

东亚酸沉降模式不确定性分析

李磊^{1,2} 王自发² 何金海¹ 林彩燕² 谢付莹²

1 南京信息工程大学大气科学学院, 南京 210044
2 中国科学院大气物理研究所竺可桢-南森国际研究中心, 北京 100029

摘 要 酸沉降会对生态环境造成危害。要控制和减少酸沉降, 就要了解酸沉降的幅度和不确定性, 而模式研究是获得这些因子的重要工具。用东亚酸沉降模式比较计划 (MICS-Asia II) 中 7 个模式模拟的 2001 年 7 月和 12 月东亚地区酸沉降数据及东亚酸沉降监测网络 (EANET) 的观测数据, 通过相关分析发现多模式模拟的平均值可表现东亚地区酸沉降的分布特征。采用各个模式与模拟结果平均值的离散程度来表征这些模式在东亚地区的不确定性, 简要分析了目前模式模拟东亚酸沉降的不确定及其产生原因, 可为制定酸沉降的控制措施提供依据。

关键词 东亚地区 酸沉降 不确定性

文章编号 1006-9585 (2008) 03-0273-08 **中图分类号** P402 **文献标识码** A

Analysis of Acid Deposition Model Uncertainties over East Asia

LI Lei^{1,2}, WANG Zi-Fa², HE Jin-Hai¹, LIN Cai-Yan², and XIE Fu-Ying²

1 *Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044*
2 *Nansen-Zhu International Research Center, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

Abstract Acid deposition has harmful impacts on ecological system. In order to control and reduce acid deposition, it is necessary to investigate the magnitude and uncertainties of acid deposition. The chemical transport model is one of the most important tools to integrate them. The authors adopted the modeling results of 7 models used in the Model Intercomparison Project for East Asia II (MICS-Asia II) and the observations of the Acid Deposition Monitoring Network in East Asia (EANET) to discuss the model uncertainties over East Asia. The results show that mean values of the seven models can represent the distribution characters of acid deposition in East Asia. A new method is presented the model uncertainty by adopting the bias between each model results and the multi-model ensemble mean. Furthermore, the uncertainty of acid deposition simulations is analyzed by present models and is expected to offer reference for establishing control measures of acid deposition in East Asia.

Key words East Asia, acid deposition, model uncertainties

1 引言

大气酸沉降 (Acid deposition) 是指大气中的

酸性物质通过干沉降和湿沉降两种途径迁移到地表的过程。酸性湿沉降又称为大气酸性降水, 一般指 pH 值低于 5.6 的天然降雨以及酸雪、酸雾等^[1]。酸沉降对生态环境的影响是多方面的, 王代长

收稿日期 2007-04-13 收到, 2008-02-22 收到修定稿
资助项目 国家重点基础研究发展规划项目 2005CB422205
作者简介 李磊, 女, 1981 年出生, 硕士生, 主要从事大气动力学及其对大气污染的影响方面的研究。E-mail: lileisally@163.com

等^[2]研究发现:酸沉降会导致土壤中和酸的能力下降并造成养分库的耗竭,造成植物营养器官功能衰退,破坏植物细胞组织,引起森林冠层中营养离子大量淋失;还可导致地表水体酸化和水生生物死亡;此外,还可使重金属元素的溶解性增加,有利于重金属污染物进入食物链,使人类健康的风险加大。

酸沉降中又以硫沉降和氮沉降为主,高世东等^[3]发现适量的硫沉降对土壤能起到有利的作用,有利于植被生长,而过量的硫沉降则可能引起盐基离子流失、土壤酸化和有毒元素活化,使土壤贫瘠,从而对生态环境产生不利影响。当前,全球平均人为硫排放是自然硫排放的 1.5~3 倍^[4,5],全球已形成北美、欧洲和东亚 3 个 SO_2 和硫酸盐的高值中心^[6]。东亚地区人类活动不仅使污染地区硫酸盐含量显著增加,而且分布具有明显的区域分布和季节变化特征^[7],肖辉林^[8]发现氨在土壤中的化学和生物化学反应对 H^+ 离子的产生与消耗有重要影响, NH_4^+ 和 NO_3^- 输入与输出的平衡状态影响着土壤和土壤溶液系统的酸化速率。Moffat^[9]指出超过环境负荷能力的氮沉降可以改变化合物的组成成分,并改变生态系统中的动物和植物的种类,导致生物多样性减少。

由于酸沉降的危害日益加重,如何治理酸沉降就成了人们关注的焦点,而了解酸沉降的分布是规划和治理的前提,由于缺少系统的大范围观测资料,数值模拟就成了探讨污染物分布及其特征的有力工具^[10]。

国内对酸沉降模拟与分析进行了长期研究。Wang 等^[11]利用硫沉降模式研究了 1989 年东亚地区硫污染物的年平均分布;张美根等^[12]利用由区域大气模式系统 (RAMS) 和区域大气质量模式系统 (CMAQ) 耦合的空气质量模式系统,对东亚地区 2001 年春季气溶胶的输送及其化学转化过程进行了研究,结果显示模式很好地反映了气溶胶浓度的分布特征和变化规律,再现了许多观测到的重要特征。安俊岭等^[13]给出了区域尺度空气质量数值预报模型的基本物理构架,重点介绍了欧拉型输送/沉降模式对各种物理(沉降、输送)、化学(气相化学与液相化学)过程和初值与边界条件等问题的处理/简化,并利用该模型对全国空气质量作了一周(1998 年 10 月 23~29 日)预报,结果说明区域空

