

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

探空资料在输电线路覆冰事故评估中的应用

顾骏强¹ 朱持则¹ 姜瑜君¹ 张 斌¹ 王亚云²

1 浙江省气象科学研究所, 杭州 310017

2 浙江省气象信息网络中心, 杭州 310017

提 要: 为了分析2008年初浙江省电网大面积覆冰事故发生的原因,在缺乏有代表性电线结冰观测的条件下,利用气象探空观测资料统计分析低空各个海拔高度上气温、湿度条件,发现低温与高湿度的配置条件出现状况与输电线路覆冰事故调查结果有较好的对应,可将这样的配置条件视作覆冰气象基本条件,并可通过对比历史上严重冰雪天气灾害发生期间的低空覆冰气象条件,分析评估电网覆冰事故。分析指出:2008年1月中旬至2月初,浙江内陆海拔100 m以上高度出现持续性较严重的覆冰气象条件,是有系统气象记录以来最严重的时段,覆冰条件随着海拔高度的增高而加强,其主要原因是大气层低空低温与高湿配置条件较好,持续时间长。

关键词: 探空, 输电线路, 覆冰, 评估

Application of Upper Air Sounding Data to the Evaluation of Power Transmission Line Ice-Coating Accidents

GU Junqiang¹ ZHU Chize¹ JIANG Yujun¹ ZHANG Bin¹ WANG Yayun²

1 Zhejiang Meteorological Science Research Institute, Hangzhou 310017

2 Zhejiang Meteorological Information Network Center, Hangzhou 310017

Abstract: Large-area power transmission line ice-coating accidents occurred in Zhejiang Province early 2008. And the upper air sounding data are used due to the lack of representative ice-coating observations. The configuration of temperature and humidity factors at various altitudes in the lower atmosphere is also obtained. It reveals that combination of continuously low temperature and corresponding high humidity fits the investigation of transmission line incidents so well that it can be regarded as a basic criterion for ice-coating prediction and early diagnosis. The evaluation indicates that, from middle January to early February in 2008, the continuous occurrence of low temperature accompanied by high humidity was the main factor of power transmission line ice-coating accidents. In such severe air conditions, the correlation between intensity of ice-coating and altitude is proved to be positive in the lower boundary layer. Comparisons with the similar historic weather records point out that, the unprecedented severe meteorological conditions resulted in the extremely severe ice-coating accidents in early 2008.

Key words: upper air sounding, transmission line, ice-coating, evaluation

引 言

2008年1月15日,浙江中部会稽山区500 kV桐风5419输变电路发生严重电线覆冰,5基铁塔

不同程度变形,塔头折断,导线断落。此后,随着持续性雨雪冰冻天气的发展,浙江省境内输电线路事故不断。全省累计倒(断)塔(杆)15157基、斜杆1544基、断线6889处、线路损坏10814 km;其中,500 kV骨干电网遭受历史重创,倒塔167基,对全

省电力供给造成严重影响。许多文献[1-4]对这次天气过程的特点和成因等进行过分析,主要是 2008 年 1 月中旬至 2 月上旬期间,北半球中高纬度欧亚地区的大气环流长时间持续呈现西高东低分布,有利于冷空气自西北方向沿河西走廊不断入侵;西北太平洋副热带高压偏强偏北,且位置稳定维持在我国东南侧的海洋上空,并多次向西伸展,使冷暖空气交汇的主要地区位于我国长江中下游及其以南邻近地区;青藏高原南缘的南支低压槽活跃,使西南方向暖湿空气沿云贵高原向长江中下游地区输送;长江中下游地区上空冷暖空气交汇时,在对流层中低层形成稳定的逆温层,持续 20 多天,造成持续 20 多天的大范围低温、雨雪、冰冻天气。

