

2011—2019年铜陵市酸雨状况变化趋势分析

程龙¹,董昊¹,洪星园²,张红^{2*}

(1. 安徽省生态环境监测中心,安徽 合肥 230071;

2. 安徽省生态环境科学研究院,安徽 合肥 230061)

摘要:通过统计分析2011—2019年铜陵市酸雨监测结果,研究该市酸雨变化趋势及其成因。结果表明:铜陵市降水pH年均值为5.04~6.38,酸雨污染状况虽在改善,但酸雨仍时有发生;铜陵市降水中 SO_4^{2-} 与 NO_3^- 的浓度比总体呈现下降趋势,从2011年的4.05下降到2019年的1.25,表明 NO_3^- 对降水酸度的影响逐渐增加,酸雨类型正由硫酸型向硫酸-硝酸混合型转变,机动车排放对于酸雨的贡献已不可忽视;2019年 SO_4^{2-} 沉降通量较2016年下降68.4%, NO_3^- 沉降通量较2016年下降5.1%,大气中 SO_2 质量浓度变化趋势与 SO_4^{2-} 沉降通量变化趋势十分吻合;铜陵市降水中起主要中和作用的离子为 NH_4^+ 和 Ca^{2+} ,其中 NH_4^+ 强于 Ca^{2+} 。

关键词: pH值;酸雨频率;变化趋势;离子浓度;铜陵市

中图分类号:X517 文献标志码:B 文章编号:1006-2009(2022)02-0032-06

Analysis on Change Trend of Acid Rain in Tongling from 2011 to 2019

CHENG Long¹, DONG Hao¹, HONG Xing-yuan², ZHANG Hong^{2*}

(1. Anhui Eco-Environment Monitoring Center, Hefei, Anhui 230071, China;

2. Anhui Provincial Academy of Eco-Environmental Science Research, Hefei, Anhui 230061, China)

Abstract: The change trend and causes of acid rain in Tongling were studied by statistical analysis of the monitoring data from 2011 to 2019. The results showed that the annual average pH value of precipitation in Tongling was 5.04~6.38. Although acid rain pollution was improving in Tongling, it still occurred occasionally. The concentrations ratio of $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$ showed a downward trend, from 4.05 in 2011 to 1.25 in 2019, indicating that the influence of NO_3^- on precipitation acidity was gradually increasing, the type of acid rain was changing from sulfuric acid type to sulfuric acid-nitric acid mixed type. The contribution of vehicle emissions to acid rain could not be ignored. Compared with 2016, the deposition flux of SO_4^{2-} and NO_3^- decreased by 68.4% and 5.1% in 2019, respectively. The variation trend of SO_2 mass concentration was very consistent with SO_4^{2-} deposition flux in atmosphere. NH_4^+ and Ca^{2+} played a major role in neutralization, in which NH_4^+ was stronger than Ca^{2+} .

Key words: pH value; Acid rain frequency; Change trend; Ion concentration; Tongling

“十二五”以来,中国经济实现了历史性跨越,伴随而来的是化石能源的大量消耗,以致 SO_2 、 NO_x 等酸性气体大量排放,严重超出环境自净能力,出现了一系列的环境问题,其中,酸雨问题已成为主要环境问题之一,中国已经成为世界第三大主要酸雨区^[1-2]。20世纪80年代初期第一次酸雨调查发现,长江以南和中国西南部的城市区域为主要酸雨区且酸雨问题相当严重^[3]。酸雨问题已经给中

国南方地区的人民生活带来了严重危害,也给

收稿日期:2021-03-19;修订日期:2022-01-16

基金项目:安徽省自然科学基金资助项目(2108085MD138);国家重点研发计划基金资助项目(2018YFC0213800);安徽省博士后研究人员科研活动经费基金资助项目(2021B548,2020A395);安徽省自然科学基金青年基金资助项目(2108085QD161)