气质量数值预报模型能够较好地反映全国重点城市的空气质量以及污染物随时间的演变态势。王体健等^[14]建立了一个三维欧拉型排放/输送/转化/沉降模式,其主要特点是采用独立的气相化学子模式计算各种不同条件下 SO_2 的转化速率,建立转化率率的数据库,直接为欧拉模式调用,并对液相化学和湿清除过程进行了参数化处理。叶小峰等^[15]利用东亚酸沉降监测网 (EANET) 观测资料,对 2001 年东亚地区降水成分的时空分布特征进行了分析,通过与过去的观测进行对比,揭示了东亚各地酸雨分布情况及降水化学特性差异;丁国安等^[16]指出 20 世纪 90 年代已获得的降水化学资料已在大气化学、大气环境、区域气候研究等方面发挥了重要作用,但仍有必要尽快更新已有的资料。

国际上对空气污染长距离输送的关注也越来越多,使得提高对东亚地区远距离化学输送模式 (CTMs) 的原理和准确性的认识成为一个迫切需要解决的问题。为此,国际应用系统分析研究所 (IIASA)、日本酸雨和氧化剂研究中心 (ADORC) 和中国科学院大气物理研究所等单位发起了东亚酸沉降模式比较计划 (MICS-Asia),对应用于东亚目前的化学输送模式和酸沉降模式进行了比较研究^[17]。计划的第一期^[18](1998~2000 年)主要将 1993 年 1 月和 5 月 SO_2 和硫酸盐的浓度及湿沉降量的模拟结果与东亚地区的 18 个地面观测站的观测数据比较,发现模式的模拟结果在很多地区都与观测值很接近,具有很好的预报性。在影响模式的因子中,排放源的变化和污染物输送通道的变化同等重要;气象数据,特别是气象场的垂直分层,其影响远大于化学变化速率的影响。所用的 8 个模式包括了拉格朗日和欧拉两种工作框架,使用了不同的垂直分层和数值模拟方法,但所用的排放源数据、气象参数、空气湿度和化学变化速率是相同的。研究的第二阶段^[19]用一个全球模式中的排放源数据和边界条件来计算 9 个不同区域的 O_3 及其前体、气溶胶在 2001 年 3、7、12 月和 2002 年 3 月的酸沉降,并与 EANET 的观测数据做比较,发现模式的模拟结果基本上可以反映模拟区域的微量气体、气溶胶和酸沉降的分布特点。此外,还发现模式之间存在显著的差别,如:改变一个模式中气溶胶的成分所得结果与原结果的差可能比用一个模式模拟的结果与原结果的差更大,这说明模式中的参数需要

改进, 这就要做更多的敏感试验。同时还发现, 边界条件也是造成模式不确定性的重要原因, 所以要选择使模式不确定性最小的边界条件来模拟。这些模式大多是为了模拟美国和欧洲地区而开发的, 使它们适用于亚洲地区还需要做很多工作。

要改进模式, 提高模式模拟的准确度, 就是要降低模式的不确定性, 前提条件是要确定模式目前的不确定性到底有多大。不确定性是一个与测量结果相关的参数, 它描述数值扩散的特征, 此数值可合理地归因于所测变量。而模式的不确定性分析旨在对输出值提供量化的不确定性指标, 其主要源自模式本身及其输入值的不确定性, 同时分析各因子的相对重要性。模式比较研究的第二阶段中并没有对模式输出结果的不确定性以及模式中所用源数据的不确定性大小进行分析, 本文针对这一问题做了一些工作。

2 模式和资料

本文分析的是模式比较研究 (MICS) 中的 8 个模式^[20], 只选取了 NO_3^- 、 NH_4^+ 和 SO_4^{2-} 的湿沉降进行比较。因模式 5 缺少湿沉降的模拟值, 故本文所进行的计算和比较都不包括模式 5。7 个模式的模拟范围有所不同, 综合考虑之后选择模拟公共区域 ($20\sim50^\circ\text{N}$, $90\sim140^\circ\text{E}$) 作为模拟区域, 中心区域大体包括中国东部以及日本地区。在这一范围内, 2001 年 7 月和 12 月 3 种污染物都有观测值的站点共有 14 个, 分布状况是: 中国西南 1 个和南部沿海 2 个, 日本 7 个, 韩国西部 2 个, 越南 2 个。

3 结果分析

3.1 模式验证

图 1 是东亚地区 14 个站点观测和 7 个模式模拟的 NO_3^- 、 NH_4^+ 和 SO_4^{2-} 的散点图。由图可以看出, 模拟的平均值和观测值的相关性较大, 除了 7 月的 NH_4^+ 外, 其余的相关系数都在 0.5 以上, 模式的可信度在 90% 以上。

