

中国酸雨成因研究

王文兴

(中国环境科学研究院, 北京 100012)

文摘 根据大气颗粒物酸化缓冲能力、土壤的碱金属及碱土金属含量、土壤的酸碱性质、酸雨前体物排放强度和酸性物雨洗能力等阐明了我国酸雨成因及其地理分布, 并指出其它一些敏感地区, 如云南东南部、东北东部和北部、山东半岛东部等地区可能出现酸性降水。根据前体物排放量预测, 2020年前我国酸雨仍将继续发展。

关键词: TSP; 土壤pH; 排放强度; 雨洗能力; 酸雨趋势。

继欧洲和北美之后, 东北亚地区伴随着经济的高速发展出现了世界第三大酸雨区。该地区包括我国长江以南广大地区、台湾、朝鲜半岛和日本列岛^[1-3]。亚洲降水酸性最强, 面积最大的酸雨区都在我国, 而且面积仍在扩大, 降水酸性继续升高。这种情况已引起我国及世界各国科学工作者的兴趣, 纷纷对我国酸雨进行研究。

我国科学工作者在不同地区, 从不同方面研究了降水酸性的形成, 得到了很有说服力的结果。赵殿五^[4]、黄美元^[5]等研究了西南的重庆和贵阳地区降水云下洗脱过程, 认为该地区降水的酸性主要来自局地源。俞绍才等研究了厦门酸雨季节分布特点后认为该地区的酸雨可能以外来源为主^[6]。张宁等^[7]分析了甘肃武都县1983年至1990年降水pH值变化, 发现8年间降水pH年均值降低了1.5个pH单位, 认为该地区的酸雨主要来自四川盆地。七五期间, 华南地区酸雨研究采用大面积航测云水和地面同步监测, 发现存在着中尺度和大尺度的输送。以上的工作从不同的方面解释了各地区降水酸性的形成。本文考虑到我国已形成大尺度区域性酸雨, 故采用与全国尺度相匹配的数据和信息, 从宏观上综合分析降水酸性的形成, 在前文^[8]的研究基础上, 讨论我国酸雨的形成及其发展趋势。

1 中国大陆酸雨现状和前体物排放强度分布

1.1 酸雨现状

酸雨现状是酸雨研究和控制的基础, 国家环境保护部门于1982年建立了有189个观测点的酸雨监测网, 积累了大量数据。为了对比, 现将1982年和1992年全国降雨体积加权平均pH值等值线绘于图1。由图1可见, 我国酸雨区主要位于长江以南, 且十年间酸雨的面积大幅度地向外扩展^[9]。

1.2 酸雨前体物排放强度分布

为了阐明酸雨在长江以南形成的原因, 需要查明酸雨主要前体物的排放强度分布。为此, 作者基于我国燃料消耗、燃料的含硫量, 以及消费燃料有关部门的排放因子^[10], 计算了1990年全国SO₂和NO_x以省区为基础的排放量及排放强度。

首先, 由全国各煤矿生产煤中的硫含量计算了各省、市、地区煤的平均含硫量。然后, 由各地区燃料消耗、工业产品产量及其排放因子计算各地区的硫排放量。各地区的硫年排放量除以面积即得SO₂的排放强度(t/km²)。用同样方法计算了NO_x的排放强度, 不同的是不考虑燃料中的含氮量。

在计算地区的排放强度时,在区域尺度上视北京、天津和上海为点源,将北京、天津并入河北,上海的排放量一分为二,分别并入江苏和浙江计算。各地区 SO_2 和 NO_x 年排放强度计算结果绘于图2, NO_x 的排放强度分布与该图大体一致,此处略去。由图2可知, SO_2 和 NO_x 年排放强度最大的地区位于渤海、黄海和东海沿岸地区。对于 SO_2 , 排放强度大的省依次是江苏、山东、辽宁、河北和山西,年排放强度均大于 $7\text{t}/\text{km}^2$ 。这些省份均未出现区域性酸雨。而酸雨严重的省份福建、江西、广西和广东, SO_2 年排放强度则小于 $2.6\text{t}/\text{km}^2$, 湖南、四川和贵州的 SO_2 年排放强度也低于 $5\text{t}/\text{km}^2$ 。

