

我国东部沿海地区酸雨来源研究*

王文兴 刘红杰 张婉华

(中国环境科学研究院, 北京 100012)

丁国安

(中国气象科学研究院, 北京 100085)

文 摘 1992~1995年间在我国东部沿海地区进行了降水和气象观测, 分析了降水的酸度和化学组成与降水采样时的来流方向的关系, 计算了丹东凤凰山和泗礁岛采样时的后推气流轨迹。发现我国东部沿海地区出现酸性很强的酸雨, 推断酸雨来自周边国家和地区。由于当地地理位置和气象条件的差异, 不同的时间和不同空间里影响的程度也不同。北方沿海的图们和丹东凤凰山的酸雨主要来自朝鲜半岛和日本。东南沿海地区则较为复杂, 冬春季可能受到日本和朝鲜半岛的影响。

关键词 降水酸性, 离子组成, 后推气流轨迹。

随着亚洲经济的高速发展, 化石燃料消费逐年升高, SO_2 和 NO_x 的排放量现在已经超过北美和欧洲, 在五大洲中居第一位⁽¹⁾, 其结果导致大气环境酸化, 许多国家出现了酸雨, 比较严重的区域性酸雨区在东北亚, 其中大部分在中国。由于我国酸雨前体物排放量大, 又处于西风带的上风向; 东部邻国一些科学工作者纷纷研究中国酸性排放物可能对该国产生的影响, 并得出中国酸性排放物影响东部邻国的结论⁽²⁾。对此我国近几年才开始研究有关跨国输送的问题。然而大气流场是非均一的, 我国东部邻国可能对我国的影响, 但却未见有论文发表。作者在“八五”期间, 根据酸雨的成因^(3,4), 在我国东部沿海地区进行了酸雨观测, 并利用气象资料统计和分析了中国东部沿海地区酸雨的来源。

1 研究方法

在我国东部沿海地区布点观测降水和气象要素, 统计降水酸性与风向的关系; 分析降水化学组成及其特征; 计算气流轨迹, 分析降水酸性与来流方向的关系, 最后判断酸雨的来源。

1.1 测点设计

根据研究目的, 测站设在东部沿海地区, 由北向南有图们、丹东凤凰山、东海泗礁岛、青岛、上海宝山、福州、厦门和汕头。测站站位见图1。

测站中图们、凤凰山和泗礁岛作为降水个例分析测站, 其它测站则为长期降水酸度与气象要素观测站。



图1 沿海地区降水观测站

1.2 监测与分析方法

按照国家标准⁽⁵⁾进行降水采样与分析, 降水pH和电导率在现场收集水样后立即测定。化学组分分析则在实验室进行。

降水化学组分分析结果的可靠性用降水阴离子浓度总和与阳离子浓度总和之比R来检验。若R与1相差20%以内则认为有效, 否则重做分析。

pH平均值均以 H^+ 浓度降水体积加权表示。降水离子浓度平均值亦系离子浓度降水体积加权。

收稿日期: 1997-04-08

* 国家“八五”科技攻关课题

1.3 后推气流轨迹计算

在个例降水观测研究中,对每场降水进行后推气流轨迹分析,后推气流轨迹计算中采用地面和 1500m 高度两层气象数据。计算中采用矢量内插法和权重差值法。对缺少气象数据的点,用最近气象站的数据,以权重差值法进行补充,权重差值法是以两地距离 决定其贡献大小。计算公式如下:

