第 17 卷 第 3 期
2023 年 6 月

沙 漠 与 绿 洲 气 象
Desert and Oasis Meteorology

李莹,赵振东,李文星,等.2012—2019 年河北省不同气候区酸雨特征及影响因子分析[J].沙漠与绿洲气象,2023,17(3):99-106.
doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2023.03.014

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

2012—2019 年河北省不同气候区酸雨特征及影响因子分析

李　莹,赵振东*,李文星,张　静
(中国气象局气象干部培训学院河北分院,河北　保定 071000)

摘　要:利用河北省 20 个酸雨观测站 2012—2019 年的酸雨观测日数据和 2013—2019 年的 SO_2、CO、NO_2、O_3、PM_{10}、$PM_{2.5}$ 环境气象逐日数据,分析了河北省不同气候区酸雨特征及其与其他要素的关系。结果表明:(1)近 8 年来,强、弱酸雨日数呈逐年减少趋势。强、弱酸雨在燕山丘陵气候区与冀东平原气候区交界的东部发生概率均较其他地区高。此外,弱酸雨在太行山气候区与山前平原气候区交界的南部发生概率较高。(2)当降水级别为小雨,太行山气候区主导风向为北风、山前平原气候区主导风向为东北风、冀东平原气候区主导风向为东北风、燕山丘陵气候区主导风向为东风、冀北高原气候区主导风向为东南风,有利于河北省各气候区发生强酸雨。(3)冀北高原气候区及山前平原气候区发生大雨及以上级别的降水事件时,对 SO_2、NO_2 清除效果较好;燕山丘陵气候区、太行山气候区及冀东平原气候区发生中小雨级别的降水事件时,对 SO_2、NO_2 清除效果较好。

关键词:酸雨;气候区;降水化学;河北省
中图分类号:X517　　**文献标识码:**A　　**文章编号:**1002-0799(2023)03-0099-08

pH< 5.60 的大气降水称为酸雨,形式主要包含液态降水、固态降水和混合降水[1-2]。酸雨的危害是多方面的,包括对生态系统、建筑设施甚至人体健康都有直接或潜在的危害[3-5]。随着影响程度不断扩大,酸雨已成为一个全球性的环境问题[6],为了解我国酸雨污染状况,1992 年,中国气象局组建了酸雨观测网[7-8]。我国的酸雨污染在 20 世纪 80 年代呈现加重的趋势,90 年代已经成为世界第三大污染区[9],90 年代中期我国酸雨污染逐渐减弱,21 世纪初期,随着我国经济再次飞速发展,酸雨问题再次恶化,现今处于持续改善阶段,但酸雨问题仍然受到学者们的广泛关注[10-12]。

有关酸雨的研究表明,酸雨主要由氮氧化物、二氧化硫等致酸气体进入大气所造成[13-14]。局地污染源、适当的天气气候条件有利于酸雨的发生[15-18]。张良玉等[19]研究发现,2012—2017 年京津冀区域较弱酸雨出现的频率较其他等级酸雨出现的频率高,83%的特强酸雨出现在 2012、2013 年。王苗等[20]利用质量控制后的 1990—2014 年酸雨逐日观测数据分析武汉市酸雨变化特征,结果表明,武汉市强酸雨 pH 值和电导率呈显著负相关,非酸雨 pH 值和电导率呈显著正相关。学者们虽然对酸雨特征有所研究[21],但对不同气候区酸雨特征研究较少。河北省是我国重要的交通枢纽、农业生产区及工业制造区,其气候和地理分布复杂,酸雨对该地区的国民经济发展具有重大影响[22]。因此研究河北省不同气候区酸雨特征及其影响因子,对于理解河北省酸雨变化规

收稿日期:2021-09-28;**修回日期:**2021-12-30
基金项目:中国气象局气象干部培训学院项目(2021021);中国气象局气象干部培训学院河北分院自立教科研项目(2021kyd01)
作者简介:李莹(1990—),女(壮族),工程师,主要从事气候变化研究。E-mail:lgdxliying@126.com
通信作者:赵振东(1963—),男,正高级工程师,主要从事综合气象观测研究。E-mail:zzd6307@sohu.com

律以及评估该区域的降水特征具有重要意义。

1 资料与方法

1.1 数据来源及处理

所用资料为河北省 20 个观测站（图 1）2012—2019 年酸雨日数据以及对应观测站 2013—2019 年 SO_2(24 h)、NO_2(24 h)逐日浓度。采用 K-pH 不等式法对酸雨观测资料进行质量控制[23]，得到 2012—2019 年 7 100 条记录。

研究风向时，对风向资料进行筛选分析[24]，即降水开始时间为 06—18 时的酸雨用 08 时观测的地面风向资料，降水开始时间为 18 时—次日 06 时的酸雨用 20 时的地面风向资料，将风向分为 16 个方位。

