

用月平均和逐时气象场对东亚夏季 SO_x 远距离输送的数值实验*

任保华 陈月娟

(中国科学技术大学地球和空间科学系, 第三世界科学院
中国科学技术大学地球科学和天文学高级研究中心, 合肥 230026)

田村昌三

(Department of Chemistry System Engineering, Faculty of Engineering,
University of Tokyo, Hongo, Bunkyo-Ku, Tokyo 113, Japan)

摘 要 本文用日本山梨大学片谷教孝等人建立的 3 维欧拉型污染物远距离输送模式, 分别输入 1988 年 6 月月平均和逐时气象资料 (风场、气压场、密度场、降水等), 对夏季东亚地区 SO_x 的远距离输送进行了数值模拟。所有实验均积分 1 个月, 对 SO_2 、 SO_4^{2-} 的地面浓度及沉降量进行了分析, 实验结果表明: 如果仅仅考虑 SO_2 的远距离输送模拟, 可以月平均场气象资料代替模式中需要的逐时场气象资料; 而将逐时场的风、降水资料和月平均场的气压、密度资料共同使用则与输入逐时场气象资料对 SO_2 及 SO_4^{2-} 模拟结果完全相当。由于实验中只使用了 1988 年 6 月的资料, 故下一步的研究应对不同年、季的气象资料及不同污染物的远距离输送模拟进行比较, 从而考察月平均场气象资料在污染物远距离输送的模拟中能否完全或部分代替逐时场气象资料。

关键词 东亚 输送 SO_x 数值模拟

1 引言

随着地球环境污染的日趋严重, 污染物远距离输送的研究越来越引起人们的重视。东亚地区污染物远距离输送的研究同样受到人们的极大关注。数值模拟是普遍采用的研究污染物远距离输送的方法之一, 各种各样的数值模式已被用于东亚地区污染物远距离输送的研究。Kotamarthi 等^[1]用 2 维欧拉型模式推算了东亚地区污染物的分布; Ichikawa 等^[2]采用拉格朗日模式模拟了污染物的输送过程; Katatani 等^[3,4]使用 3 维欧拉型模式模拟了东亚地区酸沉降的分布, 并且估算了不同地区排放源对日本酸沉降的贡献率; Kitata 等^[5]用一个半球模式模拟了不同天气条件下, 从东亚到北太平洋地区 SO_x 的远距离输送问题; Huang Meiyuan 等^[6]使用 3 维欧拉型模式模拟了东亚地区硫沉降和输送; 陈月娟等^[7]则用 Katatani 的 3 维欧拉型模式模拟了冬季东亚地区 SO_x 的远距离输送分布。用模式模拟污染物的远距离输送, 需要输入有关的气象资料。一般模式中或

1996-10-07 收到, 1997-04-08 收到再改稿

* 本文得到了“中日大学群合作研究项目”的支持及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的资助

输入逐时的实际气象观测资料, 或利用其它模式给出气象场的逐时预报值, 然后输入到污染物输送模式中。但这要求计算机有较大的容量, 在一般的微机上无法利用逐时气象资料进行污染物远距离输送的数值模拟。而使用月平均气象资料则可以实现在微机上进行污染物远距离输送的数值模拟。本文利用 Katatani 的 3 维欧拉型模式, 分别输入 1988 年 6 月气象场的月平均和逐时资料, 比较了两种资料对夏季东亚地区 SO_x 的远距离输送的数值模拟结果, 试图考察在 SO_x 的远距离输送模拟中月平均气象资料是否可以全部或部分替代逐时气象资料。

2 模式及参数

本文采用的是 Katatani (片谷教孝) 等^[3,4]建立的东亚地区 3 维欧拉型模式。模式包括了污染物的输送、化学反应、沉降等过程, 模式垂直方向为 σ 坐标。基本方程如下:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -\frac{\partial(uc)}{\partial x} - \frac{\partial(vc)}{\partial y} - \frac{\partial(\dot{\sigma}c)}{\partial \sigma} + \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \left[\frac{g}{10^5 p^*} \right]^2 \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\rho^2 k_z \frac{\partial c}{\partial \sigma} \right) + R + E + D,$$

式中, c 为污染物浓度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$); t 为时间 (s); u, v 为水平方向风速 (m/s); $\dot{\sigma}$ 为垂直方向风速 ($/\text{s}$); k_x, k_y 为水平方向扩散系数 (m^2/s); k_z 为垂直方向扩散系数 (m^2/s); p^* 为地面与模式顶气压差 (hPa); ρ 为空气密度 (g/m^3)。方程中反应项 (R) 假定为一次氧化反应; 地面排放源强 E 取为常数; D 为沉降量, 干沉降量设为地面浓度的函数, 湿沉降量设为每一层浓度及厚度的函数。

方程的解法采用 2 阶动量矩方法^[8]。模式计算区域为 $3700 \text{ km} \times 3000 \text{ km}$, 包括日本、朝鲜、韩国、中国的中部、东部以及台湾地区 (见图 1), 其中细网格距约 40 km, 粗网格距约 250 km。模式顶取为 700 hPa (约 3 km), 垂直方向非线性地分成 10 层。

月平均气象资料: (1) 风场、气压场等取自 COADS 资料; (2) 降水场中中国部分取自“中国 336 站降水资料”, 其它地区取自 Monthly Climate Data for the World。输入模式前已将这些资料内插到模式网格中。

