

# 伊宁市降水酸碱度变化趋势与气象因子的关系

王玲<sup>1</sup> 于桂花<sup>1</sup> 李金<sup>1</sup> 解帅<sup>1</sup> 苗运玲<sup>2</sup>

(1 伊犁州气象局, 伊宁 835000; 2 乌鲁木齐市气象局, 乌鲁木齐 830002)

**摘要:** 利用1993—2020年伊宁市酸雨观测资料, 结合相关地面气象资料, 统计分析伊宁市pH值和电导率(K值)变化趋势, 研究其与气象因子的关系。结果表明: 近年来伊宁市年平均pH值呈波动下降趋势, 2003—2005年、2015—2020年已发展为轻酸雨区; 降水酸性在秋冬两季显著增强, 冬季降水pH值最低、酸雨发生概率最大; pH值在2002年发生由大到小的突变, 酸雨呈增多趋势; 年平均K值明显上升, 1997年发生由小到大的突变, 说明大气降水洁净程度降低, 污染呈增加趋势, 利于酸雨形成; 酸雨发生概率在小雨量级出现最大, 随雨量级增大呈显著下降趋势; 降水呈酸性时地面主导风向为偏西风, pH值与降水量呈负相关、与风速呈正相关, K值与降水量呈负相关、与风速呈负相关; 雾有利于增强降水酸度和酸雨发生概率; 硫化物排放量增大致使大气污染日趋严重, 酸雨发生概率呈上升态势。

**关键词:** 降水酸碱度, 气象因子, 伊宁市

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2024.01.007

## Relationship between Precipitation pH Variation Trend and Meteorological Factors in Yining

Wang Ling<sup>1</sup>, Yu Guihua<sup>1</sup>, Li Jin<sup>1</sup>, Xie Shuai<sup>1</sup>, Miao Yunling<sup>2</sup>

(1 Ili Meteorological Bureau, Yining 835000; 2 Urumqi Meteorological Bureau, Urumqi 830002)

**Abstract:** Using acid rain observation data from 1993—2020 in Yining, combined with relevant ground meteorological data, the trends of pH and conductivity (K value) in Yining were statistically analyzed to study their relationships with meteorological factors. The results show that the annual average pH value in Yining has been fluctuating and decreasing in recent years, and has developed into a light acid rain area during 2003—2005 and 2015—2020; moreover, the acidity of precipitation is significantly enhanced in autumn and winter, with the lowest pH value and the highest probability of acid rain in winter; the pH value changed abruptly from large to small in 2002, and the trend of acid rain increased accordingly; the annual average K value has been increasing significantly, with a sudden change from small to large in 1997, indicating a decrease in the cleanliness of atmospheric precipitation and an increasing trend of pollution, which is conducive to the formation of acid rain. The probability of acid rain is highest when light rain occurs, and decreases significantly with the increase of the precipitation level; when the precipitation is acidic, the prevailing wind direction is westerly, pH value is negatively correlated with precipitation and positively correlated with wind speed, while the K value is negatively correlated with precipitation and negatively correlated with wind speed; fog is conducive to the enhancement of precipitation acidity and possibility of acid rain. The frequency of acid rain is increasing due to the increase of sulfide emissions, which leads to the increasing air pollution.

**Keywords:** precipitation acidity, meteorological factor, Yining

### 0 引言

人类活动、工业生产排放的各类硫化物与大气降水产生物理或化学作用, 造成降水酸化, 形成酸雨。大气降水趋于酸化导致酸雨污染已成为21世纪人类面临的主要环境问题之一, 其造成的危害不仅仅局限于本地, 还能够利用高空大气输送影响大范围的降水酸化, 造成区域酸雨加重。近几十年以来, 我国经济快速发展, 能源消耗急剧增加致使酸雨污染日趋严重,

已成为继东欧、美国东北部之后的第三大酸雨区<sup>[1]</sup>。监测数据表明, 中国酸雨区以城市为核心<sup>[2]</sup>, 主要分布在东北地区、华北大部、西南和华南沿海地区及新疆北部地区<sup>[3]</sup>。

自1982年建立全国酸雨监测网后, 众多学者对降雨酸化的时空变化、化学性质、形成机理、影响因素等展开研究<sup>[3-8]</sup>, 为我国酸雨控制和研究提供了大量的数据支持。中国区域的降水化学组成属硫酸或硝酸型, 这与逐年上升的区域SO<sub>2</sub>和NO<sub>x</sub>等酸性气体排放密不可分<sup>[3]</sup>。1993—2006年全国酸雨发生范围总体呈扩大趋势, 且北方酸雨强度加强非常明显<sup>[5]</sup>。1991—2008年新疆城市降水年均pH值逐年平缓降低, 其中伊

收稿日期: 2022年8月3日; 修回日期: 2022年10月31日

第一作者: 王玲(1977—), Email: 420289782@qq.com

通信作者: 苗运玲(1976—), Email: hmyl65313@163.com

宁市变化起伏较大<sup>[6]</sup>。北疆酸雨出现多,其中伊宁市因各类硫氧化物排放量呈上升趋势而导致pH均值逐渐减小,酸雨发生概率增大<sup>[7-8]</sup>。

伊宁市作为国家西部对外开放重要门户城市,是天山北坡西部中心和向西开放的桥头堡,重要的地理位置使伊宁市降水酸化研究极具意义。伊宁市空气污染物主要有颗粒物、NO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>,这些污染物也是造成伊宁市降水呈酸性的主要因素<sup>[8-9]</sup>。2015—2018年伊宁市空气质量整体呈下降趋势,重度污染天数自2016年后呈现逐年翻倍态势。当地能源结构以煤为主,冬季采暖期燃煤型污染最为突出,空气污染情况不容小觑。受燃煤影响,采暖期NO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>浓度在1—2月达到峰值,是当地降水呈酸性的重要因子之一。目前关于伊宁市酸雨的研究较分散,没有系统研究其特征及影响因素。本文利用伊宁市1993—2020年酸雨观测资料分析该地降水酸碱度变化趋势与气象因子的关系,以期为伊宁市科学治理大气污染、精准防控降水酸化提供可靠依据。

