

福建省硫沉降量变化的分析与比较

屈玉^{1,2} 肖辉¹ 王振会² 刘新罡³ 林长城⁴

1 中国科学院大气物理研究所云降水物理与强风暴实验室, 北京 100029

2 南京信息工程大学, 南京 210044

3 北京大学环境学院, 北京 100871

4 福建省气象科学研究所, 福州 350001

摘要 应用中国科学院大气物理研究所建立的三维欧拉污染物输送模式模拟了1995、2000、2002年福建省本省排放源造成的和邻近省份排放源向其输送的硫沉降量, 结果表明, 福建省接收的硫沉降量有一半以上是由周围省份的远距离输送造成的。进而分析了每年4个季节硫沉降的变化特点, 并结合福建省气象条件给出理论解释。最后, 把这3年福建省 SO_2 及 SO_4^{2-} 年沉降量和各季节沉降量分别作了比较, 结果显示, 造成福建省 SO_2 沉降的主要来源是本省的排放源, 而 SO_4^{2-} 沉降中外来源占很大比例, 超过了50%。

关键词 硫沉降 排放源 远距离输送

文章编号 1006-9585 (2006) 02-0185-09 **中图分类号** X16 **文献标识码** A

Analysis and Comparison of the Change of Sulphur Deposition in Fujian Region

QU Yu^{1,2}, XIAO Hui¹, WANG Zhen-Hui², LIU Xin-Gang³, and LIN Chang-Cheng⁴

1 *Laboratory of Cloud-Precipitation Physics and Severe Storm, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

2 *Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044*

3 *College of Environment, Peking University, Beijing 100871*

4 *Meteorological Research Institute of Fujian Province, Fuzhou 350001*

Abstract Using a 3-D Eulerian transport model with emissions and meteorological data in 1995, 2000, and 2002, the sulphur deposition amounts in Fujian province of China coming from its local emissions and the emissions of its adjacent provinces are simulated. It can be concluded that above 50% of the total sulphur deposition in Fujian is resulted from long-range transport of neighboring provinces. According to this, the change of sulphur deposition in four seasons is further analyzed and explained with changes in meteorological conditions. Comparison of the whole-year and every-season deposition amounts indicates that the contribution of local emissions to SO_2 deposition in Fujian Province is very large, whereas that to SO_4^{2-} deposition in this province is small and SO_4^{2-} deposition is mainly from other provinces, accounting for more than 50% of its total deposition amount.

Key words sulphur deposition, emission source, long-range transport

1 引言

近20年来, 我国经济突飞猛进, 蓬勃发展,

但同时因化石燃料的大量燃烧而导致的硫、氮氧化物的排放对环境造成了严重污染, 酸雨的形成就是其主要灾害, 而且发展日趋严重^[1]。酸雨污

收稿日期 2004-09-13 收到, 2005-09-10 收到修定稿

资助项目 福建省重大科技计划项目 2002F004

作者简介 屈玉, 女, 1979年出生, 硕士, 主要从事大气物理与大气环境的研究。E-mail: quyu@mail.iap.ac.cn

染的范围已从西南局部地区扩大到长江中下游大部分城市和农村,福建省所在的华东沿海地区也已成为我国主要的酸雨区。根据近几年的观测资料表明,福建的酸雨普遍且日益严重,福州、厦门、三明、泉州、漳州、龙岩 6 个城市被列为国家酸雨控制区,面积约 78 943.42 km²,占全省面积的 65%^[2]。酸雨中主要成分是硫酸和硝酸,福建省降水化学成分中,SO₄²⁻占绝对优势,为降水阴离子总量的 70%左右,已接近我国酸雨严重的西南地区(西南为 80%),城市降水中 [SO₄²⁻] 与 [NO₃⁻] 的比值在 3.22~10.65 之间,这表明福建省的酸雨类型为硫酸型^[3]。

王文兴等^[4]的研究表明,我国酸雨并未发生在酸雨前体物排放强度最大的地区,而发生在排放强度较小的地区。福建省在全国属于燃煤型省份,但与两广、浙江、上海、江苏、安徽和湖北等几个邻近省份相比,福建是 SO₂ 的低排放区,而且“九五”期间,福建酸雨控制区的环境空气质量总体较好,且 SO₂ 浓度逐年降低,在酸雨控制区内没有突出的酸性污染物排放源,这表明福建省排放的大气致酸物不是导致本地酸雨发生的决定条件,酸性物质的省际输送至关重要。近几十年来,关于硫沉降及其输送问题的数值模拟各国科学家都做了大量研究,如由美国大气科学研究中心(NCAR)建立起来的“区域酸沉降模式(RADM)”^[5];由美国 Iowa 大学和 Kentucky 大学联合开发的“硫输送模式(STEM)”^[6]及在其基础上发展起来的 STEM-II^[7],肖辉等^[8]在该模式的基础上增加了非均相化学过程,讨论了东亚地区沙尘气溶胶及硫化物形成的影响;贾新媛^[9]的区域沉降模式,王体健^[10]的三维时变欧拉型区域酸性污染物沉降模式;黄美元、王自发等^[11,12]建立的三维欧拉污染物输送模式等,张新玲等^[13,14]应用该模式对我国的硫沉降作了模拟试验,取得了很好的效果。然而,目前国内尚没有关于福建省硫沉降来源的细致研究。因此,本文采用黄美元等^[11]、王自发等^[12]建立和发展的三维欧拉污染物输送模式,比较了 1995、2000、2002 年福建及周围省份的硫沉降量,并通过对比周围省份每年以至每个季度向福建的输送量,说明造成福建酸雨严重危害的一个重要原因是外省硫的远距离输送。把 SO₂、SO₄²⁻ 沉降量分开进行比较后得出,

外省输送的 SO₄²⁻ 在福建造成的硫沉降量的影响要比 SO₂ 的影响大得多。这可为今后福建省更好地控制 SO₂ 的排放和防止酸雨造成的灾害提供科学依据。

2 模式简介与资料来源

所用模式是中国科学院大气物理研究所建立并发展的地形追随球坐标系下的三维欧拉型污染物输送模式^[11,12]。王自发^[15]对该模式进行了细致的参数敏感性试验,并与实测资料进行了较系统的对比,结果表明,该模式可以较好地模拟硫化物的沉降与输送。

模式水平范围为 (16~60°N, 75°~146°E), 水平网格距是 1°×1°。模式中包括的物理化学过程^[15]主要有:输送、云雨清除、干湿沉降、气-液相化学等。污染物长距离输送过程中,水平湍流扩散项远小于水平输送项,故可忽略,但垂直扩散—特别是在边界层大气中具有重要作用。扩散系数的大小反映了大气湍流过程对污染物在水平和垂直方向上的输送能力,它既取决于大气状态(如平均风速、风切变、大气稳定度等),又与考虑的尺度有关。本模式未对边界层湍流进行参数化处理,只对扩散系数作了简单考虑,取为常数。水平扩散系数 $K_h = 45 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, 垂直扩散系数 K_v 在 1 000 m 以下取为 $10 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, 之上取为 $12 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, 其中包含了部分对流活动的贡献。模式的垂直分层是不等距的,下层每层的厚度在 0.1~1.0 km 之间,上层厚度较大,约在 1.5~2.5 km 左右。这样取值计算结果水平扩散项比垂直扩散项小 3 个量级,高层的垂直扩散项也比低层小。这是符合实际湍流特征的。