作者简介:程龙(1988—),男,安徽合肥人,工程师,学士,主要从事环境质量综合分析、空气质量预报预警工作。

*通信作者:张红 E-mail: aqi@ahemc.cn

社会经济的健康有序发展造成了不利影响^[4-6]。多年的酸雨监测结果发现,我国的强酸雨区范围在2008年达到历史最大值^[7]。2019年我国酸雨区面积占国土面积5.0%,达到47.4万km²,比2018年减少4.74万km²,其中较重酸雨区国土面积达到6.64万km²,酸雨污染形势依然较为严峻,长江以南和云贵高原以东地区为主要酸雨区^[8]。

铜陵市位于长江以南,处于全国主要酸雨区的边缘位置,由于产业结构和排放特征,其酸雨污染较为严重。今以铜陵市为研究区,统计该市2011—2019年酸雨监测数据,分析酸雨变化特征,探索酸雨污染变化趋势及其成因,为该市酸雨污染精准治理,实现城市绿色发展提供技术支持。

1 研究区域与数据资料

1.1 研究区域气象特征

铜陵市是“中国古铜都,当代铜基地”,全国八大有色金属工业基地之一、全国重要的硫磷化工基地、国家级电子材料产业基地和长江流域重要的建材生产基地,全市工业化率达到60.3%。铜陵市冬季易受内蒙古冷高压南下控制,会出现晴朗、寒冷和干燥天气,夏季易受太平洋副热带高压控制,天气炎热。春季南北气流频繁交汇,极易出现连绵阴雨天气,秋季随着太平洋副热带高压减弱,内蒙古高压逐渐增强,易出现晴朗少雨天气。

1.2 数据资料来源

酸雨监测数据来自2011—2019年铜陵市环境监测中心站所属酸雨监测站点,2011—2015年为1个监测点位(市公路局),2016—2019年为3个监测点位(市公路局、郊区政府和天目湖),其中,市公路局为城区点位,郊区政府为郊区点位,天目湖为远郊区点位。酸雨样品的采集、pH值和离子浓度等指标监测均按照《酸沉降监测技术规范》(HJ/T 165—2004)执行,保证数据的准确性、可靠性。

1.3 数据有效性分析

对2011—2019年样品中水溶性阴阳离子的平衡情况进行分析。结果显示,水溶性阴离子浓度与阳离子浓度之比为1:1.06,阴离子略低于阳离子,可能是由于受到监测方法等影响,导致降水中的阴离子未被完全检测出来。

1.4 评价方法

根据已有酸雨分级标准,将酸雨分为弱酸雨和强酸雨两个等级,其中pH值<4.5的降水为强酸

雨,4.5≤pH值<5.6的降水为弱酸雨。降水pH平均值的计算采用氢离子浓度-雨量加权法^[9]。

离子沉降通量为采样时间内沉降到1km²土壤上某组分的量^[10],计算公式为:

$$D_i = \frac{\sum_{j=1}^n C_{ij} \times Q_j}{1000} \quad (1)$$

式中: D_i 为第*i*种离子的湿沉降通量,t/km²; C_{ij} 为第*j*次降水中第*i*种离子的质量浓度,mg/L; Q_j 为单位时间内第*j*次降水的降水量,mm; n 为降水总次数。

碱性离子的中和能力可以由酸性离子与碱性离子的浓度比值来进行评估^[11],计算公式为:

$$\text{中和能力 } N(A_i) = [A_i] / ([SO_4^{2-}] + [NO_3^-]) \quad (2)$$

式中: $N(A_i)$ 为碱性离子 A_i 的中和能力; $[A_i]$ 为碱性离子 A_i 的浓度,μmol/L。

2 结果与讨论

2.1 铜陵市酸雨变化特征

2.1.1 酸雨年变化特征

图1为2011—2019年铜陵市降水pH值和酸雨频率变化。由图1可见,2011—2019年铜陵市降水pH年均值为5.04~6.38,未出现强酸雨(pH值<4.5)。其中,2011—2015年,降水pH值总体呈上升趋势,2015年达到最高值(6.38),较2014年上升0.84;酸雨频率在2012年达到峰值(35.7%)后开始逐渐下降,到2015年降到最低值(4.3%)。2016年变化较大,降水pH年均值较2015年下降1.19,酸雨频率上升28个百分点;2018—2019年,降水pH值再次抬升,酸雨频率下降到15%以下,这可能得益于近年来安徽省大气污染防治攻坚行动、打赢蓝天保卫战等各项污染治理对于酸性气体的大幅削减。总体来看,铜陵市酸雨污染

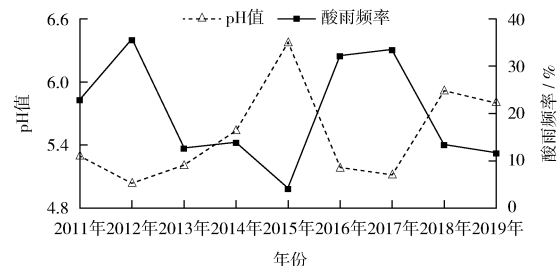


图1 2011—2019年铜陵市降水pH值和酸雨频率变化
Fig. 1 Variation of pH value and acid rain frequency of precipitation in Tongling from 2011 to 2019

情况虽然整体在改善,但仍时有发生。

分析2016年变化较大的主要原因:一是2015年铜陵市降水总量和降水次数远小于2016年。其中,2015年1月—3月铜陵市降水监测点数为1个(市公路局),该点位共采集16次降水,总降水量176.5 mm,4月起降水监测点位增加到3个,4月—12月3个监测点位的累计降水量为3 214.4 mm,降水次数为193次;2016年3个监测点位的累计降水量为5 320.3 mm,平均降水次数为88次。二是受“十三五”酸雨监测点位调整影响,由2015年的1个监测点位增加到2016年的

3个,增加了酸雨样本数收集的可能性,从而导致降水pH值出现较大变化。

表1为2015—2016年铜陵市3个点位的降水监测结果。由表1可知,3个监测点位所有监测指标均有不同程度的变化。从pH值来看,天目湖点位变化最大(pH值下降1.44);从酸雨频率来看,天目湖点位变化最大(酸雨频率上升34.9%);从酸雨样本数来看,2016新增点位的酸雨样本数(天目湖点位增加29次,郊区政府增加22次)较2015年增加51次,占2016年总酸雨样本数的60%。

表1 2015—2016年铜陵市3个点位的降水监测结果

Table 1 Monitoring results of precipitation in 3 points in Tongling from 2015 to 2016

监测点位	2015年				2016年			
	pH值	酸雨频率/%	降水样本 n/次	酸雨样本 n/次	pH值	酸雨频率/%	降水样本 n/次	酸雨样本 n/次
市公路局	6.28	6.2	81	5	4.98	34.9	86	30
郊区政府	6.31	4.8	65	1	5.55	25.8	89	23
天目湖	6.65	1.5	63	3	5.21	36.4	88	32

2.1.2 酸雨月、季变化特征

图2为铜陵市降水pH值和酸雨频率月度变化。由图2可见,除了7月降水pH值 >5.6 外,其余月份pH值均 <5.6 ,10月降水pH值最低,为4.96。铜陵市月均酸雨频率与pH值呈反相关关系。酸雨频率7月最低(9.3%),10月最高(48.8%)。

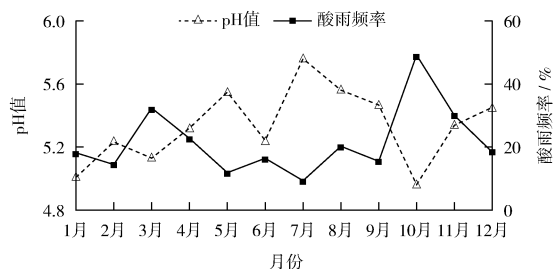


图2 铜陵市降水pH值和酸雨频率月度变化

Fig. 2 Monthly variation of pH value and acid rain frequency of precipitation in Tongling

