

文章编号:2096 - 5389 (2022)03 - 0063 - 06

毕节大气可降水量与暴雨关系研究

杨 洋¹, 柯莉萍², 聂 祥³, 张成刚⁴, 张宗笛⁵, 施倩雯¹

(1. 贵州省织金县气象局, 贵州 织金 552100; 2. 贵州省威宁彝族回族苗族自治县气象局, 贵州 威宁 553100;
3. 贵州省毕节市气象局, 贵州 毕节 551700; 4. 贵州省大方县气象局, 贵州 大方 551600;
5. 贵州省金沙县气象局, 贵州 金沙 551800)

摘 要:该文利用 2005—2019 年毕节市 8 个国家站的暴雨天气过程发生前 24 h 地面露点温度资料, 采用露点法对大气可降水量(PWV)进行反算, 探究其与暴雨天气中雨强的关系, 建立暴雨预报阈值指标, 利用 2020 年 23 次暴雨天气过程对阈值指标的可行性进行 CSI 评分检验。结果表明:①大气可降水量变化呈现单峰型特征, 其主要降水过程与 PWV 峰值有很好对应关系, 短时强降水出现前后每一次水汽的激增均对应 1 次降水过程和最大降水强度的出现。②从 CSI 评分检验的结果来看, 毕节各站暴雨阈值指标准确率达 90% 以上, 空报率小于 10%, 本地化暴雨阈值指标具有一定的可行性。总体上, 通过地面露点法建立的阈值指标对毕节市的暴雨预报有较好的指示作用, 未来应加强大气可降水量对暴雨预报的研究力度, 不断完善本地化暴雨预报指标。

关键词:大气可降水量; 暴雨; 露点温度; 特征分析

中图分类号:P426.61*3 **文献标识码:**A

Study on the Relationship between Atmospheric Precipitable Amount and Heavy Rain in Bijie Area

YANG Yang¹, KE Liping², NIE Xiang³, ZHANG Chenggang⁴, ZHANG Zongdi⁵, SHI Qianwen¹

(1. Zhijin Meteorological Bureau of Guizhou Province, Zhijin 552100, China; 2. Weining Meteorological Bureau of Guizhou Province, Weining 553100, China; 3. Bijie Meteorological Bureau of Guizhou Province, Bijie 551700, China; 4. Dafang Meteorological Bureau of Guizhou Province, Dafang 551600, China; 5. Jinsha Meteorological Bureau of Guizhou Province, Jinsha 551800, China)

Abstract: Using the ground dew point temperature data of the eight national stations in Bijie City from 2005 to 2019 before the occurrence of the rainstorm weather processes, the dew point method was used to back calculate the atmospheric precipitable water vapor (PWV) to explore its relationship with rain intensity in rainstorm weather, establish a rainstorm forecast threshold index, and the 23 rainstorm weather processes in 2020 were used to test the feasibility of the threshold index by CSI score test. The results show that: ①The change of atmospheric precipitable amount presents a single - peak characteristic, and its main precipitation process has a good corresponding relationship with the peak value of PWV. When short - term heavy precipitation occurs, each surge of water vapor corresponds to the presence of a precipitation process and a maximum precipitation intensity. ②According to the results of the CSI scoring test, the accuracy rate of the rainstorm threshold index at each station in Bijie is more than 90%, and the empty report rate is less than 10%. The localized rainstorm threshold index has certain feasibility. In general, the threshold index established by the ground dew point method has a good indicator effect on the rainstorm forecast in Bijie City. In the future, the research strength of the atmospheric precipitation on the

收稿日期:2021 - 05 - 19

第一作者简介:杨洋(1995—),女,助工,主要从事气象灾害防御研究等工作,E-mail:1035007816@qq.com。

通讯作者简介:柯莉萍(1974—)男,高工,主要从事综合气象探测研究工作,E-mail:536482839@qq.com。

资助项目:贵州省气象局科研业务项目(黔气科登[2020]03-02号):大气可降水量在毕节暴雨预报中的应用研究。

rainstorm forecast should be strengthened, and the localized rainstorm forecast index should be continuously improved.

