

凯里地区近18年酸雨pH值、K值的时空变化特征分析及整治成效

陈丹凤¹, 陈伟昌^{2*}, 石 琼³, 赖峥嵘³, 吴 虑³, 张文杰¹

¹贵州省施秉县气象局, 贵州 施秉

²贵州省麻江县气象局, 贵州 麻江

³贵州省凯里市气象局, 贵州 凯里

收稿日期: 2025年10月23日; 录用日期: 2025年11月21日; 发布日期: 2025年11月28日

摘 要

本文利用凯里地区近18年(2006~2023年)酸雨降水日采样监测数据, 选择统计学方法分析当地酸雨pH值、K值的时空变化特征, 并总结了相关整治成效。结果表明: 凯里地区近18年(2006~2023年)年降水平均pH值为5.64整体趋势向碱性增加为主, 平均每年以0.1047的速率递增; 平均K值整体趋势向纯净增加为主, 通过了显著性水平检验, 说明pH值向碱性增加趋势极为显著; 年内pH值以冬季pH值最小, 其次是春季, 而夏季和秋季pH值相当; 凯里地区酸雨天气平均出现频率为37.3%, 整体以下降趋势为主, 平均每年以4.38%的速率递减, 通过了显著性水平检验, 说明递减趋势极为显著; 尤以冬季出现酸雨天气的频率最高, 其次是春季, 而夏季和秋季相对较低; 可分别从加大政府监管力度、控制工业燃煤、做好污染物排放处理、优化能源结构等方面出发开展酸雨防治。

关键词

酸雨, 特征分析, 整治成效, 凯里地区

Analysis of the Spatial-Temporal Variation Characteristics of pH Value and K Value of Acid Rain in Kaili Area in the Past 1 Years and the Effectiveness of Remediation

Danfeng Chen¹, Weichang Chen^{2*}, Qiong Shi³, Zhengrong Lai³, Lv Wu³, Wenjie Zhang¹

¹Meteorological Bureau of Shibing County, Shibing Guizhou

*通讯作者。

文章引用: 陈丹凤, 陈伟昌, 石琼, 赖峥嵘, 吴虑, 张文杰. 凯里地区近18年酸雨pH值、K值的时空变化特征分析及整治成效[J]. 气候变化研究快报, 2025, 14(6): 1441-1448. DOI: 10.12677/ccrl.2025.146144

²Meteorological Bureau of Ma Jiang County, Majiang Guizhou³Meteorological Bureau of Kaili City, Kaili Guizhou

Received: October 23, 2025; accepted: November 21, 2025; published: November 28, 2025

Abstract

In this paper, the statistical method is used to analyze the spatiotemporal variation characteristics of local acid rain pH value and K in the past 18 years (2006~2023) based on the daily sampling monitoring data of acid rain precipitation in the Kaili area. Relevant remediation effects are summarized. The results show that the average annual pH value in the Kaili area in the past 18 years (2006~2023) is 5.64, and the overall trend is mainly alkaline. The average annual increase rate is 0.1047; The average K value is mainly increasing, and the overall trend is pure. It has passed the test of significant level, indicating that the trend of pH value to alkalinity is extremely significant; The pH of the year is the smallest in winter, followed by spring, and the pH value in summer and autumn is almost the same; The average frequency of acid rain weather in Kaili area is 37.3%, and the overall trend is mainly declining, with an average annual decrease rate of 4.38%, which has passed the test of level, indicating that the decreasing trend is extremely significant; especially in winter, the frequency of acid rain weather is the highest, followed by spring, and summer and autumn are relatively; Acid rain prevention and control can be carried out from increasing government supervision, controlling industrial coal burning, treating pollutant emissions, and optimizing the energy structure.

