

许艳,朱江,高峰,等. 2013. 两种导线观测的电线积冰资料的对比分析. 气象,39(3):362-369.

两种导线观测的电线积冰资料的对比分析^{*}

许 艳¹ 朱 江¹ 高 峰¹ 冯冬霞² 李 俊³ 何文春¹

1 国家气象信息中心,北京 100081
2 中国气象局综合观测司,北京 100081
3 中国气象局预报与网络司,北京 100081

提 要:应用直径 26.8 和 4 mm 两种导线平行观测的电线积冰资料,对比分析两种观测资料中电线积冰直径、厚度、重量和标准厚度的差异,并对不同天气现象和气象条件下两种电线积冰观测资料的差异进行了讨论。结果表明:总体上,2011 年 1—5 月全国大部分台站观测的两种导线电线积冰直径、厚度和标准厚度值差异不明显,重量差异较明显,且差值较大的站点主要分布在长江以南地区;分析不同天气现象和气象条件下两种观测资料的差异后发现,两种电线积冰直径和厚度值差异在雾凇和混合凇条件下较显著,而重量值差异在雨凇、风力 0~3 级和气温-5~0℃的条件下时相对最大。

关键词: 电线积冰, 重量, 直径, 厚度, 标准厚度, 对比分析

中图分类号: P416 **文献标识码:** A **doi:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2013.03.011

Comparative Analysis on Two Types of Wire Icing Data in China

XU Yan¹ ZHU Jiang¹ GAO Feng¹ FENG Dongxia² LI Jun³ HE Wenchun¹

1 National Meteorological Information Centre, Beijing 100081
2 Department of Integrated Observations, CMA, Beijing 100081
3 Department of Forecasting and Information System, CMA, Beijing 100081

Abstract: An intercomparison of two kinds of wire icing observed data in China is performed to analyze the differences in diameter, thickness, weight, standard thickness of the wire ice in this study. The difference in the two icing observations under different weather phenomena and meteorological conditions is also discussed. The results show that the two kinds of wire ice (north-south and east-west) diameter, thickness and standard thickness data, which were collected by majority of the stations in the country from January to May 2011, have no significant difference. However, the difference in weight between the two datasets is obvious, especially in the areas to the south of the Yangtze River. Further analysis shows that the differences in ice thickness and diameter between the two datasets under the rime and mixed icing conditions are more significant, while the difference in ice weight reaches the maximum when the wind force is from Grade 0 to 3, the temperature ranges between -5℃ and 0℃, and the glaze occurs.

Key words: wire icing, weight, diameter, thickness, standard thickness, comparative analysis

引 言

《地面气象观测规范》(中国气象局,2003)中把

雨凇、雾凇凝附在导线上或湿雪冻结在导线上的现象称为电线积冰,电力行业也称之为导线覆冰或电线覆冰。由于雨凇、雾凇等引起的电线积冰易造成输电线路荷重增加,常常导致线路断线、杆塔倒塌、

^{*} 国家自然科学基金项目(40905036)、公益性行业(气象)科研专项(GYHY201206024)和国家气象信息中心青年基金(NMICQJ201109)共同资助
2012 年 2 月 4 日收稿; 2012 年 8 月 6 日收修定稿
第一作者:许艳,主要从事气象数据处理与分析研究. Email:xuyan@cma.gov.cn

冰闪跳闸、导线舞动及通信中断等事故,严重的电线积冰灾害甚至引起大面积输电线路瘫痪,因此电线积冰导致的事故是国内外电力系统最严重的自然灾害之一(刘春城等,2011)。2008年1月10日到2月2日我国南方经历了4次大范围的低温雨雪冰冻天气过程,持续的大范围冰冻天气使得贵州、湖南、广西、云南等多个省(区)的输电网受到严重破坏,交通、电力、通讯设施、农业生产和人民生活也都受到了严重影响,直接经济损失之大、受灾人口之多为近50年来同类灾害之最(王遵娅等,2008;陶诗言等,2008;杨贵名等,2009;赵珊珊等,2010)。

目前,电线积冰资料的应用研究主要集中在气象和电力等部门,研究内容包括利用观测资料研究线路覆冰预测模型、准确预报电线积冰、制定输电线路设计标准、计算重现期导线覆冰极值、防治电线积冰风险等(吴素良等,2010;西南电力设计院,2002;李登文等,2011;周绍毅等,2010a;陈柏堃等,2009;顾骏强等,2010)。因此获得高质量的电线积冰观测资料是开展电线积冰预报业务、专业气象服务和科学研究的重要基础。过去气象部门对电线结冰的观测标准与输电线路的实际状况不一致,一直采用直径4 mm、长100 cm的铁丝或钢丝作为观测导线,远比我我国电网220 kV高压线采用的直径26.8 mm的输电线细。由于缺乏系统的、规范的输电线积冰观测数据,电线积冰预报业务、专业气象服务和科学研究往往会与实际存在一定偏差。从2008年初我国南方冰冻灾害实况数据的统计分析来看,目前电线积冰观测数据所反映的电线积冰情况与实际输电线路积冰情况差异较大,突显了现有的电线积冰观测标准已无法满足电线积冰预报业务、专业气象服务和科学研究的需求。

