

江志红, 杭月荷, 刘冬, 等. 2013. 我国南方输电线路覆冰极值序列重建试验 [J]. 气候与环境研究, 18 (3): 407–413, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2012.12011. Jiang Zhihong, Hang Yuehe, Liu Dong, et al. 2013. Reconstruction of an extreme wire icing series in southern China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 18 (3): 407–413.

我国南方输电线路覆冰极值序列重建试验

江志红¹ 杭月荷¹ 刘冬^{1,2} 吴息¹ 熊海星³

1 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室, 南京 210044

2 中国民用航空华东地区空中交通管理局气象中心, 上海 201103

3 中国电力工程顾问集团西南电力设计院, 成都 610000

摘 要 基于我国南方有覆冰数据记录的气象站冰厚年极值及同期气象要素观测资料, 统计分析多种气象因子对覆冰年极值形成条件频次分布的影响, 归纳出了最易于出现覆冰年极值的温度、风速和湿度条件。在此基础上, 通过对西南地区威宁、金佛山、峨眉山和三穗 4 站覆冰年极值与其相应气象变量的进一步分析, 建立了覆冰极值序列的回归模型。根据现有气象站电线结冰资料及其对应时段的常规气象要素资料, 对气象站电线结冰年极值序列进行重建试验, 试验结果表明不同气候背景下覆冰极值序列的回归模型有显著差异。独立样本的交叉检验结果显示, 威宁站年极值序列的回归模型效果较理想, 重建序列能够较好地模拟覆冰的极值序列。

关键词 覆冰 极值 重建

文章编号 1006-9585 (2013) 03-0407-07

中图分类号 P429

文献标志码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.12011

Reconstruction of an Extreme Wire Icing Series in Southern China

JIANG Zhihong¹, HANG Yuehe¹, LIU Dong^{1,2}, WU Xi¹, and XIONG Haixing³

1 Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

2 Aviation Meteorological Center of East China Air Traffic Management Bureau, Shanghai 201103

3 Southwest Electric Power Design Institute of China Power Engineering Consulting Group, Chengdu 610000

Abstract The authors analyzed various factors that cause extreme ice covering (EIC) using statistical methods on extreme ice thickness records and contemporaneous observational meteorological data from weather stations in southern China, and summarized how certain meteorological conditions, such as temperature, wind speed, and humidity, affect the EIC value. Further study of the EIC values and meteorological parameters at stations of Weining, Jinfoshan, Emeishan, and Sansui, allowed us to establish a regression model for the EIC data series. Based on the extreme ice thickness records and contemporaneous observational meteorological data from weather stations, the wire EIC value sequences were reconstructed, and it showed that regression models of wire EIC value sequences under different climate background conditions have significant differences. According to cross-test results using independent samples, the reconstructed regression model sequence for the Weining station matched the observational data, and the model simulated the EIC sequence well.

Keywords Wire icing, Extreme value, Reconstruction

收稿日期 2012-01-15 收到, 2013-01-26 收到修定稿

资助项目 国家科技支撑计划课题 2008BAK50B02-04, 西南电力设计院委托项目“输电线路覆冰数学模型研究”

作者简介 江志红, 女, 1963 年出生, 教授、博士生导师, 研究方向为气候学。E-mail: zhjiang@nuist.edu.cn

1 引言

近年来,随着我国特高压、大容量、超长距离主干电网线路建设的飞速发展,愈来愈多的主干线路不得不穿越那些有可能发生输电线路严重覆冰的山地区域,而电线覆冰历来就是危害电网线路安全最严重的自然灾害之一。这一问题对电网建设与安全运行的影响愈来愈突显。如 2008 年初我国南方遭遇罕见低温雨雪冰冻灾害,使我国电力行业遭受重创,直接经济损失达 100 亿元以上,给国民经济造成了巨大的损失(胡毅等, 2008; 陆佳政等, 2009)。覆冰灾害已成为电网建设与安全运行中影响最大的安全隐患之一。