Keywords

Acid Rain, Characteristic Analysis, Remediation Effect, Kaili Area

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Open Access

1. 引言

酸雨是 pH 值不足 5.6 的大气降水。大气降水的形式包含有雨、雪、雹等。通常认为，人类排放到大气中的硫氧化物和氮氧化物通过进行氧化反应而形成硫酸和硝酸，这是造成降水酸化的主要致酸物质。因城市化发展进程的加快和社会经济的快速发展，人们对能源需求量不断加大，再加上以煤为主的能源结构造成排放到空气中的二氧化硫逐年加大，直接扩大了酸雨影响范围[1]。酸雨被称之为“从天而降的杀手”，因危害民众健康、腐蚀文化古迹、破坏生态系统，现已成为世界上备受关注的重大环境问题之一。因酸雨对河流及湖泊产生影响，使得水体内的碱性物质含量下降，不仅降低了水体浮游生物种类，还导致鱼虾等水生生物死亡。酸雨会影响作物种子萌发、生长发育及产量品质，酸雨还对土壤、水体、森林、建筑等人为景观产生破坏，在引发经济损失的同时，还对人类生存和发展产生危害。凯里市位于贵州省东南部，黔东南西北部，属于中亚热带温和湿润气候区，是典型的季风气候，具有冬无严寒、夏无酷暑，雨热同季的特点。本文利用凯里地区 2006~2023 年酸雨观测资料，探讨当地酸雨 pH 值、K 值的时空变化特征，有助于人们对凯里地区酸雨 pH 值、K 值现状及变化趋势进行全面掌握，为日后酸雨防治提供参考借鉴。

年平均降水 pH 值高于 5.65，酸雨出现频率在 0%~20%之间，将其划分为非酸雨区；pH 值在 5.30~5.60，

酸雨频率处于 10%~40%之间，将其划分为轻酸雨区；pH 值在 5.00~5.30，酸雨出现频率处于 30%~60%之间，将其划分为中度酸雨区；pH 值在 4.70~5.00，酸雨出现频率处于 50%~80%之间，将其划分为较重酸雨区；pH 值不足 4.7，酸雨出现频率在 70%~100%，将其划分为重酸雨区。通过分析监测数据信息，凯里地区酸雨污染并不严重，年平均降水 pH 值为 5.6，年酸雨出现频率为 38.3%，根据一般酸雨区划分，凯里地区属于轻酸雨区，说明当地酸雨不太严重，但也需要引起相关部门的关注[1]。

2. 研究资料和方法

本文所用的酸雨资料主要来源于凯里市气象局酸雨观测站近 18 年(2006~2023 年)的酸雨降水日采样监测数据(当日 8 时~次日 8 时)。观测要素主要包括时段降水量、降水 pH 值、K 值。季节划分采用常规划分标准：春季为每年的 3~5 月，夏季为每年的 6~8 月，秋季为每年的 9~11 月，冬季则是每年的 12 月到次年 2 月。

3. 酸雨特征趋势

3.1. pH 值分析

3.1.1. pH 值总年度分析

凯里地区近 18 年(2006~2023 年)年降水平均 pH 值为 5.64，其中年降水平均 pH 值的最高值为 6.51，出现在 2016 年，最低值只有 4.15，出现在 2008 年(见表 1)。凯里地区近 18 年(2006~2023 年)年 pH 值整体向碱性增加趋势为主，平均每年以 0.1047 的速率递增，r 值为 0.7654，通过了 $\alpha=0.01$ 的显著性水平检验，说明降水出现时 pH 值整体向碱性增加趋势极为显著。结合平均值曲线，在 2009 年之前，凯里地区年降水 pH 值均在多年平均值曲线以下(见图 1)，pH 值相对较小为酸性；而从 2010 年往后，凯里地区降水 pH 值则在多年平均值曲线以上，该时期的 pH 值较大为中性到碱性。另外，通过对凯里地区四季 pH 值进行分析，春、夏、秋、冬四季 pH 值分别为 4.81、5.24、5.23、4.63 (见表 2)，年内 pH 值以冬季 pH 值最小，其次是春季，而夏季和秋季 pH 值相当[2]。

Table 1. Annual variation of pH value and acid rain rate, and K value of precipitation in Kaili area from 2006 to 223
表 1. 2006~2023 年凯里地区降水 pH 值及酸雨率、降水 K 值的年际变化

