

张翠华,李元华,冯洋.石家庄地区输电线路雷击事故发生的气象条件[J].海洋气象学报,2023,43(2):109-116.
ZHANG Cuihua, LI Yuanhua, FENG Yang. Meteorological conditions for lightning strikes on power transmission lines in Shijiazhuang[J]. Journal of Marine Meteorology, 2023, 43(2): 109-116. DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2023.02.010. (in Chinese)

石家庄地区输电线路雷击事故发生的气象条件

张翠华^{1,2,3}, 李元华⁴, 冯洋³

(1.中国气象局雄安大气边界层重点开放实验室,河北 雄安新区 071800;2.河北省气象与生态环境重点实验室,河北 石家庄 050021;3.河北省石家庄市气象局,河北 石家庄 050081;4.河北省气象信息中心,河北 石家庄 050021)

摘要: 为了研究石家庄地区输电线路雷击事故发生的气象条件,利用该地区1990—2018年输电线路雷击事故发生的详细资料和地面、探空气象资料,分析了输电线路雷击事故的时空变化,确定了容易发生输电线路雷击事故的天气系统配置和探空物理量阈值;通过输电线路雷击事故发生的气象条件,检验了2019—2020年输电线路雷击事故预报的准确性。结果表明:石家庄输电线路雷击事故主要发生在夏季傍晚前到前半夜,夏季发生概率明显高于春、秋季;输电线路雷击事故发生日数自西向东逐渐减少,集中发生在西部山区的井陘,其次是市区,井陘发生概率远高于其他地区;对流天气影响系统主要为高空槽型和冷涡型,探空物理量同时满足首要条件和附加条件时,引发输电线路雷击事故概率较高;输电线路雷击事故发生的气象条件在2019—2020年得到较好的预测检验,对防范雷击事故有一定指导意义。

关键词: 输电线路;雷击事故;气象条件;预测检验

中图分类号: P49;X43 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2023)02-0109-08

DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2023.02.010

Meteorological conditions for lightning strikes on power transmission lines in Shijiazhuang

ZHANG Cuihua^{1,2,3}, LI Yuanhua⁴, FENG Yang³

(1. China Meteorological Administration Xiong'an Atmospheric Boundary Layer Key Laboratory, Hebei Xiong'an New Area 071800, China; 2. Hebei Key Laboratory for Meteorology and Eco-environment, Shijiazhuang 050021, China; 3. Shijiazhuang Meteorological Bureau, Shijiazhuang 050081, China; 4. Hebei Meteorological Information Center, Shijiazhuang 050021, China)

Abstract: In order to study the meteorological conditions for lightning strikes on power transmission lines in Shijiazhuang, based on the detailed information of such accidents and meteorological data of surface observation and radiosonde from 1990 to 2018 in the region, the spatial and temporal variations of lightning strikes on power transmission lines are analyzed, and the configurations of weather systems and the threshold values of radiosonde physical quantities are determined. The forecast accuracy of lightning strikes on power transmission lines from 2019 to 2020 is tested by analyzing the meteorological conditions for the accidents. The results show that the lightning strikes on power transmission lines in Shijiazhuang mainly occur from early evening to early midnight in summer, and the probability in summer is

收稿日期:2022-09-21;修回日期:2022-11-09

基金项目:国家重点研发计划项目(2020YFF0304401);河北省技术创新引导计划项目(21475401D)

第一作者简介:张翠华,女,硕士,高级工程师,主要从事应用气象服务研究,zch7695@sina.com。

通信作者简介:李元华,女,硕士,高级工程师,主要从事气象信息及服务,hbqxlyh@aliyun.com。

significantly higher than that in spring and autumn. The days of such accidents decrease from west to east, mostly in Jingxing, a mountainous area in the west, followed by downtown areas, and the maximum probability is observed in Jingxing. When the convective weather systems are upper trough type and cold vortex type, and the radiosonde physical quantities satisfy both the necessary and additional conditions, the probability of lightning strikes on power transmission lines is high. The meteorological conditions for lightning strikes on power transmission lines from 2019 to 2020 have been well tested, which are instructive for preventing lightning strikes.

Keywords: power transmission line; lightning strike; meteorological condition; prediction test

