

徐丽霞, 向峰, 邱飞, 等. 2016—2020年云南省主要城市酸雨污染特征及趋势分析[J]. 灾害学, 2022, 37(1): 96–101. [XU Lixia, XIANG Feng, QIU Fei, et al. The Characteristics and Trend of Acid Rain Pollution in the Major Cities in Yunnan Province from 2016 to 2020 [J]. Journal of Catastrophology, 2022, 37(1): 96–101. doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2022.01.017.]

2016—2020年云南省主要城市酸雨污染特征及趋势分析*

徐丽霞¹, 向峰¹, 邱飞¹, 彭启洋², 万普娟³, 马强⁴, 徐博雯⁴

(1. 云南省生态环境监测中心, 云南昆明 650034; 2. 云南省气象服务中心, 云南昆明 650034;
3. 云南师范大学, 云南昆明 650500; 4. 昆明理工大学, 云南昆明 650504)

摘要:为评价云南省酸雨的污染特征及变化趋势, 收集了2016—2020年云南省21个主要城市连续5a的降水监测数据, 利用spearman秩相关系数法分析了云南省“十三五”期间城市酸雨污染的变化趋势, 并与“十二五”末期进行对比, 结果表明: 5a降水pH平均值均高于5.6, 呈逐年上升趋势; 酸雨发生频率呈逐年下降趋势; 总体上酸雨污染有明显改善。降水组分表明属硫酸硝酸混合型, 阳离子、阴离子浓度呈下降趋势。全省降水pH最低值出现在个旧市, 属于轻酸雨区; 5a来个旧市酸雨污染状况有明显好转, 而紧临个旧市的蒙自市酸雨污染不明显, 个旧市是云南省城市酸雨防治的重点。

关键词:城市; 酸雨; 降水pH值; 酸雨频率; 秩相关; 混合型; 云南

中图分类号: X43; X915.5; X517 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000–811X(2022)01–0096–06

doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2022.01.017

经济的快速发展给人们带来了舒适便捷的生活, 但由于在经济发展过程中人们对环境保护意识的淡薄, 遗留下了许多环境问题。酸雨作为经济发展的产物, 与温室效应、臭氧层空洞一起成为人类面对的三大全球性环境问题^[1-2], 而我国也是继北美、欧洲之后的世界第三大酸雨区^[3-4]。酸雨是指pH小于5.6的雨水、冻雨、雪、雹、露等大气降水, 从大气污染物沉降的角度, 又将“酸雨”定义为“酸性降水”, 它是由于人类活动或自然灾害等原因导致区域降水酸化的一种污染现象^[5]。

酸雨的形成有自然因素和人为因素, 如火山喷发、森林火灾、地震等自然灾害以及生物分解过程中产生的酸性气体进入大气中所造成的酸雨属于自然因素^[6]。人为因素主要来自于煤炭、石油、天然气等重要能源燃烧时释放的SO₂等有害气体, 以及汽车、化工生产、有色金属冶炼厂排放的NO_x、SO₂等污染性气体, 而SO₂和NO_x是降水中主要酸性物质的来源^[7-8]。这些酸性气体经氧化后溶于水, 会形成H₂SO₄、HNO₃、HNO₂等酸性物质, 从而导致降水pH降低, 形成酸雨^[9-11]。而酸雨降落到地表上, 会使江河湖泊中的水体酸化, 会对水生动植物的生存和发育造成严重影响, 还

会破坏土壤的理化性质, 严重影响农作物的生长以及种子的发芽率, 此外酸雨还能腐蚀建筑物和材料, 破坏人体皮肤、粘膜, 对人体呼吸道造成损害, 诱发皮肤病, 哮喘, 肺心病等多种呼吸道疾病和癌症^[12-16]。

云南省作为煤炭资源大省, 其总量居南方第2、全国第8^[17]。钢铁、火电、冶金、化工等行业对煤炭的消耗量大, 工艺过程中产生的SO₂等酸性气体加剧了云南省的酸雨污染程度, 而且随着机动车数量的增加, 各类机动车尾气产生的NO_x对酸雨形成的贡献值呈现上升趋势^[1, 18-19], 在一定程度上促使云南省的酸雨污染类型由硫酸型转变为硫酸—硝酸混合型^[20-22]。云南省的酸雨污染问题备受人们关注, 但近10a来, 在“十二五”和“十三五”的规划指导下, 云南省通过对重污染、“散乱污”企业以及汽车尾气排放等方面的严格整治, 使得省内酸雨污染情况得到有效改善。本文通过对云南省主要城市降水pH值的监测和酸雨发生频率的统计, 分析了“十三五”期间省内酸雨的污染变化趋势以及发生变化的原因, 旨在为后续的酸雨污染环境管理及污染治理提供科学的技术依据。

