

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.
LU Zhenli, LI Yuhua, CUI Guangshu, et al. Study on impact of hazardous weather on electric power accident in Rizhao[J]. Journal of Marine Meteorology, 2021, 41(3): 102-108. DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2021.03.011. (in Chinese)

灾害天气对日照市电力事故的影响研究

卢振礼¹,李玉华²,崔广署¹,安源¹

(1.日照市气象局,山东日照 276826;2.山东省气象服务中心,山东济南 250031)

摘要: 利用雷雨、大风等灾害天气资料和电力事故历史数据资料,分析了电力事故发生的时空分布特征及其与雷雨、大风、日平均气温等天气要素之间的关系。进而利用事件概率回归(regression estimation of event probability, REEP)和 Logistic 回归分析方法,得到了日照市电力事故发生概率与雷雨、大风和日平均气温之间关系的预警模型。研究结果表明:1)雷雨、大风是造成日照市电力事故的重要气象因素。2)雷雨、大风和高温等灾害天气对电力事故的发生虽都有促成作用,但影响能力存在较大差距。3)两种回归分析模型对因子和变量之间关系均有较好的拟合效果,相较而言,REEP 模型更为直观,Logistic 回归分析方法更为客观,适用性更强。4)回归分析结果建立在客观资料基础上,回归模型具有准确性、实用性,可为电力事故预警发布系统提供理论和技术支持。

关键词: 灾害天气; 电力事故; 回归分析

中图分类号: P49 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2021)03-0102-07

DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2021.03.011

Study on impact of hazardous weather on electric power accident in Rizhao

LU Zhenli¹, LI Yuhua², CUI Guangshu¹, AN Yuan¹

(1. Rizhao Meteorological Bureau, Rizhao 276826, China; 2. Shandong Meteorological Service Center, Jinan 250031, China)

Abstract The spatial and temporal distribution characteristics of electric power accidents and their relationship with weather factors such as thunderstorm, gale, and daily mean temperature are analyzed by using the weather data of thunderstorm and gale and historical data of electric power accidents. By using the method of REEP (regression estimation of event probability) and Logistic regression, an early warning model of the relationship between the probability of power accident and thunderstorm, gale, and daily mean temperature in Rizhao is obtained. The results are listed as follows. 1) Thunderstorms and strong winds are important meteorological factors contributing to the power accidents in Rizhao. 2) Although thunderstorms, strong winds, and high temperature have impacts on the occurrence of electric power accidents, there is a big gap between their influence ability. 3) The two regression models both have good fitting effects. The REEP model is more intuitive, and the Logistic regression analysis method is more objective and more applicable. 4) The results of the regression analysis are based on objective data and the regression model is accurate and practical, which can provide theoretical and technical support for the power accident early to warning system.

Key words hazardous weather; electric power accident; regression analysis

收稿日期:2020-08-11; 修订日期:2020-09-09

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC150790X);山东省气象局科研项目(2014sdqxm15)

通信作者:卢振礼,男,硕士,高级工程师,主要从事交通气象、气象环境学研究,lzl03121@163.com。

引言

电网安全不仅关系到各行各业的生产和千家万户的生活,还对交通、通信、供水供气等其他基础设施稳定运行产生重大影响。雷雨、大风、高温、冰冻等灾害天气对电网安全有着重要影响,灾害天气会极大影响配电网的运行可靠性^[1],也可造成特高压交流输电线路较大的电晕损失^[2]。随着灾害天气强度的加强,电网运行的潜在风险也会不断增加^[3-4],进而引发电力线路或电网故障及事故^[5-7]。统计表明,对电力系统造成影响的主要气象灾害天气有雷电、强降水、大风、高温、冰冻等^[8]。近十几年来,影响我国电网安全的灾害天气频繁发生,导致国内电网事故不断增多,损失日益严重。

