

滇南中心城市酸雨变化特征及控制对策研究

晏 娅^{1,2*}, 童 伟^{2,3#}, 和龙杰², 钟曜谦², 谢容生²

¹云南新世纪环境保护科学院有限公司, 云南 昆明

²云南省环境科学学会, 云南 昆明

³云南绿色环境科技开发有限公司, 云南 昆明

收稿日期: 2022年9月8日; 录用日期: 2022年10月7日; 发布日期: 2022年10月17日

摘 要

为研究滇南中心城市酸雨变化趋势及成因,对2011~2019年云南中心城市酸雨监测数据进行了统计分析。结果表明:近年来滇南中心城市降雨pH年均值在小幅上升,酸雨频率逐渐减小,2010~2019年均为硫酸型酸雨,2020年转变为混合型酸雨。SO₂的浓度主要受工业排放的影响,NO_x的浓度主要受移动源和工业源联合排放的影响。本研究建议加强该地区硫氮协同控制,并着力加强氮氧化物深度减排,提升管控水平,进而改善该区域酸雨的状况。

关键词

酸雨, 变化特征, 影响因素, 控制对策

Study on Variation Characteristics of Acid Rain and the Control Measures in the Central City in Southern Yunnan

Ya Yan^{1,2*}, Wei Tong^{2,3#}, Longjie He², Yaoqian Zhong², Rongsheng Xie²

¹Yunnan New Century Environmental Protection Research Institute Co., Ltd., Kunming Yunnan

²Yunnan Environmental Science Society, Kunming Yunnan

³Yunnan Environmental Science and Technology Development Co., Ltd., Kunming Yunnan

Received: Sep. 8th, 2022; accepted: Oct. 7th, 2022; published: Oct. 17th, 2022

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 晏娅, 童伟, 和龙杰, 钟曜谦, 谢容生. 滇南中心城市酸雨变化特征及控制对策研究[J]. 环境保护前沿, 2022, 12(5): 1022-1030. DOI: 10.12677/aep.2022.125127

Abstract

The change trend and causes of acid rain in the central city in southern Yunnan were studied by statistical analysis of the monitoring data from 2011 to 2019. The results show that the annual pH value of rainfall in the district had increased slightly, and the acid rain frequency had decreased gradually. From 2010 to 2019, the central city in southern Yunnan was all sulfuric acid rain, and changed to mixed acid rain in 2020. The concentration of SO₂ is mainly affected by industrial emission, and the concentration of NO_x is mainly affected by the combined emission of mobile source and industrial source. Therefore, this study proposes to further strengthen the coordinated control of regional sulfur and nitrogen, and focus on strengthening the deep reduction of nitrogen oxides. Moreover, the acid rain conditions in central cities in southern Yunnan will be improved.

Keywords

Acid Rain, Change Characteristics, Influencing Factors, Control Measures

Copyright © 2022 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

酸沉降指的是由人为活动或自然过程排放出的 SO₂、NO_x 和 NH₃ 等致酸气体及其在大气中形成的气态或颗粒态物通过干沉降, 或经由降水过程沉降到地表(湿沉降, 一般将 pH 值小于 5.6 时的降水称为酸雨)所产生的环境问题[1]。我国环境保护部门于 1982 年建立了全国酸雨监测网, 云南省昆明市、个旧市等 14 个重点区域也被纳入酸雨监测管理。从过去三十多年的总体情况上看, 中国酸雨区覆盖华东、华南、华中和西南地区, 西南地区酸雨问题较为突出[2] [3] [4]。我国自“九五”期间开展了“SO₂ 污染控制区和酸雨控制区划分方案的研究”, 制定工业 SO₂ 总量减排措施[2]。近年来随着《大气污染防治行动计划》、《打赢蓝天保卫战三年行动计划》的实施, 我国酸雨持续改善, 全国降水平均 pH 值明显回升。到 2018 年全国降雨 pH 平均值为 5.88, 酸雨区面积仅占总国土面积的 5.5% [5]。

