

# 上海市奉贤区酸雨污染监测质量控制与成因分析及防控对策

周宇轩, 董磊

上海市奉贤区环境监测站, 上海

收稿日期: 2026年5月25日; 录用日期: 2026年6月28日; 发布日期: 2026年7月8日

## 摘要

以上海市奉贤区2021年~2025年期间降水监测与大气污染源统计数据为基础, 依据《酸沉降监测技术规范》构建全流程监测质量控制体系, 系统分析区域酸雨污染特征、演变规律及驱动成因。结果表明: 奉贤区2021年~2025年年均降水量较2016年~2020年减少47.7%, 酸雨频率由2016年93.3%回落至50.7%~69.1%, 降水pH加权均值由4.8升至5.3; 降水致酸阴离子由硫酸根主导转为硝酸根主导, 硫酸根/硝酸根当量浓度比降至0.60, 酸雨类型由混合型转变为硝酸型。核心成因包括能源结构清洁化使SO<sub>2</sub>大幅减排、工业与机动车NO<sub>x</sub>排放占比提升、区域污染物传输及碱性中和离子衰减。最后从监测质控优化、污染源精准管控、区域联防联控等方面提出防控对策, 为长三角郊区硝酸型酸雨治理提供技术支撑。

## 关键词

酸雨, 监测质量控制, 硝酸型酸雨, 成因分析, 防控对策, 奉贤区

# Quality Control, Causal Analysis, and Prevention and Control Strategies for Acid Rain Pollution Monitoring in Fengxian District, Shanghai

Yuxuan Zhou, Lei Dong

Environmental Monitoring Station of Fengxian District, Shanghai

Received: May 25, 2026; accepted: June 28, 2026; published: July 8, 2026

## Abstract

Based on precipitation monitoring and air pollution source statistics during the 2021~2025 in Fengxian District, Shanghai, a full-process monitoring quality control system was constructed according to the “Technical Specification for Acid Deposition Monitoring”. The characteristics, evolution patterns, and driving causes of regional acid rain pollution were systematically analyzed. Results showed that the average annual precipitation in Fengxian District during the 2021~2025 decreased by 47.7% compared to the 2016~2020; the frequency of acid rain decreased from 93.3% in 2016 to 50.7%~69.1%; the weighted average pH of precipitation increased from 4.8 to 5.3; the dominant acid-causing anions in precipitation changed from sulfate to nitrate, the sulfate/nitrate equivalent concentration ratio decreased to 0.60, and the acid rain type changed from mixed to nitrate-type. The core causes include a significant reduction in SO<sub>2</sub> emissions due to cleaner energy structures, an increased proportion of NO<sub>x</sub> emissions from industry and motor vehicles, regional pollutant transport, and the attenuation of alkaline neutralizing ions. Finally, prevention and control strategies are proposed from aspects such as optimized monitoring quality control, precise management of pollution sources, and regional joint prevention and control, providing technical support for the treatment of nitric acid rain in the suburbs of the Yangtze River Delta.

## Keywords

Acid Rain, Monitoring Quality Control, Nitric Acid Rain, Causal Analysis, Prevention and Control Strategies, Fengxian District

Copyright © 2026 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

酸雨是大气中 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub> 等酸性前体物经光化学反应与降水淋溶形成的二次污染, 易引发土壤酸化、水体污染、建筑腐蚀等生态环境风险, 是长三角区域长期关注的大气环境问题[1]。我国酸雨治理已实现从硫酸型向混合型、硝酸型转变, 上海作为长三角核心城市, 机动车与工业排放密集, 郊区酸雨特征受本地污染源与区域传输双重影响[1][2]。奉贤区位于上海南部, 是先进制造业与都市农业集聚区域, 其酸雨演变规律对长三角郊区酸雨防控具有典型参考价值。本文基于奉贤区 2021 年~2025 年大气污染源与降水监测数据, 规范开展监测质量控制, 剖析酸雨污染特征与核心成因, 提出针对性防控策略, 为区域大气污染协同治理提供依据。

## 2. 酸雨监测概况与质量控制

### 2.1. 监测布设与方法

监测点位: 奉贤区华苑路 19 号, 共 1 个降水监测点, 符合《酸沉降监测技术规范》(HJ/T 165-2004) 点位布设要求[3]。点位为站内自有建筑用地, 场地运维管控便利; 周边无高大建筑物遮挡、近距离无重点废气污染源, 场地条件契合 HJ/T 165-2004 采样布设规范, 可保障降水样品自然采集。地处奉贤城区片区, 周边以居民区及配套生活业态为主, 无集中工业排放, 可客观反映该片区酸沉降整体环境水平, 区域代表性较好。