Key words: precipitable water vapor; heavy rain; dew point temperature; characteristic analysis

0 引言

降水是影响人民生产生活的天气,近年来,全球变暖导致极端天气增多,毕节市暴雨天气频发,强降水诱发的城市内涝、山洪、泥石流等次生灾害常常威胁到人们的生命财产安全,因此降水天气预报尤为重要,对暴雨天气预报的准确性更是提出了更高的要求。

大气可降水量 (precipitable water vapor, PWV) 是指单位面积空气柱里含有的水汽的总数量,也称为可降水量。它对应于空气中的水分全部凝结成雨、雪降落 (把空气挤得一点水分都没有) 所能形成的降水量。大气水汽是产生各种灾害天气的重要参数,它的时空分布、相变产生的潜热释放等,对大气垂直稳定性和天气系统的发展和演变起着决定性作用。强烈的对流天气配合充足的水汽容易引发强降水天气,所以大气可降水量也被认为是衡量大气水汽条件好坏以及判断暴雨天气是否发生的重要指标。因此探讨地面温度露点反算大气可降水量在降雨预报中的应用研究,为暴雨天气预报提供重要的方法,具有十分重要的实际意义。毕节地形复杂,西高东低,暴雨天气过程具有明显的突发性和局地性,通过研究 PWV 与暴雨天气过程的关系,有望提高降水预报准确率。陈聪等^[1]利用四川 GPS 观测网数据资料和 GAMIT 软件解算来反演大气可降水量,研究表明,GPS 反演出的大气可降水量对暴雨的临近预报具有较好的指示意义;秦鑫等^[2]通过降水样本拟合的方式探究辽宁地区大气可降水量阈值与降水的关系,结果显示 PWV 在降水预报方面具有一定的应用价值;强安丰等^[3]选用欧洲中心经、纬向水汽通量和大气可降水量资料,采用 IDW 等方法探究三江源区大气可降水量时空分布特征及其与降水的关系;于立等^[4]利用 NCEP/NCAR 月平均再分析资料和降水资料,分析了山西地区整层大气可降水量以及实际降水量变化特征,结果显示,大气可降水量月季变化明显,其年变化与实际降水量年变化也不尽相同;程航等^[5]选取大连市 3 次降水天气过程,利用地基 GPS/MET 观测网大气可降水量数据进行研究,分析了大气可降水量与降水量、水汽输送的关系;柯莉萍等^[6]利用贵州省贵阳、威宁探空观测数据及地面观测数据,采

用数值积分法、最小二乘法对 2 站的大气加权平均温度进行计算,建立贵州省月、季度、年的大气加权平均温度本地化模型;王根等^[7]基于 GPS/PWV 资料,对安徽省大气中水汽的时空分布特征进行分析,研究表明,GPS/PWV 平均值和地形高度变化存在正相关;洪潇宇^[8]利用 MICAPS 常规资料,对赤峰市 14 个国家站的实际降水量与大气可降水量进行相关性分析,研究表明,局地较大的大气可降水量与该地降水量之间没有明显的对应关系,而范围性大气可降水量增加至较大值对暴雨预报有一定的指示意义。

1 资料与方法

1.1 资料

本文选取 2005—2019 年毕节市 8 个国家站的 269 个暴雨天气过程及其发生前 24 h 的经过质控的地面露点温度资料和 2020 年 23 个暴雨天气过程资料。

1.2 方法

采用杨景梅等^[9]的露点法建立毕节 8 个国家站的 (PWV) 关系模型,柯莉萍等^[10]利用探空法与露点法反算的 (PWV) 进行研究对比表明,该方法可应用于 (PWV) 的反演中。地面露点法计算大气可降水量经验公式如下:

$$W = \exp(b_0' + b_1't_d) \times 10 \quad (1)$$

$$b_0' = 0.02r_1 + r_2 - r_3 \quad (2)$$

$$b_1' = 0.062\exp(0.036H + 0.12) - r_4 \quad (3)$$

$$r_1 = \exp(-1.975H^2 + 3.983H + 0.400) \quad (4)$$

$$r_2 = \frac{0.7}{(\varphi - 25.0)^2 + 1.2} \exp(-1.28H^2 - 0.69H) \quad (5)$$

$$r_3 = 0.0 \quad (6)$$

$$r_4 = \frac{0.017}{(\varphi - 25.0)^2 + 0.6} \exp(-2.0H) \quad (7)$$

(1)~(7) 式中 W 为大气可降水量,单位: mm; t_d 为露点温度,单位: °C; b_0' 、 b_1' 为经验系数; H 为海拔高度,单位: km; φ 为地理纬度。

2 大气可降水量与地面露点模型

利用公式 (1)~(7) 及表 1 中各国家站的纬度、海拔高度计算得出各站的经验系数 b_0' 、 b_1' , 建立大气可降水量与地面露点的关系模型 (表 2)。

