

沙漠地区

电力设备风害故障 诊断技术

钟永泰 聂德鑫 张 陵 马勤勇 著



非
外
借



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

沙漠地区

电力设备风害故障 诊断技术

钟永泰 聂德鑫 张陵 马勤勇 著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

随着“一带一路”发展战略以及全球能源互联网的推行，中国与中亚国家直流联网工程陆续开始规划建设，沙漠风害地区的电网建设与运行维护问题亟待解决，本专著以新疆为例，整理并总结了沙漠地区输变电工程应对风害的实用化技术，以期待相关专业人员提供重要参考。

本专著共有6章，分别为概述、沙漠风害对电力设备影响的研究现状、输电线路设备、变电设备、风害监测和应急抢修。

本专著可供从事沙漠风害地区输变电工程设计、运行维护等专业的科研与生产人员学习，也可供相关专业教职人员、研究人员参考。

图书在版编目（CIP）数据

沙漠地区电力设备风害故障诊断技术/钟永泰等著. —北京：中国电力出版社，2019.1
ISBN 978-7-5198-2932-2

I. ①沙… II. ①钟… III. ①沙漠-电力设备-风灾-故障诊断 IV. ①TM407

中国版本图书馆CIP数据核字（2019）第017706号

出版发行：中国电力出版社

地 址：北京市东城区北京站西街19号（邮政编码100005）

网 址：<http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑：罗 艳（yan-luo@sgcc.com.cn，010-63412315）

责任校对：黄 蓓 李 楠

装帧设计：张俊霞

责任印制：石 雷

印 刷：三河市万龙印装有限公司

版 次：2019年1月第一版

印 次：2019年1月北京第一次印刷

开 本：710毫米×980毫米 16开本

印 张：12.75

字 数：211千字

定 价：108.00元

版 权 专 有 侵 权 必 究

本书如有印装质量问题，我社营销中心负责退换

前言



我国沙漠地区处在中纬度地区，分布广泛，较大的沙漠有塔克拉玛干沙漠、古尔班通古特沙漠和巴丹吉林沙漠，这些沙漠地区的冷峰和低压槽过境较多，风速较大。这些地区有着丰富的太阳能和风能资源，是我国重要的能源基地，但是，这些地区存在的强风和干旱沙尘极端环境，给电网建设及运行维护带来了巨大的挑战。

国内外沙漠问题的研究，主要关注沙尘天气对大气环境的影响，研究者们通过卫星遥感、激光雷达和现场采集等方法获取沙漠地区沙尘的理化特性、物质来源、传输途径以及危害影响。在沙漠地区输电问题方面，国内外主要集中在输变电外绝缘、设备损伤等的研究工作，相关的专著极为缺乏。

随着“一带一路”建设实施以及“全球能源互联网”的推行，中国与中亚国家直流联网工程陆续开始规划建设，沙漠风害地区的电网建设及运行维护问题亟待解决。本专著以新疆为例，整理并总结了沙漠地区输变电工程应对风害的实用化技术，为相关专业人员提供重要参考。

国网新疆电力有限公司电力科学研究院与国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司深度合作，总结了多次罕遇沙漠风害电网受损的经验教训，依托《强风沙、高湿度特高压交流输电工程金具电晕特性及防晕技术研究》《强风沙尘气象环境下输电线路实时观测与预警技术研究》等系列科研攻关项目的成果，以及依托环绕塔克拉玛干沙漠、穿越西天山等多条 750kV 输变电工程，深度分析了输变电工程在沙漠风害环境作用下的损伤规律，阐述了试验模拟、故障机理探索和防护措施等关键技术，总结了多源数据融合的灾害监测、应急指挥决策和快速恢复供电的应对体系。

本专著由钟永泰、聂德鑫、张陵和马勤勇共同完成，张广洲和邓鹤鸣负责审稿和校核。专著共分为 6 章，第 1 章为概述，由钟永泰、陈彬和金铭执笔，介绍了极端风害地区的输变电工程外绝缘、设备损伤以及监测体系；第 2 章由聂德鑫、

王建、魏伟和李晓光执笔，详细介绍了沙漠风害对电力设备影响的研究现状；第3章由马勤勇、陈彬、杨洋和王立福执笔，着重于输电线路设备的危害与防治；第4章由聂德鑫、邓慰、王建和王友旭执笔，着重于变电设备的危害与防治；第5章由钟永泰、赵普志、何常根和郑路遥执笔，介绍了风害监测的进展，包括在线监测和广域监测，以及数值天气预报；第6章由张陵、文正其、李炼炼和赵建平执笔，介绍了应急抢修的技术现状，包括应急决策与抢修设备两部分。

中国电力科学研究院邬雄教授和徐涛研究员、国网电力科学研究院蔡炜研究员、国网四川省电力公司电力科学研究院曹永兴教授以及国网黑龙江省电力有限公司电力科学研究院于春来博士提出了宝贵建议，在此一并表示感谢。专著介绍的方法、技术、装置和标准适用于整个电力系统，可为从事沙漠风害地区输变电工程设计、运行维护等专业的科研与生产人员提供参考，也可以作为相关专业教职人员、研究人员的参考资料。