不同的污染物在不同的时间和区域的模拟结果差别很大, 而模拟结果越大绝对误差也就越大, 对于区域差异较大的地区用相对误差 (A) 更能

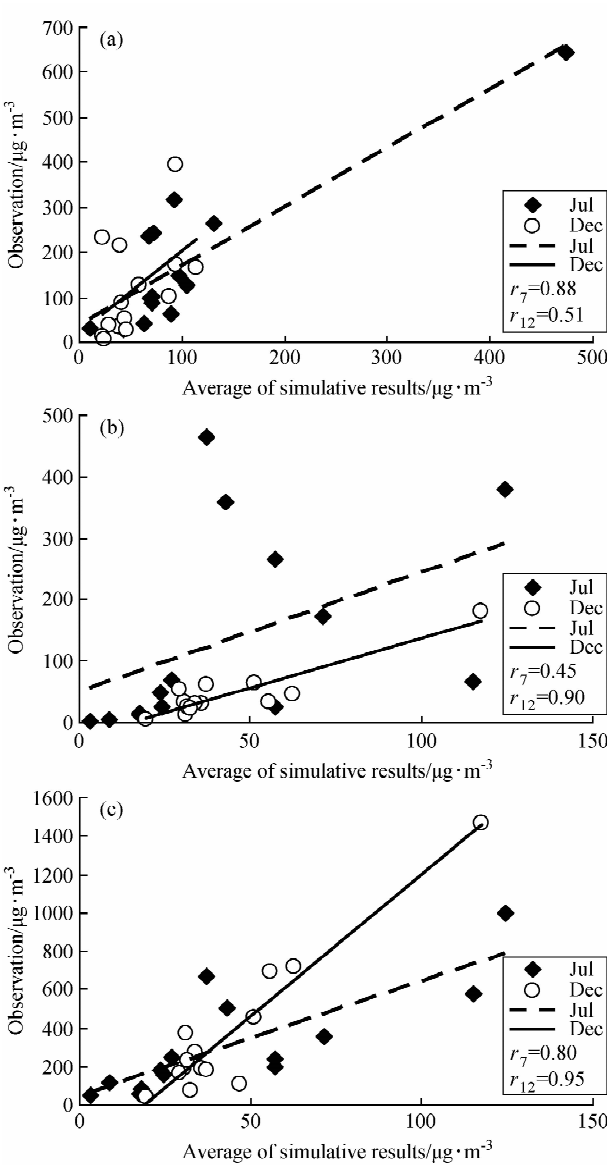


图 1 东亚地区 (a) NO_3^- 、(b) NH_4^+ 和 (c) SO_4^{2-} 湿沉降的散点图 (r_7 和 r_{12} 分别表示 7 月和 12 月模拟结果的平均值和观测值的相关系数)
Fig. 1 Scatter of (a) NO_3^- , (b) NH_4^+ and (c) SO_4^{2-} wet deposition in East Asia (r_7 and r_{12} represent the correlation coefficients between mean value of models and observation in Jul and Dec, respectively)

表征模式的不确定性, 具体定义如下:
$$A = (X_{\text{ave}} - X_{\text{obs}}) / X_{\text{obs}} \times 100\%, \quad (1)$$
其中, X_{ave} 表示模式的平均值, X_{obs} 表示观测值。
图 2 是东亚地区 14 个站点 7 个模式对 NO_3^- 、 NH_4^+ 和 SO_4^{2-} 湿沉降模拟结果的平均值的相对误差。从时间上来说, 3 种污染物 7 月的模拟结果要比 12 月好; 而从区域上来说, 在日本的模拟结果

要好一些，并且相对误差基本都在 $-100\% \sim 100\%$ 之间。由相关系数和相对误差的分析可以看出，7 个模式模拟结果的平均值基本反映了东亚地区的酸沉降分布。

3.2 模式的不确定性分析

集合离散度就是集合中各元素与它们平均值的离散程度，而标准差是反映一组数据离散程度最常用的一种量化形式，所以这里用集合离散度来表征不确定性。由前面的模式验证可知 NO_3^- 、 NH_4^+ 和 SO_4^{2-} 的湿沉降的模式平均值基本体现了它们在东亚地区的湿沉降分布，下面就以平均值代替现状进行分析。

用下式计算模式集合离散度：

$$S = \sqrt{\sum_{i=1}^7 (x_i - \bar{x})^2 / 7}, \quad i = 1, \dots, 7 \quad (2)$$

其中， x_i 表示各模式的模拟值， $\bar{x}$ 表示 7 个模式的平均值。

用 (2) 式表征模式结果的不确定性，离散度越大，不确定性越大，模式的可信度越小。图 3~5 分别是 7 月和 12 月 7 个模式 NO_3^- 、 NH_4^+ 和 SO_4^{2-} 在东亚地区的湿沉降离散度分布。从图 3 可见，对于夏季 7 月硝酸盐沉降在西太平洋部分地区、中国西北和蒙古南部地区的模拟结果准确性明显优于周围地区，而南海、渤海、日本海、朝鲜南部和韩国北部地区较差。海面上的不确定性

较小是因为海面上没有硝酸盐的排放源，陆地上的不确定性分布与模式对降水量的模拟有关，中国西北地区的观测站点缺乏也可能是原因之一。而冬季 12 月，模式不确定性在日本海和太平洋地区较大，这是因为冬季的偏北风将中国的华东和东北地区、朝鲜以及韩国的部分硝酸盐输送到太平洋和日本海。中国的华东和西南地区不确定性也比较大，这一状况与我国各地的工业发展状况有关，华东和西南地区工业比较发达，硝酸盐排放较大，加上降水也较多，对降水模拟的不确定性很容易引起硝酸盐湿沉降的不确定性。

