

重庆地区近 10 年酸雨时空分布 和季节变化特征分析

巴 金 汤 洁 王淑凤 徐晓斌

(中国气象科学研究院 中国气象局大气成分观测与服务中心
中国气象局大气化学重点开放实验室,北京 100081)

提 要: 利用 2005 年重庆各区县 31 个观测站降水的 pH 值资料分析了当年整个地区的降水酸度的空间分布和季节变化特征,并选取中国气象局酸雨观测网中沙坪坝、涪陵、万县、奉节和巴东 5 个观测站点 1997 年至 2006 年的酸雨观测数据,对重庆地区近 10 年来酸雨的时空分布特征和季节变化情况进行了统计分析。研究结果表明:重庆地区降水酸性和电导率的地区间差异较大,降水酸性的季节变化较明显,冷季(秋、冬)较暖季(春、夏)要强。西南部降水酸性较强,受污染程度也较严重,但没有明显的变化趋势;东北部大多为弱酸性降水,且受污染程度也较轻,但是日趋酸化和污染加重的趋势却较明显,且季节变化尤为明显,其中夏秋两季 pH 值的明显减小是其近 10 年来酸化加重的主要原因。涪陵的数据明显不同,酸性降水频率较低,pH 值偏高的同时电导率也偏高,2001 年前后情况尤为明显,可能受局地因素的影响比较大。

关键词: 酸雨 pH 值 电导率

Analysis of Spatio-temporal Distribution and Seasonality of Acid Rain in Chongqing from 1997 to 2006

Ba Jin Tang Jie Wang Shufeng Xu Xiaobin

(Key Laboratory for Atmospheric Chemistry, Center for Atmosphere Watch and Services,
Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

Abstract: With the data set obtained at 31 meteorological stations in 2005, spatial distribution and seasonality of precipitation acidity over Chongqing area were analyzed. Meanwhile, based on the statistics of long-term data set of 5 acid rain monitoring stations among the above meteorological stations (Shapingba, Fuling, Wanxian, Fengjie and Badong), the spa

资助项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2005CB422202)和中国气象局大气成分观测与服务中心成果转化项目《中国区域酸雨形势分析及评估》共同资助。

收稿日期: 2007 年 11 月 14 日; 修定稿日期: 2008 年 5 月 26 日

tio—temporal distribution and seasonality of acid rain in recent 10 years (from 1997 to 2006) were discussed. The results indicate a large discrepancy of acidity and conductivity of precipitation over Chongqing area. The seasonality of precipitation acidity is obvious in Chongqing area as a whole. pH value of precipitation in spring and summer higher than in autumn and winter. The acidity of precipitation in the southwest part of Chongqing is stronger than other parts, and the conductivity also higher. However, there was no significant trend in the acidity and conductivity of precipitation during last 10 years in the southwest part. The precipitation acidity aggravated and conductivity increased significantly in northeast part of Chongqing in recent 10 years, although pH value and conductivity data sets showed the precipitation in this part less polluted. The seasonality of acidity and conductivity of precipitation in the northeast part of Chongqing is more pronounced. The trend of the precipitation acidity in the northeast part of Chongqing is mainly caused by the decrease of pH value in summer and autumn. The pH value and conductivity of precipitation at Fuling are much higher than the surrounding areas, suggesting the importance of local influences.

Key Words: acid rain pH value conductivity

引 言

人类活动排放的二氧化硫和氮氧化物等酸性气体,进入大气后经过各种物理化学过程,使雨、雾、雪和雹等酸化,导致酸性湿沉降(简称酸雨)。从 1980 年代以来,我国的酸雨污染呈加速上升趋势,成为继欧洲和北美之后的世界第三大酸雨区^[1]。“六五”期间我国进行了第一次调查,结果发现我国酸雨区主要位于长江以南,西南部以大城市为中心的区域,酸雨问题已变得相当严重。在“八五”期间的有关研究又进一步表明,1982 至 1992 年的十年间我国酸雨的面积已大幅度地扩展^[2]。重庆是西南地区的工业重镇,酸雨问题十分突出,因而也是我国开展酸雨调查和研究的重点地区之一^[3]。