将3月、4月、5月划为春季,6月、7月、8月划为夏季,9月、10月、11月划为秋季,12月、1月、2月划为冬季。2011—2019年铜陵市4个季节的降水pH值由高到低依次为夏季(5.5) $>$ 春季(5.3) $>$ 秋季(5.2) $>$ 冬季(5.1),4个季节的酸雨频率由

高到低依次为秋季(32.4%) $>$ 春季(21.7%) $>$ 冬季(17.0%) $>$ 夏季(14.9%)。

铜陵市夏季酸雨状况较好,在秋冬季较差。分析原因可能是由于铜陵市位于内陆腹地,属于季风气候,夏季盛行东南风,冬季盛行西北风^[12-13]。在冬季,由于大气扩散条件较差及本地酸性气体排放量增加,叠加北方地区NO_x和SO₂等酸性污染物的长距离输送,会加重铜陵市的酸雨污染^[14];在夏季,酸雨前体物的浓度较低且大气扩散条件好,加之影响铜陵市的气流为相对清洁的东南气流,对铜陵市酸雨污染具有一定的缓解作用^[15]。

2.2 离子成分分析

2.2.1 酸雨类型分析

SO₄²⁻和NO₃⁻的浓度比是反映阴离子含量变化的重要指标,也是判定酸雨类型的一个重要依据^[16]。图3为2011—2019年铜陵市SO₂和NO_x的排放量及SO₄²⁻与NO₃⁻的浓度比。由图3可见,铜陵市SO₄²⁻与NO₃⁻的浓度比整体呈现下降趋势,从2011年的4.05下降到2019年的1.25,峰值出现在2012年(4.98)。表明2011年以来铜陵市SO₄²⁻对降水酸度的影响大于NO₃⁻,NO₃⁻对降水酸度的影响呈现增加趋势,铜陵市的酸雨类型由硫酸型逐渐转变为硫酸-硝酸混合型,大气中NO_x对酸雨形

成的贡献率不断升高。2015 年以来,安徽省大力开展脱硫脱硝工作,废气排放企业的含硫、氮气体排放量得到大幅削减,2019 年铜陵市的 SO₂ 和 NO_x 排放量较 2011 年分别下降了 82% 和 50%, NO_x 排放量下降幅度小于 SO₂, 主要是由于铜陵市汽车保有量的激增^[17]。通过查阅铜陵市统计部门数据发现,2014 年铜陵市机动车保有量不到 10 万辆,到 2018 年 6 月达到 22.5 万辆,年均增加 4 万辆。因此,随着机动车数量的迅速增加,排放的 NO_x 已经成为铜陵市酸雨的主要贡献因素之一。

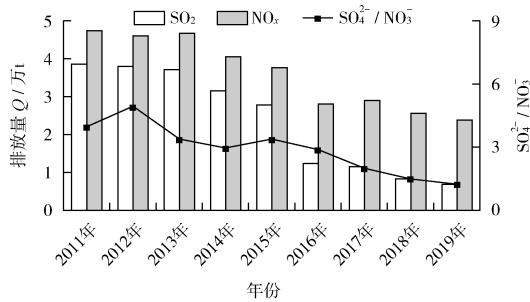


图 3 2011—2019 年铜陵市 SO₂ 和 NO_x 的排放量及 SO₄²⁻ 与 NO₃⁻ 的浓度比

Fig. 3 Emissions of SO₂ and NO_x, concentration ratio of SO₄²⁻/NO₃⁻ from 2011 to 2019 in Tongling