滇南中心城市位于云南省红河州, 市域包括蒙自、个旧、开远行政管辖区域, 总面积为 5765 平方公里。根据云南省各年环境状况公报, 滇南中心城市是云南省出现酸雨频率最高、强度最大的区域[6] [7]。“十二五”期间, 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[8]。“十三五”期间, 云南省酸雨污染有明显好转, 但滇南中心城市依然是云南省城市酸雨防治的重点[9]。本文通过对滇南中心城市降水 pH 值的监测和酸雨发生频率的统计, 分析了近十年该区域酸雨的污染变化趋势及主要成因, 为滇南中心城市乃至云南省酸雨污染环境管理及控制对策提供了理论依据和参考借鉴。

2. 资料与方法

2.1. 资料来源

本文的酸雨监测数据来源于环境统计公报和全国第二次污染源普查数据。

2.2. 分析方法

常规降雨监测指标参照《酸沉降监测技术规范》(HJ/T165-2004) [10]。每 24 h 采样一次, 若一天中出现多次降雨, 则合并为一个样品进行测定; 期间各采样点均采样 5 次。其余监测方法均根据中国气象局酸雨观测业务规范进行[11], 平均值采用降水体积加权平均计算。

3. 结果与讨论

3.1. 酸雨变化特征

“十三五”期间, 滇南中心城市设置降水监测点共 4 个, 对降水 pH 值进行了监测, 统计了酸雨发生频率, 并与“十二五”时期监测数据进行对比, 监测结果如表 1 所示。

Table 1. Statistical table of acid rain monitoring results in central cities in southern Yunnan

表 1. 滇南中心城市酸雨监测结果统计表

| 时期 | 城市 | 采样点 | 样品总数 | 降水 pH | | | 酸雨 pH 平均值 | 酸雨频次/% | 酸控区 |
|-----|-----|-----|------|-------|------|------|-----------|--------|-----|
| | | | | 平均值 | 最小值 | 最大值 | | | |
| 十二五 | 蒙自 | 1 | 17 | 6.44 | 6.04 | 7.46 | / | / | 否 |
| | 开远 | 1 | 25 | 7.15 | 6.66 | 7.73 | / | / | 是 |
| | 个旧 | 2 | 84 | 4.39 | 3.34 | 7.23 | 4.20 | 54.8 | 是 |
| | 云南省 | 31 | 1712 | 5.61 | 3.34 | 8.92 | / | / | / |
| 十三五 | 蒙自 | 1 | 40 | 7.07 | 6.19 | 8.90 | / | / | 否 |
| | 开远 | 1 | 34 | 6.92 | 6.59 | 7.46 | 4.80 | 19.7 | 是 |
| | 个旧 | 2 | 137 | 5.41 | 4.13 | 6.86 | / | / | 是 |
| | 云南省 | 35 | 1799 | 6.33 | 4.13 | 8.90 | 4.85 | 1.90 | / |

其中, 个旧的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。“十三五”期间滇南中心城市中, 个旧市酸雨频率最高, pH 年平均值最低。

3.1.1. 降雨量特征分析

据统计 2010~2020 年的降雨监测数据得出(图 1), 年均降雨量为 502.47 mm, 年均降雨频率为 39 次。其中 2016 年降雨量最多, 为 804.69 mm, 降雨频率为 64 次; 2013 年降雨量最少, 为 167.2 mm, 降雨频率为 11 次。

图 2 可见, 降雨量月变化基本呈现中间高两头低的特征, 即降雨量主要集中在 6~9 月份, 其中最大值出现在 8 月份, 接近 100 mm, 其次是 7 月份, 接近 75 mm, 而 1~3 月份和 10~12 月份都较少。对应着降雨量越大, 降雨频次越多, 7、8 月份降雨频次最多, 为 6 次; 1、2 月份和 11、12 月份降雨频次最少, 为 1 次。5~10 月份降雨量共 400.77 mm, 占全年的 69%。