为了配合浙江电网抢修设计工作,电力用户需要气象专业机构及时、客观评估电网覆冰事故的原因。从地面常规观测资料分析,2008 年 1 月中旬至 2 月初,浙江绝大多数地区长时间持续阴雨雪,多数地区连阴雨雪的天数打破历史记录,过程累计降水量在 100 mm 以上;2 月初出现大范围暴雪天气,持续 30 多小时,浙北积雪深度破历史纪录,其中山区积雪深度超过 60 cm;1 月下旬至 2 月中旬全省平均气温比常年偏低 3 ℃ 以上,杭州以北大部地区最低气温达 -4 ℃ 以下,由于连阴雨雪使空气处于高湿状态,造成山区出现大面积的冻雨现象。此外,浙江 6 个有电线结冰观测业务的气象站(海拔均低于 100 m),其中金华、杭州、临海 3 个出现电线结冰现象,但是结冰现象并不严重,而地处浙江北部湖州,以及舟山、鄞州等站,没有出现电线结冰现象。然而,这种基于地面气象观测分析得到的评估结论,并不能完全满足客观评估电网覆冰事故的需求。根据电网

覆冰事故的调查,事故地点主要出现在内陆海拔 400 m 以上山区,线路附近缺乏气象观测资料,而其所处地理环境与常规气象台站观测环境差异较大。在缺乏有代表性电线结冰观测资料的情况下,为了反映山区不同海拔上覆冰气象条件,本文尝试利用探空资料对这次天气过程浙江低空气象条件进行分析,根据相关气象要素之间的配置情况间接反映覆冰气象条件。

1 资料与方法

通过对 2008 年初浙江电网 500 kV 覆冰事故的调查分析,利用探空资料侧重对海拔 1500 m 以下的低空覆冰气象条件进行分析,并结合历史冰冻天气过程,评估 2008 年初低空覆冰气象条件状况。

1.1 灾害资料

根据电力和气象部门组成的灾害调查组从实地勘察获取的资料,覆冰事故地点湿度大,能见度低,电力建筑物及周围植物表面均出现雨淞、雾淞、湿雪及其混合冻结,附着于输电线路的实测覆冰厚度一般在 2~4 cm,最大的超过 5 cm(个别线路段最大覆冰厚度超过 10 cm);海拔 800 m 以上现场采样覆冰冻结物密度达到 $780 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。从冻结形态上看,导线覆冰冻结分布不对称,冻结单体主要呈椭圆型。冻结物结构上存在若干分层,内层呈透明状,密度较大;中层为薄的雪冰冻结层,呈透明与白色相间的晶体;外层为密度相对较小的雪冰混合层。可见,在不同气象环境条件下,线路覆冰是经过反复冻结而形成混合冻结物。

表 1 500 kV 输电线路各海拔高度覆冰事故统计

Table 1 The statistical results of 500 kV transmission line accidents of various altitudes

海拔高度 /m	事故线路塔基数 /基	倒塔数 /基	倒塔数占同高度层 塔基数比率/%	倒塔数占总倒 塔数比率/%	断线/处	事故数/处
<100	725	0	0	0	0	0
100~200	1231	0	0	0	2	2
200~300	795	6	0.75	3.59	6	12
300~400	584	11	1.88	6.59	3	14
400~500	414	39	9.42	23.35	11	50
500~600	291	52	17.90	31.14	12	64
600~700	176	38	21.59	22.74	14	52
700~800	86	16	18.60	9.58	6	22
800~900	35	5	14.29	2.99	8	13
900~1000	12	0	0	0	0	0
>1000	5	0	0	0	0	0
合计	4354	167	3.84	99.98	62	299

500 kV 线路覆冰事故地点主要出现在浙江的中部和南部山区,海拔高度在 400 m 以上倒塔数约占浙江全省总数的 90%,其中海拔 500~800 m 高度事故最为严重;从发生的时间上看,1 月中旬主要发生在 700 m 以上高海拔山区,随着时间的推移和低温雨雪冰冻天气的发展,事故发生地点由海拔高度逐步向较低的地区发展,过去在 400 m 以下地区从未发生重大电线覆冰事故,这次亦未能逃脱灾难,500 kV 输电线路事故出现的最低海拔高度约在 200 m。