中国的西南、华北和台湾地区无论冬夏 NH_4^+ 的模拟不确定性都比较大 (图 4)，而中国西北和太平洋地区则是全年的模拟结果都相当好，可信度高。夏季 (7 月) 对华北地区的模拟较差，这一特点的产生原因与硝酸盐类似，也是因为海面上没有排放源；而冬季 (12 月) 则是对西南地区和华东地区的模拟较差，也是因为这一地区的工业发展较快， NH_4^+ 排放量较大，而其地理条件又使得这些地区降水量也比较大，两者共同作用造成这些地区的不确定性较大。

中国的西南、华东和台湾地区全年对 SO_4^{2-} 湿沉降模拟具有较大的不确定性 (图 5)，但对中国西北和太平洋地区的模拟结果准确度高。另外，在 7 月，中国除西南、华东地区外，东北地区、

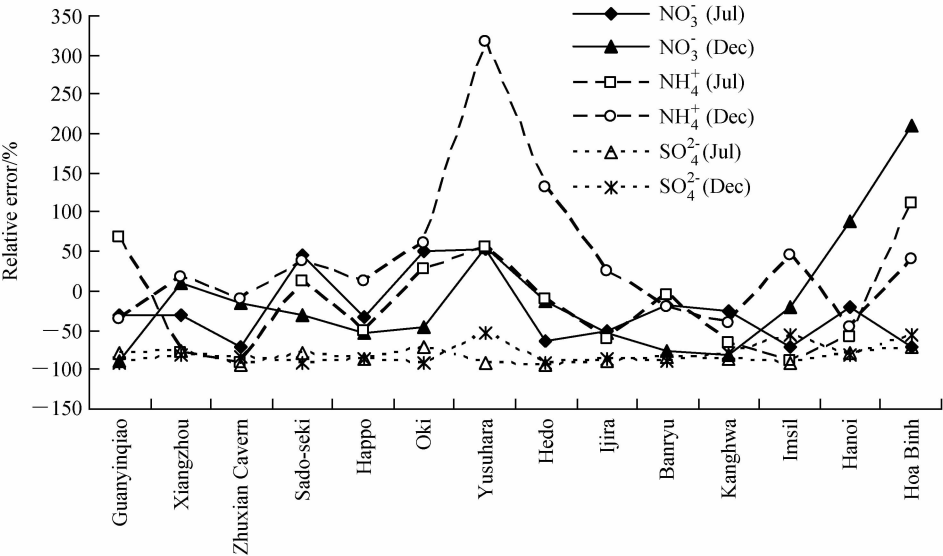


图 2 东亚酸雨观测网各站点多模式平均的 NO_3^- 、 NH_4^+ 和 SO_4^{2-} 湿沉降的相对误差
Fig. 2 The relative error of NO_3^- , NH_4^+ and SO_4^{2-} wet deposition in East Asia

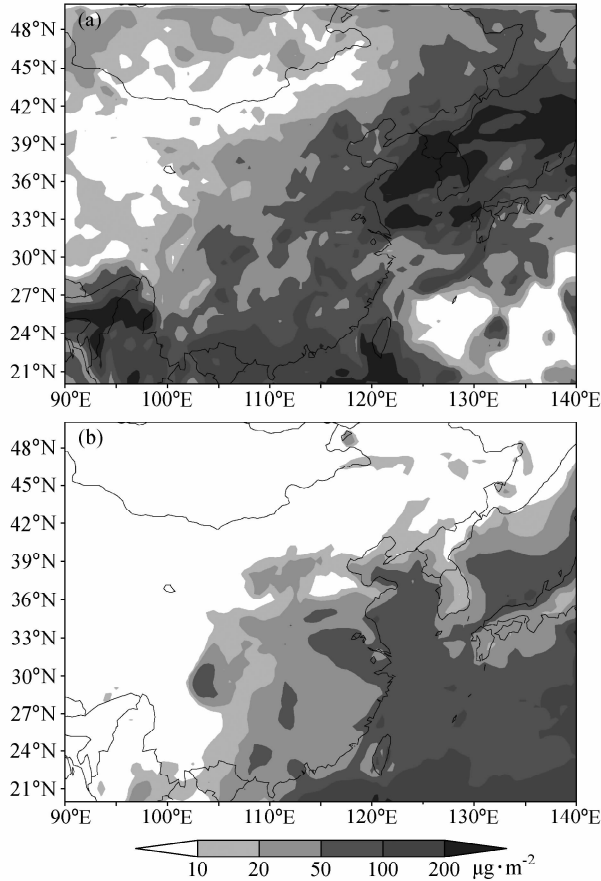


图 3 2001 年 (a) 7 月和 (b) 12 月 NO_3^- 湿沉降离散度分布
Fig. 3 Resemble spread distribution of NO_3^- wet deposition in (a) Jul and (b) Dec 2001

