

# 东亚地区气溶胶化学成分特性分析及数值模拟研究

王吉明<sup>1</sup>, 曹艳华<sup>2</sup>, 叶小峰<sup>1</sup>, 骆世娟<sup>3</sup>, 阮启亮<sup>4</sup>, 刘立群<sup>4</sup>, 段艺萍<sup>3</sup>

(1. 江西省萍乡市气象局, 江西 萍乡 337002; 2. 江西井冈山大学 数理学院, 江西 吉安 343009; 3. 江西省气象局, 江西 南昌 330046; 4. 江西吉安市气象局, 江西 吉安 343000)

**摘要:**通过东亚监测网 2007 年观测资料,分析东亚地区气溶胶化学成分特性,结果表明:(1)东亚地区气溶胶化学成分随地理分布各异,其主要是受到地壳源、生物源、海洋源、工业源和光化学反应等因素影响。(2)东亚地区气溶胶化学成分存在一定的季节变化,相对而言,春、冬季季节变化明显,这与东亚地区气候季节性变化影响存在一定的关联性。其主要是受降水、高空较强西风带、天气系统(高空急流、地面冷锋、副热带高压阻挡及其西侧东风波气流)和东亚季风等季节变化的影响。(3)模式模拟 SO<sub>2</sub>、NO、NO<sub>2</sub>、HNO<sub>3</sub>、NO<sub>3</sub>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 以及 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 的结果基本上接近多数站点的观测值,具有较好的预测性能。而在其它一些站点,模式模拟结果偏差很大。尽管模拟结果与监测站点的观测值存在偏差,但基本上反映东亚地区气溶胶空间分布以及季节变化特点,偏差的原因主要是模式的结构和参数以及排放源和气象场的不确定性。

**关键词:**东亚地区;气溶胶;化学成分;特性分析;数值模拟

中图分类号:S165+.2 文献标识码:A 文章编号:1000-2286(2010)01-0190-09

## A Study on the Characteristics of Aerosol Chemical Composition and Its Numerical Modeling in East Asia

WANG Ji-ming<sup>1</sup>, CAO Yan-hua<sup>2</sup>, YE Xiao-feng<sup>1</sup>, LUO Shi-juan<sup>3</sup>,  
RUAN Qi-liang<sup>4</sup>, LIU Li-quan<sup>4</sup>, DUAN Yi-ping<sup>3</sup>

(1. Pingxiang Meteorological Bureau, Pingxiang 337002, China; 2. Mathematical and Physical Academy of Jinggangshan University, Ji'an 343009, China; 3. Jiangxi Meteorological Bureau, Nanchang 330046, China; 4. Ji'an Meteorological Bureau, Ji'an 343000, China)

**Abstract:** On the basis of observations in East Asia Net during 2007, the characteristics of aerosol chemical composition in East Asia were analyzed. The analysis showed that: (1) the aerosol chemical composition changes with geographical distribution, the main causes are the impacts of the sources of earth crust, organism, ocean, industry and photochemical reaction on it; (2) the aerosol chemical composition changes with seasonal variation, comparatively speaking, variation in spring and winter is remarkable, the main cause is the seasonal climate changes in East Asia. (3) the simulated results of SO<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, HNO<sub>3</sub>, NO<sub>3</sub>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> and SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> are close to the most observations with good predictability, but there are some deviations in some stations. Although there are some bias between the simulated results and the actual observations, The simulation basically

收稿日期:2009-10-27 修回日期:2009-12-09

基金项目:江西省科技攻关项目资助(【2008】009)

作者简介:王吉明(1963-)男,工程师,主要从事气象科学研究, E-mail:wjm\_0825@163.com.

reflects the features of the spatial distribution of aerosols in East Asia and the seasonal variations, the main cause of the bias is the uncertainty of the model structure and parameters, emission sources and the atmospheric field.

**Key words:** Asian region; aerosol; chemical composition; characteristic analysis; numerical model

气溶胶对环境和全球气候影响的作用越来越明显,这主要是因为气溶胶可以通过散射、吸收太阳辐射和地面长波辐射改变地-气系统的辐射平衡直接影响气候,还可作为云凝结核,通过改变云的宏观特性,特别是改变云的生命期和光学特性来间接影响气候。此外,气溶胶粒子还能够促进酸沉降,导致城市中光化学烟雾的形成和大气能见度下降等<sup>[1]</sup>,因此有关大气气溶胶的研究越来越受到人们的关注。

研究大气气溶胶的物理状态和组成以及气溶胶在区域和全球尺度上的分布,尤其是研究人类活动产生的气溶胶对大气过程和气候强迫的扰动,是大气气溶胶研究的最重要的一个方面<sup>[2]</sup>。大气气溶胶在形成和演变过程中,随时间、地理位置、粒子产生的途径等不同,气溶胶的大气数浓度、质量浓度、尺度分布、化学组成等是不同的。在以往研究中,针对不同的研究目的,发展了许多不同复杂程度的气溶胶动力化学模式。模式从侧重于研究气溶胶形成机制到与复杂的空气质量模式相结合研究城市、区域环境污染问题,甚至研究气溶胶的全球气候影响问题。如 Russell 等<sup>[3-5]</sup>用一个轨迹模式研究 Los Angeles 地区硝酸盐气溶胶特性,但模式没有考虑气溶胶的尺度分布;Pandis 等<sup>[6]</sup>用一个拉格朗日型轨迹模式结合简化的 2 次有机气溶胶产率模型,研究了 2 次有机气溶胶的形成、输送和沉降规律,并应用于 Los Angeles 地区空气污染事件研究;Pinlinis 等<sup>[7-8]</sup>用三维欧拉光化学气相气溶胶模式,研究 California 南部地区气溶胶的化学特性。另外,还有许多光化学模式包括气溶胶动力过程模块,Russell 等<sup>[9]</sup>对此作了总结,这些模式有:SAQM-AERO<sup>[10]</sup>、URM<sup>[11]</sup>以及 MODELS23/CMAQ 的气溶胶模式 (RPM)<sup>[12-13]</sup>等。