1.2 探空资料

利用浙江省内杭州、衢州、椒江 3 个探空站 2008 年 1 月 1 日至 2 月 15 日 08:00 和 20:00 时次的探空资料,选用探空报表中规定层和特性层资料,零度层高度及其湿度资料,分析海拔 1500 m 以下低空的气温与湿度配置状况。在覆冰气象条件评估过程中,对浙江近 50 年出现冰冻灾害天气过程进行了遴选,确定了 20 多个严重的天气过程个例,摘录当时相应的探空资料,通过计算和统计进行分析评估。选用个例涉及的年份有 1957、1961、1964、1970、1972、1977、1978、1980、1982、1983、1984、1985、1989、1991、1993、1994、1996、1998、1999、2004、2005 年,这些年份对应的冰冻天气过程中,不乏有电网覆冰灾害事故发生,例如 110 kV 奉新线 1978 年 2 月、1985 年 2 月事故,110 kV 古云线 1982 年 2 月事故;220 kV 安梁线 2005 年 2 月事故等。

1.3 分析方法

由于浙江缺乏有效的电线结冰的观测及相关试验分析,关于覆冰厚度、覆冰气象条件及其持续时间等之间关系的问题,至今仍没有充分的客观依据。根据我国南方地区电线覆冰相关研究成果^[5-11],通常以大气相对湿度 $>85\%$ 同时气温 $<0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为覆冰基本条件,当湿度进一步增加且气温下降则覆冰状况加剧。因此,在缺乏代表性的电线结冰观测资料的条件下,利用探空资料计算地面至海拔 1500 m 以下每隔 100 m 高度层上的气温和相对湿度,通过对这两个要素的配置情况来反映覆冰气象条件。

为了客观评定 2008 年初的覆冰气象条件,根据经验以表 2 给出的指数为评估依据,等级指数越大,说明覆冰形成的气象条件越严重。当确定分析评估连续时段后,定义时段内各个探测时次得到符合表

2 条件的总次数为覆冰条件出现次数,出现次数占探测总次数的百分比为出现频率,各个时次的等级指数之和与探测总次数的商为平均等级指数,平均等级指数与时段日数之积为评估指数。当然,对于评估时段长短的选取和个例等级指数等具体要求,今后可进一步探讨和规定。

表 2 电线覆冰气象条件等级指数

Table 2 The rating index of meteorological conditions for ice-coating

气温/ $^{\circ}\text{C}$	相对湿度/ $\%$		
	85~90	90~95	>95
-2.5~0.0	1	2	3
-5.0~-2.5	2	3	4
<-5.0	3	4	5

2 分析与评估

2.1 低空条件分析

2008 年 1 月 12 日降温以前,随着西南暖湿气流加强,气温回升湿度增大,浙江全省基本没有降水;12 日受寒潮天气影响,并伴有降水,大气低层湿度较大,基本上维持在 90% 左右。从浙江 3 个探空站逐日探空曲线来看,降温期间对流层低层出现了不同程度的逆温现象,其中椒江站逆温层出现在 925 hPa,其他两站逆温层出现高度稍微高些。1 月 12—13 日受寒潮影响气温直线下降,低层降温表现尤其突出,特别在 925 hPa 高度层,过程降温幅度超过 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$;降温后各个高度相对湿度迅速增加,形成低温、高湿的覆冰环境条件。1 月 19—20 日气温有一次短暂回暖过程,此后至 2 月 5 日,持续出现低温。从 1000 hPa、925 hPa 高度层来看,整个天气过程低温、高湿的条件维持时间较长,而 925 hPa 以上高度层湿度变化波动大于低层。对比 3 个探空站的资料,自 1 月 12 日降温后,杭州、衢州站 1000 hPa 高度气温波动小,徘徊在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,而沿海的椒江站,温度基本在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上。因此,整个天气过程浙江低空低温、高湿的配合条件较好,尤其是内陆地区。

气象探空的零度层高度对覆冰气象条件分析具有指示作用。图 1、图 2 分别给出 2008 年初浙江 3 个探空站逐日 20 时低空大气零度层的海拔高度,以及零度层高度的相对湿度;当地面气温 $<0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,零度层高度为探空站地面海拔高度。08 时零度层高度逐日变化与 20 时基本一致(图略)。1 月 12 日至