干沉降过程主要由沉降速度来描述,其定义为向下通量除以大气浓度,沉降速度随大气稳定度、植被、风场等因素而变化。采用经验参数化的方法模拟干沉降速度,沉降速度与 3 个停留因子的和成反比,可用下式表示

$$V_g = \frac{k(z)dc(z)}{c(z)dz} = (r_a + r_b + r_s)^{-1},$$

式中, r_a 为空气动力学阻力,取决于表面层湍流混合的强度; r_b 为附加边界层阻力(副层阻力),决定于向地表的分子和湍流扩散过程; r_s 为地表

面阻力,与地表类型有关,随季节、地点、不同物质而变。湿清除主要是处理云下(1 600 m)的洗脱过程。由于我国近地面大气中污染气体和气溶胶的浓度都比较高^[16],降水的冲刷作用对污染物浓度影响比较大,把雨水的湿清除定义为

$$W = W_a \cdot c_i,$$

式中, W 是冲刷量, c_i 为污染物浓度, W_a 为冲刷系数,它与雨强、雨滴谱分布以及各种污染物浓度有关。雨水对 SO_2 、 SO_4^{2-} 的冲刷系数表示如下

$$W_{\text{SO}_2} = (0.94 - 0.16 \ln c_{\text{SO}_2}) R,$$

$$W_{\text{SO}_4^{2-}} = 0.33 R^{0.83},$$

式中, R 为雨强, c_{SO_2} 为 SO_2 浓度。

SO_2 在大气中的氧化是造成云雨酸化的主要原因之一,氧化反应可以发生在气相、液相和气溶胶表面。对云覆盖率为 α 的网格点总的 SO_2 氧化转化率为

$$K_c = \alpha \cdot K_{\text{cq}} + (1 - \alpha) \cdot K_{\text{cg}},$$

式中, K_{cq} 为液相氧化速率, K_{cg} 为气相氧化速率。本模式采用查表法处理 SO_2 的气相氧化率,即找出一些影响 SO_2 气相转化率的主要因子(如光强、温度、湿度、 SO_2 浓度、云雾等),根据一定的标准(如氧化率的改变不大于 0.1%/h),把这些因子分为不同的档,然后,应用该气相化学模型计算各类分档不同组合情况下化学物种的气相转化

率,得出气相转化率的查算表。此方法在张新玲等^[13]的文章中得到了很好的验证。

中国大陆之外的其他排放源资料选用 Akimoto 等^[17]的资料,并按年变化率进行了订正。月平均气象场资料采用 NCEP 的等压面(1 000、925、850、700、500、400、300、200、100 hPa)同化资料,网格距为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$,采用线性插值方法把各气象要素插值到 $1^\circ \times 1^\circ$ 网格,垂直方向把等压面的气象要素插值到等 σ 坐标面,舍弃资料中的垂直速度,采用地形坐标下的连续方程重新计算垂直速度。降水量是对全国各台站以及韩国、日本各台站实测资料进行平方反比权重法内插成 $1^\circ \times 1^\circ$ 的格点资料。

3 模拟福建及周围省份排放源在福建省造成的硫沉降量

3.1 1995、2000、2002 年各省排放源在福建省造成的硫沉降量的比较

本文应用上述三维欧拉污染物输送模式对 1995、2000 和 2002 年福建省接收的硫沉降量作了模拟,结果如图 1 所示。1995 年模式输入的排放源资料是根据全国 422 个二氧化硫排放源区分高

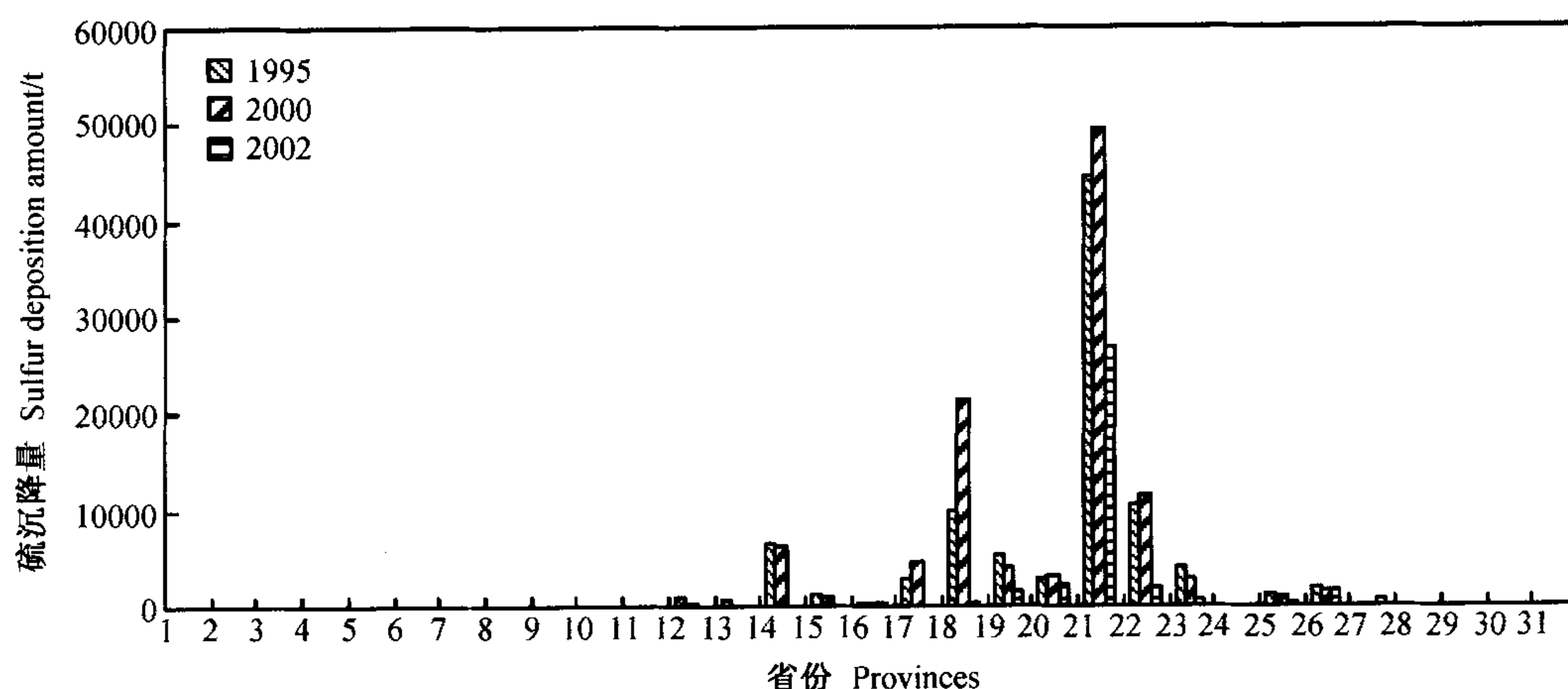


图 1 1995、2000、2002 年低方案各省排放源在福建的沉降量

Fig. 1 Sulfur deposition in Fujian from emission source of each province of China in 1995, 2000, and 2002