我国学者在气溶胶模拟方面也做了许多工作。赵春生等<sup>[14]</sup>建立了一个包含气溶胶微物理过程并可以描述粒子尺度变化的大气气溶胶动力模式,加入一个简化的海洋 DMS 化学机制,模拟了遥远海洋大气边界层典型气象条件下由 DMS 到 CCN 的形成过程;黄美元等<sup>[15]</sup>设计和建立了适合东亚地区的沙尘气溶胶模式,该模式包括新的起沙机制模型,粒子采用分档处理,并考虑了一定条件下气溶胶微物理过程。这些模式的主要区别在于对 2 次有机气溶胶 (SOA) 以及气溶胶粒子谱分布的处理。考虑到东亚地区气溶胶前期研究主要局限于日本和中国,缺乏统一观测资料。为此,通过 2007 年东亚地区监测网数据,分析了东亚地区气溶胶化学成分特性,同时,通过中科院大气物理研究所研制的嵌套网格空气质量预报模式系统 (NAQPMS)<sup>[16]</sup>,利用 NCEP/NCAR 再分析资料,对东亚地区气溶胶春、夏、冬季典型化学成分进行了模拟。

## 1 研究区域及资料来源

### 1.1 研究区域

研究区域限于东亚地区,参考区域 75°E~160°E,5°S~60°N,包括 10 个国家,分别是俄罗斯、蒙古、中国、韩国、日本、泰国、越南、马来西亚、印尼和菲律宾。东亚各监测站位置分布及其的标号如图 1 所示。

### 1.2 资料来源

数据资料来源于东亚酸雨监测网 (<http://www.adorc.gr.jp>) 2007 年观测资料,监测网共有 41 个观测站,分布在东亚地区 10 个国家,详细情况参阅文献 [17] 和 [18],数值模式均采用中科院大气物理研究所王自发等<sup>[16]</sup>研制的嵌套网格空气质量预报模式系统 (NAQPMS),排放源资料由日本酸沉降与氧化剂研究中心 (ADORC) 提供,以 2007 年 NCEP/NCAR (美国气象环境预报中心

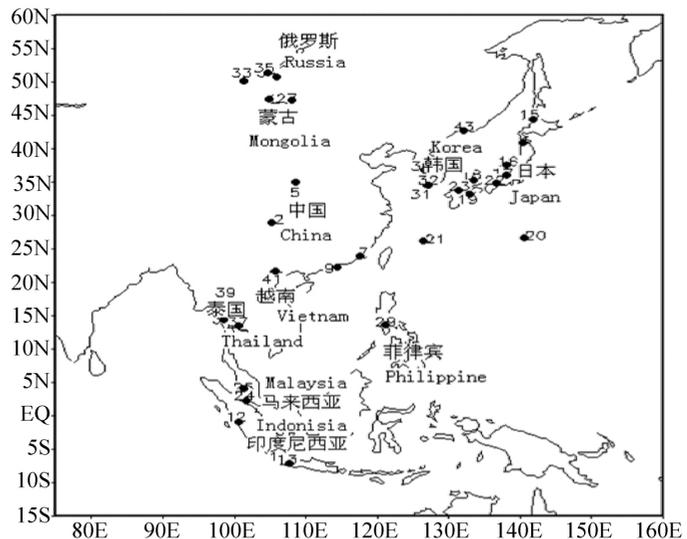


图 1 东亚监测网监测站点分布示意图

Fig. 1 Distribution of 41 monitoring sites of EANET

(NCEP) 和美国国家大气研究中心(NCAR) 月平均再分析资料(<http://dss.ucar.edu/pub/reanalysis>) 作为模式的气象驱动场。

## 2 气溶胶地理分布

### 2.1 气溶胶化学成分地域分布特征

依据观测资料分析,得出东亚地区气溶胶化学成分地域分布特征。

表 1 2007 年东亚地区气溶胶化学成分地域分布情况  
Tab.1 Distribution of aerosol over the East Asia in 2007

国家或地区 (Country or Region)	PM <sub>10</sub> / ( $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ )	SO <sub>2</sub> / ( $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ )	NO/ ( $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ )	NO <sub>2</sub> / ( $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ )	NO <sub>x</sub> / ( $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ )	HCL/ ( $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ )	NH <sub>3</sub> / ( $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ )	HNO <sub>3</sub> / ( $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ )
俄罗斯(Russia)	*	21.1	*	*	*	4.7	3.8	2.0
蒙古(Mongolia)	*	*	*	*	*	0.85	27.7	0.6
中国(China)								
西北地区(Northwest Region)	1 472	61.4	*	33.2	*	*	*	*
西南地区(Southwest Region)	1 148	120.2	*	55.9	*	*	*	*
东南地区(Southeast Region)	726	102.5	*	136.1	*	*	*	*
华南地区(South China)	609	120.5	*	233.6	*	*	*	*
韩国(Korea)	*	*	*	*	*	0.8	14.8	1.5
日本(Japan)								
北部地区(Northland)	224	3.7	0.45	37.2	11.5	*	*	*
中部地区(Midland)	223	4.0	1.2	*	11.7	*	*	*
南部地区(Southland)	288	10.2	2.5	47.2	32.2	*	*	*
南部海域(South Waters)	315	8.5	1.2	*	13.3	*	*	*
越南(Viet Nam)	*	29.4	*	*	*	9.4	39.3	3.6
泰国(Thai Land)	*	*	*	*	*	10.4	71.8	2.6
北部地区(Northland)	82	4.0	227	240.1	*	*	*	*
南部地区(Southland)	340	45	300.5	303.5	*	*	*	*
马来西亚(Malaysia)	*	31.8	*	*	*	1.7	61.6	8.4
北部地区(Northland)	*	*	*	10.6	466	*	*	*
南部地区(Southland)	*	*	*	319.7	607	*	*	*
印度尼西亚(Indonesia)	*	4.6	*	*	*	7.0	23	1.9
菲律宾(Philippines)	*	29.6	*	*	*	7.1	68.3	2.7

\* 表示部分资料缺失。

从表 1 可见,中国西北( $1\ 472\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ )和西南地区( $1\ 148\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ )的 PM<sub>10</sub>(可吸入颗粒物)质量浓度远高于其他国家含量,日本南部地区、南部海域高于北部和中部地区,泰国与日本情况类似;中国西南和华南地区 SO<sub>2</sub> 浓度明显高于其他国家约为  $120\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,印度尼西亚含量最低,其中日本南部地区、南部海域高于北部和中部地区;越南、马来西亚、菲律宾的含量大致相当,约为  $30.0\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ ;NO、NO<sub>x</sub> 高值区分别位于泰国( $227 \sim 300.5\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ )和马来西亚( $466 \sim 607\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ );日本含量最低,其南部地区高于其他地区;NO<sub>2</sub> 高值区分布在马来西亚南部地区、泰国以及中国的华南地区,其中马来西亚南部地区和泰国南部地区含量最高,低值中心位于日本北部和南部地区以及中国西北和马来西亚北部地区;各国 HCL ( $<11\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ )和 HNO<sub>3</sub> ( $<9\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ )分布较均匀;NH<sub>3</sub> 高值区位于泰国、马来西亚、菲律宾,最大中心出现在泰国为  $71.8\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,最低中心位于俄罗斯  $3.8\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