* 收稿日期: 2021–06–13 修回日期: 2021–08–27

基金项目: 云南省生态环境厅“环境质量变化趋势分析及保障专项资金”; 国家自然科学基金(21966016)

第一作者简介: 徐丽霞(1968–), 女, 汉族, 甘肃天水人, 高级工程师, 主要从事环境与气象研究。E-mail: 510535312@qq.com

通讯作者: 彭启洋(1970–), 男, 汉族, 云南昭通人, 高级工程师, 主要从事气象服务研究。E-mail: 18431768@qq.com

1 资料与方法

1.1 数据来源

2020 年的监测数据来源于云南省 16 个州(市)政府所在地及安宁、宣威、个旧、开远、弥勒、腾冲、瑞丽等 7 个县级市的城市建成区, 共 23 个城市的降水和酸雨监测数据^[23]。连续 5 a 的平均监测数据采用了 21 个城市(以上 23 城市不含弥勒、腾冲)的数据^[23]。

1.2 酸雨评价方法

按中华人民共和国气象行业标准《QX/T372 - 2017 酸雨和酸雨区等级》^[24]进行评价。

1.2.1 评价标准

降水 pH 值小于 5.60 的大气降水即为酸雨, 年均降水 pH 值小于 5.60 的地区叫酸雨地区, 酸雨控制区要比酸雨地区小得多, 一般将降水 pH 值低于 4.60 作为受控对象的标准。酸雨控制区包括酸雨污染最严重地区及其周边 SO₂ 排放最大区域。

1.2.2 评价指标

(1) 降水 pH 平均值。一次降水 pH 值为该降水 [H⁺] 离子浓度的负对数, 而城市(月、季、年)降水 pH 平均值则采用氢离子(H⁺)水量加权法计算。计算公式如下:

$$pH_{\text{平均}} = -\log[H^+]_{\text{平均}}; \quad (1)$$

$$[H^+]_{\text{平均}} = \frac{\sum [H^+]_i \cdot V_i}{\sum V_i} \quad (2)$$

式中: $pH_{\text{平均}}$ 为城市(月、季、年)降水 pH 平均值; $[H^+]$ 和 V_i 分别为第 i 个城市的氢离子平均浓度和降水量。

根据区域内全部单站(月、季、年)酸雨 pH 平均值, $pH < 4.0$ 划分为特重酸雨区; $4.0 \leq pH < 4.5$ 为重酸雨区; $4.5 \leq pH < 5.0$ 为轻酸雨区; $5.0 \leq pH < 5.6$ 为较轻酸雨区。

(2) 酸雨频率。酸雨频率计算公式如下:

$$F(\text{酸雨频率}\%) = \frac{\text{酸雨的样本数}}{\text{降水总体本数}} \times 100\% \quad (3)$$

酸雨频率 F 的等级标准可以用来评价区域内酸雨发生规律见表 1。

表 1 酸雨频率等级

酸雨频率 $F/\%$	级别
$F < 5$	酸雨偶发
$5 < F \leq 20$	酸雨少发
$20 < F \leq 50$	酸雨多发
$50 < F \leq 80$	酸雨频发
$F > 80$	酸雨高发

酸雨频率 F 判别酸雨污染程度的变化依据为: $F \leq 10\%$, 基本持平; $10\% < F \leq 20\%$, 稍有加重(或好转); $F > 20\%$, 明显加重(或减轻)^[25]。

1.3 酸雨评价方法

斯皮尔曼等级相关系数, 即 spearman 秩相关系数。是一个非参数的度量两个变量之间的统计相关性的指标, 用来衡量两个变量的依赖性, 在数据中没有重复值, 并且两个变量完全单调相关时, 则两者之间的 spearman 秩相关系数为 +1 或 -1。它的计算公式如下:

$$\rho_s = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{n(n^2 - 1)} \quad (4)$$

式中: 秩相关系数记为 ρ_s ; d_i 为两变量 x_i 与 y_i 的秩次之差; n 为样本容量。

spearman 秩相关系数的符号表示 X 和 Y 的联系方向, ρ_s 为正时表示正相关, ρ_s 为负时表示负相关, 当 ρ_s 为 0 时表明随着 X 的增加, Y 增大或减小的变化趋势不明显。