基于以上原因,从2011年1月1日起,全国有电线积冰观测业务的气象台站在原有4 mm导线积冰观测业务的基础上新增直径为26.8 mm 220 kV电力传输主干线电缆的积冰观测业务,并从2011年年初至春季电线积冰观测期间实施同期对比观测。观测导线的变化,必然会对积冰观测产生影响,从而引起两种观测数据的差异。本文将利用平行观测期内(2011年1—5月)两种导线观测的电线积冰资料,对比分析两种观测资料中电线积冰直径、厚度、重量和标准厚度的差异,同时分析不同天气现象和气象条件下两种电线积冰观测资料的差异,并建立通过4 mm导线电线积冰资料推算26.8 mm导线电线积冰资料的回归模型,从而为今后更好地使用

两种数据提供一定参考依据。

1 资料和分析方法

1.1 观测资料

气象台站观测电线积冰时通常采用在电线积冰架上进行观测。电线积冰架一般由两组支架组成,一组呈南北向,一组呈东西向。观测项目包括南北向电线积冰直径、南北向电线积冰厚度、南北向电线积冰重量、东西向电线积冰直径、东西向电线积冰厚度、东西向电线积冰重量,以及出现电线积冰时的天气现象(雨淞、雾淞和混合淞)、温度、风向和风速。

2011年1月1日起气象部门增加采用直径26.8 mm(过去为4 mm)、长100 cm的220 kV电力传输主干线电缆作为观测导线。电线积冰观测须根据时机测定每次积冰过程的最大积冰直径和厚度,以mm为单位,取整数。当积冰直径达到规定标准时,还应测量最大重量,以 $\text{g} \cdot \text{m}^{-1}$ 为单位,取整数。对于直径26.8 mm的导线,当单纯的雾淞积冰直径达31 mm,雨淞、湿雪冻结物或包括雾淞在内的混合积冰直径达38 mm时,测定一次积冰最大重量。积冰直径是指垂直于导线切面上冰层积结的最大数值,导线直径包括在内;积冰厚度是指在导线切面上垂直于积冰直径方向上冰层积结的最大数值,厚度一般小于直径,最多与直径相等;积冰重量是换算成1 m长导线上冰层的重量(吴素良等,2010)。

全国除海南、西藏及青海外,各省(区、市)气象台均有电线积冰观测。本文分析所用的电线积冰资料来源于2011年1月1日至5月31日(平行观测期)各省(区、市)上报的每日08时4和26.8 mm两种导线观测的电线积冰资料。

1.2 质量控制

电线积冰资料经过整理后,依据中国气象局《地面气象观测规范》的质量检测方法,进行要素的相关性检查、逻辑检查和气候极值比较检查,并根据检查结果剔除了数据中出现的奇异值。具体检测条件及阈值如下:

(1)26.8 mm电线积冰直径 ≥ 27 mm(27 mm表示微量)时或4 mm电线积冰直径 ≥ 4 mm(4 mm表示微量)时,应有雨淞、雾淞现象;

(2)26.8 mm(4 mm)电线积冰(雨淞或混合淞)直径 ≥ 31 mm(8 mm)时,应有重量值;

- (3)26.8 mm(4 mm)电线积冰(雾凇)直径 ≥ 38 mm(15 mm)时,应有重量值;
- (4)电线积冰厚度 $\leq$ 直径;
- (5)风向为“C”时,风速 $\leq 0.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;
- (6)电线积冰直径 $< 200\text{ mm}$;
- (7)电线积冰重量 $< 30000\text{ g}\cdot\text{m}^{-1}$ 。

1.3 对比分析方法

对比两种导线观测资料的差异,主要分析两种导线观测得到的南北向电线积冰直径、南北向电线积冰厚度、南北向电线积冰重量、东西向电线积冰直径、东西向电线积冰厚度、东西向电线积冰重量等要素的差异情况,计算两种资料各要素的差值、差值平均值和差值标准差。另外,将实际冰厚折算成密度为 $0.9\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 的标准冰厚,作为对比分析的参考项目。

(1)差值

设 A_i 为4 mm导线第 i 次观测的电线积冰直径观测值, U_i 为相应时间26.8 mm导线电线积冰直径观测值,则对于第 i 次观测的两种积冰直径的差值 X_i 为:

$$X_i = (U_i - 26.8) - (A_i - 4) \tag{1}$$

同理,设 B_i 为4 mm导线第 i 次观测的电线积冰厚度观测值, V_i 为相应时间26.8 mm导线电线积冰厚度观测值,则对于第 i 次观测的两种积冰厚度的差值 Y_i 为:

$$Y_i = (V_i - 26.8) - (B_i - 4) \tag{2}$$

设 C_i 为4 mm导线第 i 次观测的电线积冰重量观测值, W_i 为相应时间26.8 mm导线电线积冰重量观测值,则对于第 i 次观测的两种积冰重量的差值 Z_i 为:

$$Z_i = W_i - C_i \tag{3}$$

(2)差值平均值

设 x_i 为第 i 次观测的两种导线电线积冰观测值的差值, n 为电线积冰的观测次数,则差值的平均值 $\bar{x}$ 为:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \tag{4}$$