逐时气象资料: (1) 风场等在日本区域使用日本探空资料, 其余区域使用日本气象厅的数值预报结果; (2) 降水场等在日本区域使用

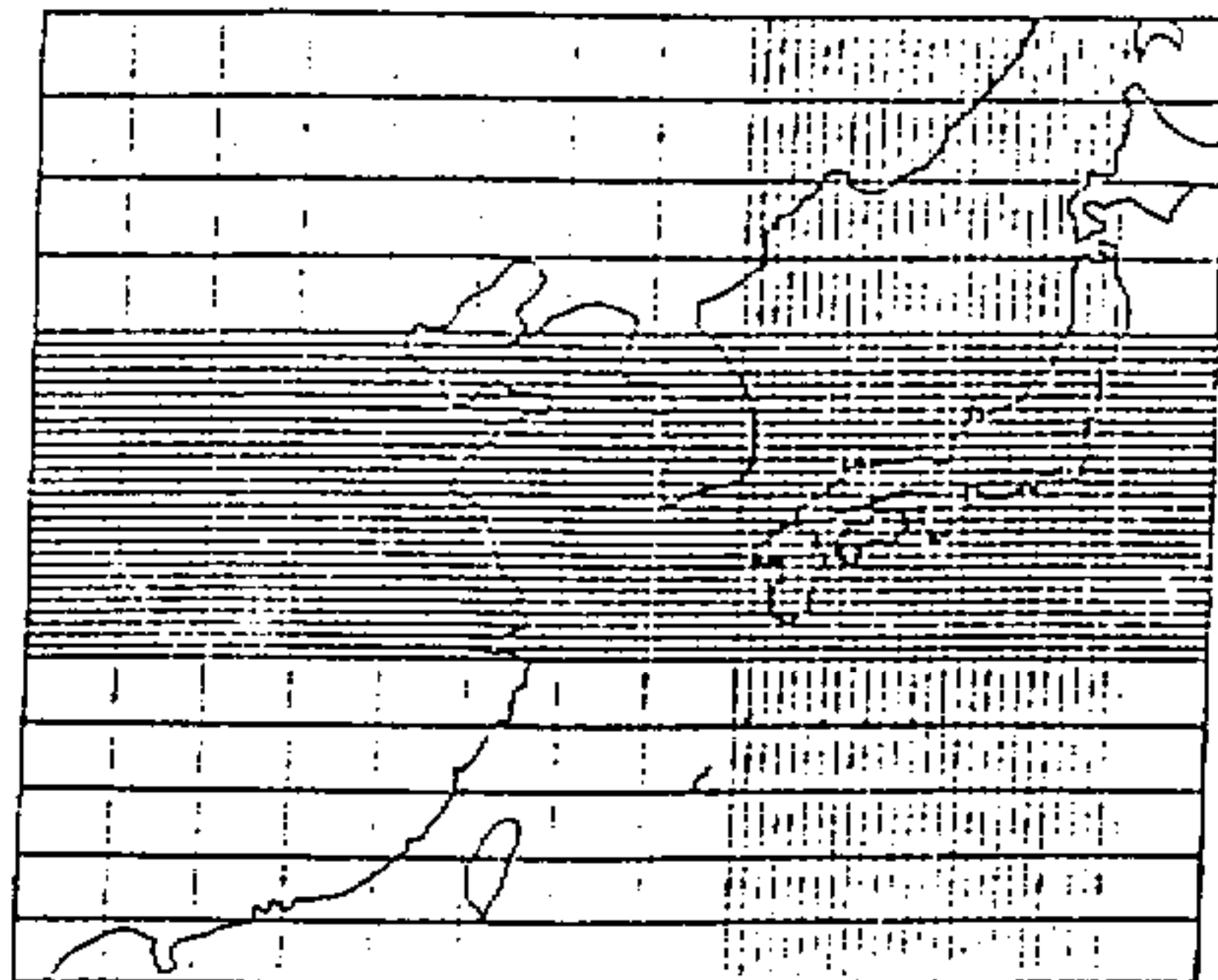


图 1 模式计算区域

AMeDAS (自动气象测报系统) 数据, 其余区域取自 World Meteorological Data。

模式计算中所用排放源资料, 扩散系数, 干、湿沉降率, SO_2 向 SO_4^{2-} 的转化率等与 Katatani 以前的取法相同, 详见文献[3, 4]。

3 数值实验方案说明

一共进行了 5 个方案的数值实验, 方案设计见表 1。

表 1 实验方案说明

编 号	方 案 设 计
Case 0	本实验为对照实验, 实验中输入 1988 年 6 月逐时气象资料 (风、气压、降水、密度等), 其它参数见本文“模式及参数”部分
Case 1	输入 1988 年 6 月月平均气象资料 (风、气压、降水、密度等), 其它同 Case 0
Case 2	降水输入 1988 年 6 月逐时气象资料, 其它同 Case 1
Case 3	风场输入 1988 年 6 月逐时气象资料, 其它同 Case 1
Case 4	降水、风场输入 1988 年 6 月逐时气象资料, 其它同 Case 1

用上述方案输入模式中进行了 1 个月的积分, 分别输出 SO_2 地面浓度和沉降量以及 SO_4^{2-} 地面浓度和沉降量。

3 结果分析

根据数值实验的结果, 图 2~5 分别给出了 5 种方案模拟的 SO_2 、 SO_4^{2-} 地面浓度和沉降量分布。下面首先对各种方案的结果进行比较, 并讨论造成结果不同的可能原因, 然后给出用月平均和逐时气象资料模拟的 SO_x 的输送特征比较。

4.1 SO_2 、 SO_4^{2-} 地面浓度和沉降量模拟结果

4.1.1 SO_2 沉降量

图 2 给出了各种方案积分 1 个月的 SO_2 沉降量分布。从图 2a 的模拟结果可见: SO_2 沉降量超过 300 mg/m^2 的区域主要分布在朝鲜半岛、中国山东及北京地区、上海周围和重庆附近, 而日本只在其西南部九州岛附近出现超过 300 mg/m^2 的区域, 但最大值仅 320 mg/m^2 , 且很大程度上可能受该地区火山的影响。

比较图 2a 和图 2b 可见: 二者模拟的 SO_2 沉降量高值 ($> 300 \text{ mg/m}^2$) 区的分布很相似, 只是图 2b 中高值区的范围比图 2a 中的要大一些, 且图 2b 中高值区中的最大值均比图 2a 中的要大, 如在朝鲜半岛, 图 2a 中 SO_2 沉降量最大值为 680 mg/m^2 , 图 2b 为 840 mg/m^2 ; 日本九州岛附近图 2a 为 330 mg/m^2 , 而图 2b 则为 730 mg/m^2 。总体说来, 月平均气象资料比逐时气象资料模拟的 SO_2 沉降量要大。但用月平均气象资料模拟出了夏季 SO_2 沉降量的主要分布特征和高值区分布型态。