### 2.2 气溶胶化学成分中阳离子 Na<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、K<sup>+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>的地域分布特征

表 2 表明:(1)Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup> 高质量浓度区位于菲律宾分别为  $15.0\ 8.2\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,俄罗斯、蒙古、韩国、泰国、越南、马来西亚、印度尼西亚 Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup> 含量均低于  $3.0\ \mu\text{g}/\text{m}^3$  和  $6\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。其中俄罗斯 Na<sup>+</sup> 最低为  $0.9\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,蒙古 K<sup>+</sup> 最低约为  $0.6\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ ;(2)各国 Mg<sup>2+</sup> 质量浓度含量分布较均匀,均在  $2\ \mu\text{g}/\text{m}^3$  以下,其中韩国最低。(3)Ca<sup>2+</sup> 高质量浓度区位于蒙古,越南,其中蒙古含量最高,而其他国家含量均低于

6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。(4)  $\text{NH}_4^+$  质量浓度含量高的地区有越南、韩国、俄罗斯;最大值为 11.2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  位于越南,最小值位于印度尼西亚为 2.0  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

表 2 2007 年东亚地区气溶胶化学成分中离子地域分布情况

Tab. 2 Ions distribution of aerosol over the East Asia in 2007

国家 Country	$\text{Na}^+$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{K}^+$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{NH}_4^+$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{NO}_3^-$	$\text{Cl}^-$
俄罗斯 (Russia)	0.9	0.53	1.6	2.8	8.4	12.4	6.3	4.2
蒙古 (Mongolia)	1.3	1.2	0.6	16.7	2.8	13.6	5.5	3.1
韩国 (Korea)	2.3	0.1	3.0	1.1	9.7	29.3	3.0	2.7
泰国 (Thai Land)	1.4	0.6	5.3	5.1	6.7	9.6	7.1	3.9
越南 (Viet Nam)	2.8	1.2	3.2	13.9	11.2	21.1	3.5	7.8
马来西亚 (Malaysia)	2.2	0.35	2.8	3.9	7.2	25.7	3.7	0.8
印度尼西亚 (Indonesia)	2.0	0.9	2.0	2.0	2.0	9.1	3.0	0.7
菲律宾 (Philippines)	15.0	0.7	8.2	0.2	4.2	16.4	5.1	8.4

### 2.3 气溶胶化学成分阴离子 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$ 的地域分布特征

(1)  $\text{SO}_4^{2-}$  高值区位于韩国、马来西亚、越南,其中最大值为 29.3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  位于韩国;最小值在泰国和印度尼西亚约为 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。其他国家在 12 ~ 16  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。(2) 各国  $\text{NO}_3^-$  分布均匀,含量约在 3.0 ~ 7  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  韩国和印度尼西亚最低。(3)  $\text{Cl}^-$  高浓度区涵盖菲律宾、越南,其中高值中心位于菲律宾为 8.4  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ;而马来西亚、印度尼西亚含量最低小于 1.0  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ;其他地区在 3 ~ 5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

综合上述分析,东亚地区气溶胶化学成分随地理分布各异,如图 2 所示,菲律宾  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Cl}^-$  含量高,蒙古  $\text{Ca}^{2+}$  居东亚地区之首, $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  质量浓度高值区分别位于韩国、越南;各国  $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{NO}_3^-$  浓度分布较均匀,其主要是受到海洋源、地壳源、生物源、工业源和光化学反应的影响,如:海洋源影响:菲律宾气溶胶中  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Cl}^-$  含量高,主要是由于海域盐度分布不同造成的,海洋表面盐度的分布从副热带海区分别向两侧的高纬度和低纬度递减<sup>[19]</sup>。地壳源影响:气溶胶化学成分的含量与下垫面的土壤地质结构有关,土壤中碱金属  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$  等含量由南至北逐渐递增<sup>[20]</sup>。蒙古  $\text{Ca}^{2+}$  含量高,主要原因是其位于沙尘源区,沙尘粒子中主要含有  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  等离子<sup>[21]</sup>。生物源影响:北部地区植被自然条件差,碱性土壤的  $\text{NH}_3$  以及源自有机物和含  $\text{NH}_3$  农田肥料易挥发至大气中去;工业源和光化学反应影响:气溶胶中  $\text{NO}_3^-$  离子,一部分主要源于人为或工业污染源排放的  $\text{NO}_x$  和尘埃,另外有相当部分的  $\text{NO}_3^-$  可能来自空气放电产生的  $\text{NO}_x$ <sup>[22]</sup>。

## 3 气溶胶化学成分季节分布特征

### 3.1 气溶胶化学成分季节变化

$\text{PM}_{10}$  (图 2) 季节变化显著区位于中国,尤其是西北和西南地区春、冬季,其浓度超过国家环境空气质量二级标准 (100  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ),西北地区为 138  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (春),101  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (冬),西南地区为 161  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (春),101  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (冬),夏、秋季相对稳定,低值区位于日本,其南部地区春、冬季变化较明显; $\text{NO}_2$  季节变化显著区位于泰国、马来西亚南部地区以及中国华南地区。其中中国华南地区秋、春季变化较明显,泰国北部地区则春、冬季变化明显,高值区位于泰国北部地区和马来西亚南部地区,分别约为 28, 32.6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  和 28, 29.8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ;  $\text{NO}$  和  $\text{NO}_x$  的季节变化显著区位于泰国,  $\text{NO}$  北部地区变化幅度大于南部地区,春、夏、秋、冬季质量浓度值分别为 18.9, 21.6, 28.5, 20  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $\text{NO}_x$  南部地区变化幅度大于北部地区,春、夏、秋、冬季质量浓度值分别为 37.4, 33.2, 42.7, 43.1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 其中秋季质量浓度最大;日本地区  $\text{NO}$  和  $\text{NO}_x$  分布均匀均低于 5.0  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ;  $\text{SO}_2$  季节变化显著区位于中国西南和华南地区。春、夏、冬季高值中心位于西南地区,分别为 19.2, 13.6, 7.8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 秋季则位于华南地区为 13.6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ;低值区位于日本,四季分布均匀,均在 2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  以下;  $\text{HCl}$  与  $\text{HNO}_3$  含量四季都较低,分别均在 4.0  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  和 1.2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  以下,相对而言,菲律宾  $\text{HCl}$  含量冬季最高为 3.95  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,春季次之为 2.0  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ;季节变化明显,俄罗斯、蒙古、以