监测频次：逢雨必测；每月首场降雨开展全项目监测分析。

监测指标：必测项为降雨量、pH 值、电导率；全项为硫酸根、硝酸根、氟离子、氯离子、铵离子、钙离子、镁离子、钾离子、钠离子。

数据计算：pH 均值采用氢离子浓度雨量加权法，其余离子与电导率采用雨量加权算数均值；以 pH < 5.6 作为酸雨判定标准[4]。

## 2.2. 全流程监测质量控制

为保障监测数据准确性、代表性、可比性，严格执行国家监测质控标准，构建“采样 - 分析 - 数据”三级质控体系[5]：

(1) 采样质控：降水采样器定期计量检定，采样桶经无离子水浸泡清洗，避免交叉污染；雨天密闭采样，防止扬尘与外源干扰。

(2) 分析质控：pH 计、电导率仪每日用标准缓冲液校准；离子色谱仪绘制标准曲线，平行样相对偏差控制在±10%以内，使用 GBW08672 等国家一级标准物质校准[6]。

(3) 数据质控：执行“监测员 - 审核员 - 技术负责人”三级审核，剔除异常值，确保数据完整有效，符合《大气成分观测数据质量控制方法酸雨》(QX/T 676-2023)要求[7]。

## 3. 酸雨污染状况

### 3.1. 降水

2021 年~2025 年期间，奉贤区年均降水量为 1033 mm，相较于 2016 年~2020 年期间年均降水量 1977mm，有明显减少(表 1)。

Table 1. Average annual precipitation from 2016 to 2025 (Unit: mm)

表 1. 2016~2025 年年均降水量(单位：mm)

年份	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年	2021 年	2022 年	2023 年	2024 年	2025 年
降水量	1490	1473	1282	1461	4180	1327	806	726	1383	924

近十年来，奉贤区降水的 pH 值加权年均值呈前期改善中期有所恶化后期逐渐恢复并稳定的趋势，pH 值加权年均值最低为 2016 年至 2018 年三年，最高为 2020 年、2023 年和 2024 年。电导率加权年均值总体呈下降趋势并逐渐平稳，电导率加权年均值最高为 2017 年，最低为 2022 年和 2024 年。见图 1。

### 3.2. 酸雨

2021 年~2025 年期间酸雨频率相较于 2016 年~2020 年有所下降并逐渐趋于稳定。如图 2，近十年来酸雨频率的峰值出现在 2016 年为 93.3%，pH 加权年均值为 4.8，此后酸雨频率逐年下降，最低的是 2023 年 pH 加权年均值为 5.4。虽然在 2021 年~2025 年初期酸雨发生频率有所反弹，但在之后持续改善并趋于平稳。

## 4. 化学组成分析

降水酸化的本质是氢离子的收支平衡问题，酸的来源主要是硫酸根和硝酸根等阴离子贡献的酸性，中和作用主要是铵根离子、钙离子等阳离子对酸性的中和。对降水样品进行了离子组分析，为了能更直观的体现各种离子对于 pH 值的贡献，将各种离子的质量浓度换算到离子当量浓度，化学成分统计结果见表 2。