## 1 资料与方法

### 1.1 研究区概况

伊宁市地处天山西段、伊犁河谷盆地中央,属于温带大陆性气候,地理坐标80°4′—81°29′E、43°50′—44°9′N,面积约为640 km<sup>2</sup>。地形地貌复杂多样,主要以山地、丘陵和平原为主,四季分明,日照充足。由近30年(1991—2020年)气候整编资料可知:伊宁市年平均气温10.0℃,年极端最高气温39.2℃,最低气温-31.5℃,年降水量306.6 mm,年内降水分布不均衡,年平均风速1.5 m·s<sup>-1</sup>,主导风向以ENE和E为主。

### 1.2 资料来源

伊宁国家基准气候站酸雨观测始于1993年1月,是中国气象局酸雨观测站网之一。文中资料来源于伊宁站的酸雨观测数据,降水样品的采集、测量及月、年统计值依据《酸雨观测业务规范》<sup>[10]</sup>中的相关规定执行。

研究资料为1993—2020年伊宁站达到酸雨观测标准的日期、降水量、pH值、电导率(K值)及相应时间的风向、风速、雾等常规气象观测资料。当日08—次日08时降水量达到1.0 mm时,样品采集后记录为一个降水样品。pH值<sup>[10]</sup>定义是氢离子浓度的负对数,其值范围1~14,可以反映大气降水的酸碱程度,值越小酸度越大。电导率K值表示大气降水的导电能力,它的大小可以反映降水中离子含量的高低。酸雨强度划分标准<sup>[10]</sup>为:pH<4.5为强酸雨,4.5≤pH<5.6为弱酸雨,5.6≤pH<7.0为中性,pH≥7.0为碱性。降

水平均pH值和电导率K值的计算方法均采用《酸雨观测业务规范》<sup>[10]</sup>中的方法。

### 1.3 研究方法

为了分析伊宁市酸雨的变化特征,采用线性趋势、多项式拟合、相关系数等方法开展研究,利用F分布函数对回归系数进行检验<sup>[11-12]</sup>,运用Mann-Kendall(简称M-K)方法<sup>[13]</sup>对pH值和电导率K值的时间序列进行突变分析,利用信噪比检验转折点是否存在突变。

## 2 结果分析

### 2.1 pH值和K值变化特征

#### 2.1.1 年变化

分析1993—2020年伊宁站采集的1598个降水样品,结果显示,pH值日变化范围为3.06~9.18,平均值为6.11。K值日变化范围为2.2~591.7 μs·cm<sup>-1</sup>,平均值为51.4 μs·cm<sup>-1</sup>。由表1可知,伊宁市大气降水多呈中性,占总样品的61.64%;其次为碱性,占比19.21%;酸雨共出现306次,占总样品的19.15%。从图1可知,1993—2020年伊宁市降水样品与酸雨出现次数均呈增加趋势,其中2005年出现酸雨次数最多,达38次,且13次为强酸雨。28年中仅有2年未出现酸雨,有1/3的酸雨集中在2004年、2005年和2010年,其中2005年酸雨出现概率达73.08%;pH值最小为3.06,对应K值为65.5 μs·cm<sup>-1</sup>,出现在2004年12月21日。

表1 1993—2020年伊宁市降水样品pH值概率  
Table 1 pH probability of precipitation samples in Yining from 1993 to 2020

pH值	降水样品/个	所占比例/%
pH<4.5	36	2.25
4.5≤pH<5.6	270	16.90
5.6≤pH<7.0	985	61.64
≥7.0	307	19.21

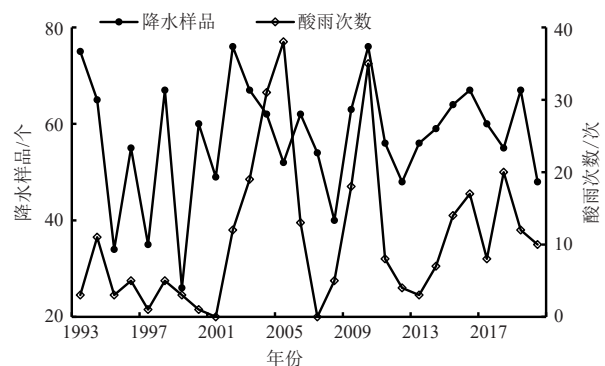


图1 1993—2020年伊宁市降水样品和酸雨出现次数逐年变化  
Fig. 1 Year-to-year variation of precipitation samples and acid rain occurrence in Yining from 1993 to 2020

按照中华人民共和国气象行业标准《酸雨评价方法》<sup>[14]</sup>中的标准(表2),由图2可知,伊宁市2003—2005年、2015—2020年pH值在5.31~5.60的酸雨出现概率为11.67%~32.73%,属于轻酸雨区;其他年份均未达到酸雨区标准。说明近28年来,伊宁市从无酸雨到出现酸雨,这与李晓燕等<sup>[7]</sup>研究结论基本一致。因人口增长和城市化加剧,能源消耗快速上升,导致大气降水酸化是不容忽视的事实,应该引起有关部门重视,科学加强污染防治是十分必要的。

表2 酸雨区分级标准

Table 2 Classification standard for acid rain area

pH值	酸雨出现概率/%	酸雨区
<5.00	>50	重酸雨区
5.01~5.30	30~60	中酸雨区
5.31~5.60	10~40	轻酸雨区
>5.60	0~20	非酸雨区