图 2c 中模拟的 SO_2 沉降量的分布与图 2b 相比, 在中国及朝鲜半岛区域二者结果基本一致; 但对日本 SO_2 沉降量分布的模拟, Case 2 的结果比 Case 1 的结果要好些。图 2c 模拟的日本地区 SO_2 沉降量的高值区 ($> 300 \text{ mg/m}^2$) 出现在日本西南九州岛附近, 最大值为 410 mg/m^2 , 这与 Case 0 (图 2a) 的结果比较接近。

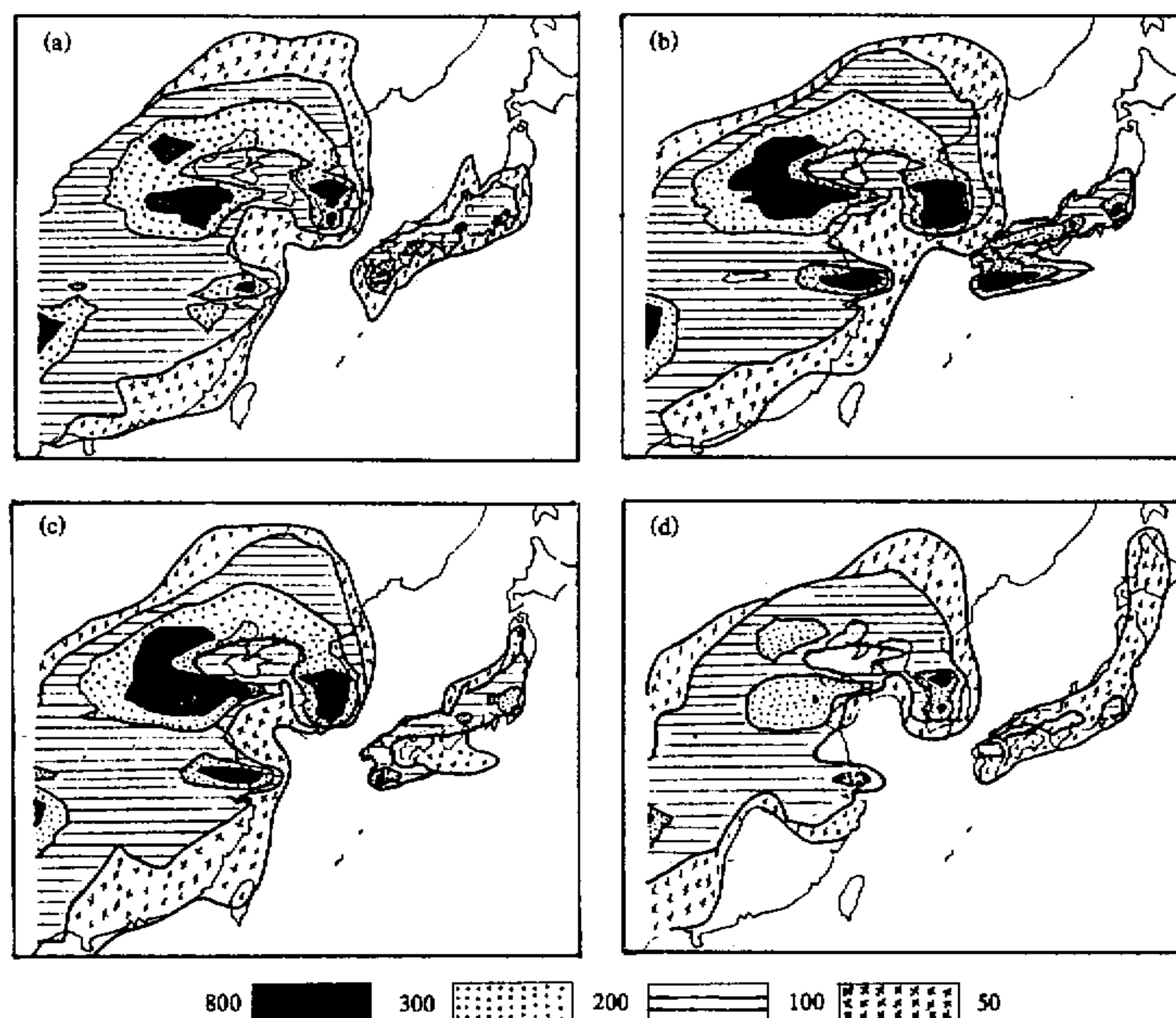


图 2 模拟的 SO_2 沉降量分布。单位： mg/m^2

(a) Case 0; (b) Case 1; (c) Case 2; (d) Case 3

图 2d 是输入逐时风场资料，其余气象场输入月平均气象资料的模拟结果。从图可见： SO_2 沉降量的高值区 ($> 300 \text{ mg}/\text{m}^2$) 仅出现在朝鲜半岛和山东地区以及重庆附近，范围和高值区中的最大值要小很多，与图 2a 相比，大大低估了 SO_2 沉降量的分布。

从输入逐时风场、降水资料，其余气象场输入月平均气象资料的 Case 4 模拟结果 (图略) 看，它与 Case 0 (图 2a) 模拟的 SO_2 沉降量的分布几乎完全一样，仅仅是高值区中的最大值有微小的差别。如在朝鲜半岛，图 2a 模拟的最大值是 $610 \text{ mg}/\text{m}^2$ ，Case 4 的结果为 $620 \text{ mg}/\text{m}^2$ ；在日本西南九州岛附近图 2a 模拟的最大值是 $320 \text{ mg}/\text{m}^2$ ，而 Case 4 的结果为 $330 \text{ mg}/\text{m}^2$ 。