由于水平和经验有限，书中难免有缺点或错误，敬请读者批评指正。

著 者

2018年10月

目 录



前言

第 1 章 概述	1
1.1 沙漠地区特征	1
1.2 风沙分布特征	4
1.3 主要危害	10
第 2 章 沙漠风害对电力设备影响的研究现状	15
2.1 沙漠地区输变电工程外绝缘问题	15
2.2 输变电设备的风沙故障	22
第 3 章 输电线路设备	25
3.1 导线风偏	25
3.2 复合绝缘子的伞裙撕裂	35
3.3 连接金具磨损	46
3.4 间隔棒磨损	81
3.5 地线绝缘子及配套金具损伤	91
第 4 章 变电设备	98
4.1 变电主设备	98
4.2 变电站避雷针	101
4.3 支柱绝缘子	113

第 5 章 风害监测	129
5.1 在线监测	129
5.2 广域监测	145
5.3 多尺度数据融合的风害数值预报	151
第 6 章 应急抢修	166
6.1 应急决策	166
6.2 抢修设备	171
参考文献	188



第 1 章

概 述

1.1 沙漠地区特征

世界沙漠的大多数集中分布于南、北纬 $20^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 地区。这是由于太阳照射产生了地球的大气环流，并在南、北纬 33° 附近形成了两条强大的高压下沉气流带。地球公转使它们南北摆动，于是在地球中低纬度地区出现了两条宽阔的干旱气候带，其范围大致在南、北纬 $20^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 。

沙漠在地球上的分布还有一个明显的特点，大都居于大陆内部。越是深入内陆，距海越远，大气水汽来源越少，降雨量越少，气候越干旱，也就越有利于形成沙漠。我国西北及中亚的沙漠就是这样形成的。世界沙漠多倾向于分布在大陆西部。这是因为，一方面，大陆西部逼近高压下沉气流旋涡的东侧，干旱效果更加强烈；另一方面，大陆西侧常有冷洋流经过，也会加剧这一地区的干旱强度。

世界上，最大的沙漠地区是非洲北部的撒哈拉沙漠；最大的固定性沙漠是非洲南部的卡拉哈里沙漠，最大的流动性沙漠是阿拉伯半岛的鲁卜哈利沙漠；最干的沙漠是南美洲的阿塔卡马沙漠。

中国沙漠总面积约 70 万 km^2 ，如果连同 50 多万 km^2 的戈壁在内总面积为 128 万 km^2 ，占全国陆地总面积的 13%。中国西北干旱区是中国沙漠最为集中的地区，约占全国沙漠总面积的 80%，主要沙漠自西向东有塔克拉玛干沙漠、古尔班通古特沙漠、库姆塔格沙漠、柴达木沙漠、巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠、乌兰布和沙漠及库布齐沙漠等八大沙漠。

中国西北、华北北部及东北西部，有大片沙丘覆盖的沙质荒漠，由砾石、碎石组成的戈壁、砾漠，以及称之为岩漠或石质荒漠的岩石裸露的山地。它们主要

位于北纬 $35^{\circ} \sim 50^{\circ}$ 、东经 $75^{\circ} \sim 125^{\circ}$ ，分布在新疆、青海、甘肃、内蒙古、陕西、吉林和黑龙江等 7 个省区。据统计，中国沙漠、戈壁和沙漠化土地面积总计约 130.8 万 km^2 ，占全国陆地总面积的 13.5% 。在荒漠地带以流动性沙丘为主的沙漠，占全国沙漠面积 70% 以上；在荒漠草原和干草原地带以半固定、固定沙丘为主的沙漠化土地，面积约 32.8 万 km^2 。其中，以新疆分布的面积最广，约占全国沙漠、戈壁面积的 60% 。中国著名的八大沙漠中塔克拉玛干沙漠面积达 32 万 km^2 ，比 3 个浙江省还大，是中国最大的沙漠，也是世界上著名的大沙漠之一。

新疆地处欧亚大陆的中心，深居内陆，是世界上距离海洋最远的地区，四面高山环抱，很难受到海洋暖湿气流的影响，属温带、暖温带干旱性气候，新疆的沙漠又都是在盆地的中间，更是干旱性气候的极端地区，总的特点是干旱少雨，蒸发强烈，日照充足，热量丰富，大风、沙尘暴、扬沙、浮尘等灾害性天气频繁，沙害严重。

新疆地域辽阔，有三大山系和两大盆地，地质条件复杂，气候变化大，气候的水平和垂直地带性差异明显，沙漠地域分布广，类型多，差异明显。新疆沙漠一般分布于各盆地或谷地中，面积较大的沙漠有 10 片，其中北疆分布着古尔班通古特沙漠、福海沙漠、乌苏沙漠、吉木乃沙漠和塔克尔莫乎尔沙漠，南疆分布有塔克拉玛干沙漠、阿克别勒库姆沙漠、库姆塔格沙漠、鄯善库姆塔格沙漠以及位于昆仑山的库木库里沙漠。尤以塔里木盆地内的塔克拉玛干沙漠面积最大，准噶尔盆地内的古尔班通古特沙漠面积次之，分别达 33.76 万 km^2 和 4.88 万 km^2 ，并分别是世界第二大流动性沙漠和我国最大的固定半固定沙漠。