年份	降水 pH 年均值	年最 低值	年最 高值	$\text{pH} \leq 4.5$ 日数(d)	$4.5 < \text{pH} \leq 5.6$ 日数(d)	$\text{pH} > 5.6$ 日数(d)	总降水 量(mm)	观测降 水量 (mm)	K 最 大值 ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	K 最 小值 ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	$K < 20$ 值(d)	$20 \leq K \leq 50$ 值(d)	$K > 50$ 值(d)	酸雨率 (%)
2006	4.19	3.49	6.69	42	5	2	471.2	461.7	279.0	20.6	0	17	31	95.9
2007	4.29	2.67	6.47	83	15	6	1218.9	1194.6	310.0	15.4	6	44	54	94.2
2008	4.15	2.44	6.47	87	17	4	1460.6	1439.7	192.0	11.5	4	43	61	96.3
2009	4.83	3.40	7.76	48	30	25	1009.0	993.0	159.5	3.6	6	38	59	75.7
2010	5.70	4.20	7.62	10	36	73	1114.0	1095.6	214.0	11.3	7	49	63	38.7
2011	6.08	4.53	9.70	0	16	71	1004.0	988.2	255.0	12.4	12	29	46	18.3
2012	5.68	4.35	6.87	1	55	79	1121.5	1089.5	180.1	9.1	10	55	70	41.5
2013	5.93	4.33	7.04	1	23	79	1342.6	1322.0	158.4	18.1	10	49	44	23.3

续表

2014	5.69	2.87	8.38	17	25	79	1205.4	1180.2	194.0	10.1	16	50	55	34.7
2015	6.21	4.91	8.52	0	5	118	1651.9	1628.9	211.1	7.4	17	51	55	4.1
2016	6.51	4.97	7.48	0	4	113	1265.7	1245.5	180.9	9.2	12	68	37	3.4
2017	6.24	5.32	7.07	0	8	99	1069.7	1041.8	153.6	10.5	14	53	40	6.6
2018	5.94	4.06	7.58	2	38	85	1285.6	1256.1	151.9	7.9	11	66	48	32.0
2019	5.99	4.42	7.24	1	25	108	1348.1	1323.2	185.5	12.8	8	86	40	19.4
2020	5.93	4.56	7.14	0	24	97	1523.5	1479.3	128.9	6.6	7	93	21	19.3
2021	5.98	4.14	8.29	4	29	100	1441.4	1428.1	239.0	2.1	47	66	20	24.8
2022	6.06	4.04	7.71	2	20	79	960.8	926.6	115.2	3.5	43	33	24	21.8
2023	5.71	4.40	7.43	11	23	56	901.8	879.5	171.0	2.4	42	22	10	37.8

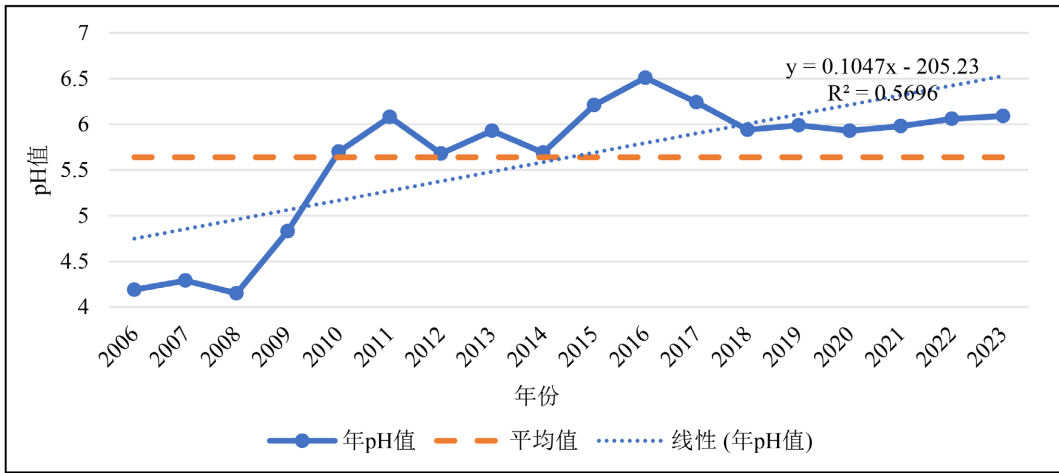


Figure 1. The trend of average pH value of annual precipitation in Kaili area from 2006 to 2023
图 1. 2006~2023 年凯里地区年降水平均 pH 值变化趋势图

