

# 长江三峡库区酸雨分布特征分析

杨贤为 邹旭恺 马天健

(国家气候中心,北京 100081)

## 提 要

利用长江三峡库区近期酸雨监测资料和气象资料,计算分析了库区酸雨强度及各等级酸雨频率的时空分布特征,通过与有关气象要素的对比分析,揭示影响库区酸雨强度的若干气象因子及其影响程度。

**关键词:** 三峡 酸雨 偏相关

## 引 言

酸雨是当代世界上面临的主要环境问题之一,它与云雾降水、大气污染程度密切相关<sup>[1]</sup>。酸雨严重危害农作物、森林和草场,降低土壤肥力,抑制河流、湖泊中的生物,侵蚀石质建筑物和金属制品,甚至威胁人们的身体健康。大量观测事实表明,我国酸雨问题日趋严重,酸雨面积超过国土面积的29%,成为仅次于欧洲和北美的世界第三大酸雨区<sup>[2]</sup>。长江三峡库区是我国酸雨频率较高、酸雨程度极为严重的区域之一。随着三峡大坝工程的进展和库区城市化进程的加快,三峡库区生态环境的现状及其变化引起有关部

门的高度重视。为了有效地监测库区酸雨的时空变化,自1997年开始,库区的酸雨监测站点从原来的2个增至6个,从而使库区成为我国酸雨测点较密集的地区之一。本文根据库区近期的酸雨监测资料及相应的气象资料,揭示库区酸雨强度、发生频率的时空分布特征及其与气象条件的关系。

## 1 库区酸雨测点和酸雨强度指标

三峡库区酸雨测站自西向东依次为重庆、涪陵、万州、奉节、巴东、宜昌。我们收集整理了这6站1996~2001年逐月降水的pH值(1996年仅重庆、宜昌有记录),并以12~2月、3~5月、6~8月、9~11月分别表示冬、

春、夏、秋四季。当降水的 pH 值小于 5.6 时,一般认为有酸雨出现<sup>[2]</sup>;调查和模拟试验表明<sup>[3]</sup>,pH 小于 4.5 的降水不仅可使林木受害,而且对金属材料的腐蚀速率也急剧增大;当 pH 值小于 4.0 时,酸雨的危害将极为严重。为此,本文以 pH 值 5.6、4.5、4.0 分别表示酸雨、较强酸雨、强酸雨的临界指标。

## 2 库区酸雨强度及频率的时空分布特征

### 2.1 库区年 pH 值的地理差异

库区重庆等 6 站年 pH 值的多年平均如图 1 所示,从图中可见,库区两端重庆、宜昌酸雨最为严重,其年 pH 值分别为 4.19 和 4.26,均小于 4.5;位于库区西部的涪陵酸雨最轻,其年 pH 值为 5.51,接近临界值 5.6;位于库区中部及东部的万州、奉节、巴东酸雨较重,其年 pH 值分别为 4.63、4.97、5.06。上述 6 站的年 pH 值都达到酸雨标准,这说明整个库区都不同程度地遭受酸雨危害。

### 2.2 库区区域及各站 pH 值的月际变化

库区区域平均 pH 值的逐月变化(图 2)显示,库区区域 pH 值年平均为 4.77,其中 10 月、3 月、12 月为年内酸雨最重的月份,其

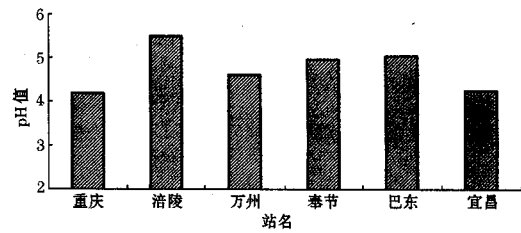


图 1 库区 6 站年降水 pH 平均值分布

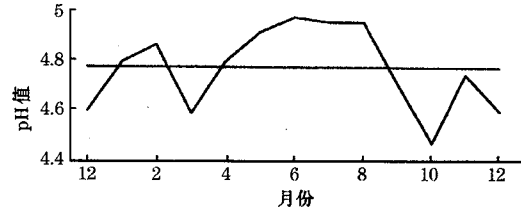


图 2 库区区域平均逐月 pH 值变化

pH 值维持在 4.5 左右;1 月、4 月、9 月、11 月是酸雨较重的月份,其 pH 值为 4.70~4.79 之间,与区域年平均值相仿;2 月酸雨较轻,其 pH 值为 4.86;5~8 月是一年中酸雨最轻的时段,pH 值为 4.91~4.97。

