

# 中国二氧化硫排放控制的效果评估<sup>\*</sup>

程新金<sup>1)</sup> 孙继明<sup>1, 2)</sup> 雷恒池<sup>1)</sup> 段 宁<sup>3)</sup> 安俊岭<sup>1)</sup>

1) (中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)  
2) (宁夏气象科学研究所, 银川 750002)  
3) (中国环境科学研究院大气环境研究所, 北京 100012)

**摘 要** 综合中国大陆二氧化硫排放源详细资料及国家所制定的酸雨控制区和二氧化硫控制区污染源控制排放目标, 推算了 1995 年、2000 年和 2005 年  $1^\circ \times 1^\circ$  网格的二氧化硫排放量; 应用三维欧拉型污染物输送模式模拟计算了 1995 年硫沉降量和地面二氧化硫浓度的分布, 以及依照控制目标实施后 2000 年和 2005 年控制区硫沉降和二氧化硫浓度的变化; 根据中国硫沉降临界负荷的分布, 计算了不同时期超临界负荷区和超临界负荷量。结果表明, 2000 年和 2005 年在二氧化硫排放量与 1995 年相比分别减少 21.4% 和 28.4% 的情况下, 在我国大陆的硫沉降量分别下降了 17% 和 24.7%; 1995 年中国超临界负荷区面积已达国土面积的 32.7%, 硫沉降超临界负荷总量占该年硫沉降总量的 45.4%, 危害相当严重; 以目前的控制方案和控制目标, 全国硫沉降超临界负荷总量比 1995 年减少 12%~35.3%, 超临界负荷区域面积减少 0.3%~6.9%, 超临界负荷区域面积减少非常有限。

**关键词:** 二氧化硫; 硫沉降; 超临界负荷

**文章编号** 1006-9895 (2004) 02-0174-13 **中图分类号** P402 **文献标识码** A

## 1 引言

针对酸雨和二氧化硫污染的不断加剧, 1998 年 1 月 12 日, 国务院批准了酸雨控制区和二氧化硫污染控制区 (以下简称“两控区”) 的划分方案, 并确定了“两控区”的控制目标<sup>[1]</sup>。通过实施该方案后, 二氧化硫排放总量逐年增加的势头得到了遏制, 2000 年我国的主要排放企业达到了国家控制的排放目标。但是, 按照“两控区”的划定范围以及二氧化硫排放标准实施后, 我国的硫沉降出现何种变化, 大气质量的实际变化如何, 能否基本控制全国酸雨和二氧化硫污染不断恶化的趋势, 这是一个值得研究的课题。Lynch 等<sup>[2]</sup>评估了美国东部在 1995 年至 1997 年间, 二氧化硫排放消减 38% 后, 湿硫沉降减少了 10%~25%。我国的控制效果如何也是一个急需回答的问题。

本文利用详细的 1995 年中国大陆二氧化硫排放源资料, 以及控制区排放源的排放目标, 应用数值模拟的方法, 模拟计算了 1995 年的硫沉降量和地面二氧化硫浓度的分布, 并且模拟了依照控制目标实施后 2000 年和 2005 年的硫沉降量分布和地面二氧化硫浓度的分布; 根据我国硫沉降临界负荷的分布, 计算了不同时期的超临界负荷区和超临界负荷量。

2002-11-27 收到, 2003-04-21 收到修改稿  
<sup>\*</sup> 国家重点基础研究规划项目 G1999032801 资助

2 资料与研究方法

2.1 二氧化硫排放源资料

准确、详细的污染源排放量资料是我们研究特定地区污染物传输规律以及干、湿沉降特点的基本要求。“两控区”的划分是按 1995 年二氧化硫排放量确定的，为了应用数值模拟的方法比较控制前和控制后我国二氧化硫污染状况的变化，必须确定 1995 年、2000 年和 2005 年  $1^{\circ}\times 1^{\circ}$  网格的二氧化硫排放量。Streets 等<sup>[3, 4]</sup>利用 RAINS-ASIA 模型估计了我国不同时期二氧化硫的排放量，Wang 等<sup>[5]</sup>利用统计的城市源和电厂源做出了 1995 年的网格排放量，排放总量为 24500 kt。我们利用国家环保局提供的排放源资料重新计算了  $1^{\circ}\times 1^{\circ}$  网格的排放量。

2.1.1 1995 年  $1^{\circ}\times 1^{\circ}$  网格的二氧化硫排放量

根据 1995 年详细的二氧化硫城市排放源和重点排放企业合计的我国二氧化硫排放总量为 25780.4 kt（见表 1）。1995 年“两控区”排放量为 15338.8 kt，其中酸雨控制区为 8901.7 kt，二氧化硫控制区为 6437.1 kt。控制区内各城市以及重点控制企业 1995 年排放量和分布见图 1。

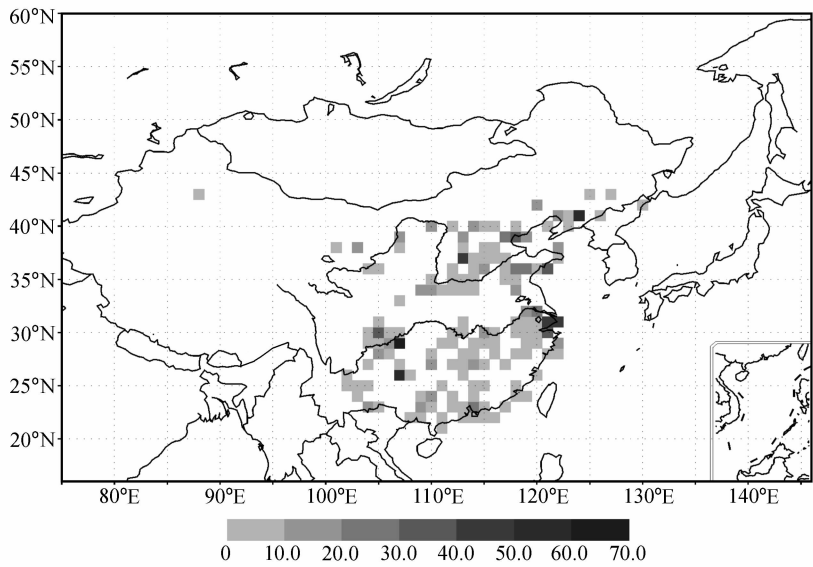


图 1 控制区各城市以及重点控制企业 1995 年排放量（单位：kt）和分布（ $1^{\circ}\times 1^{\circ}$  网格）

在对控制区各地区排放源总量控制的同时，我国还对年二氧化硫排放量大于 5 kt 的 258 个二氧化硫排放企业进行重点控制，涉及年二氧化硫排放量 5323 kt，其中酸雨控制区 96 个排放企业，年二氧化硫排放量 1986 kt，二氧化硫污染控制区 79 个排放企业，二氧化硫年排放量 1986 kt，非控制地区 83 个企业，二氧化硫年排放量 1810 kt。