3.1.2. pH 值年度分段分析

2006-07~2008-12 期间总降水量 3150.7 mm，酸雨观测降水量 3096.0 mm；降水日数有 380 d，酸雨观测日数有 261 d；符合酸雨观测标准的 261 次，测出是酸雨有 249 次，不是酸雨 12 次；pH 值 ≤4.5 的日数 212 d，4.5<pH 值 ≤5.6 的日数 37 d，pH 值 >5.6 的日数 12 d；平均酸度 4.47，酸雨概率平均值 95.4% (见表 1)。2009-01~2009-12 期间总降水量 1009.0 mm，酸雨观测降水量 993.0 mm。降水日数有 143 d，酸雨观测日数有 103 d；符合酸雨观测标准的 103 次，测出是酸雨有 78 次，不是酸雨 25 次；pH 值 ≤4.5 的日数 48 d，4.5<pH 值 ≤5.6 的日数 30 d，pH 值 >5.6 的日数 25 d。平均酸度 4.83，酸雨概率平均值 75.7% (见表 1)。2010-01~2023-12 期间总降水量 17236.0 mm，酸雨观测降水量 16884.5 mm。降水日数有 2346 d，酸雨观测日数有 1616 d；符合酸雨观测标准的 1616 次，测出是酸雨有 380 次，不是酸雨 1236 次；pH 值 ≤4.5 的日数 49 d，4.5<pH 值 ≤5.6 的日数 331 d，pH 值 >5.6 的日数 1236 d。平均酸度 5.98，平均酸雨概率平均值 23.3% [3] (见表 1)。

3.2. 酸雨出现频率

3.2.1. 酸雨出现频率总年度分析

2006~2023 年凯里地区酸雨天气出现频率处于 3.4%~96.3%之间(见表 1), 平均出现频率为 37.3%, 其中年酸雨出现频率的最高值为 96.3%, 出现在 2008 年, 年酸雨出现频率的最低值为 3.4%, 出现在 2016 年, 两者之间相差 92.9%, 说明凯里地区酸雨天气年际变化波动幅度较大。凯里地区近 18 年酸雨天气出现频率整体以下降趋势为主(见图 2), 平均每年以 4.38%的速率递减, r 值为 0.7639, 通过了 $\alpha=0.01$ 的显著性水平检验, 说明递减趋势极为显著。通过对凯里地区四季酸雨天气出现频率进行分析, 春、夏、秋、冬四季酸雨出现频率分别为 73.3%、59.4%、56.6%、75.5%(见表 2), 尤以冬季出现酸雨天气的频率最高, 其次是春季, 而夏季和秋季相对较低[4]。

