

未来东亚地区硫化物沉降及输送的预测

王自发 安俊岭 高会旺 黄美元

(中国科学院大气物理研究所大气边界层物理与大气化学国家重点实验室, 北京 100029)

摘要 采用东亚未来二氧化硫排放量的预测资料, 利用东亚硫化物输送模式模拟了未来15年东亚各地区的硫化物沉降量、相互输送量的变化趋势及其对土壤的影响。结果表明, 未来15年东亚各地区的硫化物沉降量将日益增多, 一些地区硫化物沉降量大大超出了土壤对酸沉降的承受能力, 对周边地区硫化物的输送量也将进一步加大, 形势相当严峻。

关键词 硫化物 沉降 输送模式 东亚

1 引言

我国是以煤炭为主要能源的国家, 1990年能源总消耗量为9800万t标准煤, 其中煤炭消耗占79.3%。燃料燃烧过程中的废气排放量逐年增加, SO_2 排放量呈上升趋势。1990年全国 SO_2 排放量为1761万t, 1995年为2341万t^[1], 预计2000年将达到2880万t, 2010年达3910万t(见表1)。因而, SO_2 造成的酸雨和酸沉降污染必然加重, 可能由目前的点、线污染发展到一些酸雨污染区, 并可能在部分污染区(如重庆、贵阳等城市)发生酸雨污染事件。酸沉降对土壤的影响也日益加重, 部分地区将超过土壤的承受能力而出现酸化现象。

本文利用中国科学院大气物理研究所三维欧拉污染物输送实用模式^[2], 采用10年平均的气象场作为模式的输入资料, 排放源的资料则根据“八五”国家科技攻关项目“我国和东亚地区酸性物质的输送研究”(85-912-01)所得的2000年和2010年的燃烧 SO_2 产生量预测结果, 模拟了2000年和2010年东亚地区硫和硫沉降的分布, 对土壤的影响及跨国输送量的变化。

2 硫沉降的未来变化及土壤的临界负荷

2.1 2000年和2010年东亚地区硫和硫沉降的分布

根据2000年排放源的预测资料, 我国的硫化物排放量约为2880万t, 1992年排放量超过100万t的省份仅有4个(辽宁、河北、山东和四川), 2000年将有12个(辽宁、内蒙古、河北、陕西、山西、山东、河南、江苏、湖南、广东、贵州和四川), 其中山东和四川超过300万t。假设日本、朝鲜、中国台湾和香港等国家和地区的排放量维持现状, 气象资料取多年平均资料, 计算2000年的硫沉降分布。图1是东亚地区

1998-05-05收到

1) 国家环保局计划司最新统计资料, 1996。

2000 年硫总沉降量比 1992 年的增加量。可见增长较大的地区[大于 $200 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{月})$]集中在四川盆地、山东半岛、长江三角洲、珠江三角洲、京津塘地区和辽宁。大于 $300 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{月})$ 的区域有沈阳、重庆、济南和大同。

2010 年我国大陆排放量为 3 910 万 t, 排放量超过 100 万 t 的省份将有 14 个(较 2000 年增加了湖北、广西), 四川、山东分别达到 425 万 t 和 534 万 t。2010 年的硫沉降量比 2000 年增加量见图 2。增长较大的地区有四川盆地、广东、江苏、山东、陕西、河南、内蒙古、京津塘及辽宁。大于 $300 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{月})$ 有珠江三角洲、上海、山东、大同。济南和大同超过 $400 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{月})$ 。环渤海湾地区的增长很大。