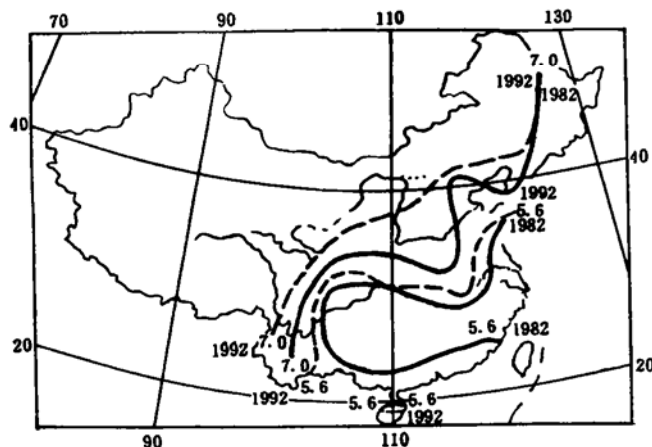


图1 全国降水体积加权平均pH值等值线
实线: 1982年 虚线: 1992年

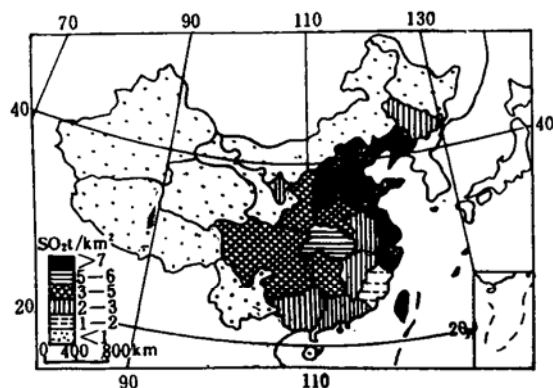


图2 全国各地 SO_2 的年排放强度 (1990年)

比较图1与图2可知,我国的酸雨并未发生在酸雨前体物排放强度最大的北方地区,而发生在排放强度较小的地区。为什么我国酸雨形成这样的分布,这是一个重要的科学问题。本文以下将逐步阐明我国酸雨的形成这种表面上似乎不合逻辑的分布。

2 大气颗粒物和土壤对降水酸性的影响

2.1 南北方降水化学组成的差异

为了分析大气颗粒物和土壤的化学组成对降水酸性的影响,有必要首先检查南方和北方降水化学组成的特点。表1、2列出了南方酸雨区和北方非酸雨区降水主要离子的浓度。

由表1、2可见,非酸雨区北方城市降水中硫酸根和硝酸根年均浓度之和达 $241.5\mu\text{g}/\text{L}$,而酸雨区仅为 $145.1\mu\text{g}/\text{L}$ 。北方甚高于南方,是南方的1.7倍。对于阳离子浓度,铵离子浓度南北方差别不大,土壤元素钙镁浓度悬殊,北方这两种离子浓度之和达 $458.9\mu\text{g}/\text{L}$,而南方降水中此值仅为106.3,北方是南方的4.3倍。原来,北方降水中的酸被大量碱性物质中和,致使降水的酸性大幅度下降,其pH值一般在5.6以上,由此也可以看到硫沉降和酸沉降不可混淆。

2.2 南北方大气颗粒物浓度及其酸化缓冲能力的差异

降水的碱金属和碱土金属主要来自大气颗粒物,大气颗粒物的浓度和化学组成随各地的自然和社会条件而异。南方湿润多雨、植被良好、颗粒物浓度小,北方则干燥少雨、土壤裸露、颗粒物浓度大。图3给出了全国约250个城市大气TSP浓度,据其中北方和南方各35个城市1990至1992年统计,大