(3)差值标准差

设 x_i 为第 i 次观测的两种导线电线积冰观测值的差值, $\bar{x}$ 为差值平均值,则两种导线观测的电线积冰差值的标准差 σ 为:

$$\sigma = \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right]^{1/2} \tag{5}$$

(4)标准冰厚

由于电线结冰的形状非常复杂,结冰的密度也不尽相同。为了便于比较,需要将不同天气条件下形成的不同密度的电线结冰换算为标准积冰厚度。采用文献(西南电力设计院,2002)提供的方法,将实际冰厚折算成密度为 $0.9\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 的标准冰厚:

$$b_{0.9} = \sqrt{\frac{M}{0.9\pi} + \frac{d^2}{4}} - \frac{d}{2} \tag{6}$$

式中, M 表示积冰重量(单位: $\text{g}\cdot\text{m}^{-1}$), d 表示电线直径(单位:mm)。

2 对比分析结果

2.1 电线积冰日数空间分布

图1为2011年1—5月全国267个台站出现电线积冰现象的日数,从图中可以看出,2011年1—5月电线积冰主要出现在我国东北、华北、黄淮西部、江淮西北部、江南大部、西南地区东南部、西北地区东部、新疆北部等地区,大部分地区积冰日数达2 d以上,其中贵州地区出现的积冰日数最多,部分地区超过20 d。电线积冰现象主要由雨凇、雾凇引起。雨凇、雾凇的分布特征是山区多于平原,迎风坡多于背风坡,湿润地区多于干旱地区(张家诚,1991;王守礼,1994)。图中电线积冰日数达20 d以上的台站主要位于祁连山脉以及云贵高原的迎风坡地区。1—5月,我国由于受冬季风影响,盛行偏北风,在山脉、高原的迎风坡地区易受地形效应的影响,水汽汇聚、气温下降,因此常常出现雨凇或雾凇现象。

2.2 两种资料的总体差异

图2为2011年1—5月电线积冰日数达2 d以上的台站中两种导线观测的积冰(南北向和东西向)直径、厚度、重量和标准厚度的差值(26.8 mm导线观测值减4 mm导线观测值,下同)的频率分布情况。由图2a~2c可知,两种电线积冰(南北向和东西向)直径、厚度、重量和标准厚度的差值均遵从正态分布;两种电线积冰(南北向和东西向)直径和厚度差值的最大频率出现在 $-1\sim 1\text{ mm}$ 区间,对应的频率约为84%;99%以上的台站观测的两种电线积冰(南北向和东西向)的重量差值大于零,最大频率出现在 $50\sim 250\text{ g}\cdot\text{m}^{-1}$ 区间;标准厚度差值为正的频率低于差值为负的频率,约82%的台站差值为 $-2\sim 1\text{ mm}$ 。统计两种电线积冰观测资料的差值平均值和标准差可知(表1),两种电线积冰(南北向和东

西向)直径、厚度和标准厚度的差值平均值略小于零(未通过 $\alpha=0.05$ 的显著性水平检验),而重量的差值平均值较大,南北向和东西向电线积冰重量的差值平均值分别为 172.06 和 $184.26\text{ g}\cdot\text{m}^{-1}$ (通过了 $\alpha=0.001$ 的显著性水平检验),南北向和东西向电

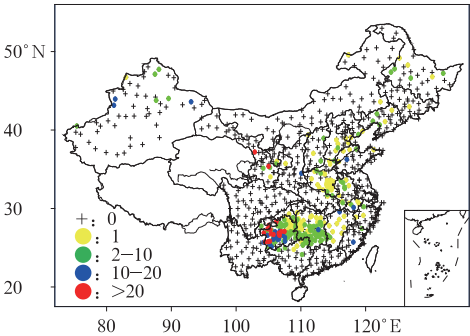


图 1 2011 年 1—5 月全国电线积冰日数分布(单位:d)

Fig.1 Distribution of icing days over China from January to May, 2011 (unit: d)

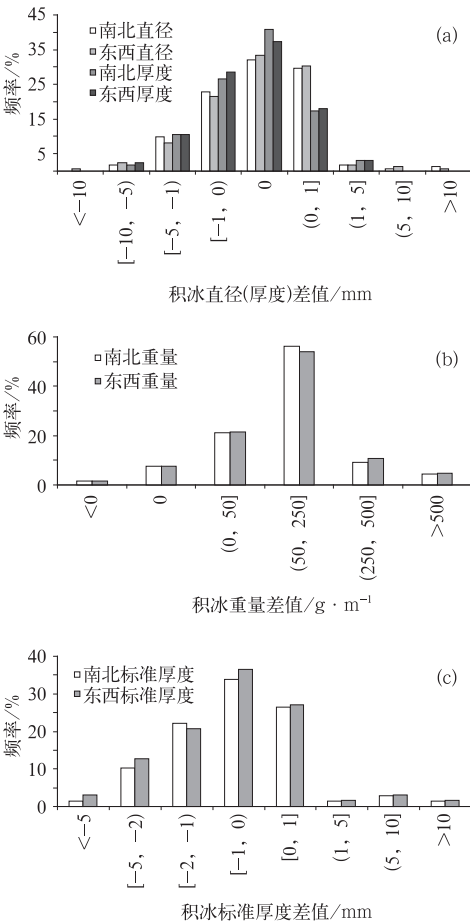


图 2 全国两种电线积冰观测资料差值的频率分布
Fig.2 Distributions of frequency percentage of the difference between the two types of wire icing data