从图 2 可以看出我国二氧化硫的主要排放区域集中在华北、华中、华东、西南和华南地区，控制区排放量最大值出现在重庆为  $88.27\text{ g m}^{-2}\text{ a}^{-1}$ ，非控区最大值出现在六盘水为  $33.09\text{ g m}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 。二氧化硫控制区和酸雨控制区的控制区域和我国的主要排放

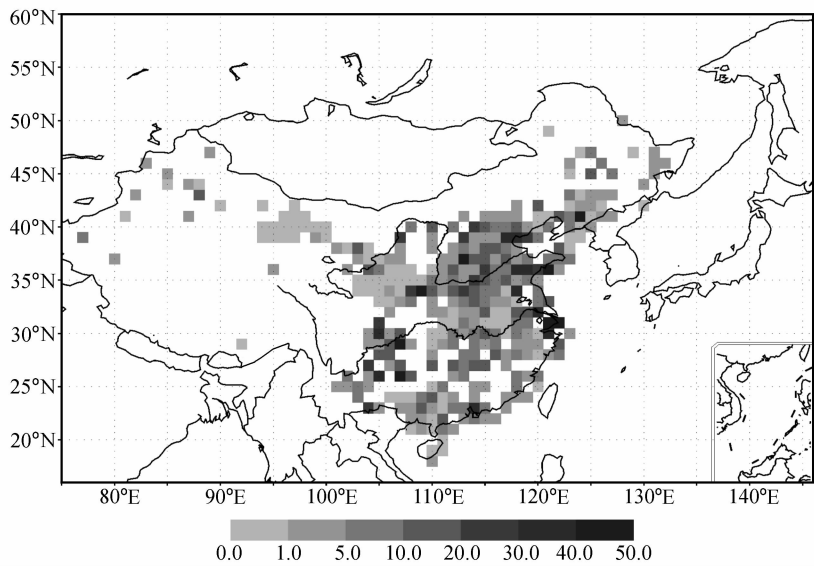


图 2 中国大陆 1995 年二氧化硫  $1^{\circ}\times 1^{\circ}$  网格排放量 (单位:  $\text{g m}^{-2} \text{a}^{-1}$ )

区域一致,但从图 1 和图 2 看出有些高排放区没在控制区,如河南的部分地区。

2.1.2 2000 年  $1^{\circ}\times 1^{\circ}$  网格的二氧化硫排放量

由于缺少 2000 年污染源详细的排放量资料,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。2000 年公布的二氧化硫排放总量为 19950 kt,这与 1995 年的排放量的差距较大,因此在评估控制效果时将 19950 kt 作为目标控制量的一个方案,还需考虑其他的方案。

“两控区”实际排放总量为 13170 kt,目标控制总量为 13565.2 kt。因此,可以设定 2000 年控制区内各排放源的目标排放量为实际排放量,所有重点控制的高架源按照 8.17%减排<sup>①</sup>,非控区各污染源的排放按照以下两个方案进行减排。

**高方案** 非控区排放源的排放量与 1995 年排放量一致。按照此方案估算的 2000 年二氧化硫全国排放总量为 24370 kt,达到了“国家环境保护‘九五’计划和 2010 年远景目标”中计划 2000 年排放总量控制在 24600 kt 以下的目标。在此方案下估算的 2000 年高架源  $1^{\circ}\times 1^{\circ}$  二氧化硫排放量最大值出现在广州为  $48.9 \text{ g m}^{-2} \text{a}^{-1}$ ;非控区二氧化硫  $1^{\circ}\times 1^{\circ}$  网格高架源估算排放量,最大值出现在六盘水  $32.9 \text{ g m}^{-2} \text{a}^{-1}$ 。

**低方案** 要达到 2000 年公布的排放总量,除了控制区各污染源按照目标排放量消减外,非控区各污染源也必须进行消减。非控区排放源排放量的消减采用按比例消减的办法,具体方法是在 1995 年非控区各排放源排放量的基础上,按 1995 年至 2000 年各省非控区排放量递减率的一半进行消减。经该方案计算后 2000 年的排放总量为 20249 kt,与公布值相当。

低方案估算的 2000 年高架源  $1^{\circ}\times 1^{\circ}$  网格控制区二氧化硫排放量最大值出现在广州为  $47.5 \text{ g m}^{-2} \text{a}^{-1}$ 。非控区二氧化硫  $1^{\circ}\times 1^{\circ}$  网格高架源估算排放量,最大值出现在六盘

<sup>①</sup> 王金南,中国“十五”期间二氧化硫总量控制,SO<sub>2</sub>和酸雨控制研讨会,北京,2001.

水  $30.2 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。

2.1.3 2005 年二氧化硫  $1^\circ \times 1^\circ$  网格预测排放量

在“国民经济和社会发展‘十五’计划纲要”中计划 2005 年二氧化硫排放总量为 18000 kt，“两控区”排放量为 10530 kt，但“两控区”各地、市制定的 2005 年二氧化硫控制目标总量为 13148.6 kt，因此，要达到“十五”计划目标，控制区内各排放源还要减少 20%。非控区各排放源按各省 1995 年至 2005 年非控区递减率减排，各高架源按照 24% 的消减比例减排<sup>[6]</sup>，预测的排放总量为 1846 万吨。控制区低架源  $1^\circ \times 1^\circ$  网格排放量最大值出现在苏州为  $49.6 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ；非控区  $1^\circ \times 1^\circ$  网格低架源最大值出现在六盘水为  $26.8 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。

2.2 模式

我们采用王自发等<sup>[6]</sup>发展的三维欧拉型污染物输送的实用模式。该模式考虑了影响  $\text{SO}_2$  输送及其硫沉降的物理和化学过程，可以有效地模拟  $\text{SO}_2$  输送、转化和去除机制。王自发等<sup>[7]</sup>对该模式的模拟值和观测值进行了对比分析，验证了该模式具有较好的模拟能力。张新玲等<sup>[8]</sup>对污染物长距离输送模式中的气相化学过程采用查表法处理和直接耦合气相化学模式进行了分析研究，研究表明查表法能够较好地反应硫化物沉降量以及浓度的分布趋势。这对我们利用该模式进行长时期硫化物沉降和输送研究提供了科学依据，在模拟时将高架源的排放量放在模式的第二层。

除中国大陆外的其他排放源资料选用 Akimoto 的资料<sup>[9]</sup>，并按年变化率进行了订正。日本的火山对硫沉降的影响很大，因此加入了日本火山源的资料。