在新疆境内著名的风区有吐鲁番西北部的“三十里风区”（小草湖—大河沿），吐鲁番与哈密交界十三间房“百里风区”（兰新线红旗坎—沙尔站），哈密三塘湖—淖毛湖风区（二百四十里戈壁风区）和东南部风区，巴州罗布泊风区，博尔塔拉阿拉山口风区，乌鲁木齐达坂城风区（红雁池—后沟），塔城铁厂沟—老风口风区，阿勒泰额尔齐斯河谷风区等 9 大风区。这些风区年大风日数（8 级及以上大风）大多在 100 天以上，其中达坂城、阿拉山口风区甚至超过了 200 天。其中，哈密十三间房“百里风区”不仅大风出现频率高，且风速极值出现最多，2003 年 4 月 16 日，位于“百里风区”的兰新线大步车站（距十三间房车站 15km ）实测瞬时最大风速达到了 60m/s （17 级）。

新疆地处中纬度西风带，由于受地形的影响，素以风多风大著称，特别是 4~



5月份强劲的西北风沿阿拉山口、老风口、达坂城等著名的风口、风区长驱直入，时常刮得天昏地暗、飞沙走石。风的总体趋势是北疆大于南疆，高山、高原大于中低山地，盆地边缘大于盆地腹部。风口、风区最大，盆地中心最小。年平均风速北疆、东疆为2.5~3.5m/s，其中额尔齐斯河谷西部在4m/s以上，三塘湖、淖毛湖4~5m/s，阿拉山口、老风口、达坂城、“三十里风区”“百里风区”以及高山的山隘达坂区高达5~6m/s。南疆塔里木盆地在孔雀河以西为1.5~2.5m/s，孔雀河以东为3m/s，罗布泊地区达5m/s。

北疆西部、东疆和南疆东部是大风（风速 $\geq 17.2\text{m/s}$ 的八级以上的风）的多发地区。南疆东部的若羌一带，年平均大风日数为30~40天。北疆西部的哈巴河、和布克赛尔、克拉玛依，东疆的三塘湖、七角井、托克逊以及南疆的托云等地年均大风日数为60~90天，吐鲁番的“三十里风区”，哈密的“百里风区”，乌鲁木齐的达坂城以及艾肯和奎先达坂等地，年均大风日数均在100天以上。北疆西部的阿拉山口，年均大风日数多达165h，最大风速达50m/s。

新疆风速的年内变化多数是以春季为最大，夏季次之，冬季最小。以月份计，4、5月风速最大，12月和1月最小。北疆额尔齐斯河河谷西部、额敏县的老风口地区和达坂城谷地以冬、春各月风速较大，夏、秋风速略小。

新疆的风害对输变电设备的影响，往往伴随沙尘的侵蚀作用。从全疆范围来看，沙丘活化应该是最主要的形式。所谓沙丘活化，即原来属于固定、半固定的沙丘（或沙地）变成了流动沙丘。形成流动沙丘的条件，一个是沙丘上的植被被破坏了，松散的沙子在风力吹扬下向流动沙丘转化。它们多出现在绿洲与流动沙漠之间的过渡带。形成流动沙丘的第二个条件是地下水位降低，造成地上植被衰败、干枯，逐渐失去保护沙地地面的作用。

沙漠在全球变化和人为扰动双重作用的驱动下，不仅地理环境特征（活动性、规模以及生物、景观和生态等特征）发生显著变化，而且可能产生空间位置的变动。干旱的气候、丰富的沙源、裸露的地面、起沙风的作用是地质历史时期和人类历史时期新疆约43.30万 km^2 沙漠和沙漠化土地形成的先决条件。人类活动的干扰则是最近数千年来新疆沙漠化发生发展的一个极其重要的促进因素。新疆的气候是典型的温带干燥大陆性气候，由于深处内陆，加之山盆相间的地貌格局相对封闭，在其165万 km^2 的国土中，有88.7%属于干旱和半干旱区，绝大多数平原和沙漠区域的干燥度都在4以上，塔里木盆地、吐哈盆地及东疆东北部的不少

区域在 32 以上, 塔克拉玛干沙漠腹地 64 以上, 而吐鲁番盆地则达 100 以上。

北疆西北部、东疆和南疆东部是大风高值区。阿拉山口年大风日达 165 天, 最大风速达 55m/s。起沙风日数 (按 $\geq 6\text{m/s}$ 计), 塔里木盆地一般在 30 天以上, 盆地中西部多在 50 天以上, 南部达 90~110 天; 北疆和东疆一般在 20 天以下; 准噶尔盆地南缘的精河到乌苏以东、玛纳斯河下游和哈密盆地东部, 多在 20 天以上, 最高达 50~60 天。