表 1 两种电线积冰观测资料的差值平均值和标准差
Table 1 The means and standard deviations of differences between the two types of wire icing data

	平均值	标准差
南北向直径差值/mm	-0.36	3.08
南北向厚度差值/mm	-0.52	2.54
南北向重量差值/ $\text{g}\cdot\text{m}^{-1}$	172.06***	233.65
南北向标准厚度差值/mm	-0.55	2.37
东西向直径差值/mm	-0.60	4.33
东西向厚度差值/mm	-0.55	2.53
东西向重量差值/ $\text{g}\cdot\text{m}^{-1}$	184.26***	281.78
东西向标准厚度差值/mm	-0.50	2.71

注:“***”表示通过了 $\alpha=0.001$ 的显著性水平检验。

线积冰重量的差值标准差分别达 233.65 和 $281.78\text{ g}\cdot\text{m}^{-1}$ 。

统计结果表明,与直径 4 mm 导线相比,直径 26.8 mm 导线电线积冰(南北向和东西向)的直径、厚度和标准厚度无明显差异,而重量增加较显著。这主要是由于粗导线的表面积更大,增大了与周围大气中过冷却雾滴或水滴的碰撞面积,更有利于雨淞、雾淞等在导线上的凝附,从而导致 26.8 mm 导线的积冰重量较大。此外,分析还发现电线积冰直径、厚度、重量的东西向的平均差值和标准差较南北向的平均差值绝对值和标准差偏大。这主要与东西向导线覆冰频率要比南北向导线覆冰频率高有关,东西向设置的导线与盛行风呈较大的迎风角度,迎风的面积较大,捕获的水汽较多,更有利于积冰的增长;而南北向设置的导线几乎与盛行风平行,迎风的面积较小,捕获的水汽较小,不利于积冰的增长。

2.3 两种资料差异的空间分布

图 3 为 2011 年 1—5 月各站两种电线积冰(南北向和东西向)的直径、厚度、重量、标准厚度差值平均值的空间分布图。从图中可以看出,两种电线积冰(南北向和东西向)直径和厚度的差值平均值分布比较一致(图 3a~3d),大部分站点积冰直径和厚度的差值平均值为 $-1\sim 1\text{ mm}$,且主要集中在长江以南地区。与积冰直径和厚度的差值不同,绝大部分站点的电线积冰重量差值为正值(图 3e 和 3f),大部分站点积冰重量的差值平均值主要集中在 $50\sim 250\text{ g}\cdot\text{m}^{-1}$ 之间,且差值较大的站点主要分布在长江以南地区。与积冰直径和厚度的差值分布相似,电线积冰标准厚度差值(图 3g 和 3h)也以负值为主。

以上分析可知,与直径 4 mm 导线相比,绝大部分站点 26.8 mm 导线观测的电线积冰直径和厚度变化范围为 $-1\sim 1\text{ mm}$,积冰标准厚度变化范围为 -2