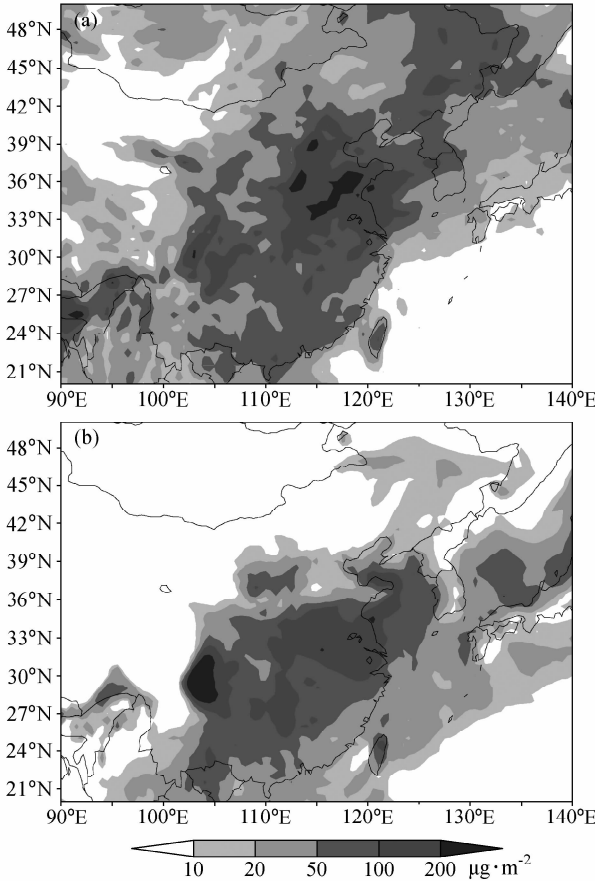


图 4 2001 年 (a) 7 月和 (b) 12 月 NH_4^+ 湿沉降离散度分布
Fig. 4 Resemble spread distribution of NH_4^+ wet deposition in (a) Jul and (b) Dec 2001

渤海地区的模拟结果可信度也不高；而 12 月，中国的华南、渤海、黄海和日本海部分地区的结果离散度都比较大，可信度都不高。

结合前面的观测数据可知，沉降量大的地区，模式的不确定性较大，可信度较差；反之，沉降量小的地区，模式的不确定性较小，可信度较高。这里需要注意的是：由于观测站点稀少，计算离散度时用 7 个模式模拟结果的平均值代替了实际的沉降量，所以会对结果产生一定的影响。由观测点的分布还可以知道，在缺少观测点的地区，模式的不确定性评估较难，但实际情况还需要进一步研究。

3.3 东亚地区的硫、氮总沉降分布特征

酸沉降分布状况与酸性污染物的排放情况密切相关，大气中的 NO_3^- 、 NH_4^+ 和 SO_4^{2-} 主要是由 NO_2 、 NH_3 和 SO_2 通过化学反应生成。东亚污染物的排放主要集中在中国的华北、华中和华东地区，东北的南部地区排放量也比较大。图 6~8

分别为多模式平均的硝酸盐、铵盐和硫酸盐总沉降在夏季和冬季的分布情况。7 月 NO_3^- 总沉降量主要分布在中国的华北、东北和台湾地区以及日本，主要原因是由于夏季降水量较大，而湿沉降与降水关系密切；另外，华北和东北是 NO_2 的主要排放区，而风场形成的是由南向北的输送通道。12 月沉降主要集中在日本和中国台湾地区，原因是冬季中国大陆降水量较少，所以湿沉降减少，污染物通过输送通道到达这两个地区，而这些地区的降水量又比较大，因而湿沉降量较大。7 月 NH_4^+ 总沉降的分布与排放源分布基本吻合，主要在中国的华东、华北、西南和台湾地区，这些地区平均风速很小，污染物无法扩散，加之夏季降水量大，本地沉降所占比例较大。而 12 月华东、西南和台湾依旧为主要沉降区，原因是除台湾外，其他地区主要是风场，且冬季大陆降水较少，但此时东北地区的污染物则被输送到日本，加上日

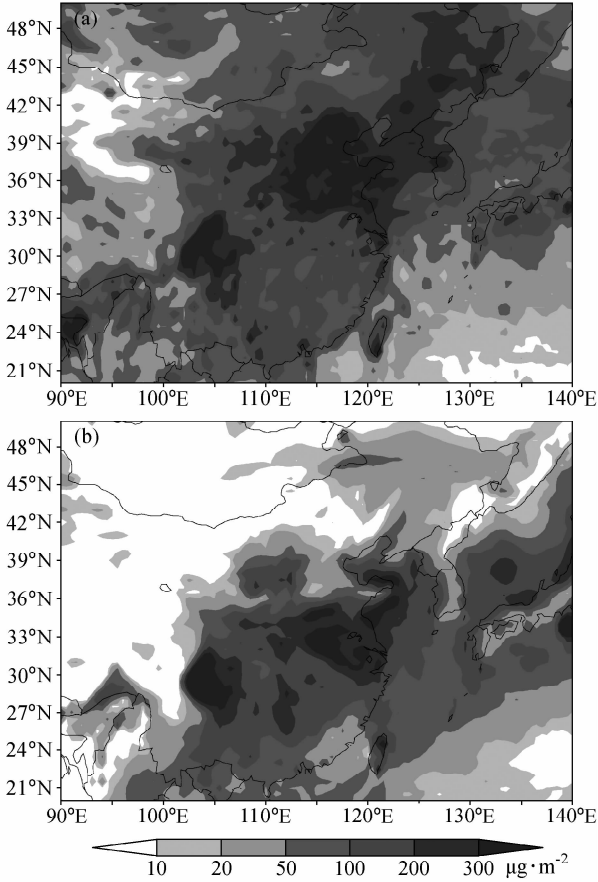


图5 2001年 (a) 7月和 (b) 12月 SO_4^{2-} 湿沉降离散度分布
Fig. 5 Resemble spread distribution of SO_4^{2-} wet deposition in (a) Jul and (b) Dec 2001