$$U_A = \frac{\sum_{i=1}^n U_i / r_i^2}{\sum_{i=1}^n 1 / r_i^2}$$

式中: U_A 为未知点A 的气象要素; r_i 为第*i* 未知点与 A 点的距离; U_i 为第*i* 点的气象要素。

2 观测结果与讨论

2.1 降水的酸度与风向的关系

表1列出了汕头、厦门、福州、宝山、青岛

表 1 不同风向扇形区内降水量加权 pH 月、年平均值(1994)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	年平均
汕头 NE-ESE		4.68	4.79	5.11	4.76	6.10	5.51	4.76	4.74			5.14	4.95
其它		6.48	6.06	5.07	6.32	6.07	6.12	5.99	5.82			6.29	5.83
厦门 NNE-SE	4.18	4.41	5.55	5.17	5.87	5.83	4.92	5.56	5.66			4.90	4.90
其它	5.63	4.40	6.09	6.50	6.36	6.57	6.00	5.02				5.39	5.39
福州 ENE-SSE	4.40	4.63	4.62	4.20	4.90	4.85	6.25	4.90	4.75			5.07	4.80
其它	4.75	4.98	5.12	4.08	5.40	5.17	5.52	5.87	4.7	6.14		5.71	4.86
青岛 ENE-SE			5.56	4.75		6.01	5.00	4.95	4.10				4.78
其它		7.25	7.30	7.50	6.95	5.71				6.09	4.75	5.51	5.56
宝山 NE-E	6.21	5.03		6.05	7.16	6.49		5.34	8.07	6.77	6.32	6.18	5.71
其它	5.70	5.97	4.46	4.43	6.54	7.28	5.88	6.84	7.94	6.90	5.61	6.35	5.14

1994 年不同地面来流方向下降水的平均 pH 值。

2.1.1 除宝山外,其余 4 个测点全年的绝大部分月份来自海上;且上述国家和地区扇形区内降水 pH 值均小于来自其它方向的降水 pH 值。对于汕头而言,9 个对照月份有 7 个来自 NE-ESE 方向的降水 pH 值小于其它方位的降水 pH 值约一个 pH 值单位。对厦门 8 个月份中有 6 个月份来自 NNE-SE 方向的降水 pH 值小于其它方位的降水 pH 值,1 个月份两个方位比较接近。福州 10 个月份中有 8 个月来自 ESE-SSE 方位的降水 pH 值小于其它方位。青岛 3 个月份来自 ENE-E 方位的降水 pH 值都小于其它方位。而宝山 10 个月份仅有 5 个月份来自 NE-E 风向的降水 pH 值小于来自其他方位的 pH,这是因为宝山测站相对不在海边的缘故,来自该方向的降水仍受大陆的影响所致。

2.1.2 各测点不同月份不同风向降水的 pH 值有明显的差异。汕头 7 个月份风向 NE-ESE,扇形区降水 pH 值小的月份中有 6 个月份相比其它方位降水 pH 值要小 1 个以上 pH 单位。厦门不同风向差异在 1 个 pH 值单位有 3 个月份,这

些差异可能和月 分气象有某种连系。

2.1.3 各测点年平均 pH 值除福州相差不大外,对汕头、厦门、青岛而言,受影响扇形区降水 pH 值小于不受影响扇形区的 pH 值约为 0.5pH 单位。

2.1.4 以上统计的是每场降水的资料,可以看出除宝山外,其余测站,全年大多数月份及全年雨量加权平均,来自日本、韩国及台湾地区方向的降水 pH 值明显地小于来自其它方位。虽然对海洋气溶胶未加分析,统计的年份有限,站点也有限,但仅就此而言,即可以认为来自日本、韩国、我国台湾地区的酸性物对我国大陆降水酸度有十分重要的影响;仅就这几个测点而言,可说明该站位酸雨主要由上述国家和地区造成的。

根据东海泗礁岛和丹东凤凰山的降水观测和气流轨迹,以及沿海其它站位降水观测分析,有证据表明我国东部及东北部沿海的降水酸度受日本和韩国的影响。

我国东南沿海地区,例如江苏、浙江一带,冬季和春季受到东北方向日本、韩国的影响,夏季我国丹东一带,则受到东南来自日本和韩国气流

的影响。

2.2 降水化学特征分析

各地降水化学组成各不相同, 现将吉林省图们、辽宁省凤凰山和浙江省东海泗礁岛三处的降水观测结果与日本、韩国和中国全国降水观测结果进行分析比较, 所有数据列于表 2。

表 2 东部沿海地区降水化学组成特征分析(μeq/L)