表 1 北方部分城市降水离子的浓度 (μeq/L)

地 点	样 本 数	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻ /NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
北 京	28	154.5	39.5	3.91	162.8	151.6	12.1
齐 齐 哈 尔	4	10.6	1.9	5.58	87	365.7	45.4
长 春	34	156.5	21.2	7.38	61.3	256.5	51.2
吉 林	4	66.8	2.6	25.7	84.6	108.1	99.8
延 吉	7	79.2	1.1	72.0	13.5	7.5	43.1
沈 阳	19	398.0	50.3	7.96	99.0	305.4	395.3
大 连	39	576.3	62.9	9.16	199.7	497.6	21.6
锦 州	14	259.2	49.4	5.25	123.8	340.8	52.4
西 安	5	358.1	67.3	5.32	275.8	179.5	66.84
烟 台	2	182.5	22.8	8.00	39.1	289.1	20.1
平 顶 山	9	152.3	0.36	42.5	138.3	107.9	31.9
算 术 均 值		212.8	28.7	5.8	116.7	382.8	76.1

表 2 南方部分城市降水离子的浓度 (μeq/L)

地 点	样 本 数	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻ /NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
合 肥	42	141.9	31.8	4.46	117.3	110.3	13.7
马 鞍 山	28	139.2	15.1	9.26	73.7	123.0	18.8
铜 陵	63	96.9	15.9	6.10	107.3	79.9	6.01
南 京	16	144.4	285.5	0.51	104.6	137.9	12.3
苏 州	39	200.2	14.4	13.89	93.6	125.3	15.5
徐 州	8	105.8	13.7	7.72	144.2	37.6	10.9
上 海	36	153.4	12.6	12.2	75.8	104.3	27.9
杭 州	21	112.3	13.5	8.32	68.2	59.9	7.6
温 州	24	48.5	5.1	9.5	85.2	36.0	12.0
宁 波	9	169.6	25.1	6.76	74.1	9.10	9.3
厦 门	35	100.1	69.5	1.44	49.0	98.4	10.8
吉 安	5	60.9	1.2	50.8	75.4	18.4	6.6
南 宁	29	61.6	4.9	12.6	27.7	26.6	1.4
桂 林	13	107.2	19.7	5.44	50.0	67.2	6.6
重 庆	21	326.6	27.9	11.7	151.1	127.8	31.5
贵 阳	4	405.2	27.9	14.5	174.3	199.6	65.2
算 术 均 值		125.1	20.0	6.0	92.5	90.2	16.1

气TSP年均浓度分别为426μg/m³和218μg/m³，北方约为南方的2倍。南北方大气颗粒物浓度的这种相对水平一直保持着，图4是南北方大气TSP浓度年均值十年变化趋势^{〔11〕}。十年间城市TSP浓度约降低了50%。与此同时，就全国而论，南北方城市SO₂和NO_x浓度接近，且变化不大。

许多研究工作表明，不仅北方大气颗粒物浓度甚高于南方，北方大气颗粒物中碱性

和酸性物质浓度之比也甚高于南方。因此，对于同样的降水南方大气颗粒物对降水酸性的缓冲能力要大得多^{〔12、13〕}。表3列出了中国南方、北方典型城市和日本关东地区的浦和市和熊谷市的TSP对降水的缓冲能力^{〔14〕}。

表3中H⁺为TSP样品用去离子水萃取液的起始酸度，△C_b为TSP对降水酸性的临界缓冲能力。由表3可知，北方颗粒物的

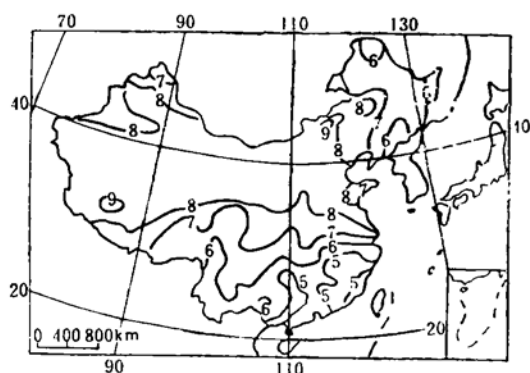


图 7 中国土壤pH等值线
(1990年)