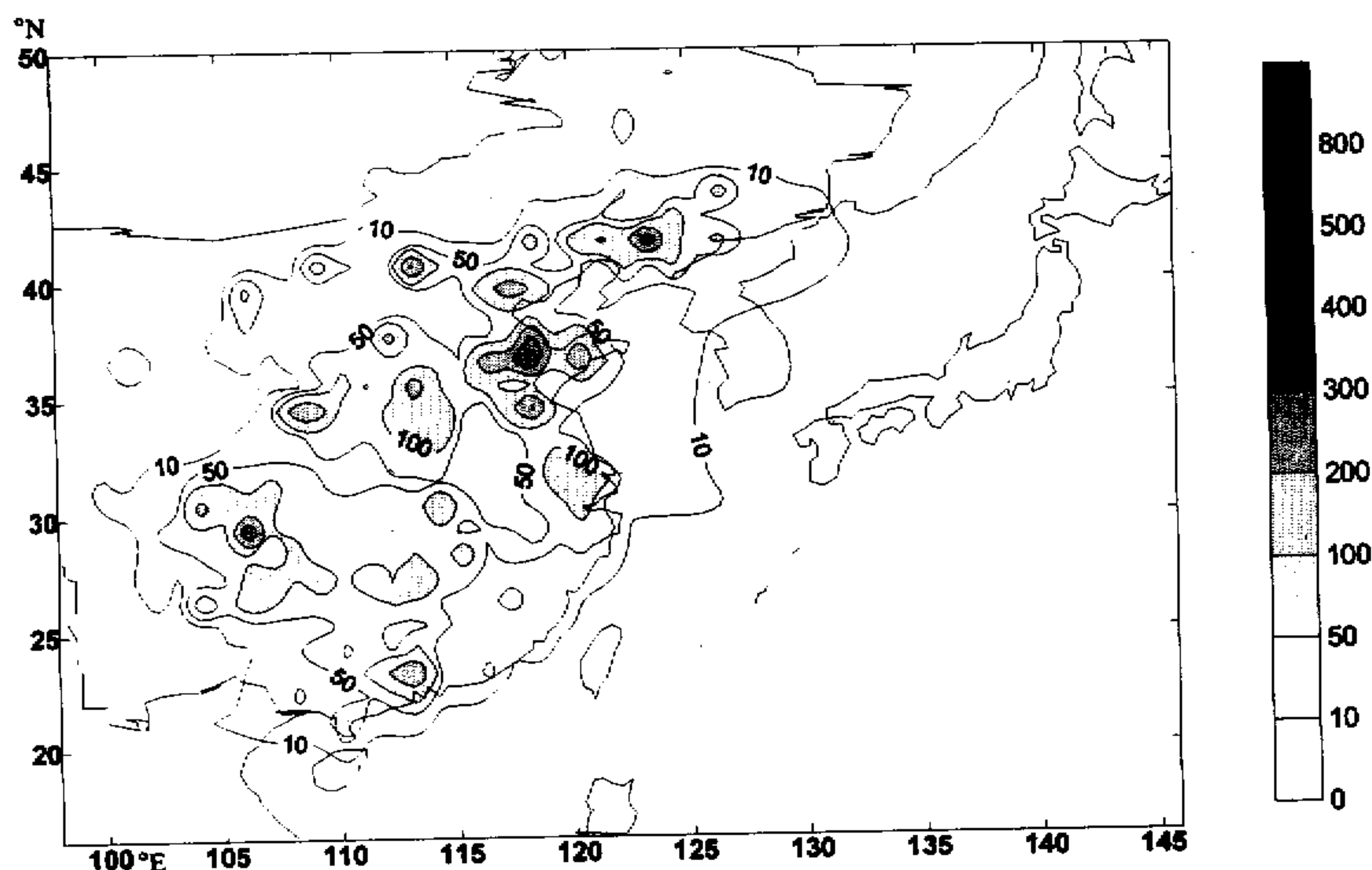


图 1 东亚地区 2000 年硫总沉降量比 1992 年的增加量
单位: $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{月})$