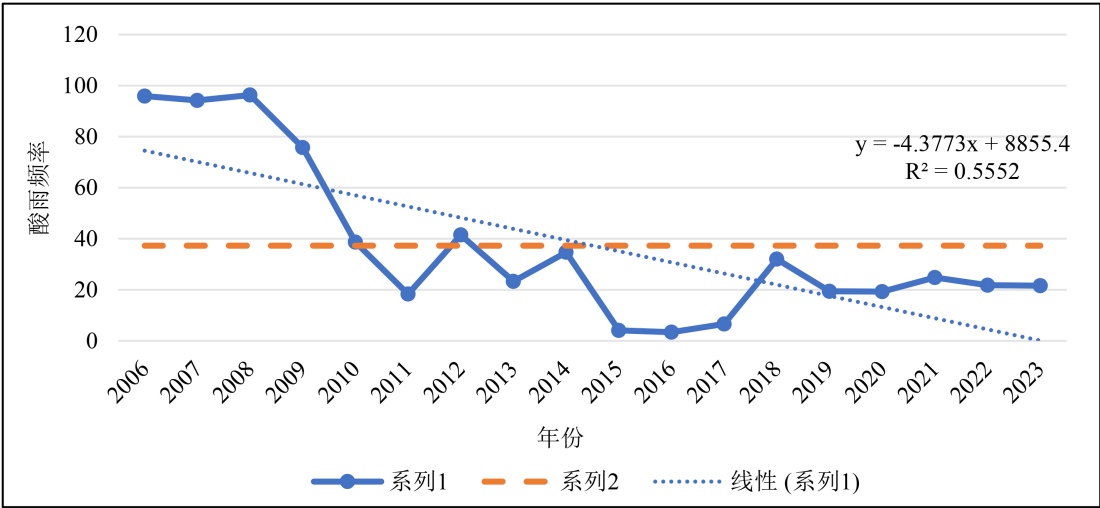


Figure 2. The trend of the pH value of precipitation and the rate of acid rain in the Kaili area from 2006 to 203
图 2. 2006~2023 年凯里地区降水 pH 值酸雨率变化趋势

Table 2. Segmented and seasonal trend of pH value of precipitation, acid rain rate and K value of precipitation in Kaili area from 200 to 2023

表 2. 2006~2023 年凯里地区降水 pH 值及酸雨率、降水 K 值的分段、分季节变化趋势

年度	季节	降水 pH 季均值	pH 最 大值	pH 最 小值	pH ≤ 4.5 日数(d)	4.5 < pH ≤ 5.6 日 数(d)	pH > 5.6 日数(d)	K < 20 值(d)	20 ≤ K ≤ 50 值(d)	降水 K 值 > 50	酸雨率 (%)
2006 至 2008	冬季	4.10	6.43	2.82	45	1	2	0	11	37	93.8
	春季	4.16	5.69	2.44	61	2	1	1	21	42	98.4
	夏季	4.43	6.47	3.11	73	4	8	7	53	25	90.6
	秋季	4.09	6.69	2.67	59	0	1	2	19	39	98.3
2009	冬季	3.92	6.31	3.43	17	0	0	0	2	15	100
	春季	4.34	5.26	3.40	32	3	1	2	15	19	88.9
	夏季	5.06	5.46	3.93	15	3	7	4	14	7	72
	秋季	5.55	7.76	4.04	6	5	10	0	6	15	52.4

续表

2010 至 2023	冬季	5.87	9.25	2.87	15	85	207	13	107	182	32.6
	春季	5.94	9.70	3.32	16	129	381	61	247	204	27.6
	夏季	6.23	8.26	3.93	5	66	381	134	221	97	15.7
	秋季	6.05	8.52	4.04	3	62	274	48	193	97	19.2

3.2.2. 酸雨出现频率年度分段分析

2006-07~2008-12 期间春季和秋季的酸雨出现频率高于冬季和夏季酸雨出现频率。pH 最小值 2.44 出现在春季(2008-05-05), pH 最大值 6.69 出现在秋季(2006-09-05); pH 值 ≤ 4.5 的日数 238 d, $4.5 < \text{pH}$ 值 ≤ 5.6 的日数 7 d, pH 值 > 5.6 的日数 12 d; 降水 K 值 $< 20 \mu\text{S}/\text{cm}$ 的日数 10 d, 降水 $20 \mu\text{S}/\text{cm} \leq \text{K}$ 值 $\leq 50 \mu\text{S}/\text{cm}$ 的有 104 d, 降水 K 值 $> 50 \mu\text{S}/\text{cm}$ 有 143 d (见表 2)。2009-01~2009-12 期间冬季和春季酸雨出现频率高于夏季和秋季酸雨出现频率。pH 最小值 3.40 出现在春季(2009-04-04), pH 最大值 7.76 出现在秋季(2009-09-25); pH 值 ≤ 4.5 的日数 70 d, $4.5 < \text{pH}$ 值 ≤ 5.6 的日数 11 d, pH 值 > 5.6 日数 18 d; 降水 K 值 $< 20 \mu\text{S}/\text{cm}$ 的日数 6 d, 降水 $20 \mu\text{S}/\text{cm} \leq \text{K}$ 值 $\leq 50 \mu\text{S}/\text{cm}$ 的有 37 d, 降水 K 值 $> 50 \mu\text{S}/\text{cm}$ 有 56 d (见表 2)。