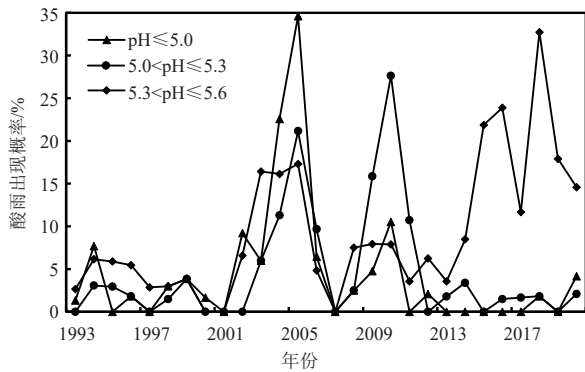


图2 1993—2020年伊宁市酸雨在不同pH值区间概率分布  
Fig. 2 Probability distribution of acid rain in different pH value in Yining from 1993 to 2020

从图3可知,近28年伊宁市pH值年变化呈下降趋势,速率为 $-0.19 (10 a)^{-1}$ ,可见该地降水酸性增强,这与刘新春等<sup>[6]</sup>、李晓燕等<sup>[7]</sup>的研究结论一致。年平均pH值变化范围在4.65~6.99,极差达2.34,说明伊宁市pH值年际变化较大。K值年变化范

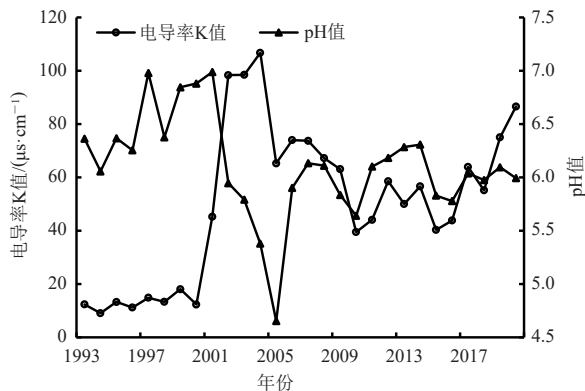


图3 1993—2020年伊宁市降水样品年均pH值和电导率K值变化  
Fig. 3 Variation of average annual pH and conductivity K value of precipitation samples in Yining from 1993 to 2020

围在 $9.1 \sim 106.7 \mu s \cdot cm^{-1}$ ,呈显著上升趋势,增加率为 $18.70 (10 a)^{-1}$ ,通过0.01的显著性水平检验,说明上升趋势很明显,即大气降水中离子浓度增加,洁净度降低,杂质不断增多,大气污染程度增大。伊宁市逐年降水pH值下降,而K值上升,说明大气污染日趋严重。对pH值和K值进行相关性分析,相关系数为 $-0.545$ ,通过0.01的显著性水平检验,说明二者存在显著的负相关关系,即K值越大,pH值越小,降水的酸度越强,环境污染越严重,反之降水的酸度越弱,空气质量越好。

### 2.1.2 季节变化

对伊宁市降水pH值和K值的季节变化分析(图4)表明,四季中pH值从高到低的排序为夏季>秋季>春季>冬季,其值分别为6.28、6.17、6.08和5.88,除夏季外其他三季均呈下降趋势,其中秋季通过0.01的显著性水平检验,冬季通过0.05的显著性水平检验,其他两季均未通过显著性检验,说明秋冬两季降水酸性是显著增强的。从各季酸雨出现次数(表3)可知,冬季出现最高,共出现137次,占总酸雨次数的44.77%,其中强酸雨出现19次,占总强酸雨次数的52.78%;其次是春季,酸雨出现71次,占总酸雨次数的23.20%,其中强酸雨出现8次,占总强酸雨次数的22.22%;秋季与春季较接近;夏季最少,仅出现36次,占比为11.76%,其中强酸雨占比8.33%。四季中K值从大到小的排序与pH值一致,夏季、秋季、春季、冬季分别为55.2、50.1、49.7、48.2  $\mu s \cdot cm^{-1}$ ,四季均呈上升趋势,其中春季和夏季通过0.01的显著性水平检验,秋季和冬季未通过显著性检验,表明春夏两季降水中的杂质是显著增多的,即空气污染增加趋势较秋冬两季显著。夏季pH值和K值最大,冬季pH值和K值最小,出现这种情况的原因为,伊宁市地处中国北方,土壤碱性物质含量较高,大气中的碱性颗粒物浓度也相应较高,当伴随强对流天气出现较大风速时,这些碱性颗粒物溶解至降水中,一方面对降水的酸度有中和缓冲作用<sup>[5]</sup>,使夏季降水pH值升高,另一方面则造成K值增大。此外,夏季降水过程中对流旺盛,降水强度大,对大气酸性污染源稀释和扩散作用明显,故夏季酸雨概率较小。冬季伊宁市供暖时段为10月20日一次年4月5日,冬季12月、1月和2月是伊宁市最为寒冷的季节,采暖的燃煤量很大,煤炭中含硫量较高,是大气中硫化物的主要来源,故易造成降水pH值下降,降水的酸性增强。