科学合理地解决线路设计中覆冰问题是电网建设与安全运行的重要基础,其关键问题是准确地估计覆冰重现期冰厚极值(江志红等, 2010)。根据极值分布理论,进行覆冰重现期冰厚极值的估计一般需要较长时间的覆冰极值观测序列,序列长度至少在 20 年左右(谢志清等, 2005; 许月萍等, 2009)。但由于以往输电线路上没有长期覆冰观测,而近期电力部门虽在少数输电线路附近设立观冰站,但观测成本高,资料完整性差,序列长度都不足 10 年,无法满足重现期冰厚极值估计的需要。

电线覆冰形成过程与气象条件之间的关系密切,线路覆冰的形成需要特定的环境条件。如黄浩辉等(2010)分析了各气象要素对导线覆冰厚度的影响,认为主导风向、日最低气温和日降水(雪)量是影响导线覆冰厚度的主要气象因子。黄新波等(2008)探讨了利用气象要素建立覆冰预测模型的可能性,提出采用单一温度、湿度、风速等气象要

素进行覆冰预测可靠性差,而采用多气象因素进行覆冰预测有利于提高预测能力。廖玉芳和段丽洁(2010)则提出了海拔 1 km 以上和以下的不同电线覆冰厚度模型。但以往大多数工作主要分析覆冰形成的气象条件,尝试建立以多种气象要素为因子的覆冰模型。实际上覆冰极值的出现也与一定的特殊气象条件有关,且覆冰极值的重现期估计在输电线路设计中极具重要价值。但有关覆冰极值形成的气象条件及其模型的研究尚非常缺乏。

本文利用西南地区各气象站电线结冰及其相应的常规气象要素资料,在分析导线覆冰年极值形成的气象条件基础上,探讨了覆冰年极值与气象要素的定量关系,导出了覆冰年极值序列的重建模型,研究结果为覆冰的年极值序列重建提供了科学依据,鉴于目前输电线路上的观冰站非常缺乏,其结果也可开展输电线路覆冰气象服务提供参考。

2 资料和方法

本文收集整理了中国南方 6 省(市) 68 个气象站共 54 年(1957~2009 年)导线覆冰观测资料,同时段气象要素观测资料(日平均温度、最高最低温度、日平均风速、最大最小风速、相对湿度),以及这些站点每一次雨雾凇过程的起止时间资料。站点分布及其序列长度如图 1 所示。

本文所用的冰厚年极值资料为在每一年中各次覆冰过程中选取导线结冰厚度最大时对应的覆冰厚度值。通过统计覆冰极值出现时的各气象要素频次分布,了解覆冰极值对应的最有利气象条件。在此基础上,采用多元线性回归方法,进行覆冰极值的重建试验。

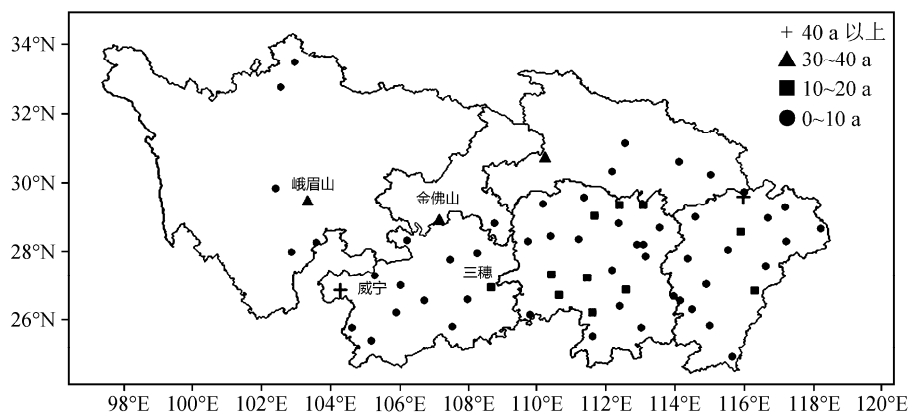


图 1 68 个站点分布示意图(符号为资料序列长度)

Fig. 1 Distribution of the 68 meteorological stations in southern China (symbols denote different sequence lengths)

3 出现覆冰极值的气象条件分析

3.1 频次分析

在 68 站 54 年资料中, 选取有完整的雨雾凇过程起止时间及同时次气象要素观测记录的样本, 共 680 条数据进行整理分析, 统计这些气象站每一次极值出现时相应各气象因子出现的频数。图 2 为 680 个覆冰年极值出现当天的不同日平均气温、日最低气温和日最高气温出现的频次百分比分布。可以看出, 覆冰极值出现的日平均气温范围在 $-14.5 \sim$