1.2 风沙分布特征

1.2.1 历史强风时空分布特征

空间分布上, 统计过去 3 年有多少日出现过大风、大风持续最长时间 (h) 及其对应的时段, 得到表 1-1。结合大风情况和新疆地区国家观测站分布可知, 过去 3 年, 处于北疆的大风日数多于南疆以及天山山脉附近。其中, 十三间房出现大风日数最多, 有 278 天, 且大风天气最长持续了 108h。吉木乃和淖毛湖在 3 年内只出现过一次大风天, 且持续时间不足 1h。

表 1-1 气象站大风信息表

站名	大风日数(天)	最长持续时间(h)	最长持续时间(年月日)	经纬度
吉木乃	4			85.866 7° E, 47.433 3° N
福海	6	3	2015033011~2015033014	87.466 7° E, 47.116 7° N
阿克达拉	1	2	2016030306~2016030307	87.966 7° E, 47.1° N
和布克塞尔	14	11	2015100505~2015100515	85.716 7° E, 46.783 3° N
阿拉山口	27	9	2014112423~20141102507	82.566 7° E, 45.183 3° N
淖毛湖	1			94.983 3° E, 43.75° N
十三间房	278	108	2016072909~2016080313	91.733 3° E, 43.216 7° N
巴音布鲁克	2	2	2014052011~2014052012/ 2014053021~2014053022	84.15° E, 43.033 3° N
托克逊	4	2	20160030302~2016030303 2016042405~2016042406	88.6° E, 42.766 7° N
轮台	1	3	2014042303~2014042305	84.266 7° E, 41.816 7° N
吐尔尕特	1	3	2014120714~2014120416	75.4° E, 40.516 7° N
喀什	4	2	2014042219~2014042220 2014052205~2014042206	75.75° E, 39, 4833° N