18日,椒江零度层高度出现在600~900 m,杭州、衢州出现在200~600 m高度;浙江内陆中部地区(衢州)1月10日至14日零度层相对湿度达90%左右,15日至18日相对湿度在85%左右徘徊。浙江输电线路覆冰第一次过程出现在12日至18日,这次天气过程使浙江中部、南部多数高海拔山区的输电线路造成覆冰,部分线路出现事故,同时也为其他线路后期事故的不断出现奠定了覆冰基础。1月19日至20日气温回暖,零度层高度有所抬升;1月23日至25日低层大气湿度有所降低,但是1月25日以后,持续时间更长的低温高湿天气再度出现,零度层高度也再次出现海拔800 m以下,并且大部分时间保持在500 m以下的低空。配合零度层湿度条件可以判断,在1月25日至28日、2月1日至2日、2月5日有3次利于电线覆冰的气象条件出现。其中,2月1日至2日同时又遭到暴雪天气的肆虐,使浙江中部、南部地区已形成覆冰的输电线路不堪重负,事故不断。

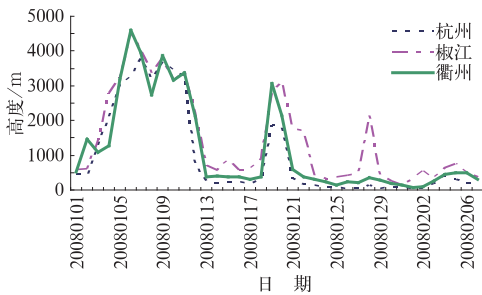


图1 2008年初20时探空零度层高度逐日变化曲线

Fig.1 The time series of freezing-level height at 2000 BT derived from daily upper air sounding data in early 2008

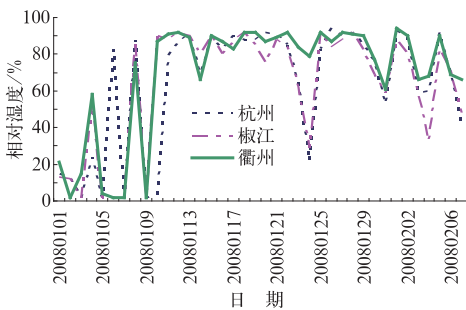


图2 2008年初20时探空零度层相对湿度逐日变化曲线

Fig.2 The time series of freezing-level relative humidity at 2000 BT derived from daily upper air sounding data in early 2008

根据2008年初浙江三个探空站两个时次的逐日资料,利用压高公式以100 m海拔高度为间隔,插值计算各海拔高度层的气温和相对湿度。从各站气温和相对湿度逐日变化曲线来看,杭州、衢州各个海拔高度上气温均比椒江偏低,各站气温随高度增加下降;相对湿度各个海拔高度的变化趋势十分一致,其中在海拔400 m至800 m高度层内数值差异不大。图3给出杭州站08时5个高度上气温逐日变化曲线。在1月20日气温在回暖的时候,各个海拔高度上气温差异不大,但是在其他低温时段,各个高度层上气温的差异十分明显,海拔200 m与1000 m的气温差可以达到6℃以上。因此,浙江这次电路覆冰事故除了相对湿度条件配合外,各海拔高度输电线路事故的差异主要反映在每个高度的低温差异上。以1月20日气温在回暖为界线,整个天气过程的低温有两个时段,即1月13—19日及1月21日至2月初,前一时段低温与高湿的配合比后一时段好,而后面时段的气温相对更低,使利于覆冰形成条件的区域向低海拔地区发展,但是其湿度条件随着海拔增高相对减弱。因此,前一时段海拔越高,越利于覆冰形成,后一时段由于气温进一步降低,相对低海拔地区的低温与高湿的配合条件得到增强,这与电力覆冰事故灾情上报情况一致。浙江低空长时间的低温高湿,加之期间短暂回暖,造成电线覆冰的反复冻结,增加覆冰密度,有利电线覆冰的持续发展,加重电网事故。