2 结果与分析

2.1 2020 年降水 pH 值与酸雨频率

2020 年, 云南省 23 个城市中共设置了 35 个降水监测点, 对降水 pH 值进行了监测, 统计了酸雨发生频率, 并与 2015 年监测数据进行对比, 监测结果如表 2 所示。表 2 数据表明, 2020 年全省平均降水 pH 为 6.33, 比 2015 年的 5.61 升高了 0.72; 酸雨出现频率 1.9%, 比 2015 年的 4.1% 下降了 1.2%; 酸控区酸雨频率 4.9%, 比 2015 年的 11.1% 下降了 6.2%; 2020 年降水 pH 和酸雨出现频率明显优于 2015 年, 全省酸雨污染明显减轻。

2020 年全省平均最小值降水 pH 为 4.13(出现在个旧市), 比 2015 年的 3.34(出现在个旧市)升高了 0.79 (23.6%); 2020 年个旧市的酸雨频率 19.7%, 比 2015 年的 54.8% 下降了 35.1%, 个旧市的酸雨污染明显减轻。

2.1.1 降水 pH 值

2020 年开展降水 pH 监测的 23 个城市中, 降水 pH 年平均值在 4.13 ~ 8.90 之间。个旧、大理、楚雄 3 个城市监测到酸雨, 占城市总数的 13.0%, 全省仅个旧市的降水 pH 年均值为 5.41, 占城市总数的 4.3%。相比 2015 年, 楚雄市的降水 pH 平均值从 5.39 达到了 5.95。酸控区 7 个城市中, 降水 pH 年平均值在 4.13 ~ 8.85 之间, 平均值为 6.18。

2.1.2 酸雨频率

23 个城市酸雨频率平均为 1.9%, 3 个出现过酸雨的城市中: 个旧市酸雨频率为 19.7%、大理市为 5.0%、楚雄市为 4.4%。酸雨控制区 7 个城市的酸雨频率平均为 4.9%, 个旧市、楚雄市出现过酸雨。非酸雨控制区 16 个城市的酸雨频率平均为 0.5%, 其中大理市出现过酸雨, 其余 15 个城市未出现过酸雨。由于酸控区的酸雨污染程度重于非酸控区, 所以个旧市依然是云南省城市酸雨防治的重点。

酸控区酸雨 pH 平均值 4.81, 低于全省平均值 4.85, 且酸雨频率 4.9% 高于全省平均值 1.9%。酸控区中的昭通市、昆明市、曲靖市、玉溪市、开远市 5 个城市, 经济较为发达, 分布有较多的火力发电、冶金、化工、建材等 SO₂ 和 NO_x 排放大户, 而排放的 SO₂ 和 NO_x 却是酸雨形成中酸性物质的重要来源, 但这 5 个城市并未出现酸雨, 可能与污染物迁移转化, 远距离传输有关, 导致了酸雨生成的异地性, 而同属酸控区的个旧市 SO₂ 和 NO_x 排放量不高却酸雨较频繁发生的原因, 也可能与当地逆温频繁有关^[27]。

2.1.3 酸雨空间分布

23 个城市中, 个旧、大理、楚雄 3 个城市出现酸雨, 占城市总数的 13.0%; 昆明、安宁、曲靖、宣威、玉溪、保山、腾冲、昭通、普洱、开远、弥勒、蒙自、文山、景洪、临沧、芒市、瑞丽、泸水、丽江、香格里拉 20 个城市未出现酸雨, 占 87.0%。

表 2 2020 年云南省 23 城市降水监测统计表

序号	城市	采样点数目	降水 pH			样品总数	酸雨样品数	酸雨 pH 平均	酸雨频率/%	酸控区
			平均	最小	最大					
1	昆明	5	7.54	6.69	8.85	186	0		0.0	是
2	安宁	1	7.18	6.27	8.23	35	0		0.0	否
3	曲靖	1	6.64	5.73	7.82	65	0		0.0	是
4	宣威	1	7.30	6.12	8.38	52	0		0.0	否
5	玉溪	2	6.56	5.97	7.46	87	0		0.0	是
6	保山	1	7.09	7.01	7.18	70	0		0.0	否
7	腾冲	1	6.86	6.73	7.08	59	0		0.0	否
8	昭通	2	7.93	7.82	8.12	34	0		0.0	是
9	丽江	3	6.47	5.89	7.22	121	0		0.0	否
10	普洱	2	6.67	6.16	8.12	144	0		0.0	否
11	临沧	1	6.29	5.66	6.96	89	0		0.0	否
12	楚雄	1	5.95	5.01	6.96	45	2	5.10	4.4	是
13	蒙自	1	7.07	6.19	8.90	40	0		0.0	否
14	个旧	2	5.41	4.13	6.86	137	27	4.80	19.7	是
15	开远	1	6.92	6.59	7.46	34	0		0.0	是
16	弥勒	1	6.82	6.57	8.17	44	0		0.0	否
17	文山	1	6.80	6.18	8.10	64	0		0.0	否
18	景洪	2	6.88	5.90	8.61	134	0		0.0	否
19	大理	2	5.87	4.62	8.64	121	6	4.92	5.0	否
20	芒市	1	6.33	5.71	7.16	103	0		0.0	否
21	瑞丽	1	6.60	6.09	7.63	76	0		0.0	否
22	泸水	1	7.30	6.68	8.21	25	0		0.0	否
23	香格里拉	1	7.95	7.22	8.49	34	0		0.0	否
2020 年 非酸控区		21	6.45	4.62	8.90	1 211	6	4.92	0.5	
2020 年 酸控区		14	6.18	4.13	8.85	588	29	4.81	4.9	
2020 年 全省		35	6.33	4.13	8.90	1 799	35	4.85	1.9	
2015 年 全省		31	5.61	3.34	8.92	1 712	70		4.1	

