

燃煤 二氧化硫 污染控制 技术手册

郝吉明 王书肖 陆永琪 编著

109

X701.3
H04

燃煤二氧化硫污染控制 技术手册

郝吉明 王书肖 陆永琪 编著

化学工业出版社

环境科学与工程出版中心

·北京·

(京)新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

燃煤二氧化硫污染控制技术手册/郝吉明,王书肖,陆永琪编著. —北京:化学工业出版社,2001.4
ISBN 7-5025-3179-3

I. 燃… II. ①郝…②王…③陆… III. 二氧化硫-污染控制-技术手册 IV. X511-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 14822 号

燃煤二氧化硫污染控制技术手册

郝吉明 王书肖 陆永琪 编著

责任编辑:管德存

责任校对:蒋宇

封面设计:郑小红

*

化学工业出版社 出版发行
环境科学与工程出版中心
(北京市朝阳区惠新里3号 邮政编码 100029)
发行电话:(010)64918013
<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销
北京市彩桥印刷厂印刷
三河市东柳装订厂装订
开本 787×1092 毫米 1/16 印张 30 $\frac{1}{4}$ 字数 747 千字
2001 年 4 月第 1 版 2001 年 5 月北京第 1 次印刷
印数:1—4000
ISBN 7-5025-3179-3/X·81
定 价:60.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责退换

前 言

酸沉降和二氧化硫污染一直是国际科学界和各国政府关心的重大环境问题。如果说工业革命始于 1750 年的话, 100 年后瑞典科学家 R.A.Smith 就发表了“空气和降雨”(Air and Rain) 的专著, 将酸雨问题正式提到科学家、企业家和政府面前。随着欧洲和美国降雨的不断酸化, 又差不多过了 100 年, 国际科学界不得不携起手来共同研讨酸雨的成因、危害与控制。1975 年, 第一届国际酸沉降学术会议在美国 Ohio 州的 Columbus 举行。随后, 每 5 年举行一次, 会议地点也从北美移至欧洲, 最后移至亚洲。1952 年发生在英国伦敦的烟雾事件也与二氧化硫污染密不可分。

从 1975 年的第一届国际酸沉降学术会议算起, 25 年过去了, 世界发生了巨大变化, 首先是全球人口由 40 亿升至 60 亿。虽然世界各国都尽了各自的努力, 国际社会也在努力寻求合作, 但由于能源消费和食物生产的需要, 导致各种致酸前体物的排放量都呈不断增加的趋势。SO₂ 的排放量由 25 年前 60TgS 增长至 75TgS, NO_x 的排放量由 20TgN 增至 33TgN, NH₃ 的排放量增幅最大, 由 23TgN 增至 50TgN。

控制生态环境酸化面临技术和经济的挑战, 科学上也存在巨大风险。为恢复已经酸化的生态环境, 应采取哪些措施? 需要多长的时间才能够恢复? 仍需要科学界获得更多的知识。但有一点是共识, 采取行动存在巨大风险, 但等科学上完全清楚以后再采取行动, 可能会冒更大的风险。早在 1979 年, 30 多个国家以及欧盟签署了长距离越跨国界大气污染物公约, 并于 1983 年生效。根据该协议, 1985 年 21 个国家承诺从 1980~1993 年期间, 至少削减 30% 的二氧化硫; 1994 年, 经 26 个国家签署, 达成了第二次硫化物议定书, 对每个国家设定限值, 到 2000 年, 欧洲在 1980 年的水平上, 可削减 45% 的二氧化硫排放, 到 2010 年, 削减 51%; 1999 年, 在瑞典哥德堡 20 个国家签署了缓解酸化、富营养化和地面臭氧议定书, 对四种主要污染物制定了 2010 年国家排放限值, 据此, 欧洲国家在 1990 年水平上可削减 63% 二氧化硫、40% 氮氧化物及挥发性有机化合物, 17% 氨。

中国既是能源生产大国, 也是能源消费大国, 目前中国能源消费占全球的 10%。由于中国将保持较高的经济增长速度进入 21 世纪, 因而将消费更多的能源。能源消费产生的各种污染物将会大幅度地增长。中国以煤炭为主要能源, 据预测, 在今后 30 年内, 中国以煤炭为主的能源结构不会发生显著变化。1995 年中国排放的二氧化硫为 2370 万吨, 近几年排放量虽有下降, 但仍排在世界第一位。二氧化硫的大量排放不仅严重污染大气环境, 还造成中国大面积酸性降水。根据 1995 年修订的大气污染防治法, 国务院于 1998 年批准由国家环保总局领导划定的酸雨控制区和二氧化硫污染控制区。根据国务院的批复, 到 2000 年, 排放二氧化硫的工业污染源达标排放, 并实行二氧化硫总量控制; 有关直辖市、省会城市、经济特区城市、沿海开放城市及重点旅游城市环境空气二氧化硫浓度要达到国家环境质量标准, 酸雨控制区酸雨恶化的趋势得到缓解。到 2010 年, 二氧化硫排放总量控制在 2000 年排放水平以内; 城市环境空气二氧化硫浓度达到国家环境质量标准, 酸雨控制区降水 pH 值小

于4.5的面积比2000年有明显减少。要实现上述目标，必须严格控制燃煤过程的二氧化硫排放。

选择燃煤二氧化硫排放的控制技术，是一项系统工程。首先要符合国家及地方的法规、政策和标准，系统考虑各项措施的技术、经济性能，还要根据污染源自身的特点，因地制宜。在“七五”期间，为制定华南地区酸雨综合控制对策，编者对各种控制技术的综合评价进行了尝试。在后续“工业燃煤二氧化硫收费标准及实施方案的研究”、“柳州地区酸沉降综合防治示范研究”、“我国东部地区酸沉降控制规划和对策研究”以及“我国酸雨及二氧化硫控制区划分研究”中，不断系统和深化对各种燃煤二氧化硫排放控制技术的综合评价。为推进我国控制二氧化硫污染的进程，基于编者多年的积累，在相关领导和同行的鼓励和帮助下，编著了这本手册。编者试图在简要阐述我国燃煤二氧化硫污染控制战略与对策的基础上，系统分析各种燃煤二氧化硫污染控制技术的技术、经济性能并进行综合比较，对目前应用较为广泛的技术给出了应用实例。

本书由郝吉明担任主编。编写人员为：第一章：郝吉明；第二章：王书肖；第三章：徐康富；第四、五章：朱天乐；第六章：郝吉明、王书肖；第七、八、九、十章：郝吉明、王书肖、陆永琪；第十一章：王书肖、郝吉明。全书由王书肖协助统稿。