表 1 库区 6 站逐月 pH 值

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
重庆	4.41	4.52	4.15	4.29	4.13	4.14	4.09	4.09	3.96	4.25	4.07	4.15
涪陵	5.96	5.80	5.21	5.36	5.86	6.07	5.38	5.70	5.14	4.82	5.89	4.96
万州	4.66	4.84	4.58	4.48	4.70	4.27	5.00	4.97	4.76	4.46	4.40	4.44
奉节	4.73	5.10	4.69	4.97	5.27	5.43	5.16	5.15	5.01	4.71	4.41	5.03
巴东	4.73	4.51	4.82	5.26	5.33	5.52	5.38	5.20	5.24	4.74	5.42	4.67
宜昌	4.25	4.40	4.00	4.36	4.19	4.39	4.69	4.56	4.07	3.75	4.24	4.26

库区 6 站 pH 值的逐月变化(表 1)与区域变化趋势大体相同,如 pH 最大值除重庆出现在 2 月外,其余 5 站均出现在 6 月或 7 月,大多数站点 pH 最小值出现在 9~11 月。各站逐月 pH 值大小顺序也与图 1 完全一致,涪陵一年中有 6 个月无酸雨,有酸雨的月份其 pH 值也大多在 5.0 以上;重庆、宜昌每月皆有酸雨,而且平均每年分别有 11 个月和 10 个月达较强酸雨标准,各有 1 个月达强酸雨标准;万州、奉节、巴东虽然也是每月皆有酸雨,但达到较强酸雨标准的月份甚少,万州有 5 个月,奉节有 1 个月,巴东没有。

### 2.3 酸雨频率分布

从库区 6 站不同级别酸雨出现频率分布(图 3)可以看出,涪陵酸雨年频率最低,为 60%,其余各站除巴东为 78% 外都在 90% 以上,其中重庆最高达 100%,这表明库区总体酸雨极为频繁。各站之间较强酸雨频率差别较大,库区两端重庆、宜昌的频率高达 79%

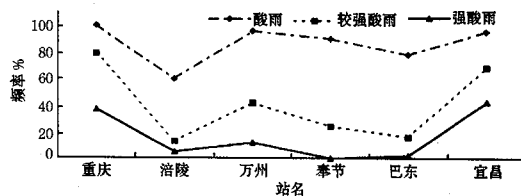


图 3 库区 6 站各级别酸雨年频率分布

和68%，以下依次为万州42%、奉节24%、巴东16%，涪陵频率最低为13%。强酸雨频率仍以重庆、宜昌最高，分别为37%和42%，其次是万州，为12%，其余3站极少或未曾出现强酸雨，其出现频率为0~5%。

### 3 库区酸雨强度与气象条件的关系

有关研究表明，酸雨强度与风速、雾、降水等气象因子有一定的关系<sup>[4~6]</sup>。通过将库区酸雨逐月pH值与同期多种气象因子的相互比较，证实库区酸雨强度确与上述3种气象因子有关。

#### 3.1 季节变化趋势比较

图4表示库区四季酸雨强度(pH值)与雾日、风速、降水量的对应关系，图中明显反映出pH值与风速、降水量呈正相关，与雾日呈负相关。从冬至夏，随着pH值的上升，风速呈增大趋势，降水量急剧上升，而雾日则明显减少；由夏到秋，pH值从高峰降到低谷，风