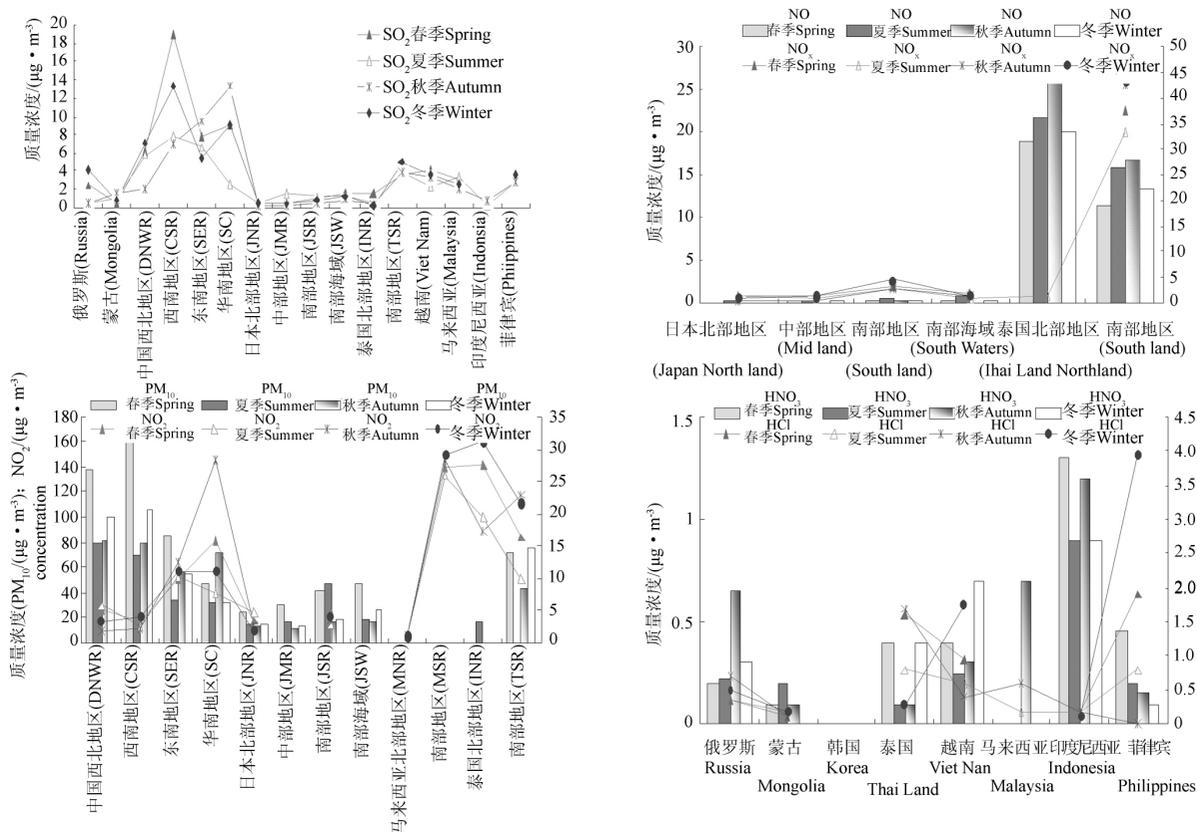


图 2 东亚地区气溶胶化学成分季节分布示意

Fig. 2 Schematic of seasonal distribution of aerosol over the East Asia

及马来西亚含量低,四季变化不明显,均在  $0.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  以下;  $\text{HNO}_3$  含量最大区域位于马来西亚,春秋季高于其他季节分别为  $1.3$  和  $1.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,夏冬季相当,蒙古含量最低 ( $<0.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )。

### 3.2 气溶胶化学成分阴、阳离子的季节变化

东亚各地区  $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{Na}^+$  以及  $\text{Ca}^{2+}$  (图 3) 季节分布均匀,变化不很明显,分别均低于  $0.7$ 、 $2.5$ 、 $2.4$ 、 $2.8$ 、 $4.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,其中  $\text{Mg}^{2+}$  季节变化相对明显区位于印度尼西亚、越南和蒙古;  $\text{K}^+$  季节变化相对明显区位于菲律宾,春、冬季较明显。  $\text{NH}_4^+$  季节变化相对明显区位于越南、韩国;  $\text{Na}^+$  季节变化相对明显区位于菲律宾,春、冬季较明显。  $\text{Ca}^{2+}$  季节变化相对明显区位于越南、蒙古,秋、冬季变化较明显。  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$  以及  $\text{Cl}^-$  含量分别均低于  $5.8$ 、 $3.5$ 、 $3.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,季节变化幅度不大,其中:  $\text{SO}_4^{2-}$  季节变化相对明显区位于越南、韩国,且春、秋、冬季变化较明显。  $\text{NO}_3^-$  季节变化相对明显区位于菲律宾、泰国,其中春、秋、冬季变化较明显。  $\text{Cl}^-$  随季节变化相对明显区位于越南,其中冬、春季较明显。

从上可知:气溶胶化学成分存在一定的季节变化,相对而言,春、冬季季节变化明显,这与东亚地区气候季节性变化影响存在一定的关联性,如:中国北部地区春、冬季气候干燥少雨,不易因降水湿清除而使气溶胶悬浮于空中持续时间长;此外,沙尘源区沙土松散,受大风扬沙影响也易导致大气中沙尘气溶胶浓度偏高;再者春、冬季高空存在较强的西风带,在天气系统冷锋影响下,大气中气溶胶易随大风扬起而由锋前强烈抬升气流输送到对流层中层,在高空西风急流作用下输送到下游地区。而导致下游地区(如日本南部海域)气溶胶质量浓度偏高。夏、秋季节,受副热带高压的阻挡及其西侧东风波气流和东亚季风影响,大气中的气溶胶易在此地区(如:华南地区、东南地区和江浙沿海以及环渤海湾地区)上空聚集,致使气溶胶质量浓度偏高。