本手册的编写过程中，得到了国家环境保护总局污染控制司领导和大气处的关心、支持和帮助，贺克斌教授参加了手册的规划和前期讨论，相关企业和设计单位提供了工程实例的基础资料。编者谨在此向这些领导、专家和朋友表示衷心的感谢。

近年来，二氧化硫污染控制技术的资料浩如烟海，难免挂一漏十。加之编者水平有限，书中疏漏谬误之处在所难免，恳请读者和同行批评指正。

编著者

2000年12月于清华园

第一章 中国燃煤二氧化硫污染控制战略与政策

自70年代初日本和美国率先实施控制SO₂排放战略以来,许多国家相继制定了严格的SO₂排放标准和中长期控制战略,加速了控制SO₂的步伐,大大促进了有关控制技术的发展,使SO₂排放在短短的十多年间,得到了大幅度的削减。燃煤SO₂污染控制是中国目前大气污染控制领域最紧迫的任务。本章拟从我国SO₂和酸雨污染特征、经济发展与SO₂排放控制水平相关关系等方面入手,对我国SO₂排放控制战略加以阐述。

第一节 中国燃煤SO₂污染特征

中国是世界上最大的煤炭生产和消费国,也是世界上少数几个以煤为主要能源的国家之一。我国排放的SO₂90%来自于燃煤。大量燃煤和其他经济活动一起导致我国SO₂污染及由此引起的酸沉降污染。中国燃煤SO₂污染控制战略,必须基于中国SO₂污染的如下特征。

一、中国已成为SO₂的最大排放国

中国是当今世界上几乎惟一以煤为初级能源的经济大国。若将中国计算在外,目前世界各国的能源结构中煤炭比例已下降到22.4%,已低于天然气的25.51%。1980年至1993年,全世界煤炭产量增加量的81%是由于中国增量的结果。表1-1给出1949年以来我国能源产量。随着工业和经济的发展,原煤产量由1949年的3200万t增长至1998年的12.95亿t,原油产量由12万t增长至1.61亿t,天然气产量由700万m³增长至233.6亿m³。能源生产的平均年增长率高达9%。表1-2为中国1952~1999年一次能源消费量及构成。虽然原煤占能源消费总量的比例与50~60年代相比,有较大幅度的下降,但至今仍高达70%左右,并且近期内不会有根本性变化。煤炭为主的能源结构,意味着能源系统的整体效率降低,大量建立在气、液燃料基础上的先进的能源转换和终端利用技术不能适用于煤炭。煤炭作为终端燃料,使得很多产品质量受到影响。煤炭生产和消费系统亦给中国造成了巨大的运输压力。

表 1-1 1949~1999 中国能源产量

年 份	原煤/Mt	原油/Mt	天然气/10 ⁸ m ³	电 力	
				总发电量/(TW·h)	其中:水电/(TW·h)
1949	32.0	0.12	0.07	4.3	0.7
1950	43.0	0.20	0.07	4.6	0.8
1951	53.0	0.31	0.08	5.7	0.9
1952	66.0	0.44	0.08	7.3	1.3
1953	70.0	0.62	0.11	9.2	1.5
1954	84.0	0.79	0.15	11.0	2.2
1955	98.0	0.97	0.17	12.3	2.4
1956	110.0	1.16	0.26	16.6	3.5
1957	131.0	1.46	0.70	19.3	4.8
1958	270.0	2.26	1.10	27.5	4.1
1960	397.0	5.20	10.40	59.4	7.4
1961	278.0	5.31	14.70	48.0	7.4

续表

年 份	原煤/Mt	原油/Mt	天然气/10 ⁸ m ³	电 力	
				总发电量/(TW·h)	其中:水电/(TW·h)
1962	220.0	5.75	12.10	45.8	9.0
1963	217.0	6.48	10.20	49.0	8.7
1964	215.0	8.48	10.60	56.0	10.6
1965	232.0	11.31	11.00	67.5	10.4
1966	252.0	14.55	13.40	83.5	12.6
1967	206.0	13.88	14.60	77.4	13.1
1968	220.0	15.99	14.00	71.6	11.5
1969	266.0	21.74	19.60	94.0	16.0
1970	354.0	30.65	28.70	115.9	20.5
1971	392.0	39.41	37.40	138.4	25.1
1972	410.0	45.67	48.40	152.4	28.8
1973	417.0	53.61	59.80	166.8	38.9
1974	413.0	64.85	75.30	168.8	41.4
1975	482.0	77.06	88.50	195.8	47.6
1976	483.0	87.16	101.00	203.1	45.6
1977	550.0	93.64	121.20	233.4	47.6
1978	618.0	104.05	137.30	256.6	44.6
1979	635.0	106.15	145.10	282.0	50.1
1980	620.0	105.95	142.70	300.6	58.2
1981	622.0	101.22	127.40	309.3	65.5
1982	666.3	102.12	119.30	327.7	74.4
1983	714.5	106.07	122.10	351.4	86.4
1984	789.2	114.61	124.20	377.0	86.8
1985	872.3	124.89	129.30	410.7	92.4
1986	894.0	130.69	137.60	449.5	94.5
1987	928.1	134.14	138.90	497.3	100.0
1988	979.9	137.05	142.60	545.2	109.2
1989	1054.2	137.67	150.49	584.8	118.3
1990	1079.9	138.31	152.98	621.2	126.7
1991	1087.4	140.99	160.73	677.5	124.7
1992	1116.4	142.10	157.88	753.9	130.7
1993	1149.7	145.24	167.56	839.5	151.8
1994	1239.9	146.08	175.59	928.1	167.4
1995	1360.7	150.05	179.47	1007.0	190.6
1996	1397.0	157.33	201.14	1081.3	188.0
1997	1392.48	160.34	209.07	1134.47	195.98
1998	1294.92	160.90	233.55	1166.2	208.0
1999	1045.00	160.92	256.39	1233.00	212.9

注：1999年数值为估算值。

表 1-2 1952~1999年中国一次能源消费量及构成

年份	能源消费总量/Mtce	占能源消费总量/%			
		原 煤	原 油	天 然 气	水 电
1952	46.95	95.00	3.37	0.02	1.61
1953	54.11	94.33	3.81	0.02	1.84
1954	62.34	93.45	4.33	0.02	2.20
1955	69.68	92.94	4.91	0.03	2.12