由图 5、6 可知, 土壤中钙和钠的含量由南到北递增, 但越过淮河秦岭则其含量迅速增加, 两者的规律性完全相似。土壤的酸性是土壤中各种化学成份综合作用呈现的一种物化性质, 它的等值线变化规律与土壤中碱性物质含量一致。值得注意的是将图 1 与图 5、图 6 和图 7 比较, 发现酸雨区恰与土壤碱性物质低含量区、土壤的低 pH 值区重叠。从区域观点看, 表明土壤的酸碱性质也可作为影响酸性降水形成的一个基本因素。

3 气象条件对降水酸性的影响

3.1 对化学反应的影响

气象条件对酸雨形成的影响主要表现在两个方面: 在化学方面影响前体物的转化速率; 在大气物理方面影响有关物质的扩散、输送和沉降。

太阳光强和水蒸气浓度将促进 SO_2 的转化, 形成硫酸在局地沉降。众所周知, 光强增加使大气自由 OH 等浓度升高, 加速 SO_2 的氧化, 在广州野外光化学实验得到关于 SO_2 转化的下列方程^[18]:

$$R = 0.175RH + 2.03\ln I_0 + 0.0704[\text{SO}_2] - 2.35$$

式中, R —— SO_2 平均转化率 ($\text{ppb} \cdot \text{h}^{-1}$); RH ——相对湿度; I_0 ——光强 (kW/m^2); $[\text{SO}_2]$ —— ppb 。

太阳光强随纬度升高而降低, 对我国来说, 大气湿度也是由南向北递减。故当其它条件相同时, 南方大气中 SO_2 较快的转化为硫酸, 酸化当地大气环境。由全国 I_0 和 RH 平均分布可以作出 SO_2 转化速率全国分布来解释我国酸雨的形成和分布。

3.2 对输送和沉降的影响

除化学转化外, 影响酸雨形成的重要气象因素是输送和沉降。徐大海等^[13]在研究我国大陆通风量和雨洗能力分布时, 采用箱模式计算通风量分布, 并进而导出和定义了污染物的半洗出区长度, 即箱的顺风尺度达此长度时, 有一半大气污染物被湿沉降清除。半洗出区长度为:

$$\Delta X_w = 53 V_E / R$$

式中, V_E ——通风量 (m^2/s); R ——降水率 (m/s)。

即半洗出区长度与通风量成正比, 与降水率成反比。故此值大小可作为酸性物湿沉降难易的度量, 按多年平均风速、总辐射量估计的年平均 V_E 值和平均降水量计算的 ΔX_w 值绘于图 8。由图 8 可知, ΔX_w 值最短区域位于四川盆地西北部和东部湘鄂西

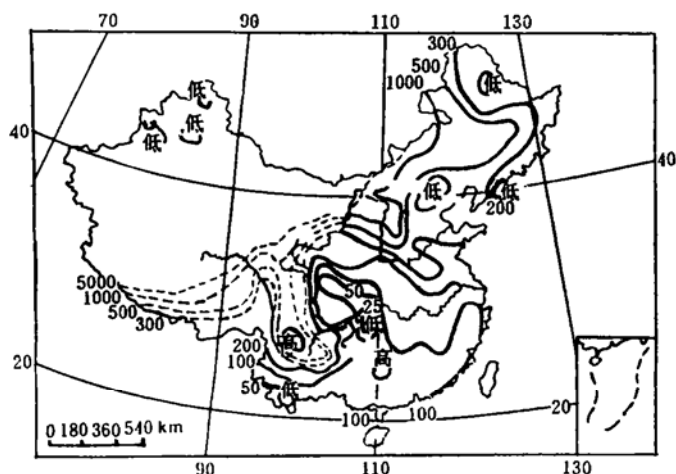


图 8 我国大陆半洗区长度年均值分布

部地区，西双版纳、丹东和黑龙江北部地区，此图与我国降水pH值等值线分布很相似。 ΔX_w 值为200的等值线大体上与目前酸雨区重叠。由图8预测，随着SO₂和NO_x排放强度的增加，酸雨区可能向云南、长江以北发展，东北东部和北部有可能出现酸雨。