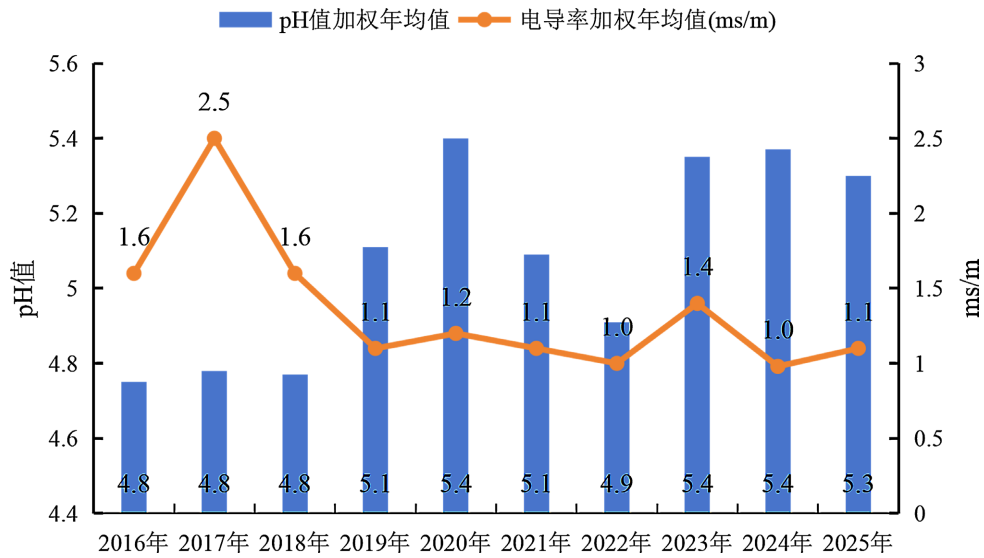


Figure 1. Changes in the weighted annual average pH value and the weighted annual average conductivity value of Fengxian District from 2016 to 2025

图 1. 2016~2025 年奉贤区 pH 值加权年均值和电导率加权年均值变化情况

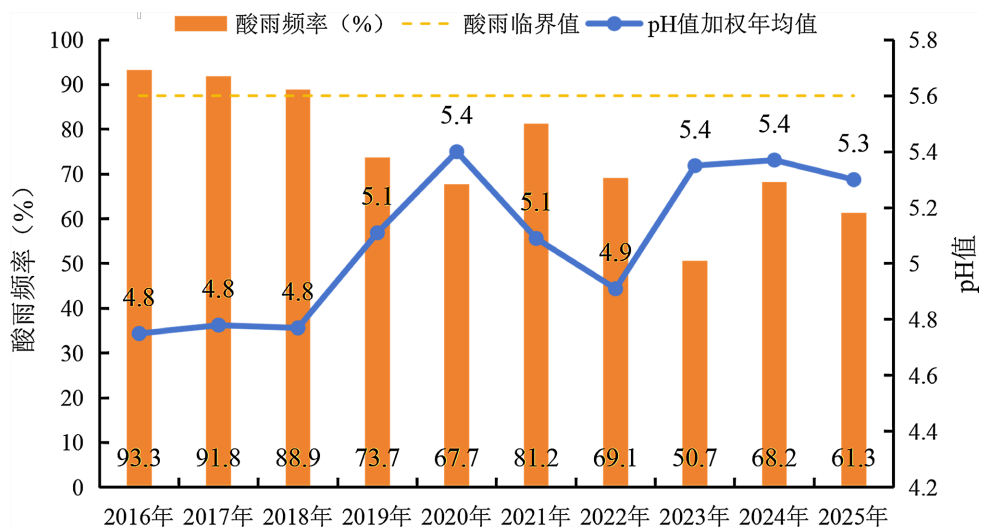


Figure 2. Changes in the frequency of acid rain in precipitation in Fengxian District from 2016 to 2025

图 2. 2016~2025 年奉贤区降水酸雨频率变化情况

Table 2. Annual average equivalent concentration of ions in precipitation in Fengxian District, 2016~2025 (Unit:  $\mu\text{eq/L}$ )

表 2. 2016~2025 年奉贤区降水离子年均当量浓度(单位:  $\mu\text{eq/L}$ )

年份	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年	2021 年	2022 年	2023 年	2024 年	2025 年
pH	4.8	4.8	4.8	5.1	5.4	5.1	4.9	5.4	5.4	5.3
硫酸根	65.3	59.3	48.1	38.8	60.4	38.5	30.8	33.1	35.3	26.7
硝酸根	46.9	33.6	42.6	31.1	62.4	37.9	62.4	60.3	64.9	47.5
氟离子	11.5	10.5	9.4	3.3	1.6	2.5	2.4	2.0	0.8	1.2
氯离子	27.2	32.0	19.8	21.6	32.9	29.2	27.8	25.9	27.9	20.9
铵离子	57.8	49.7	31.5	20.2	45.1	44.6	51.1	63.3	58.1	29.4

续表

钙离子	39.2	36.2	33.0	32.9	37.0	28.3	40.2	29.2	26.6	23.7
镁离子	6.8	8.8	8.3	7.9	11.8	10.4	10.4	9.0	10.0	17.3
钠离子	28.3	31.1	26.6	33.9	42.4	25.3	22.2	29.7	21.6	35.7
钾离子	5.8	3.6	3.6	3.3	7.1	6.6	2.9	3.2	4.3	5.5