(1 黑龙江 Heilongjiang, 2 吉林 Jilin, 3 辽宁 Liaoning, 4 内蒙古 Nei Mongol, 5 河北 Hebei, 6 北京 Beijing, 7 天津 Tianjin, 8 山西 Shanxi, 9 陕西 Shaanxi, 10 宁夏 Ningxia, 11 甘肃 Gansu, 12 山东 Shandong, 13 河南 Henan, 14 江苏 Jiangsu, 15 安徽 Anhui, 16 湖北 Hubei, 17 上海 Shanghai, 18 浙江 Zhejiang, 19 江西 Jiangxi, 20 湖南 Hunan, 21 福建 Fujian, 22 广东 Guangdong, 23 广西 Guangxi, 24 海南 Hainan, 25 云南 Yunnan, 26 贵州 Guizhou, 27 四川 Sichuan, 28 青海 Qinghai, 29 新疆 Xinjiang, 30 西藏 Xizang, 31 台湾 Taiwan)

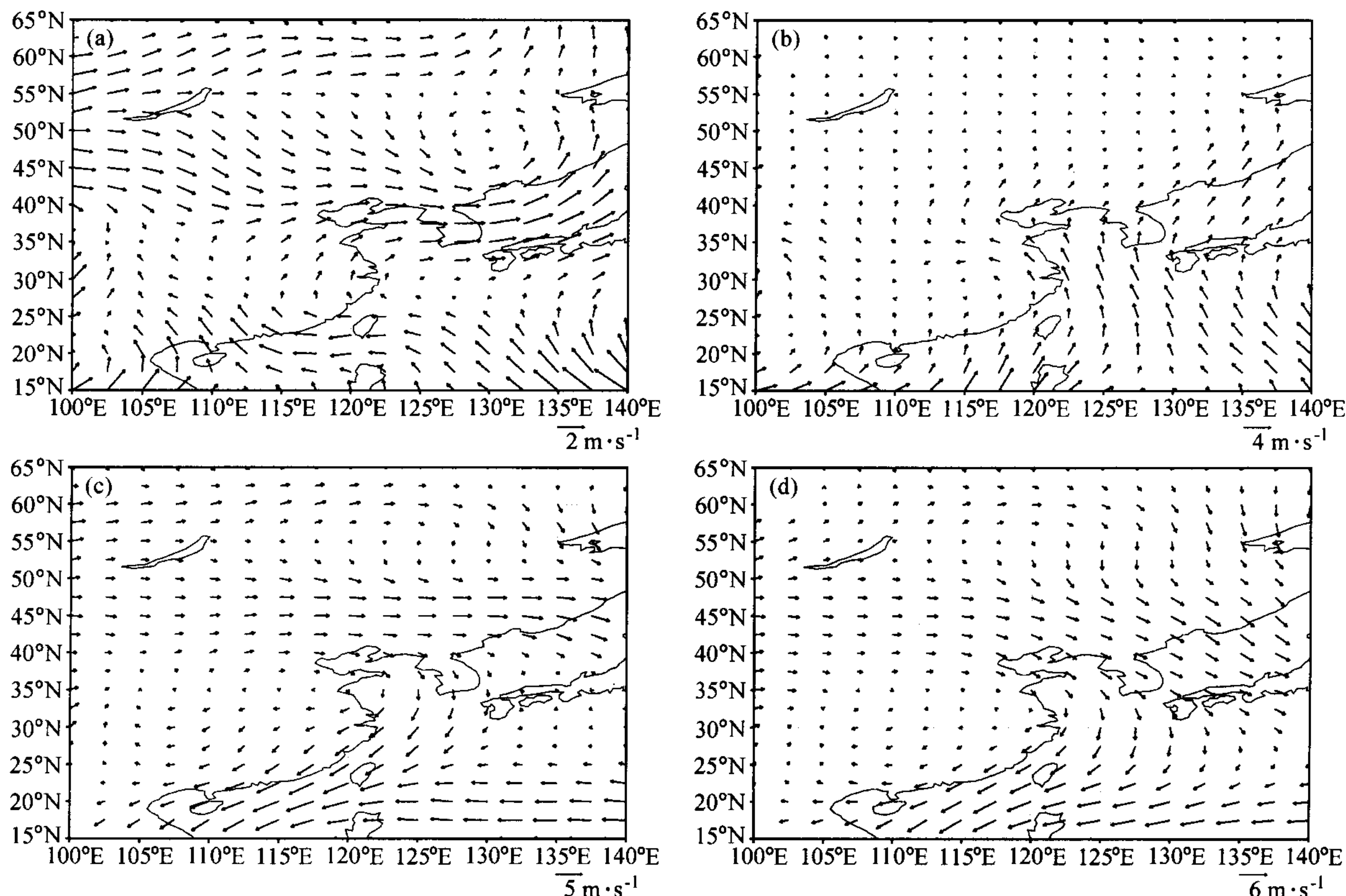


图2 2000年各季风流线场。(a) 春季；(b) 夏季；(c) 秋季；(d) 冬季

Fig. 2 Field of wind streamline in 2000. (a) Spring; (b) Summer; (c) Autumn; (d) Winter

架源（排放高度大于 100 m）和低架源后处理成的 $1^\circ \times 1^\circ$ 的网格资料，处理方法是把各网格内所有排放源的排放量相加，然后除以该网格的面积。高架源放在模式的第 2 层，低架源放在第 1 层。其中福建省被分成 14 个排放区^[18]。台湾省的排放源资料缺乏，暂记为零。模式结果表明，1995 年福建省接收的硫沉降总量为 92 644.5 t。其中福建本省排放源造成的沉降量为 44 496.8 t，占总量的 48.03%；来自外省的硫沉降量超过了一半，其中来自广东的输送量达到了 11.34%，浙江 10.72%，江苏 6.96%，江西 5.71%，广西 4.32%，上海 3.10%。

由于缺乏 2000 年全国各个排放源的详细资料，只能以控制区排放源的控制目标以及总量控制目标来对各污染源的排放量进行估计，高架源按 8.17% 减排。本文采用程新金等^[18]给出的低方案减排后的排放源资料，即控制区（酸雨控制区和 SO_2 控制区）各污染源按照目标排放量进行削减，非控区各污染源采用按比例的比例的削减方法，具体方法是在 1995 年非控区各排放源排放量的基础