引言

石家庄地处河北省中南部,域跨太行山地和华北平原两大地貌单元,西部地处太行山中段东麓,山区部分约占全市总面积的50%,东部为滹沱河冲积平原,包括市区和16个县(区)。中国平均雷暴日数较多区域主要分布在新疆西北部、西藏中部、青海南部、四川西部及沿长江的以南地区,石家庄位于我国北方中雷区^[1],西部为太行山中段东麓,东部为中南部平原,雷电活动发生频繁^[2]。通过大气电场仪组网数据、天气雷达及闪电定位资料等多源资料的综合分析可以更好地判断雷暴云的活动状况^[3],提高雷电预警准确率和时间提前量。但是雷暴事件小概率会引发雷击灾害,雷击地铁线路及高架站^[4]、建筑物^[5]、地上油气管道^[6-7]、森林^[8-9]等造成人员伤亡和经济损失,而架空输电线路是电力系统的重要组成部分,由于其所经之处大都为旷野且线路距离较长,杆塔较高,因此遭受雷击的概率增大^[10]。雷暴是导致电网事故发生频率较高的气象灾害^[11],当雷电贴近陆地表面与输配电杆塔或线路相遇,雷击电流在杆塔或线路上形成巨大电位差和能量释放,会在一定程度上损毁杆塔、线路及附近的电力设备^[12]。

目前在输电线路事故的相关气象条件研究中,卢振礼等^[13]采用事件概率回归和逻辑回归对比分析,建立了灾害性天气(雷雨、大风)、气温与电力事故发生概率的回归预警模型。王洁等^[14]分析了冀北电网灾害事故的时空分布特征,指出影响输电线路的气象灾害主要有雷害、冰害、风偏和污闪,其中雷害最多。张翠华^[15]分析了石家庄地区电力污闪事故发生资料,给出判定电力污闪发生的气象要素指数条件。王洁等^[16]分析了冀北地区输电线路舞动的时空分布和气象要素特征,得出输电线路舞动

发生的气象要素指标。王馨等^[17]、武辉芹等^[18]通过分析河北省输电线路覆冰、冰害事故资料,分别采用层次法、逐步回归分析构建输电线路覆冰风险预报模型和电线积冰的逐步回归预报模型。杨琳晗等^[19]采用层次分析法确定雷击灾害频度、雷暴日数、生命易损模数和经济易损模数4个评估指标权重分布,从而建立输电线路雷击风险评估模型,形成冀北地区输电线路雷击灾害风险区划图。张翠华等^[20-21]分析了输电线路雷击前地面气象要素变化特征并建立输电线路雷击事故发生气象指标。目前关于影响输电线路的气象灾害事故研究中,输电线路雷击研究是从雷击发生前的地面气象要素、评估指标确定权重建立雷击风险模型来入手分析,而本文以石家庄地区1990—2018年99次输电线路雷击事故为研究样本,从高空大气环流形势和物理量的角度分析雷击输电线路前的环流背景和探空物理量变化,找出其发生的气象条件,以期为做好输电线路雷击事故预报预警^[22],进一步防范输电线路雷击事故的发生提供科技支撑。

1 资料及方法

利用石家庄地区1990—2018年99次输电线路雷击事故的发生时间、故障地点、故障现象描述等详细资料,分析输电线路雷击事故发生的时空变化和发生概率。通常发生雷暴的当日为一个雷暴日,在雷暴日发生输电线路雷击事故的当日为一个输电线路雷击日,发生概率是指输电线路雷击日数占雷暴日数的百分比,利用Surfer软件绘制输电线路雷击点的空间分布。根据2001—2018年50次输电线路雷击事故详细资料,利用国家级地面气象观测站的高空(时间间隔12h)、地面(时间间隔3h)观测资料进行环流形势分析;石家庄地区一般选取邢台站探空资料(时间间隔12h)用于探空物理量分析,利

用天气学原理分析其发生的气象条件,对强对流雷电话动引发输电线路雷击事故的天气影响系统归类并统计分析发生的探空物理量,确定容易发生输电线路事故的天气系统配置和探空物理量阈值,找出其发生的气象条件;基于2001—2018年输电线路雷击事故发生的气象条件,检验2019—2020年输电线路雷击事故的预报准确性。

2 结果分析

2.1 输电线路雷击事故发生的时空变化

由季节变化来看,石家庄输电线路雷击事故在春季、夏季和秋季均有发生,主要发生在夏季,其占春夏秋3季的86.9%;夏季输电线路雷击事故发生概率(9.5‰)明显高于春季(4.1‰)和秋季(4.5‰)。由日变化看,春季输电线路雷击事故主要发生在前半夜(20—22时),发生概率为62.5%;夏季输电线路雷击事故主要发生在傍晚前到前半夜(16—22时),发生概率为68.5%;秋季输电线路雷击事故主要发生在午夜后(00—02时),发生概率为60%。由石家庄输电线路雷击事故发生的空间分布(表1)可见,输电线路雷击事故发生日数自西向东逐渐减少,集中发生在西部山区的井陘,其次是市区、平山发生较多,赞皇和栾城没有发生;西部山区雷电活动发生频繁,引发输电线路雷击事故发生概率增大,井陘和市区发生概率(31.8‰和31.4‰)最大,其次是平山(13.1‰),远高出全区发生概率(8.5‰)。