气象场资料采用 NCEP 等压面（1000 hPa、925 hPa、850 hPa、700 hPa、500 hPa、400 hPa、300 hPa、200 hPa、100 hPa）1995 年的月平均气象场资料，网格距为  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ ，采用线性插值的方法把各气象要素插值到  $1^\circ \times 1^\circ$  网格。

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值成  $1^\circ \times 1^\circ$  格点资料。

3 结果分析

3.1 硫沉降及二氧化硫浓度

3.1.1 1995 年硫沉降和二氧化硫浓度的模拟

模拟的 1995 年中国大陆全年的硫沉降总量为 5623.592 kt，其中控制区排放源造成的硫沉降总量为 2989.482 kt。图 3 为硫沉降大于  $0.1 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$  的区域分布，从该图看出，我国存在着五个大范围的硫沉降高值中心，它们分别在西南地区、华北地区、华东地区、华中地区和华南地区。硫沉降量最大的地区出现在重庆为  $10.40 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。大于  $0.1 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$  的分布区域集中在我国青藏高原以东的陆地和西太平洋上；硫沉降大于  $0.5 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$  的区域分布集中在我国主要的二氧化硫排放地区、朝鲜半岛以及日本，而海洋上只出现在近海附近。

从表 1 看出，硫沉降量最大的省是四川（包括重庆）为 908.0779 kt，最小的省是海南为 8.5423 kt；硫排放较多的省份容纳的硫沉降量也较多，但它们并不是线性关系。1995 年各省硫沉降量与硫排放量的比值有较大的差异；排放量最多的山东省，其排放

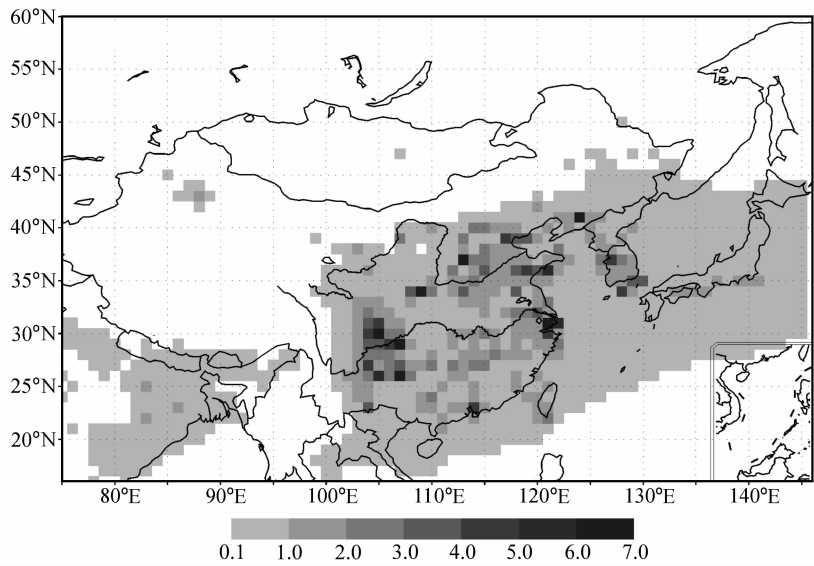


图 3 1995 年中国及东亚地区硫沉降分布模拟 (大于  $0.1 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$  的区域)

量为全国的 9.5%，而沉降到该省的硫为 345.4563 kt，占全国硫沉降量的 6.06%，沉降量与排放量的比值为 28.3%，；四川和重庆的总排放量为全国的 9.4%，沉降到这两个地区的硫却占到了全国硫沉降的 15.93%，沉降量与排放量的比值为 75.1%。

图 4 为模拟的 1995 年地面  $\text{SO}_2$  浓度，从图中看出，模拟的我国大陆地面的高  $\text{SO}_2$  浓度区与  $\text{SO}_2$  的高排放区是一致的 (图 2)，分别出现在贵阳、重庆、西安、太原、京津地区、丹东、山东、珠江三角洲地区和长江三角洲地区，最大值出现在重庆为  $105.3 \mu\text{g m}^{-3}$ 。

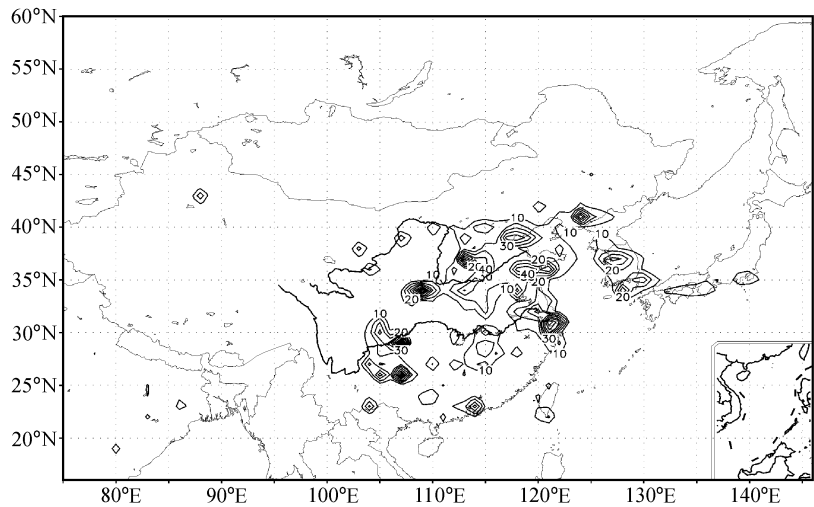


图 4 1995 年地面  $\text{SO}_2$  日均浓度模拟值 (单位:  $\mu\text{g m}^{-3}$ )

3.1.2 2000 年硫沉降和二氧化硫浓度的模拟

高方案 在该方案下模拟的中国大陆全年的硫沉降总量为 5289.202 kt，在我国大陆的硫沉降量与 1995 年相比下降了 6.2%，排放量消减最大的四川（包括重庆）消减