如图 3, 2021 年~2025 年期间, 全区降水阴离子中含量最高的是硝酸根离子, 占离子总当量的 23%; 其次是硫酸根离子, 占总当量的 14%, 氯离子占离子总当量的 11%。阳离子中含量最高的是铵离子, 占离子总当量浓度的 21%; 其次是钙离子, 占 12%, 钠离子占离子总当量的 11%。

2016 年~2020 年期间, 全区降水阴离子中含量最高的是硫酸根离子, 占离子总当量的 21%; 其次是硝酸根离子, 占离子总当量浓度的 17%, 氯离子占离子总当量的 11%。阳离子中含量最高的是铵离子, 占离子总当量浓度的 16%; 其次是钙离子, 占 14%, 钠离子占离子总当量的 13%。

2021 年~2025 年期间, 硫酸根离子的当量浓度相较于 2016 年~2020 年有较大幅度的下降, 从 2016 年最高值的  $65.3 \mu\text{eq/L}$  下降到了 2025 年的  $26.7 \mu\text{eq/L}$ , 下降幅度达到了 59.1%, 离子总当量浓度的占比也从 21% 下降到了 14%。2021 年~2025 年期间硝酸根离子的当量浓度总体有所上升, 但在 2025 年基本恢复到了 2016 年的当量浓度。

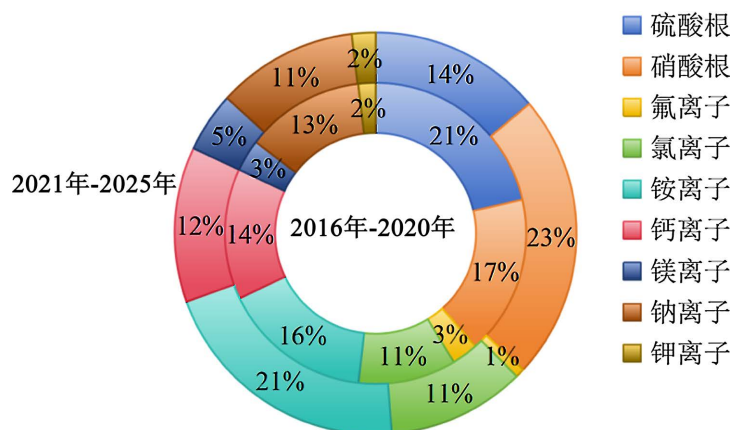


Figure 3. Comparison of percentage of ion equivalent concentration in precipitation in Fengxian District during the 2016~2020 and 2021~2025

图 3. 2016 年~2020 年和 2021 年~2025 年奉贤区降水中离子当量浓度百分比对比

如图 4, 2021 年~2025 年期间降水组分中, 阴离子硫酸根离子和硝酸根离子当量浓度之和占阴离子当量浓度总和的 75.7%, 表明降水受硫酸根离子和硝酸根离子前体物二氧化硫和二氧化氮的影响较大。阳离子中, 钙离子和铵离子当量浓度之和占阳离子当量浓度总和的 59.9%。降水中硫酸根离子和硝酸根离子的当量浓度比为 0.60, 较 2016 年~2020 年下降了 52.4%。根据《环境学导论》中酸雨的分类标准, 表明奉贤区降水中的致酸物质硝酸盐贡献较多, 奉贤区酸雨类型属于硝酸型酸雨。

2021 年~2025 年期间奉贤区酸雨中的主要致酸阴离子是硝酸根离子和硫酸根离子。它们的浓度越高, 雨水的酸性越强, pH 值越低。2016~2025 年阴离子当量浓度呈先下降在 2020 年有所反弹之后再波动下降趋势。见图 5。

碱性阳离子如铵离子、钙离子和钠离子可以中和酸性物质, 降低雨水的酸性。而钾离子和镁离子对酸雨 pH 值的中和作用较小。2016~2025 年阳离子当量浓度呈波动变化趋势。见图 6。