表 1 毕节各国家站的纬度和海拔高度

Tab.1 Latitude and altitude of various national stations in Bijie

	七星关	威宁	织金	黔西	金沙	大方	纳雍	赫章
纬度/°N	27.3	26.86	26.68	27.02	27.47	27.15	26.77	27.09
海拔高度/km	1.5106	2.2375	1.3193	1.322	0.942	1.6508	1.4571	1.6296

表 2 毕节各国家站的经验系数、大气可降水量模型

Tab.2 Empirical coefficients and atmospheric precipitation models of various national stations in Bijie

	经验 系数 b_0'	经验 系数 b_1'	大气可降水量模型
七星关	0.1371	0.0737	$W = \exp(0.1371 + 0.0737t_d)$
威宁	0.0112	0.0757	$W = \exp(0.0112 + 0.0757t_d)$
织金	0.1912	0.073	$W = \exp(0.1912 + 0.073t_d)$
黔西	0.1887	0.0731	$W = \exp(0.1887 + 0.0731t_d)$
金沙	0.2364	0.0719	$W = \exp(0.2364 + 0.0719t_d)$
大方	0.0995	0.0741	$W = \exp(0.0995 + 0.0741t_d)$
纳雍	0.1532	0.0734	$W = \exp(0.1532 + 0.0734t_d)$
赫章	0.1051	0.074	$W = \exp(0.1051 + 0.074t_d)$

表 3 毕节各国家站 PWV 在强降水中的阈值指标(单位:mm)

Tab.3 Threshold indicators of PWV in heavy precipitation in various national stations in Bijie (unit: mm)

	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	平均值
七星关		43.1	49.6	54.5	52.5	45.2	38.9	47.3
威宁		31.7	32.2	35.9	36.6	35.8		34.4
织金		49.8	55.1	56.1	54.1	53.2	29.9	49.7
黔西	40.0	49.3	53.0	57.7	52.9	55.6	47.0	50.8
金沙		48.5	62.8	64.4	61.3	53.4		58.1
大方		42.2	47.8	47.0	44.2	42.9	42.6	44.5
纳雍		46.5	51.2	53.3	49.1	49.1	43.7	48.8
赫章			46.8	48.7	46.8	43.7		46.5
PWV 均值	40.0	44.4	49.8	52.2	49.7	47.4	40.4	

由于毕节市暴雨分布不均匀,4月、10月发生暴雨的几率较小,部分县区没有PWV在强降水中的阈值指标,4月仅黔西存在PWV阈值指标,与黔西其他各月相比较,4月阈值指标最低。

通过表3可以看出,大气可降水量(PWV)与海拔存在负相关,海拔最高的威宁在各月的PWV阈值最低,海拔最低的金沙平均值最大。结合图1分析PWV均值,其单峰型特征明显,以7月阈值最高即为峰值,分别向两边延伸递减,4月与10月、5月与9月、6月与8月阈值均相近,两两沿7月阈值递减呈现对称分布。整个毕节市的平均PWV阈值在

3 毕节暴雨 PWV 阈值指标及时间提前量

3.1 毕节暴雨 PWV 阈值指标

统计分析毕节市各国家站在2005—2019年间269个暴雨天气过程中PWV与降水强度之间的关系,发现在不同月份降雨过程开始持续上升并超过一定阈值时,有暴雨天气发生,大多数的强降水发生在PWV达到阈值的0~12h内;当PWV达到峰值开始下降时,多数降水过程随之在此后的几小时内结束。基于2005—2019年毕节各站暴雨天气及露点资料,利用统计分析等方法建立各站每月发生强降水前12h内PWV阈值指标(表3)。

40.0~52.2mm之间,而各站均有不同,PWV阈值单峰型特征显著,夏季(6—8月)阈值相对其他月份较高。

3.2 毕节暴雨 PWV 时间提前量

每月大气可降水量(PWV)的差异较为明显,在降水的强度、性质等方面均不相同,各站每月PWV达到阈值指标后出现降水的时间不同。当PWV达峰值后开始波动减小,随后测站出现降水,将峰值出现的时刻与降水开始的时刻的差值作为PWV峰值相对降水开始时间的提前量。

表 4 毕节各国家站 PWV 峰值相对降水开始时间提前量(单位:h)

Tab. 4 The advance of the PWV peak relative to the precipitation start time of the national stations in Bijie (unit: h)