3.1.2. 降雨 pH 时空变化特征

酸雨频率和酸雨区等级情况见表 2。从年度变化趋势来看, 除 2013 年和 2019 年外, 其余 9 年的降雨 pH 年均值均小于 5.6。按照《酸雨和酸雨区等级》(QX/T372-2017) [12]标准中对酸雨区的定义, 除 2013 年和 2019 年外其余 9 年都属于酸雨区。其中, 降水 pH 年均值最低的年份发生在 2015 年, 其 pH 年均值为 4.398, 属于重酸雨区; 2018 年和 2020 年降水 pH 年均值分别为 5.155、5.410, 属于较轻酸雨区; 其余 6 个年份的降水 pH 年均值在 4.5~5.0 之间, 属于轻酸雨区。

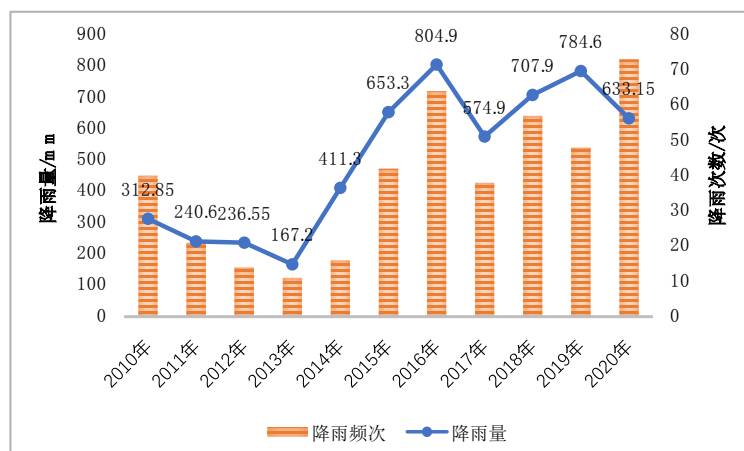


Figure 1. 2010~2020 rainfall and rainfall frequency statistics
图 1. 2010~2020 降雨量和降雨频次统计

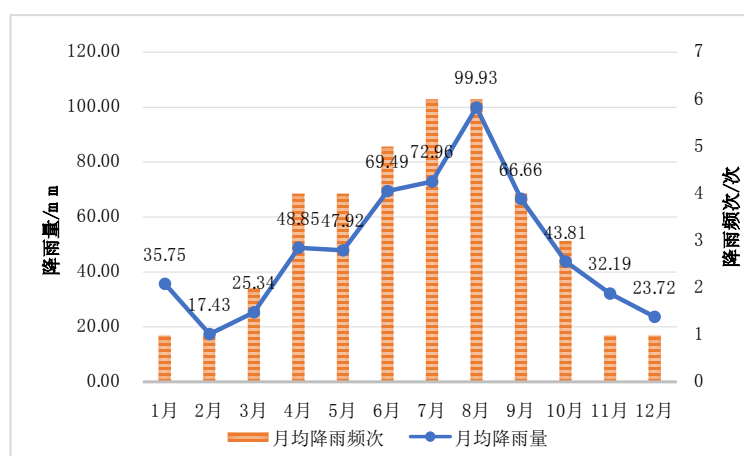


Figure 2. The monthly trends of rainfall and rainfall frequency from 2010 to 2020
图 2. 2010~2020 年雨量和降雨频次的月变化趋势图

Table 2. Overview of acid rain frequency and acid rain zone grades
表 2. 酸雨频率和酸雨区等级概况

| 年份 | 降雨 pH 年均值 | 酸雨区等级 | 年降水次数 | 日降水 pH 值小于 5.6 的次数 | 酸雨频率级别 |
|--------|-----------|-------|-------|--------------------|--------|
| 2010 年 | 4.580 | 轻酸雨区 | 40 | 19 | 酸雨多发 |
| 2011 年 | 4.760 | 轻酸雨区 | 21 | 12 | 酸雨频发 |
| 2012 年 | 4.980 | 轻酸雨区 | 14 | 5 | 酸雨多发 |
| 2013 年 | 5.910 | 非酸雨区 | 11 | 3 | 酸雨多发 |
| 2014 年 | 4.678 | 轻酸雨区 | 16 | 11 | 酸雨频发 |
| 2015 年 | 4.388 | 重酸雨区 | 42 | 23 | 酸雨频发 |
| 2016 年 | 4.525 | 轻酸雨区 | 64 | 37 | 酸雨频发 |
| 2017 年 | 4.825 | 轻酸雨区 | 38 | 25 | 酸雨频发 |
| 2018 年 | 5.155 | 较轻酸雨区 | 57 | 20 | 酸雨多发 |
| 2019 年 | 5.643 | 非酸雨区 | 48 | 12 | 酸雨多发 |
| 2020 年 | 5.410 | 较轻酸雨区 | 73 | 14 | 酸雨少发 |