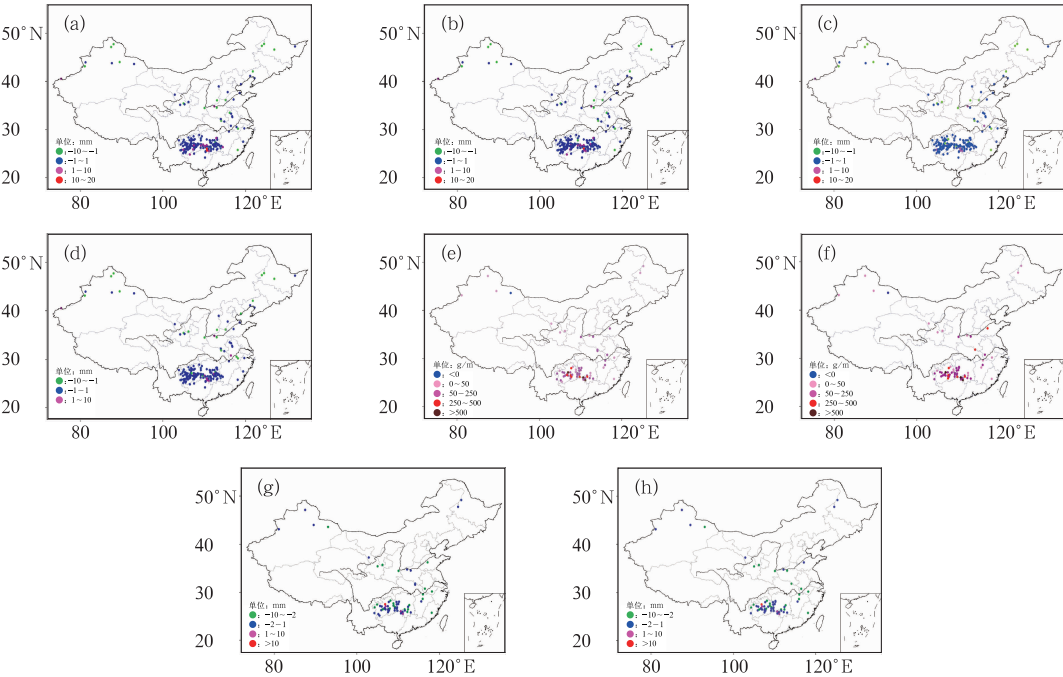


图 3 2011 年 1—5 月全国两种电线积冰观测资料差值平均值的空间分布
(a)南北向直径,(b)东西向直径,(c)南北向厚度,(d)东西向厚度,(e)南北向重量,
(f)东西向重量,(g)南北向标准厚度,(h)东西向标准厚度
Fig. 3 Spatial distributions of average difference between the two types of wire icing data
over China from January to May, 2011
(a) north-south diameter, (b) east-west diameter, (c) north-south thickness, (d) east-west thickness,
(e) north-south weight, (f) east-west weight, (g) north-south standard thickness,
(h) east-west standard thickness

~1 mm,各站积冰重量有不同程度的增加,且主要集中在长江以南地区,这与 2.2 节的分析结果一致。

2.4 不同条件下两种资料的差异

(1)不同天气现象条件

电线积冰是由雨淞、雾淞凝附在导线上或湿雪冻结(混合淞)在导线上的现象。因此有必要分析雨淞、雾淞和混合淞三种天气现象条件下电线积冰(南北向和东西向)的直径、厚度、重量和标准厚度的差异状况。表 2 为在这三种天气现象条件下两种电线积冰观测值的差值平均值。由表 2 可知,对于两种电线积冰的直径、厚度和标准厚度的差值平均值,在混合淞条件下绝对值达最大,雾淞条件下次之,在雨淞条件下最小。此外,在雾淞和混合淞条件下,两种电线积冰直径、厚度和标准厚度差值平均值为负,且通过了 $\alpha=0.05$ 的显著性水平检验。与两种电线积冰直径和厚度不同的是,当雨淞出现时两种电线积冰重量差值最大,其次为混合淞条件下,差值最小出现在雾淞条件下。

分析电线积冰在雨淞、雾淞和混合淞三种天气

现象条件下的形成机制可知:在雨淞条件下,积冰是因为过冷却水滴通过相变变成固态水,从而形成透明或半透明的冰层,冰层密度较大;在雾淞条件下,积冰是由过冷却雾滴或水汽直接凝华而形成附着在导线上的冰晶,冰晶质地疏松、密度较小;混合淞是在雨淞、雾淞共同作用下形成积冰,一般先出现雾淞,雾淞的凝结速度快,增加了电线上捕获大气中悬

表 2 不同天气现象条件下全国两种电线积水
观测资料的差值平均

Table 2 Average difference between the two types of wire icing data under different weather conditions over China			
	雨淞	雾淞	混合淞
南北向直径/mm	0.14	-1.92 *	-3.39 ***
南北向厚度/mm	-0.20	-2.03 **	-4.52 ***
南北向重量/ $\text{g} \cdot \text{m}^{-1}$	203.62 ***	29.38 ***	139.48 ***
南北向标准厚度/mm	-0.22	-1.43 ***	-2.83 ***
东西向直径/mm	0.17	-2.12 **	-13.21 ***
东西向厚度/mm	-0.19	-2.26 **	-4.83 ***
东西向重量/ $\text{g} \cdot \text{m}^{-1}$	207.30 ***	28.08 ***	98.70 ***
东西向标准厚度/mm	-0.16	-1.43 ***	-3.57 ***

注:“*”表示通过了 $\alpha=0.1$ 的显著性水平检验;“**”表示通过了 $\alpha=0.005$ 的显著性水平检验;“***”表示通过了 $\alpha=0.001$ 的显著性水平检验,下同。

浮过冷却雾滴和水滴的碰撞面积,随着雨淞的产生,电线上的冰层不断增加,最终形成混合积冰(李登文等,2011;江祖凡,1983;周绍毅等,2010b)。因此在雾淞和混合淞条件下,积冰直径和厚度容易增加,两种导线的积冰直径和厚度差异也较明显。其他研究也表明,同一地点由于雨淞形成的电线积冰密度最大,混合淞次之,雾淞最小(谢运华,1998),即同一地点体积相同的积冰结晶体,雨淞形成的积冰最重。因此,当雨淞出现时两种导线电线积冰重量差异最大,其次为混合淞条件下,差值最小为雾淞条件下。