地区	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	NH ₄ ⁺	H ⁺	SO ₄ ²⁻ / NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺ / Ca ²⁺	Na ⁺ / Cl ⁻
图们	81.90	22.20	12.50	8.60	31.40	17.90	27.50	49.90	13.20	3.69	1.81	1.81
凤凰山	142.13	43.20	31.60	26.17	53.02	29.13	43.58	58.13	19.61	3.23	1.30	1.71
泗礁岛	159.65	52.06	48.18	13.67	60.12	19.63	38.12	38.12	97.37	3.10	1.00	1.25
日本	44.40	14.10	63.50	16.30	49.10	3.10	16.00	18.30	17.30	3.10	1.14	0.77
韩国	226.63	70.96	49.65	15.68	71.01	12.28	21.93	338.05	27.50	3.19	15.41	1.52
中国全国	125.86	19.62	28.86	15.44	21.44	10.83	80.41	67.89	18.13	6.24	0.84	0.74

图们地区夏季盛行东南风, 东南方向隔海约 800km 与日本相望, 凤凰山夏季主导风向为南偏东风, 这个方向则为朝鲜半岛。因此这两处的数据均取自夏季的观测结果。东海泗礁岛 4 月经常出现东北风, 东北方向隔东海约 600km 为韩国和日本。表 2 所列泗礁岛的数据为 1994 年 4 月的观测结果。日本的数据为全国 3 年观测平均值⁽⁶⁾。韩国的数据取自 1991 年 1~ 7 月 Choongbook 省的观测平均值⁽⁷⁾。我国的数据则为 1993 年 8 省全年平均值。因此, 这些数据均有一定的时空代表性。

由表 2 明显看出, 图们、凤凰山和泗礁岛后 3 项降水化学特征值与我国全国平均值存在着明显差异。浓度特征接近日本和韩国降水的化学特征。其中降水 SO₄²⁻ / NO₃⁻ 值, 图们接近日、韩水平, 凤凰山和泗礁岛与日、韩一样。这种差异的形成是由于我国能源是煤, 而日、韩则油占很大的比例, 因此 SO₂ 和 NO_x 排放量之比不同。日、韩甚高于我国。关于 NH₄⁺ / Ca²⁺ 和 Na⁺ / Cl⁻ 值我国全国平均值是最低的。3 个观测点的数据更接日本和韩国。由此看来, 图们和凤凰山夏季降水酸性可能受到日本和韩国的影响, 而泗礁岛则春季可能受到日本和韩国的影响。

2.3 后推气流轨迹分析

后推气流轨迹分析选取辽宁省丹东凤凰山、浙江省东海中的泗礁岛和吉林省的图们观测资料进行计算和分析。

2.3.1 凤凰山后推气流轨迹

分析 1993 年和 1994 年两年夏季观测资料, 1993 年在凤凰山 400m 和 800m 观测的与气流轨迹分析有关的数据列于表 3。

表 3 1993 年丹东凤凰山降水的化学组成(μeq/L)

高度 (m)	日期	雨量 (mm)	风向	pH	Na ⁺	K ⁺	NH ₄ ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
400	08-22	3	S	4.44	78.26	53.71	235.56	188.62	34.64	10.00	98.21	98.71	318.75
	08-23	20	S	4.32	45.65	30.69	111.11	42.07	20.57	-	36.10	30.32	125.00
	08-24	50	S	5.05	28.26	7.67	53.89	35.91	17.44	-	18.73	24.18	84.39
	08-29	10	N	5.81	34.78	38.06	72.78	62.87	23.12	-	17.21	72.57	131.25
800	08-22	3	S	4.87	60.87	38.36	235.56	190.06	46.41	7.89	65.16	126.97	316.67
	08-23	50	S	4.57	60.87	38.36	145.56	104.79	23.21	-	63.18	46.45	181.25
	08-29	10	N	6.00	65.22	30.69	141.67	95.75	46.08	3.21	53.59	96.78	212.50