降水量和降雨 pH 变化趋势图见图 3。整体来看, 2015 年以来, 酸雨 pH 年均值逐年升高, 2019 年首次脱酸, 2020 年又小幅下降, 说明近几年来实施的大气污染防治行动计划等政策的实施, 有效控制了酸沉降的发展。经分析, 年降雨量、降雨频率和降雨 pH 值之间没有正负相关性, 说明区域的降雨 pH 值受除年降雨量、降雨频率外的多种因素影响。

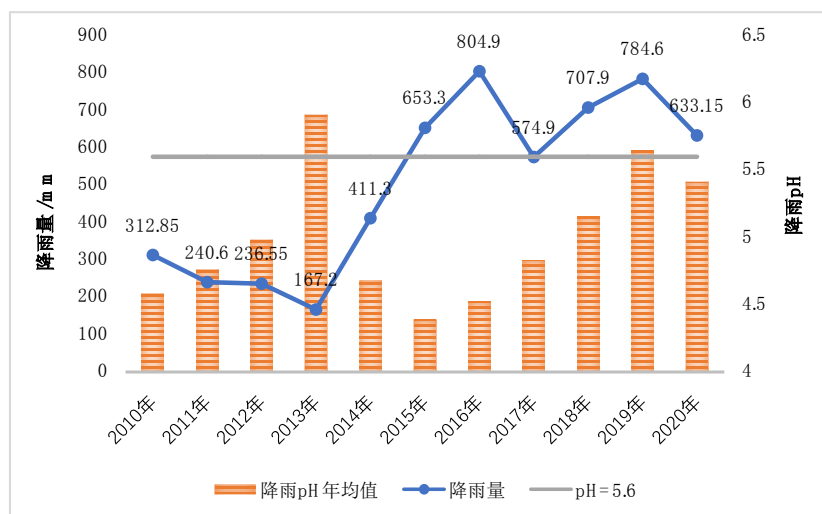


Figure 3. Variation trends of rainfall and rainfall pH

图 3. 降雨量和降雨 pH 的变化趋势图

3.2. 降雨化学特征分析

降雨中的致酸物质较为复杂, 研究其各个离子浓度之间的比值变化对确定区域的酸雨类型与变化趋势具有重要意义[10][12]。通过对监测点雨水中离子进行监测, SO_4^{2-} 、 NO_3^- 是雨水中主要的阴离子, 两者共占总离子含量的 52.68%, 约占总阴离子含量的 79.27%, 尤其是 SO_4^{2-} 占很大比重, 占总离子含量的 42.51%, 占总阴离子含量的 64.12% 左右。 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 是大气中的 SO_2 和 NO_x 经氧化后溶于水形成的, 除自然界释放外, 人类活动向大气中排放大量的 SO_2 和 NO_x , 是酸雨的主要前体物。

SO_4^{2-} 、 NO_3^- 的浓度比值是反映阴离子含量变化的重要指标, 同时也是分析、衡量酸雨类型的一个重要依据, 能够反映雨水酸度的主控因子[13], 比值 ≤ 0.5 为硝酸型酸雨, $0.5 < \text{比值} \leq 3$ 为混合型酸雨, 比值大于 3 的为硫酸型酸雨[14]。如图 4 所示, 2010~2018 $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$ 比值范围为 3.717~22.941, 酸雨类型为硫酸型酸雨, 但比值总体呈下降趋势, 2019 年及以后转变为混合型酸雨。2019、2020 年 $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$ 比值分别为 2.897、1.878, 这表明近年来大气中 NO_x 对酸雨成因的贡献率升高, 空气中硫酸型污染物排放量逐步减少, 这可能与近年来与日俱增的私家车数量有关。此外, 拆除鼓风机、淘汰 10 t/h 以下燃煤锅炉等大气污染防治措施, 有效的减少了工业源 SO_2 的排放量。