### 2.1.3 月变化

由1993—2020年伊宁市降水月平均pH值和K值变化趋势可知(图5a),各月降水pH值变化幅度较

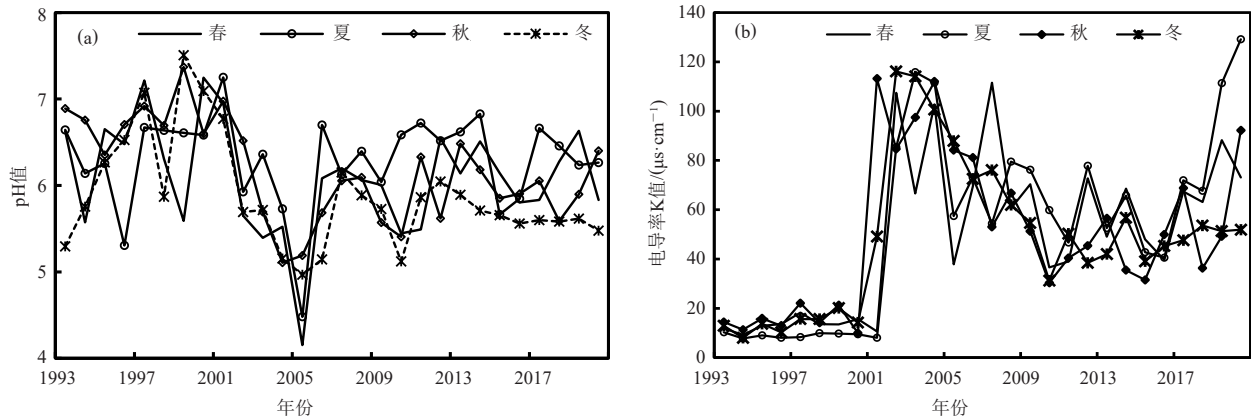


图4 1993—2020年伊宁市四季酸雨平均pH值(a)和电导率K值(b)变化

Fig. 4 Changes of the average pH (a) and conductivity K value (b) of four seasons of acid rain in Yining from 1993 to 2020

表3 1993—2020年伊宁市四季酸雨及强酸雨分布  
Table 3 Distribution of acid rain and strong acid rain in Yining in all seasons from 1993 to 2020

季节	酸雨次数/次	占比/%	强酸雨次数/次	占比/%
春	71	23.20	8	22.22
夏	36	11.76	6	16.67
秋	62	20.26	3	8.33
冬	137	44.77	19	52.78

大, 最高值出现在8月, 为6.56; 最低值出现在12月, 为5.80, 有明显的高峰和低谷, 表现出一定的规律性, 总体呈“抛物线”型特征。每月均有酸雨现象发

生(图5b), 其中12月和2月酸雨次数最高, 占总酸雨次数的30.72%; 9月出现次数最少, 占比1.31%。K值总体变化与pH值基本相同, 最高出现在8月, 为 $62.3 \mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$ , 最低值出现在12月, 为 $44.9 \mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$ 。对各月pH值和K值进行趋势分析可知, pH值在8—12月呈明显下降趋势, 其他各月均呈上升趋势, 其中2月通过0.05、9月通过0.01的显著性水平检验, 其他各月均未通过显著性检验。K值月变化趋势与pH值相似, 其中3月通过0.05、5—7月通过0.01的显著性水平检验, 其他各月均未通过显著性检验。

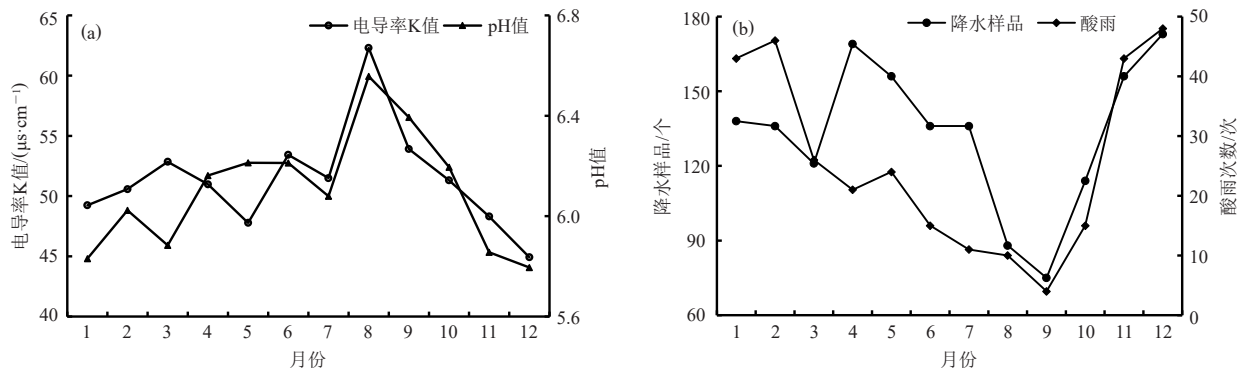


图5 1993—2020年伊宁市降水月平均pH值和电导率K值变化(a)与月降水样品和酸雨出现次数(b)

Fig. 5 Variation of monthly mean pH and conductivity K value of precipitation (a) and monthly precipitation samples and occurrences of acid rain (b) in Yining from 1993 to 2020

## 2.2 突变分析

利用M-K方法对伊宁市28年的pH值和K值进行突变分析。年突变分析显示, pH值(图6a)UF和UB曲线相交于临界线范围内, 交点为2002年, 并通过信噪比检验, 说明2002年是pH值由大到小的突变年, 即该区域酸雨呈增多趋势; K值(图6b)UF和UB曲线相交于1997年并通过信噪比检验, 表明1997年是K值由小到大的突变年, 即降水中的杂质不断增多, 空气污染越

来越严重, 在2001年超出临界值(1.96), 并且一直持续到2020年, 说明K值增大很显著。这种增加趋势在未来是否会持续有待于进一步研究和讨论。对不同季节pH值和K值进行突变分析(图6c~6j)发现, pH值只在秋、冬季发生突变, 突变年分别为2001年和2014年(均通过信噪比检验), 表明pH值发生突变受秋、冬季突变影响较大。K值除秋季外其他三季均发生突变, 其中春、冬季突变年均出现在1997年, 夏季出现在