2004年11月24日,乌鲁木齐市两座铁塔受大风影响出现倒塔事故。2005年6月24日,受飚线大风影响,江苏省泗阳500 kV任上5237线输电线路(输电线路一般是超过35 kV的高压电路)发生倒塔事故,一次性串倒输电铁塔10基,同时大风还造成临近的500 kV任上5238线跳闸,两条线路同时停止输电,给华东电网造成了非常严重的影响。2008年1月12日—2月4日,我国华南、西南、中华和华中地区先后4次遭受低温雨雪冰冻天气袭击,全国有20个省受到不同程度的影响,13个省的电力设施遭到了破坏,造成直接经济损失达1 516亿元。2012年“7·21”雷雨灾害致使北京220 kV、110 kV电网均发生了瞬时故障,同时受山洪和积水影响,电网10 kV设备共发生76起永久性故障,35 kV设备发生1起永久性故障。2010年5月30日和2011年8月29日两次强雷雨灾害天气共造成日照市境内紧急电力事故17起,重大电力事故34起,电力设备损毁,经济损失巨大。因此,研究和预测气象条件对电力系统的影响对于防御电网事故和减轻事故损失具有重要意义。

目前,已有学者对灾害天气与电网安全做过诸多研究。研究^[9-17]指出,雷雨、大风及冰灾是引起输电线路故障的主要原因。其中,雷雨天气灾害常造成输电线路雷击跳闸事故^[10-11],大风天气灾害主要会造成供电线路(供电线路是输送和分配电能的线路,一般为低于35 kV的电路)、输电线路和输电塔遭受破坏的事故^[14-15,18],同时还可能引发铁路交通中断^[19]。冰冻灾害也是影响电网安全的主要气象灾害之一,电线积冰与雾凇和雨凇密切相关,可出现线路舞动或冰闪^[17]。至于气温对输电线路影响

方面的研究也较多,但主要研究^[20-26]集中在气温与城市电力负荷的关系方面,普遍认为夏季的日平均气温与电力负荷正向相关,也有学者^[26]认为,高温引起电力线路超负荷,一旦电力线路出现过载现象,将威胁到电网安全平稳运行。

关于雷电灾害对电力系统影响的风险评估,学者相继展开过细致研究,对输电线路雷击故障数据统计分析,利用信息扩散方法获得线路发生雷击故障的条件概率密度分布,并发展了输电线路雷击故障概率的电网短期可靠性评估模型^[27];归纳雷雨灾害影响电网安全的机理、途径及特点,提出了雷雨引发电网故障的风险评估思路和雷雨灾害在线预警及在线防御的实施方案^[28]等。本文在以上研究的基础上,针对影响日照电力安全的灾害天气特点,即雷雨、大风天气频发,高温天气较少,线路积冰极少发生的情况,将重点研究雷雨、大风天气对电力事故的影响。通过统计分析,把握灾害天气对电力事故影响的特点,并利用事件概率回归(regression estimation of event probability, REEP)方法和Logistic回归分析方法建立气象要素对电力事故的预测模型,为建立电力事故的预警系统提供理论依据和技术支持。

1 研究资料与方法

1.1 研究资料

研究的气象数据由日照市气象局提供,选取2009—2014年雷雨、大风和日平均气温等气象数据,气象数据来源于日照市境内国家级气象观测站、区域气象观测站的监测数据。气象设备是江苏省无线电科学研究所有限公司生产的“DZZ4”自动气象站。风速、雨量、气温为5 min累计一次。雷电资料来源于山东省内组网设备,闪电定位仪采用“三点”和“四点”定位模式确定闪电位置。相应电力事故资料由日照供电公司提供,选取了雷电多发年份2009—2014年电力事故发生时段的历史资料。

1.2 研究方法

首先采用REEP方法分析雷雨、大风和日平均气温等对电力事故发生概率的贡献,并建立简单的预报模型。这一方法的基本思想是把自变量与预报量视为随机事件,这类随机事件发生与否通常用“1”和“0”数值变量表示,利用预报因变量 y 与 n 个自变量 x_1, x_2, \dots, x_n 建立回归模型。本文需要研究 n 个气象要素是否会对电力事故 y 产生影响,即对电力事故 y 与雷雨、大风和日平均气温等进行回归分

析,从而建立关于预报量 y 和自变量 x 的事件概率回归模型,其表达式参见公式(1)。

$$p(y=1 | x_1, \dots, x_p) = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i \quad (1)$$