2.2.2 降水离子组分分析

对 2011—2019 年铜陵市所有降水样本中主要

阴阳离子浓度占比分析发现,在主要阳离子中 Ca²⁺、NH₄⁺ 占阴阳离子总浓度比例分别为 24.44%、21.03%,二者之和约占阳离子总浓度的 82.04%。SO₄²⁻、NO₃⁻ 是铜陵市降水中的主要阴离子,占阴阳离子总浓度比例分别为 21.52%、14.25%,二者共占阴离子总浓度的 80.23%。F⁻、Cl⁻、Mg²⁺、Na⁺ 和 K⁺ 占阴阳离子总浓度的比例分别为 2.06%、6.75%、2.72%、4.58% 和 2.65%。

从 2011—2019 年铜陵市离子组分浓度占离子总浓度百分比变化情况(见表 2)可以发现,降水中主要阴离子是 SO₄²⁻,其离子浓度占比范围为 14.60% (2019 年)~27.34% (2012 年),总体呈下降趋势,2019 年较最高水平下降 12.74 个百分点;NO₃⁻ 离子浓度占比范围为 10.98% (2012 年)~23.36% (2019 年),总体呈上升趋势,2019 年达到最高水平,较最低水平上升 12.38 个百分点;NH₄⁺ 离子浓度占比范围为 11.21% (2013 年)~40.18% (2018 年),总体呈上升趋势,2019 年较最低水平上升 24.76 个百分点;Ca²⁺ 离子浓度占比范围为 12.66% (2018 年)~33.20% (2014 年),总体呈下降趋势,2019 年较最高水平下降 18.00 个百分点;F⁻、Cl⁻、Mg²⁺、Na⁺ 和 K⁺ 占比情况比较类似,总体呈现下降趋势,2019 年较最高水平下降幅度范围为 2.15 (F⁻)~7.72 (Na⁺) 个百分点。总的来说,铜陵市降水中虽然主要致酸离子为 SO₄²⁻,但 NO₃⁻ 的贡献在逐渐增强。

表 2 2011—2019 年铜陵市降水中各离子浓度占比

Table 2 Proportion of each ion concentration in precipitation in Tongling from 2011 to 2019

年份	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	F ⁻	Cl ⁻	NH ₄ ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺
2011 年	24.13	11.92	2.93	8.78	15.81	23.08	4.02	5.94	3.39
2012 年	27.34	10.98	2.92	4.34	13.77	33.20	2.65	3.08	1.72
2013 年	20.59	12.05	1.95	11.48	11.21	23.77	3.51	9.99	5.45
2014 年	22.04	14.67	1.96	4.16	22.06	29.44	1.94	2.26	1.47
2015 年	21.19	12.32	1.73	3.81	23.84	31.85	1.80	1.81	1.65
2016 年	20.60	14.19	1.66	6.46	24.37	24.06	2.15	4.46	2.05
2017 年	18.18	17.83	1.72	5.95	31.99	17.32	2.57	2.77	1.67
2018 年	16.59	21.75	0.84	4.14	40.18	12.66	1.37	1.39	1.08
2019 年	14.60	23.36	0.78	4.95	35.97	15.20	1.48	2.27	1.39

2.2.3 沉降通量及碱性离子中和能力分析

表 3 为 2011—2019 年铜陵市降水中各离子的沉降通量。由表 3 可知,2011—2019 年铜陵市降水中 SO₄²⁻ 沉降通量为 2.63 t/km²~27.64 t/km²,2016 年最高,2011 年最低,自 2016 年以后呈下降

趋势,2019 年较 2016 年下降 68.4%;2016—2019 年,SO₂ 质量浓度从 40 μg/m³ 下降至 15 μg/m³,下降幅度达 62.5%,铜陵市 SO₂ 质量浓度变化与 SO₄²⁻ 沉降通量变化趋势一致。NO₃⁻ 沉降通量为 0.82 t/km²~11.22 t/km²,2016 年最高,2011 年最

低,自2016年以后呈下降趋势,2019年较2016年下降26.8%;2016—2019年 NO_2 质量浓度从 $39 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 下降至 $37 \mu\text{g}/\text{m}^3$,下降幅度为5.1%,铜陵市 NO_2 质量浓度变化与 NO_3^- 沉降通量变化趋势基本一致。其他离子沉降通量变化与上述离子沉降通量变化一致。