4.1.2 SO_2 地面浓度

图 3 是模拟的 SO_2 地面质量分数分布。由图 3a 可见： SO_2 地面质量分数大于 10×10^{-9} 的高质量分数区主要在朝鲜半岛和中国上海附近；而日本本土 SO_2 地面质量分数值很低，均不超过 7.5×10^{-9} 。

将图 3b 与图 3a 相比较可以看出：2 个实验模拟的 SO_2 地面质量分数分布基本一

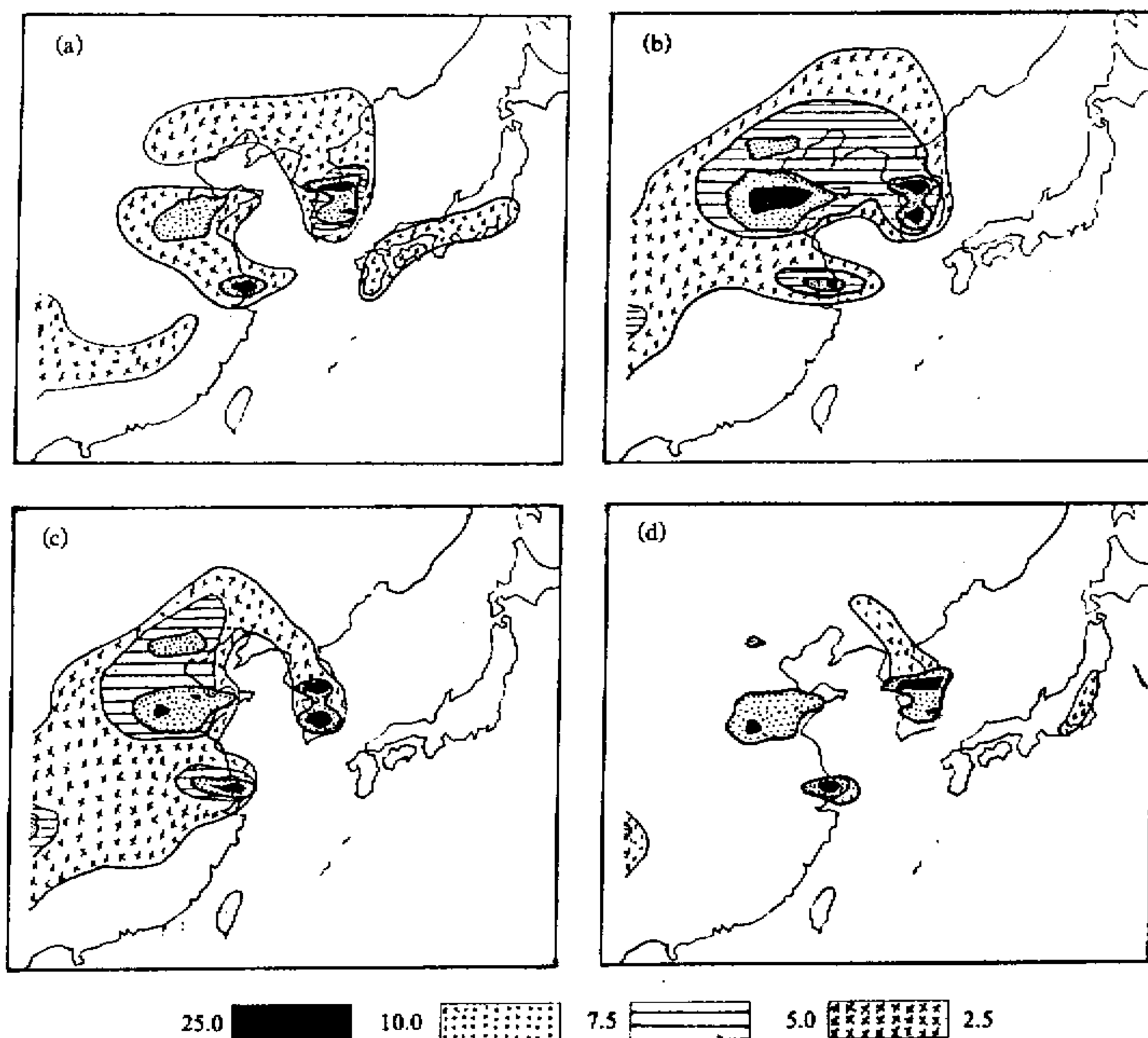


图3 模拟的 SO_2 地面质量分数分布 ($\times 10^{-9}$)
(a) Case 0; (b) Case 1; (c) Case 2; (d) Case 3

致, 但图 3b 中朝鲜半岛高质量分数区域及其最大值要比图 3a 中的大 (最大值: 图 3a 为 14×10^{-9} , 图 3b 为 19×10^{-9}); 而图 3b 模拟的在上海周围的高质量分数区域和其中的最大值均比图 3a 模拟的要小一些 (最大值: 图 3a 为 13×10^{-9} , 图 3b 为 11×10^{-9})。另外, 在图 3b 中山东地区有一片高质量分数区, 其最大值为 12×10^{-9} ; 而在图 3a 中山东地区 SO_2 地面质量分数最大值仅为 9×10^{-9} 。

将图 3c 和图 3d 与图 3a 比较可以看出: Case 2 和 Case 3 模拟的 SO_2 地面质量分数分布和 Case 0 的结果基本一致, 只是 Case 2 和 Case 3 模拟的高质量分数区范围及最大值与 Case 0 有点差异。如图 3c 中模拟的朝鲜半岛上和上海周围最大值分别为 17×10^{-9} 和 13×10^{-9} ; 图 3d 中则分别是 16×10^{-9} 和 13×10^{-9} 。

Case 4 的模拟结果 (图略) 和图 3a 的结果几乎完全相同。

4.1.3 SO_4^{2-} 沉降量

图 4 是模拟的 SO_4^{2-} 积分 1 个月的沉降量分布。从图 4a 可见: SO_4^{2-} 沉降量大于 300 mg/m^2 的高值区仅仅出现在中国山东境内个别点上, 在中国山东、北京附近、西南重庆以及朝鲜半岛, SO_4^{2-} 沉降量介于 $200 \sim 300 \text{ mg/m}^2$ 之间, 而日本 SO_4^{2-} 沉降量