2.2 输电线路雷击事故发生的天气影响系统分析

高空的槽、冷涡,低层的切变线、低涡和地面气旋、冷锋、倒槽等影响系统为雷电、大风、冰雹等对流性天气的产生提供了天气尺度的动力条件、水汽条件和触发机制,在发生对流性天气时积雨云中雷电交作的激烈放电为引发输电线路雷击事故提供了充分条件。

石家庄2001—2018年输电线路雷击事故50个样本中,对逐次输电线路雷击事故发生时(最近一个时次08时或20时)对流天气过程的影响系统做了细致分析并分类,确定容易发生输电线路事故的天气系统配置,如表2所示,引发输电线路雷击事故的对流天气影响系统分为高空槽型、冷涡型、西北气流型和横槽型4个类别。其中高空槽型最多,为33例,占66%;其次,冷涡型为10例,占20%;西北气

流型与横槽型较少,分别为5例、2例。

表1 石家庄输电线路雷击事故发生的空间分布

Table 1 Spatial distribution of lightning strikes on power transmission lines in Shijiazhuang

区域	雷暴日数/d	雷击日数/d	雷击发生概率/‰
灵寿	776	3	3.9
行唐	770	1	1.3
晋州	697	6	8.6
正定	677	3	4.4
井陘	911	29	31.8
平山	761	10	13.1
新乐	718	6	8.4
藁城	667	5	7.5
市区	797	25	31.4
无极	662	4	6.0
赵县	656	1	1.5
栾城	673	0	0
高邑	754	3	4.0
元氏	705	2	2.8
赞皇	820	0	0
深泽	671	1	1.5
全区	11 715	99	8.5

表2 石家庄输电线路雷击事故发生的天气影响系统及分类

Table 2 Weather systems and their classification for lightning strikes on power transmission lines in Shijiazhuang

类别	个例数	高空环流形势	地面环流形势
高空槽型	33	500 hPa 高空槽、700 hPa 或 850 hPa 切变线	低压、冷锋、低压带
冷涡型	10	500 hPa 冷涡、冷中心, 700 hPa 或 850 hPa 低涡或切变线	低压、锋面气旋
西北气流型	5	500 hPa 槽后或冷涡后西北气流, 700 hPa 西北气流, 850 hPa 西北气流或切变线	低压带、气旋底部
横槽型	2	500 hPa 横槽、700 hPa 横槽或切变线, 850 hPa 切变线	“北高南低”、冷高压

高空槽型中,强对流发生在500 hPa槽前西南气流中,700 hPa或850 hPa常存在低空切变线,地面多存在冷锋、低压或低压带。高空锋区与地面锋区接近重合时,大尺度的上升运动强烈。冷涡型中,500 hPa的冷涡为蒙古冷涡、东北冷涡和华北冷涡,一般有明显冷中心或冷温槽配合,700 hPa或850 hPa有低涡或切变线对应,3层系统近于垂直或前倾,地面系统为低压、锋面气旋(底部或前部)。发现强对流天气多出现在冷涡的东南或西南象限。中高纬阻塞形势建立时,冷涡移动缓慢或少动,会造成连续数日的强对流天气。西北气流型中,高空500 hPa位于高空槽或冷涡后部的西北气流中,有明显冷平流,低层有切变产生或加强,有暖(湿)平流,地面位于低压带中或气旋底前部、高压后部。横槽

型中,500 hPa 蒙古东部横槽南压过程中有新冷空气补充,逐渐南摆转竖,横槽后风速可达急流标准(风速为 $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$),高低层结构垂直或前倾,低层(700 hPa或 850 hPa)有横槽或切变线,海平面气压场多呈“北高南低”形势,北部有较强冷高压。4类强对流天气形势中,500 hPa 有时出现 $v>20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的大风速带,表明冷平流强,850 hPa 有时存在暖脊,对应暖平流强,使得高低层温差增大,加强层结不稳定,更利于强对流产生。

2.3 输电线路雷击事故发生的探空物理量分析

高空(干)冷空气和低层暖湿空气共同作用于建立不稳定层结,加之天气尺度系统、地面辐合线、重力波、地形等触发机制的共同作用产生对流性

天气。在探空物理量条件中,一般当对流有效位能(convective available potential energy, CAPE)达几百 $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$,高低空气温差值 $t_{850}-t_{500}$ 超过 $26 \text{ }^{\circ}\text{C}$,沙式指数(Showalter index, SI)小于 $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$,K 指数大于 $28 \text{ }^{\circ}\text{C}$,低层有一定的水汽(相对湿度 $H_R>60\%$)时即可产生对流性天气,而较弱、中等和强的 $0\sim 6 \text{ km}$ 垂直风切变均可产生对流性天气。

石家庄 2001—2018 年输电线路雷击事故 50 个样本中,对输电线路雷击对流发生时(最近 1 个时次 08 时或 20 时)表征动力、热力(不稳定能量)和水汽的探空物理量(邢台探空)做细致分析,确定容易发生输电线路事故的探空物理量阈值,如表 3 所示。