由于中国经济的持续发展, 排放的 SO_2 也日益增多, 硫化物输送模式计算表明, 东亚各地区的硫化物沉降量也日益增多, 环境状况将进一步恶化, 形势相当严峻。表 2 表明未来东亚各国和地区硫沉降量的变化情况。中国大陆的硫化物沉降量 2010 年将是 1992 年的 2.3 倍, 总沉降量由 1992 年的 569 万 t 硫增长到 2010 年的 1 313 万 t 硫, 2010 年硫酸盐的沉降量也达 257 万 t 硫。日本的硫总沉降量 2010 年比 1992 年增长 1.8 万 t 硫, 韩国的增量为 1.2 万 t 硫, 朝鲜为 7.5 万 t 硫。对硫酸盐的沉降量, 日本、韩国均增加 1.2 万 t 硫, 朝鲜增加 1.7 万 t 硫。中国台湾和香港地区硫总沉降量增加不多, 分别为 2 000、4 000 t 硫。由于香港面积很小, 单位面积的增量就很大了。蒙古的变化很小。

表 1 为我国大陆部分省市未来硫化物沉降量的变化情况预测。年沉降量超过 50 万 t 硫的, 1992 年仅有山东和四川, 1995 年有 4 个(山东、四川、河北和贵州), 2000 年