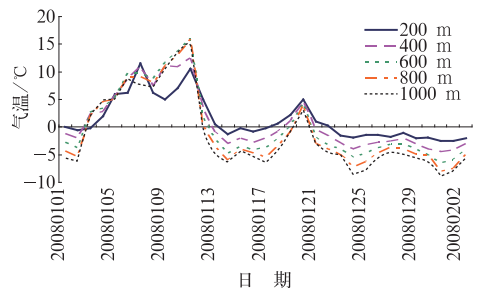


图3 2008年初杭州08时各个海拔高度上气温逐日变化曲线

Fig.3 The time series of temperature at different heights derived from daily upper air sounding data at 0800 BT in early 2008, Hangzhou

表3给出2008年杭州站08时和20时探空资料得到的各个高度上符合覆冰形成气象条件时的等级指数。可以看出,在有限的探测次数内,随着海拔的升高,符合覆冰形成条件的次数在增加,即形成覆冰气象条件的出现频率在提高,并且总体而言覆冰

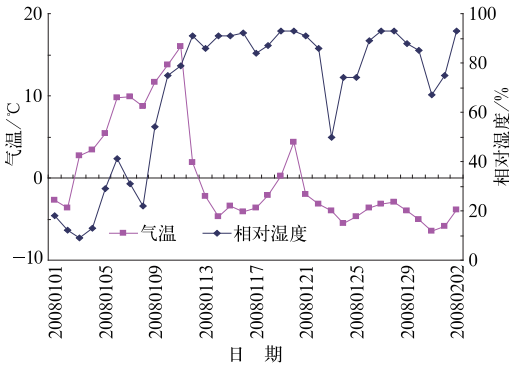


图 4 2008 年初杭州 08 时 600 m 海拔高度上气温、相对湿度逐日变化曲线

Fig. 4 The time series of temperature and relative humidity at 600 m level derived from daily upper air sounding data at 0800 BT at Hangzhou in early 2008

气象条件等级强度也相应增强,说明浙江随着海拔上升,电线覆冰风险也在加大,2008 年初的天气过程该特点尤其明显。2008 年 1 月 13—18 日覆冰气象条件在海拔 700 m 以上的地方等级指数较高,而 1 月 25—29 日不仅在海拔 700 m 以上地区出现覆冰条件高等级指数,在海拔 400~700 m 高度区间的等级指数明显增强,表明覆冰条件向低海拔发展,这与前述的分析一致。同时段内,衢州各个高度覆冰气象条件出现次数比杭州略多(表略),但各个高度层的等级强度非常接近,海拔越高,两地的覆冰气象条件越接近;然而,地处浙江中部沿海的椒江与内陆有较大区别,覆冰气象条件在海拔 600 m 才出现,各个高度层累计出现频率不足 10%,出现的最大等级指数为 2。通过 3 个探空站低空资料的同期

表 3 2008 年初杭州 08 时/20 时电线覆冰气象条件等级指数

Table 3 The ice-coating index time series at Hangzhou derived from daily upper air sounding data in early 2008