2010-01~2023-12 期间冬季和春季酸雨出现频率高于夏季和秋季酸雨出现频率。pH 最小值 2.87 出现在冬季(2014-02-24), pH 最大值 9.70 出现在春季(2011-03-02); pH 值 ≤ 4.5 的日数 39 d, $4.5 < \text{pH}$ 值 ≤ 5.6 的日数 342 d, pH 值 > 5.6 日数 1243 d; 降水 K 值 $< 20 \mu\text{S}/\text{cm}$ 的日数 256 d, 降水 $20 \mu\text{S}/\text{cm} \leq \text{K}$ 值 $\leq 50 \mu\text{S}/\text{cm}$ 的有 768 d, 降水 K 值 $> 50 \mu\text{S}/\text{cm}$ 有 580 d (见表 2)。

3.3. 酸雨大气降水 K 值(电导率)分析

2006-07~2008-12 期间: 降水 K < 20 的有 10 d, 降水 $20 \leq \text{K} \leq 50$ 的有 104 d, 降水 K > 50 的有 146 d, 降水 K 值最大值 310.0, 降水 K 值最小值 11.5。2009-01~2009-12 期间: 降水 K < 20 的有 6d, 降水 $20 \leq \text{K} \leq 50$ 的有 38 d, 降水 K > 50 的有 59 d, 降水 K 值最大值 159.5, 降水 K 值最小值 3.6。2010-01~2023-12 期间: 降水 K < 20 的有 256 d, 降水 $20 \leq \text{K} \leq 50$ 的有 770 d, 降水 K > 50 的有 573 d, 降水 K 值最大值 255.0, 降水 K 值最小值 2.1 (见表 1)。

从观测数据看出大气降水电导率 K 值偏大, 电导率反映大气降水的洁净程度, K 值的大小与大气降水的洁净程度成反比, 由此看来凯里地区 2006-07~2008-12 期间 K 值 ≥ 20 的天数比 K 值 < 20 的天数多, 大气降水的洁净程度特差; 2009-01~2009-12 期间大气降水的洁净程度有所好转, 但是 K 值 ≥ 20 的日数仍然居高不下; 2010-01~2023-12 期间大气降水的洁净程度有进一步好转, 特别是 2021、2022、2023 年的大气降水的洁净程度相比其他年份比较好, 但从整体来看还是存在一定污染(见表 1)。

4. 酸雨整治成效

4.1. 政府加大监管力度

在全面防治酸雨的过程中离不开政府部门的参与。经过提交凯里地区酸雨污染情况, 通过政府及有关单位共同采取措施, 对凯里地区各个砖厂硫化物和氮氧化物的排放并进行脱硫技术处理。减少硫化物、氮氧化物的等酸性气体的排放, 大力进行对煤炭的洗选加工, 综合开发煤、硫资源, 对于高硫煤和低硫煤实行管控。因此在后期继续整治过程中对于凯里市当地政府部门来说, 必须继续加大立法和监管力度, 结合当地实际, 尽快制定出更好的酸雨防治和污染物排放有关的标准, 通过强制性的法律法规来

规范人们的日常活动，帮助工业企业尽快树立起环境保护的意识，将排放和治理污染物工作做的更好，以有效控制凯里地区酸雨的形成，降低其对环境和社会经济的危害。严格控制“两高一资”(“高耗能、高污染和资源性”)企业项目的建设，从源头上解决酸雨污染的问题[5]。