注：采用降水 pH 值小于 5.6 作为酸雨判据，主要用降水 pH 年均值和酸雨出现频率评价酸雨污染。

2020 年云南省酸雨主要出现于滇南和滇西 2 个区域的部分城市，2020 年云南省酸雨空间分布示意图见图 1。

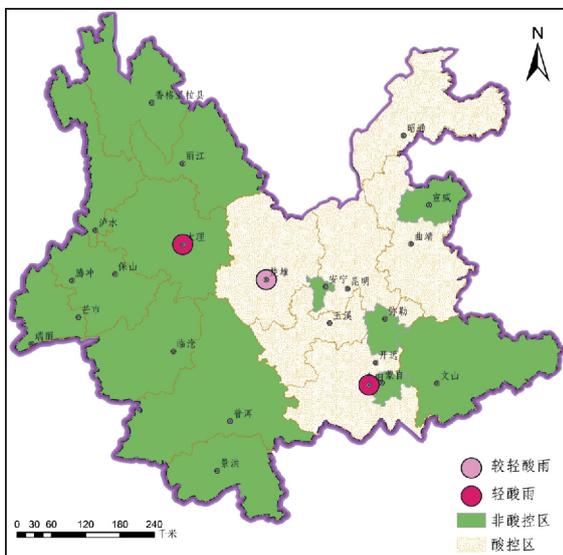


图 1 2020 年云南省酸雨空间分布示意图
(审图号：GS(2019)第 3333 号)

滇南区：位于红河州境内的个旧市，该区域

冶炼行业发展较早较成熟，历年来出现酸雨的频率和酸雨强度较大。2020 年出现酸雨污染的 3 个城市中，个旧市酸雨频率最高，pH 年平均值最低。

滇西区：该区域的酸雨强度不大，出现频率也不高，各年出现位置和范围不固定，常在保山、临沧、楚雄、大理、普洱等城市一带游移。2020 年大理市和楚雄市监测到酸雨，其频率分别为 5.0% 和 4.4%；降水 pH 年平均值分别为 5.87 和 5.95，仍属非酸雨区。

2.2 降水 pH 值与酸雨频率的年度变化

(1) 降水 pH 值的年度对比。2020 年与 2019 年相比，年度变化见图 2。全省降水 pH 年平均值由 6.34 变为 6.33，酸雨频率由 2.2% 变为 1.9%。全省出现酸雨的城市数量由 5 个减少为 3 个，滇南出现酸雨的地区稳定在个旧市，滇西出现酸雨的地区缩小为大理市和楚雄市。大理、文山、弥勒 3 个城市 pH 年平均值分别降低了 1.13、1.00、0.99；蒙自市 pH 年平均值上升了 1.7，变化较为明显；昆明、安宁、楚雄、曲靖、宣威、玉溪、保山、腾冲、昭通、普洱、开远、个旧、景洪、临沧、芒市、瑞丽、泸水、丽江、香格里拉 19 个城市 pH 年平均值变化未超过 0.6，变化不显著。云南省境内降水 pH 值及酸雨频率基本稳定。

2020 年是“十三五”的最后 1 a，为了进一步观察与 5 a 前降水 pH 值的变化，将 2020 年与 2019、

2015 年进行对比^[25-26](图2)。曲靖、玉溪等 10 个城市变化不大, 升降未超过 0.5; 变化在 0.5 以上的城市有 9 个, 其中, 降低 0.5 以上的有丽江、文山、大理 3 个城市, 升高 0.5 以上的有昆明、宣威、昭通、楚雄、个旧、蒙自 6 个城市。个旧市 2020 年相比于 2015 年已有较大好转。