(2)不同气象条件

电线积冰的形成和增长不仅与引起它产生的天气现象相关,也与适合的温度和风速等气象条件密切相关(王遵娅等,2011)。因此,表 3 和表 4 给出了不同风力等级和不同气温条件下电线积冰(南北向和东西向)的直径、厚度、重量和标准厚度的平均差值状况。可以看出,在 0~3 风力等级下,26.8 mm 导线电线积冰直径和厚度差值均小于 4 mm 导线观测值,且差异不大(未通过 $\alpha=0.1$ 显著性水平检验);26.8 mm 导线电线积冰重量差值均大于 4 mm 导线观测值,且当风力等级 0~3 级时差异最大;两种电线积冰的标准厚度差值在风力 4~6 级时最大,

表 3 不同风力等级条件下两种电线积冰观测资料的平均差值

Table 3 Average difference between the two types of wire icing data under different scales of wind over China

风力等级/级	0	1~3	4~6
南北向直径/mm	-0.59	-0.63	0.12
南北向厚度/mm	-0.53	-0.97	-0.90
南北向重量/ $\text{g} \cdot \text{m}^{-1}$	150.73**	146.99*	71.39**
南北向标准厚度/mm	-0.12	-1.13***	-1.69***
东西向直径/mm	-0.32	-1.26	-1.12
东西向厚度/mm	-0.53	-0.96	-1.90
东西向重量/ $\text{g} \cdot \text{m}^{-1}$	144.2**	142.34**	62.25**
东西向标准厚度/mm	-0.18	-1.19**	-2.05***

注:说明同表 2。

表 4 不同气温条件下两种电线积冰观测资料的平均差值

Table 4 Average difference between the two types of wire icing data under different temperatures over China

温度/ $^{\circ}\text{C}$	<-10	$-10\sim-5$	$-5\sim 0$	$0\sim 5$
南北向直径/mm	-2.10	-2.40	-0.15	1.03
南北向厚度/mm	-2.11	-3.23	-0.41	-0.24
南北向重量/ $\text{g} \cdot \text{m}^{-1}$	26.38*	62.00**	187.48**	109**
南北向标准厚度/mm	-1.21***	-2.29***	-0.81**	-0.06
东西向直径/mm	-2.08	-4.49	-0.67	1.38
东西向厚度/mm	-2.48	-3.51	-0.40	-0.24
东西向重量/ $\text{g} \cdot \text{m}^{-1}$	19.00**	70.28**	178.04**	117.75**
东西向标准厚度/mm	-1.42***	-2.27***	-0.92**	-0.15

注:说明同表 2。

且通过 $\alpha=0.01$ 的显著性水平检验。

与表 2 相似,不同气温条件下两种电线积冰观测值差值也存在类似的关系。在不同气温条件下,26.8 mm 导线电线积冰直径和厚度差值小于 4 mm 导线观测值,且差异不大(未通过 $\alpha=0.1$ 的显著性水平检验);26.8 mm 导线电线积冰重量差值均大于 4 mm 导线观测值,且当气温为 $-5\sim 5^{\circ}\text{C}$ 时差异相对较大;两种电线积冰的标准厚度差值在气温小于 0°C 时为负,且通过 $\alpha=0.01$ 的显著性水平检验。

许多研究表明电线积冰在低温、弱风速等条件下最易产生(王守礼,1994;王遵娅等,2011),可以看出在积冰最易产生的条件下,两种电线积冰重量的差异相对较大。

3 推算模型

参照全国一级气候区划的划分标准(中国气象局预测减灾司,2006),结合全国电线积冰日数的空间分布情况,将全国分为 6 个区域:西南地区(1 区)、江南地区(2 区)、黄淮、江汉、江淮地区(3 区)、西北地区(4 区)、东北地区(5 区)、华北地区(6 区)。在此基础上,采用线性回归方法建立两种导线电线积冰资料的推算模型,该方法简洁、实用、物理意义明确。线性回归方程:

$$Y = bX \tag{7}$$

式中, X 为 4 mm 导线的积冰观测值, Y 为 26.8 mm 导线的积冰观测值, b 为拟合系数。

在建立两种直径导线电线积冰资料的函数关系时发现,全国 6 个区电线积冰资料线性拟合效果都较好。以 1~4 区积冰标准厚度的回归拟合效果为例(图 4),各气候区均能够准确反映 4 与 26.84 mm 导线积冰标准厚度之间的函数关系。采用最小二乘法计算出的拟合系数 b 和相关系数 R 如表 5 所示,各气候区的相关性均较高,除 5 区和 6 区的积冰厚度外,其他各气候区都通过了 $\alpha=0.01$ 的显著性水平检验。

4 结 论

本文利用 2011 年 1—5 月直径 26.8 和 4 mm 两种导线观测的电线积冰观测资料,对比分析了两种导线观测的电线积冰直径、厚度、重量和标准厚度的差异,并对不同天气现象、风力等级和气温条件下两种导线观测的电线积冰资料的差异及原因进行了