续表

年份	能源消费总量/Mtce	占能源消费总量/%			
		原煤	原油	天然气	水电
1956	88.00	92.73	4.83	0.03	2.41
1957	96.44	92.32	4.59	0.08	3.01
1958	175.99	94.62	3.92	0.06	1.40
1959	239.26	94.68	4.05	0.14	1.13
1960	301.88	93.90	4.11	0.45	1.54
1961	203.90	91.31	5.47	0.94	2.28
1962	165.40	89.23	6.61	0.93	3.23
1963	155.67	88.93	7.20	0.81	3.06
1964	166.37	87.97	8.04	0.73	3.26
1965	189.01	86.45	10.27	0.63	2.65
1966	202.69	86.24	10.17	0.67	2.92
1967	183.28	84.77	10.89	0.84	3.50
1968	184.05	83.79	12.09	0.76	3.36
1969	227.30	81.93	13.76	0.82	3.49
1970	292.91	80.89	14.67	0.92	3.53
1971	372.73	77.51	17.17	1.73	3.59
1973	391.09	74.84	18.58	2.03	4.55
1974	401.44	72.14	20.72	2.49	4.65
1975	454.25	71.85	21.07	2.51	4.57
1976	478.31	69.91	23.00	2.81	4.28
1977	523.54	70.25	22.61	3.08	4.06
1978	571.44	70.67	22.73	3.20	3.60
1980	602.75	72.15	20.76	3.10	3.99
1981	594.47	72.74	19.96	2.79	4.51
1982	620.67	73.67	18.91	2.56	4.86
1983	660.40	74.16	18.14	2.44	5.26
1984	709.04	75.27	17.45	2.37	4.91
1985	766.82	75.81	17.10	2.24	4.85
1986	808.50	75.83	17.20	2.26	4.71
1987	866.32	76.21	17.02	2.13	4.64
1988	929.97	76.17	17.05	2.10	4.90
1989	969.34	75.80	17.20	2.10	4.90
1990	987.03	76.20	16.60	2.10	5.10
1991	1037.83	76.10	17.10	2.00	4.80
1992	1091.70	75.70	17.50	1.90	4.90
1993	1159.93	74.70	18.20	1.90	5.20
1994	1227.37	75.00	17.40	1.90	5.70
1995	1311.76	74.60	17.50	1.80	6.10
1996	1388.11	75.00	17.50	1.60	5.90
1997	1381.73	71.5	20.4	1.7	6.2
1998	1322.14	69.6	21.5	2.2	6.7
1999	1220.00	67.1	23.4	2.8	6.7

注:1. 煤当量折算比率:煤炭 0.714t/t,石油 1.43t/t,天然气 1.33t/1000m³,水电按当年火电煤耗计算。

2. 1994~1999年水电包括核电。

3. 1999年的数值为估算值。

煤炭是一种低品位的化石能源,中国煤炭中灰分、硫分含量较高。大部分煤炭灰分在25%~28%左右;硫分含量变化范围较大,从0.1%到10%不等,1995年全国商品煤的平

均含硫量为 1.13%。图 1-1 给出了我国商品煤、发电用煤及终端用煤的硫分分布。中国煤炭大多都直接燃烧，因此造成烟尘和 SO₂ 等污染物大量排放到环境中。

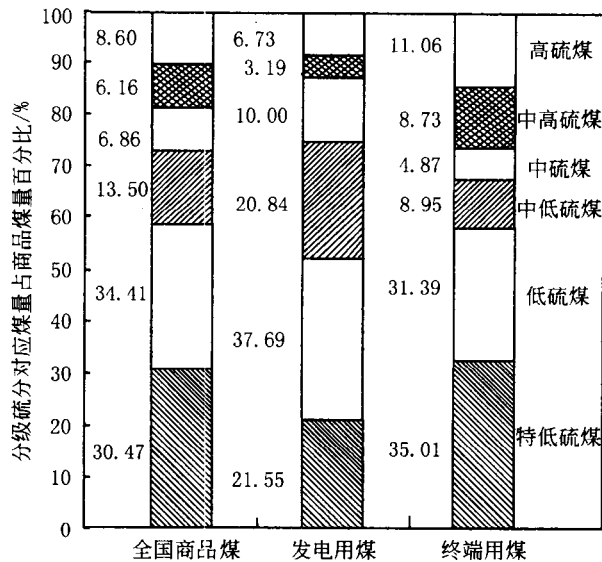


图 1-1 商品煤、发电用煤及终端用煤的硫分分布

中国二氧化硫排放量与煤炭消耗量有着密切关系，1983~1991年两者的相关系数达到 0.96。随着燃煤量的增加，燃煤排放的 SO₂ 也不断增长，1995年中国 SO₂ 排放达到 2370 万 t，已超过欧洲和美国，居世界第一位。图 1-2 为中国历年 SO₂ 排放量。

联合国环境规划署资助项目“将环境因素纳入能源规划 (Incorporation of Environmental Consideration in Energy Planning)”的研究结果表明，按照中国目前的能源政策，到 2010 年和 2020 年，中国一次能源供应结构中煤炭仍将分别占 68.3% 和 63.1%。若不采取有效的削减措施，2020 年中国 SO₂ 排放量将会达到 3500 万 t。削减和控制燃煤 SO₂ 污染，是中国能源和环境保护部门面临的严峻挑战。

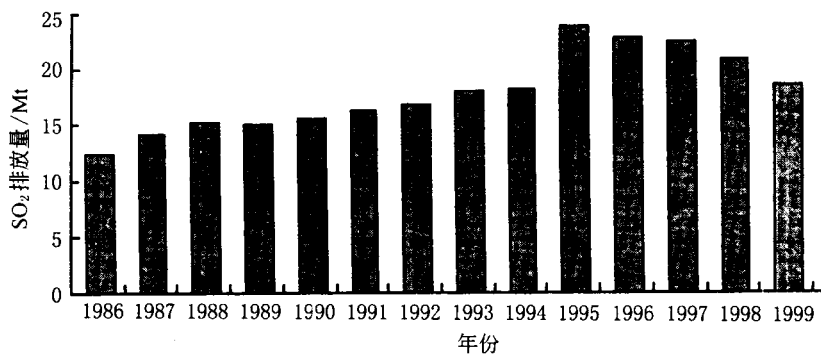


图 1-2 中国历年 SO₂ 排放量

二、中国 SO₂ 排放源分布具有明显的地域性

中国 SO₂ 排放源具有明显的地域性。以 1991 年为例，排放 SO₂ 在 50 万 t 以上的省、自

治区共有 12 个，其中山东、四川、江苏、辽宁等名列前茅。从估算的平均每平方公里排放数量来看，排放强度大的城市和地区包括：京津塘地区、辽宁、河北、山东、陕西、河南等工业区、长江三角洲、珠江三角洲、四川东部、贵阳、昆明、柳州等。1995 年中国 SO_2 排放量网格 ($1^\circ \times 1^\circ$) 分布情况如图 1-3 所示。电力工业是造成 SO_2 污染和酸雨的主要行业，1995 年全国大电厂 SO_2 排放量占全国总排放量的 35%。