已有学者通过数值模拟^[4],降水化学分析^[5],还有配合气象要素、高空风场、天气形势及雷达云团移动跟踪观察^[6]等方法对重庆地区的酸雨进行了一些观测和研究,这些工作主要是 20 世纪 80 年代和 90 年代开展的。

这些工作指出,重庆地区风速极低,相对湿度大,污染物难向外扩散,酸雨的来源主要是自身污染造成的^[1],且雨水的云中酸化为主要过程^[6]。有研究结果表明,1981 至 1991 十年间重庆的空气质量没有随城市的发展而恶化,然而酸雨影响的区域却在扩大^[7]。同时空气中二氧化硫浓度季节变化比较有规律,雨水酸度和主要致酸离子浓度的季节变化与其相似,都在冷季(秋、冬)升高,暖季(春、夏)降低^[7]。

1998 年 1 月,我国将部分地区划分为酸雨控制区和二氧化硫污染控制区,即“两控区”,并开始进行污染治理,以减少二氧化硫的排放和控制酸雨的污染。在治理的同时不可避免会出现一些新的情况和问题,对这些新问题的认识可以使我们对酸雨及其影响有一个更加深入的了解,从而为下一步的控制对策提供一些依据。故本文选取了最近 10 年的资料,对重庆地区自划分“两控区”以来酸雨的时空分布和变化特征进行了分析,并与 1980 年代的酸雨形势进行了比较。

1 数据资料

本文的数据资料有两个来源。其一是重庆市气象局在分布于全市31个县级气象站基础上开展的酸雨业务观测,该项观测业务开始于2005年,遵循中国气象局发布的《酸雨观测业务规范》^[8]的技术要求,按降水事件进行采样,使用pH-3C型pH计测量降水的pH值。该pH计属电位法工作原理,使用复合玻璃电极作为传感器,可自动进行温度补偿,其主要技术指标符合国家标准GB/T11165—1989中有关pH计的规定和要求。降水样品的采集按照采样桶的准备、取用、安放、采样和取回等步骤进行,每次测量之前都用标准缓冲溶液校准pH计。

本文的数据资料的另一个来源是中国气象局酸雨观测网中沙坪坝、涪陵、万县、奉节和巴东5个观测站点(详见图1)1997年至2006年的酸雨观测数据。沙坪坝站位于重庆地区西南部的重庆市区,涪陵和万县位于重庆地区的中部,而奉节则位于东北部。巴东虽然地处湖北,但其位于重庆地区和湖北省的交界处,故也能反映重庆地区东北部的一些情况。这5个站的降水采样和pH值、电导率的测量均按照中国气象局的统一业务规范^[8]要求进行,pH值的测量仪器和观测方法同上。电导率使用DDS-307型电导率仪(2000年前使用DDS-11A型电导率仪)进行测量,其主要技术指标符合标准JB/T9366—1999中1.0级电导率仪的有关规定和要求。样品的采集方法同上。

2005年年底以前按降水事件进行采样,2006年年初开始改为日采样,即以每日08时(北京时)为酸雨观测降水采样日界,测量降水的pH值和电导率。虽然采样方式的变化对于降水频次有关的统计分析有一定影响,但本文的pH平均值是由氢离子浓

度——降水量加权方法计算,电导率平均值由降水量加权计算,因而对与此相关的统计分析并无影响。

为确保沙坪坝、涪陵、万县、奉节和巴东5个观测站点历史观测资料的准确性和一致性,对包括pH值、电导率、降水温度和降水量在内等观测记录进行了细致审核。主要将电子版数据与原始记录进行逐项核对,对漏错数据进行了补充录入和订正。此外还应用K-pH不等式对所有历史数据进行了检验^[9],审核的总体结果表明,这5个站的数据质量较好,K-pH不等式校验的通过率达到96%。

2 2005年重庆地区降水酸度分布情况和季节变化

2.1 降水酸度的空间分布

图1显示了2005年重庆各区县31个观测站年平均降水pH值的空间分布状况,可以看出,重庆地区降水酸性的地区间差异较大,主要可以分为4个不连续的区域,即西南部、涪陵及其邻近地区、中部和东南部、东北部。