注 表格中未填写数据之处表示最长持续时间不足 1h。



时间分布上,如图 1-1 大风天气出现频次季变化特征显示,北疆大风多出现在春季,尤以 3 月份居多,而南疆大风多出现在春末夏初 4~6 月。由图 1-2 大

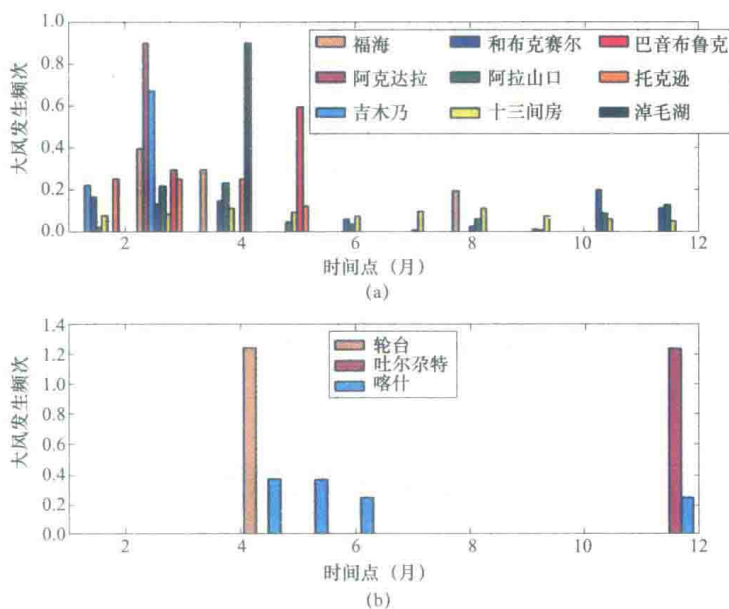


图 1-1 大风天气出现频次季变化

(a) 北疆不同月份大风天气出现频次; (b) 南疆不同月份大风天气出现频次

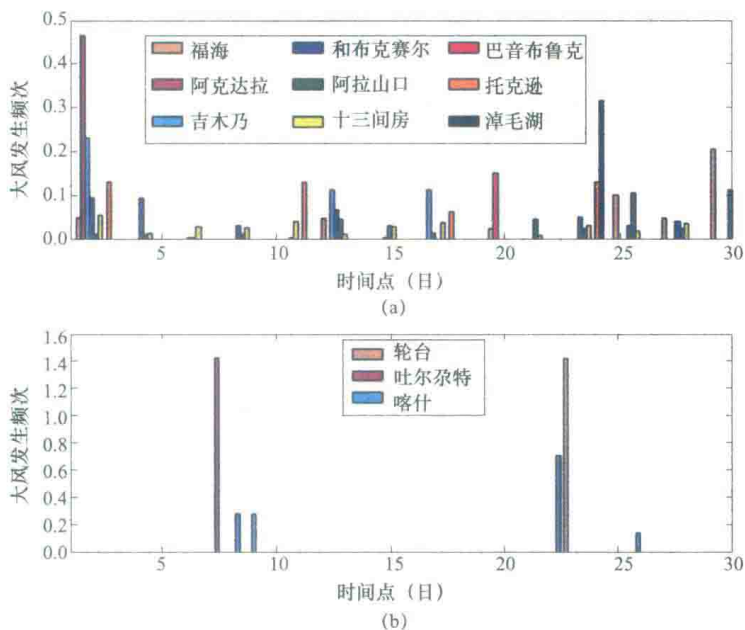


图 1-2 大风天气出现频次月变化

(a) 北疆不同日大风天气出现频次; (b) 南疆不同日大风天气出现频次

风天气出现频次月变化可见，过去三年内，北疆大风多出现在 1~3 日、10~14 日、25 日前后，南疆大风主要出现在 7 日和 23 日左右。由图 1-3 所示的大风天气出现频次日变化可见，北疆大风主要出现在 9 点~13 点，南疆大风出现频次较均匀，无明显时间变化。

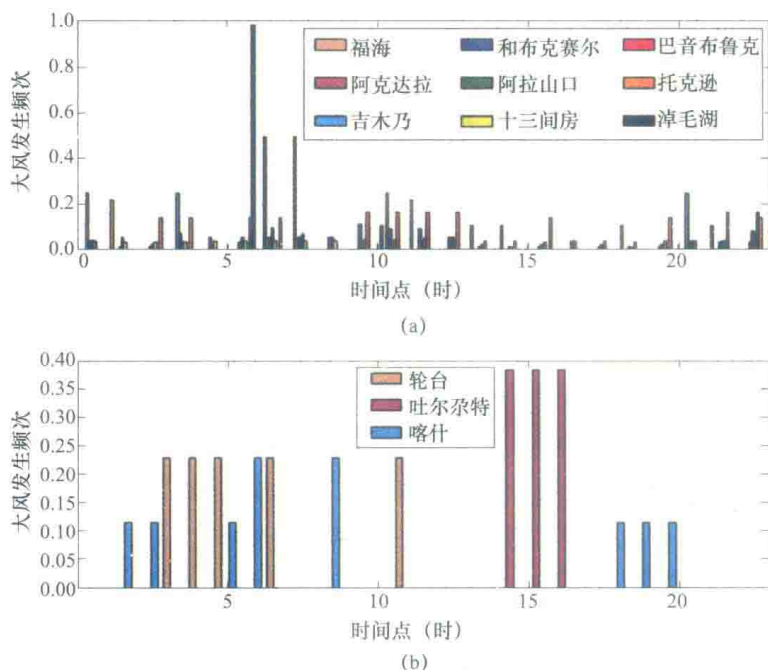


图 1-3 大风天气出现频次日变化

(a) 北疆不同时间点大风天气出现频次；(b) 南疆不同时间点大风天气出现频次
北疆站点为图 1-5 中紫色十字，南疆站点为图 1-5 中红色十字

1.2.2 历史沙尘时空分布特征

从全疆地区来看，如图 1-4 所示，普通沙尘的时间分布均匀无明显时间特征。强沙尘主要发生在 10~12 月，尤其在月末和夜间出现频率较高。特强沙尘主要发生在 10 月中旬到 12 月，月频率高值在 26 号至次月 3 号期间，日发生频率高值在 19 时至翌日凌晨 4 时。从南、北疆的空间分布上来看，北疆普通沙尘多发生在 12 月至第二年 1 月，日发生频率高值在凌晨 0~2 时，月频率高值在 4 日和 30 日左右，如图 1-5 所示；南疆普通沙尘多发生在 12 月和 4 月，高发时段为凌晨和傍晚，如图 1-6 所示。北疆强沙尘多发生在 12 月，月频率高值在 30 日左右，高发