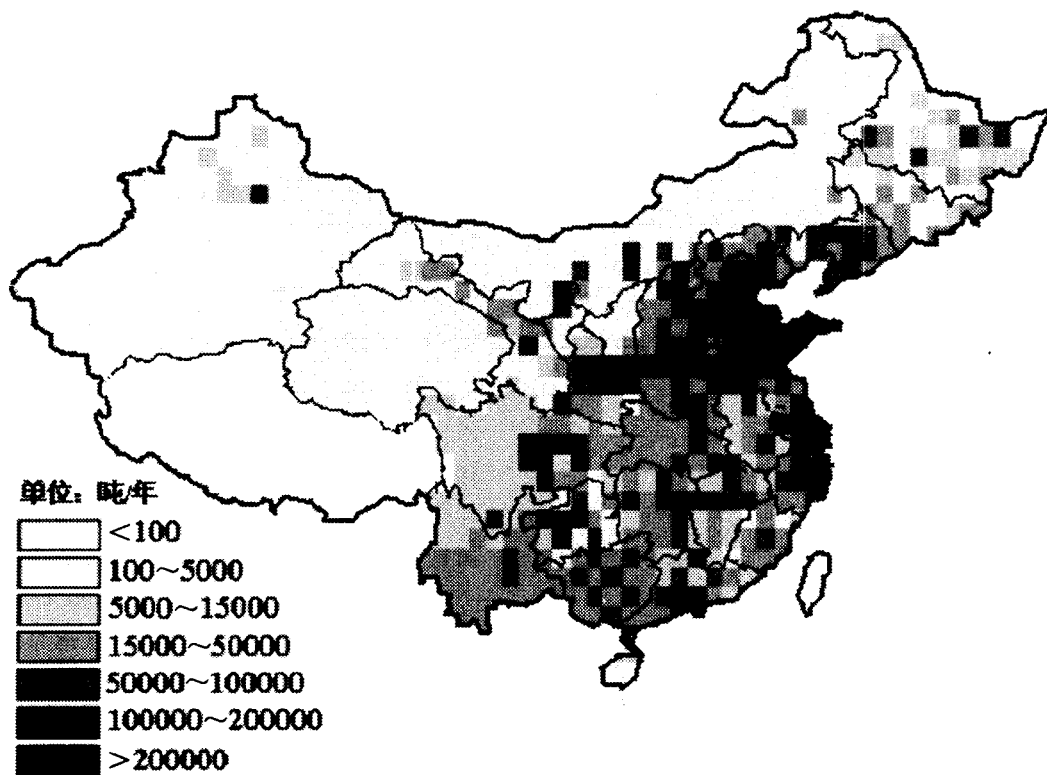


图 1-3 中国 SO_2 排放量网格分布 (1995 年)

三、城市大气环境中 SO_2 浓度居高不下

SO_2 的大量排放导致中国城市的空气污染十分严重。根据国家环境保护总局对全国 2177 个环境监测站 13 年监测数据分析表明，中国有 62.3% 的城市环境空气 SO_2 年平均浓度超过国家环境空气质量二级标准。而环境空气 SO_2 年平均浓度二级标准是保障人群在环境中长期暴露不受危害的基本要求。图 1-4 给出 1994 和 1995 两年我国城市环境空气中 SO_2 浓度与国家环境空气质量标准的比较。由于民用燃料的优质化及工业锅炉烟气高烟囱排放等原因，尽管全国 SO_2 排放量在 1985~1995 年间持续上升，中小城市大气中的 SO_2 平均浓度基本保持不变，而在大城市还有所下降 (图 1-5)。平均说来，中国大城市空气中 SO_2 比中小城市高出 60%。

据对全国 322 个省控以上城市空气质量监测结果分析，1998 年 SO_2 年日均值范围在 $0.002 \sim 0.385 \text{mg}/\text{m}^3$ 之间，全国平均为 $0.056 \text{mg}/\text{m}^3$ 。

四、我国的酸雨污染发展迅速

中国从 80 年代开始对酸雨污染进行观测和调查研究。在 80 年代，中国的酸雨主要发生在重庆、贵阳和柳州为代表的西南地区，酸雨区面积约为 170 万平方公里。到 90 年代中期，

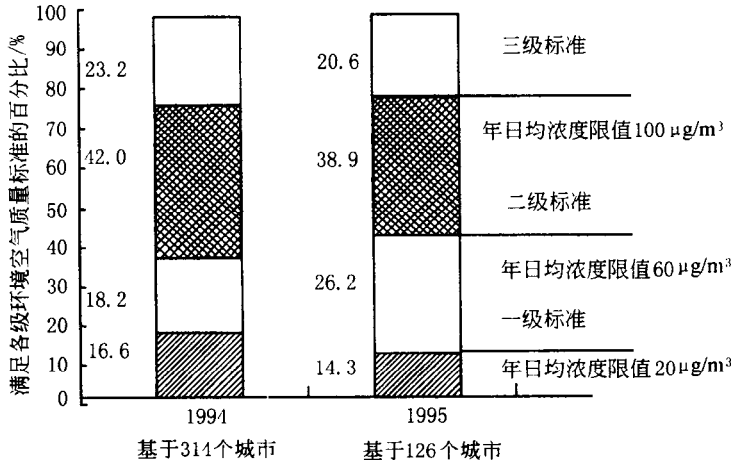


图 1-4 中国城市环境空气 SO₂ 污染水平

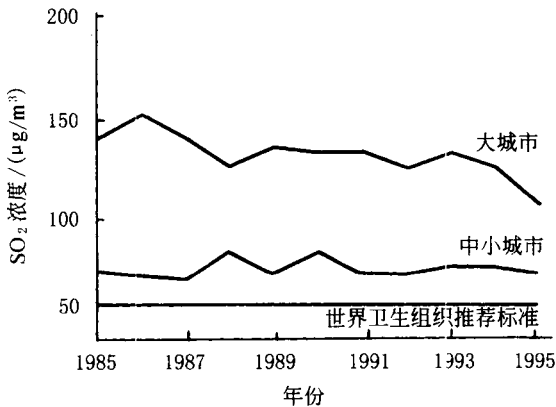


图 1-5 1985~1995年 SO₂ 平均浓度基本稳定不变
(注：大城市指 1994 年人口在 100 万以上的城市，中小城市指人口在 0.1 万~100 万之间的城市)