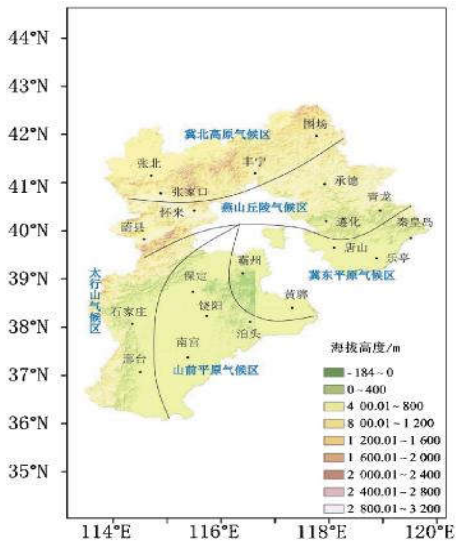

图 1 河北省 20 个气象站点及气候区分布

河北省大体上由高原、山地和平原，即坝上高原和由燕山与太行山所构成的山地以及河北平原三部分组成（高原位于西北缘，燕山自西向东，太行山自北向南构成“弧形山脉”环抱河北平原），并且西北向东南依次排列，形成西北高、东南低逐级下降的地势。根据河北省自然地理条件和气候地理分布特征，将全省分为冀北高原气候区、燕山丘陵气候区、太行山气候区、山前平原气候区和冀东平原气候区 5 个气候区[25]，其所属站点见表 1。

1.2 酸雨等级划分

《酸雨和酸雨区等级》(QX/T 372—2017)[26]将酸雨等级划分为四类：较弱酸雨(5.0≤pH<5.6)、弱酸雨(4.5≤pH<5.0)、强酸雨(4.0≤pH<4.5)以及特强酸雨(pH<4.0)。本文将酸雨统分为弱酸雨(4.5≤pH<5.6)和强酸雨(pH<4.5)两个等级。

表 1 河北省 5 个气候区及其所属站点

气候区	包含站点
冀北高原气候区	张北、张家口、丰宁、围场
燕山丘陵气候区	蔚县、怀来、遵化、承德、青龙
太行山气候区	石家庄、邢台
山前平原气候区	保定、饶阳、南宫、泊头
冀东平原气候区	霸州、黄骅、唐山、乐亭、秦皇岛

2 结果与分析

2.1 河北省不同强度酸雨的特征分析

2.1.1 不同气候区酸雨日数的变化趋势

图 2 为 2012—2019 年河北省不同气候区酸雨日数的逐年变化情况。各气候区的强酸雨日数均呈现逐年减少的趋势，强酸雨日数平均值大小顺序为燕山丘陵气候区>冀东平原气候区>山前平原气候区>冀北高原气候区>太行山气候区(图 2a)。其中，冀北高原气候区及冀东平原气候区强酸雨日数呈逐年减少趋势。燕山丘陵气候区及山前平原气候区强酸雨日数最大值均出现在 2013 年，呈先增加后减少趋势。太行山气候区强酸雨日数呈先减少后增多趋势。燕山丘陵气候区、冀东平原气候区及太行山气候区的弱酸雨日数变化较为一致，呈减少—增加—减少的交替变化(图 2b)，均在 2016 年出现反弹，其原因有待进一步研究。山前平原气候区弱酸雨日数的

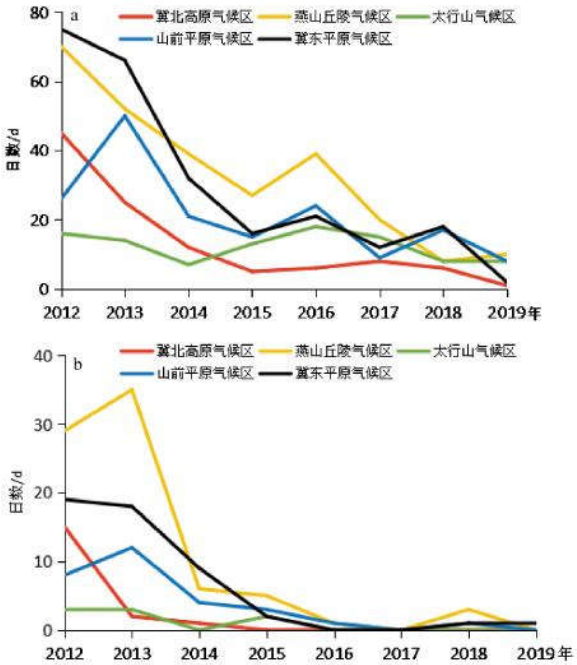

图 2 2012—2019 年河北省不同气候区酸雨日数的逐年变化

(a 为强酸雨，b 为弱酸雨)

最大值出现在 2013 年,且呈增多—减少—增多—减少—增多—减少的交替变化。冀北高原气候区的弱酸雨日数呈逐年减少趋势。

从表 2 中可以看出,2012—2018 年河北省 SO_2 与 NO_X 的排放总量呈逐年减少趋势,且《2019 年河北省生态环境质量状况公报》中提到,河北省 2019 年二氧化硫、氮氧化物排放总量持续下降,提前完成“十三五”约束性指标。