4.2. 控制工业燃煤

凯里地区相关部门要有效控制工业燃煤，工业生产中优先选用含硫量低的燃煤，以有效减少硫化物的排放，进而从根源上控制酸雨的形成。例：对凯里地区煤矿生产出来的原煤进行脱硫技术处理，可以除去煤中 50%左右的无机煤，生产成液化态燃煤；对我市饮食行业常用的蜂窝煤逐渐采取限制销售、使用的措施；在凯里地区内大力推广使用天然气和电，并鼓励广大市民在日常生活中积极使用天然气、液化石油气，电或其他清洁能源。

4.3. 做好污染物排放处理

为了减少硫化物排放，需全面处理工业气体的排放，以减少酸雨的形成。工业企业应认识到做好污染物处理的重要性，并做好煤与石油燃烧后气体的脱硫处理；还可以减少私家车使用频率，通过降低尾气排放的方式来控制酸雨的形成。例：对凯里地区不符合国家产业政策以及污染严重的企业实施关停或是搬迁的措施；对于凯里地区那些高能耗，重污染的难以治理的各类工业炉窑将给予淘汰处理；凯里地区所有新建项目的废气排放设施都必须同步配套建设得有烟气脱硫除尘设施。

4.4. 优化能源结构

煤炭与石油燃烧中产生的污染物极易形成酸雨，因此，需不断优化能源结构，将新型清洁能源替代煤与石油等燃烧后产生较大污染物的能源，以减少空气中硫化物排放。在凯里地区积极发展低碳绿色生活，大力发展循环经济科技，低碳绿色科技等，通过对清洁生产流程不断规范，切实贯彻节能降噪、控制排放和增加资源效用的生态保护目标。同时加快生态环境建设，提升沼气的应用能力，从根本上降低污染物对生态环境的破坏。例：对于凯里地区那些高能耗，重污染的难以治理的各类工业炉窑将给予淘汰处理；凯里地区所有新建项目的废气排放设施都必须同步配套建设得有烟气脱硫除尘设施；在燃烧煤炭过程中，采取排烟脱硫技术，回收 SO_2 ，生产硫酸，发展脱硫煤、成型煤供居民使用，有计划地进行城市煤气化；积极调整工业和民用燃料结构，大力推广使用各种“清洁能源”。

4.5. 构建绿色出行机制

积极构建起人民群众绿色出行机制，以对机动车尾气排放量进行科学控制，进而构建起绿色生态环境。科学控制机动车放行数量，严格管理机动车行驶速度，倡导人民出行时优先选用自行车、步行等方式。加快绿色建设、防控酸雨工作顺利开展，同时还可以培养人们的生态保护意识，通过社区宣传的方式，引起人们的关注，进而实现全面共建绿色家园，共建地球村生态环境。例：针对机动车辆加强对汽车尾气(氮氧化物)的控制；加快城区绿化工作，扩大城区绿化面积，根据城市环境规划，选择种植一些较强吸收 SO_2 和粉尘的如石榴、菊花、桑树、银杉等花草树木[5]。

5. 结论

(1) 2006~2023 年凯里地区年降水平均 pH 值为 5.64，整体向碱性趋势发展为主，平均每年以 0.1047 的速率递增，通过了显著性水平检验，说明 pH 值向碱性增加趋势极为显著；

(2) 凯里地区酸雨天气平均出现频率为 37.3%，整体以下降趋势为主，平均每年以 4.38% 的速率递减，通过了显著性水平检验，说明递减趋势极为显著；

(3) 从加大政府监管力度、控制工业燃煤、做好污染物排放处理、优化能源结构等方面出发开展酸雨防治,取得明显成效。

参考文献

- [1] 孙崇基. 酸雨[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2001.
- [2] 陈丹凤, 陈伟昌, 魏正全. 凯里地区酸雨情况和趋势分析[J]. 贵州气象, 2007, 31(6): 16-18.
- [3] 今山. 酸雨的危害[N]. 北京科技报, 2000-07-28(006).
- [4] 姜欣, 蒋卓亚, 任莉慧. 2011~2020 年昆山市酸雨变化特征及成因分析[J]. 四川环境, 2023(1): 287-292.
- [5] 冯宗炜. 中国酸雨对陆地生态系统的影响和防治对策[J]. 中国工程学, 2002, 2(9): 5-11.