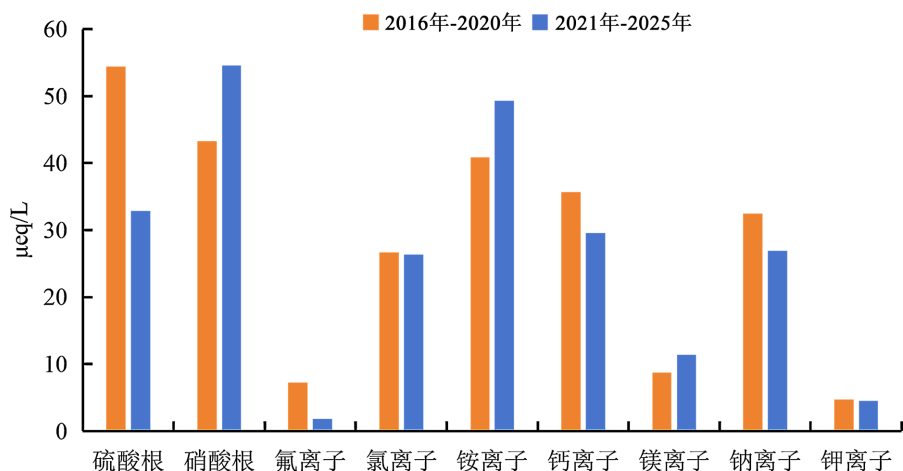


Figure 4. Comparison of anion equivalent concentration in precipitation in Fengxian District during the 2016~2020 and 2021~2025

图 4. 2016 年~2020 年和 2021 年~2025 年奉贤区降水中阴离子当量浓度对比

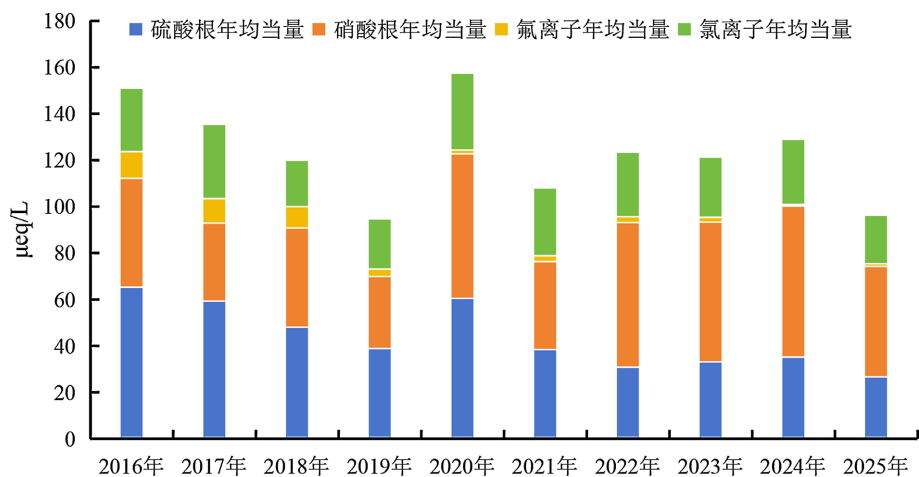


Figure 5. Changes in anion equivalent concentration in precipitation in Fengxian District from 2016 to 2025

图 5. 2016~2025 年奉贤区降水中阴离子当量浓度变化情况

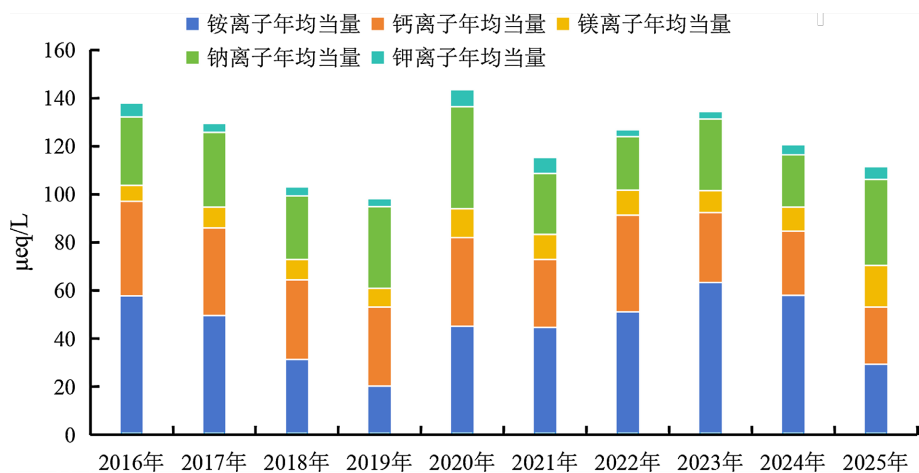


Figure 6. Changes in cation equivalent concentration in precipitation in Fengxian District from 2016 to 2025