3°C 之间, 其中出现极值频次最高的日平均气温范围为 $-5 \sim 2^{\circ}\text{C}$, 占有覆冰极值出现概率的 82.2%。出现极值频次最高的日最低气温范围为 $-6.5 \sim 0.5^{\circ}\text{C}$, 日最高气温范围为 $-3.5 \sim 3^{\circ}\text{C}$, 分别占有覆冰极值出现概率的 81.9% 和 81.0%。可见, 日平均气温接近 0°C , 且高低温差相差不大, 是利于出现覆冰极值的温度条件。

研究表明, 一定的风速也是覆冰出现的重要条件。图 3 为不同测站多年覆冰年极值发生当天的不同日平均风速、日最小风速和日最大风速出现频次百分比分布, 可以看到 85% 覆冰极值出现于风速低

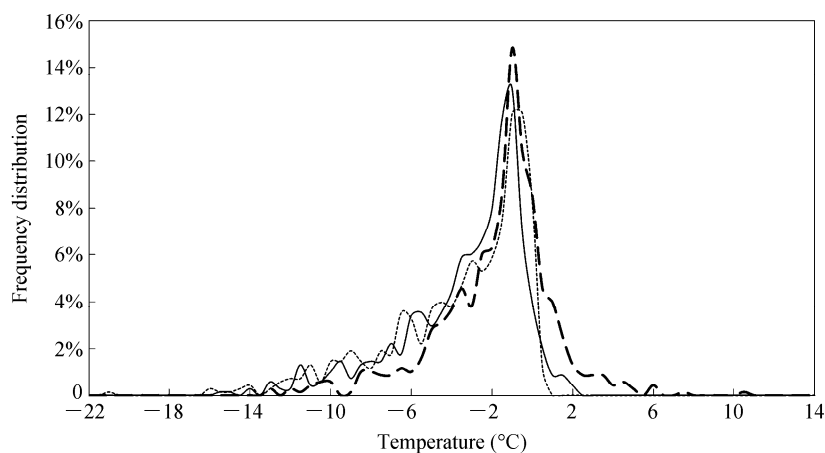


图 2 覆冰年极值发生当天不同日平均气温(实线)、日最低气温(点线)和日最高气温(虚线)出现的频次

Fig. 2 Frequencies of the daily average temperature (solid line), minimum temperature (dotted line), and maximum temperature (dashed line) corresponding to the contemporaneous extreme ice covering (EIC) values