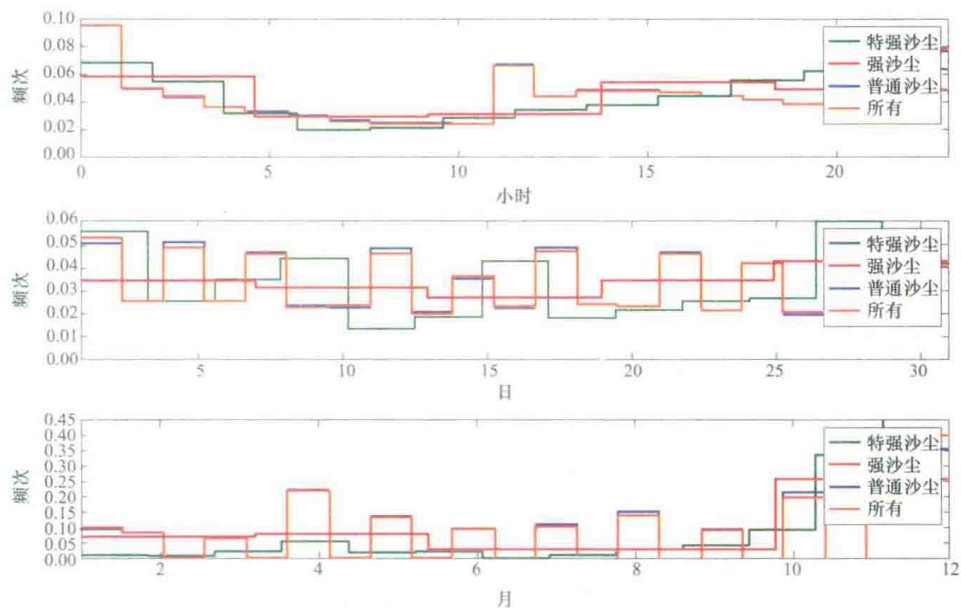


图 1-4 全疆沙尘天气出现频次时间分布

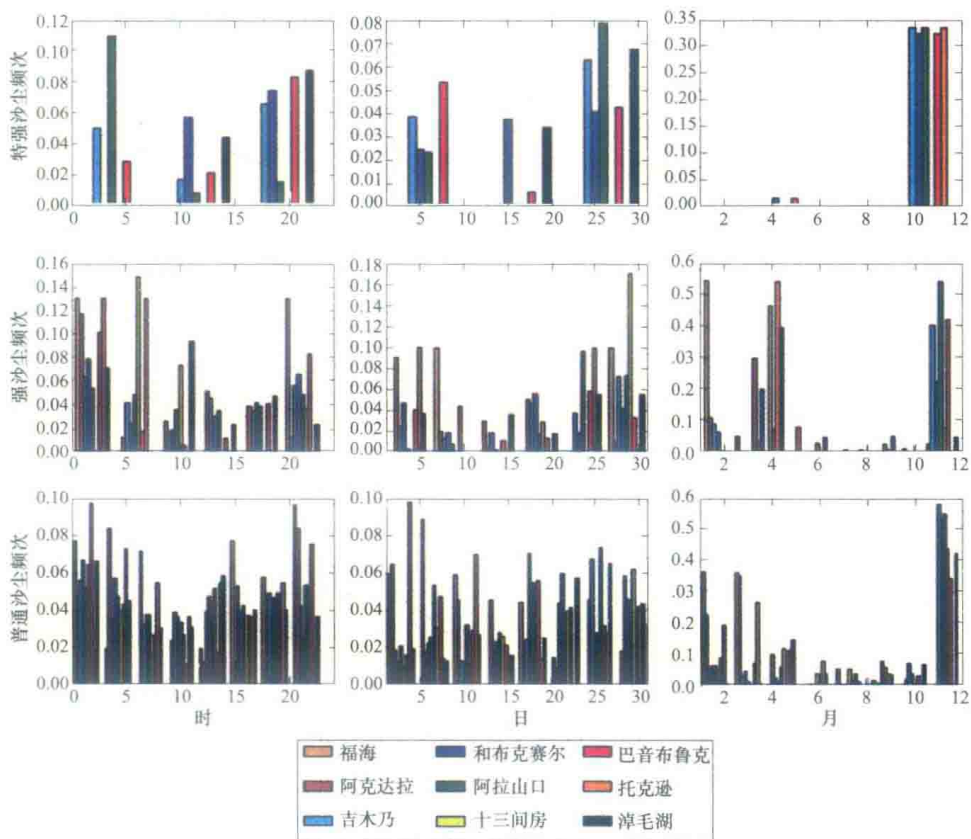


图 1-5 北疆不同等级类型沙尘出现频次

时段为凌晨和 20 时以后；南疆强沙尘多发生在 4 月，月频率高值区在 28 号至次月 5 号，高发时段与北疆相似。北疆特强沙尘主要发生在 11 月左右，月频率高值在 26 号和 6 号前后，高发时段为 5 时、10 时、20 时前后；南疆特强沙尘主要发生在 4 月和 11 月左右，月发生率高值在 6 日和 26 日左右，高发时段为 4 点、14 点和 20 点前后。