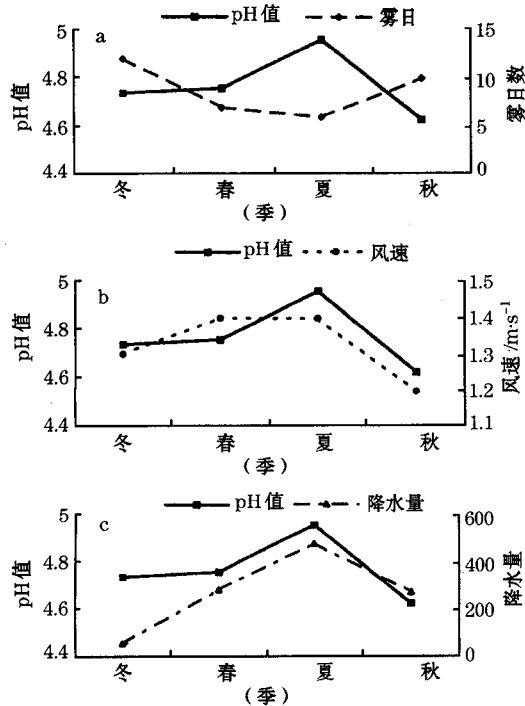


图4 库区pH值与降水量四季分布

速也随之降到一年中的最小值，降水量显著减少，雾日则较夏季明显增多。

#### 3.2 降水酸度与气象因子之间的相关矩阵

为了分析库区逐月pH值与上述气象因子的定量关系，令 $x_1, x_2, x_3$ 分别代表雾日、风速、降水量等因子逐月值序列，令 $y$ 代表pH值序列， $r_{12}, r_{13}, r_{23}$ 表示 $x_1$ 和 $x_2, x_1$ 和 $x_3, x_2$ 和 $x_3$ 之间的相关系数， $r_{14}, r_{24}, r_{34}$ 表示 $x_1$ 和 $y, x_2$ 和 $y, x_3$ 和 $y$ 之间的相关系数，据此组成的相关矩阵及利用实际资料的计算结果见下式<sup>[7]</sup>：

$$R = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & r_{34} \\ r_{41} & r_{42} & r_{43} & r_{44} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -0.76 & -0.46 & -0.49 \\ -0.76 & 1 & 0 & 0.37 \\ -0.46 & 0 & 1 & 0.54 \\ -0.49 & 0.37 & 0.54 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

上式为以对角线元素为1的对称矩阵，该矩阵第4行(或第4列)表示，就单相关而言，库区pH值与雾日呈负相关，与风速及降水量呈正相关。矩阵1至3行表示，雾日与风速及降水量呈负相关，风速与降水量之间不相关。

#### 3.3 偏相关计算与分析

为了单独考察各个气象因子与pH值关系的紧密程度，必须把其他气象因子对这个因子的线性影响以及对pH值的线性影响剔除，即计算该因子与pH值的偏相关系数<sup>[8]</sup>，在此将 $x_1, x_2, x_3$ 对 $y$ 的偏相关系数分别记为 $r_{y1,23}, r_{y2,13}, r_{y3,12}$ ，于是从文献<sup>[8]</sup>可知，

$$r_{y1,23} = \frac{-R_{14}}{\sqrt{R_{11}R_{44}}} \quad (2)$$

$$r_{y2,13} = \frac{-R_{24}}{\sqrt{R_{22}R_{44}}} \quad (3)$$

$$r_{y3,12} = \frac{-R_{34}}{\sqrt{R_{33}R_{44}}} \quad (4)$$

式(2)~(4)中 $R_{ij}$ 分别表示 $r_{ij}$  ( $i=1,2,3,4; j=1,2,3,4$ )的代数余子式。

令 $M_{ij}$ 为 $r_{ij}$ 的余子式，则 $M_{ij}$ 可通过计算 $M_{ij}$ 在式(1)中去掉 $i$ 所在行及 $j$ 所在列后剩下的元素组成的行列式来求取<sup>[9]</sup>，即

$$M_{11} = \begin{vmatrix} r_{22} & r_{23} & r_{24} \\ r_{32} & r_{33} & r_{34} \\ r_{42} & r_{43} & r_{44} \end{vmatrix} = 0.5715 \quad (5)$$

$$M_{22} = \begin{vmatrix} r_{11} & r_{13} & r_{14} \\ r_{31} & r_{33} & r_{34} \\ r_{41} & r_{43} & r_{44} \end{vmatrix} = 0.5001 \quad (6)$$

$$M_{33} = \begin{vmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{14} \\ r_{21} & r_{22} & r_{24} \\ r_{41} & r_{42} & r_{44} \end{vmatrix} = 0.3210 \quad (7)$$

$$M_{44} = \begin{vmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{vmatrix} = 0.2108 \quad (8)$$

$$M_{14} = \begin{vmatrix} r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \\ r_{41} & r_{42} & r_{43} \end{vmatrix} = 0.0396 \quad (9)$$

$$M_{24} = \begin{vmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \\ r_{41} & r_{42} & r_{43} \end{vmatrix} = -0.1080 \quad (10)$$

$$M_{34} = \begin{vmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{41} & r_{42} & r_{43} \end{vmatrix} = 0.1331 \quad (11)$$

由于代数余子式与余子式有如下关系:

$$R_{ij} = (-1)^{i+j} M_{ij} \quad (12)$$

将式(5)~(12)的计算结果代入式(2)~(4), 可得  $r_{y1,23} = 0.114$ ,  $r_{y2,13} = 0.334$ ,  $r_{y3,12} = 0.512$ .