## 4 模式模拟结果分析

通过运行中科院大气物理研究所研制的嵌套网格空气质量预报模式系统 (NAQPMS) [16],利用 NCEP/NCAR 再分析资料,对东亚地区 2007 年气溶胶春、夏、冬季典型化学成分进行了模拟,模拟结果如

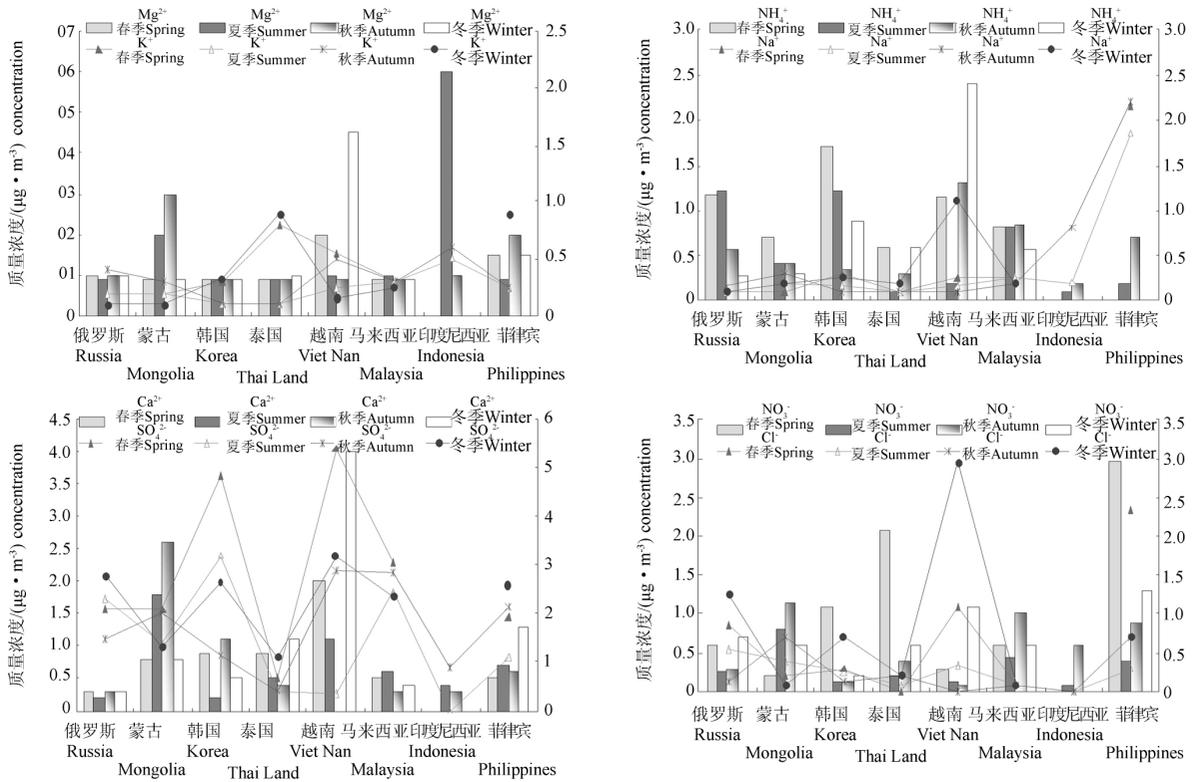


图 3 东亚地区气溶胶化学成分阴、阳离子季节分布示意

Fig. 3 Schematic of seasonal distribution of anion and cation in aerosol over the East Asia

图 4 所示。

中国环渤海地区、西南地区、华北地区和江浙一带以及韩国、日本西岸中部地区为 SO<sub>2</sub> (图 4: a ~ c) 季节变化明显区, 最高质量浓度区位于中国环渤海地区和华南地区。地理分布稳定少变, 夏季变化最为明显为 24 ~ 27 μg/m<sup>3</sup>, 高于其他季节 6.0 μg/m<sup>3</sup>。与实测情况相比, SO<sub>2</sub> 季节变化显著区位于中国西南和华南地区: 春、夏、冬季高值中心位于西南地区, 分别为 19.2, 13.6 和 7.8 μg/m<sup>3</sup>, 模式能模拟出 SO<sub>2</sub> 季节变化显著区, 与实际情况的季节分布趋势一致, 模拟值略偏高。

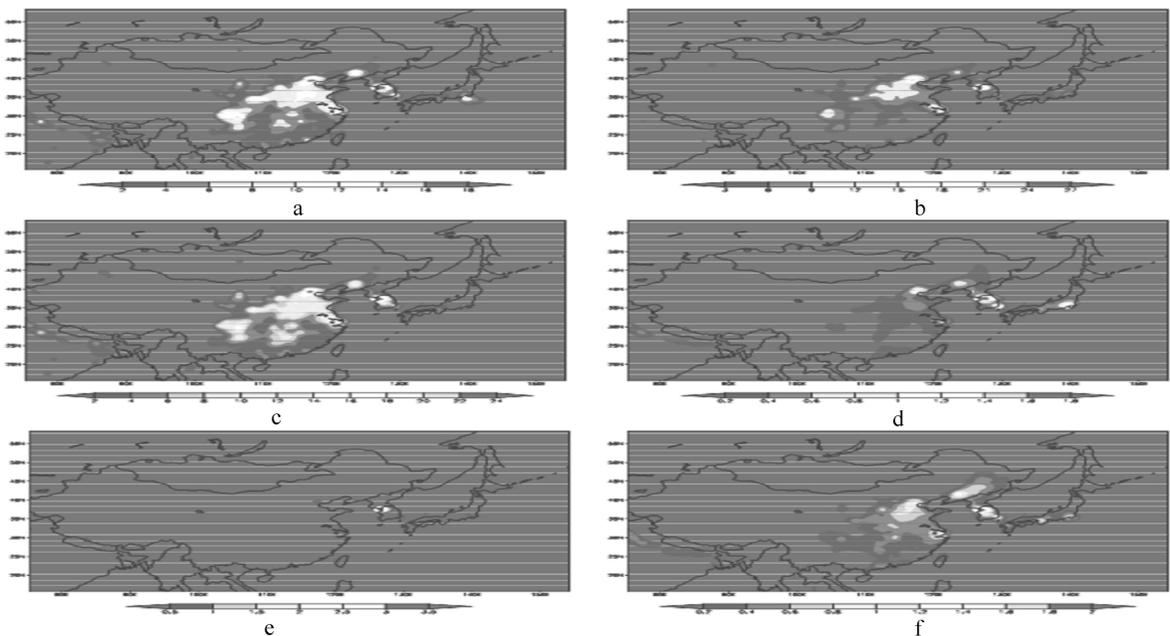


图 4 2007 年春(a)、夏(b)、冬(c) SO<sub>2</sub>、春(d)、夏(e)、冬(f) NO 模拟浓度

Fig. 4 Schematic of seasonal distribution of SO<sub>2</sub> and NO simulated by NAQPMs in 2007