图2 2020 年与 2019、2015 年降水 pH 值变化情况

(2) 酸雨频率的年度对比。2020 年与 2019、2015 年相比^[25-26], 酸雨发生的频率变化见图 3。23 个城市与上年相比, 丽江、临沧、蒙自由 2019 年监测到酸雨变为无酸雨发生; 大理由无酸雨变为监测到酸雨; 酸雨频率变化最大的是个旧市, 酸雨频率下降了 10.2 个百分点, 楚雄市酸雨频率从 10% 下降到 4.4%; 昆明、安宁、曲靖、宣威、玉溪、保山、腾冲、昭通、普洱、开远、弥勒、文山、景洪、芒市、瑞丽、泸水、香格里拉 17 个城市 2 a 均未监测到酸雨, 酸雨频率无年度变化。

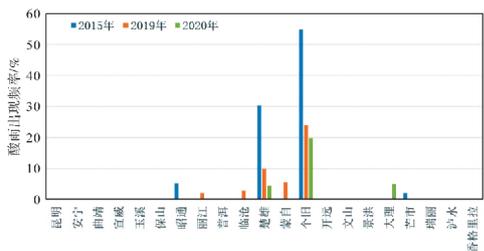


图3 2020 年与 2019、2015 年酸雨出现频率变化情况

图3 表明, 2020 年相比 2015 年变化较为明显的有 2 个城市^[25-26], 其中楚雄和个旧, 下降了 26.0% 和 35.1%, 其余 19 个城市的变化在 10% 以下。全省 21 个城市中, 大理有所上升, 昆明等 16 个城市两年均未出现过酸雨, 楚雄等 4 个城市有不同程度下降, 全省平均由 4.1% 降为 1.9%, 酸雨出现频率明显减少。总体上, 2020 年与 2015 年相比, 个旧市和楚雄市大幅下降, 酸雨污染有所减轻, 昭通市、芒市由酸雨区变为非酸雨区, 酸雨污染范围有所减少。2020 年与 2019、2015 年相比, 个旧、大理、楚雄 3 个城市出现酸雨, 占城市总数的 13.0%, 大理、楚雄 2 个城市虽然出现过酸雨, 但降水 pH 年均值尚在 5.6 以上, 仍属非酸雨区, 2020 年个旧市已达到酸雨少发等级, 酸雨污染情况已有所改善。

从酸雨出现的范围看, 依然集中于滇南和滇西这两个片区, 尤其是滇南的个旧市多年来一直属于酸雨区, 且酸雨污染程度明显高于其他城市。鉴于形成酸雨的污染物质存在异地生成的情况, 污染物质在空气中扩散传输受气象因素较为

复杂^[27], 因此开展深入细致的酸雨生成机理研究和区域联防联控是进一步治理酸雨污染的重要需求。

2.3 “十三五”期间酸雨变化趋势

“十三五”期间, 云南省 21 个主要城市连续 5 a 对降水进行了监测, 5 a 降水 pH 年均值见图 4, 5 a 酸雨出现频率大于 0 的城市见图 5。图 4 表明, 个旧市只有 2019 年为 5.64, 其他年均低于 5.60; 蒙自市 2019 年为 5.37, 其他年份均在 5.60 以上, 而其他城市 5 a 虽然有所变化, 但都高于 5.60。个旧市属于云南省酸雨污染的重点城市。图 5 表明, 个旧市在 2017 年达到最高值 65.8%, 之后一直呈下降趋势, 到 2020 年虽然还有 19.7%, 但酸雨频率已经呈现逐步好转趋势。丽江、临沧、楚雄、蒙自、大理、芒市酸雨频率都低于 10%。其它 14 个城市酸雨频率为 0%。