表 3 石家庄输电线路雷击事故发生的探空物理量特征

探空物理量	变化范围	均值	阈值范围	较高阈值个例数量
CAPE/ $(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1})$ (或订正)	700~5 000	2 100	1 000~2 500 2 500~5 000	26 20
$t_{850}-t_{500}/^{\circ}\text{C}$	25~35	32	26~35	45
SI 指数/ $^{\circ}\text{C}$	-10.0~0.8	-4	-10~0	46
K 指数/ $^{\circ}\text{C}$	26~42	36	28~42	45
0~6 km 风矢差/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	10~24	16	12~20 20~24	41 4
850 hPa 或边界层的相对湿度/%	50~100	87	60~100	46

CAPE 值(或订正)均值为 $2\ 100 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$,其中达到中等强度($1\ 000\sim 2\ 500 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$)的个例有 26 个,达到高值(大于 $2\ 500 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$)的个例有 20 个,分别占 52%和 40%,最大值达到 $5\ 000 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。高低空气温差值 $t_{850}-t_{500}$ 的均值为 $32 \text{ }^{\circ}\text{C}$,超出发生对流性天气的经验阈值 $26 \text{ }^{\circ}\text{C}$,其中 $t_{850}-t_{500}>26 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 的个例有 45 个,占 90%, $t_{850}-t_{500}>30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 的个例有 40 个,占 80%,最大值达到 $35 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。SI 指数均值为 $-4 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $I_S<0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 的个例有 46 个,占 92%, $I_S<-2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 的个例有 42 个,占 84%, $I_S<-5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 的有 15 个,占 30%,最小值为 $-10 \text{ }^{\circ}\text{C}$,表明强雷暴或严重对流天气发生可能性很大。K 指数均值为 $36 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $I_K>28 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 的个例有 45 个,占 90%, $I_K>32 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 的个例有 43 个,占 86%,最大值为 $42 \text{ }^{\circ}\text{C}$,不稳定层结明显。 $0\sim 6 \text{ km}$ 垂直风切变均值为 $16 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,中等强度($12\sim 20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)的个例有 41 个,强垂直风切变($20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)的个例有 4 个,最大值为 $24 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,中等强度及以上的垂直风切变个例占 90%,在 9 个出现大风的个例中,有 6 个出现中等强度及以上的 $0\sim 6 \text{ km}$ 风矢差,利于风暴组织维持加强和雷暴大风的出现。近

地层(低层 850 hPa 或边界层)有湿层(相对湿度 $H_R>60\%$)的个例有 46 个,占 92%,有明显湿层(相对湿度 $H_R>80\%$)的个例有 40 个,占 80%,近地湿层不论深厚还是浅薄,均利于产生对流天气。由以上统计分析可知,大气层结呈明显对流不稳定,多会产生剧烈的强对流天气,当 $V_{\text{CAPE}}>1\ 000 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ (个例占 92%)、 $t_{850}-t_{500}>26 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (个例占 90%)、 $I_S<0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (个例占 92%)、 $I_K>28 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (个例占 90%)、 $0\sim 6 \text{ km}$ 风矢差 $\Delta v>12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (个例占 90%)、近地湿层空气相对湿度 $H_R>60\%$ (个例占 92%)时作为首要条件,并进一步满足 $t_{850}-t_{500}>30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (个例占 80%)、 $I_S<-2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (个例占 84%)、 $I_K>32 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (个例占 86%)其中的两个以上指标时作为附加条件,经统计 2001—2018 年期间满足首要条件和附加条件的个例数为 60 个雷暴日,其中包含 45 个雷击日,即输电线路雷击事故发生概率为 75%,表明同时满足首要条件和附加条件可以考虑作为输电线路雷击事故发生的阈值指标。

2.4 输电线路雷击事故发生气象条件的预测检验

通过基于 2001—2018 年输电线路雷击事故发生

的详细资料和国家级地面气象观测站高空和地面观测资料、探空资料的气象条件分析得出输电线路雷击事故发生的气象条件,用以预测检验 2019—2020 年输电线路雷击事故。2019 年雷电活动较弱,未发生输电线路雷击事故。2020 年发生 2 次输电线路雷击事故,分别为 2020 年 5 月 17 日 17:59 石家庄东部晋州的里丰站 110 kV 丰光线和 6 月 24 日 19:46 石家庄西部元氏的万花站 110 kV 万佐Ⅱ线,石家庄东部的晋州和

西部的元氏在这两个时段均发生了雷暴等强对流天气。下面利用环流形势、探空物理量和雷达回波资料,分析检验 6 月 24 日天气过程发生输电线路雷击事故的气象条件。

2020 年 6 月 24 日 19:46 位于元氏(石家庄西部)的 110 kV 万佐Ⅱ线泉村 T 接线发生雷击跳闸事故,对流天气影响系统为高空槽型,高空槽、地面低压倒槽发展触发对流(图 1)。