NO (图 4:d~f) 春、冬季变化明显区主要在中国环渤海地区、韩国以及日本西岸中部地区,夏季则位于韩国,其中最高质量浓度区位于韩国,夏季变化最明显为  $3 \sim 3.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。地理分布夏季区域缩小仅位于韩国,而其他两季位置基本未变。与实测情况相比,NO 季节变化显著区位于泰国北部地区,春、夏、冬季浓度值分别为  $18.9 \ 21.6 \ 20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  模式不能模拟出实际情况,引起较大偏差原因这可能与 NO 的化学性质有关,因为 NO 在大气中易被氧化而转化成其他化学物质,如: $2\text{NO} + \text{O}_2 = 2\text{NO}_2$ 。

NO<sub>2</sub> (图 5:a~c) 与 NO 的季节变化基本相似,明显区主要分布在中国环渤海地区、韩国以及日本西岸中部地区,最高质量浓度区位于韩国,其中夏季变化最明显为  $40 \sim 45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。地理分布区域随季节变化少变。与实际情况相比较,NO<sub>2</sub> 季节变化显著区位于泰国、其北部地区春、冬季变化明显,高值区位于泰国北部地区和马来西亚南部地区,分别约为  $2 \ 832.6$  和  $28 \ 29.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ;模拟结果与实际情况有出入。究其原因,可能与 NO<sub>2</sub> 遇大气中水汽而发生化学反应有关,如: $3\text{NO}_2 + \text{H}_2\text{O} = 2\text{HNO}_3 + \text{NO}$ ;  $4\text{NO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 = 4\text{HNO}_3$ 。

HNO<sub>3</sub> (图 5:d~f) 春、冬季变化明显区主要位于东南亚滨海区,夏季位于西太平洋南部地区、韩国以及日本南部地区,最高质量浓度区位于韩国为  $6.5 \sim 7.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$  春、冬两季分布基本一致,相对而言,夏季季节变化明显些,地理分布不同。与实际相比,HNO<sub>3</sub> 含量最大区域位于马来西亚,春秋两季高于其他季节分别为  $1.3$  和  $1.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  夏冬季相当,蒙古含量最低 ( $<0.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 模式能够较好地模拟出东南亚滨海区季节变化明显区(如马来西亚,但韩国实测资料缺,无法比较)。

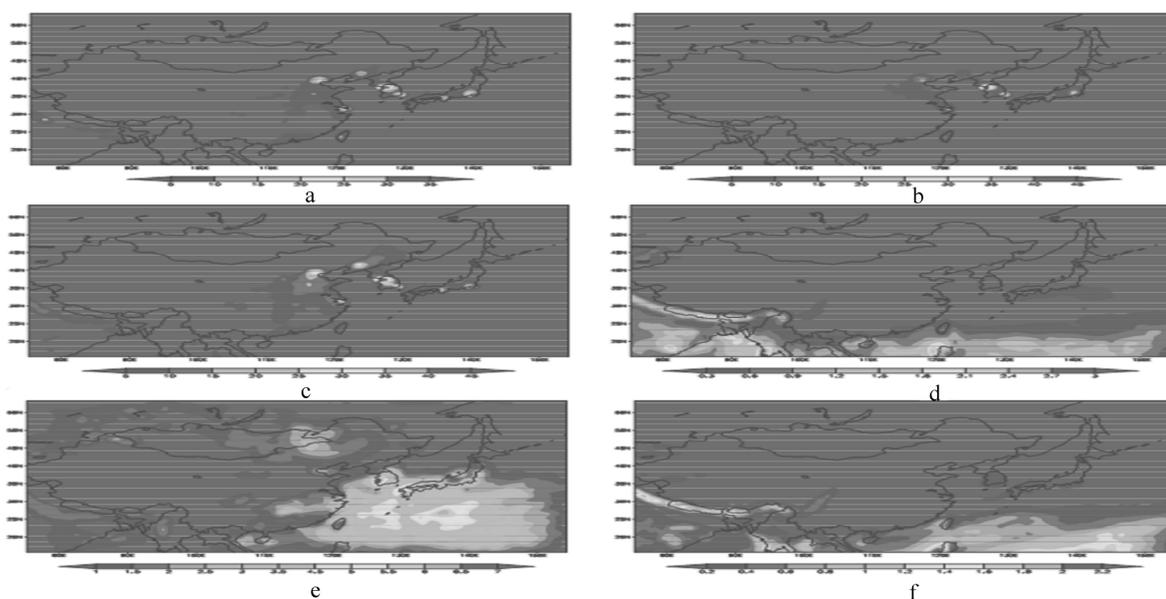


图 5 2007 年春(a)、夏(b)、冬(c)NO<sub>2</sub>、春(d)、夏(e)、冬(f)HNO<sub>3</sub> 模拟浓度

Fig. 5 Schematic of seasonal distribution of NO<sub>2</sub> and HNO<sub>3</sub> simulated by NAQPMS in 2007

NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (图 6:a~c) 季节变化明显区主要分布在西太平洋及东南亚海域,冬季分布区域小,变化明显。夏、冬季 ( $160 \sim 180 \mu\text{mol}/\text{m}^3$ ) 高于春季 ( $90 \sim 100 \mu\text{mol}/\text{m}^3$ )。与实际情况比较,NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 低于  $3.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 季节变化幅度不大,NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 季节变化相对明显区位于菲律宾、泰国。依据 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 的单位 mol 与 g 的换算可知,模式的能够模拟出 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 的实际高浓度区及其季节变化,与实际观测值基本吻合。

NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (图 6:d~f) 春、冬季变化明显区主要分布在中国西南地区、长江以南地区以及西太平洋地区,其中最明显变化区主要在中国东部沿海一线,约为  $2.4 \sim 3.5 \mu\text{mol}/\text{m}^3$ ,夏季主要分布在中国(除西北地区外)、韩国、日本北部及西北岸海区,最大浓度为  $3.5 \sim 4.0 \mu\text{mol}/\text{m}^3$ ,夏季分布区域更广。与实际情况相比,NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 季节分布均匀,变化不很明显,低于  $2.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 季节变化相对明显区位于越南、韩国;模式能够模拟出 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 季节变化趋势,依据单位转算可知:模拟值低于实测值。偏差原因可能与模式参数以及模式和气象场的不确定性存在某种关系。

SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (图 7:a~c) 春、夏季变化明显区主要分布在日本、中国西南地区、江浙一带,其中最高质量浓度区(春: $90 \sim 100 \mu\text{mol}/\text{m}^3$ ;秋: $55 \sim 60 \mu\text{mol}/\text{m}^3$ ) 位于日本,冬季则位于中国西南地区,江浙一带,其中

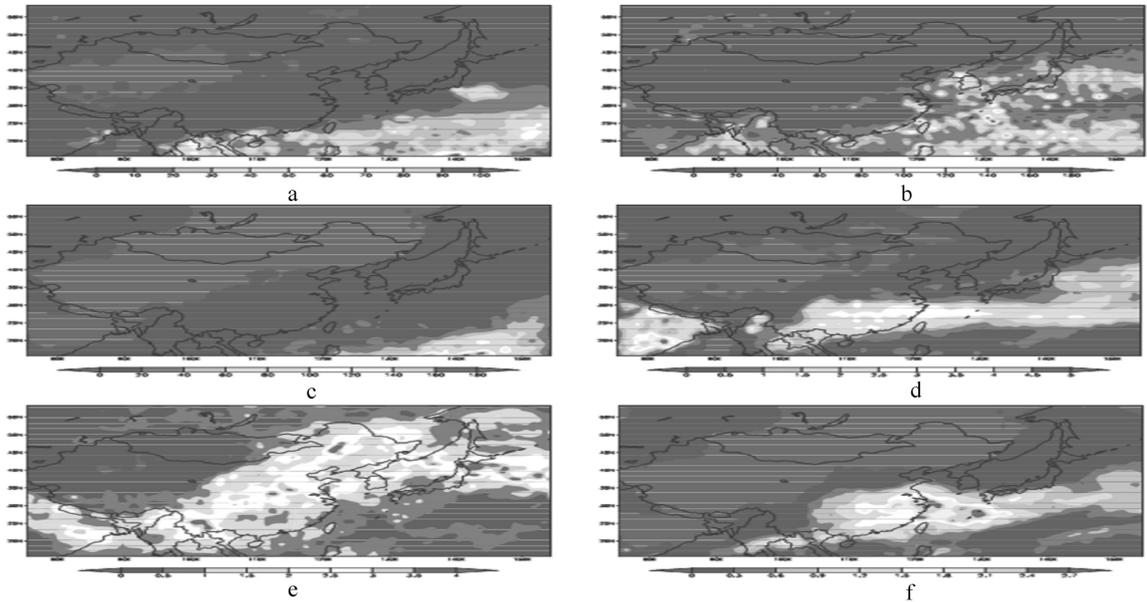


图 6 2007 年春(a)、夏(b)、冬(c)  $\text{NO}_3^-$ 、春(d)、夏(e)、冬(f)  $\text{NH}_4^+$  模拟浓度

Fig. 6 Schematic of seasonal distribution of  $\text{NO}_3^-$  and  $\text{NH}_4^+$  simulated by NAQPMS in 2007

最高浓度区 ( $14 \sim 16 \mu\text{mol}/\text{m}^3$ ) 位于中国西南地区。与实测值相比较,  $\text{SO}_4^{2-}$  含量低于  $5.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 季节变化幅度不大, 其中:  $\text{SO}_4^{2-}$  季节变化相对明显区位于越南、韩国, 且春、秋、冬季变化较明显。(中国、日本季节资料缺, 不能比较, 但是从地理位置分布来看, 模拟结果能够较好的反映实际情况)。

从模式模拟  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{HNO}_3$ 、 $\text{NO}_3$ 、 $\text{NH}_4^+$  以及  $\text{SO}_4^{2-}$  的结果与观测值相比较得知: 模式模拟

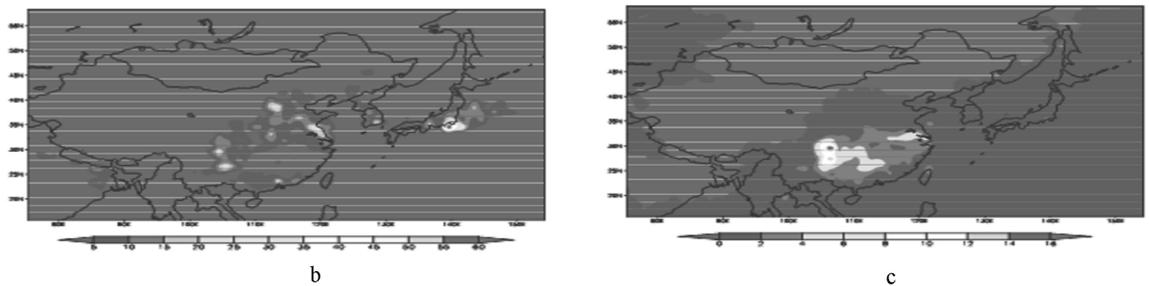


图 7 2007 年春(a)、夏(b)、冬(c)  $\text{SO}_4^{2-}$  模拟浓度/ $(\mu\text{mol}/\text{m}^3)$

Fig. 7 Schematic of seasonal distribution of  $\text{SO}_4^{2-}$  simulated by NAQPMS in 2007