上，按 1995 至 2000 年各省非控区递减率的一半进行削减。经该方案计算后全国 2000 年的排放总量为 2.0249×10^7 t，与订正后的公布值 2.02665×10^7 t 相当，说明此方案可行。把此排放源代入模式计算后，得出福建省接收的硫沉降总量为 107 195.9 t，其中由本省源造成的沉降量为 49 360.61 t，占总量的 46.05%。外省源的影响较 1995 年有所增加，达到 53.95%，其中广东的贡献占 10.59%，浙江的输送量较 1995 年明显增加，占 19.91%，江苏 8.96%，上海 4.34%，江西 3.83%，广西 2.48%，湖南 2.88%。

2002 年各个排放源的详细资料也是在 1995 年的基础上，两控区和非控区按照一定比例减排后的结果。但模拟结果和 1995、2000 年有很大不同。福建省接收的硫沉降总量只有 36 493.93 t，比 1995、2000 年减少了很多，福建本省源造成的沉降量为 26 907.78 t，占接收总量的 73.73%，本省源的贡献占了绝大多数，分析其中原因认为，这可能与 2002 年的气象场条件有很大的关系。当把 2002 年的月平均雨强资料用 2000 年的替换，

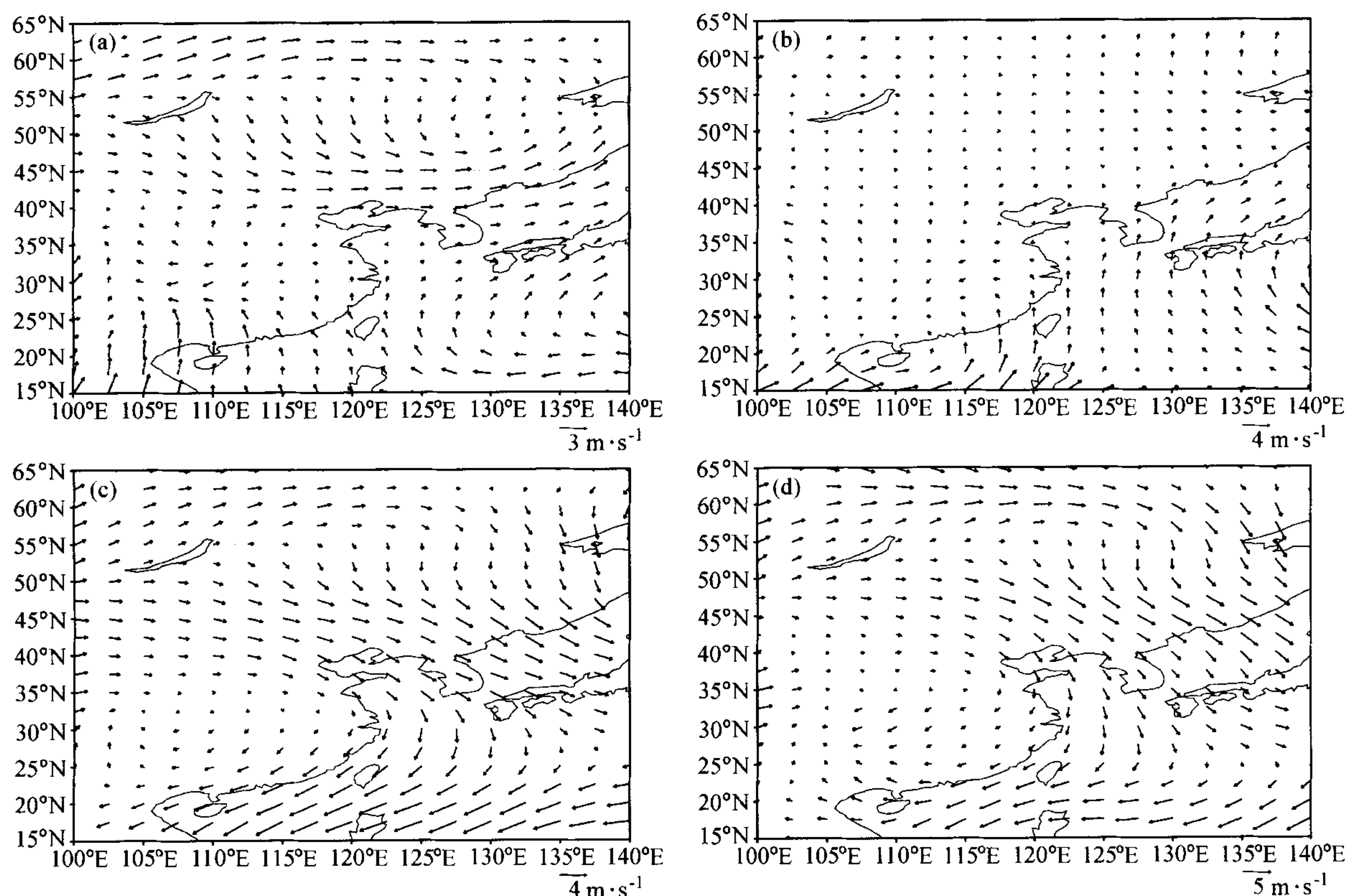


图3 2002年各季风流线场。(a) 春季；(b) 夏季；(c) 秋季；(d) 冬季

Fig. 3 Field of wind streamline in 2002. (a) Spring; (b) Summer; (c) Autumn; (d) Winter

结果与采用2002年的资料结果相当，本省源的贡献占了绝大多数，表明雨强变化不是造成这种现象的关键原因。但是把2002年的常规气象场资料（包括风场、温度、相对湿度）用2000年的替换，重新代入模式计算后发现福建省2002年接收的硫沉降量变为96 871.48 t，福建本省源的贡献为47.28%，大多数是来自外省源的传输，这与1995、2000年的结论相同。可见，各年的气象场分布，其中主要是风场的分布，对污染物的远距离输送和沉降起着至关重要的作用。

图2和图3分别给出了2000与2002年风场流线，选取模式的第2层925 hPa作比较。可以看出2002与2000年的春夏秋冬4个季节的风场趋势有很大的不同，福建省上空的风速值比2000年小很多，这就是2002年福建省接收的硫沉降量比1995、2000年明显小很多的最主要原因。

通过比较福建省与江西、安徽、广东和江苏等几个邻近省份SO₂的年排放量（见图4），可知福建省为SO₂的低排放区。但有关资料显示福建省的降水酸化程度却比邻近几个省份严重，结合

上面的模式结果的分析，可知福建本省源排入大气的致酸物不是导致该省酸雨发生的决定条件，而外来源的输送却对福建酸雨的发生起着至关重要的作用。

3.2 1995、2000、2002年4个季节福建省硫沉降量的变化

由上文的数据分析可以看出，福建省的硫沉降很大一部分来自外省的输送，而硫的长距离输送与多种因素有关，其中很重要的就是气象条件的影响，每年4个季节在风场、降水量等方面都有很大的差异，因此，运用上述模式计算了3年各个季节福建省的硫沉降量，并对其进行了分析。这里冬季指从上年12月到该年的2月，春季指该年的3至5月，依此类推。