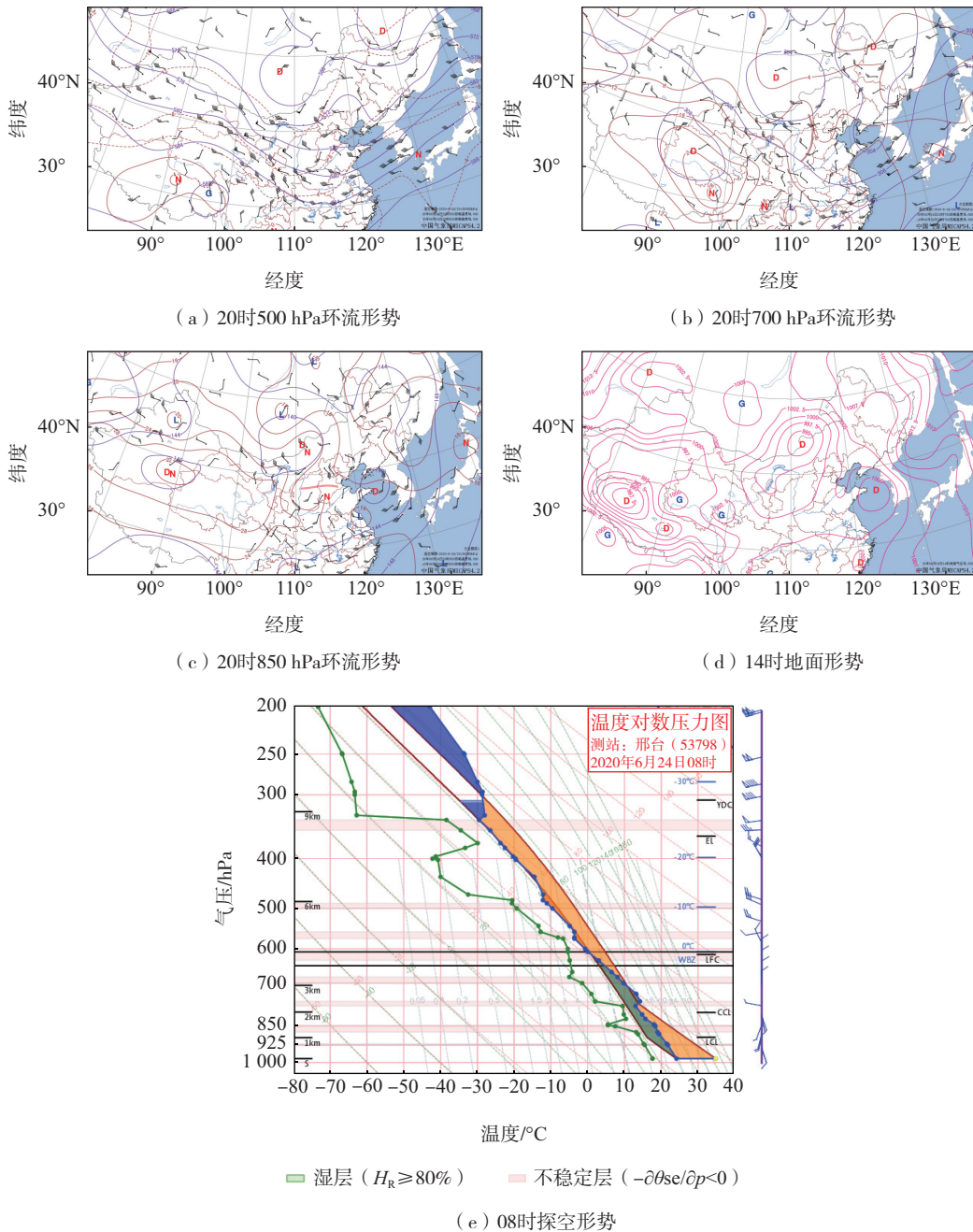


图 1 2020 年 6 月 24 日形势场
Fig.1 Weather situation on 24 June 2020

由环流形势看,500 hPa 贝加尔湖以南有一冷涡,华北地区受涡底部东移的短波槽影响(图 1a)。08 时短波槽位于河套地区并东移发展,20 时短波槽、700 hPa 冷切变移至石家庄西部(图 1b),850 hPa 在石家庄中部存在暖切变(图 1c),地面内蒙古中部有低压倒槽发展,石家庄处于倒槽底部前的弱气压场中(图 1d)。

由探空物理量(08 时邢台探空)看,呈“上干下湿”不稳定层结,850 hPa 以下有湿层(相对湿度在 80%以上),具备一定水汽条件(图 1e)。14 时订正 CAPE 值达 $1\ 600\ \text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$, $t_{850}-t_{500}$ 为 $32\ ^\circ\text{C}$,具备一定不稳定能量。SI 指数为 $-4\ ^\circ\text{C}$,强雷暴或严重对流天气发生可能性较大。K 指数为 $30\ ^\circ\text{C}$,不稳定层结