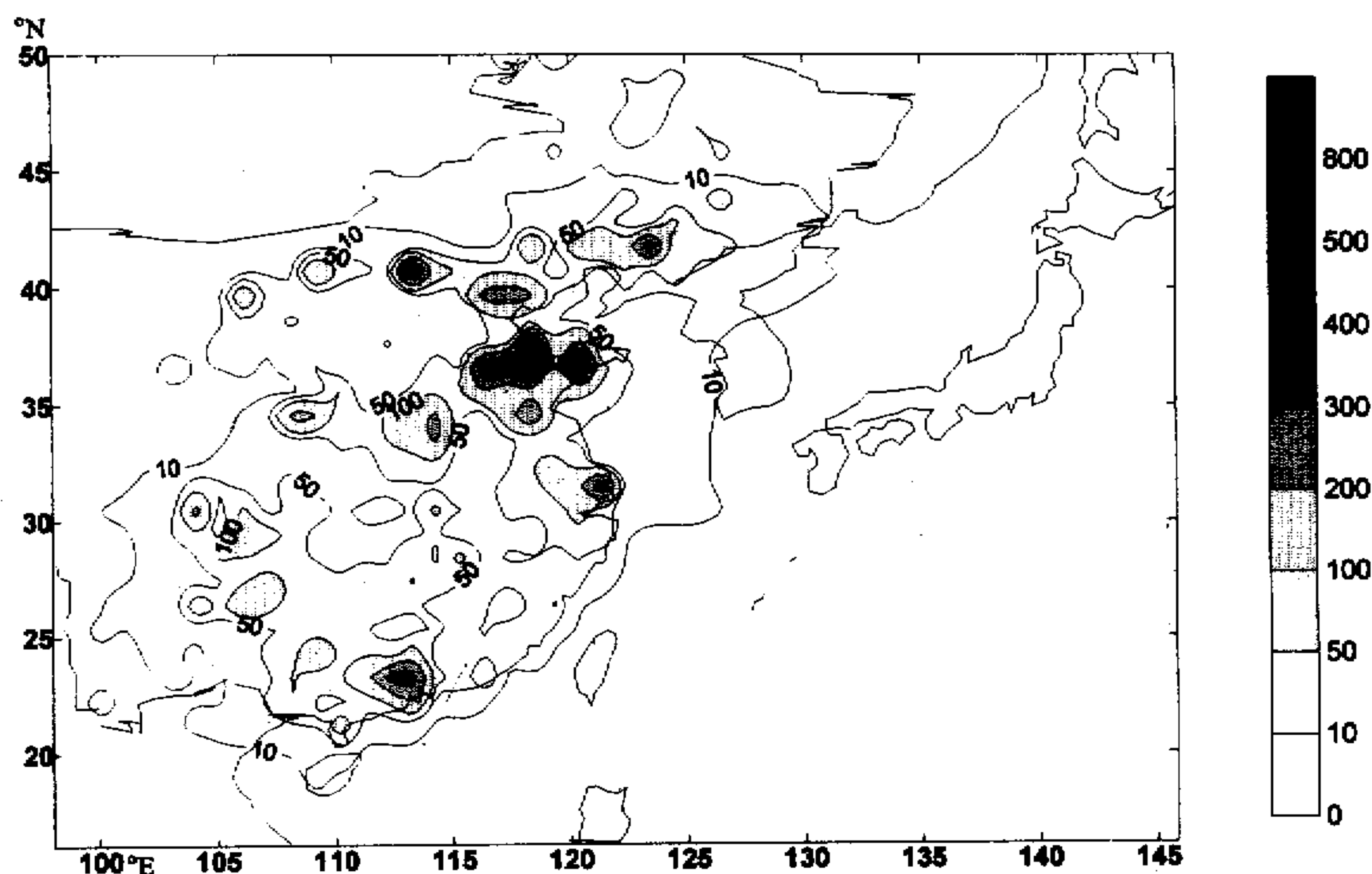


图2 东亚地区2010年硫总沉降量比2000年的增加量
单位: $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{月})$

有5个(较1995年增加了辽宁),2010达12个(辽宁、内蒙古、河北、陕西、山东、河南、江苏、湖南、广东、广西、贵州和四川)。2000年硫化物沉降量四川和山东超过100万t硫,2010年四川和山东达150万t硫。表1中最后一列为2010年与1992年硫沉降量的比值(R),增长2倍(比值 $R > 3$)以上的省份有内蒙古、陕西和广东,增长1.5倍($2.5 < R < 3$)以上的省份有山东和河南,增长1倍($2 < R < 2.5$)以上的省份有吉林、辽宁、天津、山西、宁夏、江苏、江西、湖南、福建和海南,增长很小的省份($1 < R < 1.3$)有安徽和云南,沉降量减少的省份($R < 1$)有黑龙江和甘肃。

2.2 酸沉降对土壤的影响

酸沉降产生的环境影响已成为一个世界性的重大环境问题。酸沉降对土壤、湖泊、植被等生态系统的酸化效应已带来严重的危害。中国东部地区的森林受酸沉降危害造成的生态效益损失达54亿元^[3]。随着我国经济的迅速发展,能源消耗将不断增加,由于我国缺乏有效的脱硫能力的现实情况,今后20年我国的酸沉降将进一步加大,许多省份的硫化物的沉降量2010年将翻番。在这样的严峻形势下,作为酸沉降的最大接收者,我国土壤及其赖以生存的植被系统将会如何变化?

不同的生态系统对酸沉降的承受能力不同。在不导致对生态系统的结构和功能产生长期有害影响的化学变化时,生态系统所能承受的最大酸性物质的沉降量,称为生态系统对酸沉降的临界负荷,简称酸沉降临界负荷。冯宗炜等^[4]利用MAGIC模型给出了我国东部7省市的临界负荷。我国东部7省市临界负荷大致由东南向西北逐渐增高,东南部临界负荷较低。