表 2　2012—2018 年河北省 SO_2 和 NO_x 排放总量统计　　万 t

污染物	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年
SO_2	134.1	128.47	118.99	110.84	78.94	60.24	49
NO_x	176.1	165.23	151.25	135.08	112.66	105.8	96.5

注:资料来源为《河北省生态环境状况公报》和《中国统计年鉴》。

河北省各气候区的酸雨日数在近8 年均呈现明显减少趋势,说明随着“大气十条”等一系列污染防治规划的实施,河北省污染物排放总量持续降低,酸雨污染得到大幅改善。

2.1.2　不同强度酸雨日数的空间分布

图 3 是 2012—2019 年河北省强酸雨日数的空间分布。强酸雨日数最大值顺序为秋季>夏季>春季>冬季, 燕山丘陵气候区与冀东平原气候区交界的东部,即河北省东北地区,强酸雨四季发生概率较其他地区高。春季、夏季强酸雨在山前平原气候区的中南部,即河北省西南地区发生的概率较高。强酸雨日数的空间分布呈现“一个中心”的特征。

由 2012—2019 年河北省弱酸雨日数的空间分布(图 4)可知,弱酸雨日数最大值顺序为夏季>秋季>春季>冬季,燕山丘陵气候区与冀东平原气候区交界的东部和太行山气候区与山前平原气候区交界

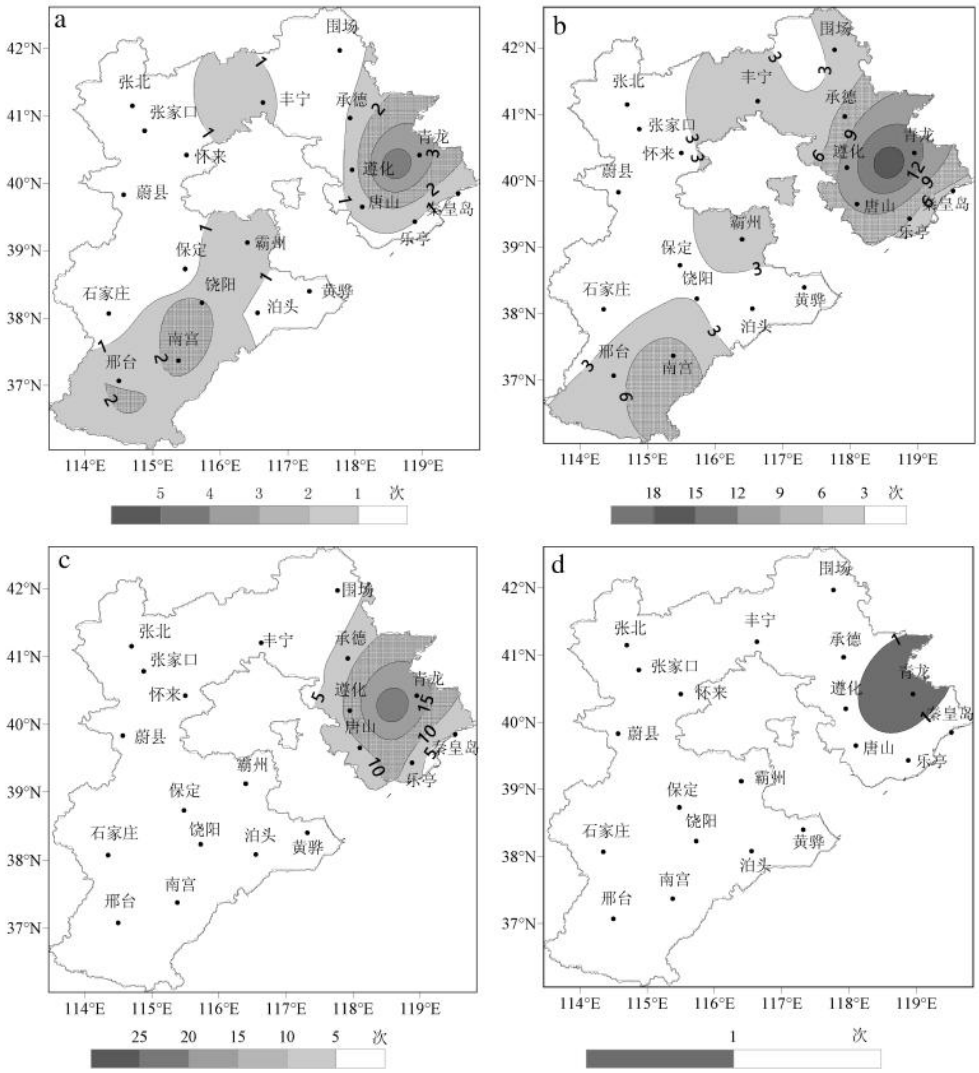

图 3　河北省强酸雨日数的季节空间分布

(a 为春季,b 为夏季,c 为秋季,d 为冬季)