明显。0~6 km 垂直风切变为 $13\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,白天受辐射升温影响,最高气温达 $34\sim 35\ ^\circ\text{C}$,露点温度为 $18\sim 19\ ^\circ\text{C}$,热能条件利于午后触发强对流天气。强对流天气在石家庄西部山区触发向下游的不稳定区移动中,产生了雷电活动引发输电线路雷击事故。由 17—20 时石家庄雷达(位于石家庄新乐) 1.5° 仰角基本反射率因子回波演变(图 2)看,16—17 时石家庄西部山区回波东移,17—19 时多单体风暴继续东移加强(图 2a—c),侧向排列组织化逐渐形成飑线,最大反射率因子超过 60 dBZ,19—20 时强回波(反射率因子在 45 dBZ 以上)影响石家庄西部的元氏,最大反射率因子达 64 dBZ(图 2d—f),元氏出现雷电、8 级雷暴大风、短时强降水等强对流天气。

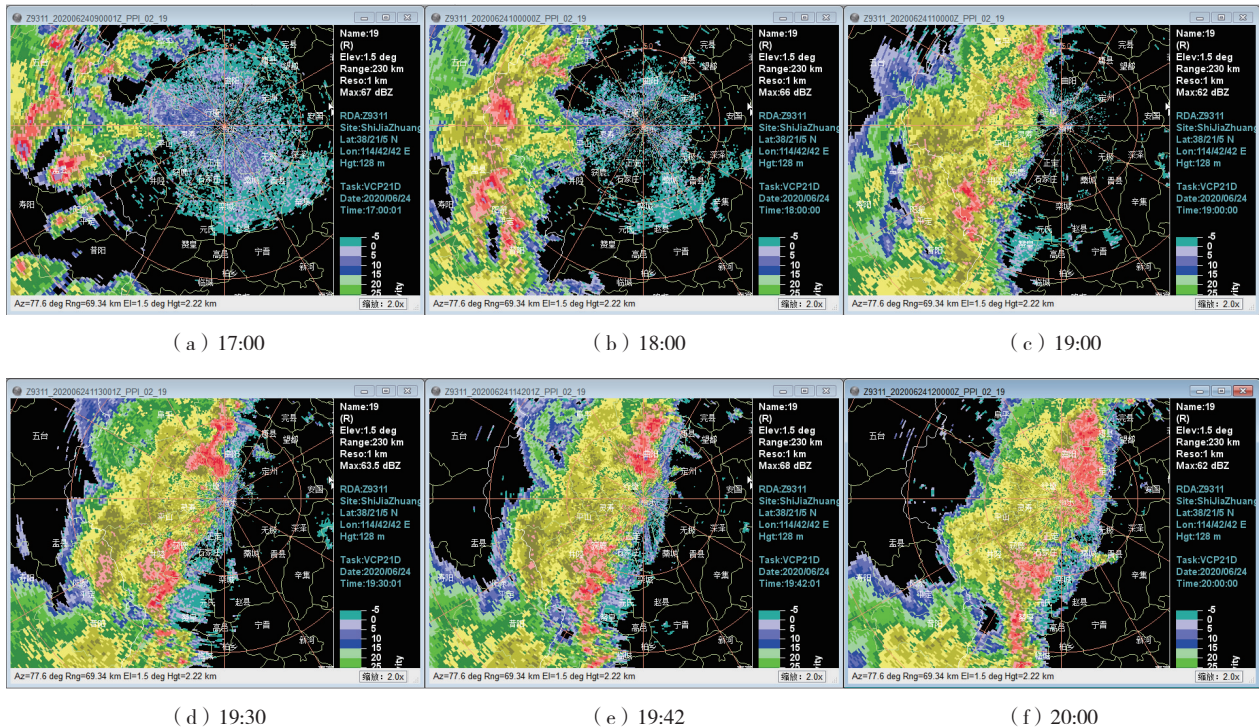


图 2 2020 年 6 月 24 日 17—20 时石家庄雷达 1.5° 仰角基本反射率因子回波演变

Fig.2 Evolution of basic reflectivity echo at 1.5° elevation from Shijiazhuang radar from 17:00 to 20:00 BST 24 June 2020

输电线路雷击事故发生(19:46)前,石家庄西部的元氏受强多单体风暴影响, $0.5^\circ\sim 3.3^\circ$ 仰角反射率因子(图 3)均很强,达到 $50\sim 55\ \text{dBZ}$,最大超过 $60\ \text{dBZ}$,其中风暴单体 G2 质心高度(图 4)为 $3\sim 5\ \text{km}$,最大反射率因子高度达 $5\sim 6\ \text{km}$,风暴发展旺盛。由 0.5° 、 1.5° 仰角速度图(图 5)看出,飑线过境,北侧有 $20\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上的大风速核,产生较大范围 8 级以上雷暴大风等强对流天气引发输电