2010~2020 年 $\text{Ca}^{2+} + \text{NH}_4^+$ 变化趋势图见图 5。 Ca^{2+} 和 NH_4^+ 是含量最高的阳离子, 两者共占总离子含量的 26.22%, 约占总阳离子含量的 78.8%, 尤其是 Ca^{2+} 占比较高, 占总离子含量的 18.67%, 占总阳离子含量的 54% 左右。根据 $\text{Ca}^{2+} + \text{NH}_4^+$ 的变化趋势来看, 变化幅度不大, 2011 年突然升高, 主要是因为钙离子浓度异常偏高, 可能是空气中 PM_{10} 浓度过高导致。

如图 6 所示, $(\text{SO}_4^{2-} + \text{NO}_3^-)/(\text{NH}_4^+ + \text{Ca}^{2+})$ 比值均大于 2, 说明大气中酸性离子浓度较高。2011 年~2012 年比值出现异常, 具体表现为 2011 年 $\text{Ca}^{2+}/\text{NH}_4^+$ 比值达到近 11 年来最大值, 次年即变为最小值, 同时 $(\text{SO}_4^{2-} + \text{NO}_3^-)/(\text{NH}_4^+ + \text{Ca}^{2+})$ 达到最大值。根据统计分析, 2011 年降水次数为 21 次, 降水量为 240.6

mm, 2012 年降水次数为 14 次, 降水量为 252.1 mm, 其它正常年份的降水量均大于 300 mm, 最大时 2016 年达到 804.69 mm。这可能是由于 2011~2012 年降雨频率相对较低, 降水量少, 由于缺乏降水, 污染物大量累积在大气中, 一旦降雨就会导致雨水中的污染物浓度异常。

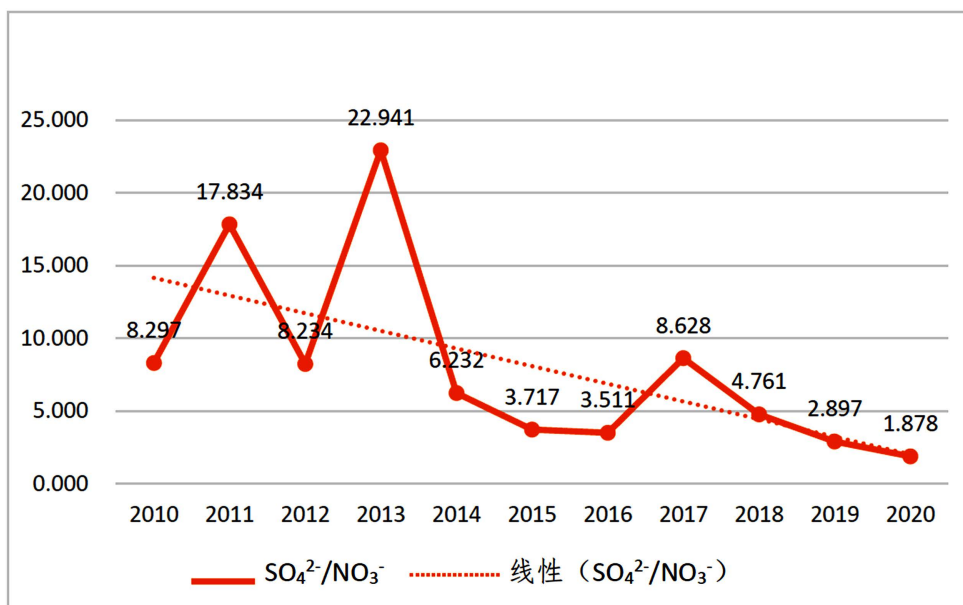


Figure 4. Variation trend of $\text{SO}_4^{2-} / \text{NO}_3^-$ from 2010 to 2020