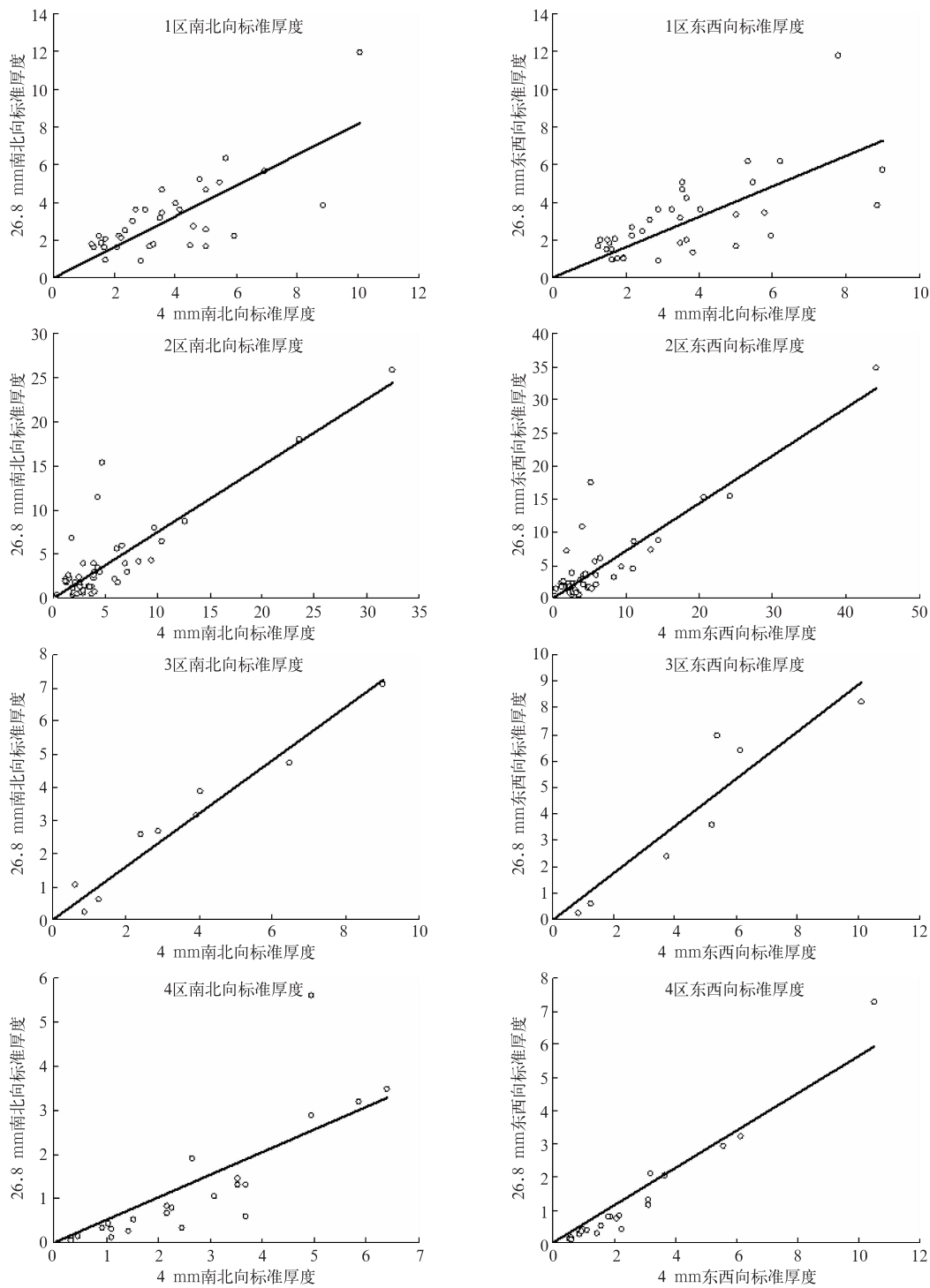


图 4 中国各区域两种电线积冰资料标准厚度值的线性拟合
Fig. 4 Linear regression effect between the two types of wire icing standard thickness over different regions of China

讨论。主要结论如下：

(1)全国大部分台站观测的两种电线积冰直径和厚度值差异不大,差值平均值为 $-1\sim 1\text{ mm}$ 。在不同天气现象、风力等级和气温条件下,仅当雾凇和混合凇条件下,两种电线积冰直径和厚度值差异较

明显。

(2)在各种天气现象、风力等级和气温条件下,全国大部分台站中两种电线积冰重量值差异都较大,南北向和东西向电线积冰重量差值平均值为分别为 172.06 和 $184.26\text{ g}\cdot\text{m}^{-1}$,差值较大的站点主

表 5 中国各区域两种电线积冰资料线性拟合系数和相关系数列表

Table 5 Linear fitting coefficients and the correlation coefficients between the two types of wire icing data over different regions of China