4 我国酸雨发展趋势

4.1 酸雨前体物排放量预测

我国酸雨的发生与发展与中国能源消费增长密切相关，据各方面预测今后相当长时间内煤仍是我国的主要能源。在过去10年里能源总消费中煤占75%以上。据韩国纲的预测^[18]，到2020年能源消费总量将达到25.4亿t标准煤，其中煤炭为18.1亿t，占72%。我国能源消费总量及煤炭消费量列于表5。

表 4 中国能源消费总量和煤炭消费量预测
(单位: 亿t标准煤)

年 份	能源消费 总 量	增 长 率 (%)	煤炭消费	增 长 率 (%)
2000	14.9	4.0	10.7	3.3
2010	20.0	3.0	14.2	2.9
2020	25.4	2.4	18.1	2.4

全国环境保护投资从1991年到2020年，30年间累计约占同期国民总产值累计的2.19%，其中大气占0.59%，根据2020年用于大气环境保护的投资额，煤炭消费量的增长量和控制SO₂排放的水平，SO₂的产生量和排放量列于表5。

由表5可知，我国SO₂排放量到2020年前，将继续增长。2020年比1990年增长80%。应当指出，由于NO_x更难控制其排放量增长速度将会更大，到2020年，可能超过2000万t，SO₂和NO_x的年排放量要超过5000万t。

4.2 典型地区降水酸性发展趋势

为了分析随着酸雨前体物的排放量持续

表 5 中国SO₂的产生量和排放量预测
(单位: 万t)

年 份	产生量	排放量	去 除 率 (%)
2000	2675	2098	15
2010	3550	2767	25
2020	4525	3178	30

长期增长可能使降水进一步酸化程度，有必要回顾代表性地区降水酸度的历史变化。图9为全国5个地区的城市降水酸性逐年变化曲线^[18]。由图9可知，这些城市降水的pH值都大幅度下降，其中武都降水pH值降低了1.5个pH单位。

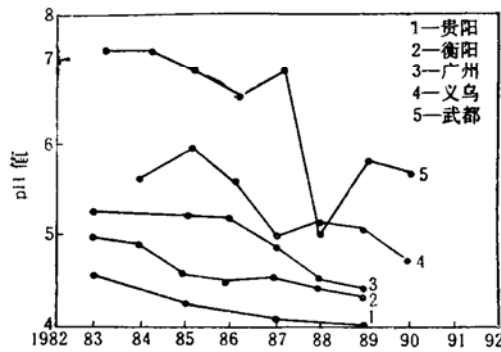


图 9 典型地区降水pH值历史变化趋势

由过去10年酸雨的发展和到2020年酸雨前体物排放量预测，可以预见我国酸雨面积将继续扩大，酸雨区将向西向北蔓延，降水酸性将继续升高。长江以南将出现更多的降水pH值小于4的严重酸雨区。生态环境和物质材料将会遭到更严重的破坏。

综合本文以上各节所述，可知我国酸雨区的形成是由酸雨前体物源强、大气颗粒物、土壤、大气输送能力、气温、降水、太阳辐射等各种因素综合作用的结果。长江以南，酸雨前体物有一定源强、颗粒物缓冲能力小，土壤呈酸性、大气输送能力较小、湿度大、温度大、太阳辐射强度大等都有利于酸雨的形成。北方则相反，除源外，诸多因