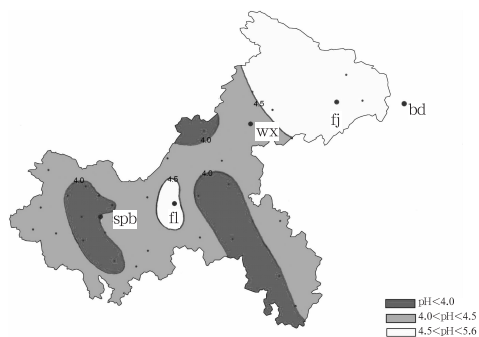


图1 2005年重庆地区pH值分布情况
(spb表示沙坪坝;fl表示涪陵;wx表示万县;
fj表示奉节;bd表示巴东;其他未标注点表示
2005年进行降水pH值测量的气象站)

西南部地处四川盆地内侧,可能由于盆地的大气结构较稳定,污染物难以向外扩散,故而降水酸化的程度较严重;涪陵及其周围地区的 pH 值明显高于西南和中部,可能存在局地影响;中部和东南部的 pH 值也较低,酸化程度也很严重;东北部可能由于地处四川盆地边缘,酸化程度较轻。

可见,重庆地区酸雨的局地性特征较明显,这与 1980 年代有关研究结果认为重庆酸雨的来源主要是自身污染造成的^[1]较一致。

2.2 季节变化

2005 年整个重庆地区 31 个观测站的降水 pH 值,春季平均为 4.6,夏季为 4.7,秋季为 4.3,冬季为 4.4,标准偏差分别为 0.91, 0.96, 0.93 和 1.05,可见降水酸性在秋季最强,夏季最弱。对 31 个观测站四个季节降水的 pH 值进行方差分析,利用 P 值检验法^[10]对其进行显著性水平为 0.05 的检验,由于其 P 值小于 0.05,故可以认为 2005 年整个地区 pH 值的季节变化较明显。

图 2 中给出了 2005 年各个季节不同程度酸性降水的频率。可以看到,每个季节发生强酸性降水($\text{pH} < 4.5$)的频率均大于弱酸性降水($4.5 \leq \text{pH} < 5.6$);强酸性降水在暖季(春、夏)出现频率较低,而在冷季(秋、冬)相

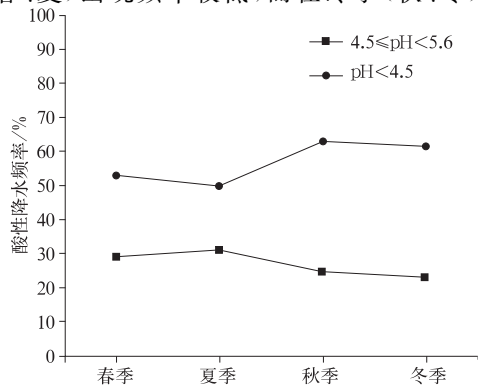


图 2 重庆地区 2005 年各个季节不同程度酸性降水的频率

对较高;而弱酸性降水频率则相反。因此可以说,秋季强酸性降水频率增加是导致其降水酸性最强的主要原因;而夏季虽然弱酸性降水频率不低,但强酸性降水频率最低,故总体看来其降水酸性最弱。此外,空气中二氧化硫和氮氧化物浓度一般在冷季(秋、冬)升高,暖季(春、夏)降低^[7],且春夏的降水量明显多于秋冬,可能是导致降水中氢离子浓度冷季明显高于暖季的原因。

3 重庆地区近 10 年酸雨形势演变特征

3.1 近 10 年降水 pH 值和电导率的变化趋势

图 3 显示了 5 个观测站 10 年的年均 pH 值和电导率。从图 3a 中可以看到,巴东的 pH 值近 10 年来有明显的下降趋势,同时奉节也有一定的减小趋势。从 1997 至 2006 年,重庆地区 pH 值的地区间差异较大。沙坪坝降水的酸性较强,年均 pH 值基本上都在 4.5 以下,而万县、奉节和巴东的降水基本上呈弱酸性。涪陵的 pH 值几乎都在 4.5 之上,明显不同于其他站,特别是 2001 年 pH 值将近 6.5,据了解当年站上及周围并没有大的工程项目,可能是受局地土壤、气象条件等方面的影响比较大。