的南部,即河北省东北及西南地区,弱酸雨四季发生概率较其他地区高。冀东平原气候区,即河北省中部地区,弱酸雨夏季、秋季、冬季发生的概率相对较高。河北省弱酸雨日数的空间分布呈现“两个中心”的特征。

2.2 酸雨与其他要素的相关分析

2.2.1 不同强度酸雨 pH 值与降水量的关系

由河北省强酸雨、弱酸雨发生概率随降水级别的变化(图 5a)可知,随着降水级别的增大,5 个气候区发生强酸雨的概率均逐渐降低。降水量级为暴雨及以上时,冀北高原气候区及太行山气候区没有发生强酸雨,表明强降水能够稀释酸性污染物,有效降低强酸雨发生的概率,这和缪明榕等[27]研究结论一致。且冀北高原气候区地势比较平坦开阔,常见八级

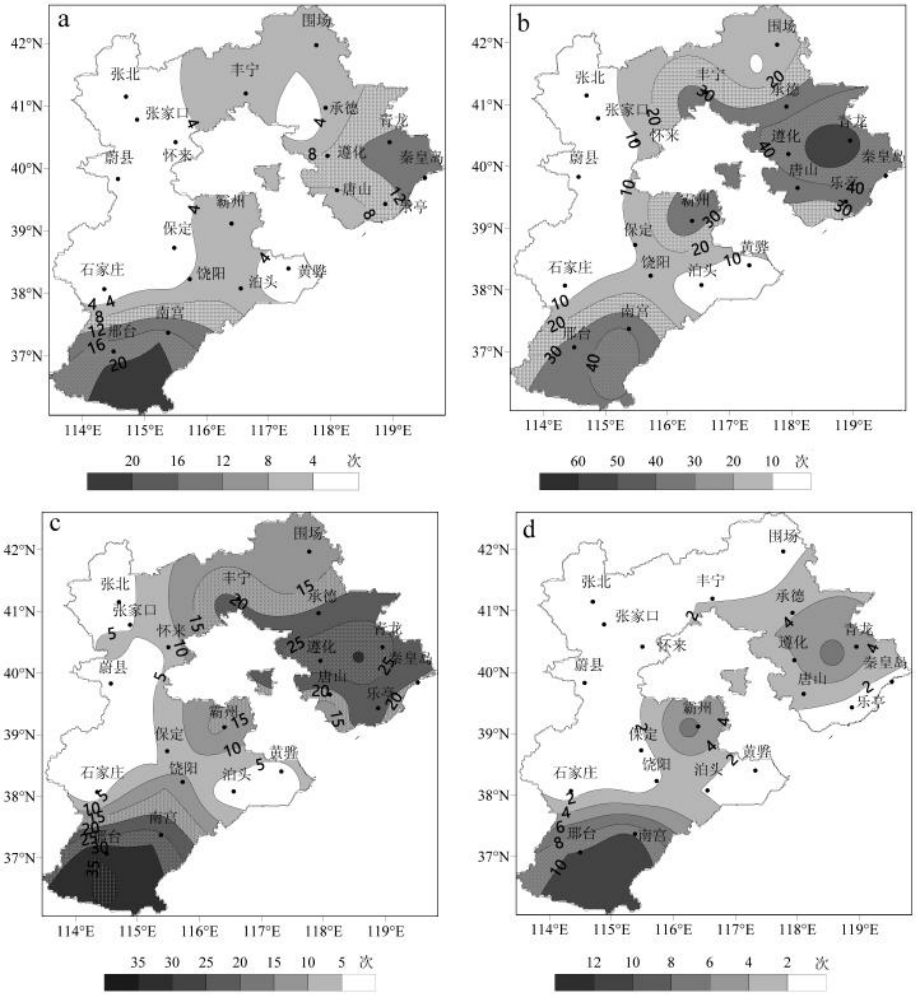

图 4 河北省弱酸雨日数的季节空间分布

(a 为春季,b 为夏季,c 为秋季,d 为冬季)

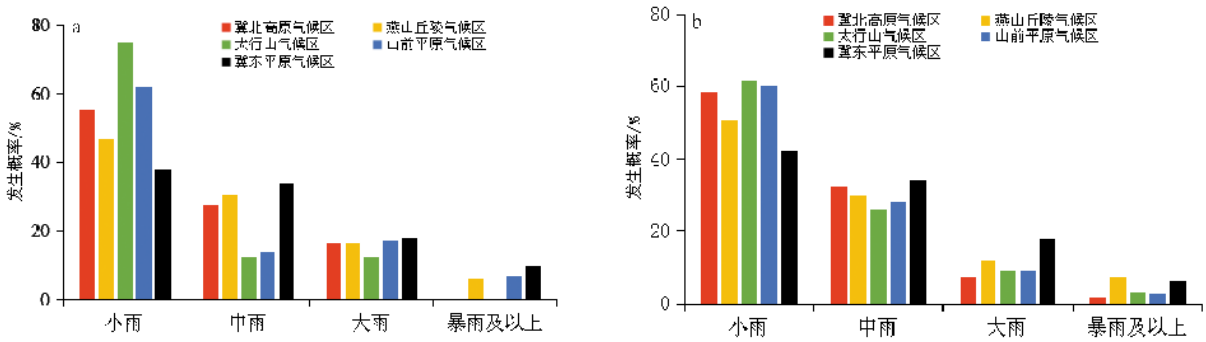

图 5 河北省不同强度酸雨发生概率与降水量的关系

(a 为强酸雨,b 为弱酸雨)