表 1  各年各省硫排放量和硫沉降量

| 省、市、区 | 1995 年  |          |            | 2000 年估计 |          | 2005 年预计 |          |
|-------|---------|----------|------------|----------|----------|----------|----------|
|       | 硫排放/ kt | 硫沉降/ kt  | 硫沉降/硫排放    | 硫排放 / kt | 硫沉降/kt   | 硫排放/kt   | 硫沉降/kt   |
| 黑龙江   | 144.8   | 53.062   | 36.6%      | 139.4    | 53.636   | 133.135  | 50.349   |
| 吉 林   | 137.7   | 64.265   | 46.7%      | 137.4    | 59.949   | 131.014  | 54.315   |
| 辽 宁   | 579.5   | 194.324  | 33.5%      | 500.0    | 161.154  | 429.332  | 142.248  |
| 内蒙古   | 386.8   | 165.391  | 42.8%      | 357.9    | 148.546  | 332.940  | 137.926  |
| 河 北   | 830.0   | 262.169  | 31.5%      | 535.9    | 199.417  | 480.831  | 159.506  |
| 北 京   | 191.0   | 52.550   | 27.5%      | 112.0    | 36.813   | 75.500   | 24.294   |
| 天 津   | 175.0   | 37.592   | 21.5%      | 148.8    | 30.865   | 172.036  | 34.348   |
| 山 西   | 789.3   | 236.495  | 30.0%      | 523.0    | 170.336  | 457.234  | 146.706  |
| 陕 西   | 633.0   | 219.830  | 34.7%      | 487.5    | 174.416  | 369.542  | 137.578  |
| 宁 夏   | 102.0   | 16.324   | 34.7%      | 108.4    | 15.317   | 107.616  | 13.295   |
| 甘 肃   | 220.2   | 142.763  | 64.8%      | 191.2    | 118.795  | 163.783  | 101.249  |
| 山 东   | 1219.0  | 345.456  | 28.3%      | 609.1    | 204.357  | 538.782  | 174.289  |
| 河 南   | 767.9   | 216.943  | 28.2%      | 465.6    | 130.673  | 360.112  | 110.408  |
| 江 苏   | 821.4   | 236.075  | 28.7%      | 824.6    | 226.494  | 761.858  | 207.190  |
| 安 徽   | 250.1   | 172.037  | 68.8%      | 189.5    | 150.401  | 175.263  | 138.056  |
| 湖 北   | 325.3   | 187.324  | 57.6%      | 234.6    | 155.520  | 227.689  | 136.427  |
| 上 海   | 255.3   | 60.052   | 23.52%     | 250.0    | 58.597   | 225.000  | 53.326   |
| 浙 江   | 414.0   | 191.925  | 46.4%      | 457.3    | 204.019  | 436.435  | 180.049  |
| 江 西   | 361.2   | 194.338  | 53.8%      | 284.5    | 165.606  | 207.806  | 141.409  |
| 湖 南   | 474.1   | 261.259  | 55.1%      | 412.5    | 228.433  | 420.066  | 224.745  |
| 福 建   | 146.4   | 110.462  | 75.4%      | 143.1    | 110.691  | 132.952  | 103.278  |
| 广 东*  | 485.3   | 194.807  | 40.1%      | 577.3    | 217.344  | 578.062  | 218.164  |
| 广 西   | 512.3   | 216.357  | 42.2%      | 352.3    | 173.924  | 348.579  | 166.728  |
| 海 南   | 18.9    | 8.612    | 45.6%      | 7.1      | 6.952    | 19.471   | 13.244   |
| 云 南   | 405.2   | 274.168  | 67.8%      | 312.7    | 226.594  | 241.759  | 193.525  |
| 贵 州   | 834.6   | 412.953  | 49.5%      | 656.2    | 332.079  | 615.850  | 309.092  |
| 四 川** | 1212.4  | 910.902  | 75.1%      | 990.5    | 734.786  | 946.324  | 682.368  |
| 青 海   | 19.7    | 58.050   | 295.4%     | 7.0      | 50.137   | 9.796    | 51.041   |
| 新 疆   | 177.5   | 65.555   | 36.9%      | 109.0    | 67.179   | 121.698  | 66.194   |
| 西 藏   | 0.5     | 61.535   | 1230700.0% | 0.5      | 61.197   | 10.000   | 66.093   |
| 合 计   | 12890.2 | 5623.592 | —          | 10124.5  | 4674.240 | 9230.000 | 4237.455 |

注：\* 包括香港，\*\* 包括重庆。

了 16.8%，该地区接收到的硫沉降量下降了 14.8%。硫沉降大于 0.1 g m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup> 的分布区域，与 1995 年没有明显变化。图 5 为控制区硫沉降和二氧化硫浓度与 1995 年比较的减少量，控制区大部分地区硫沉降和二氧化硫浓度是减少的，最大减少量出现在重庆，分别为 5.0 m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup> 和 54.3 μg m<sup>-3</sup>，但在长江三角洲和珠江三角洲是增加的，增加的原因是在部分地区计划排放量是增加的。沉降量增加的最大量位于广州，分别为 1.2 g m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup> 和 12.5 μg m<sup>-3</sup>。

低方案     该方案计算的二氧化硫排放量与 1995 年相比减少了 21.4%，在我国大陆的硫沉降量下降了 17%。从表 1 看出，对于排放量较少的省，如青海和海南等，排放量的减少对该地区的硫沉降的影响不明显；其他各省排放量消减率与硫沉降变化率有相同的变化趋势。