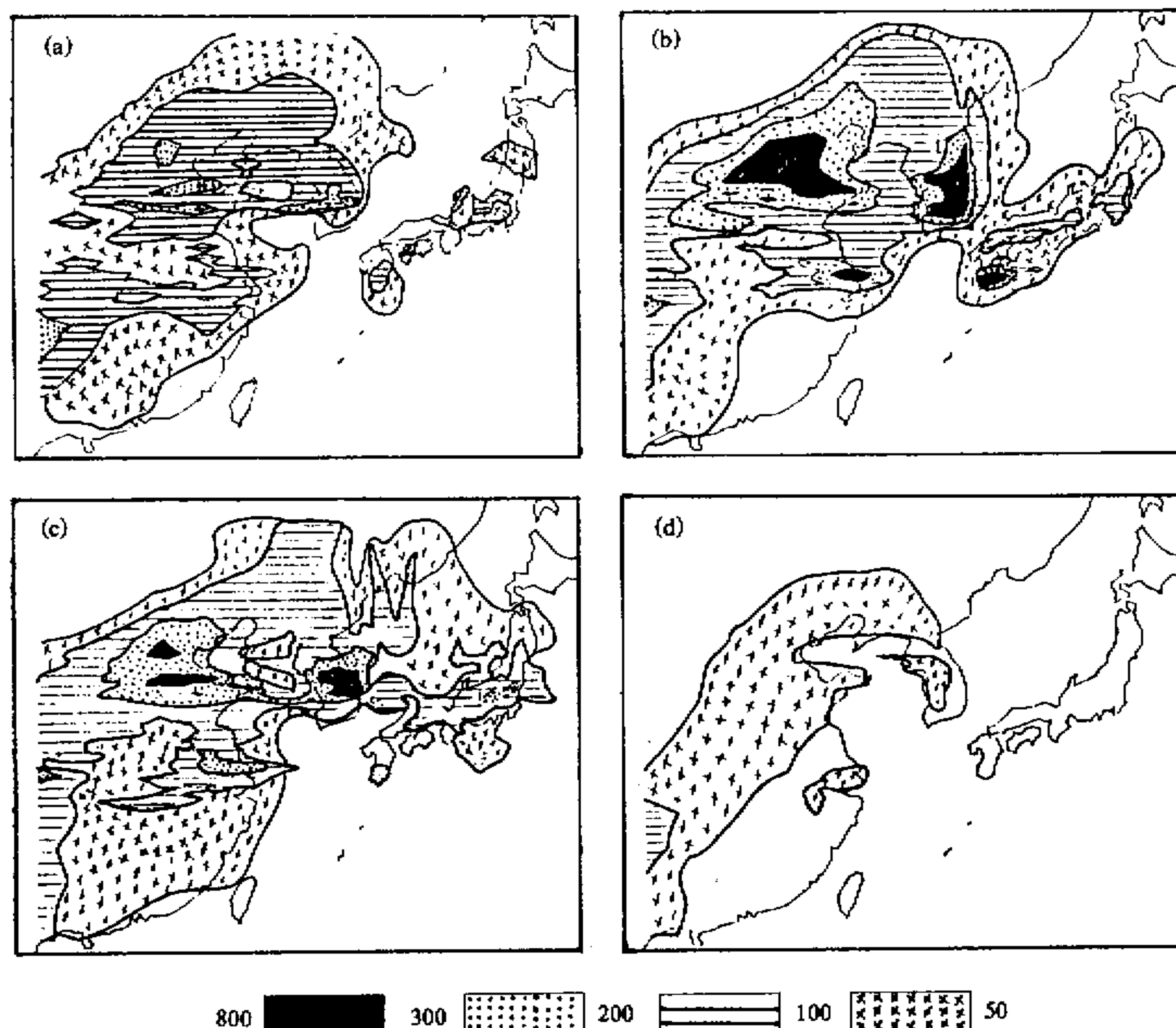


图 4 模拟的 SO_4^{2-} 沉降量分布。单位: mg/m^2
(a) Case 0; (b) Case 1; (c) Case 2; (d) Case 3

都很小。最大值也未超过 $300 \text{ mg}/\text{m}^2$ 。

图 4b 和图 4a 结果比较可以看到: 模拟的 SO_4^{2-} 沉降量分布无论是高值区 ($>300 \text{ mg}/\text{m}^2$) 的位置及范围, 还是高值区中的最大值都相差较大。图 4b 模拟出 4 个高值区, 最大的 SO_4^{2-} 沉降量为 $640 \text{ mg}/\text{m}^2$, 出现在日本西南九州岛附近; 而图 4a 模拟结果除中国山东境内除个别点上出现 SO_4^{2-} 沉降量超过 $300 \text{ mg}/\text{m}^2$ 外, 其它地方 SO_4^{2-} 的沉降量均小于 $300 \text{ mg}/\text{m}^2$, 且最大值仅为 $310 \text{ mg}/\text{m}^2$ 。图 4c 模拟的 SO_4^{2-} 沉降量高值区 ($>300 \text{ mg}/\text{m}^2$) 分别出现在朝鲜半岛, 中国山东和北京周围, 范围及高值区中的最大值均比图 4a 的模拟结果要大许多。图 4d 的模拟结果与其它方案的结果差别很大: SO_4^{2-} 沉降量的分布除中国西南重庆附近出现超过 $100 \text{ mg}/\text{m}^2$ 的区域 (最大值仅为 $150 \text{ mg}/\text{m}^2$) 以外, 其它地区 SO_4^{2-} 沉降量都不超过 $100 \text{ mg}/\text{m}^2$ 。