酸雨已发展到长江以南、青藏高原以东及四川盆地的广大地区，酸雨区面积扩大了 100 多万平方公里。以长沙、赣州、南昌、怀化为代表的华中酸雨区现已成为全国酸雨污染最严重的地区，其中心区平均降水 pH 值低于 4.0，酸雨频率高达 90% 以上，已到了“逢雨必酸”的程度。以南京、上海、杭州、福州和厦门为代表的华东沿海地区也成为我国主要的酸雨地区。值得注意的是，华北的京津、东北的丹东、图们等地区也频频出现酸性降水。年均 pH 值低于 5.6 的区域面积已占全国国土面积的 40% 左右。图 1-6 为中国 1995 年降水的 pH 值分布。

根据 1998 年的监测结果，全国降水年均 pH 值范围在 4.13~7.79 之间。降水年均 pH 值低于 5.6 的城市占统计城市数的 52.8%。73% 的南方城市降水年均 pH 值低于 5.6。降水 pH 值低于 4.5 的城市有临安、株洲、益阳、韶关、清远、南昌、鹰潭和长沙。北方城市中的图们、青岛、西安和铜川降水年均 pH 值低于 5.6。华中酸雨区的污染有所减轻，但中心区域降水年均 pH 值仍低于 5.0，酸雨频率在 70% 以上。华南酸雨区污染总体格局未变，但南部沿海部分城市降水年均 pH 值逐年降低，酸雨出现频率逐年上升。华东、西南酸雨区总体污染程度仍维持在上一年的水平，但福建西部的武夷山和云南、贵州西部的部分地区有所好转，降水年均 pH 值高于 5.6。青岛和图们是北方两个较为稳定的酸雨污染局部区域。其他几个北方城市降水年均 pH 值虽低于或接近 5.6，但从酸雨频率来看，尚不足以说明该区域已形成稳定的酸雨区。

我国酸雨的化学特征是 pH 值低，硫酸根 (SO₄²⁻)、铵 (NH₄⁺) 和钙 (Ca²⁺) 离子浓度远远高于欧美，而硝酸根 (NO₃⁻) 浓度则低于欧美。研究表明，我国酸性降水中硫酸根与

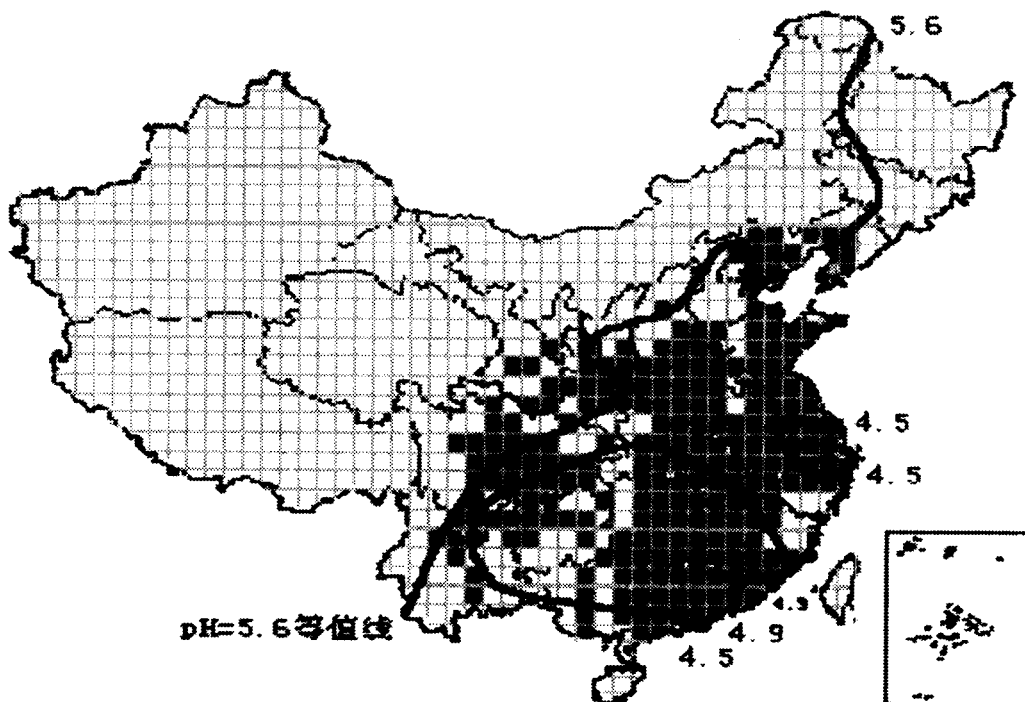


图 1-6 1995 年中国降水年均 pH 值分布

硝酸根的摩尔之比大约为 6.4:1，因此，中国的酸雨是硫酸型的，主要是由人为排放 SO_2 造成的。图 1-7 给出了中国酸性降水的化学特征。

五、酸雨和 SO_2 污染制约了经济的发展

中国有关环境损失的评估研究始于 80 年代初，主要集中研究评估理论、方法及部分案例。这些研究对中国开展环境损失定量化工作非常重要。在 1984 年，研究人员完成了一项基于全国范围的有关研究《中国 2000 年环境预测与对策》。根据这一研究，1991~1995 年年均环境损失为 380 亿元人民币，占 1993 年 GNP 的 6.75%。自此之后，区域性的环境损失评估研究得到了长足的发展，在 90 年代则受到了更多的关注，开展了多项研究并取得了一些成果。这些工作以人体健康、森林、渔业、材料等为研究对象，而主要集中在前三类研究。

SO_2 排放造成了严重的酸雨污染和生态损害，因而其环境影响受到了极大关注。研究的焦点是 SO_2 污染的健康影响，另一个重点是酸雨引起的生态损失。基于国内外研究的成果，特别是国家“七五”和“八五”科技攻关项目关于酸雨引起的生态影响的研究成果，清华大学综合考虑损失评估与能源有关的环境污染控制规划，核算了中国 1995 年由于 SO_2 污染受到的损失（见表 1-3）。