式(1)中, p 表示事件发生的概率, b 为方程常数项。

进而采用 Logistic 回归分析方法,并将回归结果与 REEP 方法的结果对比分析。以往的研究表明相对于多元线性回归, Logistic 回归对事件发生与否的预测能力更加有效。所谓 Logistic 回归分析方法就是一种非线性回归分析方法,其原理是对二分类因变量($y=1$ 或 $y=0$)进行回归分析时普遍使用的多元量化统计分析方法,模型中大多自变量为连续型变量,主要应用最大似然估计法,由样本数据求解各参数的值,模型方程表达的是一种概率思想^[29]。可以用 Logistic 回归模型来预测某事件发生的概率,因而可应用 Logistic 回归模型计算电力事故发生的可能性,即一定时间内气象因素的异常变化与电力事故发生的因果关系。Logistic 回归模型的数学表达式为:

$$p = \frac{\exp(a_0 + a_1 F_1 + a_2 F_2 + \dots + a_n F_n)}{1 + \exp(a_0 + a_1 F_1 + a_2 F_2 + \dots + a_n F_n)} \quad (2)$$

其中, p 表示事件发生的概率, a_i 表示待估算系数, F_i 为自变量, $i=1, 2, \dots, n$ 。

2 统计结果分析

2.1 不同天气电力事故影响统计结果

日照市电力事故发生的频次年际差异较大,无论从逐年分布还是从逐月分布情况(图1)来看,均存在不均匀性,变化幅度存在明显跳变性。日照市电力事故每年发生次数均在30次以上,其中2012年和2014年发生次数较多(图2a)。由逐月次数变化情况可以看出,电力事故主要发生在5—9月,以

7月和8月发生次数最多(图2b),与部分学者^[9,30]统计分析结果一致。同时,对雷雨和大风天气的年、月分布情况(图3a、b)进行了统计。本文所述雷雨是一种伴有雷电的降雨现象,产生于雷暴积雨云下,表现为大规模的云层运动,降雨时空分布不均,还伴有放电现象,常见于夏季;大风是指极大风速达到8级(风速在 $17.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上)。7—8月正是日照市雷雨和大风发生的集中月份,这种对应关系是否存在偶然的的不确定性,还是存在密切关联性?下文将就这一问题深入探讨,分析电力事故与雷雨、大风等极端天气要素的关联性。高温天气相对出现概率较少,先不做关联性分析。分析内容将在第3节进行介绍。

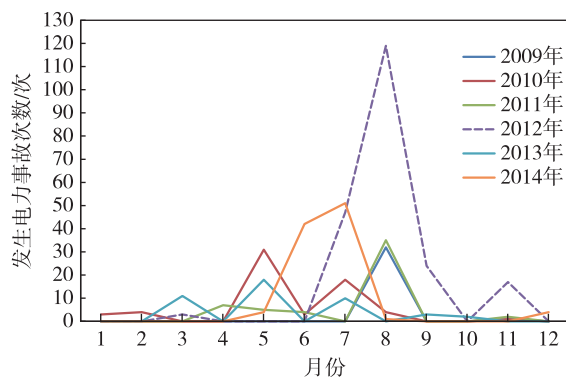


图1 2009—2014年电力事故次数逐月分布
Fig.1 Monthly distribution of frequency of electric power accidents from 2009 to 2014

2.2 日照市电力事故与气象条件的关联性分析

通过上文统计分析可以发现,雷雨、大风与电力事故的发生可能存在关联性。雷雨、大风哪个因子的影响力更为直接?雷雨、大风两项因子叠加之后对电力安全的影响是否会更加严重?本文继续深入探讨这一内容。

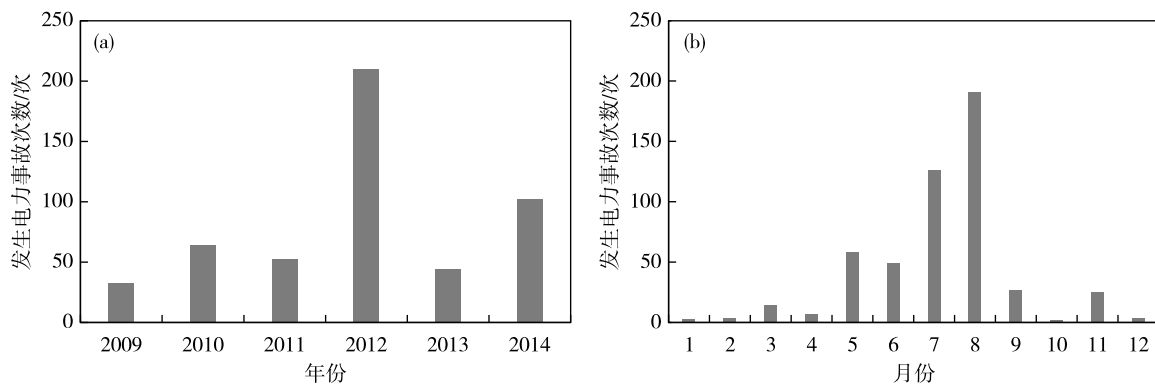


图2 电力事故次数逐年变化(a)和逐月变化(b)
Fig.2 Annual (a) and monthly (b) variation of frequency of electric power accidents