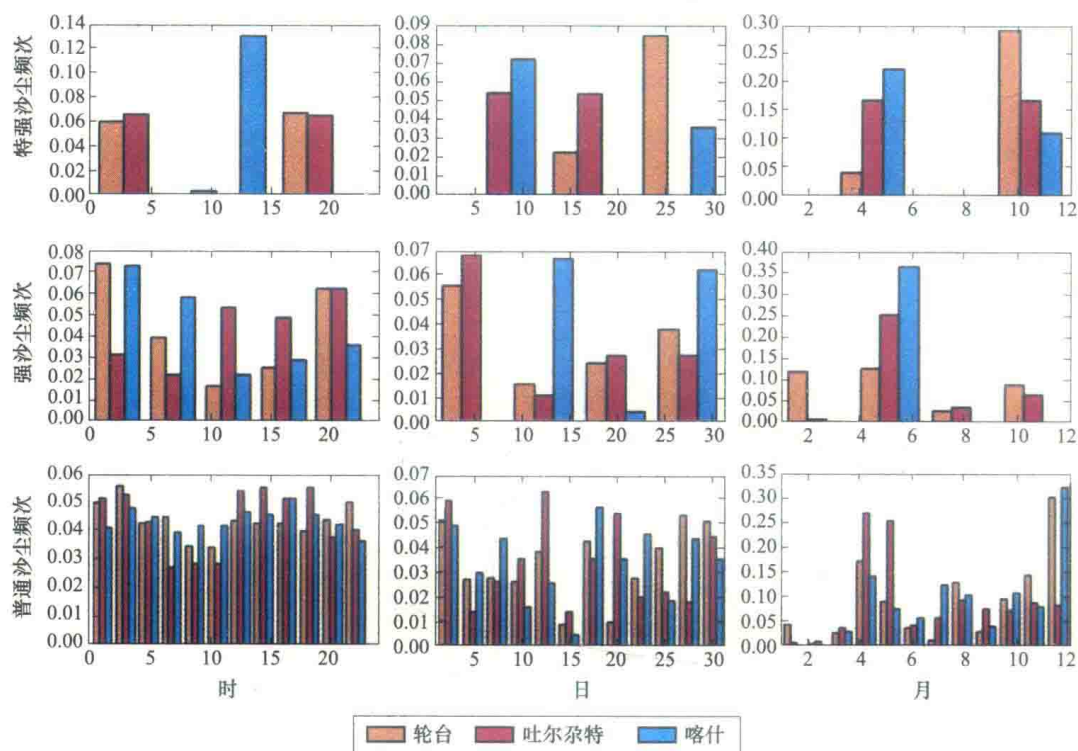


图 1-6 南疆不同等级类型沙尘出现频次

1.2.3 强风沙尘天气相关性分析

对大风天气和沙尘天气对比发现，过去 3 年在北疆基本呈现大风高发季节沙尘天气减少的现象：北疆沙尘天气都主要发生在冬季到第二年年初，而大风多发生在 3 月，在此期间沙尘天气很少出现，此后 4、5 月重新发生沙尘天气，直到 10 月初沙尘天气出现频率明显降低，如图 1-7 所示；而南疆大风与沙尘天气基本同时出现，5 月和 12 月前后均为大风和沙尘多发月份，如图 1-8 所示。此外，北疆大风多发日与强、特强沙尘天气有较好的对应关系，大风日沙尘天气发生时



间很接近；南疆则无明显相关性。从日变化来看，北疆大风日发生频率比较均匀，高值区在中午，而沙尘天气在中午这段时间要比早上和傍晚发生的频率小一些，南疆大风天气和沙尘天气基本同时出现，但是随着大风天气的持续，沙尘情况逐渐减小，这种关系在上午时段比较明显。总体上发现，大风天气与沙尘天气基本上相伴相生，当日大风持续时间长时，该地区强和特强沙尘现象在大风结束时有所缓解。