Case 4 模拟 SO_4^{2-} 沉降量的分布 (图略) 和图 4a 的结果相当一致, 仅在个别点上的值有甚微差异。

4.1.4 SO_4^{2-} 地面浓度

模拟的 SO_4^{2-} 地面浓度分布列在图 5 中。从图 5a 结果来看: 高浓度区 (>10

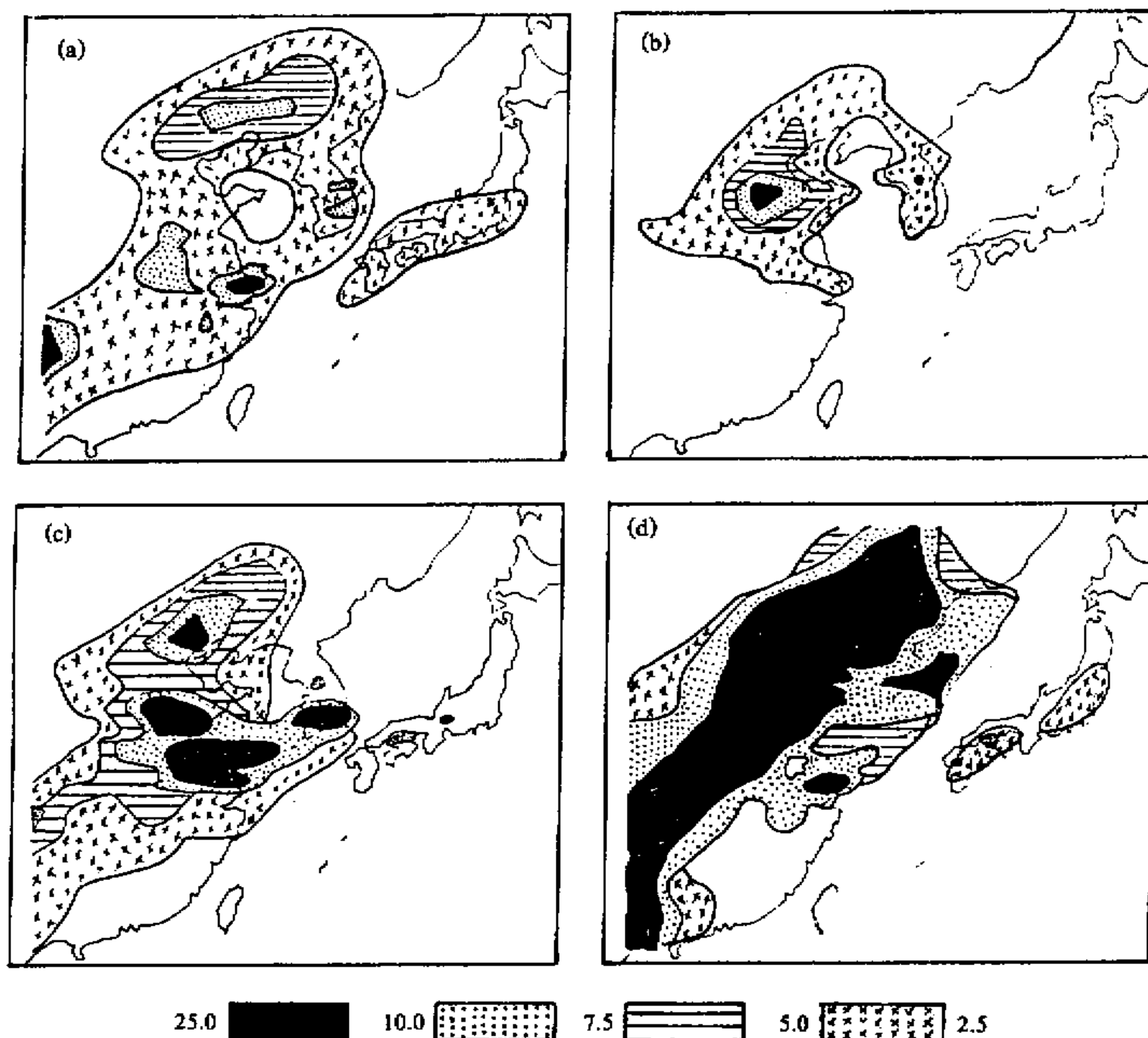


图 5 模拟的 SO_4^{2-} 地面浓度分布。单位: $\mu\text{g}/\text{m}^3$
(a) Case 0; (b) Case 1; (c) Case 2; (d) Case 3

$\mu\text{g}/\text{m}^3$) 出现在上海周围以及重庆附近, 日本的 SO_4^{2-} 地面浓度非常小。

分析图 5b 和图 5c 可见: 二者模拟的结果与图 5a 的结果都不一致, 图 5b 大于 $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 的高浓度区出现在中国山东省; 图 5c 上大于 $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 的高浓度区分别位于朝鲜半岛, 中国山东到上海一带以及北京周围; 而图 5a 模拟的 SO_4^{2-} 地面浓度大于 $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 的高浓度区如前所述出现在中国上海周围以及重庆附近。

图 5d 模拟的结果与其它方案的结果差别非常大, 从中国西南到东北、华北地区 SO_4^{2-} 地面浓度为一连续的高浓度 ($>10 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 带状分布, 而中国上海周围以及朝鲜半岛也为高浓度 ($>10 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 区, 但日本 SO_4^{2-} 地面浓度均未超过 $7.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。而 Case 4 模拟的 SO_4^{2-} 地面浓度分布 (图略) 和 Case 0 (图 5a) 的结果却十分一致。

4.2 讨论

通过分析上面的模拟结果可以发现: 对于 SO_2 沉降量及 SO_2 地面浓度的分布, 几种方案的结果较为一致, 尤其对 SO_2 地面浓度的模拟结果更好。而对于 SO_4^{2-} 的模拟, 无论是 SO_4^{2-} 沉降量还是 SO_4^{2-} 地面浓度的分布, 各种方案的结果相差较大。