从图 3b 中可以看到,奉节的电导率值近 10 年来有明显的增加趋势,同时巴东也有一定的增加趋势。从 1997 至 2006 年,重庆地区电导率的地区间差异较大。沙坪坝和涪陵的年均电导率值较高,涪陵在 2001 年前后电导率明显升高,可能受局地影响较大。奉节和巴东的年均电导率值则仅在 $20 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ 至 $50 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ 之间不等,污染程度较轻。

表 1 和表 2 分别给出了 5 个观测站近 10 年 pH 值和电导率的统计分析和检验结果,可以看到,沙坪坝 10 年来 pH 值平均值最小,其次为万县,奉节和巴东较大;奉节和

表 1 5 个站 10 年 pH 值的统计分析和检验结果

站名	平均值	标准偏差	线性回归方程 倾向值(年 ⁻¹)	P 值
沙坪坝	4.20	0.15	0.015	0.393
涪陵	5.02	0.62	-0.001	0.996
万县	4.44	0.12	-0.008	0.576
奉节	4.71	0.28	-0.040	0.217
巴东	4.67	0.29	-0.083	0.001

表 2 5 个站 10 年电导率的统计分析和检验结果

站名	平均值 ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	标准偏差 ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	线性回归方程 倾向值 ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ \cdot 年 ⁻¹)	P 值
沙坪坝	76.7	20.3	-3.741	0.093
涪陵	86.6	25.5	0.434	0.888
万县	55.2	10.8	0.686	0.595
奉节	32.4	9.0	2.183	0.016
巴东	30.0	6.8	1.132	0.139

巴东 pH 值的标准偏差较沙坪坝和万县要大。奉节和巴东的电导率平均值和标准偏差都较沙坪坝和万县要小,其中巴东最小,沙坪坝最大。涪陵 pH 值和电导率的平均值和标准偏差在 5 个观测站中都是最大,这与 2001 年前后其 pH 值和电导率的高值有关。可以看到,奉节和巴东 pH 值的线性回归方程中倾向值的绝对值较大;沙坪坝、奉节和巴东电导率的回归方程中倾向值的绝对值较大。利用 P 值检验法^[10]对线性回归方程进行显著性水平为 0.05 的检验,由于巴东的 pH 值和奉节的电导率的 P 值小于 0.05,故巴东的 pH 值在这 10 年中下降趋势很明显,而奉节的电导率增加趋势很明显,这与上述分析较一致。奉节的 pH 值和巴东的电导率值虽然