本的本地排放，再结合降水以湿沉降的形式到达地面。夏季 SO_4^{2-} 沉降分布在中国大陆地区与排放源高值区分布一致，主要在华北、华中和华东地区，尤其是中国东部经济发达地区已经成为东亚乃至全球硫污染的主要贡献源之一。另外，降水和区域输送起到很大作用。而冬季主要是中国的华东、西南和台湾地区以及日本沉降较大，究其原因，华东和西南主要是风速较小，不利于输送，而台湾和日本的沉降还有一部分原因要归结于这两个地区冬季的大量降水。

综合前面的离散度分析不难发现，排放量大、降水量大、湿沉降量大的地区模式的离散度大，反之，模式的准确度较高，这说明模式的不准确性与输入的排放源和降水量有极大的相关性，这两个参数的不确定性会对模式产生重要影响。所以要提高模式的模拟效果，就要及时更新排放源的数据，还要提高降水和风场模拟的准确度。

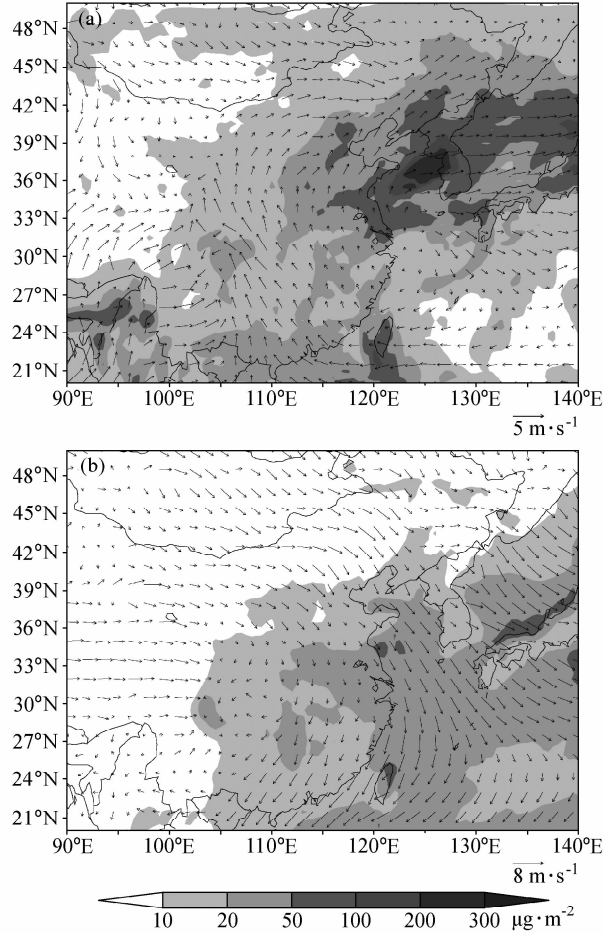


图6 多模式模拟的2001年 (a) 7月和 (b) 12月硝酸盐总沉降月平均分布 (矢量表示月平均流场)
Fig. 6 Multi-model mean nitrate deposition over East Asia in (a) Jul and (b) Dec 2001

4 结论

(1) 因为观测站点的模拟平均值和观测值的相关系数大多数都在 0.5 以上，可信度在 90% 之上，而平均值与观测值相对误差绝对值的百分率大部分都在 100% 以内，且有一半左右的相对误差在 50% 以内，所以 7 个模式模拟的平均值基本上可以表示东亚地区湿沉降的实际情况。

(2) 由集合离散度值判断模式对东亚地区湿沉降实际状况发现： NO_3^- 在中国西部和蒙古地区模拟较好，不确定性小。 NH_4^+ 模拟较好，不确定性较小的地区主要是中国的西部地区、蒙古和西太平洋的部分地区，不确定性大的地区主要是中国的沿海地区和西南的部分地区。 SO_4^{2-} 模式模拟