从表1可以看出，1995、2000年4个季节中春、夏季福建省接收的沉降量最多，除了夏季，其他季节外来源比例占到一半以上，而且硫的远距离输送季节性差异很大。1995年春季广东的输送量就占到了15.82%，广西8.02%，江西8.01%，浙江6.54%（见图5）；2000年春季广东

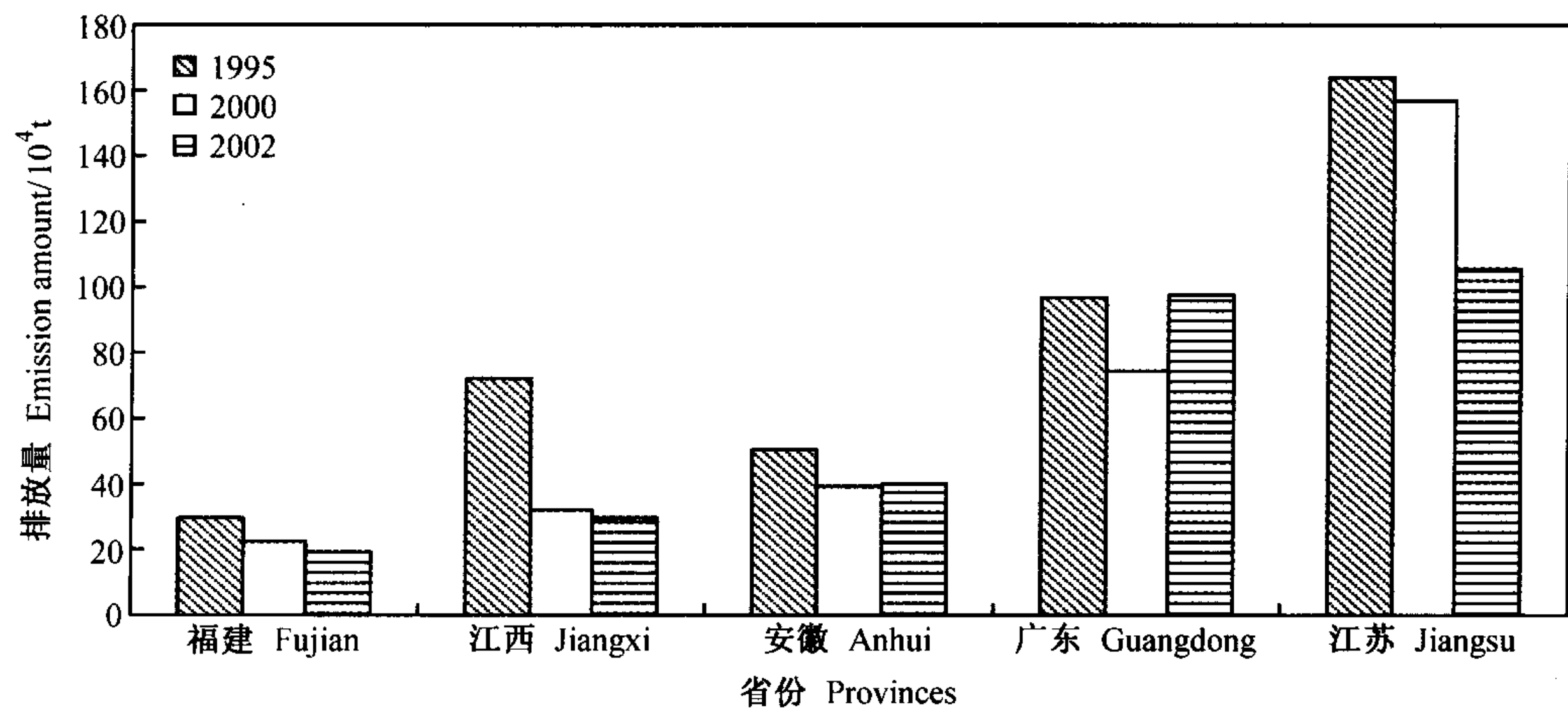


图 4 1995、2000、2002 年福建省与周边省份 SO₂排放量比较

Fig. 4 Comparison of SO₂ emission between Fujian and ambient provinces of China in 1995, 2000 and 2002

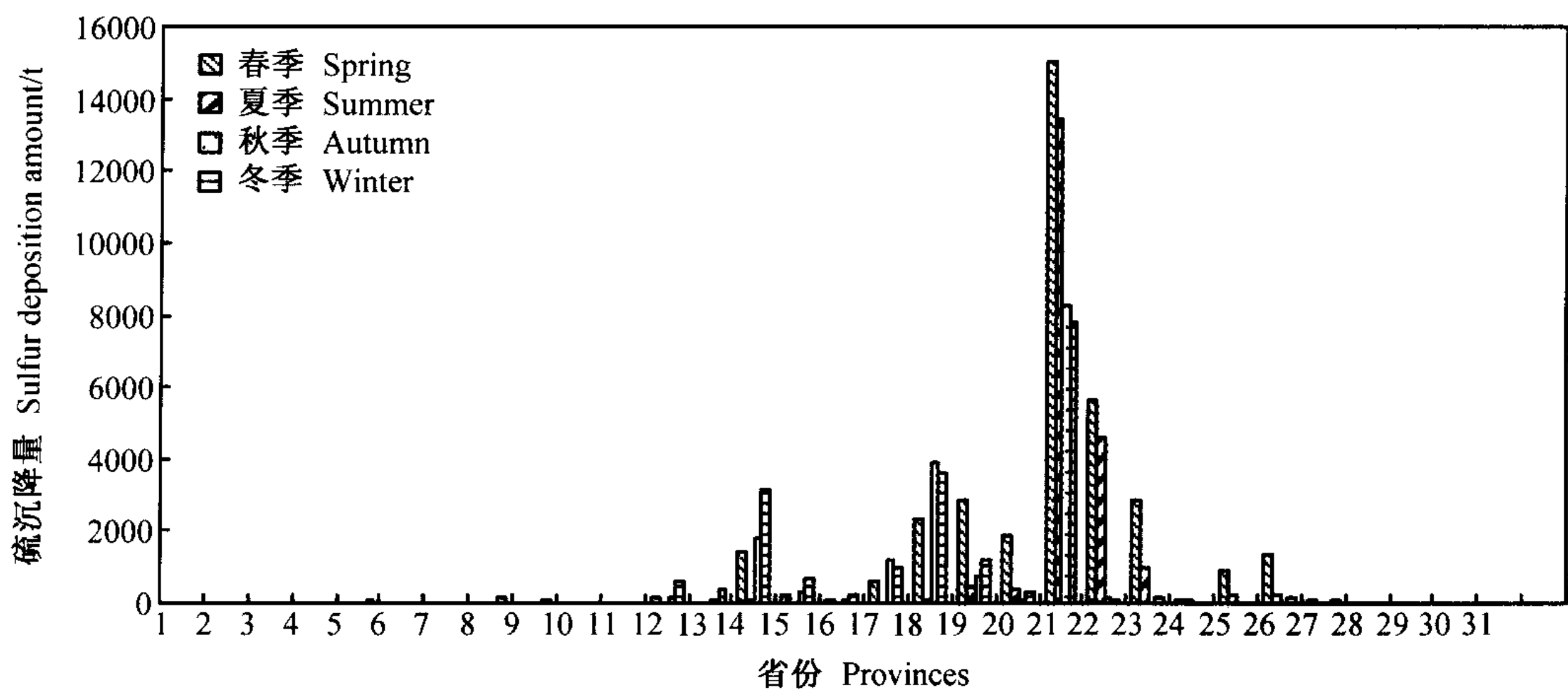


图 5 1995 年四季各省排放源在福建造成的硫沉降量 (省份编号同图 1)