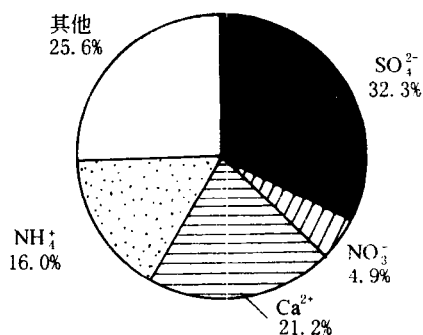


图 1-7 中国酸性降水的化学特征

世界银行的一份报告《碧水蓝天——展望 21 世纪的中国环境》估算了中国大气污染和

表 1-3 中国由于 SO₂ 污染受到的损害(1995)/10⁸ 元

项 目	SO ₂ 控制区	酸雨控制区	“两控区”	两控区之外	总 计
农作物	12.27	167.70	179.97	37.70	217.67
森 林	0.00	775.80	775.80	0.00	775.80
人体健康	65.02	56.18	121.20	50.67	171.87
合 计	77.29	999.68	1076.97	88.37	1165.34

水污染对环境的影响。根据支付意愿价值法估算，中国目前（1995 年）大气和水污染的损失约占 GDP 的 8%；若采用人力资本估值法，其损失相当于 GDP 的 3.5%。

自 80 年代以来，已有三组中外研究者对中国城市中大气环境污染与人体健康之间的关系进行了研究分析。这些研究得出的大气污染与健康后果之间的统计性关系（“剂量-响应”关系）与在其他国家进行的研究所得结果大体一致。1989 年开始的北京研究表明，若大气中 SO₂ 浓度每增加一倍，则总死亡率增加 11%。1992 年对沈阳大气污染与每日死亡率的关系作了研究。该城市居民区和商业区中 SO₂ 与总悬浮颗粒物浓度较高。研究人员在对温度、湿度与季节等因素进行控制的同时，将日死亡率对 SO₂ 及总悬浮颗粒物浓度进行了回归，结果表明 SO₂ 和总悬浮颗粒物浓度每增加 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，总死亡率分别增加 2.4% 和 1.7%（见图 1-8）。重庆的研究关联了该市夏、冬两季的细颗粒物（直径小于 10 μm ）和 SO₂ 浓度与采自 3500 名成人和 300 名小学生的疾病调查数据，结果发现大气污染与肺功能衰退有显著关系。对 1995 年医院门诊率、急救病例以及日死亡率与大气污染水平的分析也反映出，大气中高浓度的颗粒物和 SO₂ 会损害健康和增加死亡率。

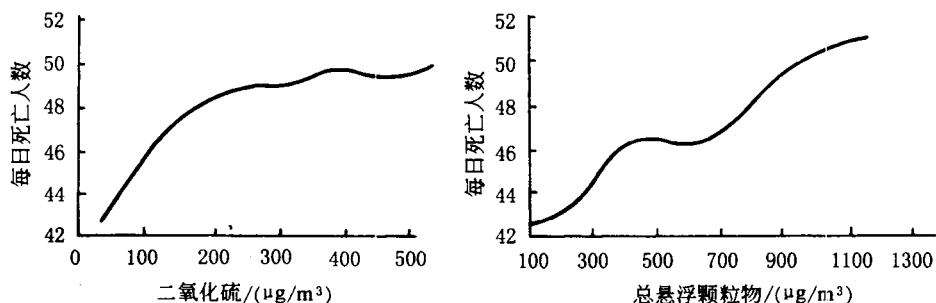


图 1-8 较高的污染浓度增加了死亡率

注：图中显示的地方加权回归法拉平了沈阳 1992 年运用普通附加模型制作方法得出的死亡率情况，从而对温度、湿度及季节影响加以控制。

清华大学完成的“湖南案例”研究，评估了 SO₂ 和酸雨污染对农作物造成的损失、对森林的损害以及对人体健康的损害。表 1-4 给出了湖南省 SO₂ 排放引起的损失成本的变化趋

表 1-4 湖南省 SO₂ 排放引起的损失成本

项 目	1995	2000	2005	2010	2015	2020
农作物/亿元人民币	5.44	6.01	6.21	6.71	7.16	7.56
人体健康/亿元人民币	3.79	8.36	12.99	18.57	24.08	31.17
森林/亿元人民币	12.0	15.45	16.70	19.31	21.72	24.07
合计/亿元人民币	21.23	29.83	35.90	44.59	52.96	62.80
SO ₂ 排放量/万吨	89.0	98.7	102.3	107.2	112.0	116.8
SO ₂ 污染损失/(元/吨 SO ₂)	2384	3022	3509	4161	4729	5377
边际损失/(元/吨 SO ₂)		5102	5988	8773	9037	9619

势（仅为一种情景分析下的结果）。

由表可见，随着 SO_2 排放量的增加，所导致的损失成本迅速增加。

根据有关研究，1995 年我国由于酸雨和 SO_2 污染造成农作物、森林和人体健康等方面的经济损失为 1100 多亿元，已接近当年国民生产总值的 2.0%，成为制约我国经济和社会发展的的重要因素。因此，对 SO_2 排放的控制已势在必行。

第二节 中国控制酸雨和 SO_2 污染的重大行动

中国政府高度重视酸雨和 SO_2 污染防治，针对酸雨和 SO_2 污染的不断加剧，采取了一系列措施，取得初步成效。

一、中国酸雨研究

酸雨是半个世纪以来全球关注的区域性环境问题，自 80 年代以来中国政府组织了较大规模的酸雨研究及监测。中国酸雨研究大体可分为三个阶段。

1. 探索性研究阶段

70 年代末，中科院环境化学所就开始了酸雨监测。1982 年 5 月国务院环境保护领导小组办公室将“西南地区酸雨问题研究”列为国家环保重点科研项目，委托中科院环化所承担。1984 年国家计委拨专款进行“我国酸雨来源、影响和控制对策的研究”。中国科学院将“西南地区酸雨成因、危害及防治”作为院重点项目，组织多个专业所联合攻关。上海市科委组织上海市有关院所进行上海市酸雨形成、影响及对策的研究。在国内形成了西南、华南、上海三片研究酸雨的格局。这一阶段的研究，为“七五”期间的深入研究奠定了基础。