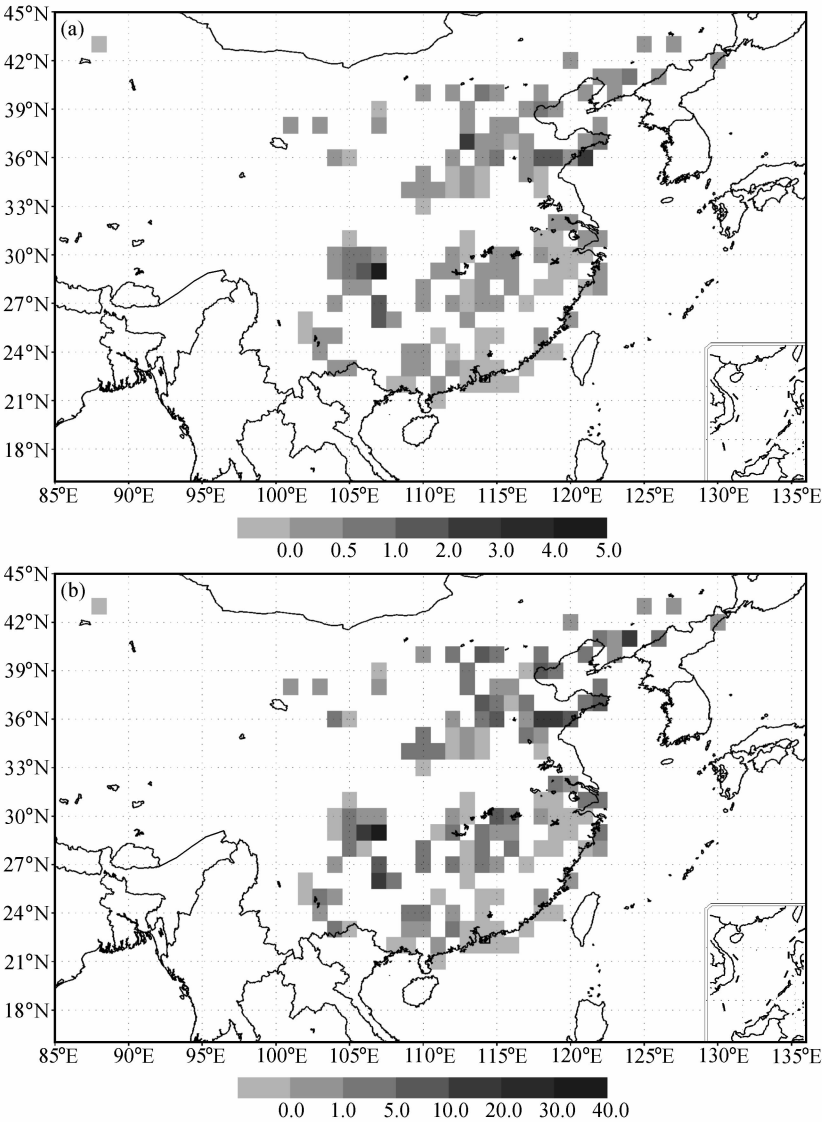


图 5 2000 年高方案下控制区硫沉降和  $\text{SO}_2$  浓度的减少量  
(a) 硫沉降, 单位:  $\text{g m}^{-2} \text{a}^{-1}$ ; (b)  $\text{SO}_2$  浓度, 单位:  $\mu\text{g m}^{-3}$

与 1995 年比较, 低方案模拟的大于  $0.1 \text{ g m}^{-2} \text{a}^{-1}$  的分布区域面积没有明显变化, 但华北地区的硫沉降高值区域明显缩小, 硫沉降量最大的地区出现在贵阳为  $7.6 \text{ g m}^{-2} \text{a}^{-1}$ 。高浓度地区的区域面积明显减少, 特别是在山东地区减少明显。浓度最大值出现在苏州为  $69.0 \mu\text{g m}^{-3}$ 。

图 6 为控制区硫沉降和二氧化硫浓度与 1995 年比较的减少量, 控制区硫沉降和二氧化硫浓度减少的区域面积与高方案相比明显增加, 最大减少量出现在重庆, 分别为  $5.0 \text{ g m}^{-2} \text{a}^{-1}$  和  $54.1 \mu\text{g m}^{-3}$ , 长江三角洲和珠江三角洲还是增加的, 增加的原因是在部分地区计划排放量是增加的。沉降量最大增加量位于广州, 分别为  $1.0 \text{ g m}^{-2} \text{a}^{-1}$  和  $10.9 \mu\text{g m}^{-3}$ 。

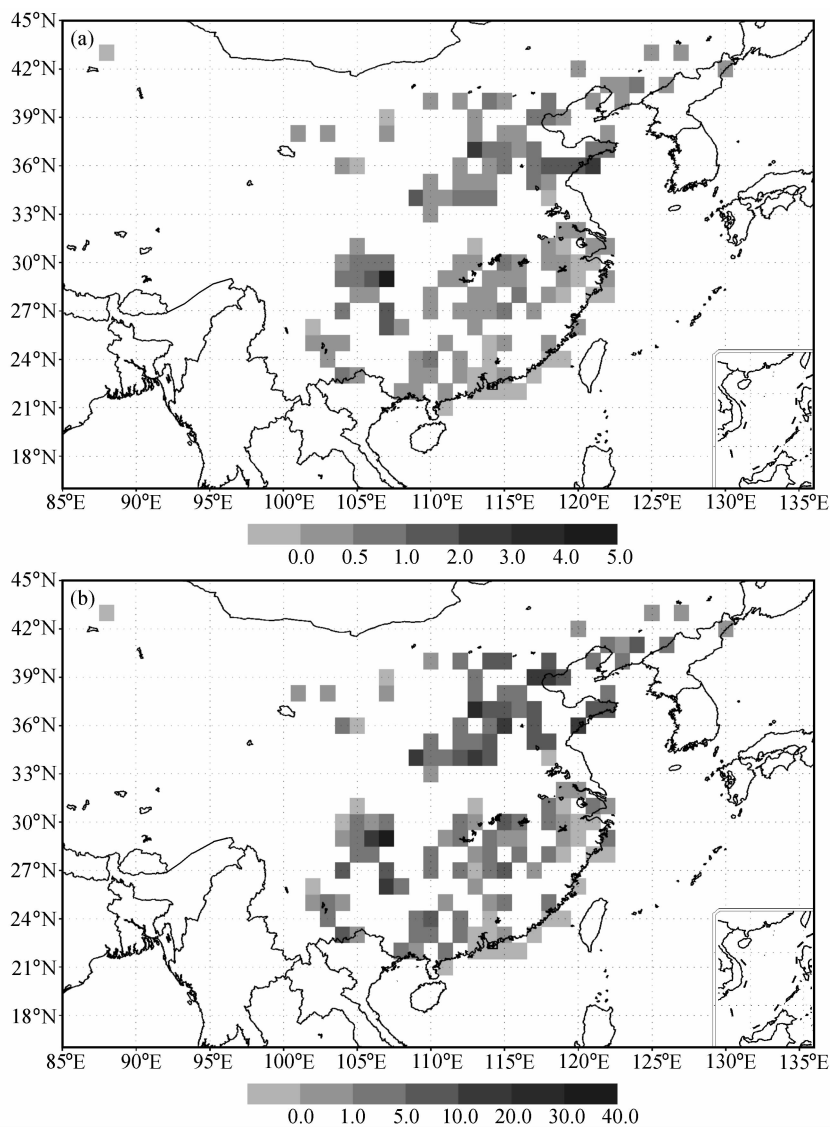


图6 2000年低方案下控制区硫沉降和SO<sub>2</sub>的浓度的减少量  
(a) 硫沉降, 单位: g m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>; (b) SO<sub>2</sub>浓度, 单位: μg m<sup>-3</sup>

3.1.3 2005年硫沉降和二氧化硫浓度的模拟

该年预测的二氧化硫排放量与1995年相比减少了28.4%，在我国大陆的硫沉降量下降了24.6%，除排放量较少的西藏、青海和海南外，其他各省排放量消减率与硫沉降变化率有相同的变化趋势，西藏2005年计划的二氧化硫排放量从1995年的1 kt增加到20 kt，增加了1900%，而西藏的硫沉降量只增加了7.4%，西藏地区的硫沉降主要是跨区域输送来的。

图7为硫沉降大于0.1 g m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>的区域分布，与1995年比较来看，华北地区和山西的硫沉降高值区域明显缩小，硫沉降量最大的地区出现在贵阳为7.4 g m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>。在华中地区、华南以及华北等地大于0.5 g m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>的面积都有不同程度的减少。浓度最大值出现在苏州为73.5 μg m<sup>-3</sup>。