线路雷击事故。

3 结论

(1) 石家庄输电线路雷击事故主要发生在夏季傍晚前到前半夜,夏季发生概率明显高于春、秋季。石家庄地区输电线路雷击事故发生日数自西向东逐渐减少,集中发生在西部山区的井陘,其次是市区,井陘发生概率远高于其他地区。

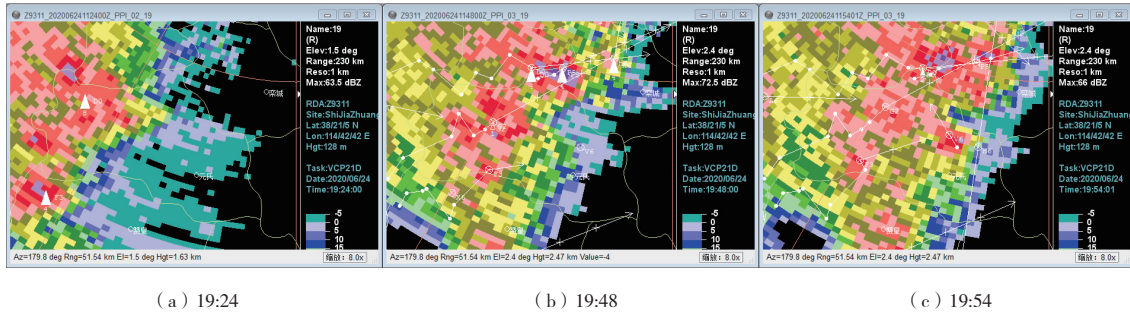


图 3 2020 年 6 月 24 日不同时刻元氏雷达 1.5°、2.4°仰角回波演变
Fig.3 Evolution of basic reflectivity echo at 1.5° and 2.4° elevations from Yuanshi radar on 24 June 2020

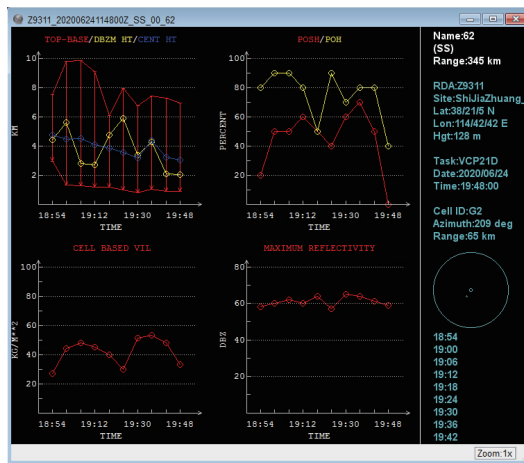


图 4 2020 年 6 月 24 日 18:54—19:48 元氏风暴单体 G2 追踪信息
Fig.4 Tracking information about storm cell G2 in Yuanshi from 18:54 to 19:48 BST 24 June 2020

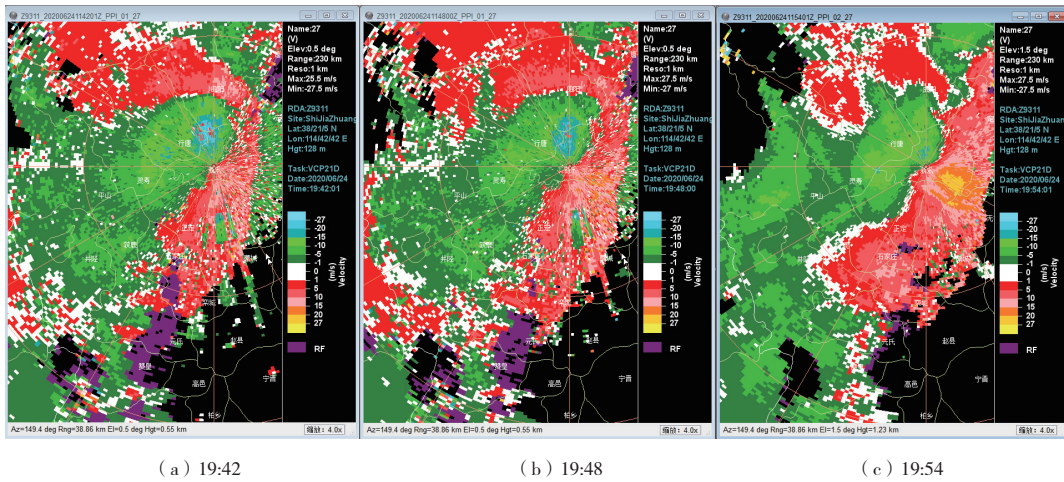


图 5 2020 年 6 月 24 日不同时刻元氏雷达 0.5°、1.5°仰角速度图
Fig.5 Velocity diagram of 0.5° and 1.5° elevations from Yuanshi radar on 24 June 2020