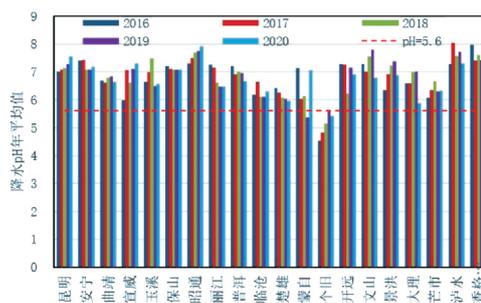


图4 2016—2020 年云南省主要城市降水 pH 值

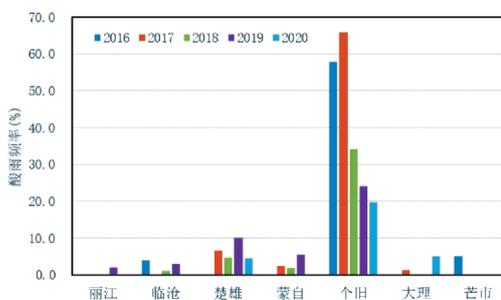


图5 2016—2020 年酸雨出现频率

采用 Spearman 秩相关系数法, 分析 5 a 的 21 个城市 pH 年均值及酸雨频率的变化趋势, 结果见表 3。全省及酸雨控制区降水 pH 值和酸雨频率 5 a 变化见图 6。从表 3 中可以看到, 个旧市的酸雨频率呈现明显的下降趋势, 降水 pH 值呈明显上升趋势; 全省和酸控区的酸雨污染有所下降。这得益于“十三五”期间, 云南省根据各地出现的不同程度、不同污染因子引起的大气污染, 实施差异化防控的定制策略, 分别实施水泥、钢铁等企业错峰生产、限产限排以及人工改变局地气象条件, 实施人工增雨等精细化措施, 及时应对和遏制大气环境污染趋势, 全力以赴打赢打好蓝天保卫战, 为此全省的降水 pH 值和酸雨频率都有了改善^[28]。

从“十三五”期间酸控区和全省降水 pH 平均值变化可以发现, 二者都呈明显上升趋势, 酸控区从 2016 年的 5.37 上升到了 2020 年的 6.18, 而全省都保持在 5.60 之上。在“十三五”期间酸雨频率变化趋势中, 全省酸雨发生频率从 2016 年的 4.2% 下降到了 2020 年的 1.9%, 酸控区的酸雨发生频率下降幅度更大, 5 a 时间下降了 5.7%。

表3 云南省重点城市酸雨变化趋势分析

城市	降水 pH 年均值		酸雨频率		酸雨污染变化趋势
	ρ_s	变化趋势	ρ_s	变化趋势	
昆明	1.00	呈明显上升	*	无明显变化	变化不明显
昭通	1.00	呈明显上升	*	无明显变化	变化不明显
宣威	0.90	呈明显上升	*	无明显变化	变化不明显
个旧	0.90	呈明显上升	-0.90	呈明显下降	明显下降
瑞丽	0.50	无明显变化	*	无明显变化	变化不明显
景洪	0.40	无明显变化	*	无明显变化	变化不明显
曲靖	0.20	无明显变化	*	无明显变化	变化不明显
芒市	0.20	无明显变化	-0.71	呈明显下降	有所下降
泸水	0.10	无明显变化	*	无明显变化	变化不明显
大理	-0.05	无明显变化	0.45	无明显变化	变化不明显
香格里拉	-0.10	无明显变化	*	无明显变化	变化不明显
文山	-0.10	无明显变化	*	无明显变化	变化不明显
蒙自	-0.30	无明显变化	0.10	无明显变化	变化不明显
玉溪	-0.50	无明显变化	*	无明显变化	变化不明显
安宁	-0.50	无明显变化	*	无明显变化	变化不明显
普洱	-0.70	呈明显下降	*	无明显变化	变化不明显
开远	-0.70	呈明显下降	*	无明显变化	变化不明显
保山	-0.89	呈明显下降	*	无明显变化	变化不明显
丽江	-1.00	呈明显下降	0.35	无明显变化	变化不明显
楚雄	-1.00	呈明显下降	0.30	无明显变化	变化不明显
临沧	-1.54	呈明显下降	-0.46	无明显变化	变化不明显
酸控区	0.90	呈明显上升	-1.00	呈明显下降	有所下降
全省	0.90	呈明显上升	-0.90	呈明显下降	有所下降

注*：5 a的数据系列中，出现连续3个及以上并列值时，Spearman 秩相关系数法不能很好的判断变化趋势，采用主观判断。

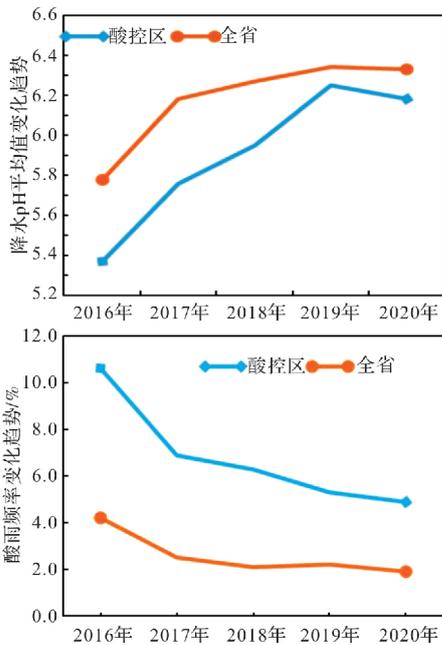


图6 2016—2020年降水 pH 平均值和酸雨频率变化趋势

“十三五”期间全省酸雨问题得到显著改善得益于政府高度重视大气污染防治工作，坚持把大气污染防治作为生态环境保护重要任务抓紧抓实，全省上下有效联动，全面治理了钢铁、建材、有