图 4. 2010~2020 年 $\text{SO}_4^{2-} / \text{NO}_3^-$ 变化趋势

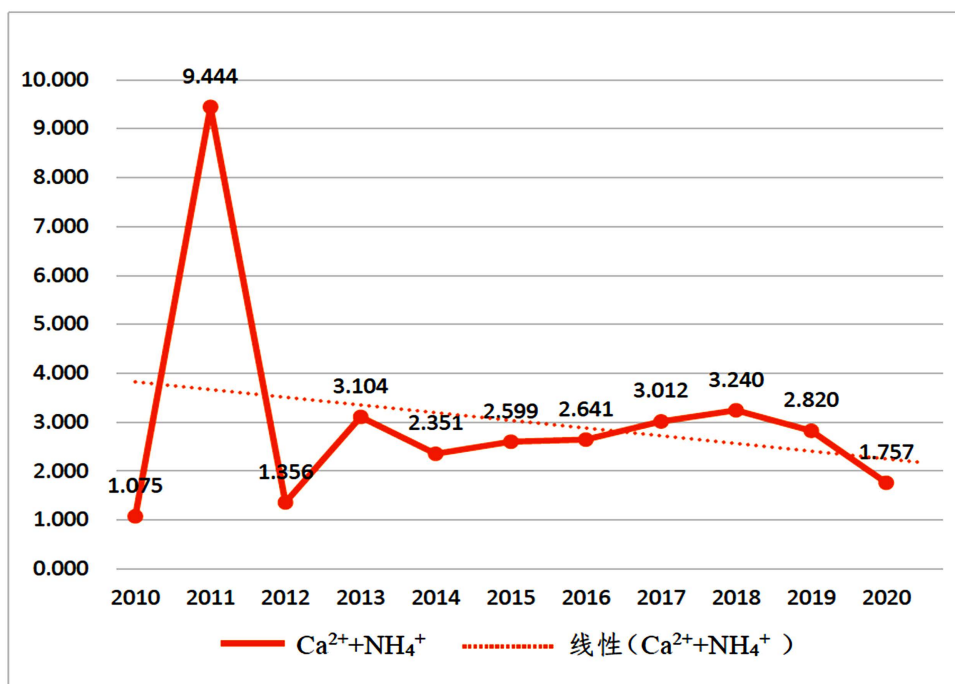


Figure 5. Change trend of $\text{Ca}^{2+} + \text{NH}_4^+$ from 2010 to 2020

图 5. 2010~2020 年 $\text{Ca}^{2+} + \text{NH}_4^+$ 变化趋势

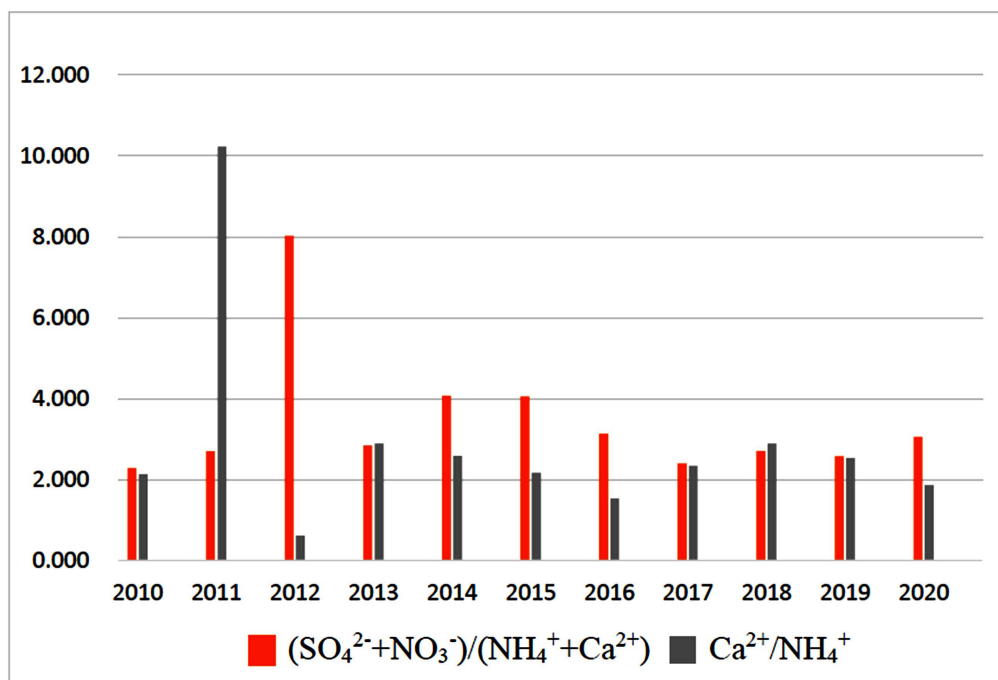


Figure 6. Changes in $(\text{SO}_4^{2-} + \text{NO}_3^-)/(\text{NH}_4^+ + \text{Ca}^{2+})$ and $\text{Ca}^{2+}/\text{NH}_4^+$ from 2010 to 2020

图 6. 2010~2020 年 $(\text{SO}_4^{2-} + \text{NO}_3^-)/(\text{NH}_4^+ + \text{Ca}^{2+})$ 和 $\text{Ca}^{2+}/\text{NH}_4^+$ 变化情况

3.3. 酸雨成因分析

1) 废气排放

滇南中心城区酸雨频率较高的时间为秋冬季。根据降水中主要酸性污染物硫酸根年均浓度与硝酸根年均浓度的比例可知，该地区酸雨为硫酸型酸雨，污染物主要来自含硫矿物和燃料燃烧，与冶炼、化工等行业密集分布于城区周边密切相关，工业源排放是该地区酸雨形成的主要原因之一。

2) 社会活动