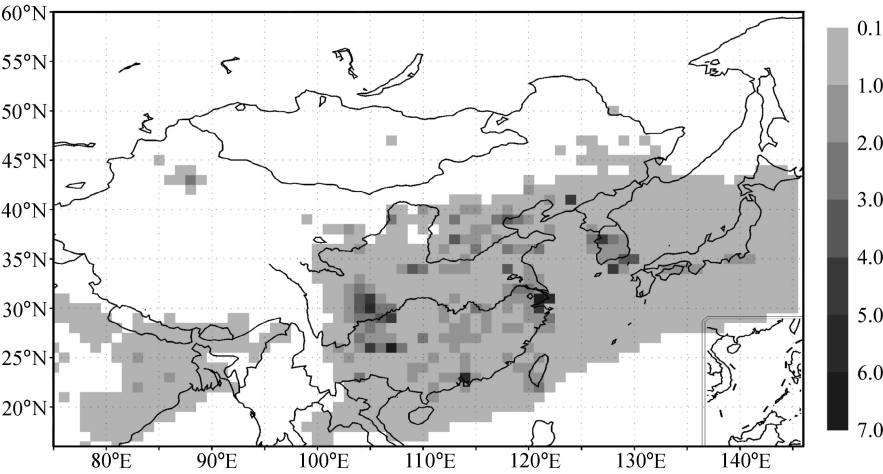


图 7 2005 年预测排放量模拟的中国及东亚地区硫沉降分布 (大于 0.1 g m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup> 的区域)

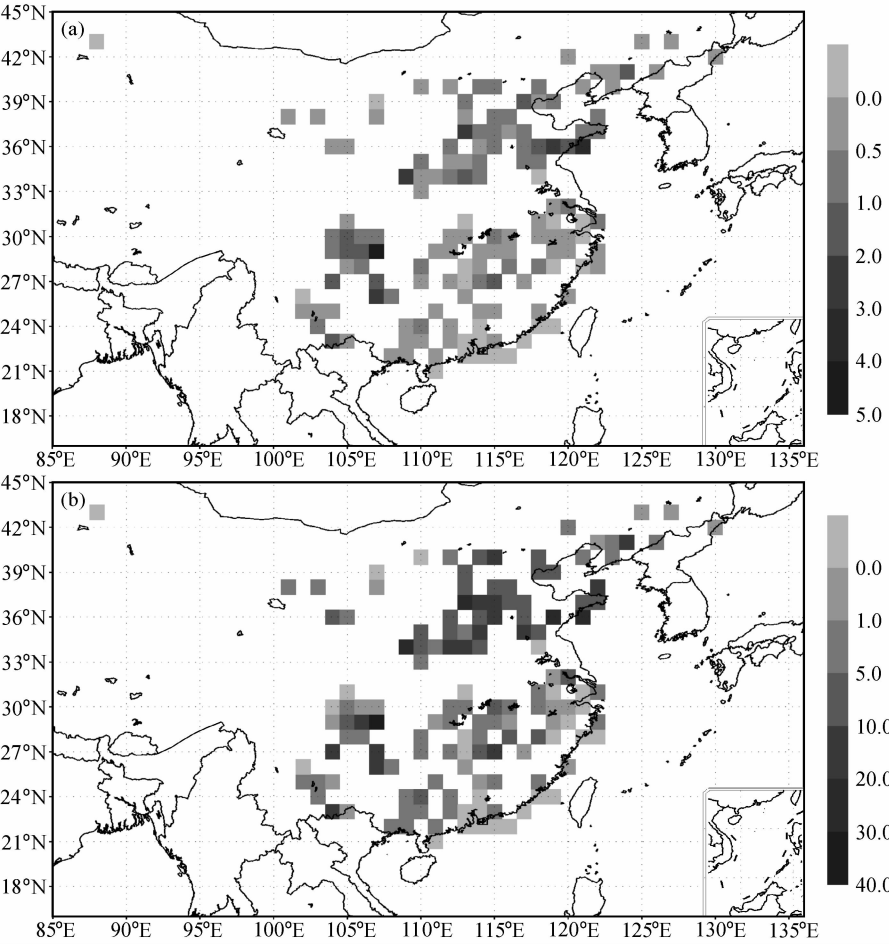


图 8 2005 年控制区硫沉降和 SO<sub>2</sub> 的浓度的减少量  
(a) 硫沉降, 单位: g m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>; (b) SO<sub>2</sub> 浓度, 单位: μg m<sup>-3</sup>

图 8 为控制区硫沉降和二氧化硫浓度与 1995 年比较的减少量，控制区硫沉降和二氧化硫浓度增加的地区主要位于东南沿海地区，二氧化硫控制区地面浓度只有乌鲁木齐等地区是增加的，增加的原因是计划排放量增加造成的。最大减少量出现在重庆，分别为  $5.6\text{ g m}^{-2}\text{ a}^{-1}$  和  $59.8\text{ }\mu\text{g m}^{-3}$ ，增加的最大量位于广州，分别为  $1.3\text{ g m}^{-2}\text{ a}$  和  $13.7\text{ }\mu\text{g m}^{-3}$ 。

3.2 超临界负荷区

临界负荷作为国际上公认的进行有关酸沉降控制的科学手段，近年来在我国也逐步得到应用。但如何确定酸沉降的临界负荷是一个复杂的有争议的问题<sup>[10]</sup>，这里暂时用一下。段雷等<sup>[11]</sup>在地理信息系统的支持下，应用稳态法确定的中国土壤的硫沉降临界负荷。

3.2.1 1995 年超临界负荷区

1995 年我国超临界负荷区的总面积为  $3149642\text{ km}^2$ ，占到了国土面积的 32.7%；全国硫沉降超临界负荷总量为  $2590.240\text{ kt}$ ，占该年硫沉降总量的 45.4%。图 9 为 1995 年我国超临界负荷区域分布，从图中看出我国的超临界负荷区域主要集中在西南地区、我国中部的山西和河南西部、华北、东北东部、华中的两湖地区、华南沿海地区以及福建省，值得注意的是在低污染区的青藏高原东南部出现了大范围的超临界负荷区，必须引起重视。