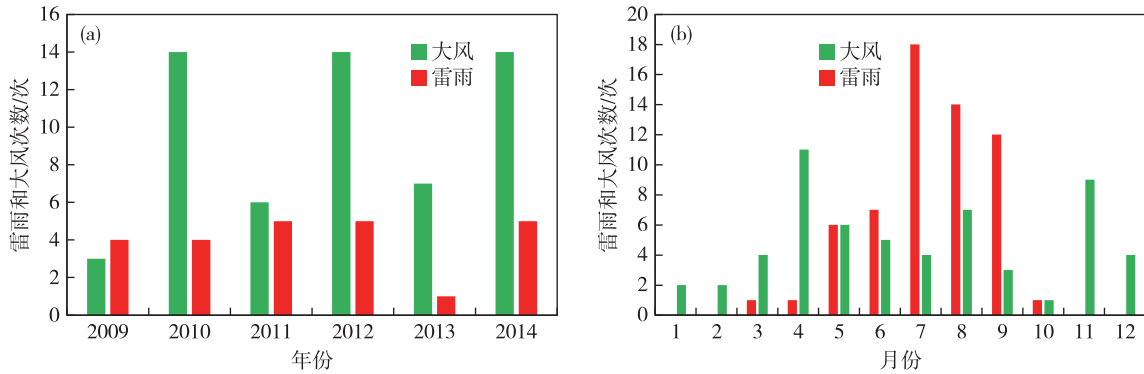


图3 雷雨和大风次数逐年分布(a)和逐月分布(b)
Fig.3 Annual (a) and monthly (b) distribution of frequency of thunderstorms and gales

2009年电力事故和对流天气发生次数均较少,因而选取其中对流天气发生较频繁的年份2010—2014年资料,对气象与电力数据进行统计对比和回归分析。5 a内总计发生电力事故达463次,年均92.6次。其中对应的雷雨天气时发生电力事故68次,大风天气时发生电力事故137次,雷雨+大风天

气时发生电力事故164次,各占统计时间段内发生电力事故总次数的比率分别为15%、30%和35%。这两类灾害天气所对应的电力事故次数共计369次,占总发生次数比率为80%(表1)。这说明雷雨、大风天气与日照市电力事故的发生存在明显的关联性。

表1 电力事故发生次数与雷雨、大风天气事件的对应关系

Table 1 Relationship between frequency of electric power accidents and thunderstorm/gale/thunderstorm and gale

总次数/次	雷雨类事故次数/次(比率/%)	大风类事故次数/次(比率/%)	雷雨+大风类事故次数/次(比率/%)
463	68(15)	137(30)	164(35)

表2给出了日照市区域(包含各区)、时段内37个变电站发生电力事故的基本情况与事故与雷雨、大风天气事件的对应关系(其中雷雨、大风事件是指发生电力事故时出现的雷雨、大风天气)。由表2可以看出,即使从单站的资料对比分析,也说明了雷雨和大风天气对电力事故影响较大。

图4给出了日照市区域(包含各区)电力事故发生次数与雷雨、大风天气的对比曲线。由图4可看出,电力事故发生频次与雷雨、大风频次存在明显的趋同性,3条曲线的波峰波谷存在一致性变化,这进一步说明了雷雨、大风天气对电力事故发生存在显著影响。

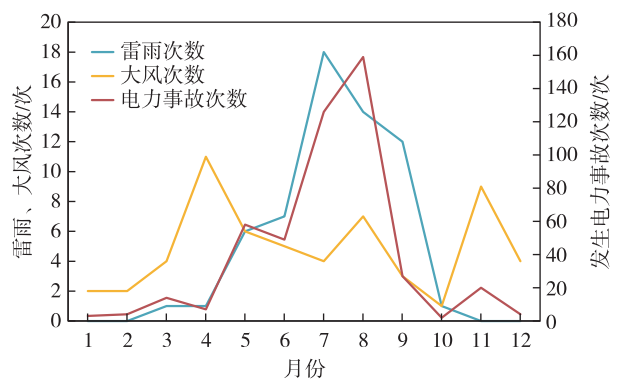


图4 电力事故、雷雨、大风次数逐月分布
Fig.4 Monthly variation of electric power accident/thunderstorm/gale