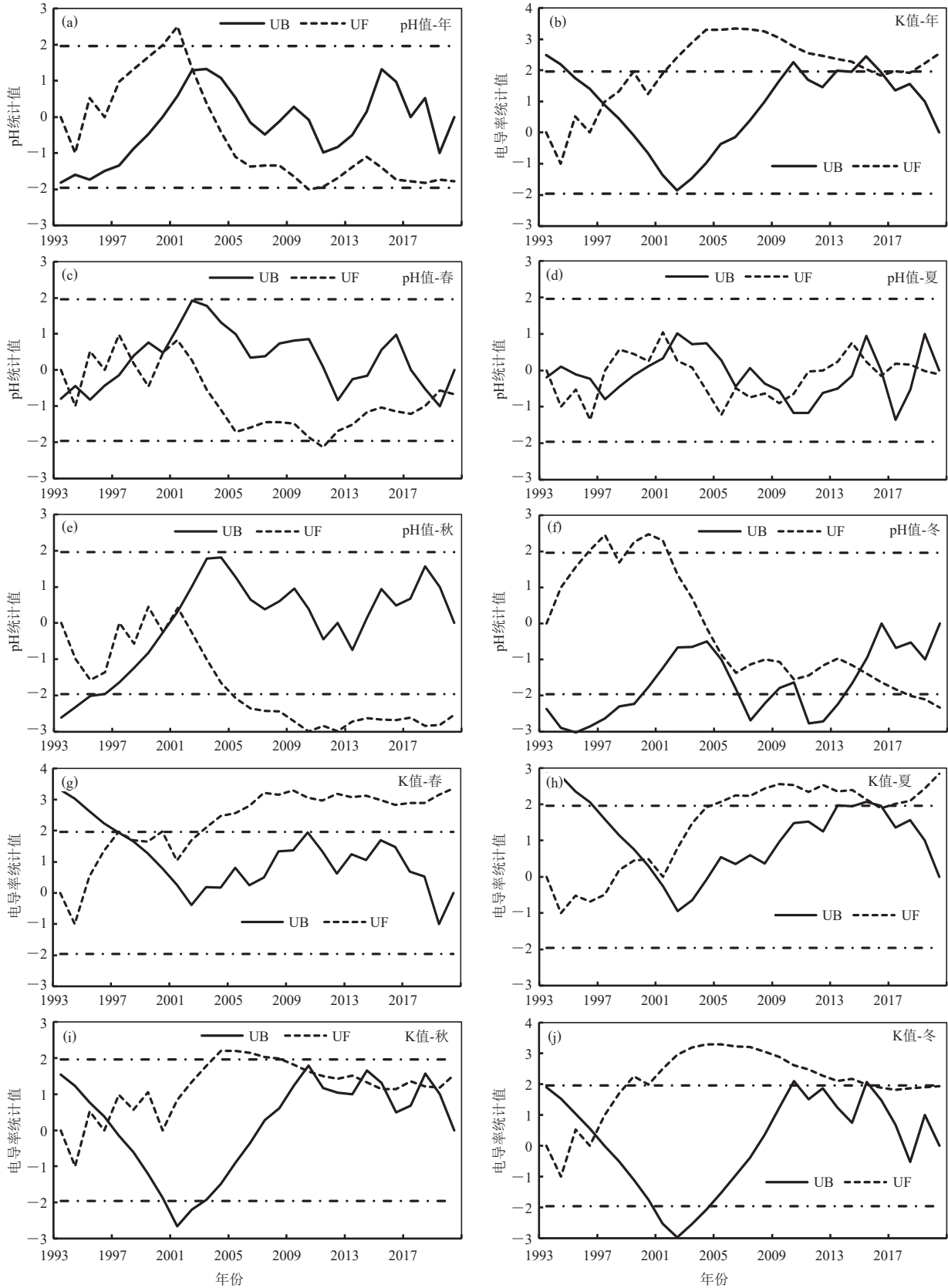


图6 1993—2020年伊宁市降水年、季平均pH值和电导率K值突变分析

Fig. 6 Analysis of sudden changes in annual and seasonal mean pH and conductivity K value of precipitation in Yining from 1993 to 2020

2000年,均通过信噪比检验,说明年K值突变出现在1997年是受春、冬两季的影响。

### 2.3 pH值和K值与气象因子的关系

大量对酸雨的研究<sup>[15-21]</sup>表明,酸雨的形成和强度与降水量、风向、风速、雾等气象因子有一定的关系。为了解伊宁市酸雨成因,利用2004年、2005年、2010年酸雨资料与动力(风向、风速)、湿度(降水量)进行相关性分析。原因是这三年酸雨出现次数较其他年份偏多,达104次,占近28年总次数的33.99%,有较好的代表性。

#### 2.3.1 降水量对pH值和K值的影响

新疆气象局规定降水量的4个等级分别为小雨(0.1~6.0 mm)、中雨(6.1~12.0 mm)、大雨(12.1~24.0 mm)和暴雨及以上(24.1 mm),将每一个降水样品的降水量按此标准划分等级。由表4可知,伊宁市小雨量级时弱酸雨出现次数最多,占比58.8%,且随降雨量级增大呈下降趋势,当量级为暴雨等级时酸雨出现次数最少,占比仅为2.3%;强酸雨的出现次数也是随着降水量增大而下降,且强酸雨在各降水量级中出现次数均明显小于弱酸雨的出现次数。出现这种情况的原因可能是伊宁市降水达到暴雨量级的次数

很少,且降水量级大对大气污染物稀释和扩散比较有利,故强酸雨发生概率较小。

表4 1993—2020年伊宁市各级降水量对应不同强度酸雨的统计值

Table 4 Statistics of acid rain of different intensities corresponding to different grades of precipitation in Yining from 1993 to 2020

项目	酸雨强度	小雨	中雨	大雨	暴雨及以上
出现次数占比/%	强酸雨	7.5	2.3	1.3	0.7
	弱酸雨	58.8	19.9	7.2	2.3
占总降水量百分比/%	强酸雨	3.5	2.8	3.9	4.4
	弱酸雨	28.5	27.3	18.6	10.9

由各降水量级对应的不同等级酸雨降水量的分布可知,弱酸雨降水量在小雨等级时所占比例最高,达28.5%,且四个等级降水中,弱酸雨降水量所占比例均高于强酸雨;强酸雨则是在暴雨等级时所占比例最高,达4.4%。

降水量大小会直接影响对大气污染物的冲刷能力。从图7a可知,pH值和降水量呈负相关,通过0.01的显著性水平检验,说明降水越大,出现酸雨的概率越小,反之越大。K值与降水量也呈负相关(图7b),但未通过显著性检验,说明降水量的大小对K值影响不显著。