	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	平均值 V_4
七星关		0.0	4.0	6.6	3.3	-1.0	9.5	3.7
威宁		4.0	4.2	1.3	1.4	7.7		3.7
织金		3.5	2.1	0.0	3.1	0.9	8.0	2.9
黔西	2.0	0.9	0.4	1.1	9.0	0.3	4.0	2.5
金沙		7.0	5.3	1.8	4.8	3.0		4.4
大方		0.0	0.0	0.0	4.0	0.1	6.0	1.7
纳雍		4.5	4.2	2.1	3.8	0.0	1.0	2.6
赫章			4.7	3.0	1.9	2.8		3.1
平均值 V_3	2.0	2.8	3.1	2.0	3.9	1.7	5.7	

表 4 为 2005—2019 年毕节各站 PWV 峰值相对降水开始的平均时间提前量分布统计情况。从表中看出,PWV 峰值多出现于降水之前,占 88%;与降水同步发生的情况占 8%,PWV 峰值滞后出现的仅七星关 9 月。根据平均值 V_3 (即区域逐月平均提前量)可知,毕节市 4—10 月的时间提前量在 1.7 ~ 5.7 h 之间,10 月的暴雨天气持续时间长,强度相对较小,大气可降水量累积耗时长,PWV 峰值超前降水发生的时间较长。由平均值 V_4 (即各站平均提前量)可知,各站的时间提前量在 1.7 ~ 4.4 h 之间,其中大方站时间提前量最小,金沙站的时间提前量最大,七星关站与威宁站的时间提前量相同。

4 暴雨天气过程 PWV 与强降水关系
个例分析

毕节市暴雨天气过程出现在 4—10 月,主要集

中发生于 6—8 月。以织金县 2020 年 7 月 6—8 日 1 次暴雨天气过程(图 1)为例,对 PWV 暴雨阈值指标和时间提前量进行探讨。本次过程降水为 89.3 mm,最大小时雨强为 $42.6 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,PWV 在降水开始前 24 h 内略微有下降趋势,7 日 10 时 PWV 为 52.5 mm,之后开始缓慢增长,在接近降水发生时,存在 2 次较为明显的跃增现象。由表 3 可知,织金县 7 月暴雨天气的阈值指标 PWV 为 56.1 mm,在上升过程中,PWV 在 7 日 19 时达 58.2 mm,此时 PWV 已大于 7 月的大气可降水量阈值指标,随后继续增长,于 7 日 21 时增至峰值 61.2 mm,平均增幅 $1.5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,同时降水开始,PWV 峰值与降水同时出现,时间提前量为 0,PWV 急速骤降,于 7 日 23 时降至最低值 48.5 mm,平均降幅 $2.4 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,与此同时,降水强度达最大值 $42.6 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,之后 PWV 略有回升后缓慢减小,降水强度也逐渐减小。