色、火电、焦化等多个重点行业的无组织排放，全面淘汰了城市(城镇)建成区内每小时10蒸吨及以下燃煤锅炉；对全省16个地级城市划定高污染燃料禁燃区。此外对国三排放标准老旧的柴油货车进行全面淘汰，全省全面供应符合国六(B)标准的车用汽油和国六标准的车用柴油，停止销售低于国六标准的汽柴油，实现车用柴油、普通柴油、部分船舶用油“三油并轨”，取消普通柴油标准。油品质量比国家要求自2023年1月1日起全面使用国六(B)标准汽油的要求提前了整整4a，还增设了机动车固定式遥感监测设备、黑烟车抓拍设备；大力发展水电和其它清洁能源，充分利用云南省的资源优势，提高能源利用率和优化能源结构^[28]。这些强有力措施无疑使省内SO₂和NO_x的排放大幅降低，有效确保了全省空气质量长期保持优良，从而促使省内酸雨发生的频率减少以及降水pH平均值的升高。

2.4 酸雨离子组分分析

2020年降水组分分析结果表明，降水中阳离子浓度由高到低为钙离子>氨离子>钾离子>镁离子>钠离子；阴离子浓度由高到低为硫酸根>硝酸根>氯离子>氟离子，其中硫酸根、硝酸根全省平均值共占阴离子总量的80%，[SO₄²⁻]/[NO₃⁻]为1.39，降水属硫酸硝酸汇合型酸雨。2019年[SO₄²⁻]/[NO₃⁻]为0.83。2020年与2019年相比，阳离子、阴离子浓度均有所下降；2018年为五年中最高值，之后呈下降趋势。酸雨离子组分5a变化情况详见图7。

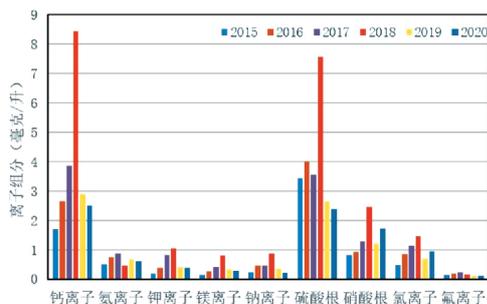


图7 2016—2020 年酸雨离子组分 5 a 变化情况

3 结论

2020 年全省降水 pH 平均值为 6.33, 在开展降水 pH 监测的 23 个城市中, 楚雄、个旧、大理 3 个城市监测到酸雨。全省仅个旧市属于酸雨区, 占城市总数的 4.3%。因酸雨生成的异地性, 个旧市酸雨治理还需注重周边城市 SO_2 和 NO_x 等酸性物质的排放, 从区域源头减少酸雨形成。酸雨离子组分分析结果表明, 降水中阳离子浓度最高为钙离子, 阴离子浓度最高为硫酸根和硝酸根, 降水属硫酸硝酸汇合型酸雨。从 2016—2020 年, 云南省酸雨污染已得到明显改善, 总体上, 云南省酸雨污染问题已不突出, 个旧市依然是云南省城市酸雨防治的重点。

参考文献:

- [1] 王伟丽, 吴洪颜, 贺金芳, 等. 基于信息扩散理论的江苏省酸雨风险评估[J]. 灾害学, 2015, 30(1): 92-95.
- [2] 祝晓红. 酸雨的形成、危害和防控研究[J]. 农业灾害研究, 2014, 4(12): 66-67.
- [3] 王文兴, 丁国安. 中国降水 pH 和离子浓度的时空分布[J]. 环境科学研究, 1997, 10(2): 1-7.
- [4] 牛建刚, 牛荻涛, 周浩爽. 酸雨的危害及其防治综述[J]. 灾害学, 2008, 4(4): 110-116.
- [5] 余倩, 段雷, 郝吉明. 中国酸沉降: 来源、影响与控制[J].