Case 2 (降水用逐时气象资料, 其余用月平均气象资料) 和 Case 1 (全部用月平均

气象资料) 相比, 模拟的 SO_2 沉降量高值区区域及其中最大值均小一些。这可能是由于逐时降水资料有时空的变化, 对于计算区域各点降水都不是连续作用的, 时有时无; 而月平均降水资料的使用, 使得计算区域各点每个计算时段都有连续不变的降水作用; 这样连续的降水相对增大了湿沉降量。Case 3 (风场用逐时气象资料, 其余用月平均气象资料) 模拟的 SO_2 沉降量比 Case 1 的结果要小许多, 这可能由于相对每个计算格点而言, 月平均风场是定常不变的; 而逐时风场在每个计算时段其大小和方向都是变化的。风场的不同使得 SO_2 的水平及垂直输送都发生了变化, 并且风场的作用是非线性的。

值得探讨的是与 Case 1 相比, Case 3 模拟的 SO_4^{2-} 无论是沉降量还是地面浓度的分布都相差较大, 如 Case 3 模拟的 SO_4^{2-} 沉降量分布除重庆附近出现超过 100 mg/m^2 的区域 (最大值仅为 150 mg/m^2) 以外, 其它地区 SO_4^{2-} 沉降量都不超过 100 mg/m^2 ; 而 Case 1 模拟的 SO_4^{2-} 沉降量超过 300 mg/m^2 的区域有四个, 最大的 SO_4^{2-} 沉降量为 640 mg/m^2 , 出现在日本西南九州岛附近; 对于 SO_4^{2-} 地面浓度, Case 3 模拟出从中国西南到东北、华北地区均为一连续的高浓度 ($> 10 \mu\text{g/m}^3$) 带状分布, Case 1 则仅在山东境内模拟出一小块浓度超过 $10 \mu\text{g/m}^3$ 的区域。这可能是由于风场的非线性作用不仅直接影响 SO_4^{2-} 的分布, 而且还通过对 SO_2 的影响, 部分 SO_2 再转化成 SO_4^{2-} 而间接影响了 SO_4^{2-} 的分布。但影响的原因尚需进一步研究。