3 气象条件对电力事故影响的概率模型

3.1 事件概率回归模型(REEP)

除了大风、雷雨天气之外,高温也可能是引发电力事故的重要因素^[26],建立模型时将日平均气温也作为一个因素加以考虑,进行分析检验。两种回归模型中所选用的降水量、极大风速、日平均气温

等数据来源于日照市区域(包含各区)的国家级气象观测站、区域自动气象观测站实况监测值,选取距离电力事故点10 km内最近的单站资料。降水量为单站24 h累计降水量,极大风速为事故时段内的极大值,日平均气温为02时、08时、14时、20时的整点平均值。首先,用事件概率回归方法(REEP)

分析雷雨、大风和日平均气温与电力事故的回归模型。根据事件概率回归方法的原理,假定电力事故发生为 $y=1$,不发生为 $y=0$,发生雷雨时 $x_1=1$,无雷雨时 $x_1=0$,极大风速级达到大风级别 $x_2=1$,无大风 $x_2=0$,平均气温达到 $26\text{ }^\circ\text{C}$ 以上 $x_3=1$,低于 $26\text{ }^\circ\text{C}$, $x_3=0$,选取日平均气温指标参考了部分学者^[21-22]的研究资料。

表2 变电站发生电力事故次数及其与大风、雷雨天气的对应关系

Table 2 Frequency of electric power accidents at substation and its relationship with thunderstorm/gale/thunderstorm and gale

站名	总次数/次	雷雨/次	大风/次	大风+雷雨/次
于家站	33	2	11	15
古镇站	28	6	9	9
三庄站	25	4	13	5
南湖站	23	4	10	4
巨峰站	21	5	8	7
昭园站	19	0	8	7
河山站	18	0	6	6
汾水站	18	5	2	9
涛雒站	17	6	5	4
马庄站	16	1	6	6
甜河站	15	2	1	9
安东站	15	1	2	10
黄墩站	14	1	3	8
东港站	14	3	5	1
西潘站	14	4	2	6
大学城站	13	2	4	3
陈疃站	13	2	7	2
高旺站	13	6	0	7
正阳站	13	1	4	3
后村站	11	0	1	7
奎山站	10	2	3	5
滕家站	9	1	1	2
黄海站	9	0	5	0
碑廓站	9	1	4	1
汪家台站	9	4	2	1
岚山站	8	2	3	2
虎山站	8	1	0	3
西湖站	8	1	0	6
兴海站	7	0	4	2
樊家站	6	0	2	4
高兴站	6	0	1	3
五莲站	6	0	0	3
公园站	5	1	1	2
招贤站	4	0	3	0
莒州站	3	0	0	2
十里站	2	0	2	0
秦楼站	1	0	0	1

根据事件概率回归方程(1)和历史统计数据,可以建立电力事故发生概率与雷雨、大风和日平均气温的回归关系模型,即可得到回归方程(3)和方程(4)。

$$p(y=1 | x_1, x_2, x_3) = 0.0159 + 0.548x_1 + 0.857x_2 + 0.046x_3 \quad (3)$$

以0.5为阈值判定事件是否发生,如果 $p>0.5$ 则表示电力事故会发生。由回归系数值可看出,雷雨、大风对电力事故促进作用较大,而日平均气温的影响能力相对较小(通过显著性检验,也作为影响因子)。如果剔除2012年电力事故发生次数异常的年份,则可得到回归方程:

$$p(y=1 | x_1, x_2, x_3) = 0.016 + 0.467x_1 + 0.873x_2 + 0.054x_3 \quad (4)$$

对比方程(3)和方程(4)得出,两者回归系数差异较小,表明了电力事故发生概率与雷雨、大风天气的关系稳定。

3.2 Logistic 回归模型

根据 Logistic 回归原理,选取发生雷雨天气时段的降水量、极大风速和日平均气温建立电力事故发生概率预报模型,其中降水量、极大风速和日平均气温取实际数值,而电力事故取逻辑值,即电力事故发生为1,不发生为0。需要说明的是本文的回归模型系数均设置为0.05的显著性检验(Significance test)阈值,只有回归变量系数显著性值小于0.05的变量才被纳入回归模型。根据 Logistic 回归分析方法,结合气象数据和电力事故历史资料,可以得到以下回归方程:

$$\ln\left(\frac{p}{1-p}\right) = -7.3101 + 0.05x_1 + 0.233x_2 + 0.1087x_3 \quad (5)$$