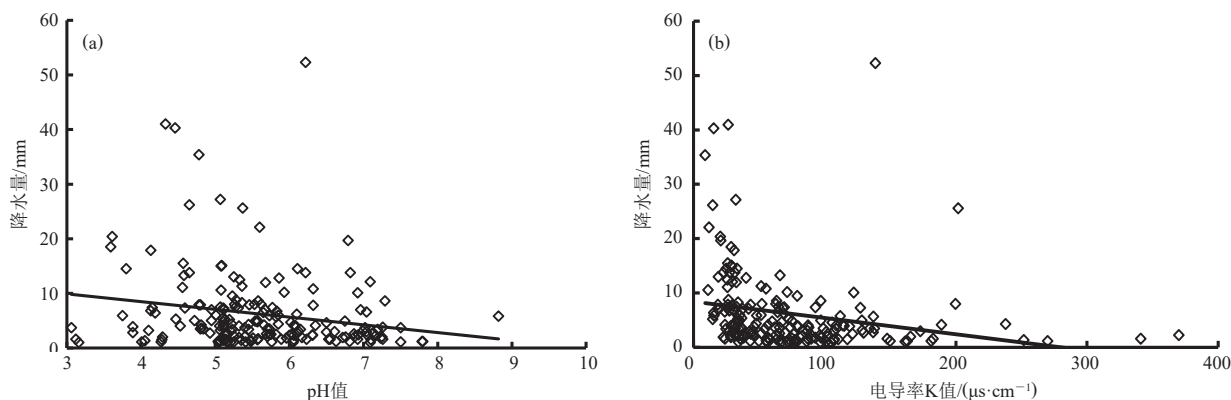


图7 1993—2020年伊宁市降水样品的pH值(a)和电导率K值(b)与降水量的相关性

Fig. 7 Correlation between pH (a), conductivity K value (b) of precipitation samples and precipitation in Yining from 1993 to 2020

#### 2.3.2 风对pH值和K值的影响

风作为气象要素中的动力因子,风向影响污染物水平迁移扩散方向<sup>[22]</sup>,风速大小会影响污染物扩散和稀释能力。

由图8可知,2004年、2005年和2010年出现降水时的地面主导风向以W为主,出现次数占比为16.05%;E次之,出现次数占比为11.32%,S、NNW和N等风向时酸雨仅有零星分布。同时对三年出现的104次酸雨对应的地面风向进行分析(图略),主导风向仍以W

为主,出现次数占比为16.83%,E次之,出现次数占比为12.26%,当风向为S时没有出现酸雨。综上所述,伊宁市受偏西风影响时较容易形成酸雨,这是因为受喇叭口独特地形影响,降水天气过境时盛行偏西风,而伊宁市人口和工业主要集中在城市西方,聚集了能源消耗产生的致酸污染物。在大气污染物相对恒定的条件下,风向对污染物的扩散方向有明显影响,降水过程中偏西风会携带较多的大气污染物,为酸雨的形成提供前期储备条件。

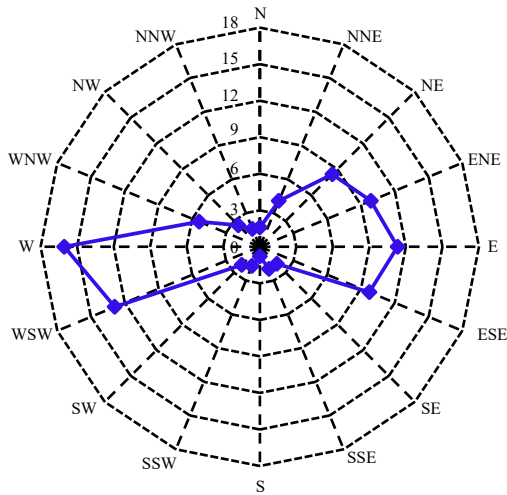


图8 1993—2020年伊宁市采集降水样品时的地面风向玫瑰图(单位: %)

Fig. 8 Surface wind direction rose diagram when collecting precipitation samples in Yining from 1993 to 2020 (unit: %)

为了研究风速对pH值、K值的影响,同样进行了相关分析。从图9a可知, pH值与风速呈正相关,但没有通过显著性检验,说明风速对酸雨的形成影响不显著;K值与风速呈负相关(图9b),并通过0.01的显著性水平检验,表明风速的大小对K值影响显著,风速

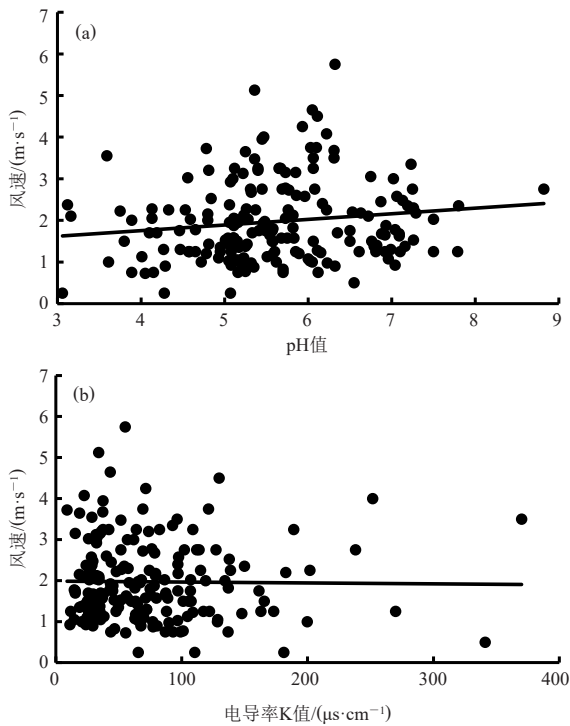


图9 1993—2020年伊宁市降水样品pH值(a)、电导率K值(b)与风速的相关性

Fig. 9 Correlation between pH (a), conductivity K value (b) and wind speed of precipitation samples in Yining from 1993 to 2020