总体来看,2015年以来,随着安徽省大气污染防治力度加大,各项污染治理措施得到有效实施,大气中的 SO_2 质量浓度得到大幅削减,降水中 SO_4^{2-} 沉降通量也随之逐年下降;大气中的 NO_2 质量浓度稳中有降,降水中 NO_3^- 沉降通量也随之稳中有降。

表3 2011—2019年铜陵市降水中各离子的沉降通量 t/km^2
Table 3 Deposition flux of each ion in precipitation in Tongling from 2011 to 2019 t/km^2

年份	SO_4^{2-}	NO_3^-	F^-	Cl^-	NH_4^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+
2011年	2.63	0.82	0.06	0.22	0.27	1.11	0.08	0.20	0.12
2012年	17.55	3.29	0.38	0.99	1.25	9.36	0.35	0.47	0.40
2013年	7.93	2.31	0.14	1.04	0.80	3.66	0.33	0.66	0.58
2014年	5.99	2.60	0.11	0.46	1.47	2.81	0.12	0.13	0.17
2015年	24.57	8.71	0.42	1.85	5.38	18.95	0.74	0.58	0.94
2016年	27.64	11.22	0.49	3.57	5.98	13.78	0.94	1.19	1.25
2017年	14.28	8.44	0.30	1.79	4.46	5.25	0.50	0.57	0.52
2018年	8.63	6.77	0.09	0.82	4.03	2.74	0.18	0.16	0.23
2019年	8.73	8.21	0.10	1.23	3.84	4.01	0.31	0.41	0.36

将2019年铜陵市降水中pH值、主要碱性离子浓度及其中和能力与安徽省内其他地区进行对比,见表4。由表4可知,铜陵市及省内其他城市主要碱性离子组成相似,碱性离子中 Ca^{2+} 和 NH_4^+ 浓度较高。查阅文献发现, Ca^{2+} 主要来自地面扬

尘, NH_4^+ 可能来自生物质腐败、土壤、机动车排放和二次反应生成^[18-19]。铜陵市降水pH值高于安庆市和黄山市,低于其他城市,这可能是由于铜陵市降水受到碱性离子的中和作用。

表4 铜陵市与周边城市降水中pH值、碱性离子浓度及其中和能力比较
Table 4 Comparison of pH value, alkaline ion concentration and its neutralization capacity in precipitation between Tongling and surrounding cities

地区	pH值	浓度 $c/(\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1})$					中和能力				
		NH_4^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	$N(\text{NH}_4^+)$	$N(\text{Ca}^{2+})$	$N(\text{Mg}^{2+})$	$N(\text{Na}^+)$	$N(\text{K}^+)$
铜陵市	5.81	85.33	40.05	5.17	7.09	3.69	0.96	0.45	0.06	0.08	0.04
黄山市	5.24	23.06	7.68	1.79	4.52	3.87	0.26	0.09	0.02	0.05	0.04
安庆市	5.40	37.44	21.58	3.00	5.09	2.36	0.42	0.24	0.03	0.06	0.03
池州市	6.59	60.89	43.68	3.00	3.48	10.41	0.68	0.49	0.03	0.04	0.12
芜湖市	6.27	86.67	35.45	6.79	7.09	9.00	0.97	0.40	0.08	0.08	0.10
淮北市	6.89	78.89	59.63	12.21	24.35	4.92	0.88	0.67	0.14	0.27	0.06
阜阳市	6.78	51.78	18.33	4.38	2.96	2.05	0.58	0.21	0.05	0.03	0.02
合肥市	6.24	70.89	25.50	2.96	5.87	3.85	0.79	0.29	0.03	0.07	0.04
滁州市	5.90	104.44	95.23	12.75	26.00	12.10	1.17	1.07	0.14	0.29	0.14