时间/年月日	海拔高度/m										
	地面	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
20080112	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/1	0/1	2/3	2/3
20080113	0/0	0/0	0/2	1/2	1/2	1/2	1/2	2/2	2/2	2/2	4/2
20080114	0/0	1/0	1/0	1/0	2/0	2/0	3/0	4/0	4/0	3/0	0/0
20080115	0/0	0/0	0/0	1/1	1/1	2/1	3/1	3/2	2/2	2/2	2/2
20080116	0/0	1/0	2/0	2/0	3/0	3/0	3/0	2/0	0/0	0/2	0/3
20080117	0/0	0/0	0/0	0/1	0/1	0/1	0/2	2/3	4/3	3/4	3/4
20080118	0/0	0/0	0/0	0/2	0/2	0/2	1/2	2/2	3/3	3/3	3/3
20080119	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	2/0	2/0	2/0	2/0
20080120	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/2	0/2
20080121	0/0	0/0	0/0	0/0	1/1	1/1	2/1	3/2	3/2	3/2	3/2
20080122	0/0	0/0	0/0	1/1	1/1	1/2	2/2	2/2	2/2	2/2	2/2
20080123	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/3	0/4	0/4
20080124	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	3/0	3/0
20080125	0/0	0/1	0/1	0/1	0/2	0/2	0/2	0/3	0/4	3/4	3/3
20080126	0/0	2/2	2/2	2/3	3/3	3/3	2/3	2/3	2/4	3/4	3/4
20080127	0/0	2/2	2/1	2/1	2/1	3/2	3/2	3/2	3/3	3/4	3/4
20080128	0/0	2/0	2/2	2/2	2/2	2/3	3/3	3/3	3/3	3/3	3/3
20080129	0/0	3/0	2/0	3/0	3/0	2/0	2/0	2/0	2/0	3/0	3/0
20080130	0/0	0/0	0/0	0/0	2/0	3/0	2/0	0/0	0/3	0/3	0/3
20080131	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
20080201	0/0	0/2	0/2	0/3	0/3	0/3	0/3	0/2	0/2	3/2	3/2
20080202	0/0	2/2	2/2	2/3	3/3	3/3	3/3	3/3	3/3	4/4	4/4
20080203	0/0	0/2	0/2	0/3	0/3	0/2	0/2	0/3	0/3	0/3	0/4
出现次数	0	13	15	22	25	25	26	28	29	35	34
出现频率/%	0	28	33	48	54	54	57	61	63	76	74
平均等级指数	0	0.52	0.59	0.87	1.07	1.13	1.26	1.50	1.72	2.17	2.22

对比分析,杭州站低空温湿条件与衢州基本一致,而椒江站则有明显差异。

2.2 覆冰条件评估

通过对浙江近 50 年来冰冻天气个例的对比分析,严重程度可以与 2008 年初这次过程相比的仅有 1977 年初和 1984 年初的两次过程,其他历史个例在海拔 1000 m 以下地区出现覆冰气象条件的持续

时间短、强度也相对较弱。

1977 年 1 月 1 日至 30 日,浙江出现持续低温天气过程中,其中有 3 次强降温过程,1 月底地面出现的最低气温记录目前仍未打破,气温偏低程度强于 2008 年初的低温天气过程。然而,1977 年初的低温天气过程中,湿度条件的配合并不理想,低温与高湿条件同时出现持续的时间较短,出现时段之间的时间间隔较大;此外,在 1 月 24—25 日有 10 °C 以

上的较大的回温过程。

从1983年底至1984年2月中旬,浙江出现罕见的低温天气过程,持续时间也是历史上最长的,其中1984年1月16日至2月12日的冰冻天气造成严重灾害。1984年1月16—17日的强降温过程与2008年1月12—13日的过程十分相似,降温幅度接近 20°C ,略逊于2008年。在1984年初的低温过程中,出现过几段高湿天气,就海拔1000 m高度而言,持续2天的时段有:1月27—30日、2月4—5日、2月9—12日。与1977年初低温过程一样,在低温与高湿条件同时出现的时段之间,至少有3天以上的时间间隔,这样的时间间隔明显大于2008年初的情况。

1977、1984年两次天气过程确定的评估时段分别是1月1日至29日、1月17日至2月13日,进行与表3同样的统计(表略),并作对比分析。在冰冻天气统计分析时段内,2008年初的天气过程除了地面层和200 m高度层外,在各个高度层上出现符合覆冰形成气象条件的次数和平均等级指数均具有优势。1977年初的天气过程在海拔400 m以下出现过非常利于覆冰形成的气象条件,但是出现的持续时间较短。图5为以杭州测点为例,给出浙江历史上3次严重冰冻天气低空各个高度覆冰气象条件平均等级指数。可见,1977年地面层最大,其他各个高度均最小;1984年与2008年从地面到200 m高度基本一致,海拔300 m以上各个高度上综合评估指数均以2008年为最大。根据前述的定义,这3次过程各个高度层平均指数的均值与对应评估时段日数的乘积应为过程的综合评估指数,根据评估指数的排序,3次天气过程低空覆冰气象条件综合评估结果由高到低为:2008年、1984年、1977年。