以上的大风,太行山气候区降雨较多,会出现持续性特大暴雨,为扩散与稀释大气污染物创造了有利条件。

由弱酸雨发生概率随降水级别的变化(图 5b)可知,随着降水级别的增大,5 个气候区发生弱酸雨的概率也逐渐降低。5 个气候区在相同级别降水量的影响下,发生弱酸雨的概率相差不大。

2.2.2 影响酸雨的风向特征

风对大气中污染物的扩散速度及方向有一定的影响,由不同风向上强酸雨发生的频率(图 6)可知,冀北高原气候区、燕山丘陵气候区、太行山气候区的当主导风向分别为东南风、东风、北风时,山前平原气候区、冀东平原气候区的主导风向为东北风时,强酸雨发生频率较高。由不同风向上弱酸雨发生的频率(图 7)可知,冀北高原气候区、燕山丘陵气候区、太行山气候区、山前平原气候区、冀东平原气候区的主导风向分别为西北风或东南风、东北风、东北风或西北风、北风、东北风或东南风时,弱酸雨发生频率较高。

河北省位于环渤海经济圈,大型化工、制造企业林立,且地处北方,冬季有供暖需求,给大气污染防治带来巨大的压力,在 20 个空气质量相对较差的城市中,有 5 个位于河北,分别为石家庄、保定、唐山、邢台、邯郸,20 个酸雨观测站中的邢台、南宫、石家庄、唐山、乐亭、遵化、保定站均位于污染物浓度较高的城市[28]。结合各气候区的气候特征,可以得出,在东南风的影响下,冀北高原气候区易发生强酸雨,这可能是当降水天气系统的气流来向为东南方向时,途经工业城市唐山,携带了较多的大气污染物,使降水酸度升高,即冀北高原气候区的酸雨污染主要是由于区域输送形成的。对于燕山丘陵气候区,其海拔较高,石家庄、保定、邢台、邯郸来的污染物不易深入,当主导风向为东西风时,易发生强酸雨,即燕山丘陵气候区的酸雨污染主要是由于区域输送和本地污染共同作用形成的。太行山基本上呈南北走向,在一定程度上能够起着“屏障”作用,为太行山气候区阻挡来自保定、唐山的污染物质,当主导风向为北风时,易发生强酸雨,即太行山气候区的酸雨污染主要是由本地污染导致的。受燕山和太行山的阻挡,当冀东平原气候区发生强酸雨时,主导风向多为东北风,冀东平原气候区临海,从海面吹来的风携带污染物质较少,唐山位于冀东平原气候区的东北部,说明该气候区的污染源主要来自本地,从源头控制,就能改善其酸雨污染,即冀东平原气候区的酸雨污染主要是由本地污染造成。强、弱酸雨的主导风向相比,强酸雨的优势风向范围较弱酸雨小,且不同气候区发生酸雨的主导风向虽各不相同但范围比较集中,说明外来污染源对河北省酸雨的形成有一定的影响。