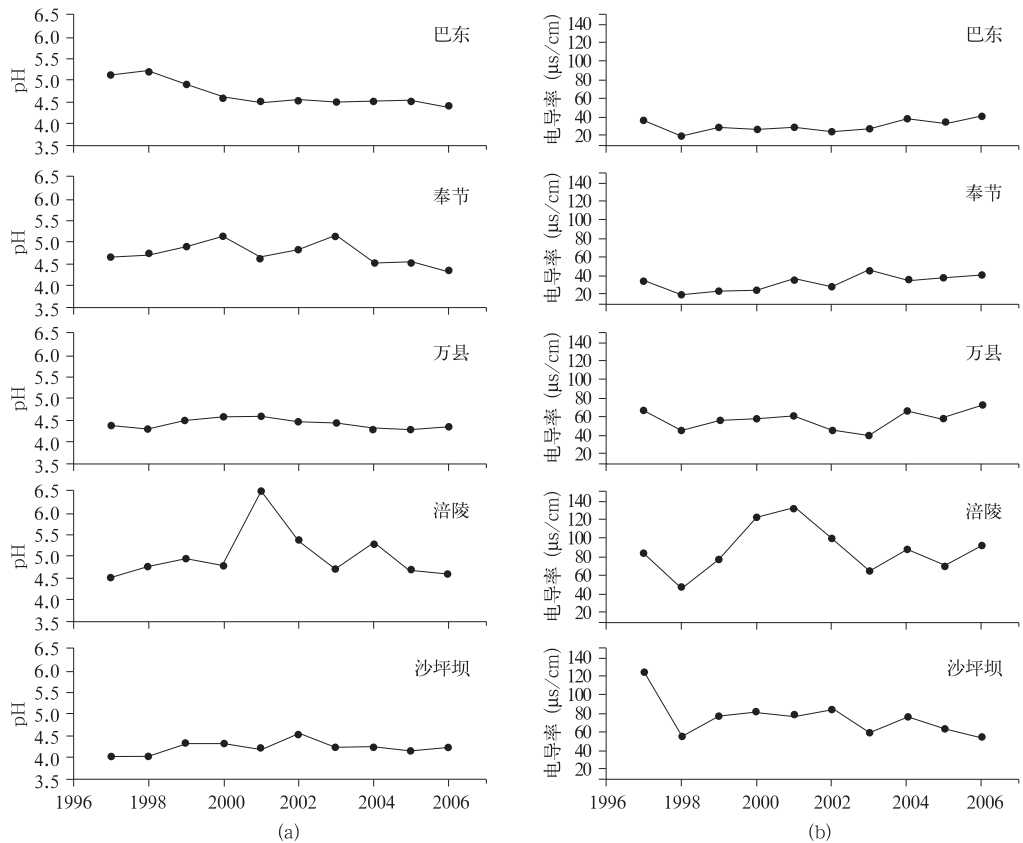


图 3 1997—2006 年 5 个酸雨观测站降水的年平均 pH 值(a)和电导率值(b)

没有通过检验,但图 3 中还是可以看到一定的趋势变化。

综上所述,从 1997 年到 2006 年,重庆地区 pH 值和电导率的地区间差异均较大。位于重庆地区西南部的沙坪坝,其降水呈现较强的酸性,受污染程度也较严重,但 10 年来没有明显的变化趋势。涪陵的大部分为弱酸性降水,但其电导率年均值却较高,可见其他离子成分较多,且波动较大,变化趋势也不明显,可能受局地的影响较大。对重庆地区的东北部来说,基本上为弱酸性降水,但日趋酸化的趋势较明显;其年均电导率数值虽然较小,但污染加重的趋势却不容忽视。可见,自国家划分“两控区”以来,虽然重庆西南部的酸雨形势变化不大,但东北部却日趋严重,故与 1980 年代的形势^[7]相比较,重庆地区降水酸化的范围仍在扩大。

3.2 不同季节的降水 pH 值和电导率的变化趋势

3.2.1 降水 pH 值和电导率多年平均的季节变化特征

对 5 个观测站四个季节降水的 pH 值和电导率进行方差分析,利用 P 值检验法^[10]对其进行显著性水平为 0.05 的检验,表 3 分别给出了 5 个观测站四个季节降水 pH 值和电导率的方差分析检验结果。可以看到,除沙坪坝以外,其他 4 个站 pH 值的 P 值均小于 0.05,故其 pH 值的季节变化较明显,同理 5 个测站电导率的季节变化均较显著。

表 3 5 个观测站四个季节降水 pH 值和电导率的方差分析检验结果

站名	沙坪坝	涪陵	万县	奉节	巴东
P 值 (pH 值)	0.650	0.040	<0.001	<0.001	<0.001
P 值 (电导率)	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

由上述方差分析结果,故只对涪陵、万县、奉节和巴东的降水酸性进行季节性的统

计和分析。图 4 分别显示了 4 个观测站各个季节总酸性降水 ($\text{pH} < 5.6$) 和强酸性降水 ($\text{pH} < 4.5$) 的频率。可以看到,涪陵的酸性降水的次数明显少于其他站;万县、奉节和巴东在夏季发生弱酸性降水 ($4.5 \leq \text{pH} < 5.6$) 的次数明显多于强酸性降水;奉节和巴东在秋、冬两季总酸性降水和强酸性降水的频率均明显高于春、夏两季,其中夏季降水酸性最弱。空气中二氧化硫和氮氧化物浓度一般在冷季(秋、冬)升高,暖季(春、夏)降低^[7],且春夏的降水量明显多于秋冬,可能是导致降水中氢离子浓度冷季高于暖季的原因。