表 1 模式所用的 SO₂ 排放源资料及计算的硫总沉降量

年 份	SO ₂ 排放量 / 万 t					硫沉降量 / 万 t				R
	1987	1992	1995	2000	2010	1992	1995	2000	2010	
黑龙江	55.62	41.44	28.72	31.53	35.69	16.43	11.38	12.50	14.15	0.86
吉林	35.86	26.81	24.58	44.72	55.77	10.76	9.87	17.93	22.28	2.07
辽宁	85.30	108.40	97.54	176.86	236.17	43.77	39.34	71.05	94.44	2.16
内蒙古	119.66	51.36	57.68	125.38	232.31	19.70	22.08	47.77	88.04	4.47
河北	111.60	122.79	162.95	153.30	185.10	43.80	57.82	54.35	65.58	1.50
北京	42.34	38.80	33.98	48.51	64.08	14.94	13.11	18.66	24.58	1.65
天津	22.88	22.80	40.58	36.75	48.66	8.85	15.84	14.25	18.87	2.13
山西	63.84	79.00	151.47	155.48	171.37	21.85	41.34	42.00	46.49	2.13
陕西	96.52	61.90	101.78	146.79	213.57	15.68	25.07	35.80	51.38	3.28
宁夏	8.04	11.96	20.48	23.33	30.17	3.82	6.47	7.38	9.33	2.44
甘肃	27.86	34.17	43.13	29.08	34.04	9.81	12.33	8.32	9.60	0.98
山东	136.42	206.95	235.14	336.22	534.93	62.92	71.14	100.45	158.92	2.53
河南	72.96	77.28	148.64	138.24	212.22	19.07	36.01	33.33	50.91	2.67
江苏	186.82	94.73	151.47	152.44	201.96	27.91	44.56	44.79	59.15	2.12
安徽	80.82	41.94	47.31	43.75	52.87	12.07	13.57	12.56	15.12	1.25
湖北	59.10	59.28	66.11	97.68	118.01	17.52	19.47	28.74	34.42	1.96
上海	64.18	58.88	50.74	65.30	88.01	20.98	18.07	23.28	31.22	1.49
浙江	40.26	51.89	63.12	70.19	84.74	19.16	23.30	25.91	31.18	1.63
江西	46.78	36.24	73.48	61.61	81.46	12.58	25.35	21.27	27.94	2.22
湖南	56.32	76.98	79.89	130.77	158.13	28.58	29.64	48.45	58.45	2.05
福建	23.48	19.68	20.85	29.25	42.60	8.16	8.66	12.10	17.65	2.16
广东	54.24	49.00	100.95	105.47	182.51	21.56	44.16	46.14	79.50	3.69
广西	38.92	83.11	97.79	99.45	136.85	34.41	40.33	41.03	56.31	1.64
海南	1.88	1.88	3.81	2.43	4.11	0.76	1.53	0.98	1.65	2.17
云南	73.62	38.34	44.43	34.44	45.45	16.89	19.58	15.19	20.03	1.19
贵州	93.42	93.30	148.71	140.73	187.04	37.92	59.70	56.32	74.69	1.97
四川	232.90	227.59	208.76	339.43	425.58	84.15	76.93	121.76	149.33	1.77
青海	4.12	2.26	3.83	6.66	7.26	0.67	1.12	1.96	2.13	3.18
合计	1935	1818	2341	2880	3910	634	787	964	1313	—

1987、1992、1995、2000、2010 年排放量资料分别来自文献[5]、[6]、[1]、[7]、[4]

表 2 东亚各国和地区的硫沉降量及未来的变化

万 t/a

年 份	硫总沉降量				SO ₄ ²⁻ 中硫沉降量			
	1992	1995	2000	2010	1992	1995	2000	2010
中国大陆	569.3	787.7	964.3	1313.4	121.2	158.7	189.5	257.1
中国台湾	7.0	7.1	7.1	7.2	0.8	0.84	0.86	0.92
中国香港	2.5	2.7	2.7	2.9	0.38	0.43	0.45	0.54
日本	60.6	60.8	61.4	62.4	6.3	6.4	6.9	7.5
韩国	30.2	30.6	31.2	32.4	3.0	3.1	3.5	4.0
朝鲜	13.3	13.1	17.3	20.8	1.6	1.6	2.4	3.3
蒙古	2.90	2.91	2.92	2.93	0.2	0.2	0.2	0.2

为考察未来 20 年我国的土壤及植被对酸沉降的影响, 根据前节计算的 2000 年和 2010 年硫沉降量, 与各地酸沉降临界负荷进行比较, 得出超标地区的分布。模式区域临界负荷的取值如下: 东部 7 省市引用冯宗炜等^[4]的值, 其余地区根据以下假设, 北方 (35°N 以北) 定为 $10\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 南方定为 $4.5\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。