图 6. 2016~2025 年奉贤区降水中阳离子当量浓度变化情况

## 5. 结论及原因分析

### 5.1. 结论

奉贤区 2021 年~2025 年期间年均降水量大幅减少, 相较于 2016 年~2020 年期间年均降水量减少了 47.7%。酸雨发生频率由 2016 年~2020 年初的 93.3%, 减少并稳定在 50.7%~69.1%; 降水 pH 加权年均值从 4.8 上升到了 5.3; 降水电导率加权年均值从 1.6 ms/m 下降到 1.1 ms/m。阴离子中的强酸性硝酸根离子和硫酸根离子占比比较高, 阳离子中弱碱性的铵离子、钠离子、钙离子为主要阳离子。2021 年~2025 年期间奉贤区降水中硫酸根离子和硝酸根离子的当量浓度比从 2016 年~2020 年期间的 1.26 下降为 0.60, 酸雨类型从原先的混合型酸雨转变为硝酸型酸雨。

### 5.2. 原因分析

#### 5.2.1. 本地及区域能源结构与污染源的转变

(1) 燃煤污染得到有效控制: 奉贤区近年来在能源结构调整和污染治理上力度巨大。燃煤锅炉改造、电厂超低排放改造、高污染企业关停搬迁等措施, 使得二氧化硫(SO<sub>2</sub>)排放量大幅下降。这是导致降水硫酸根离子浓度降低、硫酸贡献减少的最主要原因。

(2) 机动车污染日益突出: 上海拥有全国最高的机动车保有量之一(特别是私家车和货运车辆)。机动车尾气是氮氧化物(NO<sub>x</sub>)和挥发性有机物(VOCs)的最重要排放源。尽管实施了严格的排放标准(如国六), 但巨大的基数使得 NO<sub>x</sub> 排放总量依然很高。NO<sub>x</sub> 在大气中经过复杂的光化学反应, 最终生成硝酸(HNO<sub>3</sub>)和硝酸盐, 进入降水。这是硝酸根离子浓度升高、成为主导因子的直接来源。

#### 5.2.2. 奉贤区的特殊地理位置与气象条件

(1) 位于上海南部, 受区域传输影响显著: 奉贤区地处上海郊区, 其大气污染不仅受本地排放影响, 更受到上海主城区(特别是浦东、闵行等方向的)污染物区域输送的强烈影响。如北风、西北风会将城区密集的机动车尾气污染物(富含 NO<sub>x</sub>)输送到奉贤上空。

(2) 大气氧化性增强: 长三角地区夏季臭氧(O<sub>3</sub>)污染问题突出。高浓度的臭氧和 OH 自由基等氧化剂, 会极大地加速 SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>x</sub> 向硫酸和硝酸的转化速率, 使得酸性物质在降雨前就已大量生成, 从而导致降雨的酸度(高频率)和硝酸盐比例都很高。

#### 5.2.3. 碱性中和物的变化

扬尘等碱性颗粒物减少: 随着城市清洁化水平的提高(道路硬化、绿化、施工管理), 土壤扬尘、建筑尘等富含钙离子(Ca<sup>2+</sup>)等碱性物质的颗粒物排放减少。这些碱性物质原本可以中和一部分酸性, 尤其是中和硫酸。它们的减少, 使得酸性物质的“克星”变少, 加剧了酸雨的发生频率。

扬尘等碱性颗粒物减少: 随着城市清洁化水平的提高(道路硬化、绿化、施工管理), 土壤扬尘、建筑尘等富含钙离子(Ca<sup>2+</sup>)等碱性物质的颗粒物排放减少。这些碱性物质原本可以中和一部分酸性, 尤其是中和硫酸。它们的减少, 使得酸性物质的“克星”变少, 加剧了酸雨的发生频率。

## 参考文献

- [1] 牛彘文, 顾骏强, 俞向明. 长三角区域背景地区降水化学特征[J]. 环境化学, 2010, 29(3): 456-460.
- [2] 周剑兴, 李秉珍, 韩怡蒙. 中国 40 年酸沉降治理历程及未来展望[J]. 国家科学评论, 2024, 11(4): 1-12.
- [3] 国家环境保护总局. HJ/T 165-2004 酸沉降监测技术规范[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2004.
- [4] 国家质量监督检验检疫总局. GB/T 19117-2017 酸雨观测规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.

- [5] 生态环境部. HJ 630-2011 环境监测质量保证与质量控制技术规范[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2011.
- [6] 中国气象局. GB/T 35664-2017 大气降水中铵离子的测定离子色谱法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [7] 中国气象局. QX/T 676-2023 大气成分观测数据质量控制方法 酸雨[S]. 北京: 气象出版社, 2023.