铜陵市降水中的主要中和离子为 NH_4^+ 和 Ca^{2+} ,其中 NH_4^+ 中和能力最强(0.96), Ca^{2+} 次之(0.45),远高于其他3种碱性离子。铜陵市周边城市情况都较为类似,均是 NH_4^+ 中和能力最强;距离铜陵市较远的淮北市和滁州市的 Ca^{2+} 中和能力与 NH_4^+ 中和能力较为接近,其余城市差距较大。

3 结论

(1)从年度来看,2011年以来,铜陵市年均降水pH值在5.04~6.38之间,年均未出现强酸雨。铜陵市酸雨状况在2011—2015年逐年好转,2015年达到最好水平,2016年发生恶化,虽然之后逐渐好转,但酸雨问题依然存在。

(2) 从月度来看, 全年有 11 个月降水 pH 值 < 5.6, 其中 10 月的降水 pH 值最低(4.96), 为强酸性降水。铜陵市酸雨发生情况具有明显的季节变化特征, 酸雨频率与降水 pH 值呈反相关关系。

(3) 2019 年 SO_4^{2-} 沉降通量较 2016 年下降 68.4%, NO_3^- 沉降通量较 2016 年下降 5.1%, 铜陵市大气中 SO_2 质量浓度变化趋势与 SO_4^{2-} 沉降通量变化趋势十分吻合。

(4) 铜陵市降水中主要阳离子为 NH_4^+ 和 Ca^{2+} , 主要阴离子为 SO_4^{2-} 和 NO_3^- , 主要中和离子为 NH_4^+ 和 Ca^{2+} 。 SO_4^{2-} 与 NO_3^- 的浓度比呈逐年下降趋势, 说明铜陵市酸雨污染类型正由原来的硫酸型向硫酸-硝酸型转变。机动车尾气已经成为影响铜陵市酸雨形成一个不可忽视的因子。

[参考文献]