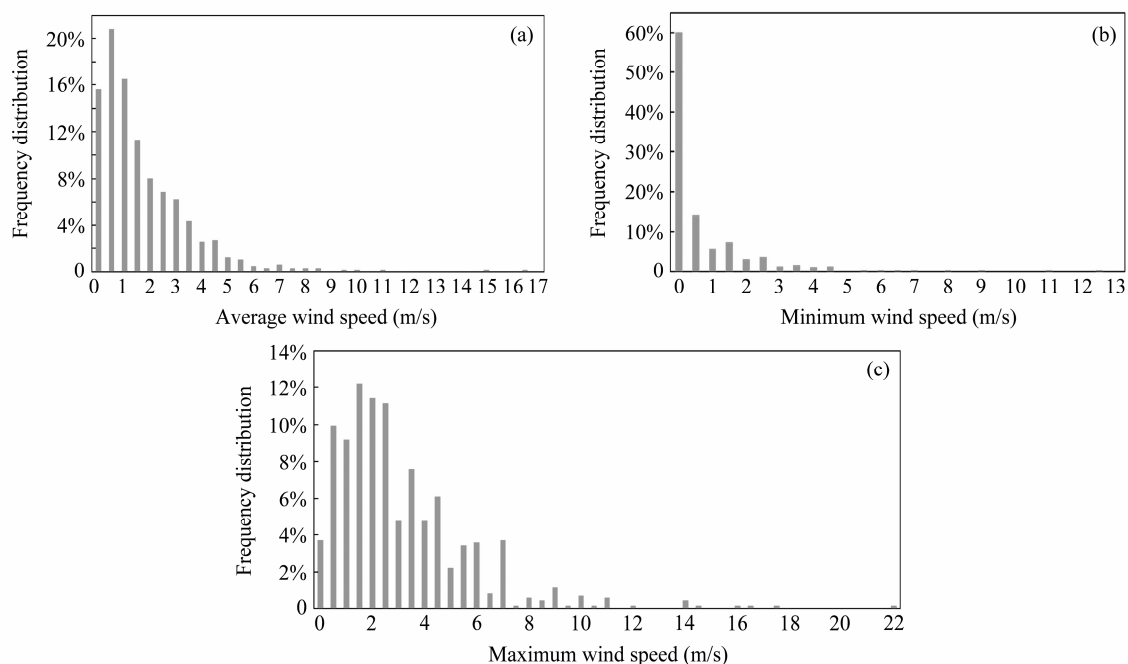


图 3 同图 2, 但为 (a) 日平均风速、(b) 日最小风速和 (c) 日最大风速出现的频次

Fig. 3 Same as Fig. 2, but for the (a) daily average wind speed, (b) minimum wind speed, and (c) maximum wind speed

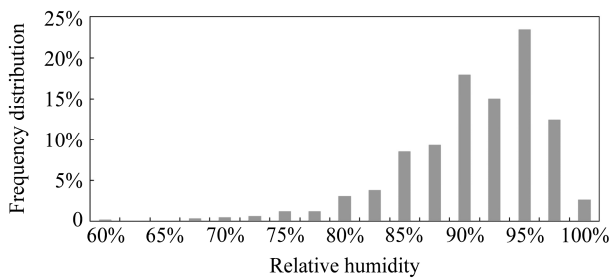


图4 覆冰年极值发生当天不同相对湿度出现的频率分布

Fig. 4 Frequencies of the relative humidity corresponding to the contemporaneous EIC values

于 3.5 m/s。出现极值概率最大的日最大和最小风速分别为 0.5~5 m/s 和 0~2 m/s，占到了各自全部频次的 77.1%和 87.4%。

图 4 为不同测站多年覆冰年极值发生当天的不同相对湿度出现的频次百分比分布。当相对湿度在 60%以上时，都有覆冰极值出现；而极值出现概率最高的相对湿度范围为 85%~100%，占有频次的 86.6%。

由此可见，从覆冰年极值所对应的各气象因子的出现频次分布来看，除了与日平均气温、日最低气温和日最高气温有关以外，覆冰年极值还与当日的风速、相对湿度出现的阈值有关。例如，覆冰年极值最可能出现在日平均气温范围在 $-5\sim 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间；日最低气温范围在 $-6.5\sim 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间；日最高气温范围在 $-3.5\sim 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间；且覆冰年极值最可能出现在日平均风速在 0~3.5 m/s 之间，即风速很小的日子里；而其相对湿度则在 85%~100%之间，即近饱和天气状态。根据对 680 次覆冰年极值出现的月份进行统计（表 1），发现最易发生覆冰的月份为 12 月、1 月、2 月和 3 月。可见，覆冰的年最大极值最有利的气象条件是：低温、寒冷、潮湿加之雨雪弥漫的冬春季。

表 1 覆冰年极值出现月份的统计

Table 1 Statistics of months for the wire icing extreme values

月份	出现覆冰年极值次数	占总次数比例
10 月	1	0.15%
11 月	14	2.06%
12 月	116	17.06%
1 月	272	40.00%
2 月	211	31.03%
3 月	58	8.53%
4 月	8	1.18%

3.2 相关分析

根据上述覆冰年极值出现条件下气象要素概

率分布的分析，进一步选取了观测序列长度超过 20 a，且雨雾凇资料较为完整的 4 个测站，其有效样本数分别为：威宁站 36 次、金佛山站 37 次、峨眉山站 35 次和三穗站 18 次。考虑到覆冰极值的出现与其形成期内累积气象条件有关，重点研究覆冰极值 (H) 与覆冰极值形成期内低于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的积温 ($\sum T$)、该时段内垂直于导线截面上的平均风速 (V) 及其相应的水汽输送量 (Q) 这 3 个因子之间的相关关系。其中覆冰极值形成期内低于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的积温 ($\sum T$) 为出现雨雾凇的开始日至覆冰极值出现这一时段内，所有低于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的日平均温度的总和（为负值）。垂直于导线截面上的水汽输送量（单位： $\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ）的表达式为