4.3 SO_x 的输送特征

为了比较用月平均和逐时气象资料模拟的 SO_x 的输送特征, 图 6 给出了 Case 0、Case 1 和 Case 4 模拟的日本硫收支平衡表。

由图 6 可见, 用逐时气象资料 (Case 0) 和月平均气象资料 (Case 1) 模拟的积分

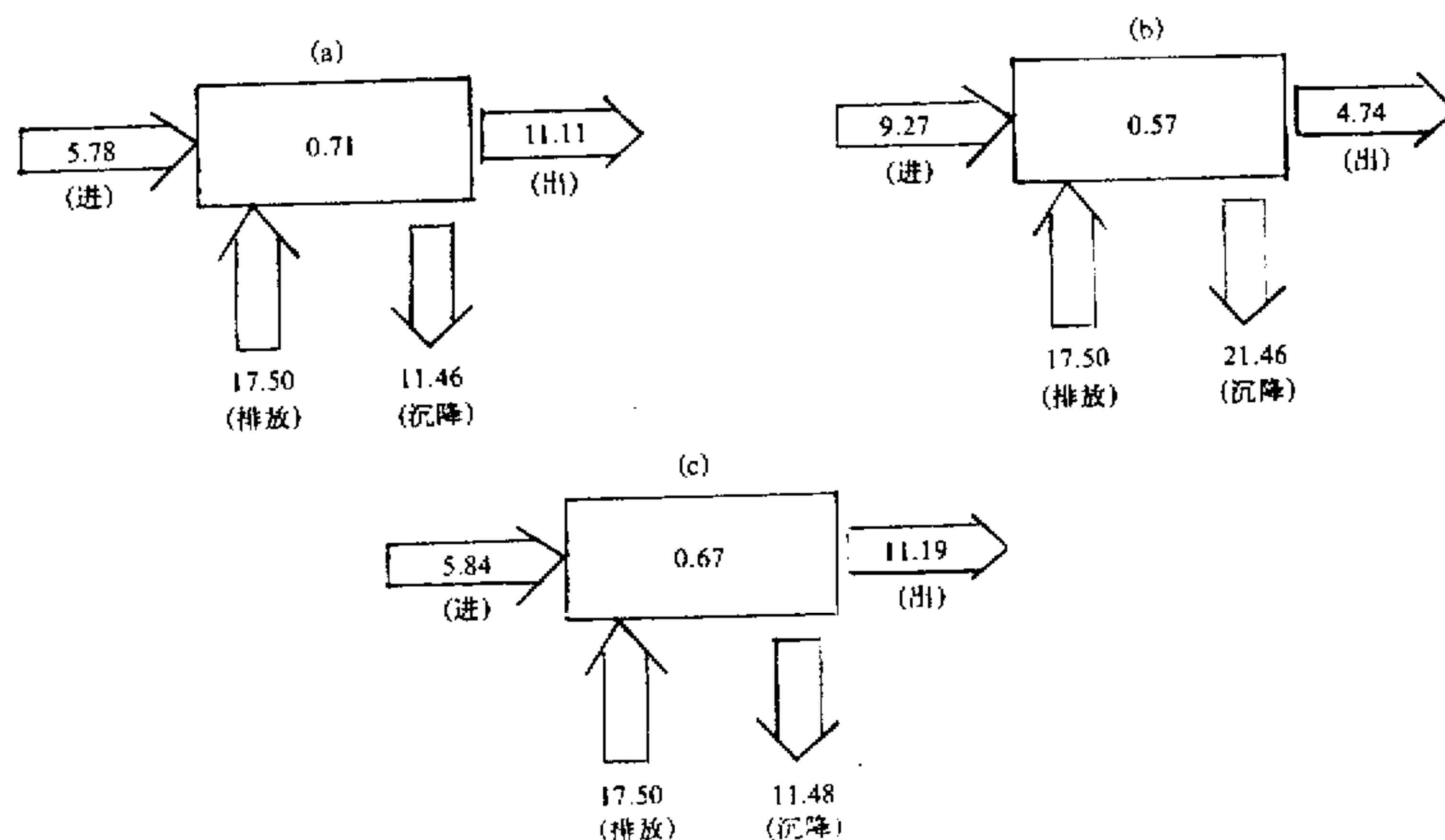


图 6 日本国硫平衡。单位: $\times 10^4 \text{ t}$ 。(a) Case 0; (b) Case 1; (c) Case 4

1 个月, 日本国 SO_x 的剩余量差不多, 分别为 $0.71 \times 10^4 \text{ t}$ 和 $0.57 \times 10^4 \text{ t}$; 但模拟的硫的流入流出及沉降正好相反; Case 0 模拟的硫的流出大于流入, 沉降小于本地排放源的贡献; 而 Case 1 的结果表明: 硫的流出小于流入, 沉降大于本地排放源的贡献。正是这种原因, 使得两种资料模拟的硫的平衡总的结果基本一致; 而 Case 4 与 Case 0 无论是硫的流入、流出还是沉降, 其模拟结果都相当一致。

4 结论

本文用 Katatani 的 3 维欧拉型污染物输送模式, 对夏季东亚地区 SO_x 的远距离输送进行了数值实验, 并对结果进行了分析与比较。

(1) 月平均气象场和逐时气象场的模拟结果对比发现: 用月平均气象场对 SO_2 沉降量及 SO_2 地面浓度的分布模拟较好; 而对 SO_4^{2-} 沉降量及地面浓度的分布模拟较差。因此可以用月平均气象场代替逐时气象场模拟 SO_2 远距离输送的基本分布和主要特征。

(2) 单独输入逐时降水场或逐时风场资料, 其它用月平均气象场的实验结果显示: 对 SO_4^{2-} 远距离输送的模拟结果较差; 对 SO_2 沉降量及 SO_2 地面质量分数的分布模拟较好, 但较之全部用月平均气象场模拟的结果, 并无显著改进。

(3) 在 SO_x 的远距离输送的模拟中。可以用逐时降水场、逐时风场和月平均的气压场及密度场共同输入, 其模拟结果与完全用逐时气象场的模拟结果相当一致。

由于只使用了 1988 年 6 月的气象资料, 本文的结论尚有许多不确定性。应进一步对输入不同年、季气象资料东亚地区 SO_x 的远距离输送进行模拟研究, 从而考察在 SO_x 的远距离输送的模拟中可否用月平均气象资料完全或部分替代逐时气象资料。

致谢 作者之一(任保华)十分感谢日本山梨大学 Katatani 博士提供本文所用的模式和许多有益的建议; 感谢日本东京大学阿久津好明博士在本人赴日期间给予的生活及工作上极大的帮助; 同时还要感谢中国科学技术大学李兴文女士提供的 1988 年 6 月月平均风场资料。

参 考 文 献

- 1 Kotamarthi V. R. and G. R. Carimichael, 1990, The long range transport of pollutants in the Pacific Rim region, *Atmos. Environ.*, **24A**, 1521~1534.
- 2 Ichikawa Y. and S. Fujita, 1990, Development of long-range transport model for sulfur oxides for East Asia, *Report of Central Res. Inst. of Electric Power Industry, Japan*, T89407.
- 3 Katatani N., N. Murao, S. Okamoto, N. Ono and Kobayashi., 1992, A modeling study on acid deposition and secondary aerosols in eastern Asia, *Proc. 9th World Clean Air Congress (Montreal)*, **3**, IU-16B, 11.
- 4 Katatani N., et al., 1994, Estimation of region-by-region source contribution ratio to the deposition in Japan using model calculations, *Proc. 7th IUAPPA Regional Conference on Air Pollution and Waste Issues (Taipei)*, **2**.
- 5 Kitata T. and K., Tanaka, 1992, Simulated semi-global scale transport of SO_2 and SO_4^{2-} from East Asia to the north Pacific in Spring season, *Air Pollution Modeling and Its Application*, IX. Plenum Press, New York, 445~454.
- 6 Huang Meiyuan, Wang Zifa, et al., 1995, Modelling studies on sulfur deposition and transport in East Asia, *Water, Air and Soil Pollution*, **85**, 1921~1926.

- 7 Chen YueJuan, N. Katatani and M. Tamura, 1994, Numerical study on the long-range transport of SO_x in atmosphere, *Proc. of China-Japan Bilateral Symposium on Fluid Mechanics and Management Tools for Environment*, USTC Press, 185~190.
- 8 Prather M. J., 1986, Numerical advection by conservation of second-order moments, *J. Geophys. Res.*, **91**(D6), 6671~6681.

Numerical Experiments on the Long-Range Transport of SO_x over East Asia in Summer with Monthly-Mean and Day-to-Day Meteorological Data

Ren Baohua and Chen Yuejuan

(Department of the Earth and Space Science, University of Science and Technology of China, Advanced Study Center of Earth Science and Astronomy, University of Science and Technology of China of the Third World Academy of Sciences, Hefei 230026)

Masamitsu Tamura

(Department of Chemistry System Engineering, Faculty of Engineering, University of Tokyo, Hongo, Bunkyo-Ku, Tokyo 113, Japan)

Abstract In this paper, numerical experiments have been carried out for the long range transport of SO_x over East Asia in summer with a three-dimensional Eulerian model originally established by Katatani. Monthly-mean and day-to-day meteorological data were employed in the simulations. Particular interest was made to the comparison for the distribution of SO_x surface concentration and deposition conducted with these two sets of data. It is shown that monthly-mean meteorological data can be used, in place of day-to-day meteorological data, in the simulation for the long range transport of SO_2 over East Asia; whereas the simulation for the long range transport of SO_x by use of day-to-day wind and rainfall and the monthly-mean pressure and density simultaneously is shown to be in good agreement with that by day-to-day meteorological data alone. It is also suggested that further study be needed for the numerical experiments of long range transport of SO_x with different year's and season's meteorological data so as to investigate the validation of substituting monthly-mean meteorological data for day-to-day meteorological data.

Key words East Asia transportation SO_x numerical simulation