目前我国超过临界负荷的地区见图 3a。超标的地区为点状分布, 主要在南方, 有上海、杭州、徐州、长沙、柳州、成都和重庆附近, 总面积达 11 万 km^2 。超过临界负荷 1 倍的地区有成都、重庆和上海, 不超过临界负荷 20% 的地区为重庆以东、贵阳、长沙、柳州、徐州和杭州不超过 40%。2000 年超过临界负荷的地区向北扩展到在济南附近、青岛、京津、沈阳地区, 超标面积达 46 万 km^2 (图 3b)。在苏南、重庆及成都附近、贵阳附近形成较大面积的超标区, 超标区由目前的点状分布向块状分布发展。重庆沉降量已超过临界负荷 2 倍, 成都、上海和徐州超过 1 倍。2010 年的超标情况已遍布西南、华南、华中、华东、华北, 超标面积达 76 万 km^2 (图 3c)。在四川盆地、贵州、广东、湖南、江苏、浙江、山东形成了超标区, 超过临界负荷量也显著增多。

3 未来输送态势的变化

伴随中国大陆 SO_2 排放量的日益增长, 跨国、跨地区的输送也会更加严重。这已经引起相关国家和地区的政府和科学家的关注, 并成为环境外交的敏感性问题。为得出各国之间的输送规律, 用各种方法和手段对这类问题进行研究势在必行。下面是根据远距离欧拉输送模式模拟的一些初步结果。

表 3 是我国输出的硫污染物占周边地区硫沉降量的百分比及未来变化。可见中国大陆排放的硫化物沉降到本国的比例增大, 总沉降从 1992 年的 99.15% 增长到 2010 年的 99.59%, 2010 年硫酸盐沉降到本地的比例比 1992 年增长 1.2%。随着时间推移, 中国大陆硫化物对周边地区的输送均有显著增加。对香港输送的硫化物显著增长, 占其总沉降的比例从 1992 年 8.77% 增长到 2010 年的 22.8%, 硫酸盐的增幅也达 24%; 对台湾输送的硫酸盐增幅达 14 个百分点; 对朝鲜输送的硫化物占的比例最大, 从 1992 年的 36.49% 增长到 2000 年的 48.94%, 2010 年达 56.30%; 韩国从 1992 年的 7.26% 增长到 2010 年的 13.95%; 而日本则增长了 3 个百分点。由于硫酸盐的输送效果显著, SO_4^{2-} 占周边地区沉降量的比例和增长的幅度普遍高于总硫沉降量。朝鲜从 1992 年的 72% 增加到

表 3 中国输出的硫污染物占东亚各地区硫沉降的百分比及未来的变化

年 份	总沉降				硫酸盐			
	1992	1995	2000	2010	1992	1995	2000	2010
中国大陆	99.15	99.34	99.45	99.59	97.62	98.11	98.43	98.85
中国台湾	3.60	4.08	5.32	5.38	20.09	26.46	29.03	34.75
中国香港	8.77	14.04	15.32	22.81	23.13	32.92	36.20	47.26
日 本	4.67	4.86	6.07	7.61	17.27	19.24	24.76	31.32
韩 国	7.26	8.25	10.25	13.95	30.52	34.76	40.84	49.49
朝 鲜	36.49	35.46	48.94	56.30	72.19	71.90	78.43	81.33
蒙 古	0.22	0.25	0.54	1.00	0.30	0.34	0.74	1.36