如果去除2012年电力事故异常年份,电力事故概率回归方程为:

$$\ln\left(\frac{p}{1-p}\right) = -6.9187 + 0.0488x_1 + 0.2013x_2 + 0.1079x_3 \quad (6)$$

对比方程(5)和方程(6)发现,回归方程中各系数相差较小,说明电力事故与3种天气要素具有稳定的关系。

4 回归结果验证

事件概率回归(REEP)模型结果显示, $p>0.5$ 时,模型预报的电力事故天数为33d,占电力事故总天数的40.2%(共82d的数据),但是对应电力事故

发生次数为 376 次,占发生总次数的 81.2%,表明雷雨、大风对于电力事故的影响能力比较大,事件概率回归预测模型具有较高的准确性。

由 Logistic 回归方程系数来看,其中风速对电力事故的发生概率影响最大。雷雨和 26 °C 以上的日平均气温对电力事故的发生概率影响相对较小。对比事件概率回归方法(REEP)得到的结果可发现,降水量 50 mm 以上的雷雨天气对电力事故发生概率影响较大的因素是雷电而不是降水量。两种模型中,日平均气温在 26 °C 以上的天气对电力事故的发生概率影响并不明显,这一点与王玮等^[7]、付桂琴和张文宗^[30]的研究结果一致。

此外,Logistic 模型结果中 $p > 0.5$ 的天数为 16 d,对应发生电力事故 313 次,占总电力事故次数的 68%,其准确性略低于事件概率回归方法(REEP)的分析结果,除了降水量和日平均气温在模型中的相关性系数较小的原因外,还因为 p 值是非线性变化,方程中选取的自变量是实际数值,分别对应降水平均值 $65 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 、风速平均值 $13.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、平均气温 $22.7 \text{ }^\circ\text{C}$,而 REEP 方法 $p > 0.5$ 时对应降水平均值 $34 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 、风速平均值 $14.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、平均气温 $16.9 \text{ }^\circ\text{C}$ 。两者对应的平均值除了风速外,其他相差都较大,即阈值差异较大。因而 Logistic 模型结果与 REEP 模型结果有差异是可以理解的。

5 结论与讨论

基于日照市雷雨、大风等气象资料和电力事故历史资料,利用 REEP 回归分析和 Logistic 回归方法构建了电力事故与灾害天气要素之间的回归模型,并得到以下结论:

1) 利用事件概率回归(REEP)分析建立的回归模型,当 $p > 0.5$ 时,模型结果得到电力事故 33 d,占发生总天数的 40.2%,对应电力事故发生次数 376 次,占发生总次数的 81.2%,表明了雷雨、大风对于电力的事故发生概率贡献相当大。

2) 利用 Logistic 逻辑回归方法建立的回归模型,当 $p > 0.5$,模型结果显示,发生电力事故为 16 d,占总天数的 20%,但对应电力事故发生次数为 313 次,占总次数的 68%。

3) 从两种方法来看,REEP 模型更为直观,Logistic 模型更为客观,适用性更强。

检验结果是基于 82 d 样本资料,而整个模型的建立是基于 5 a 的资料,因而如果用模型预测未来 5 a 或者更长的时间,其预测的结果准确率会更高一

些。今后可进一步积累气象和电力事故数据,继续完善预警模型,提高电力气象预警发布的科学性、时效性。

参考文献:

- [1] 李勇,刘俊勇,魏震波,等.计及天气的分布式电源对配电网可靠性的影响[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(2):93-98.
- [2] 律方成,尤少华,刘云鹏,等.雨雪天气下特高压交流单回试验线段电晕损失实测分析[J]. 高电压技术,2011,37(9):2089-2095.
- [3] 刘嘉宁,潮铸,钟华赞,等.电网调度操作过程中的天气风险源建模及分析[J]. 广东技术师范学院学报,2016,37(11):8-12.
- [4] 林智敏,林韩,温步瀛.天气条件相依失效模型的电力系统可靠性评估[J]. 华东电力,2008,36(1):81-84.
- [5] 刘文颖,杨楠,张建立,等.计及恶劣天气因素的复杂电网连锁故障事故链模型[J]. 中国电机工程学报,2012,32(7):53-59.
- [6] 王正旺,白绍烈,庞转棠,等.电力污闪事故的气象条件分析[J]. 自然灾害学报,2005,14(5):136-140.
- [7] 王玮,王维洲,金娜,等.恶劣天气引发电网连锁故障机理初探[J]. 中国电业(技术版),2013(2):7-11.
- [8] 从荣刚.自然灾害对中国电力系统的影响(文献综述)[J]. 西华大学学报(自然科学版),2013,32(1):105-112.
- [9] 付桂琴,曹欣.雷雨大风与河北电网灾害特征分析[J]. 气象,2012,38(3):353-357.
- [10] 王少华,叶自强.恶劣气候对浙江电网输电线路的影响[J]. 中国电力,2011,44(2):19-22.
- [11] 张祎,姜瑜君,童杭伟,等.浙江省雷击跳闸数据与闪电定位数据统计分析[J]. 气象科技,2016,44(3):505-509.
- [12] 邓杰,陈霖,朱志杰,等.一起强风天气下某 10 kV 线路杆塔串倒分析[J]. 江西电力,2018,42(6):9-11.
- [13] 路永玲,陶风波,周志成,等.气象灾害对江苏电网设备的影响及防御分析[J]. 南京信息工程大学学报,2015,7(5):469-474.
- [14] 程思明,胡飞飞,谢静芳,等.吉林省大风天气特征及对电力设施的影响研究[J]. 吉林电力,2016,44(4):14-15.
- [15] 李彦斌,韩颖,张嵘,等.气象因素对电力安全事故影响的模型[J]. 电网技术,2013,37(6):1683-1687.
- [16] 罗学礼.高精度灾害天气预测技术在电力安全中的应用[J]. 云南电力技术,2013,41(增刊):130-133.
- [17] 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.

- [18] 谢强,张勇,李杰.华东电网 500 kV 任上 5237 线飏线风致倒塔事故调查分析[J]. 电网技术,2006,30(10):59-63.
- [19] 夏祎萌,何清,李军,等.东疆兰新铁路沿线大风特征及风压研究[J]. 干旱区资源与环境,2012,26(10):18-23.
- [20] 张海东,孙照渤,郑艳,等.温度变化对南京城市电力负荷的影响[J]. 大气科学学报,2009,32(4):536-542.
- [21] 付桂琴,龙凤春,曹欣,等.积温效应在电力日峰谷负荷中的应用及检验[J]. 应用气象学报,2015,26(4):492-499.
- [22] 刘红亚,曹亮.上海市电力负荷与气象因子关系及精细化预报[J]. 应用气象学报,2013,24(4):455-463.
- [23] 杨静,郝毅,陈冬梅,等.新疆农业区电力负荷与天气的关系[J]. 气象,2009,35(1):114-118.
- [24] 卢珊,浩宇,王百朋,等.引入积温效应预测夏季西安市电力气象负荷[J]. 气象科技,2017,45(6):1090-1094.
- [25] 张彦恒,杨林晗,武辉芹,等.冀北电网电力负荷特征与气温的关系[J]. 干旱气象,2016,34(5):881-885.
- [26] 霍林,谭萍,张婷婷,等.电力气象灾害时空分布特征及其影响分析[J]. 南方农业,2017,11(20):83-84.
- [27] 熊小伏,方伟阳,程韧俐,等.基于实时雷击信息的输电线强送决策方法[J]. 电力系统保护与控制,2013(19):7-11.
- [28] 常康,薛峰,吴勇军,等.暴雨影响电网安全的机理及其在线防御技术[J]. 陕西电力,2014,42(12):6-10.
- [29] VARELA G, NOVOA N, JIME'NEZ M F, et al. Applicability of logistic regression (LR) risk modeling to decision making in lung cancer resection [J]. *Interact Cardio TH*, 2003(2):12-15.
- [30] 付桂琴,张文宗.河北省致电网事故的气象灾害特征及风险评价[J]. 干旱气象,2014,32(3):460-464.