越大,越有利于污染物的扩散,起到稀释作用,不利于酸雨的形成,反之有利于酸雨的形成。

### 2.3.3 雾对pH值和K值的影响

雾对酸雨的影响有两个方面,一是影响大气污染物的扩散,二是影响酸雨前体物的化学转化速率<sup>[23-24]</sup>。有雾出现时,大气层结较稳定,地面风速小,湿度大,且多有逆温,大气污染物不易扩散,有利于降水酸化;同时空气中充足的水汽加快了酸雨前体物SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>转化为硫酸和硝酸的速率,增加了降水酸化的几率。伊宁市28年降水样品1598个中出现雾均集中在冬半年,共有135次,其中pH值<5.6为60次,占比44.44%。降水样品中有雾出现时pH平均值为5.90,冬半年(10—4月)无雾时pH平均值为6.24;雾与酸雨呈正相关,相关系数为0.748,并通过0.01的显著性水平检验,说明雾对降水呈酸性影响明显。分析发现,雾对电导率K值影响不大。

## 3 结论

1) 1993—2020年伊宁市年平均pH值呈波动下降趋势,酸雨出现概率逐年上升,电导率K值呈明显上升趋势,冬半年(10—4月)酸雨污染相对严重,夏半年(5—9月)偏轻;酸雨月和季节变化明显,冬春季pH值、K值均低于夏秋季,月平均pH值和K值规律性显著,8月最高,12月最低。整体来看,降水pH值呈下降趋势,酸雨发生概率上升,伊宁市已从无酸雨区发展为轻酸雨区。

2) 利用M-K方法对伊宁市pH值和K值进行突变分析,运用信噪比检验可得,2002年是pH值由大到小的突变年,K值在1997年发生突变;pH值在秋、冬季发生突变,突变年分别出现在2001和2014年;K值在除秋季外其他三季均发生突变,其中春、冬季突变年均出现在1997年,夏季突变年出现在2000年。

3) 酸雨出现次数在小雨量级时最多,且随降水量的增大而减小,pH值与降水量呈显著负相关,降水量变化对K值影响不显著。地面主导风向为偏西风时降水出现酸化次数较多,说明偏西风对酸雨的形成作用显著。pH值与风速呈正相关,K值与风速呈负相关,风速大小对K值作用显著。雾与酸雨密切相关,降水过程中有雾时酸雨出现次数远大于无雾时酸雨出现次数,说明雾对酸雨的贡献较大。

4) 城市人口和经济的快速发展,工业各类硫化物排放量急剧上升是伊宁市大气污染日趋严重、降水酸化的主要原因。科学采用诸如调整能源战略、发展集中供热,采用清洁能源等方法 and 措施加强污染防治刻不容缓。

## 参考文献

- [1] 杨昂, 孙波, 赵其国. 中国酸雨的分布、成因及其对土壤环境的影响[J]. 土壤, 1993, 31(1): 13-18.
- [2] 王德春, 赵殿五. 中国酸雨概述[J]. 世界环境, 1998(2): 8-10.
- [3] 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.
- [4] 中国生态环境部. 2020年中国生态环境状况公报[R]. 北京: 中国生态环境部, 2021.
- [5] 赵艳霞, 侯青. 1993—2006年中国区域酸雨变化特征及成因分析[J]. 气象学报, 2008, 66(6): 1032-1042.
- [6] 刘新春, 何清, 钟玉婷. 新疆城市酸雨分布特征及变化趋势分析[J]. 水土保持研究, 2009, 16(1): 115-120.
- [7] 李晓燕, 钟玉婷, 侯俊. 新疆降水pH值得时空分布及变化趋势初步分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2010, 4(5): 24-26.
- [8] 王彩萍. 伊宁市大气环境污染特征及防治对策[J]. 内蒙古环境科学, 2008, 20(4): 64-67.
- [9] 尚毅林, 迟洪蕾. 伊宁市空气质量特征分析及对策研究[J]. 环境保护与循环经济, 2020, 40(12): 55-58.
- [10] 中国气象局. 酸雨观测业务规范[M]. 北京: 气象出版社, 2005.
- [11] 张山清, 任泉, 刘振新, 等. 乌鲁木齐市城区大气降水酸碱度及电导率变化分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2008, 2(2): 11-14.
- [12] 苗运玲, 张军, 郑玉萍, 等. 乌鲁木齐市酸雨变化特征及其与气象因子的关系[J]. 气象与环境学报, 2020, 36(5): 62-68.
- [13] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术(第2版)[M]. 北京: 气

- 象出版社, 2007.
- [14] 李帅, 刘丹, 于成龙, 等. 1991—2012年黑龙江省酸雨变化特征[J]. 气象与环境学报, 2015, 31(5): 105-111.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 蒲维维, 张小玲, 徐敬, 等. 北京地区酸雨特征及影响因素[J]. 应用气象学报, 2010, 21(4): 464-471.
- [18] 宋佰春, 李斌, 徐传凯. 2003—2007年日照市酸雨变化特征与成因研究[J]. 气象与环境学报, 2008, 24(6): 49-52.
- [19] 李倩, 杨旭, 马梁臣, 等. 长春市酸雨变化特征及其影响因素分析[J]. 气象与环境学报, 2017, 33(4): 48-55.
- [20] 李亚军. 2006—2019年山西省酸雨变化特征分析[J]. 气象与环境学报, 2021, 37(4): 134-138.
- [21] 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.
- [22] 王苗, 吕槐槐, 王凯, 等. 武汉市酸雨变化特征及影响因素分析[J]. 气象, 2019, 45(2): 282-289.
- [23] 于文革, 梁铁军, 孙莹, 等. 丹东市酸雨特征及其影响因素分析[J]. 气象与环境学报, 2016, 32(4): 77-82.
- [24] 黄磊, 王庆国. 广西南宁市酸雨特征及影响因素分析[J]. 贵州气象, 2014, 38(6): 52-54.