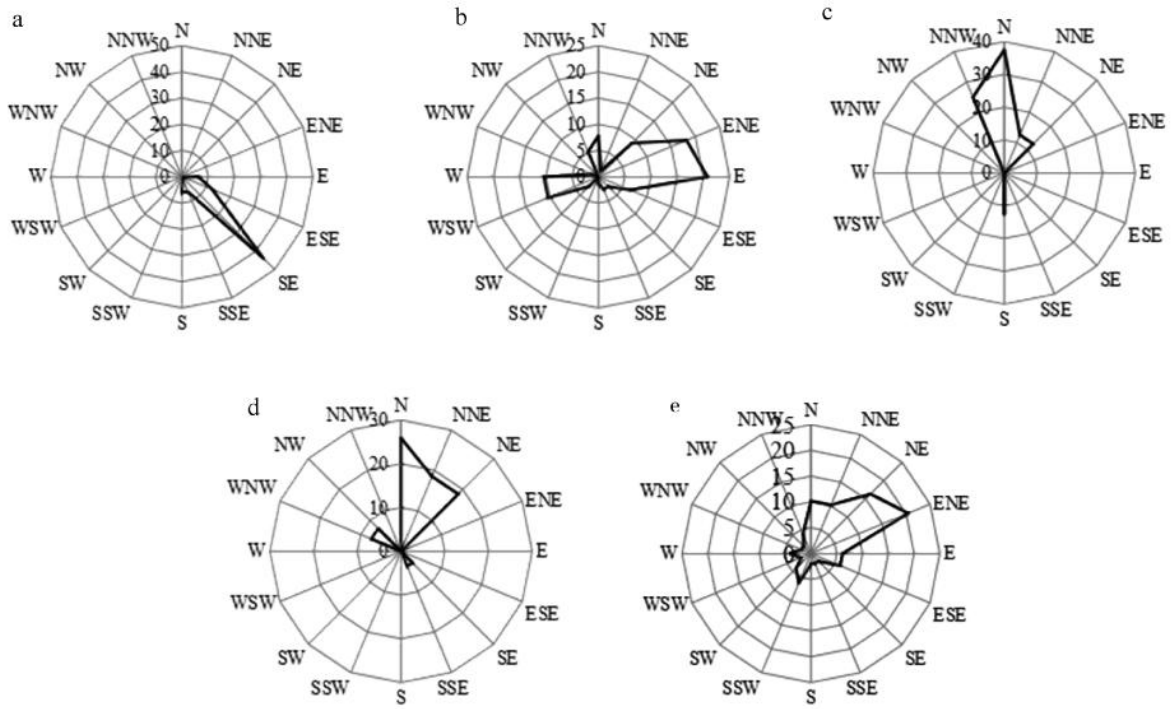

图 6 不同风向上强酸雨发生的频率

(a 为冀北高原气候区,b 为燕山丘陵气候区,c 为太行山气候区,d 为山前平原气候区,e 为冀东平原气候区;单位:%)