Fig. 5 Sulfur deposition in Fujian from emission source of each province of China in 1995 (province numbers are the same as that in Fig. 1)

表 1 4 个季节福建省接收的硫沉降量及各季节外来源所占比例

Table 1 Sulphur deposition in Fujian and contribution of ambient sources in four seasons

年份 Year	硫沉降量 Sulfur deposition amount/t				外来源比例 Proportion of exotic emission source/%			
	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter
	Spring	Summer	Autumn	Winter	Spring	Summer	Autumn	Winter
1995	35429.85	20600.79	16839.68	19880.75	57.59	34.78	51.08	60.84
2000	30808.98	23895.54	29825.78	22818.11	56.11	30.86	64.08	62.40
2002	7860.92	13713.81	9011.18	5730.42	24.40	25.72	33.74	16.69
2002b	27975.24	22547.75	26401.59	20225.34	55.28	31.43	62.53	60.65

注：2002b 是用 2000 年气象场资料替换 2002 年的计算结果

Note: 2002b is the result using the meteorological field data of 2000 instead of 2002

的贡献为 12.48%，广西 5.24%，江西 6.0%，浙江 12.62%。1995 年夏季广东的贡献也最大，占 22.40%，浙江 4.85%；2002 年夏季广东的贡献为 23.60%，浙江 7.87%。

1995、2000 年冬季的外来源比例最高。1995 年浙江向福建的输送量占总量的 18.28%，江苏占

15.92%, 江西 6.18%, 上海 5.04%, 广东 0.56%; 2000 年浙江的贡献为 29.15%, 江苏 9.86%, 上海 7%, 江西 3.54%。秋季 1995 年浙江的贡献为 23.12%, 江苏 10.85%, 广东为 0.92%。2000 年秋季浙江的贡献为 35.74%, 江苏 8.79%, 广东 3.83%。

福建省周围的省份中广东、浙江、江苏都是燃煤排放大省, 而且, 由模拟结果可知, 春夏季, 广东向福建输送的硫最多, 秋冬季浙江、江苏则是贡献大省。这是因为, 春夏季(特别是 2~5 月)福建往往出现连阴雨天气, 大陆冷气团与海洋暖气团在南方交汇相持形成准静止锋, 造成大气污染物粒子在福建的沉积; 秋冬季主导风向是北风, 此时恰逢北方各省采暖季节, 燃煤消耗量大, 排放集中, 污染物随冷空气南下入侵福建。

2002 年 4 个季节的硫沉降量比 1995、2000 年少了很多且差异很大, 这与 2002 年气象场条件有很大的关系, 如前所述, 当采用 2000 年的气象场条件时, 趋势与 1995、2000 年一致, 模拟数值如表 1 中 2002b 一行所示。

4 福建省 SO_2 、 SO_4^{2-} 沉降来源比较

4.1 福建省 SO_2 、 SO_4^{2-} 沉降总量分析

把模式计算出的 SO_2 、 SO_4^{2-} 年沉降总量分开进行了处理, 图 6 给出了 1995 年各省向福建省输送的 SO_2 、 SO_4^{2-} 的沉降量。由于 2000、2002 趋势同 1995 年, 图略。

1995 年福建省共接收 SO_2 沉降量 35 820.46 t, 福建本省源的贡献为 85.57%, 占绝大多数; 2000 年福建共接收 34 997.57 t, 本省源的贡献占 88.35%; 2002 年福建共接收 31 145.79 t, 本省源的贡献占 81.56%。这些结果说明 SO_2 的沉降量中福建本省源的贡献是主要的。

SO_4^{2-} 的沉降量的贡献来源有很大的不同, 1995 年福建省共接收 SO_4^{2-} 沉降 57 970.14 t, 福建本省源的贡献只占 24.0%, 绝大多数来自于外省的远距离输送, 其中广东向其输送的最多, 占 17.67%, 广西 6.93%, 浙江 13.91%, 江西 7.76%, 江苏 9.40%; 2000 年福建省共接收 SO_4^{2-} 沉降量 72 189.7 t, 本省源的贡献仅占 25.65%, 外省的输送依然居多, 浙江输送最多,

达 25.80%, 广东占 15.24%, 江苏 7.91%, 上海 6.07%, 广西 3.63%, 江西 5.37%; 2002 年福建省共接收 SO_4^{2-} 沉降量 5 026.82 t, 本省源的贡献占 29.19%, 湖南贡献最多占 16.75%, 贵州 14.76%, 广东 10.41%, 江西 8.15%, 浙江为 1.98%, 江苏为 0。

2002 年福建省 SO_2 的总沉降量及来源贡献与 1995、2000 年相比, 大小和趋势都很一致; 而 SO_4^{2-} 无论从总量, 还是主要来源地和 1995、2000 年就有很大差异了。分析发现这还是 2002 年的气象场条件造成的, 同时发现, 气象场条件对 SO_4^{2-} 的影响要比对 SO_2 的影响大得多, 也就是说, SO_4^{2-} 的远距离输送对气象场条件的依赖性很大。

总之, 福建省 SO_2 的沉降量中本省源的贡献最多, 是主要影响因素; 而 SO_4^{2-} 的沉降量则主要来自周围省份的远距离输送。

4.2 福建省 SO_2 、 SO_4^{2-} 沉降分季节比较

为了更好地了解 SO_2 、 SO_4^{2-} 沉降与输送特性, 对它们分季节进行了比较。由表 2 可以看出, 1995 年福建省各季的沉降量中, SO_4^{2-} 的沉降量远大于 SO_2 的沉降量, 特别是春季, SO_4^{2-} 的沉降量是 SO_2 沉降量的 3 倍多, 而且各个季节 SO_4^{2-} 的外来源比例都超过了 60%, 而 SO_2 的来源则主要是本省排放源。春季福建省 SO_4^{2-} 造成的沉降量中广东的占 20.96%, 广西 10.74%, 江西 10.09%, 湖南 7.03%, 浙江 8.21%, 江苏 5.13%; 夏季广东的占 39.65%, 广西 8.20%,; 秋季浙江的比例为 35.07%, 江苏 17.69%, 上海 11.77%, 江西 5.93%; 冬季浙江的输送比例为 24.26%, 江苏为 22.87%, 上海 7.5%。