(编辑: 郑秋红)

(上接45页)

结、强的垂直风切变是此次强对流天气的有利环境条件。地面辐合线是主要触发机制, 强对流触发后, 在850 hPa切变线南侧, 低空急流出口区自西向东组织化发展。

2) 冰雹发生时雷达回波具有三体散射特征, VII跃增; 雷暴大风发生时为飚线中内嵌超级单体, 含有深厚的中气旋, 加上动量下传共同作用, 有利于出现极端灾害性大风; 而短时强降水发生时“列车效应”特征明显, 低质心、高效率的回波有利于强降水的发生。另外, “V”型缺口、弱回波区、中气旋、中层径向辐合(MARC)等特征对分析风暴发展所处阶段及发布强对流天气预警具有重要指示意义。

3) 极端大风与强降水中心出现位置的不同与水汽辐合的中心位置、垂直运动的强弱以及不稳定能量条件差异有关, 与洞庭湖大型水体和临湘东部山区地形的阻挡作用有较大关系。洞庭湖水体对强对流的激发作用使得洞庭湖东部沿岸一带强对流更为剧烈, 导致出现极端大风; 洞庭湖水汽随着西南气流源源不断地向东北方向输送, 以及临湘东部山区地形的阻挡对临湘市出现强降水中心有一定的增幅作用。洞庭湖水体对岳阳市强对流的影响作用有待进一步分析和研究。

## 参考文献

- [1] 姚蓉, 唐佳, 兰明才, 等. 一次混合强对流天气的环境条件及演变特征分析[J]. 暴雨灾害, 2017, 36(3): 217-226.
- [2] 唐佳, 姚蓉, 王晓雷, 等. 2015年春季湖南两次混合对流天气过程对比分析[J]. 干旱气象, 2017, 35(2): 250-259.
- [3] 王起唤, 姚蓉, 周长青, 等. 湖南春夏季混合强对流天气过程对比分析[J]. 湖北农业科学, 2021, 60(19): 65-74.
- [4] 孙继松, 陶祖钰. 强对流天气分析与预报中的若干基本问题[J]. 气

- 象, 2012, 38(2): 164-173.
- [5] 俞小鼎, 周小刚, 王秀明. 雷暴与强对流临近天气预报技术进展[J]. 气象学报, 2012, 70(3): 311-337.
- [6] 叶成志, 唐明晖, 陈红专, 等. 2013年湖南首场致灾性强对流天气过程成因分析[J]. 暴雨灾害, 2013, 32(1): 1-10.
- [7] 章丽娜, 王秀明, 熊秋芬, 等. “6.23”北京对流暴雨中尺度环境时空演变特征及影响因子分析[J]. 暴雨灾害, 2014, 33(1): 1-9.
- [8] 周后福, 余政, 袁业畅, 等. 2013年4月29日皖西南强风暴天气雷达资料分析[J]. 暴雨灾害, 2014, 33(1): 80-86.
- [9] 王丛梅, 俞小鼎. 2013年7月1日河北宁晋极端短时强降水成因研究[J]. 暴雨灾害, 2015, 34(2): 105-116.
- [10] 翟丽萍, 农孟松, 屈梅芳, 等. 相同大尺度环流背景下不同类型强对流天气个例分析[J]. 暴雨灾害, 2013, 32(4): 346-353.
- [11] 许爱华, 马中元, 叶小峰. 江西8种强对流天气形势与云型特征分析[J]. 气象, 2011, 37(10): 1185-1195.
- [12] 郑媛媛, 姚晨, 郝莹, 等. 不同类型大尺度环流背景下强对流天气的短时临近预报预警研究[J]. 气象, 2011, 37(7): 795-801.
- [13] 庞古乾, 伍志方, 叶爱芬, 等. 珠三角地区前汛期强对流潜势预报方法研究[J]. 热带气象学报, 2012, 28(4): 564-568.
- [14] 马明, 林锦冰, 傅云飞. 一次强对流活动中雷电与降水廓线特征研究[J]. 气象学报, 2012, 70(4): 797-805.
- [15] 姜晓曼, 袁慧玲, 薛明, 等. 北京“7.21”特大暴雨高分辨率模式分析场及预报分析[J]. 气象学报, 2014, 72(2): 207-219.
- [16] 卢冰, 史永强. 2012年7月中旬克拉玛依罕见强对流天气的数值模拟分析[J]. 气象, 2014, 40(8): 949-956.
- [17] 吴丹娃, 潘益农, 吴林林, 等. 2011年6月23日沿淮强对流天气中尺度辐合特征模拟研究[J]. 热带气象学报, 2013, 29(4): 672-680.
- [18] 章国材. 强对流天气分析与预报[M]. 北京: 气象出版社, 2011.
- [19] 孙继松. 强对流天气预报的基本原理与技术方法[M]. 北京: 气象出版社, 2014.
- [20] 许爱华, 陈云辉, 陈涛, 等. 锋面北侧冷气团中连续降雹环境场特征及成因[J]. 应用气象学报, 2013, 24(2): 197-206.
- [21] 盛杰, 毛冬艳, 蓝渝. 春季我国冷锋后部的高架雷暴天气特征分析[J]. 气象, 2014, 40(9): 1058-1065.
- [22] 俞小鼎. 多普勒天气雷达原理与业务应用[M]. 北京: 气象出版社, 2006.
- [23] 丁青兰, 刘武, 朱晓虎, 等. 一次飚线天气过程多普勒雷达产品分析及临近预报[J]. 气象科技, 2008, 36(2): 160-163.
- [24] 喻长建, 陈姣荣, 喻宇. 近3 a岳阳暴雨时空分布规律及形势特征分析[J]. 贵州气象, 2019, 43(4): 46-50.

(编辑: 郑秋红)