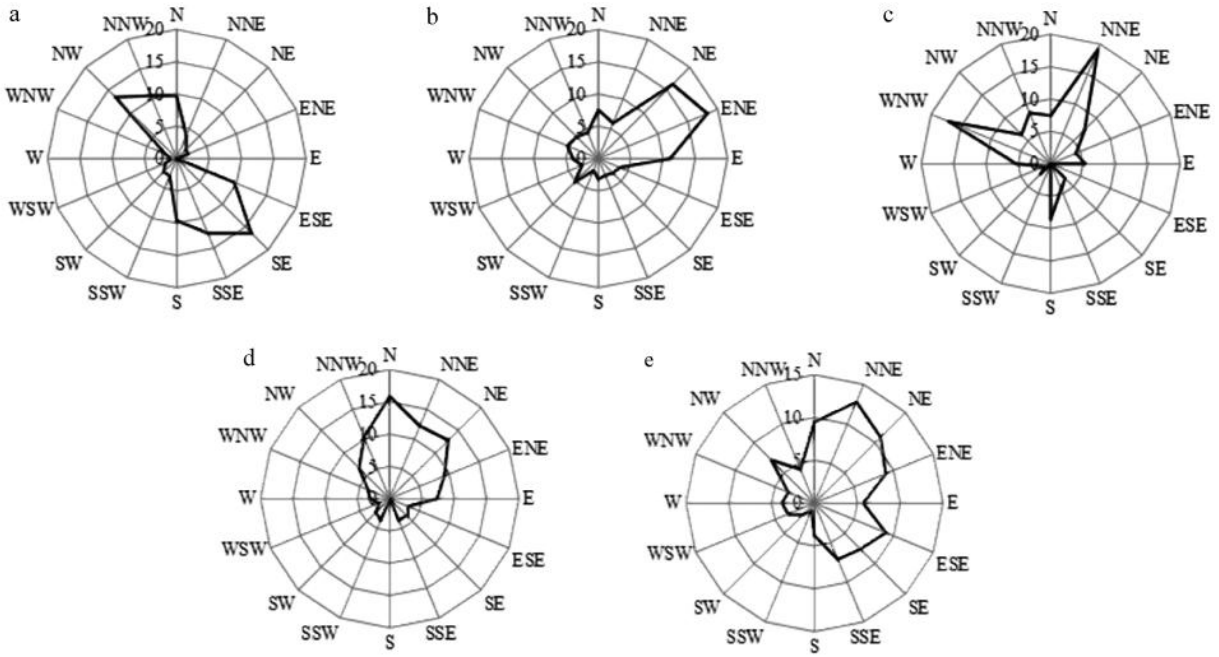

图 7 不同风向上弱酸雨发生的频率

（a 为冀北高原气候区，b 为燕山丘陵气候区，c 为太行山气候区，d 为山前平原气候区，e 为冀东平原气候区；单位：%）

2.2.3 酸雨污染物分析

酸雨的形成是一种复杂的大气物理和大气化学过程，SO_2、NO_2 等气态物质是使降水呈酸性的主要前体物。当降水级别为暴雨及以上时，2013—2019 年冀北高原气候区无酸雨事件。由酸雨事件发生前后 SO_2、NO_2 的浓度变化（表 3）可知，无论是小雨、中雨、大雨还是暴雨，降水对空气中的 SO_2、NO_2 有不同程度的清除，同一气候区 SO_2 的最大清除率大于 NO_2。当降水级别为大雨及以上时，冀北高原气候区及山前平原气候区对 SO_2、NO_2 的清除率较高。当降水级别为中小雨时，燕山丘陵气候区、太行山气候区及冀东平原气候区对 SO_2、NO_2 的清除率较高。清除作用不仅和降水量有关，还与雨强、降水时间有一定联系，中小雨的持续时间一般较长，大雨以上的暴雨主要以 1~6 h 的短时降水过程居多[29]，燕山丘陵气候区及冀东平原气候区多发强酸雨事件，即该地区 SO_2、NO_2 浓度较高，需要长时间的降水过程才会使其浓度下降。冀北高原气候区及山前平原气候区多发弱酸雨事件，即该地区 SO_2、NO_2 浓度均不高，短时降水有较好清除效果，故随着降水量增大，降水对 SO_2、NO_2 的清除率逐渐增大。且降水对前体物的清除效果和前体物的浓度关系密切，降水开始前前体物浓度不高时，降水对其清除效果不明显，降水开始前前体物浓度较高时，降水对其清除效果较好，这可能是当降水级别为中雨时，太行山气候区清除率较高的原因。

表 3 河北省不同气候区降水清除率 %

气候区	小雨		中雨		大雨		暴雨及以上	
	SO_2	NO_2	SO_2	NO_2	SO_2	NO_2	SO_2	NO_2
冀北高原气候区	26.4	22.6	20.8	22.9	42.0	41.7		
燕山丘陵气候区	31.7	32	33.1	31.8	37.4	25.9	7.7	21.1
太行山气候区	37.3	20.1	55.0	36.8	52.8	30.8	27.3	33.3
山前平原气候区	39.2	21.0	21.1	25.1	32.5	24.5	46.7	44.1
冀东平原气候区	44.2	37.5	49.9	30.0	43.5	33.4	24.4	31.0

注：清除率=（清除过程前浓度-清除过程后浓度）/清除过程前浓度。

3 结论

利用河北省 20 个酸雨观测站 2012—2019 年酸雨日数据及 2013—2019 年河北省自动气象观测站发布的逐日资料，分析河北省不同气候区酸雨特征及其影响因子。主要结论如下：

（1）近 8 年来，强酸雨和弱酸雨日数都呈现逐年减少趋势。

（2）强酸雨日数最大值出现在秋季，弱酸雨日数最大值出现在夏季。在空间分布上，强酸雨在燕山丘陵气候区与冀东平原气候区交界的东部，即在河北省东北地区，四季发生概率较其他地区高。弱酸雨在燕山丘陵气候区与冀东平原气候区交界的东部和太

行山气候区与山前平原气候区交界的南部，即河北省的东北及西南地区,四季发生概率较其他地区高。

(3)当降水级别为小雨时,太行山气候区易发生强酸雨,当降水级别为暴雨及以上时,冀东平原气候区易发生强酸雨。当主导风向为东南风时,冀北高原气候区易发生强酸雨;当主导风向为东风时,燕山丘陵气候区易发生强酸雨;当主导风向为北风时,太行山气候区易发生强酸雨;当主导风向为东北风时,山前平原气候区易发生强酸雨；当主导风向为东北风时,冀东平原气候区易发生强酸雨。

(4)河北省同一气候区 SO_2 的最大清除率大于 NO_2。当降水级别为大雨及以上时,冀北高原气候区及山前平原气候区对 SO_2、NO_2 的清除率较高。当降水级别为中小雨时,燕山丘陵气候区、太行山气候区及冀东平原气候区对 SO_2、NO_2 的清除率较高。

参考文献:

[1] 张占峰,王红磊,德力格尔,等.瓦里关大气降水的化学特征[J].大气科学学报,2014,37(4):502-508.

[2] 乔晓燕,尹佳莉,李林,等.2003—2015 年北京市观象台酸雨特征及长期趋势分析[J].沙漠与绿洲气象,2018,12(4):52-57.

[3] 苏艳,刘端阳,彭华青,等.无锡梅雨期湿沉降综合分析[J].气象科学,2016,36(4):547-555.

[4] 杜建飞,成天涛,马剑丽.上海地区酸雨气候特征及成因分析[J].大气科学学报,2015,38(1):137-143.

[5] 王桂芳,何云,马强,等.固原市酸雨变化特征及影响因素分析[J].沙漠与绿洲气象,2018,12(2):31-36.

[6] 许杨,杨宏青.湖北省 2007 年酸雨特征及其与气象污染条件的关系[J].暴雨灾害,2008,27(4):351-354.

[7] 汤洁,贾小芳,程红兵.酸雨观测质量考核方法的改进与评估[J].气象,2018,44(12):1618-1627.

[8] 王体健,高太长,张宏昇,等.新中国成立 70 年来的中国大气科学研究:大气物理与大气环境篇[J].中国科学:地球科学,2019,49(12):1833-1874.