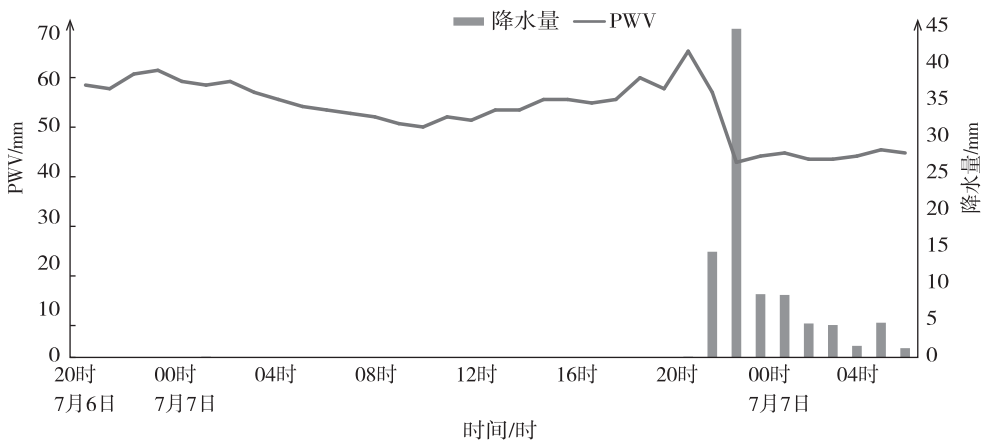


图 1 织金县 2020 年 7 月 6—8 日 PWV 与降水量时间变化

Fig. 1 Time change of PWV and precipitation in Zhijin county on July 6—8, 2020

从以上织金单站的个例分析来看,本文所探究的 PWV 在强降水发生前 12 h 的阈值指标对毕节市的暴雨预报具有重要的指示意义。

5 CSI 评分与预报检验

定义 PWV 从曲线谷底上升并超过阈值指标后

到达峰值,然后下降并低于该阈值的时间为 PWV 变化的 1 次过程,在这过程中发生的所有降水作为 1 次降水过程。PWV 从谷底上升并超过阈值开始预报将有暴雨发生。若实况有累积降水量大于 50 mm 以上的降水发生,视为预报正确;若没有发生暴雨,视为空报;若在 PWV 低于阈值指标的时段内发生 1 次暴雨天气则视为漏报。

定义试报结果的评分标准为任务成功指数 S_{CSI} (critical success index)、准确率 R 和空报率 C_{FAR} :

任务成功指数: $S_{CSI} = \frac{N_{11}}{N_{11} + N_{12} + N_{21}}$ (8)

准确率: $R = \frac{N_{11} + N_{22}}{N_{11} + N_{12} + N_{21} + N_{22}} \times 100\%$ (9)

空报率: $C_{FAR} = \frac{N_{21}}{N_{11} + N_{12} + N_{21} + N_{22}} \times 100\%$ (10)

其中, N_{11} 是达阈值指标且发生强降水的次数, N_{22} 是未达到阈值指标且未发生强降水的次数(描述 PWV 波动频次,即谷底到最高值间相差 3 mm 以上作为 1 次波动), N_{12} 是未达到阈值但强降水发生的次数,称为漏报次数, N_{21} 是达到阈值但强降水未发生的次数,即空报次数。

选取毕节 2020 年 4—10 月降水资料及地面露点资料,利用 PWV 阈值指标和时间提前量对其逐日预报进行 CSI 评分检验。

表 5 PWV 阈值预报 2020 年毕节市强降水过程的评分结果

Tab. 5 Scoring results of PWV threshold forecasting heavy precipitation process in Bijie city in 2020

月份	七星关			威宁			织金			黔西		
	S_{CSI}	$R/\%$	$C_{FAR}/\%$	S_{CSI}	$R/\%$	$C_{FAR}/\%$	S_{CSI}	$R/\%$	$C_{FAR}/\%$	S_{CSI}	$R/\%$	$C_{FAR}/\%$
5	0.33	94.6	5.40	0	93.3	6.67	0	95.0	5.00	0	97.8	2.17
6	0	96.0	4.00	0.33	95.1	4.87	0.5	96.1	3.92	0.5	98.3	1.69
7	0	98.2	1.75	0	95.7	4.26	0.33	96.6	3.39	0.67	97.8	2.22
8	0	98.1	1.89	0	97.7	2.33	0	93.9	6.12	0	95.2	4.76
9	0.67	97.7	2.27	0	96.7	3.23	0.5	97.2	2.78	0.67	92.3	5.13
10	0	96.9	3.13				0	93.8	6.25	0	96.8	3.23

月份	金沙			大方			纳雍			赫章		
	S_{CSI}	$R/\%$	$C_{FAR}/\%$	S_{CSI}	$R/\%$	$C_{FAR}/\%$	S_{CSI}	$R/\%$	$C_{FAR}/\%$	S_{CSI}	$R/\%$	$C_{FAR}/\%$
5	0.25	92.9	8.11	0	97.6	2.38	0	97.0	3.03			
6	0.5	97.9	2.13	0.5	98.2	1.75	0.5	98.0	2.04	0.5	98.1	1.92
7	0	96.2	3.77	0	95.9	4.08	0.67	98.1	1.89	0	94.1	5.88
8	0	97.7	2.27	0	97.7	2.33	0	95.5	4.55	0	95.7	4.26
9	1	100	0	0.33	93.9	6.06	0.33	94.9	5.13	1	97.0	3.03
10				0	96.6	3.45	0	96.3	3.70			

从表中 CSI 的评分结果来看,毕节各站在 2020 年出现暴雨的月份 CSI 值较高,阈值预报的结果较好,CSI 评分在 0.25 ~ 1 之间,预报效果最好的是金沙、赫章 9 月的暴雨阈值指标。根据准确率的结果分析可知,各站整体准确率高,均在 90% 以上,黔西 9 月的预报准确率最低,也有 92.3%。根据空报率来看,均低于 10%,其中金沙 5 月的空报率最高,为 8.11%,暴雨阈值指标预报效果优良。