2. 典型区域酸雨攻关研究阶段

1986 年，作为国家“七五”科技攻关重点项目——大气污染防治技术研究项目的一个课题，“酸雨研究”首次列入国家科技攻关研究。该课题选择了西南、华南两个地形、气象、大气污染、酸雨来源各具特点又有经济开发前景的酸雨敏感区，集国内研究酸雨的优势力量，开展了两地区酸雨形势的观测、酸雨形成的大气物理及大气化学过程、酸雨对生态系统的影响、酸雨对材料的影响及经济损失估计、区域酸雨未来发展趋势预测、两地区的酸雨控制对策和技术等方面的研究。在大气污染防治技术研究项目中，还同时将工业型煤、流化床燃烧脱硫、炉内喷钙脱硫、电厂锅炉排烟脱硫等作为攻关课题，为酸雨防治提供实用技术。

1986~1988 年，中国科协组织了由中国林学会带头，19 个全国性学会参加的“酸雨对大农业的危害及对策”活动。1991 年 10 月中国环境科学学会在焦作市召开了“中国酸雨发展趋势及控制对策学术讨论会”，交流已有的科研成果，总结经验，提出建议，促进了“七五”酸雨科研成果的推广。

3. 全国酸沉降研究及防治阶段

“七五”科技攻关提出的华南酸雨的形势引起了国家领导的重视。国务院领导对“广西壮族自治区酸雨问题核查报告”作出批示。1990 年 12 月，国务院环委会第十九次会议通过了《关于控制酸雨发展的意见》，提出在酸雨监测、酸雨科研攻关、二氧化硫控制工程和征收二氧化硫排污费四个方面开展工作的建议。“八五”期间国家科委又将“酸沉降及其控制技术的研究”列为“八五”国家科技攻关项目，以酸沉降传输为突破口，组织了三个不同层次的研究。

(1) 我国酸沉降及其生态环境影响的研究：在“七五”攻关基础上扩大进行我国酸沉降时空分布规律、酸沉降对生态环境影响及经济损失、酸沉降物质的大气输送、大气酸化和酸

沉降过程以及我国酸沉降控制规划与对策的研究。

(2) 沿海经济发展地区酸沉降特征与防治研究：选择我国南北沿海酸雨污染重、地理位置、气象条件、生态状况、污染排放各异的青岛及厦门两市，进行酸沉降来源、现状、成因、特点、对生态影响及区域控制对策的研究，以便为相近地区酸沉降防治提供示范。

(3) 重点地区酸沉降综合控制示范研究：选择酸雨研究已有一定基础、酸雨污染较重的贵阳、柳州二市，在进一步确定酸沉降临界负荷、控制规划的基础上，将“七五”攻关提交的燃煤 SO_2 污染治理技术在二市集中示范，技术上加以完善，并据其实效进行评估，以利推广。

鉴于我国酸雨污染不断加剧的局面，1996年，国家科委又将“燃煤烟气 SO_2 和汽车尾气控制关键技术及设备研究”列为国家“九五”科技攻关项目。该项目旨在利用现代科学最新技术、方法和手段，在我国燃煤 SO_2 控制技术与引进消化的基础上，以燃煤电站锅炉为重点，开发出适合我国国情的烟气脱硫实用技术及具有强大市场竞争力的脱硫新技术；同时，针对我国量大面广的中小型锅炉，开发出适用于不同场合的燃煤 SO_2 实用控制技术。研究专题包括：

- (1) 生物质型煤及燃煤催化剂固硫技术及装备研究；
- (2) 湿式脱硫除尘工艺与装备研究；
- (3) 半干半湿法脱硫技术与装备研究；
- (4) 吸收剂喷射烟气脱硫技术与装备研究；
- (5) 中、小型燃煤电站水膜除尘器简易脱硫技术与装备研究；
- (6) 脉冲电晕等离子体烟气脱硫技术研究。

二、中国的 SO_2 排放收费制度

排污收费是中国环境管理中一项重要的环境经济政策， SO_2 排放收费是中国排污收费制度的重要组成部分。

早在1982年，国务院颁布的《征收排污费暂行办法》已包含 SO_2 超标收费的内容，其收费标准是0.04元/kg SO_2 ，但该收费的范围只是针对工艺过程排放的 SO_2 征收超标排污费，不包括电站、工业和采暖锅炉。由于生产工艺过程排放 SO_2 的监测和计量均存在一定问题，因此，该收费标准实际上并未得到执行，只有个别省进行了收费。

根据国务院环委会《关于控制酸雨发展的意见》，1991年国家环保局委托清华大学开展《工业燃煤二氧化硫收费标准及实施方案的研究》，该研究的主要成果写入了国家环保局提交国务院环委会第20次会议的材料《征收工业燃煤二氧化硫排污费方案测算》中，并最终反映在国务院批准两省九市（广东、贵州两省和重庆、宜宾、南宁、桂林、柳州、宜昌、青岛、杭州和长沙九市）实行收费试点的环监（1992）361号文件中。该研究突破了传统的超标排污收费的惯例，建议按排放总量收费。该收费方案突出了治理费用和收费标准的联系；并建议在社会承受能力允许的范围内，适当提高收费标准；收费标准应与物价指数挂钩，或根据涨价情况适时加以调整。该研究选取与工农业生产和人民生活关系密切的工业产品和零售商品作为指数商品，估算了 SO_2 排放收费的社会承受能力，证明即使收费额为0.30元/kg SO_2 ，对社会经济和人民生活影响甚微，可以承受。

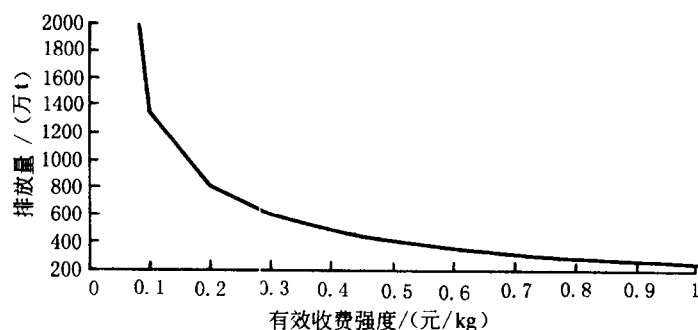
至此，关于燃煤 SO_2 收费工作在两省九市全面展开，收费的主要对象为工业和经营性燃煤排放的 SO_2 ，收费费率为不超过0.20元/kg SO_2 。根据国家环保局提供的统计数据，实施 SO_2 收费的部分省市的收费标准、征收范围等见表1-5。