[9] 王位泰,黄斌,姚玉璧,等.陇东黄土高原城市酸雨特征监测统计分析[J].干旱气象,2005(2):44-49.

[10] 罗红霞,宋韬,张自全,等.2009—2017 年南充市城区酸雨特征分析[J].中国环境监测,2020,36(1):82-87.

[11] 张霞,李兰,魏静.湖北西部城市酸雨特征及其与气象条件的关系[J].暴雨灾害,2007(2):175-178.

[12] 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.

[13] 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.

[14] 陈虹颖,赵新锋,何志东,等.2000—2016 年珠海市酸雨变化特征及酸雨概念模型[J].环境科学学报,2020,40(6):1998-2006.

[15] 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.

[16] 蒲维维,于波,赵秀娟,等.北京地区酸雨的天气影响因素及降水化学特征分析[J].气象科学,2012,32(5):565-572.

[17] 韩照全,毛佳,贾昕远,等.近 11 a 南京市酸雨变化及其成因分析[J].气象科学,2019,39(2):256-263.

[18] 李明华,陈芳丽,甘泉,等.2013—2016 年惠州市大气颗粒物质量浓度变化特征和典型污染过程分析[J].气象与环境科学,2019,42(2):89-96.

[19] 张良玉,魏丽欣,赵春雷,等.2012—2017 年京津冀区域酸雨变化特征[J].气象与环境学报,2019,35(4):47-54.

[20] 王苗,吕桅桅,王凯,等.武汉市酸雨变化特征及影响因子分析[J].气象,2019,45(2):282-289.

[21] 黄菊梅,何筱仙,吴思雁,等.洞庭湖滨湖酸雨特征及气象影响因子[J].气象与环境科学,2019,42(2):82-88.

[22] 汤洁,徐晓斌,巴金,等.近年来京津地区酸雨形势变化的特点分析——气溶胶影响的探讨[J].中国科学院研究生院学报,2007,24(5):667-673.

[23] 汤洁,徐晓斌,杨志彪,等.电导率加和性质及其在酸雨观测数据质量评估中的应用[J].应用气象学报,2008,19(4):385-392.

[24] 黄立丹,张日佳,张立峰,等.杭州地区酸雨分布特征及影响因素[J].气象科技,2013,41(6):1138-1146.

[25] 宋善允.河北气候特征及气候资源[M].石家庄:河北科学技术出版社,2016:14.

[26] 中国气象局.酸雨和酸雨区等级,QX/T 372-2017[S].北京:气象出版社,2017.

[27] 缪明榕,周红根,王辉,等.南通地区酸雨变化特征及影响因素分析[J].科学技术与工程,2020,20(1):388-396.

[28] 于慧丽.京津冀跨域环境治理政策协同研究[D].秦皇岛:燕山大学,2021.

[29] 王子欣.我国东部不同等级降水概率分布与云特征量的相关性研究[D].南京:南京信息工程大学,2021.

沙 漠 与 绿 洲 气 象
Desert and Oasis Meteorology
第 17 卷 第 3 期
2023 年 6 月

Characteristics of Acid Rain Events in Different Climatic Regions of Hebei Province during 2012–2019 and It's Impact Factors

LI Ying, ZHAO Zhendong, LI Wenxing, ZHANG Jing
(Hebei Branch of China Meteorological Administration Training Centre, Baoding 071000, China)

Abstract Based on the daily observational data of acid rain during 2012–2019 and air pollutants of SO_2, CO, NO_2, O_3, PM_{10}, $PM_{2.5}$ during 2013–2019 of the 20 acid rain observatories in Hebei province, the characteristics of acid rain and its relationship with other environmental factors in different climatic regions were analyzed.Results showed that: (1) There was a decreasing trend of both strong and weak acid rain days in the past 8 years.In terms of the spatial distribution, the occurrence probability of acid rain in the eastern part of the junction between Yanshan hilly climatic region and the Jidong plain climatic region was higher than that in other regions.In addition, weak acid rain was also more likely to occur in the southern part of the junction between Taihang Mountain climatic region and the Shanqian plain climatic region. (2) When the precipitation level was light rain, the dominant wind direction in the Taihang Mountain climatic region was north wind, the dominant wind direction in Shanqian plain climatic region was northeast wind, the dominant wind direction in the Jidong plain climatic region was northeast wind, the dominant wind direction in the Yanshan hilly climatic region was east wind, and the dominant wind direction in the Jibei plateau climatic region was southeast wind, which was conducive to the occurrence of strong acid rain in each climatic region. (3) It has a better removal effect on SO_2 and NO_2 if heavy rain or above precipitation events occur in the Jibei plateau climatic region and Shanqian plain climatic region.It has a better removal effect on SO_2 and NO_2 if moderate and light rain precipitation events occur in the Yanshan hilly climatic region, the Taihang Mountain climatic region and the Jidong plain climatic region.

Key words acid rain; climatic region; precipitation chemistry; Hebei province