(2) 石家庄输电线路雷击事故发生时对流天气过程的影响系统分为高空槽型、冷涡型、西北气流型和横槽型 4 个类别,其中高空槽型和冷涡型最多(占 86%)。

(3) 石家庄输电线路雷击事故发生时表征动力、热力(不稳定能量)和水汽的探空物理量中,满足 $V_{CAPE} > 1000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $t_{850} - t_{500} > 26 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $I_S < 0 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $I_K > 28 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $0 \sim 6 \text{ km}$ 风矢差 $\Delta v > 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、近地湿层空气

相对湿度 $H_R > 60\%$ 时,为输电线路雷击事故发生的首要条件。满足 $t_{850} - t_{500} > 30\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $I_S < -2\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $I_K > 32\text{ }^\circ\text{C}$ 中的两个以上指标时,为输电线路雷击事故发生的附加条件。同时满足首要条件和附加条件时,引发输电线路雷击事故概率较高。

参考文献:

- [1] 王学良,余田野,汪姿荷,等.1961—2013年中国雷暴气候特征及东亚夏季风影响研究[J].暴雨灾害,2016,35(5):471-481.
- [2] 陈柳彤,龙爽,俞海洋,等.河北省雷电灾害风险区划研究[J].灾害学,2019,34(3):189-195.
- [3] 吴蓓,闫景东,任兆鹏,等.青岛地区电场仪资料在一次雷暴天气过程中的应用分析[J].海洋气象学报,2017,37(1):92-97.
- [4] 刘晓东,冯建伟,植耀玲,等.城市地铁交通雷击风险评估与模拟仿真[J].科学技术与工程,2018,18(9):20-28.
- [5] 李京校,霍沛东,符琳,等.古建筑雷电灾害及防雷技术研究综述[J].气象与环境学报,2021,37(2):91-100.
- [6] 杨丝琪,陈维,郭天伟,等.特高压交流输电线路正常运行对埋地油气管道电磁影响及防护措施研究[J].高压电器,2019,55(6):205-211.
- [7] 刘宽,安韵竹,胡元潮,等.电力线路与燃气管道交叉跨越点雷击事故防护研究[J].中国安全生产科学技术,2020,16(5):166-171.
- [8] 冯俊伟,沈浩,梁栋.森林雷击火发生规律研究[J].中山大学学报(自然科学版),2021,60(3):131-137.
- [9] 丛日立,安博,王晓艳,等.雷击灾害下多级串联闪络保护器断线故障控制方法研究[J].灾害学,2019,34(4):47-52.
- [10] 刘向科,康宁,邱黎,等.泰山景区地闪分布特征及海拔高度关系研究[J].海洋气象学报,2021,41(4):102-108.
- [11] 孙霞,俞海洋,孙斌,等.河北省主要气象灾害时空变化的统计分析[J].干旱气象,2014,32(3):388-392.
- [12] 陈邦发,陈斯翔,詹清华,等.雷击输电线路杆塔接地装置周边地中散流分布特性[J].广东电力,2019,32(3):119-125.
- [13] 卢振礼,李玉华,崔广署,等.灾害天气对日照市电力事故的影响研究[J].海洋气象学报,2021,41(3):102-108.
- [14] 王洁,付桂琴,武辉芹,等.冀北电网灾害事故的时空分布特征及风险评价[J].干旱气象,2018,36(5):879-883.
- [15] 张翠华.气象要素对电力污闪发生的影响[J].干旱气象,2015,33(1):180-184.
- [16] 王洁,范俊红,赵增保,等.冀北输电线路舞动灾害特征与气象条件分析[J].干旱气象,2019,37(6):1021-1027.
- [17] 王馨,卢毅,张旭,等.冀北地区输电线路覆冰风险预报研究[J].干旱气象,2020,38(1):164-168.
- [18] 武辉芹,张金满,赵增保.河北省输电线路冰害的气象要素时空分布特征[J].干旱气象,2017,35(6):991-997.
- [19] 杨琳晗,赵增保,张彦恒,等.基于层次法的冀北地区输电线路雷击风险区划[J].干旱气象,2018,36(3):516-521.
- [20] 张翠华,张文煜,张艳品.输电线路雷击前近距离气象要素变化特征分析:以石家庄市为例[J].气象与减灾研究,2019,42(4):295-300.
- [21] 张翠华,张文煜.石家庄地区输电线路雷击事故发生的气象指标研究[J].干旱气象,2021,39(6):1025-1030.
- [22] 李京校,宋平健,甘璐,等.故宫博物院“6·23”雷击事件分析[J].南京信息工程大学学报(自然科学版),2014,6(4):326-335.