$$Q = \sum q_w V_i \sin \theta_i, \quad (1)$$

其中， V_i 为风速（单位： m s^{-1} ）， θ_i 为导线与风向之间的夹角， q_w 为绝对湿度（单位体积水汽含量，单位： g m^{-3} ），可表示为

$$q_w = 217 \frac{e}{t}, \quad (2)$$

其中， e 为水汽压（单位： hPa ）， t 为绝对温度（单位： K ）。

图 5 给出了威宁站冰厚极值和其形成期内低于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的积温与该时段内垂直于导线截面上的平均风速的相关关系分布图，两个相关关系均通过了 $\alpha=0.05$ 的信度检验。可以看到威宁站覆冰形成期冰厚极值与低于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温和平均风速的相关关系都较好，也就是说，低于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的负值积温越低（绝对值越大），即低温持续时间越长、垂直于导线的平均风速越小，覆冰厚度越大；比较而言，与积温的相关关系要优于平均风速。

由表 2 给出了威宁站、金佛山站、峨眉山站和三穗站 4 站覆冰年极值与其形成期内相应气象要素之间的相关系数，可以看到：对于不同地区而言，决定覆冰极值的关键气象因子是不同的。总体来说，覆冰形成期内低于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的日平均温度积温是最显著相关因子，除三穗站外，其余 3 站相关系数分别为威宁站 -0.774 、峨眉山站 -0.312 、金佛山站 -0.294 ，都通过了 $\alpha=0.1$ 的信度检验，且负相关的绝对值越大，二者相关关系越显著，即低于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的负值积温越低，对应覆冰冰厚极值越大。而对于三穗站，覆冰极值则仅与水汽输送量的相关性较好，相关系数达 0.387，与其它两个变量的相关性则不显著。另外有些站则存在多个显著相关因子。如威

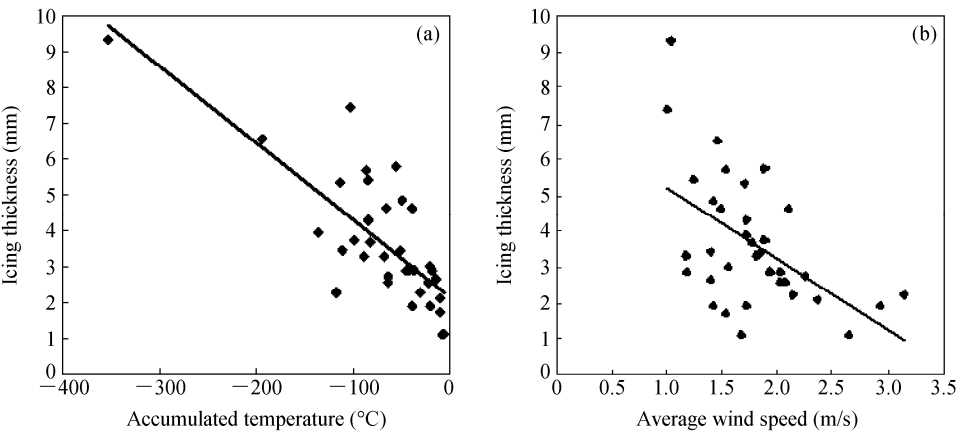


图 5 威宁站覆冰极值与 (a) 低于 0℃ 积温、(b) 平均风速的相关关系
Fig. 5 Correlationships between the icing thickness extreme values and (a) the accumulated temperature and (b) the average wind speed at Weining station

宁站和金佛山站，覆冰极值与积温和平均风速的相关性都比较好；但其密切程度各不相同。对于威宁站，积温的相关性显然要比平均风速显著得多；而金佛山站则正好相反。所以，不同区域气候背景和地理地形条件的差异造成了覆冰极值形成的主要气象变量的不同。

表 2 覆冰极值与其形成期内低于 0℃ 积温、平均风速和水汽输送量间的相关系数

Table 2 Correlation coefficients between the wire icing extreme values and accumulated temperature, average wind speed, and moisture transport