要素	系数	1 区		2 区		3 区	
		南北向	东西向	南北向	东西向	南北向	东西向
直径	<i>b</i>	0.9836	0.9631	0.8398	0.7165	0.9836	0.9631
	<i>R</i>	0.9547***	0.9459***	0.9688***	0.8721***	0.9547***	0.9459***
厚度	<i>b</i>	0.8542	0.8254	0.7749	0.7318	0.8542	0.8254
	<i>R</i>	0.9333***	0.9102***	0.9666***	0.9572***	0.9333***	0.9102***
重量	<i>b</i>	2.5072	2.4288	1.2033	1.0197	2.5072	2.4288
	<i>R</i>	0.9333***	0.5580***	0.8721***	0.9195***	0.9333***	0.5580***
标准厚度	<i>b</i>	0.8154	0.8096	0.7495	0.7205	0.8154	0.8096
	<i>R</i>	0.7323***	0.6657***	0.8494***	0.8801***	0.7323***	0.6657***
要素	系数	4 区		5 区		6 区	
		南北向	东西向	南北向	东西向	南北向	东西向
直径	<i>b</i>	0.7968	0.7050	0.5652	0.5866	0.6276	0.6487
	<i>R</i>	0.8989***	0.8595***	0.8817***	0.9097***	0.8316***	0.8395***
厚度	<i>b</i>	0.7934	0.7100	0.1993	0.2056	0.4169	0.2068
	<i>R</i>	0.8615***	0.6875***	0.3839	0.2302	0.3464	0.8832***
重量	<i>b</i>	2.2231	2.3905	/	/	/	/
	<i>R</i>	0.9223***	0.8602***	/	/	/	/
标准厚度	<i>b</i>	0.8042	0.8860	/	/	/	/
	<i>R</i>	0.9751***	0.9268***	/	/	/	/

注:“/”表示无重量观测值,其他说明同表 2。

要分布在长江以南地区。在雨淞、风力 0~3 级、气温为-5~0℃的条件下,两种电线积冰重量差异最大。

(3)将不同天气条件下形成的不同密度的电线积冰换算为标准积冰厚度,两种积冰标准厚度差值平均值为-2~1 mm。在雾淞和混合淞、风力 4~6 级、气温为-10~-5℃的条件下,两种积冰标准厚度差异最大。

(4)将全国分为 6 个气候区,建立通过 4 mm 导线电线积冰资料推算 26.8 mm 导线电线积冰资料的回归模型,除东北地区和华北地区的积冰厚度外,其他各气候区都通过了 $\alpha=0.01$ 的显著性水平检验。

需要指出的是,本文是基于平行观测期内出现电线积冰现象的 267 个台站共计 1298 个观测资料样本进行的统计分析,受资料的限制对比分析结果仅反映在此期间内 267 个台站的对比分析特征。

参考文献

陈柏堃,郇庆林,吴明江. 2009. 金华近 56 年电线积冰气候特征及灾害防御. 气象,35(8):85-90.

顾骏强,朱特则,姜瑜君,等. 2010. 探空资料在输电线路覆冰事故评估中的应用. 气象,36(8):81-86.

江祖凡. 1983. 电线积冰增长速度的研究. 科学通报,28(15):34-37.

李登文,杨静,吴兴洋. 2011. 2008 年低温冰冻雨雪灾害天气过程中贵州电线积冰气象条件分析. 气象,37(2):161-169.

刘春城,刘佼. 2011. 输电线路导线覆冰机理及雨淞覆冰模型. 高压电子技术,37(1):241-248.

陶诗言,卫捷. 2008. 2008 年 1 月我国南方严重冰雪灾害过程分析. 气候与环境研究,13(4):337-350.

王守礼. 1994. 影响电线覆冰因素的研究与分析. 电网技术,18(4):19.

王遵娅,张强,陈峪,等. 2008. 2008 年初我国低温雨雪冰冻灾害的气候特征. 气候变化研究进展,4(2):1673-1719.

王遵娅,赵珊珊,张强. 2011. 我国冰冻日出现的气象条件分析及其判别模型. 高原气象,30(1):158-163.

吴素良,范建勋,姜创业,等. 2010. 兰州至关中电线积冰与导线线径及高度关系. 应用气象学报,21(1):63-69.

西南电力设计院. 2002. DL/T5158 电力工程气象勘测技术规程. 武汉:华中科技大学出版社,23-26.

谢运华. 1998. 导线覆冰密度的研究. 中国电力,31(1):46-51.

杨贵名,毛冬艳,孔期,等. 2009. “低温雨雪冰冻”天气过程锋区特征分析. 气象学报,67(4):652-665.

张家诚. 1991. 中国气候总论. 北京:气象出版社,199-201.

赵珊珊,高歌,张强,等. 2010. 中国冰冻天气的气候特征. 气象,36(3):34-38.

中国气象局. 2003. 地面气象观测规范. 北京:气象出版社,92-95.

中国气象局预测减灾司等. 2006. 中国气象地理区划手册. 北京:气象出版社,10-95.

周绍毅,苏志,李强. 2010a. 导线覆冰极值的概率分布模拟及其应用试验. 大气科学学报,33(4):365-394.

周绍毅,苏志,李强. 2010b. 广西导线覆冰的特征及其气候成因研究. 安徽农业科学,38(21):11337-11339.