结果基本上接近多数站点的观测值, 具有较好的预测性能。如: 模式能模拟出  $\text{SO}_2$  季节变化显著区, 与实际情况的季节分布趋势一致, 模拟值略偏高; 模式的能够模拟出  $\text{NO}_3^-$  的实际高浓度区及其季节变化, 与实际观测值基本吻合。而在其它一些站点, 模式模拟结果偏差很大。如: 模式不能模拟出  $\text{NO}$  实际情况, 引起较大偏差原因可能与  $\text{NO}$  的化学性质有关, 这是因为在大气中,  $\text{NO}$  易被氧化而转化成其他化学物质 ( $2\text{NO} + \text{O}_2 = 2\text{NO}_2$ )。模拟结果与  $\text{NO}_2$  实际情况有出入。其原因可能与  $\text{NO}_2$  遇大气中水汽而发生化学反应有关 ( $3\text{NO}_2 + \text{H}_2\text{O} = 2\text{HNO}_3 + \text{NO}$ ;  $4\text{NO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 = 4\text{HNO}_3$ )。尽管模拟结果与监测站点的观测值存在偏差, 但是基本上反映了东亚地区气溶胶空间分布以及季节变化特点。偏差的原因主要是模式的结构和参数以及排放源和气象场的不确定性。

## 5 结 论

通过对东亚地区气溶胶化学成分的地理和季节变化分析以及对其进行数值模拟, 得到如下结论:

(1) 东亚地区气溶胶化学成分随地理分布各异,其主要是受到地壳源、生物源、海洋源、工业源和光化学反应等因素影响;(2) 东亚地区气溶胶化学成分存在一定的季节变化,相对而言,春、冬季季节变化明显,这与东亚地区气候季节性变化影响存在一定的关联性。其主要是受降水、高空较强西风带、天气系统(高空急流、地面冷锋、副热带高压阻挡及其西侧东风波气流)和东亚季风等季节变化的影响;(3) 模式模拟  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{HNO}_3$ 、 $\text{NO}_3$ 、 $\text{NH}_4^+$  以及  $\text{SO}_4^{2-}$  的结果基本上接近多数站点的观测值,具有较好的预测性能。而在其它一些站点,模式模拟结果偏差很大。尽管模拟结果与监测站点的观测值存在偏差,但基本上反映了东亚地区气溶胶空间分布以及季节变化特点,偏差的原因主要是模式的结构和参数以及排放源和气象场的不确定性。

#### 参考文献:

- [1] Johnson M V, Wexler A S. MS of individual aerosol particles [J]. *Anal Chem*, 1995, 23(67): 721A - 72A.
- [2] Dockery D W, Pope III C A, Xu X, et al. An association between air pollution and mortality in six U S Cities [J]. *New England J Med*, 1993, 329(24): 1753 - 1759.
- [3] Russell A G, McRae G J, Cass G R. Mathematical modeling of the formation and transport of ammonium nitrate aerosol [J]. *Atmos Environ*, 1983, 5(17): 949 - 964.
- [4] Russell A G, McRae G J, Cass G R. The dynamics of nitric acid production and the fate of nitrogen oxides [J]. *Atmos Environ*, 1985, 6(19): 893 - 903.
- [5] Russell A G, Cass G R. Verification of a mathematical model for aerosol nitrate and nitric acid formation and its use for control measure evaluation [J]. *Atmos Environ*, 1986, 10(20): 2011 - 2025.
- [6] Pandis S N, Harley R A, Cass G R, et al. Secondary organic aerosol formation and transport [J]. *Atmos Environ*, 1992, 26(A): 2269 - 2282.
- [7] Pilinis C, Seinfeld J H. Continued development of a general equilibrium model for inorganic multicomponent atmospheric aerosols [J]. *Atmos Environ*, 1987, 11(21): 2453 - 2466.
- [8] Pilinis C, Seinfeld J H. Development and evaluation of an Eulerian photochemical gas aerosol model [J]. *Atmos Environ*, 1988, 9(22): 1985 - 2001.
- [9] Russell A, Dennis R. NARSTO critical review of photochemical models and modeling [J]. *Atmos Environ*, 2000, 12 - 14(34): 2283 - 2324.
- [10] Chang J S, Jin S, Li Y, et al. The SARMAP Air Quality Model, Final Report, Air Resources Board [R]. California Environmental Protection Agency, Sacramento, CA, 1997.
- [11] Kumar N, Odman M T, Russell A G. Multiscale air quality modeling: application to Southern California [J]. *J G R*, 1994, 99(D3): 5385 - 5397.
- [12] Binkowski F S, Shankar U. The regional particulate matter model 1: Model description and preliminary results [J]. *J G R*, 1995, 100(D12): 26191 - 26209.
- [13] Byun D W, Ching J K S. Science algorithms of the EPA Model 23 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) modeling system [R]. EPA Report No. EPA2600/R299/030 Office of Research and Development U S EPA, Washington D C, 1999.
- [14] 赵春生, 秦瑜. 海洋大气边界层中大气气溶胶产生和发展的数值模拟 // 周秀骥 [C]. 中国地区大气臭氧变化及其对气候环境的影响(二). 北京: 气象出版社, 1997: 215 - 224.
- [15] 黄美元, 王自发. 东亚地区黄沙长距离输送模式设计 [J]. *大气科学*, 1998, 22(4): 625 - 637.
- [16] 王自发, 谢付莹, 王喜全, 等. 嵌套网格空气质量预报模式系统的发展和应用 [J]. *大气科学*, 2006, 30(5): 778 - 790.
- [17] An Juling, Ueda Hiromasa, Wang Zifa, et al. Simulations of monthly mean nitrate concentration in precipitation over East Asia [J]. *Atmospheric Environment*, 2002, 26(36): 4159 - 4171.
- [18] An Juling, Ueda Hiromasa, Matsuda Kazuhide, et al. Simulated impacts of  $\text{SO}_2$  emissions from the Miyake volcano on concentration and deposition of sulfur oxides in September and October of 2000 [J]. *Atmospheric Environment*, 2003, 22(37): 3039 - 3046.
- [19] 刘明哲, 魏文寿. 沙尘源区和沉降区气溶胶粒子的理化特征 [J]. *干旱区地理*, 2003, 26(4): 334 - 339.
- [20] 任仁. 中国酸雨的去、现在和将来 [J]. *北京工业大学学报*, 1997, 23(3): 128 - 132.
- [21] Hiroshi H. Acid deposition chemistry in Asia Europe and America [J]. *Progress in Nuclear Energy*, 1998, 3/4(32): 331 - 338.
- [22] Lee K B, Hong H S, Lee S D. Chemical composition of precipitation and wet deposition of major ions on Korea peninsula [J]. *Atmospheric Environment*, 2000, 4(34): 563 - 575.