对于 8 月 22、23 和 29 日 3 次降水过程自采样时间后推 3 日, 求出来流轨迹。3 次降水过程的来流轨迹计算结果分别绘于图 2、图 3 及图 4。对应 3 月 22 日 17:30~ 18:00 的降水样品, 是一场短时间的暴雨, 30min 完成。其地面和 1500m 气流轨迹均来自朝鲜半岛西岸。两个高度降水

pH 分别为 4.44 和 4.87。对应 8 月 23 日 7:30 ~ 23:00 的降水样品其地面气流轨迹与第一场雨相同,只是 1500m 处为南偏西风。两个高度降水 pH 分别为 4.32 和 4.57。8 月 29 日 16:00 ~ 16:30 下了一场暴雨,仅持续了半小时。其气流轨迹与前两场雨完全不同,地面和 1500m 气流均来自北方(图 4),且风速较大,这时两个高度降水 pH 分别为 5.81 和 6.00。说明来自北方

的气流未带来酸性降水。
1994 年 7~ 8 月在凤凰山 800m 测站进行了第二次降水观测,以验证 1993 年的观测结果。这次观测中共取得 5 场水样,分析结果列于表 4。在观测期间,800m 测站处风向全部为南风 and 东南风,5 场降水酸性都很强,加权平均 pH 值为 4.54,再次证明凤凰山地区出现了很强的酸雨,而且这些强酸性降水均与朝鲜半岛来流有关。

表 4 1994 年凤凰山降水化学组成(800m μ eq/L)

序号	日期	降水 mm	pH	H ⁺	Na ⁺	K ⁺	NH ₄ ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
1	07-25	20	4.77	16.98	82.74	20.97	68.89	41.17	10.70	8.58	21.13	45.16	142.50
2	07-30	40	4.43	37.15	49.57	20.97	58.33	37.23	7.16	11.63	21.13	39.48	106.88
3	08-02	20	4.55	28.00	104.00	57.60	104.00	87.80	43.80	12.00	74.70	46.90	206.00
4	08-03	70	4.62	24.08	73.00	47.70	73.00	44.60	22.90	11.30	43.20	30.30	134.00
5	08-04	10	4.54	27.60	31.10	14.70	31.10	34.50	11.70	8.72	10.50	26.50	69.00
平均			4.54	28.86	65.63	31.80	85.30	57.00	17.22	11.20	31.60	38.75	107.00

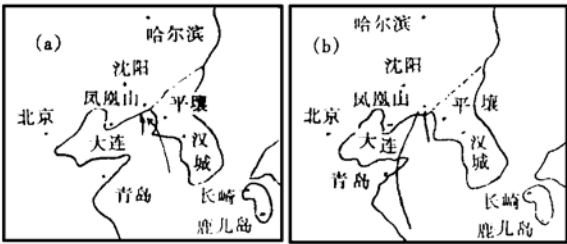


图 2 丹东凤凰山后推气流轨迹

a. 1993-08-22 18:00 后推 3 日 b. 1993-08-23 16:30 后推 3 日

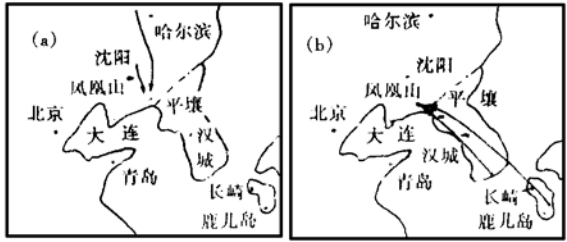


图 3 丹东凤凰山后推气流轨迹

a. 1993-08-29 16:30 后推 3 日 b. 1994-07-30 8:00 后推 3 日

进一步分析 5 场降水中酸性最强的 7 月 30 日降水。这场降水量较大(为 40mm),降水 pH 值为 4.43,后推气流轨迹如图 5 所示。此时地面和 1500m 高空风向均为东南风。值得注意的是,1500m 气流轨迹经日本工业区、鹿儿岛和长

崎,进入韩国工业城市釜山、汉城和朝鲜的平壤,直至凤凰山。这股气流到达凤凰山时对应的降水样品为 2 号样,2 号水样的 pH 值为 4.43。这是本次观测中得到的最低值。此最低降水 pH 值的形成可以这股气流流经一系列强大的酸雨前体物排放源来解释。