2000 年四季的沉降量趋势同 1995 年, SO_4^{2-} 的沉降量远大于 SO_2 的沉降量, 仍然是春季 SO_4^{2-} 输送进来的最多, 各个季节 SO_4^{2-} 的外来源比例都超过了 50%, 而 SO_2 的来源主要是本省排放源。春季 SO_4^{2-} 的沉降量中广东输送的占 17.15%, 浙江 15.80%, 江西 8.07%, 广西 7.24%, 江苏 5.24%; 夏季广东输送的占 37.92%; 秋季浙江输送得最多占 44.59%, 江苏 11.46%, 上海 9.19%, 广东 5.16%; 冬季还是浙江输送得最多占 36.77%, 江苏 13.47%, 上海 9.73%, 江西 5.19%, 广东 5.01%。

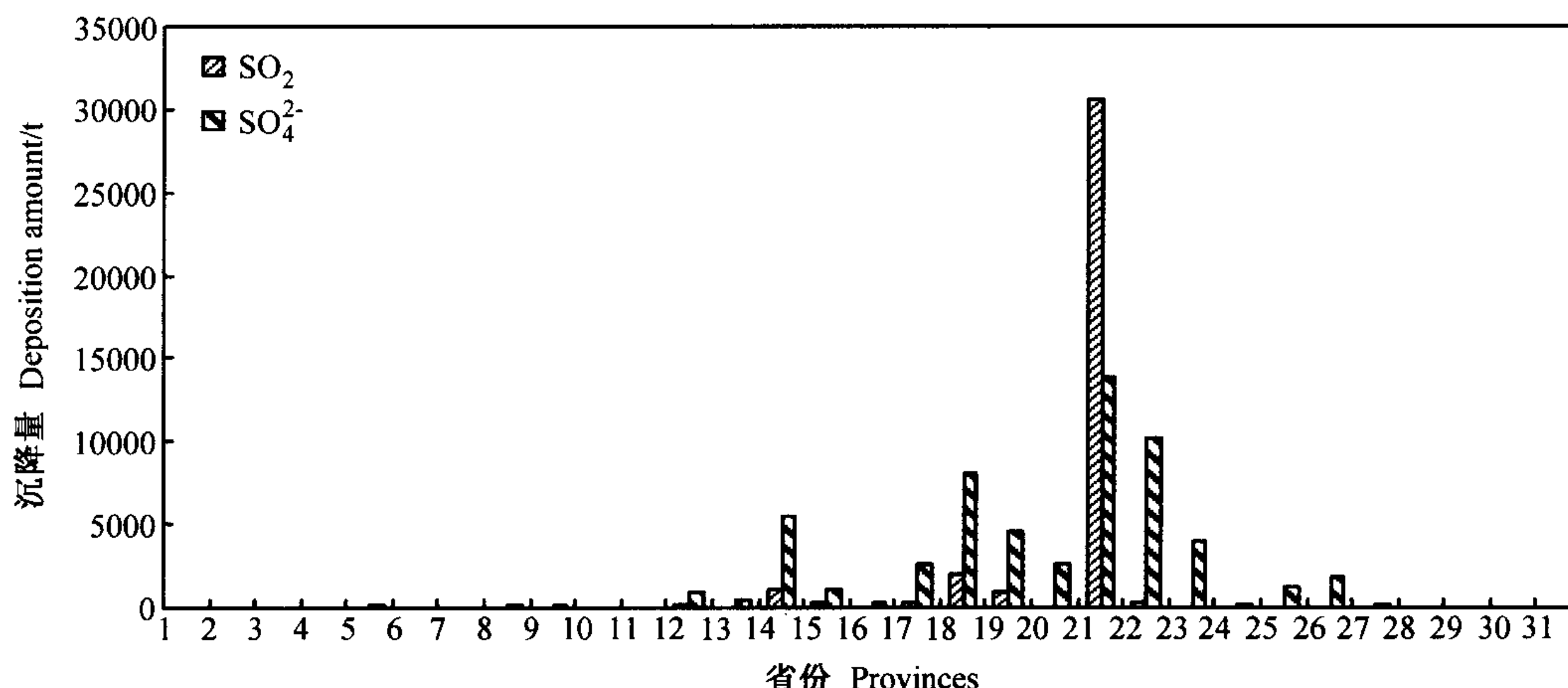


图6 1995年各省向福建输送的 SO_2 、 SO_4^{2-} 沉降量(省份编号同图1)

Fig. 6 SO_2 and SO_4^{2-} deposition in Fujian from emission source of each province of China in 1995 (province numbers are the same as that in Fig. 1)

表2 4个季节福建省接收的 SO_2 、 SO_4^{2-} 沉降量及各季节外来源所占比例

Table 2 SO_2 and SO_4^{2-} deposition in Fujian and contribution of ambient sources in four seasons

项目 Item		硫沉降量 Sulfur deposition amount/t				外来源比例 Proportion of exotic emission source/%			
		春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter
1995	SO_2	8708.78	9449.79	8139.95	9019.53	4.44	3.64	17.68	28.26
	SO_4^{2-}	26367.3	11050.18	9142.09	10540.54	74.75	60.81	82.70	87.72
2000	SO_2	8626.98	9939.69	8365.17	8088.14	5.89	3.81	18.24	21.62
	SO_4^{2-}	22293.52	14080.4	21328.63	14720.71	75.77	50.32	81.73	84.70
2002	SO_2	7039.77	11117.07	7567.75	5497.69	18.59	16.76	24.34	14.57
	SO_4^{2-}	697.55	2364.64	1476.35	309.91	72.94	61.48	81.12	71.31

2002年 SO_2 的沉降量也是绝大多数来自福建本省排放源, SO_4^{2-} 的沉降量则主要来自外省源的远距离输送。但是,由于2002年气象场条件的原因,从数量上来看,2002年 SO_4^{2-} 的沉降量要比1995、2000年少很多,就此也可得出 SO_4^{2-} 的远距离输送对气象场的依赖性很大。

总之,4个季节中,福建省 SO_4^{2-} 造成的沉降量均比 SO_2 的要得多,且60%以上来自外省源的输送,春夏季福建省西边的省份向其输送的沉降量偏多,秋冬季北边的省份输送量偏多,这与各个季节的风场条件相一致。

5 结论

通过对1995、2000、2002年及每年4个季节硫化物总沉降量和 SO_2 、 SO_4^{2-} 沉降量的模拟分析,结果表明:

(1) 福建省1995、2000年接收的硫沉降量中一半以上是来自周边省份的远距离输送,2002年由于气象场条件的原因,则主要来自本省源的贡献。硫化物的远距离输送对气象场条件依赖性很大。每年4个季节中,春季接收的硫沉降量最多,而且春夏季主要受福建西边省份的影响,秋冬季主要受北边省份的影响。

(2) 福建省 SO_4^{2-} 造成的沉降量中绝大多数来自邻近省份的远距离输送,而 SO_2 的沉降量主要来源于本省排放源的影响。1995、2000年 SO_4^{2-} 造成的沉降量均远大于 SO_2 的沉降量。2002年由于气象场条件的不同, SO_4^{2-} 造成的沉降量远远少于往年,而 SO_2 的沉降量和往年相当。

(3) SO_4^{2-} 的远距离输送能力比 SO_2 强得多,而且 SO_4^{2-} 对气象场条件的敏感程度也很大,所以各年气象场条件的不同对 SO_4^{2-} 的远程输送影响很

大,可以说直接决定了福建省该年的受污染程度。

由于本文所用的 2000、2002 年的全国各个排放源详细资料是根据总量控制的原则,在 1995 年的基础上减排得来的,势必与实际情况有差异,但在考虑省与省之间的相互输送时,这种差异并不影响总体趋势。论文的分析中也提到,模式结果 2002 年沉降量与 2000、1995 年有很大不同主要是由于气象场条件的原因,这有待于在今后的工作中进一步考察。

参考文献 (References)

- [1] 丁国安,徐晓斌,房秀梅,等. 中国酸雨现状及发展趋势. 科学通报, 1997, **42** (2): 169~173
Ding Guoan, Xu Xiaobin, Fang Xiumei, et al. Present situation of acid rain in China and its trend. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 1997, **42** (2): 169~173
- [2] 赵卫红. 福建省酸雨控制区酸雨污染特征及成因. 福建环境, 2002, **19** (2): 11~13
Zhao Weihong. Character and cause of acid rain pollution in controlling area of acid rain in Fujian. *Fujian Environment* (in Chinese), **19** (2): 11~13
- [3] 潘秀丽. 福建省酸雨成因分析及防治措施. 水文, 2001, **21** (1): 47~49
Pan Xiuli. Analysis on the cause of acid rain in Fujian and its prevention and cure. *Hydrology* (in Chinese), 2001, **21** (1): 47~49
- [4] 王文兴. 中国酸雨成因研究. 中国环境科学, 1994, **14** (5): 323~329
Wang Wenxing. Research on the cause of acid rain in China. *Chinese Environment Science* (in Chinese), **14** (5): 323~329
- [5] Chang J S, R A Brost, I S A Isaksen, et al. RADM, a Three-dimensional Eulerian Acid Deposition Model. Part I: Physical Concepts and Model Formulation. *J. Geophys. Res.*, 1987, **92** (D12): 14681~14700
- [6] Carmichael G R, L Peters, T Kitada, et al. A Second Generation Model for Regional-Scale Transport/Chemistry/Deposition. *Atmos. Environ.*, 1986, **20**: 173~188
- [7] Carmichael G R, Peters L K, Saylor R D. The STEM-II regional scale acid deposition and photochemical oxidant model, I, An overview of model development and applications. *Atmos. Environ.*, 1991, **25A**: 2077~2090
- [8] 肖辉, Carmichael R, Yang Zhang. 用 STEM-II 模式研究东亚地区春季沙尘气溶胶对硫化物输送和沉降的影响. 气候与环境研究, 1998, **3** (2): 106~116
Xiao Hui, Carmichael R, Yang Zhang. Modeling Studies for the Effects of Spring-Time Mineral Aerosols on the Transport and Deposition of Sulfur in East Asia Using the STEM-II Model, *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 1998, **3** (2): 106~116
- [9] 贾新媛. 区域酸沉降模式. 大气科学, 1993, **17** (6): 732~739
Jia Xinyuan, Regional Scale Acid Deposition Model, *Scientific Atmospherica Sinica* (in Chinese), 1993, **17** (6): 732~739
- [10] 王体健,李宗恺,南方. 区域酸性沉降的数值研究 I. 模式. 大气科学, 1996, **20** (5): 606~614
Wang Tijian, Li Zongkai, Nanfang. Numerical modeling of Regional acid deposition Part I: Model. *Scientific Atmospherica Sinica* (in Chinese), 1996, **20** (5): 606~614
- [11] Huang Meiyuan, Wang Zifa, He Dongyang, et al. Modeling studies on sulfur deposition and transport in East Asia. *Water, Air and Soil Pollution*, 1995, **85**: 1921~1926
- [12] 王自发,黄美元,何东阳,等. 关于我国和东亚酸性物质的输送研究 I. 三维欧拉污染物输送实用模式. 大气科学, 1997, **21** (3): 336~378
Wang Zifa, Huang Meiyuan, He Dongyang, et al. Studies on acid substance transport in China and south Asia I. 3-D Eulerian practical transport model of air pollutants. *Scientific Atmospherica Sinica* (in Chinese), 1997, **21** (3): 336~378
- [13] 张新玲,安俊岭,程新金,等. 查表法处理 SO_x 气相化学过程的性能检验. 环境科学学报, 2001, **21** (5): 513~518
Zhang Xinling, An Junling, Cheng Xinjin, et al. Simulated test of capacity of the look-up table method for treatment of SO_x processes. *Circumstance Science Transaction* (in Chinese), 2001, **21** (5): 513~518
- [14] 张新玲,安俊岭,程新金,等. 污染源、气象条件变化对我国 SO₂ 浓度及硫沉降量分布的影响. 大气科学, 2003, **27** (5): 939~947
Zhang Xinling, An Junling, Cheng Xinjin, et al. Effect of Evolutions of Source Emissions and Meteorological Factors on SO₂ Distribution and Sulfur Deposition in China. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2003, **27** (5): 939~947
- [15] 王自发. 我国和东亚地区硫化物与黄沙输送研究. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文. 1997, 10~19
Wang Zifa. Study on the transport of sulfur and yellow-sand in China and East Asia. Ph. D. dissertation, Institute of Atmospheric Physics of the Chinese Academy of Sciences, 1997, 10~19
- [16] Xiao Hui, Wu Yuxia, Shen Zhilai, et al. Aircraft-based measurements of atmospheric pollutants in the troposphere over the eastern coast of China. In: *Air Quality and Atmospheric Science*, Chen Fu, Ed. Beijing: China Ocean Press, 1999. 398~406
- [17] Hayime Akimoto and Hirohito Narita. Distribution of SO₂, NO_x and CO₂ emissions from fuel combustion and industrial activities in Asia with 1°×1° resolution. *Atmos. Environ.*, 1994, **28** (2), 213~225
- [18] 程新金,孙继明,雷恒池,等. 中国二氧化硫排放控制的效果评估. 大气科学, 2004, **28** (2): 174~186
Cheng Xinjin, Sun Jiming, Lei Hengchi, et al. Evaluation of SO₂ emission control in China. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2004, **28** (2): 174~186