站名	低于 0℃ 积温 ($\sum T$)	平均风速 (V)	水汽输送量 (Q)
威宁站	-0.774*	-0.532*	0.256
金佛山站	-0.294*	-0.347*	-0.025
峨眉山站	-0.312*	-0.257	0.134
三穗站	-0.139	-0.208	0.387*

*表示通过了 $\alpha=0.1$ 的显著性检验。

以上结果表明，覆冰极值的形成与 $\sum T$ 、 V 及 Q 有关，但不同区域气候背景下，形成覆冰极值的敏感气象因子不同，相关关系的密切程度也有差别。

4 气象站覆冰（标准冰厚）极值序列的重建试验

利用上述相关分析结果，分别建立了威宁站、金佛山站、峨眉山站和三穗站标准冰厚极值与其形成期内低于 0℃ 积温 ($\sum T$)、平均风速 (V)、水汽输送量 (Q) 的多元线性回归模型。

表 3 给出了上述 4 站覆冰极值的回归方程，各自模型的复相关系数和回归方程的方差贡献率。其中 y 为标准冰厚极值。

表 3 覆冰极值的多元回归模型
Table 3 Multiple regression models for the icing extreme value series

站名	回归方程	复相关系数	方差贡献
威宁站	$y=-0.02\sum T-0.868 V-0.002 Q+4.049$	0.801	65.6%
金佛山站	$y=-0.014\sum T-1.254 V+0.006 Q+24.465$	0.354	16.3%
峨眉山站	$y=-0.01\sum T-1.005 V+0.001 Q+15.526$	0.408	13.0%
三穗站	$y=0.036\sum T-0.531 V+0.025 Q+2.535$	0.425	28.3%

由上表可见，威宁站回归模型中模拟值与各气象因子之间的复相关系数达到 0.801，回归方程的方差贡献达 65.6%，回归效果在统计上是显著的。金佛山站和峨眉山站模型的复相关系数分别为 0.354 和 0.408，方差贡献分别为 16.3%和 13.0%，回归效果较为理想。以上 3 个模型均通过了 $\alpha=0.05$ 的信度检验。而三穗站模型的复相关系数和方差贡献为 0.425 和 28.3%，未通过 $\alpha=0.05$ 的信度检验，回归模拟效果并不理想。

图 6 分别给出了上述 4 站标准冰厚极值实测序列与模拟序列的对比。威宁站覆冰极值的回归模拟序列与观测序列十分接近，二者相关系数达 0.810。金佛山、峨眉山和三穗站模拟序列与观测序列的相关系数依次为 0.404、0.360、0.503，均通过了 $\alpha=0.05$ 的信度检验，但对比各站实测序列与模拟序列，可见后 3 站模拟序列与实测序列还是有较大差距。上述结果表明，不同区域气候背景下，覆冰极值序列回归模型的模拟效果有显著差异。