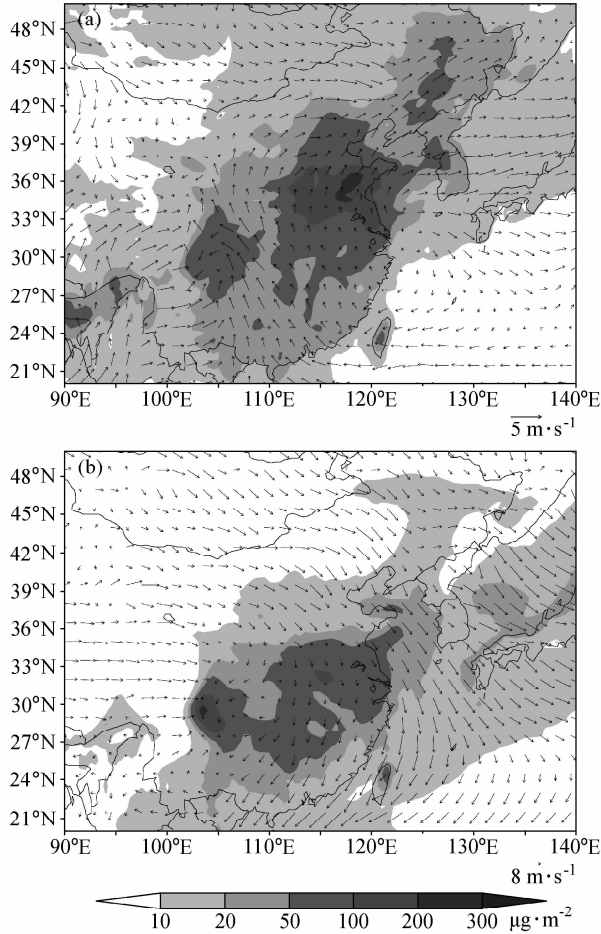


图 7 多模式模拟的 2001 年 (a) 7 月和 (b) 12 月氨盐总沉降月平均分布 (矢量表示月平均流场)
Fig. 7 Multi-model mean ammonium deposition over East Asia in (a) Jul and (b) Dec 2001

不确定性大的地区主要是中国的中、东部地区，而西部地区模式的离散度较小，也就表示模式模拟的结果较好。但由于缺少观测资料，结果仍需进一步研究。

(3) 东亚地区的湿沉降现状是：硝酸盐、铵盐和硫酸盐的沉降基本都是以 NO_3^- 、 NH_4^+ 和 SO_4^{2-} 湿沉降的形式降落到地面的。 NO_3^- 7 月在中国的华北、东北、日本和台湾地区沉降较大，12 月沉降主要集中在日本和台湾地区； NH_4^+ 和 SO_4^{2-} 夏季湿沉降的分布与排放源分布基本吻合，冬季华东、西南和台湾依旧是 NH_4^+ 的主要湿沉降区，而 SO_4^{2-} 冬季主要在华东、西南、日本和台湾地区沉降较大。影响湿沉降的因子有排放源、风场和降水量，其中降水量的影响最重要。

(4) 由于排放源数据、风场和降水的不确定

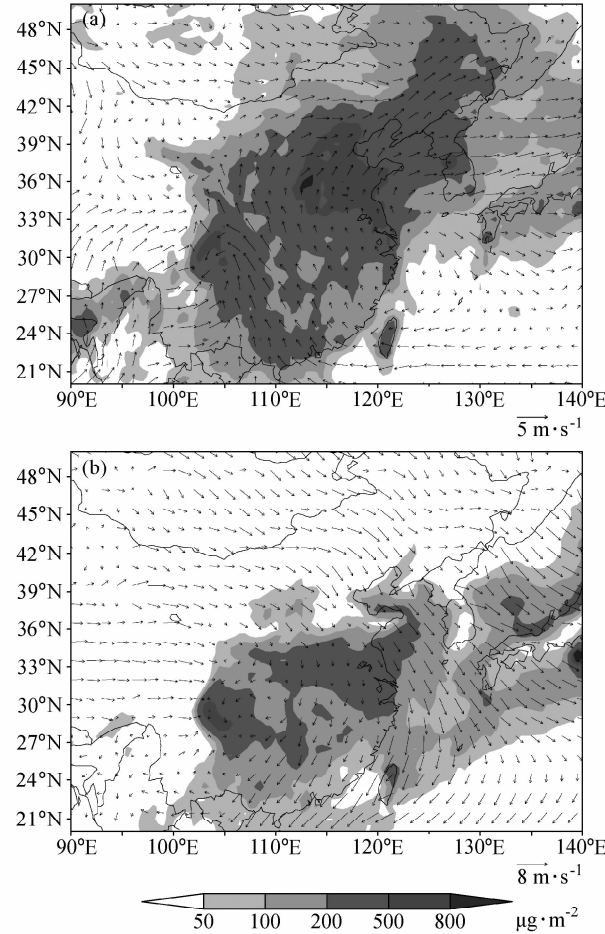


图 8 多模式模拟的 2001 年 (a) 7 月和 (b) 12 月硫酸盐总沉降月平均分布 (矢量表示月平均流场)
Fig. 8 Multi-model mean sulfate deposition over East Asia in (a) Jul and (b) Dec 2001

性会引起模式模拟结果的不确定性，所以减小模式不确定性的方法之一就是降低排放源数据、风场和降水量的不确定性，这就要求及时更新排放源数据，改进对风场和降水的模拟。

参考文献 (References)

[1] 谢绍东, 郝吉明, 周中平, 等. 中国酸沉降临界负荷区划. 环境科学, 1998, **19** (1): 13~17
Xie Shaodong, Hao Jiming, Zhou Zhongping, et al. Mapping of critical loads for acid deposition in China. *Environmental Science* (in Chinese), 1998, **19** (1): 13~17
[2] 王代长, 蒋新, 卞永荣, 等. 酸沉降对生态环境的影响. 中国生态农业学报, 2003, **11** (1): 107~109
Wang Daichang, Jiang Xin, Bian Yongrong, et al. The impacts of acidic deposition on ecoenvironment. *Chinese Journal of*