- [1] 王文兴, 许鹏举. 中国大气降水化学研究进展[J]. 化学进展, 2009, 21(2/3): 266 - 281.
- [2] 李一, 张国正, 濮梅娟, 等. 2006 年南京冬季浓雾雾水的化学组分[J]. 中国环境科学, 2008, 28(5): 395 - 400.
- [3] 巴金, 汤洁, 王淑凤, 等. 重庆地区近 10 年酸雨时空分布和季节变化特征[J]. 气象, 2008, 34(9): 81 - 88.
- [4] 冯宗炜. 中国酸雨的生态影响和防治对策[J]. 云南环境科学, 2000, 19(S1): 1 - 6.
- [5] 王子健, 朱欣, 高松. 酸雨、遮阴胁迫对加拿大一枝黄花光合生理特征的影响[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2015, 43(2): 113 - 118.
- [6] 谢田, 高小峰, 黄晟, 等. 重金属建筑废物中污染物随酸雨的迁移研究[J]. 山东化工, 2015, 44(6): 157 - 160.
- [7] 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.
- [8] 中华人民共和国生态环境部. 2019 年中国生态环境状况公报[EB/OL]. (2020 - 06 - 02) [2021 - 05 - 18]. <http://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/zghjzkgb/202006/P020200602509464172096.pdf>.
- [9] 罗益华, 励珍. 宁波市区近十年酸雨污染趋势分析[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(12H): 252 - 253, 300.
- [10] 解淑艳, 王胜杰, 于洋, 等. 2003—2018 年全国酸雨状况变化趋势研究[J]. 中国环境监测, 2020, 36(4): 80 - 88.
- [11] 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, 38(10): 4438 - 4446.
- [12] 王剑, 徐美, 叶霞, 等. 沧州市大气降水化学特征分析[J]. 环境科学与技术, 2014, 37(4): 96 - 102.
- [13] 王烈福, 宋玲玲, 蔡玉琴, 等. 长江源酸雨变化特征及来源分析[J]. 高原气象, 2017, 36(5): 1386 - 1393.
- [14] 牛彧文, 浦静姣, 邓芳萍, 等. 1992—2012 年浙江省酸雨变化特征及成因分析[J]. 中国环境监测, 2017, 33(6): 55 - 62.
- [15] 刘贵荣, 汪伟峰, 周军, 等. 宁波市“十二五”与“十一五”期间酸雨污染特征变化趋势分析[J]. 中国环境监测, 2018, 34(3): 39 - 44.
- [16] 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.
- [17] 李艳萍, 何涛. 常州市 NO_2 污染特征及一次污染过程分析[J]. 环境监测管理与技术, 2019, 31(4): 68 - 71.
- [18] 孙韧, 张文具, 董海燕, 等. 天津市 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 中水溶性离子化学特征及来源分析[J]. 中国环境监测, 2014, 30(2): 145 - 150.
- [19] 宁伟征, 狄世英, 刘焕武, 等. 邢台市采暖季 $\text{PM}_{2.5}$ 中水溶性离子污染特征及来源分析[J]. 环境监测管理与技术, 2020, 32(4): 61 - 64.
- [3] 谢花林. 土地利用生态安全格局研究进展[J]. 生态学报, 2008, 28(12): 6305 - 6311.
- [4] 高建军, 邢博文, 杨凯. 基于熵权法的土地生态安全评价研究——以陕西省为例[J]. 西部大开发(土地开发工程研究), 2018(8): 46 - 49.
- [5] 李子君, 王硕, 马良, 等. 基于熵权物元模型的沂蒙山区土地生态安全动态变化及其影响因素研究[J]. 土壤通报, 2021, 52(2): 425 - 433.
- [6] 郑岚, 张志斌, 笪晓军, 等. 嘉峪关市土地生态安全动态评价及影响因素分析[J]. 干旱区地理, 2021, 44(1): 289 - 298.
- [7] 黄烈佳, 杨鹏. 长江经济带土地生态安全时空演化特征及影响因素[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(8): 1780 - 1790.
- [8] 刘斌涛, 刘邵权, 陶和平, 等. 基于 GIS 的山区土地资源安全定量评价模型——以四川省凉山州为例[J]. 地理学报, 2011, 66(8): 1131 - 1140.
- [9] 贺正思宇, 谢玲, 梁保平, 等. 基于 CA-Markov 模型的漓江流域土地利用模拟研究[J]. 生态科学, 2020, 39(5): 142 - 150.
- [10] 邵秋芳, 彭培好, 黄洁, 等. 长江上游安宁河流域生态环境脆弱性遥感监测[J]. 国土资源遥感, 2016, 28(2): 175 - 181.
- [11] 熊建华, 唐将伟. 广州市土地生态安全与社会经济发展耦合协调研究[J]. 安全与环境学报, 2019, 19(2): 615 - 620.
- [12] 贾伟, 高小红, 谷晓天, 等. 湟水流域土地资源环境承载力分析[J]. 环境监测管理与技术, 2020, 32(6): 13 - 17.
- [13] 张洁, 焦树林, 赵宗权, 等. 基于 GIS 的百花湖流域土地利用变化与水质响应[J]. 环境监测管理与技术, 2020, 32(3): 14 - 18.
- [14] 唐怡, 韦仕川, 王湃. 基于 GIS 的区域土地利用均衡度时空差异研究——以海南省为例[J]. 中国农业资源与区划, 2017, 38(5): 41 - 47.
- [15] 杜英坤, 燕琴, 骆成凤, 等. 石家庄 1995—2015 年植被覆盖变化监测及预测[J]. 遥感信息, 2016, 31(4): 101 - 107.
- [16] 张召鹏. 基于 CA-MARKOV 模型的辽宁省大连市金州区土地生态安全评价[J]. 国土与自然资源研究, 2018(1): 27 - 30.

本栏目编辑 谢咏梅

(上接第 31 页)