进一步对威宁、金佛山、峨眉山 3 站进行独立样本的交叉检验试验（马开玉等，2004；魏凤英，2009）。即先剔除某年的所有资料，利用剩余年份

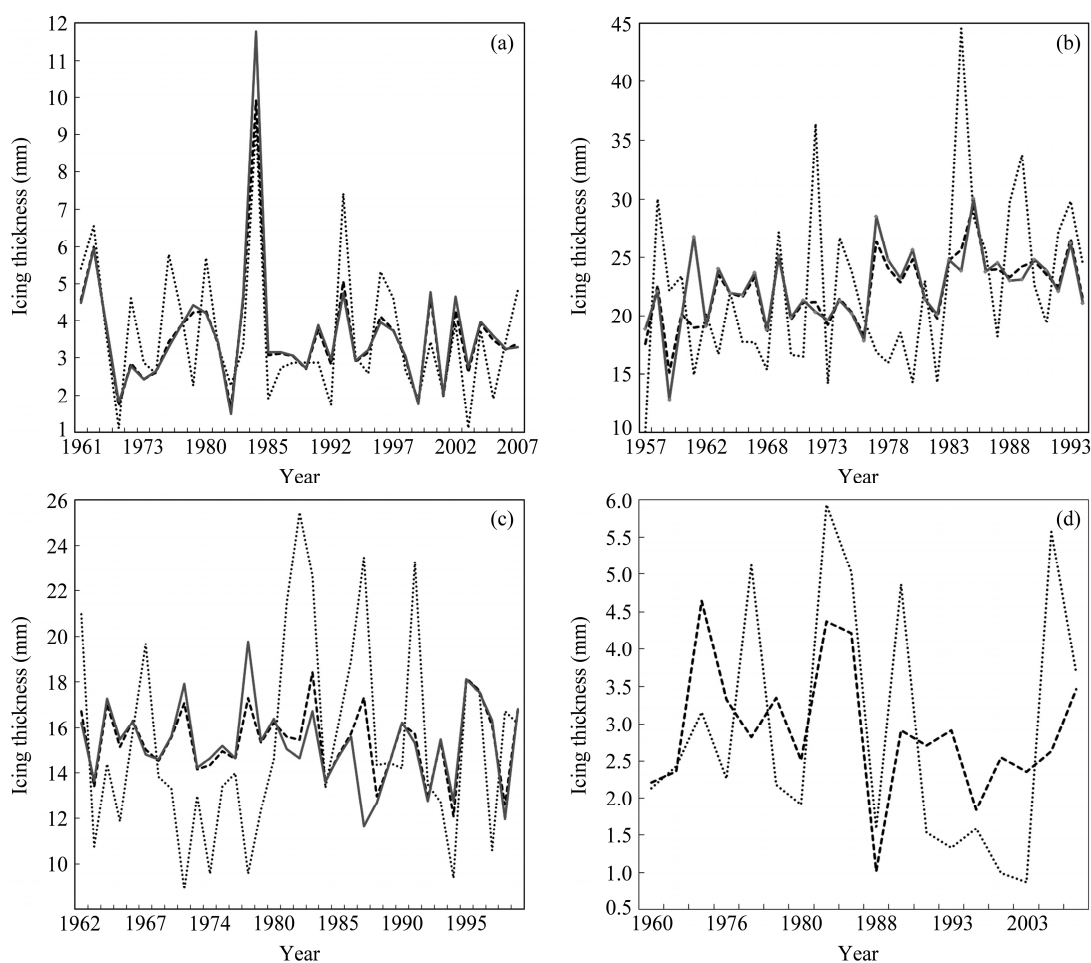


图6 (a) 威宁站、(b) 金佛山、(c) 峨眉山和 (d) 三穗站标准冰厚年极值实测与模拟序列的对比 (黑点线为实际观测值, 虚线为模型拟合曲线, 实线表示独立样本建模序列)

Fig. 6 Contrast of observed and simulated standard icing extreme sequences at (a) Weining station, (b) Jinfoshan station, (c) Emeishan station, and (d) Sansui station (the black dotted lines represent the observational series, the dashed lines represent the model fitting series, and the solid lines represent modeling sequence of independent samples)

实测数据建立回归方程, 再通过该方程及其剔除年的气象要素值, 计算得到该剔除年冰厚极值; 依次对所有年份进行上述建模, 即可得到基于独立样本的冰厚年极值重建序列, 如图6中灰实线所示。计算各站重建与实测覆冰年极值序列的相关系数, 威宁站为 0.757, 通过了 $\alpha=0.05$ 的信度检验, 表明该模型对该站覆冰年极值序列有显著的重建能力。而金佛山和峨眉山站都无法通过 $\alpha=0.05$ 的信度检验。上述结果进一步表明, 即便是建模拟合效果较好的站点, 是否能够利用多元线性回归模型对冰厚极值序列进行重建, 还需要深入的分析与计算。毫无疑问, 假定有关部门与气象部门在以往既有观测资料的基础上, 不断地增加和积累观测资料, 并进一步扩大观测范围, 上述初步研究分析的结果将更具有说服力, 可为导线覆冰的预测提供一定的参考。

5 小结

通过对不同观测站多年覆冰年极值发生当天的各种气象因子出现频率的分析以及气象站覆冰 (标准冰厚) 极值序列的重建试验, 可以初步得出如下结论:

(1) 我国南方最易出现覆冰极值的气象条件为: 日平均温度 $-5 \sim -2$ °C、日最低气温 $-6.5 \sim -0.5$ °C, 日最高气温 $-3.5 \sim -3$ °C, 平均风速为 $0 \sim 3.5$ m/s、相对湿度 85% 以上。