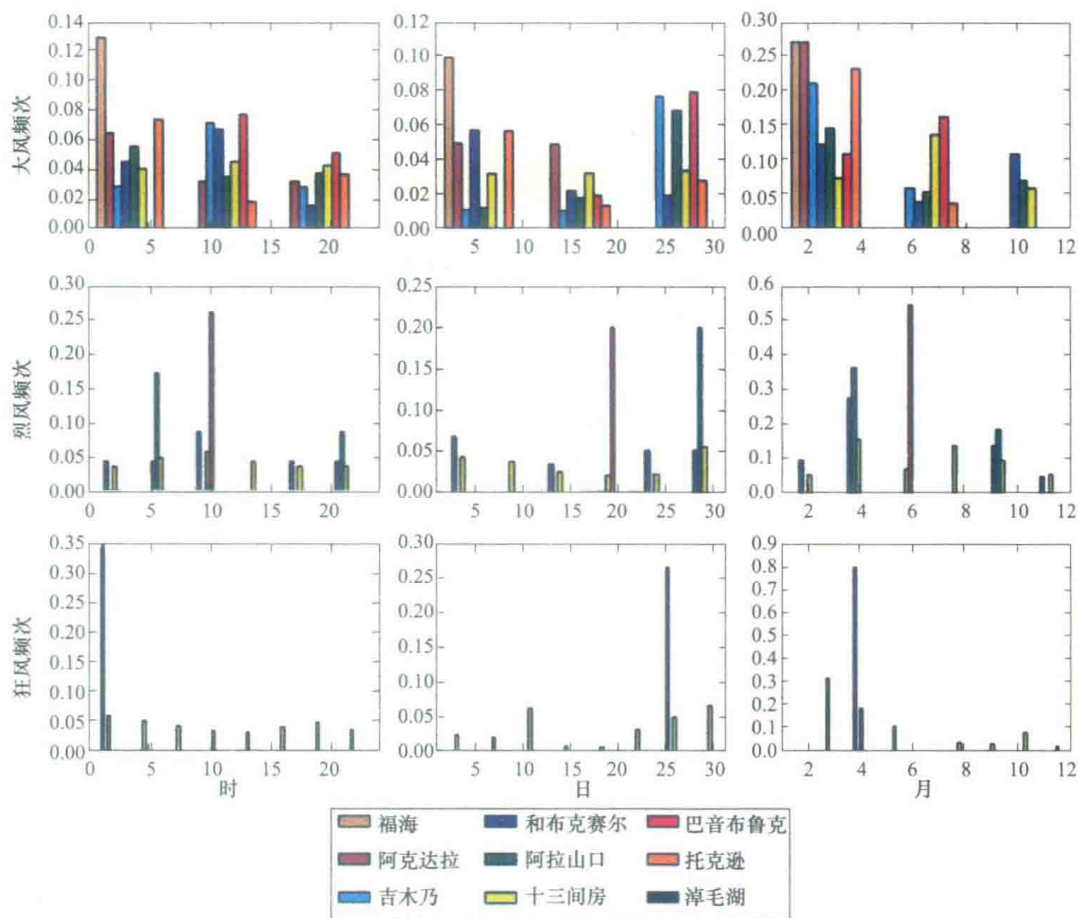


图 1-7 北疆不同强度等级风速出现频率

由大风强度和沙尘类型相关分析看出：烈风以上程度的风更容易诱发强沙尘，反而对特强沙尘有减少的作用。可能原因是在风速极大时，局部地区沙尘被快速带到其他地方。而大风和普通沙尘在季节变化上相吻合，大风频发的 2、4、12 月也正是普通沙尘频发的时间段。月变化和日变化上，大风与特强沙尘的变化图

吻合度较高于狂风，吻合度最低为烈风。进一步表明烈风以上程度风有利于沙尘迁移，而大风有利于沙尘天气在局部地区的逗留。

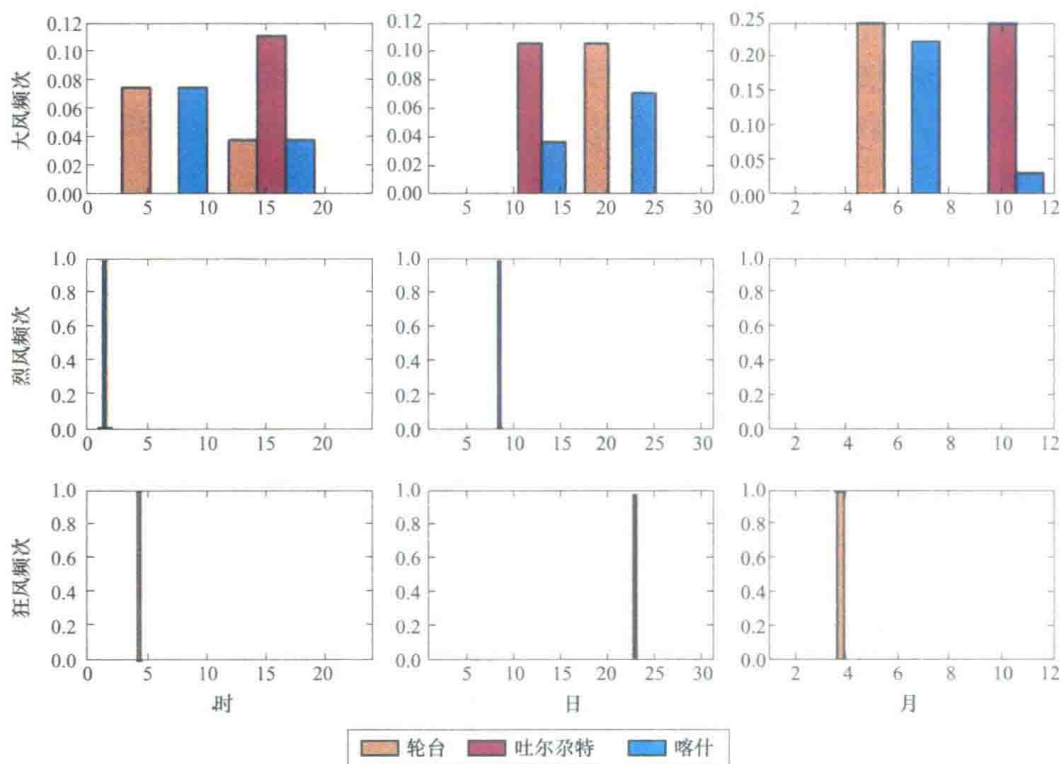


图 1-8 南疆不同强度等级风速出现频率

1.3 主要危害

从风害对输变电工程的影响类型来看，主要包括风偏跳闸、绝缘子和金具损坏、导地线断股和断线、杆塔损坏和变电站构架避雷器变形五大类。

1.3.1 风偏跳闸

风偏跳闸是输电线路风害的最常见类型，主要是指导线在风的作用下发生偏摆后由于电气间隙距离不足导致放电跳闸。风偏跳闸的本质原因是在外界各种不利的条件下，导线—杆塔空气间隙电气强度不足以承受系统运行电压所致。风偏跳闸的主要原因为：设计对恶劣气象条件的估计不足；局地强风是导致线路放电的直接原因；暴雨导致空气间隙的击穿电压降低。