表 1-5 二省九市 SO₂ 排污收费试点情况

名称	收费标准/(元/kg)	收费范围	开始征收时间
广东省	0.2	工业及经营性燃煤、油	1994
贵州省	0.2	工业及经营性燃煤	1993.7
宜宾市	0.18	工业及经营性燃煤	1993.10
南宁市	0.2	工业及经营性燃煤	1994
柳州市	0.2	工业及经营性燃煤	1994
桂林市	0.2	工业及经营性燃煤	1994
宜昌市	0.2	工业燃煤	1993.5
青岛市	0.2	工业及经营性燃煤	1993.7
杭州市	0.18	同上,包括工艺废气	1993.5
长沙市	0.2	工业及经营性燃煤	1993.1

二省九市 SO₂ 排污收费试点工作成功的,为在全国推行 SO₂ 排污收费工作积累了经验,创造了条件。实践证明,征收 SO₂ 排污费,在促进老污染源治理、控制新污染的产生、推动 SO₂ 污染防治、控制酸雨污染等方面取得一定成效。根据“国务院关于 SO₂ 排污收费扩大试点工作有关问题的批复”(国函[1996]24号),1998年,国家环境保护总局、国家发展计划委员会、财政部和国家经济贸易委员会联合颁发了《关于在酸雨控制区和 SO₂ 污染控制区开展征收 SO₂ 排污费扩大试点的通知》(环发[1998]6号),将 SO₂ 收费范围扩大到“两控区”。根据国家环境保护总局的统计,1998年全国 SO₂ 收费额为 5.08 亿,占当年排污收费总额的 10.3%。

从 SO₂ 收费试点算起,已历时 6 年。虽然收费标准偏低,但对促进 SO₂ 的控制起到了积极作用。就全国而言,实施扩大 SO₂ 收费和总量控制措施以后,中国 SO₂ 的排放总量从 1998 年开始下降,采取的相关措施明显发挥了作用。为了分析 SO₂ 收费和其他排污收费的环境效果,中国环科院利用约 300 家企业的数据分析了有效 SO₂ 收费强度和排放量之间的关系,如图 1-9 所示。

图 1-9 有效收费强度和 SO₂ 排放量的关系

由图 1-9 可见,SO₂ 的排放量和有效收费强度之间,存在着显著的相关关系。为了有效遏制大气污染和酸雨加剧的趋势,应当逐步提高 SO₂ 的有效收费强度。

考虑到排污收费的标准至少应略高于平均治理费用的原则,有人建议将中国 SO₂ 排污收费的费率确定为 1.20 元/kg SO₂。初步测算表明,现行的 SO₂ 收费标准仅使火电的生产成本平均提高 0.004 元/kW·h。若按 1.20 元/kg SO₂ 收费,以北京市为例,按北京市燃煤的含硫量 0.5% 计,吨煤的 SO₂ 排污费为 10.2 元。北京煤炭的平均消费价格为 220 元/t,

SO₂ 收费额与煤炭价格的比例约为 5:100。如果实施这种费率,将对煤炭的生产和销售产生显著影响,从而对高硫煤的开采和使用也将能够起到积极的限制作用。作为 SO₂ 收费改革的试点城市,杭州、郑州和吉林的 SO₂ 排污收费的试行标准为 0.3~0.6 元/kg SO₂。为有效控制北京市大气污染,北京市政府提出将 SO₂ 收费标准提高到 1.70 元/kg SO₂ 的建议。目前中国排污收费的主要功能为刺激污染者削减污染和筹集污染控制资金,SO₂ 排污收费率的提高应与其他环境经济政策、管理手段有机地结合起来,统筹兼顾。

三、酸雨控制区和 SO₂ 污染控制区的划分

为了进一步遏制酸雨和 SO₂ 污染的发展,1995 年 8 月,全国人大常委会通过修订的《中华人民共和国大气污染防治法》,专门规定“国务院环境保护主管部门会同国务院有关部门,根据气象、地形、土壤等自然条件,可以对已经产生、可能产生酸雨的地区或者其他 SO₂ 污染严重的地区,经国务院批准后,划定为酸雨控制区或者二氧化硫污染控制区”(即“两控区”)。同时规定在两控区内“排放 SO₂ 的火电厂和其他大中型企业,属于新建项目不能用低硫煤的,必须建设配套脱硫、除尘装置或者采用其他控制 SO₂ 排放、除尘的措施,属于已建企业不能用低硫煤的,应当采取控制 SO₂ 排放、除尘的措施。”在 1996 年全国人大批准的《国民经济和社会“九五”计划和 2010 年远景目标纲要》以及《国务院关于环境保护若干问题的决定》中,都明确提出要重点治理两控区的酸雨和 SO₂ 污染。

受国家环保局委托,自 1995 年 10 月开始,清华大学和中国环境科学研究院合作开展了“我国酸雨及 SO₂ 控制区划分研究。”划定两控区体现了从实际出发,抓重点的指导思想,即依据中国国情,集中力量控制重点污染区域,抓住污染最严重的两控区污染控制工作,就是抓住了中国酸雨和 SO₂ 污染控制的重点。

(一)“两控区”划分指导思想

根据《大气法》第二十七条关于划定酸雨控制区和 SO₂ 污染控制区的规定,《国务院关于环境保护若干问题的决定》、《国民经济和社会发展“九五”计划和 2010 年远景目标》的要求,努力实现环境保护目标及总量控制规划。

充分体现实施可持续发展战略的要求,重点控制酸雨污染严重的区域和 SO₂ 污染严重的城市。

充分利用我国自 80 年代以来在酸雨和 SO₂ 污染控制方面的监测和科研成果,结合现有行政区界确定区域范围,便于实施环境管理和监督。

(二)“两控区”划分基本条件

考虑到酸雨和 SO₂ 污染特征的差异,分别确定酸雨控制区和 SO₂ 污染控制区的划分基本条件。

1. 酸雨控制区的划分基本条件

一般将 pH 值 \leq 5.6 的降水称为酸雨。有关研究结果表明,降水 pH 值 \leq 4.9 时,将会对森林、农作物和材料产生损害。西方发达国家多将降水 pH 值 \leq 4.6 作为确定受控对象的指标。

不同地区的土壤和植被等生态系统对硫沉降的承受能力是不同的,硫沉降临界负荷反映了这种承受能力的大小。

酸雨污染是发生在较大范围的区域性污染。酸雨控制区应包括酸雨污染最严重地区及其周边 SO₂ 排放量较大地区。

在我国酸雨污染较严重的区域内,包含一些经济落后的贫困地区,这些地区目前还不具