由以上两年夏季的观测结果可以得到下列看法,即丹东凤凰山地区夏季降水的酸性主要来自日本和朝鲜半岛。

2.3.2 东海泗礁岛气流轨迹分析

泗礁岛属舟山市嵊泗县。该县以泗礁岛、嵎山岛和洋山岛为主组成。其中泗礁岛最大,但其面积也只有 21.2km²。降水观测站设在位于该岛北部的县监测站 4 楼上(120°E×30°N)。向北可见大海。泗礁岛的东北方向约 600km 远处是韩国和日本。西北至上海约 70km。年降水量 973.2mm,降水期集中在春、夏两季。风速较大,年平均风速为 7.2m/s,8 级以上大风年均为 145 天,冬春季多北风,夏秋季多南风。该县总共有大小锅炉 16 台,工业窑炉 10 个,年耗煤 3500t。全县机动车 298 辆,年耗油量 300t。年排放 SO₂ 84 t。由于风速较大,气体污染物很难在该地上空停留。

4. 60, 以后的几场降水 pH 值都小 5.0, 地面风向为东南风。气流来自日本, 气流轨迹指向大坂工业区。这说明图们地区夏季酸雨受到日本的影响。此外, 由图 7 还可以看到, 我国辽东半岛和山东半岛同时也受到日本和朝鲜半岛影响。

3 结论

3.1 根据降水的酸度、化学组成与气象条件的分析, 讨论了我国沿海地区酸雨的来源, 发现我国东部沿海地区出现了较强的酸性降水, 推断酸雨来自周边国家和地区, 各地区由于地理位置和气象条件的差异, 各个方向来流在不同的时间和空间里影响的程度不同。

3.2 我国北部沿海地区, 图们至丹东一带, 由于酸雨和降水都集中在夏季, 而夏季又盛行东南风, 因此北部沿海地区酸雨主要来自朝鲜半岛和日本。

3.3 东部和东南部沿海的酸雨来源比较复杂, 冬春季既受到东部大陆的影响, 也受到日本和韩

国的影响。

参考文献

- 1 Rodhe H et al. Water, Air and Soil Pollution, 1995, 85: 1~ 14
- 2 直江宽明等. 富士山顶の降水化学成分(3) 流迹解析. 日本第 34 回大气污染学会讲演要旨集, 日本千业: 1993. 214
- 3 王文兴等. 中国环境科学, 1993, 13(6): 401~ 406
- 4 王文兴. 中国环境科学, 1996, 16(3): 161~ 167
- 5 中华人民共和国国家标准, GB13580. 1~ 13, 580. 13~ 92
- 6 Ki-Hyung Song et al. J. KAPPA, 1992, 8(1): 38
- 7 Hara H et al. Water, Air & Soil Pollution, 1995, 85: 2307~ 2312

作者简介

王文兴 男, 1924 年 11 月生。研究员, 现任中国环境科学研究院科学顾问。早年从事工业催化研究, 近 20 年来转为环境科学研究。对大气环境科学, 如大气光化学污染、煤烟型大气污染和酸沉降化学的研究有较深的造诣, 发表有关论文 100 多篇, 译著 10 本, 获得奖 18 项, 其中国家级奖 4 项。亚洲大气污染研究协会发起人之一, 国际大气科学及其应用会议组委, 国际全球和区域大气环境化学会议两主席之一, 美国《Environment Research》杂志副主编。

The origins of acid rain in the eastern coastal areas in China

Wang Wenxing¹, Liu Hongjie¹, Zhang Wanhua¹ and Ding Guoan²

1. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012

2. Chinese Research Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100085

Abstract—The acid precipitation and meteorology in eastern areas were measured from 1992 to 1995. The relationship between rain acidity and chemical compositions and wind directions during sampling were analysed using wind direction and wind back trajectory. Results show that the severe acid rain in eastern coastal areas was found, and the acid rain probably comes from countries and areas around it. The influence on precipitation acidity in different time and space is not alike due to geographical and meteorological conditions. In general, the acid rain in Tumen and Dandong mainly comes from Korea Peninsula and Japan, whereas in south-eastern coastal areas the situation is more complex. The acid rain might come partly from Japan and Korea in winter and spring.

Key words: rain acidity, ion composition, back trajectory.