随着社会经济的快速发展，滇南中心城市能耗总量不断增加，煤炭在能源结构中仍占据主导地位。参照第二次污染源普查结果，工业企业核算 SO_2 排放量合计 3920.8~4664.1 吨/年， NO_x 排放量合计 900.5~902.7 吨/年；移动源 NO_x 合计排放量为 3150.61 吨/年， SO_2 合计排放量 0.74 吨/年；民用煤种类及数量为原煤 2623.304 吨、无烟煤 0.706 吨、一般烟煤 355.134 吨、褐煤 2267.463 吨，折合 SO_2 排放量为 5.379 吨。因此，生产、生活等社会活动带来的综合能源消费量依然保持较高水平。

3) 酸沉降作用

肖娴等[4]利用 AERMOD 模型，模拟了个旧市城区周边污染源排在气象条件、城市效应及地形作用下对城区 SO_2 、 NO_2 及 PM_{10} 的贡献及影响，其研究结果表明：即使各工业污染源都达标排放时，在不利气象条件下，例如静小风天气下，仍然会对城区大气环境质量造成一定不利影响。叠加秋季降水因素，空气中超标的致酸大气污染物就容易在降水的清洗作用下，形成酸雨，降落到地面。

4) 气候因素

该酸雨区与山体高差较大，山体对污染物的输送和扩散造成了较大阻挡作用，不利于污染物向外扩散；同时由于山体的存在改变了局地的气象条件，造成气流的转向及局地环流的存在，因此对该地区大气环境质量造成影响。

4. 控制对策

1) 调整优化产业结构

推进企业集群升级改造, 结合本地产业特征, 针对特色企业集群, 进一步梳理产业发展定位, 确定发展规模及结构, 从生产工艺、产品质量、安全生产、产能规模、燃料类型、原辅材料替代、污染治理等方面提出具体要求, 淘汰落后产能, 加快转型升级并严格控制规模。

2) 加快调整能源结构

优化能源结构, 增加清洁能源使用比重, 减少二氧化硫、氮氧化物的排放量, 重点实施能源绿色低碳转型行动, 广开渠道, 积极推广轻质柴油、液化石油气、电、天然气等优质能源替代煤。