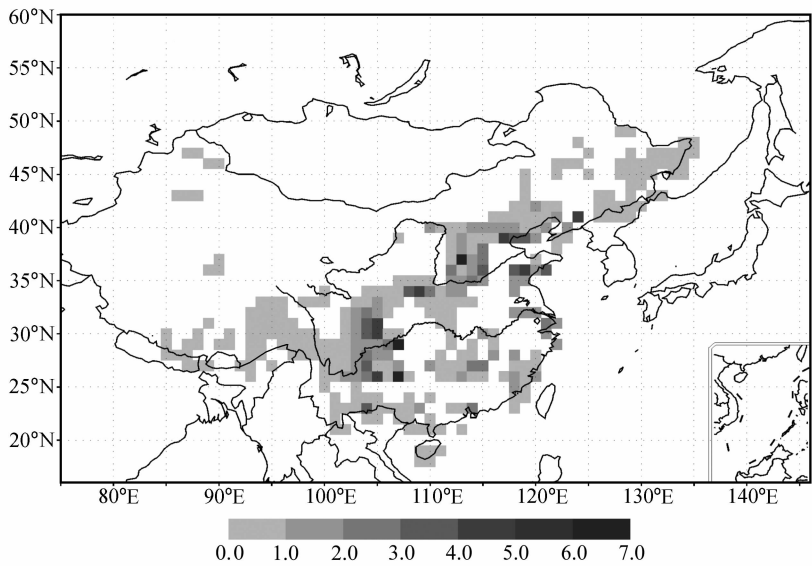


图 9 1995 年我国超临界负荷区域分布（单位： $\text{g m}^{-2}\text{ a}^{-1}$ ）

表 2 列出了各省超临界负荷区域面积，其中有 12 个省、市和区的超临界负荷区域面积超过了本省面积的 50%；没有达到临界负荷的省、区只有宁夏，超临界负荷区域面积小的省、区还有新疆和青海。按照单位面积的硫沉降临界负荷计算，我国的国土面积每年可容纳的硫沉降为  $16741.487\text{ kt}$ ，但由于排放源本身分布的特点，能够承受的硫沉降量要远远小于这一数值。

表 2 我国各省、区各年超临界负荷量以及超临界负荷区域面积

| 省、市、区 | 1995 年    |                      |      | 2000 年（高方案） |       | 2000 年（低方案） |       | 2005 年 |       |
|-------|-----------|----------------------|------|-------------|-------|-------------|-------|--------|-------|
|       | ECL/kt    | AECL/km <sup>2</sup> | RTA  | RECL        | RA    | RECL        | RA    | RECL   | RA    |
| 黑龙江   | 24.12675  | 203123.90            | 0.43 | 0.024       | 0.00  | —0.009      | 0.00  | 0.066  | 0.00  |
| 吉林    | 27.52337  | 108356.80            | 0.55 | 0.112       | 0.00  | 0.131       | 0.00  | 0.272  | 0.16  |
| 辽宁    | 96.96835  | 84053.19             | 0.50 | 0.148       | 0.00  | 0.210       | 0.00  | 0.325  | 0.00  |
| 内蒙古   | 64.78946  | 180672.10            | 0.15 | 0.137       | 0.00  | 0.158       | 0.00  | 0.215  | 0.07  |
| 河北    | 200.33600 | 132559.40            | 0.73 | 0.069       | 0.00  | 0.254       | 0.00  | 0.390  | 0.00  |
| 北京    | 52.30428  | 18943.69             | 1.00 | —0.030      | 0.00  | 0.301       | 0.00  | 0.540  | 0.00  |
| 天津    | 37.39198  | 9541.21              | 1.00 | 0.150       | 0.00  | 0.180       | 0.00  | 0.088  | 0.00  |
| 山西    | 206.54330 | 137562.20            | 0.93 | 0.145       | 0.00  | 0.312       | 0.00  | 0.425  | 0.00  |
| 陕西    | 152.01630 | 102501.10            | 0.46 | 0.054       | 0.00  | 0.238       | 0.00  | 0.429  | 0.00  |
| 宁夏    | 0.00      | 0.00                 | 0.00 | —           | —     | —           | —     | —      | —     |
| 甘肃    | 44.75630  | 91583.54             | 0.23 | 0.114       | 0.00  | 0.289       | 0.13  | 0.426  | 0.35  |
| 山东    | 154.45440 | 59892.27             | 0.38 | 0.325       | 0.00  | 0.530       | 0.00  | 0.628  | 0.00  |
| 河南    | 46.99568  | 61380.61             | 0.43 | —0.014      | 0.00  | 0.660       | 0.35  | 0.884  | 0.51  |
| 江苏    | 50.73297  | 31161.97             | 0.30 | 0.025       | 0.00  | 0.038       | 0.00  | 0.075  | 0.00  |
| 安徽    | 28.28239  | 20857.22             | 0.14 | 0.023       | —0.50 | 0.130       | —0.50 | 0.243  | 0.00  |
| 湖北    | 42.15010  | 84667.54             | 0.44 | 0.229       | —0.14 | 0.446       | 0.00  | 0.607  | 0.25  |
| 上海    | 18.15499  | 10542.97             | 1.00 | 0.148       | 0.00  | 0.08        | 0.00  | 0.370  | 0.00  |
| 浙江    | 52.26227  | 54117.41             | 0.45 | —0.049      | 0.00  | —0.043      | 0.00  | 0.203  | 0.00  |
| 江西    | 66.83278  | 65595.17             | 0.40 | 0.086       | 0.00  | 0.275       | 0.00  | 0.479  | 0.00  |
| 湖南    | 102.43050 | 131598.90            | 0.60 | 0.089       | 0.00  | 0.196       | 0.17  | 0.219  | 0.08  |
| 福建    | 73.60606  | 99958.34             | 0.82 | —0.060      | 0.00  | —0.002      | 0.00  | 0.087  | 0.00  |
| 广东*   | 34.02547  | 45523.28             | 0.24 | —0.580      | —0.21 | —0.437      | 0.21  | —0.494 | —0.17 |
| 广西    | 65.05593  | 102379.20            | 0.45 | 0.046       | 0.09  | 0.266       | 0.11  | 0.331  | 0.11  |
| 海南    | 7.02420   | 35037.79             | 1.00 | —0.068      | 0.00  | 0.236       | 0.00  | —1.150 | 0.00  |
| 云南    | 160.87670 | 280224.70            | 0.64 | 0.067       | 0.05  | 0.243       | 0.08  | 0.404  | 0.20  |
| 贵州    | 187.63150 | 77066.34             | 0.44 | 0.236       | 0.00  | 0.327       | 0.16  | 0.412  | 0.30  |
| 四川**  | 573.44520 | 383781.90            | 0.67 | 0.212       | 0.03  | 0.265       | 0.06  | 0.341  | 0.06  |
| 青海    | 3.15552   | 61863.29             | 0.09 | 0.039       | 0.00  | 0.140       | 0.33  | 0.032  | 0.00  |
| 新疆    | 4.41973   | 90327.95             | 0.06 | —1.385      | 0.00  | —1.223      | 0.00  | —2.100 | 0.00  |
| 西藏    | 11.94733  | 384768.40            | 0.32 | 0.000       | 0.00  | 0.001       | 0.00  | —0.286 | 0.03  |