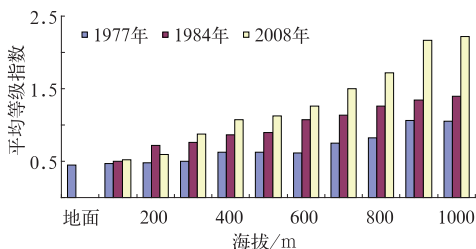


图5 杭州历史上3次严重冰冻天气过程各个高度覆冰气象条件平均等级指数
Fig. 5 The comparison of average ice-coating index of various heights between three severe freezing weather records in Hangzhou

综合上述分析,就浙江低空持续性的覆冰天气条件而言,2008年初的低温、高湿条件在近50年的气象探测记录中是最为突出的,与历史记录上其他严重冰冻天气个例比较,突出表现在低温与高湿同

时出现这一条件配合得好、持续性强。

3 小结

(1) 2008年初浙江电网出现历史上最严重的覆冰事故,尤其在浙江中部、南部海拔400 m以上山区。为了克服地面气象观测的局限给电网覆冰成因分析带来的困难,通过探空资料分析低空气温与湿度变化,发现在低温与高湿条件配置情况及其时间变化与电网覆冰事故发生的时间有很好的对应。因此,利用低空温、湿条件来分析评估电网覆冰事故是可行的。

(2) 2008年1月12—13日冷空气降温过程,浙江海拔800 m左右低空36小时降温达 20°C 以上,大气湿度基本饱和,形成了低温、高湿天气,出现电网覆冰倒塔事故;1月13—18日,海拔300 m以上地区气温维持在 0°C 以下,相对湿度多数时间保持在85%以上,覆冰进一步发展;1月19—20日气温回暖,各个海拔高度出现 0°C 以上气温;1月22日以后,气温 0°C 线触及海拔200 m以下区域,其中1月25—28日、2月1—2日再次出现两段高湿天气,电线覆冰事故进一步向低海拔地区发展。

(3) 2008年初的天气过程虽然低温程度不如1977年初,持续时间不及1984年初,但是根据低空的低温、高湿配置条件分析,2008年初浙江低空的覆冰气象条件是近50年中最为突出的,特别是在海拔400 m以上的地区。

参考文献

- [1] 王凌,高歌,张强,等. 2008年1月我国大范围低温雨雪冰冻灾害分析I. 气候特征与影响评估[J]. 气象,2008,34(4):95-100.
- [2] 高辉,陈丽娟,贾小龙,等. 2008年1月我国大范围低温雨雪冰冻灾害分析II. 成因分析[J]. 气象,2008,34(4):101-106.
- [3] 周宁芳. 全国大部气温明显偏低 南方低温雨雪冰冻肆虐[J]. 气象,2008,34(4):127-131.
- [4] 张勇. 南方低温雨雪冰冻灾害历史罕见[J]. 气象,2008,34(4):132-136.
- [5] 廖祥林. 计算送电线路标准冰厚参数取值的研究[J]. 电力勘测,1993,1(1):40-49.
- [6] 谢运华. 电线覆冰高度修正研究进展[J]. 电力建设,1997,18(6):47-50.
- [7] 王须明,马印寿. 南岭山区导线覆冰取值的分析[J]. 2002,电力勘测,10(4):48-51.
- [8] 谢运华. 三峡地区导线覆冰与气象要素的关系[J]. 中国电力,2005,38(3):35-39.
- [9] 蒋兴良,马俊,王少华,等. 输电线路冰害事故及原因分析[J]. 中国电力,2005,38(11):27-31.
- [10] 阎同喜. 导线覆冰气象参数的分析研究[J]. 机械管理开发,2006,95(5):51-52.
- [11] 魏其巍. 电线覆冰机理分析及在工程设计中的应用[J]. 电力建设,2007,28(3):26-28.