(2) 通过分析覆冰年极值与极值形成期内各气象变量的关系, 发现覆冰极值的形成与其形成期内低于 0 °C 的积温 ($\sum T$)、该时段内垂直于导线截面上的平均风速 (V) 及相应的水汽输送量 (Q) 存在

显著的相关关系，但不同区域气候背景下所形成的覆冰极值，其敏感气象因子不同，相关密切程度也有差别。

(3) 建立了基于气象条件的导线覆冰年极值序列的回归模型，回归分析表明，威宁、金佛山和峨眉山站回归方程均具有显著性；独立样本的交叉检验试验表明，威宁站年极值序列重建效果较为显著，而金佛山站和峨眉山站用该模型进行序列重建效果不理想。表明上述不同站点的回归模型有显著差异，覆冰年极值序列重建模型具有地域性特点。

参考文献 (References)

- 胡毅, 胡建勋, 刘廷. 2008. 我国南方地区电网大范围覆冰灾害的特点分析与防治措施 [J]. 电力设备, 9 (6): 1-4. Hu Yi, Hu Jianxun, Liu Ting. 2008. Analysis and countermeasures for large area icing accident on power grid in Northern China [J]. Electrical Equipment (in Chinese), 9 (6): 1-4.
- 黄浩辉, 宋丽莉, 秦鹏, 等. 2010. 粤北地区导线覆冰气象特征与标准厚度推算 [J]. 热带气象学报, 26 (1): 7-12. Huang Haohui, Song Lili, Qin Peng, et al. 2010. Meteorological characteristics and standard thickness calculations of wire icing over the north region of Guangdong Province [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 26 (1): 7-12.
- 黄新波, 孙钦东, 张冠军, 等. 2008. 线路覆冰与局部气象因素的关系 [J]. 高压电器, 44 (4): 289-294. Huang Xinbo, Sun Qindong, Zhang Guanjun, et al. 2008. Relation of transmission line icing and local meteorology [J]. High Voltage Apparatus (in Chinese), 44 (4): 289-294.
- 江志红, 刘冬, 刘渝. 2010. 导线覆冰极值的概率分布模拟及其应用试验 [J]. 大气科学学报, 33 (4): 385-394. Jiang Zhihong, Liu Dong, Liu Yu. 2010. Study on the probability distribution simulation of conductor icing and its application test [J]. Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (4): 385-394.
- 廖玉芳, 段丽洁. 2010. 湖南电线覆冰厚度估算模型研究 [J]. 大气科学学报, 33 (4): 395-400. Liao Yufang, Duan Lijie. 2010. Study on estimation model of wire icing thickness in Hunan Province [J]. Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (4): 395-400.
- 陆佳政, 彭继文, 张红先, 等. 2009. 2008 年湖南电网冰灾气象成因分析 [J]. 电力建设, 30 (6): 29-32. Lu Jiazheng, Peng Jiwen, Zhang Hongxian, et al. 2009. Icing meteorological genetic analysis of hunan power grid in 2008 [J]. Electric Power Construction (in Chinese), 30 (6): 29-32.
- 马开玉, 张耀存, 陈星. 2004. 现代应用统计学 [M]. 北京: 气象出版社, 91-92. Ma Kaiyu, Zhang Yaocun, Chen Xing. 2004. Modern Application Statistics (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 91-92.
- 魏凤英. 2009. 现代气候统计诊断与预测技术 [M]. 北京: 气象出版社, 30-32. Wei Fengying. 2009. Modern Climatological Statistical Diagnosis and Prediction Methods [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 30-32.
- 谢志清, 姜爱军, 杜银, 等. 2005. 长江三角洲强降水过程年极值分布特征研究 [J]. 南京气象学院学报, 28 (2): 268-274. Xie Zhiqing, Jiang Aijun, Du Yin, et al. 2005. Spatial-temporal features of annual extremes of heavy precipitation processes in the Yangtze River delta [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 28 (2): 268-274.
- 许月萍, 任立新, 黄艳, 等. 2009. 水文极值计算及其不确定性 [J]. 应用基础与工程科学学报, 17 (2): 172-178. Xu Yueping, Ren Lixin, Huang Yan, et al. 2009. Hydrological extreme analysis and its uncertainty [J]. Journal of Basic Science and Engineering (in Chinese), 17 (2): 172-178.