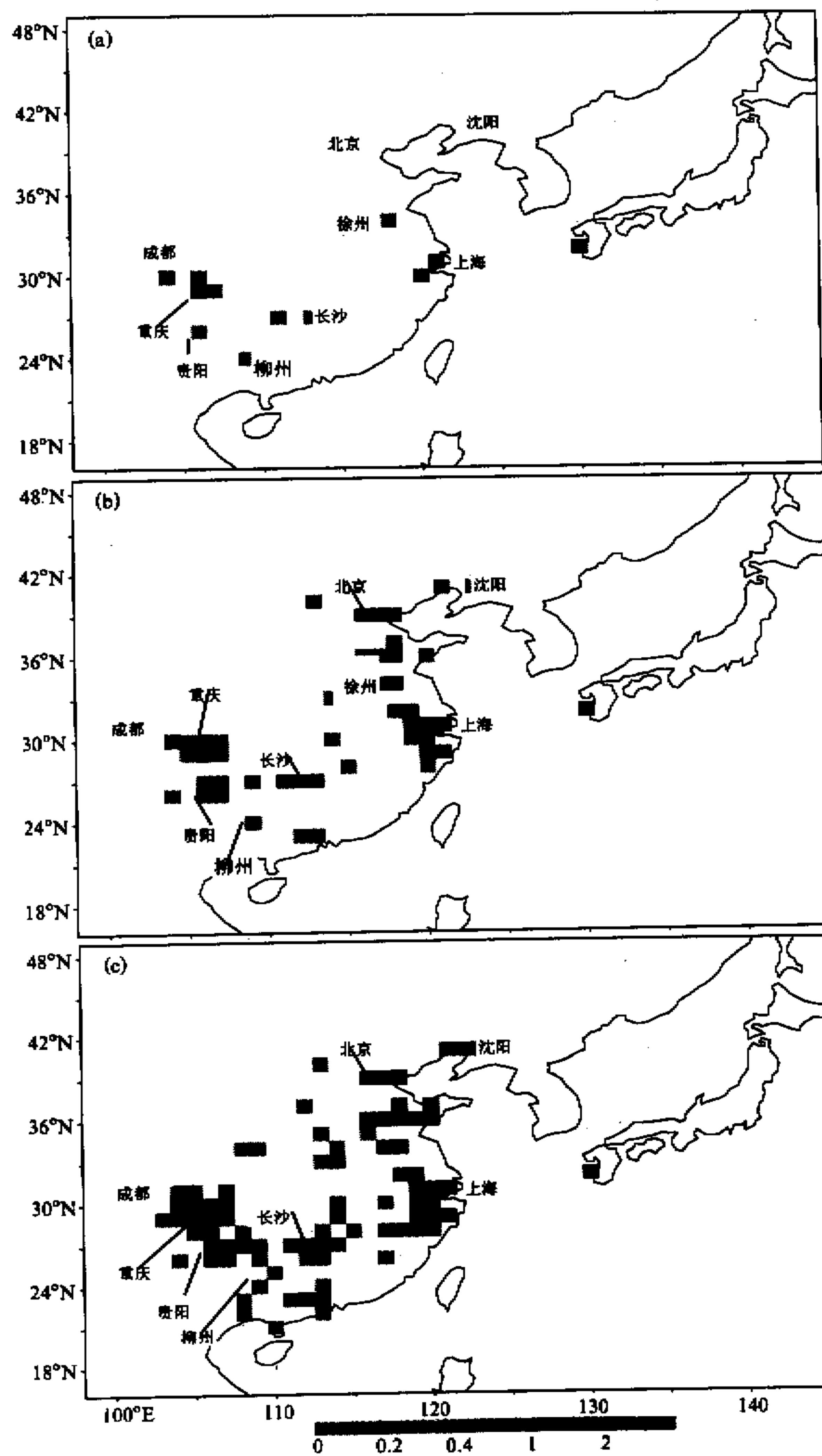


图3 我国酸沉降超过临界负荷的地区分布

(a) 1992 年; (b) 2000 年; (c) 2010 年。单位: (沉降量-临界负荷)/临界负荷

2010 年的 81%；韩国从 1992 年的 30.5% 增长到 2010 年的 49.5%；日本从 1992 年的 17.3% 增长到 2010 年的 31.3%。