根据毕节全市总体情况分析来看, S_{CSI} 为 0.22, R 为 96.32%, C_{FAR} 为 3.65%, CSI 评分较高,准确率高,空报率小,本文建立的暴雨阈值指标可用性高,对毕节市的暴雨天气预报有较好的指示作用。

6 结论与讨论

本文基于毕节市 8 个国家站海拔高度、暴雨天气与地面露点等气象资料,建立各站大气可降水量数据模型,对其特征进行分析和应用研究。结果显示:

①毕节 PWV 及时间提前量随海拔高度的变化而变化,海拔最低的金沙 PWV 均值最大,海拔最高的威宁 PWV 均值最小。

②毕节市大气可降水量月变化特征均表现为先增加后减少的单峰型特征,其主要降水过程与 PWV 峰值对应,短时强降水出现前后每一次水汽的激增均对应一次降水过程和最大降水强度的出现,表明了足够的水汽含量是造成降水的必要条件。

③PWV 峰值出现的时间比最大雨强出现时间早 1 ~ 3 h 左右;最大雨强出现前 6 h, PWV 平均增幅在 1 mm 以上, PWV 增幅大小决定了降水过程中雨强的强弱, 这对短时强降水开始时间有较好的预报指导意义, 而 PWV 增幅的大小对短时强降水的量级预报有较好的指示作用, PWV 增幅与雨强之间存在一定的正相关。

④对 PWV 阈值及时间提前量进行 CSI 评分检验, 结果表明, 强降水预报准确率高, 空报率低。

⑤当大气可降水量过小时, 降水很难发生; 大气可降水量代表某一地区单位面积上空整层大气的水汽全部凝结并降至地面的降水量, 但不能作为 1 次降水天气的降水量上限, 因为大气可降水量并不能一次性全部转化为降水量, 这涉及到大气可降水量的转化率问题。

⑥根据表 5 来看, 任务成功指数并不太理想, 且空报次数较多。这是由于大气可降水量仅作为强降水发生的充分不必要条件, 影响强降水发生的条件除了水汽之外还有很多别的因素, 如能量、抬升条件等, PWV 仅能表述强降水发生的某一方面, 并不能囊括所有发生强降水的可能, 单一讨论 PWV 在强降水预报的准确率存在一定的局限性, 此后还需要更详细的研究探索。

参考文献

- [1] 陈聪, 刘江. 地基 GPS 反演大气可降水量在暴雨中的演变特征[J]. 四川地震, 2017(2): 23 - 26.
- [2] 秦鑫, 赵姝慧, 马嘉理, 等. 辽宁地区大气可降水量与降水关系的研究[J]. 气象, 2020, 46(1): 80 - 88.
- [3] 强安丰, 汪妮, 解建仓, 等. 三江源区大气可降水量时空特征及其与降水关系[J]. 干旱气象, 2019, 37(1): 22 - 30.
- [4] 于立, 李继祥, 尚可政, 等. 山西地区大气可降水量与实际降水量变化特征分析[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(1): 171 - 173.
- [5] 程航, 程相坤, 朱晶, 等. GPS 遥感大气可降水量在大连地区 3 次降水过程中的应用[J]. 气象与环境学报, 2014, 30(5): 38 - 48.
- [6] 柯莉萍, 廖留峰, 杨洋, 等. 贵州省大气加权平均温度模型研究[J]. 中低纬山地气象, 2021, 45(1): 58 - 62.
- [7] 王根, 邱康俊, 刘惠兰, 等. 安徽省地基 GPS 大气可降水量时空演化特征分析及应用研究[J]. 中国农学通报, 2018, 34(33): 107 - 114.
- [8] 洪潇宇. 赤峰地区大气可降水量与实际降水量关联性分析[J]. 南方农业, 2019, 13(2): 173 - 175.
- [9] 杨景梅, 邱金桓. 用地面湿度参量计算我国整层大气可降水量及有效水汽含量方法的研究[J]. 大气科学, 2002(1): 9 - 22.
- [10] 柯莉萍, 张艳, 陈银东, 等. 探空与地面露点温度两种资料反算大气可降水量间差异对比[J]. 中低纬山地气象, 2020, 44(5): 26 - 31.
- [11] 张子莹, 李超. 鄂西南地区暴雨过程强降水特征分析[J]. 气象水文海洋仪器, 2021, 38(3): 56 - 60.