- 环境科学学报, 2021, 41(3): 731-746.
- [6] 赵翔, 涂薇. 酸雨的危害及其防治对策的探讨[J]. 资源节约与环保, 2014, 4(3): 69.
- [7] 胡佳佳, 尹琴. 2005—2019 年贵州省酸雨变化特征及成因分析[J]. 绿色科技, 2020, 4(12): 77-79.
- [8] 张伟勤. 酸雨的危害及其防治策略[J]. 工程与建设, 2012, 26(6): 738-741.
- [9] 程龙, 董昊, 刘阳, 等. 2008—2018 年黄山市酸雨污染特征变化趋势分析[J]. 中国环境监测, 2020, 36(4): 89-95.
- [10] 吴丹, 王式功, 尚可政. 中国酸雨研究综述[J]. 干旱气象, 2006, 4(2): 70-77.
- [11] 钟梓航. 试论酸雨的形成[J]. 化工管理, 2017, 4(20): 109.
- [12] IKUTA K, SSUZUKI Y, KITAMURA S. Effects of low pH on the reproductive behavior of salmonid fishes[J]. Fish Physiology & Biochemistry, 2003, 28(1/4): 407-410.
- [13] 张凤英, 周密, 李一龙, 等. “十三五”期间中国生态环境质量变化特征[J]. 中国环境监测, 2021, 37(3): 1-8.
- [14] 于长毅. 酸雨的形成、危害及防治[J]. 环境保护与循环经济, 2017, 37(9): 42-47.
- [15] 林慧萍. 酸雨对陆生植物的影响机理[J]. 福建林业科技, 2005, 32(1): 60-64.
- [16] 萧以德, 王光雅, 李晓刚, 等. 我国西部地区大气环境腐蚀性及其材料腐蚀特征[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2003, 23(4): 248-255.
- [17] 张镭, 孙伯刚, 任梵. 云南煤炭资源应用和煤化工产业发展现状及展望[J]. 云南化工, 2019, 46(11): 40-47.
- [18] 吕武. 宣城市城区酸雨变化趋势初步分析[J]. 资源节约与环保, 2017, 4(6): 47-49.
- [19] 何玉芹, 许宏斌. 云南省酸雨控制区二氧化硫污染现状及综合防治措施[J]. 云南环境科学, 2004, 4(10): 140-142.
- [20] 吴洪颜, 严文莲, 蒋义芳. 2017 年南京酸雨特征及连续发生的成因分析[J]. 气象科学, 2020, 40(2): 278-284.
- [21] 赵晓韵, 李金娟, 孙哲, 等. 贵州典型酸雨城市大气降水化学组成特征[J]. 地球与环境, 2014, 42(3): 316-321.
- [22] 牛建刚, 刘威亨. 酸雨侵蚀混凝土研究进展[J]. 灾害学, 2020, 35(4): 147-150, 168.
- [23] 云南省生态环境厅. 2015—2020 年度云南省环境质量报告[R]. 昆明: 云南省生态环境厅, 2021.
- [24] QX/T 372-2017 酸雨和酸雨区等级[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [25] 向峰, 胡勇, 王健, 等. 云南省“十二五”期间酸雨污染状况及趋势分析[J]. 环境科学导刊, 2019, 38(5): 42-48.
- [26] 云南省环境保护厅. 2011—2015 年度云南省环境质量报告[R]. 昆明: 云南省环境保护厅, 2016.
- [27] 周永鸣. 个旧市区大气污染分析及其防治对策[J]. 环境科学导刊, 2008, 4(4): 47-49.
- [28] 云南省人民政府办公厅. 云南省打赢蓝天保卫战三年行动实施方案(云政发[2018]44号)[EB/OL]. (2018-09-19). [2020-11-11]. http://www.yn.gov.cn/zwgk/zcwj/zxwj/201911/t20191101_183945.html.

The Characteristics and Trend of Acid Rain Pollution in the Major Cities in Yunnan Province from 2016 to 2020

XU Lixia¹, XIANG Feng¹, QIU Fei¹, PENG Qiyang², WAN Pujan³, MA Qiang⁴ and XU Bowen⁴
(1. Yunnan Ecological Environment Monitoring Center, Kunming 650034, China; 2. Yunnan Meteorological Service, Kunming 650000, China; 3. Yunnan Normal University, Kunming 650500, China; 4. Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: In order to evaluate the characteristics and trend of acid rain pollution in Yunnan Province, precipitation monitoring data of 21 major cities in Yunnan Province for 5 consecutive years from 2016 to 2020 were collected. Spearman rank correlation coefficient method was used to analyze the change trend of urban acid rain pollution during the 13th Five-Year Plan period in Yunnan Province, and compared with the end of the 12th Five-Year Plan period. The results showed that: The average pH value of precipitation in 5A was higher than 5.6, showing an increasing trend year by year. The occurrence frequency of acid rain decreased year by year. On the whole, acid rain pollution has been significantly improved. The precipitation components showed that it was a mixed acid rain of sulfuric acid and nitric acid, and the concentrations of cations and anions were decreasing. The lowest pH value of precipitation occurred in Gejiu city, which belongs to light acid rain area. Since 5a, acid rain pollution in Gejiu city has been significantly improved, while that in Mengzi city which is close to Gejiu city is not obvious. Gejiu City is the key city of acid rain prevention and control in Yunnan Province.

Key words: city; acid rain; precipitation pH value; acid rain frequency; rank correlation; a hybrid; Yunnan