考文献

1 王明星, 张仁健. 大气气溶胶研究的前沿问题. 气候与环境研究, 2001, 6: 119—124
2 Ghan S J, Schwartz S E. Aerosol properties and processes: A path from field and laboratory measurements to global climate models. Bull Amer Meteorol Soc, 2007, 88: 1059—1083
3 Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). The Physical Science Basis of Climate Change: Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. New York: Cambridge University Press, 2007. 26—27
4 Deepak A, Gali G. The International Global Aerosol Program (IGAP) Plan. Virginia: Deepak Publishing, 1991

5 Xin J Y, Wang Y S, Li Z Q, et al. AOD and Angstrom exponent of aerosols observed by the Chinese Sun Hazemeter Network from August 2004 to September 2005. J Geophys Res, 2007, 112: D05203, doi: 10.1029/2006JD007075
6 Francis P N, Hignett P, Taylor J P. Aircraft observations and modeling of sky radiance distributions from aerosol during TARFOX. J Geophys Res, 1999, 104: 2309—2319
7 Bergstrom R W, Russell P B. Estimation of aerosol direct radiative effects over the midlatitude North Atlantic from satellite and *in situ* measurements. Geophys Res Lett, 1999, 26: 173l—1734
8 Ghan S, Laulainen N, Easter R, et al. Evaluation of aerosol direct radiative forcing in MIRAGE. J Geophys Res, 2001, 106: 5295—5316
9 Malleta M, Ponta V, Lioussea C, et al. Simulation of aerosol radiative properties with the ORISAM-RAD model during a pollution event (ESCOMPTE 2001). Atmos Environ, 2006, 40: 7696—7705
10 Toon O B, Pollack J B. A global average model of atmospheric aerosols for radiative transfer calculations. J Appl Meteorol, 1976, 15: 225—246
11 Tegen I, Koch D, Lacis A A, et al. Trends in tropospheric aerosol loads and corresponding impact on direct radiative forcing between 1950 and 1990: A model study. J Geophys Res, 2000, 105: 26971—26989
12 Jacobson M Z. Global direct radiative forcing of multicomponent anthropogenic and natural aerosol. J Geophys Res, 2001, 106: 1551—1568
13 Takemura T, Nakajima T, Dubovik O, et al. Single-scattering albedo and radiative forcing of various aerosol species with a global three-dimensional model. J Clim, 2002, 15: 333—352
14 Hatzianastassiou N, Katsoulis B, Vardavas I. Global distribution of aerosol direct radiative forcing in the ultraviolet and visible arising under clear skies. Tellus, 2004, 56: 51—71
15 Koch D, Bond T C, Streets D, et al. Linking future aerosol radiative forcing to shifts in source activities. Geophys Res Lett, 2007, 34: L05821, doi: 10.1029/2006GL028360
16 Xu J, Bergin M H, Yu X, et al. Measurement of aerosol chemical, physical and radiative properties in the Yangtze delta region of China. Atmos Environ, 2002, 36: 161—173
17 Xu J, Bergin M, Greenwald H R, et al. Direct aerosol radiative forcing in the Yangtze delta region of China: Observation and model estimation. J Geophys Res, 2003, 108: 4060, doi: 10.1029/2002JD002550
18 Marmer E, Langmann B, Hungershofer K, et al. Aerosol modeling over Europe: 2. Interannual variability of aerosol shortwave direct radiative forcing. J Geophys Res, 2007, 112: D23S16, doi: 10.1029/2006JD008040
19 Roy B, Mathur R, Gilliland A B, et al. A comparison of CMAQ-based aerosol properties with IMPROVE, MODIS, and AERONET data. J Geophys Res, 2007, 112: D14301, doi: 10.1029/2006JD008085
20 Galindo N, Nicolas J F, Yubero E, et al. Factors affecting levels of aerosol sulfate and nitrate on the Western Mediterranean coast. Atmos Res, 2007, 88: 305—313
21 Li X, Zhou X, Li W, et al. The cooling of Sichuan province in recent 40 years and its probable mechanisms. Acta Met Sin, 1995, 9: 57—68
22 王喜红, 石广玉. 东亚地区人为硫酸盐的直接辐射强迫. 高原气象, 2001, 20: 258—267
23 王喜红, 石广玉. 东亚地区云和地表反照率对硫酸盐直接辐射强迫的影响. 气象学报, 2002, 60: 754—765
24 吴涧, 符淙斌, 蒋维楣, 等. 东亚地区矿物尘气溶胶直接辐射强迫的初步模拟研究. 地球物理学报, 2005, 48: 1250—1260
25 高丽洁, 王体健, 徐永富, 等. 中国硫酸盐气溶胶及其辐射强迫的模拟. 高原气象, 2004, 23: 612—619
26 张美根. 多尺度空气质量模式系统及其验证 I. 模式系统介绍与气象要素模拟. 大气科学, 2005, 29: 805—813
27 Stockwell W R, Middleton P, Chang J S, et al. The second generation regional acid deposition model chemical mechanism for regional air quality modeling. J Geophys Res, 1990, 95: 16343—16367
28 Binkowski F S, Shankar U. The regional particulate matter model: 1. Model description and preliminary results. J Geophys Res, 1995, 100: 26191—26209
29 Zhang M G, Uno I, Carmichael G R, et al. Large-scale structure of trace gas and aerosol distributions over the western Pacific Ocean during TRACE-P. J Geophys Res, 2003, 108: 8820, doi: 10.1029/2002JD002946
30 Zhang M G, Uno I, Yoshida Y, et al. Transport and Transformation of Sulfur compounds over East Asia during the TRACE-P and ACE-Asia Campaigns. Atmos Environ, 2004, 38: 6947—6959
31 Zhang M G. Modeling of organic carbon aerosol distributions over East Asia in the springtime. China Part, 2004, 2: 192—195
32 Carmichael G R, Sakurai T, Streets D, et al. MICS-Asia II: The model intercomparison study for Asia Phase II methodology and overview of findings. Atmos Environ, 2008, 42: 3468—3490
33 Woo J H, Streets D G, Carmichael G R, et al. Contribution of biomass and biofuel emissions to trace gas distributions in Asia during the

TRACE-P experiment. J Geophys Res, 2003, 108: 8812, doi: 10.1029/2002JD003200
34 Olivier J G J, Bouwman A F, C van der Maas W M, et al. Emission database for global atmospheric research. Environ Monit Assess, 1994, 31: 93—106
35 Benkovitz C M, Schultz M T, Pacyna J, et al. Global gridded inventories of anthropogenic emissions of sulfur and nitrogen. J Geophys Res, 1996, 101: 239—253
36 Malm W C, Sisler J F, Huffman D, et al. Spatial and seasonal trends in particle concentration and optical extinction in the United States. J Geophys Res, 1994, 99: 1347—1370
37 Han Z W, Zhang R J, Wang Q G, et al. Regional modeling of organic aerosols over China in summertime. J Geophys Res, 2008, 113: D11202, doi: 10.1029/2007JD009436
38 He K B, Yang F M, Ma Y L, et al. The characteristics of $PM_{2.5}$ in Beijing, China. Atmos Environ, 2001, 35: 4959—4970
39 Ye B M, Ji X L, Yang H Z, et al. Concentration and chemical composition of PM2.5 in Shanghai for a 1-year period. Atmos Environ, 2003, 37: 499—510