注：\*包括香港，\*\*包括重庆。ECL：超临界负荷量；AECL：超临界负荷区域面积；RTA：超临界负荷面积与各省总面积之比；RECL：超临界负荷量与 1995 年相比的递减率；RA：超临界负荷面积与 1995 年相比的递减率。

3.2.2 2000 年超临界负荷区

高方案 我国的超临界负荷区域分布与 1995 年一致，超临界负荷区域面积只减少了 0.3%，但全国硫沉降超临界负荷总量比 1995 年减少了 12%。超临界负荷总量占该年硫沉降总量的 42.6%。超临界负荷区域面积超过本省面积的 50%的省、区增加了湖北省，虽然该省的超临界负荷的总量递减了 22.9%。从表 2 还可以看到有 6 个省、市和区的超临界负荷总量是增加的，原因是估计排放量增加造成的。

低方案 我国的超临界负荷区域面积比 1995 年只减少了 4%，但全国硫沉降超临界负荷总量减少了 24.9%，超临界负荷总量占该年硫沉降总量的 41.1%，超临界负荷区域面积超过本省面积 50%的省、区为 12 个；有 5 个省、市和区的超临界负荷总量是增加的。

3.2.3 2005 年超临界负荷区

超临界负荷区域面积与 1995 年相比减少了 6.9%，但全国硫沉降超临界负荷总量

比 1995 年减少了 35.3%，超临界负荷总量占该年硫沉降总量的 39.0%，超临界负荷区域面积超过本省面积的 50% 的省、区减少为 10 个；有 4 个省、市和区的超临界负荷总量是增加的。

4 结 论

1995 年中国大陆全年的硫沉降总量为 5623.592 kt，占全部排放量的 43.6%。2000 年和 2005 年的二氧化硫排放量与 1995 年相比，在分别减少 21.4% 和 28.4% 的情况下，在我国大陆的硫沉降量可以减少 17% 和 24.7%；在酸雨控制区的东南沿海的部分地区，硫沉降和二氧化硫浓度是增加的。1995 年我国的超临界负荷区的面积已经达到了国土面积的 32.7%，全国硫沉降超临界负荷总量占该年硫沉降总量的 45.4%，硫沉降危害非常严重；2000 年高方案下超临界负荷区域面积只减少了 0.3%，全国硫沉降超临界负荷总量比 1995 年减少了 12%，超临界负荷总量占该年硫沉降总量的 42.6%；低方案下超临界负荷区域面积减少了 4%，全国硫沉降超临界负荷总量比 1995 年减少了 24.9%，超临界负荷总量占该年硫沉降总量的 41.1%；预测的 2005 年排放量下的超临界负荷区域面积减少了 6.9%，全国硫沉降超临界负荷总量比 1995 年减少了 35.3%，超临界负荷总量占该年硫沉降总量的 39.0%。这些结果表明在目前的控制方案和控制目标下，硫沉降和硫沉降超临界负荷总量都有 12%~35% 的减少，但超临界负荷区域面积的减少只有 0.3%~6.9%。

致谢：对中国科学院大气物理研究所黄美元研究员的指导深表感谢。

参 考 文 献

1 国家环保局，酸雨控制区和 SO<sub>2</sub> 污染控制区划分方案，环境保护，1998，**3**，6~9.

2 Lynch, J. A., V. C. Bowersox, and J. W. Grimm, Changes in sulfate deposition in eastern USA following implementation of Phade I of Title IV of the Clean Air Act Amendments of 1990, *Atmospheric Environment*, 2000, **34**, 1665~1680.

3 Streets, D. G., and S. T. Waldhoff, Present and future emissions of air pollutants in China: SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, and CO, *Atmospheric Environment*, 2000, **34**, 363~374.

4 Streets, D. G., Nancy Y. Tsai, Hajime Akimoto, Kaoru Oka., Sulfur dioxide emissions in Asia in the period 1985-1997, *Atmospheric Environment*, 2000, **34**, 4413~4424.

5 Wang T. J., L. S. Jin, Z. K. Li, and K. S. Lam, A modeling study on acid rain and recommended emission control strategies in China, *Atmospheric Environment*, 2000, **34**, 4467~4477.

6 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)，366~378.

7 Wang Zifa, Huang Meiyuan, and He Dongyang, Sulfur distribution and transport studies in East Asia using Eulerian model, *Advances in Atmospheric Sciences*, 1996, **13** (3), 399~409.

8 张新玲等，查表法处理 SO<sub>x</sub> 气相化学过程的性能检验，环境科学学报，2001，**9**，513~518.

9 Akimoto Hayime and Hirohito Narita, Distribution of SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> and CO<sub>2</sub> emissions from fuel combustion and industrial activities in Asia with 1°×1° resolution, *Atmosphere Environment*, 1994, **28** (2), 213~225.

10 安峻岭、黄美元、周玲, 酸沉降临界负荷研究中的不确定性, 环境科学, 1993, **20** (2), 104~106.  
11 段雷、郝吉明等, 用稳态法确定中国土壤的硫沉降和氮沉降临界负荷, 环境科学, 2002, **23** (2), 7~12.

Evaluation of SO<sub>2</sub> Emission Control in China

Cheng Xinjin<sup>1)</sup>, Sun Jiming<sup>1, 2)</sup>, Lei Hengchi<sup>1)</sup>, Duan Ning<sup>3)</sup>, and An Junling<sup>1)</sup>

- 1) (*Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*)
- 2) (*Ningxia Institute of Meteorological Sciences, Yinchuan 750001*)
- 3) (*Institute of Atmospheric Environment, Chinese Academy of Environment Sciences, Beijing 100012*)

**Abstract** In order to evaluate the results of China’s “Two-control-Zone” policy for Acid Rain and SO<sub>2</sub> pollution mitigation, the exact grid emission data of SO<sub>2</sub> in 1995, 2000, and 2005 have been finished. With the 3-D Eulerian long-range transport model for SO<sub>x</sub>, the sulfur deposition and SO<sub>2</sub> density in east Asia were analysed in these three years; the region and total amount of super critical load for sulfur deposition have been calculated. The research results show that with the decrease of SO<sub>2</sub> emission amounts in 21.4% and 28.4% compared with 1995, the total sulfur deposition amounts in China mainland decrease 17% and 24.7%. The area of super critical load for sulfur deposition reached 32.7% of our country’s area in 1995. According to the China’s “Two-control-Zone” policy, the area of super critical load only can decrease from 0.3%~6.9%.

**Key word:** SO<sub>2</sub> control effect ; “two-control-zone”; sulfur deposition; super critical load