素不利于降水酸化。但亦应注意到,某些地区虽不同时具备所有的有利条件,但若具有一些重要条件时,也可能出现酸性降水,例如云南东南部、东北东部和北部、山东半岛东部等地区,在有利季节也可能出现酸雨。

5 结论

5.1 区域性酸雨的形成是诸多自然和人为因素综合作用的结果。我国长江以南大气颗粒物酸化缓冲能力小,土壤呈酸性、大气半洗出区短、湿度大、气温高、太阳辐射强度大,并有一定的前体物排放强度,这些因素都有助于降水酸化,所以该地区出现了区域性严重酸雨。

5.2 北方虽然酸雨前体物排放强度很大,但上述其他因素均不利于酸雨的形成,所以北方尚未出现区域性酸雨。但若排放强度仍高速增长,夏季北方地区也可能出现酸性降水。

5.3 根据酸雨前体物排放量预测,预示到2020年我国酸雨仍得不到控制,现有的酸雨区将继续扩大,降水酸性继续升高。

5.4 随着酸雨前体物排放强度高速增长,一些地区,如云南东南部、东北东部和北部、山东东部等地也可能出现酸雨。

总的情况是控制我国酸雨危害将是一项长期艰巨的任务。

参考文献

- 1 大喜多敏一. 公害と対策(日), 1991, 27(6): 637~650
- 2 Hara H., Proc. The Expert Meeting on Acid Precipitation Monitoring Network in East Asia, Toyama, Japan Oct, 26~28, 1993, 209~228
- 3 Chung Y S, Kim T K. J. Korea Air Poll. Res. Asso, 7(3): 203~207
- 4 沈济等. 云下降雨洗脱痕量气体时硫(IV)液相氧化过程. 环境科学学报, 1989, 9(1): 11~19
- 5 黄美元等. 雨水和云水化学组成的测定. 大气科学, 12(4): 389~395
- 6 俞绍才等. 中国酸雨发展趋势及控制对策文集. 北京: 中国科学技术出版社, 1992. 54~56
- 7 张宁等. 同文献6. 229~234
- 8 王文兴等. 影响我国降水酸性因素的研究. 中国环境科学, 1993, 13(6): 1~7
- 9 Cheng Z, Proc. 同文献2. 1993, 187~195
- 10 Kato N, Akimoto H. Atmospheric Environment, 1992, VO126A, 2997~3017
- 11 国家环保局编. 中国环境监测20年. 北京: 中国环境科学出版社, 1993
- 12 Zhao Dainwu, et al. Acidification in Southwestern China. Acidification in tropical countries. John Wiley and Sons, New York, 317~346.
- 13 汪安璞等. 中国环境科学年鉴. 北京: 中国环境科学出版社, 1989, 164~167
- 14 王伟等. 中日大气污染防治研讨会论文集. 中国, 重庆, 1992, 29~99
- 15 郑春江主编. 中华人民共和国土壤环境背景值图集. 北京: 中国环境科学出版社, 1994
- 16 中国环境科学研究院编. 环境科学论文集. 北京: 中国环境科学出版社, 1990, 21~37
- 17 徐大海等. 我国大陆通风量及雨洗能力分布的研究. 中国环境科学, 1989, 9(5): 373
- 18 韩国钢等. 中国2020年环境保护战略目标预测. 北京: 中国环境科学出版社, 1993

STUDY ON THE ORIGIN OF ACID RAIN FORMATION IN CHINA

Wang Wenxing

(Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012)

Abstract The origin of acid rain formation and its geographical distribution in China were explained based on the buffering ability of atmospheric particles, contents of alkali and alkaline earth metals in soil, soil pH value, precursor emission. Results show that acid rain will probably appears in some sensitive areas, such as southeastern part of Yunnan, east and north parts of Northeastern China, and east of Shangdong Peninsula. According to the prediction of precursor emissions in the future, the acid rain may be expanded before the year 2020.

Key words: TSP; Soil pH; Emission intensity; Rainout; Trend.