以上计算结果说明,降水与 pH 值的关系最为明显,降水对大气中污染物的清除起到净化大气的作用,降水量增多有利于降低酸雨的浓度;风速与 pH 值的关系也比较好,当风速较小时,湍流脉动较弱,不利于大气中污染物的稀释与扩散;至于雾日与 pH 值的偏相关系数呈微弱正相关,与单相关系数截然不同,这说明剔除了降水、风速的影响后,雾本身对酸雨浓度有一定的减小作用,因为雾由漂浮在近地面的细小水滴组成,可以吸附和溶解空气中的酸性物质,从而一定程度上降低空气中酸性物质的浓度,但这种作用极为有限,远不如降水和风速那样明显。

#### 4 小结和对策建议

(1)长江三峡库区是我国酸雨频率较高、

酸雨严重的地区之一,位于库区东、西两端的宜昌、重庆酸雨最重。

(2)库区降水 pH 值的逐月变化显示,10月、3月、12月为年内酸雨较重的月份,5~8月是年内酸雨较轻的时段。

(3)库区各站酸雨频率为 60%~100%,大多数站 90%以上;较强酸雨频率为 13%~79%;强酸雨主要出现在重庆和宜昌,其出现频率分别为 37%和 42%。

(4)库区酸雨强度与降水量、风速、雾日有关,计算结果表明,pH 值与降水量关系最明显;其次为风速;与雾日虽有一定关系,但关系不太明显。

(5)库区重庆、宜昌酸雨较重,说明酸雨强度与城市规模及工业化程度有一定关系。控制城区和工业设施二氧化硫和氮氧化合物的排放,是降低库区酸雨发生率的有效途径,具体措施为尽量减少煤的使用量,对煤进行脱硫处理,改善燃烧条件,使用低硫燃料。

(6)鉴于库区酸雨强度与降水及风速关系较明显,在降水量偏少的季节(11~3月)和风速较小的月份(10~12月),特别要注意控制污染物的排放,以免酸雨加剧和蔓延。

(7)根据酸雨强度及频率与气象条件的关系,建立酸雨潜势预测模型,为适时采取针对性的预防措施提供依据。

#### 参考文献

- 1 朱炳海,王鹏飞,束家鑫.气象学词典.上海:辞书出版社,1985:954~955.
- 2 吴 兑,邓雪娇.环境气象学与特种气象预报.北京:气象出版社,2001:104~113.
- 3 赵殿五,张晓山.中国的大气污染和酸雨.环境和气候变化对中国的挑战,北京:气象出版社,1993:166~172.
- 4 陈德林,谷淑芬,李洪珍.一次酸性大暴雨分析.气象学报,1986,44(4):506~510.
- 5 吴芝芬,李柱国,华瑶芳.杭州市酸雨与气象条件的关系.气象,1987,13(4):22~25.
- 6 胡 倬.雨雪对大气中硝酸蒸汽的清除作用.气象科技,1987,9(2):59~63.
- 7 马开玉,丁裕国,屠其璞,么枕生.气候统计原理与方法.北京:气象出版社,1993:146~160.
- 8 屠其璞,王俊德,丁裕国,史慧敏.气象应用概率统计学.北京:气象出版社,1984:246~251.
- 9 章景德,高富荣,郑祖光.气象统计预报基础.北京:气象出版社,1995:5~8.

# Distribution Features of Acid Rain in Three Gorge Reservoir Area

Yang Xianwei Zou Xukai Ma Tianjian

(National Climate Center, Beijing 100081)

## Abstract

Based on the monthly acid rain and meteorological data for recent years in Three Gorge reservoir area, the spatial and temporal distribution features of the intensity and frequency of acid rain are analyzed. By contrasting with relative meteorological elements, it can be found that the intensity of acid rain variation relates to precipitation, wind speed and fog days to a certain extent.

**Key Words:** Three Gorges acid rain partial correlation

---

① 中国气象局“城市环境气象预报技术研究”课题资助。