3) 削减致酸物质的排放量

推行污染物排放许可证制度, 实行总量控制。防治酸雨最根本的措施是减少致酸物质的排放。应根据该地区大气中致酸物质的环境容量, 评估污染物排放对于该地区降雨的影响和环境对酸沉降的敏感程度, 从而确定致酸物质的排放总量, 制定适宜的致酸污染物削减方案, 使酸雨前体物的排放量降到最低, 以减少酸雨的发生率。

4) 提高机动车尾气污染防治水平

严格执行环保标志管理制度、机动车年检排气检测制度, 推动机动车尾气联防联控。完善城市交通道路基础设施建设, 减少十字路、丁字路, 打通断头路, 科学设置红绿灯使道路畅通, 合理控制车流, 减少交通拥堵及车辆低速行驶的状况。

5) 加强环境管理

加强排污许可管理, 深入实施固定污染源排污许可清理整顿工作, 梳理区域内纳入排污许可管理的企业情况, 最终将所有固定污染源全部纳入生态环境管理。加大依证监管和执法处罚力度, 督促企业持证排污、按证排污, 对无证排污单位依法依规责令停产停业。同时, 加强区域空气污染联防联控, 实施区域应急联动。

5. 结论

1) 该地区属于中度酸雨区, 2010~2020 年间酸雨强度总体呈先加重后减轻的趋势, 其发生频率与降水 pH 年均值呈高度负相关, 近年来有明显改善, 降水多为弱酸性降水。

2) 受降雨频率、降雨量季节性变化的影响, 雨水中污染物浓度会出现异常偏高或偏低的情况, 这也是酸雨的影响因素之一。从降水中离子特征来看, SO_4^{2-} 和 NO_3^- 是雨水中主要的阴离子, Ca^{2+} 和 NH_4^+ 是含量最高的阳离子。2010~2019 年均为硫酸型酸雨区, 随着 $\text{SO}_4^{2-} / \text{NO}_3^-$ 比值总体呈下降趋势, 2020 年转变为混合型酸雨区。

3) 社会经济活动、废气污染、酸沉降作用和气候因素综合影响酸雨的形成, 应明确大气降水化学特征, 结合酸雨成因, 综合施策, 切实降低酸雨频率。

基金项目

云南省地方环保标准体系建设项目——重点城市大气污染物排放研究。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 蔡朋程. 浅析中国的酸雨分布现状及其成因[J]. 农业与生态环境, 2018(15): 127-128.
- [3] 周晓得, 徐志方, 刘文景, 等. 中国西南酸雨区降水化学特征研究进展[J]. 环境科学, 2017(10): 4438-4446.

- [4] 肖娴, 徐松, 钱怡婷. 个旧市城区大气环境影响因素分析[J]. 环境保护前沿, 2021, 11(2): 288-298.
<https://doi.org/10.12677/AEP.2021.112030>
- [5] 张新民, 柴发合, 王淑兰, 等. 中国酸雨研究现状[J]. 环境科学研究, 2010, 23(5): 527-532.
- [6] 云南省环境保护厅. 2015-2020 年度云南省环境质量报告[R]. 昆明: 云南省环境保护厅, 2021.
- [7] 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.
- [8] 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(1): 42-48.
- [9] 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.
- [10] 国家环境保护总局. 酸沉降监测技术规范(HJ/T165-2004) [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2004.
- [11] 中国气象局. 酸雨观测业务规范[M]. 北京: 气象出版社, 2005: 30-31.
- [12] 中国气象局. 酸雨和酸雨区等级(QX/T372-2017) [S]. 北京: 气象出版社, 2017.
- [13] 刘君峰, 宋之光, 许涛. 广州地区雨水化学组成与雨水酸度主控因子研究[J]. 环境科学, 2006, 27(10): 1998-2002.
- [14] 孙启斌, 肖红伟, 肖化云, 等. 南昌市大气降水化学污染特征及来源分析[J]. 环境科学研究, 2017(12): 29-35.