总体来说,重庆地区降水酸性的季节变化较显著,冷季(秋、冬)较暖季(春、夏)要强,夏季最弱,与 2005 年重庆地区酸雨的季节变化特征一致。东北部 pH 值的季节变化尤为明显。

3.2.2 不同季节降水 pH 值和电导率的变化趋势

利用 Mann-Kendall 趋势检验法^[11]对 5 个站点不同季节 pH 值和电导率的变化趋势进行了检验。在显著性水平为 0.05 的条件下,当统计量大于 1.645 时则认为变化趋势显著,表 4 和表 5 分别列出了 5 个站 pH 值和电导率趋势的检验结果。

位于重庆东北部的奉节站夏季和秋季的 pH 值明显减小,同时,由图 4 可以看到,奉节的降水酸性在秋季最强,夏季最弱,因此,可以说近 10 年来奉节 pH 值的减小主要是由于酸性最强和最弱的两个季节 pH 值都明显减小。同时,巴东站四个季节的 pH 值均是减小的趋势,其中春、夏、秋季都很显著,这与其年均值通过趋势的显著性检验是一致的(见表 1)。涪陵四个季节的 pH 值都是减小的趋势,但只有春季显著。由表 5 可见,沙坪坝站四个季节的电导率均是减小的趋势,其中春、夏两季显著,万县夏季的电导率有显著的增加趋势,奉节秋季和巴东夏季电导率也有明显的增加趋势。

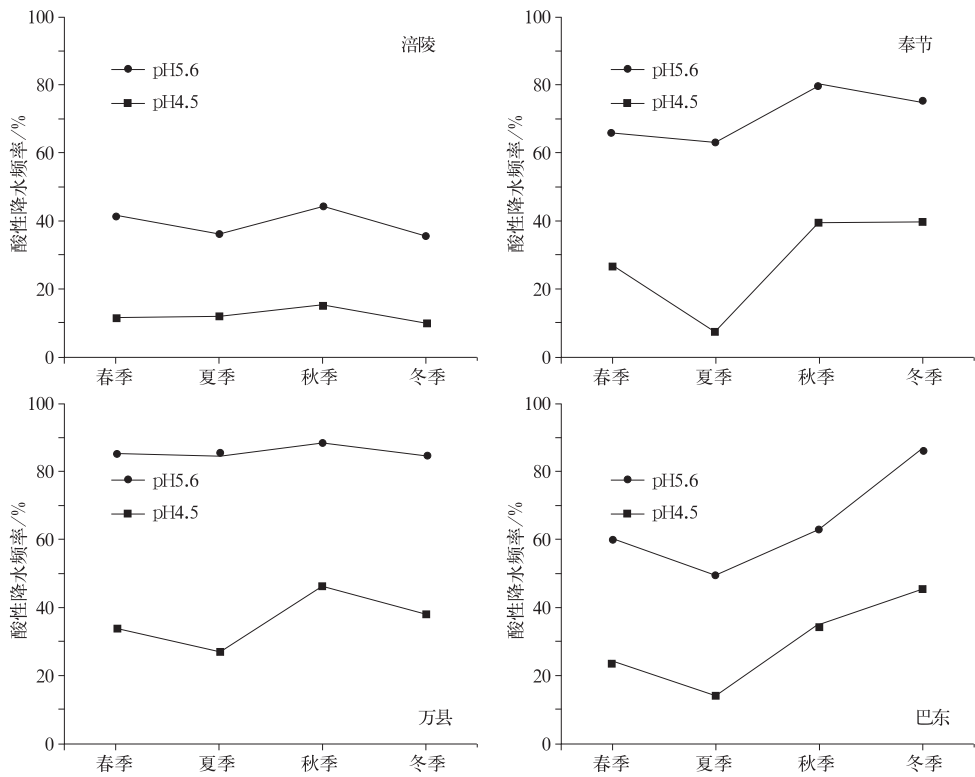


图 4 4 个酸雨观测站各个季节总酸性降水和强酸性降水的频率

表 4 不同季节 pH 值的 Mann-Kendall 趋势检验结果

站名	春	夏	秋	冬
沙坪坝	1.018	0.399	0.627	−0.378
涪陵	−1.813	−0.817	−1.274	−0.763
万县	−0.646	−0.025	−0.075	1.160
奉节	−0.272	−2.824	−2.274	1.130
巴东	−2.533	−2.789	−2.555	−1.007