表 4 是中国大陆对东亚各国家和地区硫的跨国（地区）输送量及其预测。可见对外输送的硫化物中，对朝鲜的绝对输送量最大，其次为韩国，日本再次之。输送到朝鲜的硫从 1992 年的 4.85 万 t 增长到 2000 年的 8.48 万 t，2010 年达 11.71 万 t；韩国 1992 年为 2.19 万 t，2010 年达 4.5 万 t；而日本 1992、2000、2010 年分别为 2.83、3.73、4.74 万 t。对台湾、香港的输送数量不大，到 2010 年也不超过 1 万 t。由于在远距离输送中硫酸根输送的距离要比 SO_2 远，中国大陆以硫酸盐形式的向外的输送量中对日本的输送量超过韩国，对台湾的输送量大于香港。日本从 1992 年的 1.09 万 t 增加到 2000 年的 1.7 万 t，2010 年是 1992 年的 2.15 倍，达 2.34 万 t。韩国从 1992 年的 0.9 万 t 增到 2010 年 1.99 万 t，达 2.2 倍。1995 年对朝鲜的硫化物输送量的减少主要是由于东三省排放量的减少造成的。

表 4 中国大陆向东亚各国家和地区硫的输送量及其预测

万 t

年 份	总硫沉降				硫酸盐沉降			
	1992	1995	2000	2010	1992	1995	2000	2010
中国大陆	564.48	703.80	857.33	1162.70	118.34	155.68	186.57	254.13
中国台湾	0.25	0.29	0.38	0.39	0.16	0.22	0.25	0.32
中国香港	0.22	0.37	0.41	0.67	0.09	0.14	0.16	0.26
日 本	2.83	2.95	3.73	4.74	1.09	1.24	1.70	2.34
韩 国	2.19	2.52	3.20	4.52	0.90	1.09	1.41	1.99
朝 鲜	4.85	4.65	8.48	11.71	1.31	1.28	2.16	2.98
蒙 古	0.01	0.01	0.02	0.03	—	—	—	—

— 表示输送量很小

4 结论

由于中国经济的持续发展，即使采用中等控制方案，排放的 SO_2 也将日益增多，2010 年将比 1992 年翻番。硫化物输送模式计算表明，未来 15 年东亚各国家和地区的硫化物沉降量也将日益增多，一些地区硫化物沉降量大大超出了土壤对酸沉降的承受能力，对周边地区硫化物的输送量也将进一步加大，环境状况将进一步恶化，形势相当严峻。今后应该根据我国 SO_2 污染物和酸雨分布和危害状况、中国大陆和相邻国家和地区硫污染物输送状况以及社会、人口和投资状况，初步选定若干个 SO_2 和酸雨控制区，进一步加强科学研究和排放源的控制力度，以保证我国经济 and 环境的协调发展。

参 考 文 献

- 1 国家统计局编，1996，中国统计摘要，北京：中国统计出版社，137.
- 2 王自发、黄美元等，1997，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，21(3)，366~378.
- 3 安俊岭，1996，大气酸沉降对中国典型土壤长期影响的数值模拟研究，中国科学院大气物理研究所博士学位

论文.

- 4 冯宗炜、曹洪法、周修萍等, 1995, 酸沉降对生态环境的影响及其经济损失, 国家“八五”科技攻关项目 85-912-03 总结报告, 133~247.
- 5 Akimoto Hajime, 1994, Distribution of SO_2 , NO_x and CO_2 emissions from fuel combustion and industrial activities in Asia with SO_2 resolution, *Atmospheric Environment*, **28**, 213~225.
- 6 国家环保局环境科学研究院, 1993, 国家“八五”科技攻关项目排放源调查结果.
- 7 周学龙, 1996, 中国酸雨控制区的划分, 清华大学博士学位论文.

Estimation of Sulfur Deposition and Transport in China and East Asia in Future

Wang Zifa and Huang Meiyuan

(State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Physics and Atmospheric Chemistry,
Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract According to the estimated emission data for sulfur oxidate, the tendency of sulfur deposition and transport and its influence on soils in future are estimated with three-dimensional Eulerian transport model in East Asia. Results show that the sulfur deposition in East Asia will increase day by day in the next fifteen years. Deposition of some region will be much more than the critical loads of soil. The transport among regions will be larger than before. The situation demands immediate action.

Key words sulfur deposition transport model East Asia