- Eco-Agriculture* (in Chinese), 2003, **11** (1): 107~109
- [3] 高世东, 张冬保, 赵大为. 背景区土壤对大气硫沉降的耐受力. *大气环境*, 1991, **15**: 18~19
Gao Shidong, Zhang Dongbao, Zhao Dawei. Tolerance of background soil for atmospheric sulfur deposition. *Atmos. Environ.* (in Chinese), 1991, **15**: 18~19
- [4] Spiro P A, Jacob D J, Logan J M. Global inventory of sulfur emission with $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ resolution. *J. Geophys. Res.*, 1992, **97**: 6023~6036
- [5] IPCC. *Climate Change 1995: The Science of Climate Change*. Houghton J T, et al, Eds. New York: Cambridge University Press, 1996. 138pp
- [6] Langner J, Rodhe H, Crutzen P J, et al. Anthropogenic influence on the distribution of tropospheric sulfate aerosol. *Nature*, 1992, **359**: 712~716
- [7] 王喜红, 石广玉. 东亚地区人为硫酸盐气溶胶柱含量变化的数值研究. *气候与环境研究*, 2000, **5** (1): 58~66
Wang Xihong, Shi Guangyu. A numerical study on temporal and spatial variations of anthropogenic sulfate column burden over Eastern Asia. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2000, **5** (1): 58~66
- [8] 肖辉林. 大气氮沉降对森林土壤酸化的影响. *林业科学*, 2001, **37** (4): 111~116
Xiao Huilin. Effects of atmospheric nitrogen deposition on forest soil acidification. *Scintia Silvae Sinicae* (in Chinese), 2001, **37** (4): 111~116
- [9] Moffat A S. Global nitrogen overload problem grows critical. *Science*, 1998, **279**: 988~989
- [10] 高会旺, 黄美元, 安峻岭. 东亚地区硫污染物的空间分布特征. *环境科学学报*, 1999, **19** (1): 47~51
Gao Huiwang, Huang Meiyuan, An Junling. Distribution of sulfur pollutants in East Asia. *Acta Science Circumstantiae* (in Chinese), 1999, **19** (1): 47~51
- [11] Wang Zifa, Huang Meiyuan, He Dongyang, et al. Sulfur distribution and transport studies in East Asia using eulerian model. *Adv. Atmos. Sci.*, 1990, **13** (1): 399~409
- [12] 张美根, 韩志伟. TRACE-P 期间硫酸盐、硝酸盐和铵盐气溶胶的模拟研究. *高原气象*, 2003, **22** (1): 1~6
Zhang Meigen, Han Zhiwei. A numerical study on distribution of sulfate, nitrate and ammonium aerosol over East Asia during the TRACE-P campaign. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2003, **22** (1): 1~6
- [13] 安俊岭, 王自发, 黄美元, 等. 区域空气质量数值预报模型. *气候与环境研究*, 1999, **4** (3): 244~251
An Junling, Wang Zifa, Huang Meiyuan, et al. Numerical regional-scale air quality forecast model. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 1999, **4** (3): 244~251
- [14] 王体健, 闵锦忠, 孙照渤, 等. 中国地区硫酸盐气溶胶的分布特征. *气候与环境研究*, 2000, **5** (2): 165~174
Wang Tijian, Min Jinzhong, Sun Zhaobo, et al. Characteristics of sulphate aerosol distribution in China. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2000, **5** (2): 165~174
- [15] 叶小峰, 王自发, 安俊岭, 等. 东亚地区降水离子成分时空分布及其特征分析. *气候与环境研究*, 2005, **10** (1): 115~123
Ye Xiaofeng, Wang Zifa, An Junling, et al. Analysis of the spatial-temporal distribution and ion features of components of precipitation in East Asia. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2005, **10** (1): 115~123
- [16] 丁国安, 徐晓斌, 王淑凤, 等. 中国气象局酸雨网基本资料数据集及初步分析. *应用气象学报*, 2004, **15**: 85~94
Ding Guoan, Xu Xiaobin, Wang Shufeng, et al. Database from the acid rain network of China meteorological administration and its preliminary analyses. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 2004, **15**: 85~94
- [17] Carmichael G, Calori G, Hayami H, et al. A brief overview of the model intercomparison study for long-range transport models in East Asia. *Water Air and Soil Pollution* (Special Issue for Acid Rain 2000), 2001, **13**: 51~62
- [18] Hayami H, Ichikawa Y. Sensitivity of long-range transport of sulfur compounds to vertical distribution of sources. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2001, **130**: 283~288
- [19] Carmichael G R, Calori G, Hayami H, et al. The MICS-Asia study: Model intercomparison of long-range transport and sulfur deposition in East Asia. *Atmos. Environ.*, 2002, **36**: 175~199
- [20] Carmichael G R, Sakurai T, Streets Y, et al. MICS-Asia II: The model intercomparison study for Asia Phase II methodology and overview of findings. *Atmos. Environ.*, 2008, **42**: 3468~3490