表 5 不同季节电导率的 Mann-Kendall 趋势检验结果

站名	春	夏	秋	冬
沙坪坝	−2.233	−1.713	−1.517	−1.521
涪陵	−1.415	0.870	0.923	−0.326
万县	0.819	2.654	−0.248	0.174
奉节	1.023	0.760	3.318	1.076
巴东	−0.099	2.910	1.172	−0.601

因此,降水酸性最强的秋季和最弱的夏季 pH 值均明显减小是近 10 年来重庆地区东北部酸化加重的主要原因。

4 小结与讨论

(1) 2005 年的 31 个站的观测资料和近 10 年间 5 个酸雨观测站的资料均显示,重庆地区降水酸性的季节变化较明显,冷季(秋、冬)较暖季(春、夏)要强。可能是由于空气中二氧化硫和氮氧化物浓度在冷季升高,暖季降低,且春夏的降水量明显多于秋冬。

(2) 就整个重庆地区而言,降水酸性和电导率的地区间差异较大。重庆西南部由于位于四川盆地内侧,大气层结较稳定,受污染程度较严重,降水酸性较强,但近 10 年来没有明显的变化趋势。而东北部可能由于地处四川盆地外侧,受污染程度较轻,大多为弱酸性降水,但日趋酸化和污染加重的趋势却较

明显;同时季节变化尤为明显,其中降水酸性最强的秋季和最弱的夏季 pH 值均明显减小是其近 10 年来酸化加重的主要原因。

(3) 2005 年涪陵及其邻近地区的 pH 值与其他地区相比普遍偏高,而且近 10 年来一直如此,同时电导率也较高。在 2001 年前后 pH 值和电导率都明显升高,且当年站上及周围并没有大的工程项目,可能受局地因素的影响较大。

致谢:感谢重庆市气象局提供 2005 年的降水 pH 值观测资料,并感谢沙坪坝等观测站的同志们长期的观测劳动。

参考文献

- [1] 任仁. 中国酸雨的过去、现在和将来[J]. 北京工业大学学报, 1997, 23(3): 128-132.
- [2] 王文兴. 中国酸雨成因研究[J]. 中国环境科学, 1994, 14(5): 323-329.
- [3] 周百兴, 徐渝. 重庆的酸雨问题及其对策[J]. 重庆环境科学, 1996, 18(2): 1-4.
- [4] 雷孝恩, 贾新媛, 袁素珍, 等. 重庆酸雨分布的一个数值模拟[J]. 大气科学, 1985, 9(3): 276-284.
- [5] 张卫东, 张大元, 陈军, 等. 重庆地区降水污染分析[J]. 重庆环境科学, 2003, 25(8): 10-14.
- [6] 彭中贵, 陈军, 徐放. 重庆酸雨与 SO_2 传输之间关系分析[J]. 重庆环境科学, 1989, 11(4): 46-51.
- [7] 徐渝. 重庆的环境空气质量和酸雨十年回顾[J]. 重庆环境科学, 1994, 16(5): 31-35.
- [8] 中国气象局. 酸雨观测业务规范[J]. 北京: 气象出版社, 2005: 4-24.
- [9] 汤洁, 徐晓斌, 巴金, 等. 电导率加和性质及其在酸雨观测数据质量评估中的应用[J]. 应用气象学报, 2008, 19(4): 385-392.
- [10] 贾俊平. 统计学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 205-208.
- [11] United States Environmental Protection Agency. Data Quality Assessment: Statistical Methods for Practitioners. Washington, DC: Office of Environmental Information. 2006: 106-109.
- [12] 黄美元, 沈志来, 刘帅仁, 等. 中国西南典型地区酸雨形成过程研究[J]. 大气科学, 1995, 19(3): 359-366.
- [13] 冯宗炜, 小仓纪雄. 重庆酸雨对陆地生态系统的影响和控制对策[J]. 环境科学进展, 1998, 6(5): 1-8.