

[输电线路]

基于DEM的输电线路典型易覆冰微地形分类方法研究

文/杨晓瑞 曾岁康
四川电力设计咨询有限责任公司

局部微地形特征会导致在冬季区域气象特征突变，形成严重的覆冰灾害，从而危及输电线路安全运行，这种区域称为易覆冰微地形区。利用DEM结合改进的流域分割方法在云南省巧家县开展区域易覆冰微地形分类算法研究，其分析结果为电力工程中的抗冰设计、防冰措施规划及覆冰监测等应用提供重要的地形数据支持。

我国是世界上冰雪灾害严重的国家之一，而输电线路安全运行一直受到覆冰影响。通常局部地区的微小地形特征会导致在小范围内气象特征产生突变，某些气象因素可能会显著增强，导致覆冰程度急剧增加，进而威胁到输电线路的安全运行。这类地形特征被称为易覆冰微地形。大型水电送出输电线路通常跨越地形和气候恶劣的高原山区，再加上部分地区冬季极端天气条件的出现，极易导致电力线路覆冰过载，引发大量断股、断线和倒塔事故和灾害。

近年来，随着GIS技术的应用和普及，采用高准确度DEM数据为基础，流域及宏观气象为辅助的微地形划分方式逐步被应用到输电线路工程勘察设计、覆冰巡检运维的领域中。截至目前，众多学者针对地形分类和微地形造成输电线路覆冰进行大量的分析和研究，周访滨等^[2]、张晓炯等^[3]、王文娟等^[4]分别采用神经网络、随机森林和地表流水物理模拟等算法进行地形特征分类，能够较好地提取山脊、山谷、山麓和山顶点等地形特征，但这种单纯的地理学角度采用地形特征分类的方法难以应用于电网输电线路覆冰研究。在吴国强等^[5]、马小敏等^[6]的研究中首次引入微地形因子，并用支持向量

机等模型算法分析覆冰与微地形因子、微气象因子之间的关系，提取覆冰预测、覆冰等级判别模型，得到较好的覆冰预测准确度，并成功应用实践。赵栋等^[7]、何相奎等^[1]和康基伟等^[8]众多学者在具体的电网工程对输电线路重冰区微地形微气象特征进行分析，概括性地提出几种造成线路严重覆冰的典型微地形微气象类型：垭口、低温、高温叠加型微地形微气象区；地势抬升、低温、水源叠加型；水汽增大、平原/风口、低温叠加型。综上所述，现阶段对电网覆冰微地形的分析主要停留在定性评价研究，而在地理信息领域的地形分类方法则没有有效结合覆冰背景进行分类。因此，迫切需要进行电网易覆冰微地形分类方法研究，识别典型易覆冰微地形区输电线路，有效进行电网的防冰设施部署等研究。

本文旨在开发一种针对易覆冰微地形的分类算法，以更好地理解 and 划分不同类型的易覆冰微地形，研究聚焦于云南省巧家县。通过数字高程模型和GIS算法提供高效、大尺度区域识别输电线路易覆冰微地形的的方法，为提高冬季输电线路覆冰巡检效率、依据微地形识别覆冰钢铁制定针对性的防冰融冰方案提供资料参考。

研究区与数据源

1. 研究区概况

本文选取云南省巧家县作为研究区，如图1所示。巧家县位于云南东北部、昭通市西南部，地处云贵川交界、长江流域上游地区，四周河流众多，有白鹤滩等大型水电站，是我国西电东送的重点区段。巧家县山地地形覆盖面积广，四周河流和湖泊较多，微地形微气象特征极为明显，冬季极易形成水汽在微地形区聚集。由图1b所示巧家县大部分区域位于30 mm及以上线路重冰区，是电网冬季覆冰巡检、运维的重点区域。根据历史覆冰故障资料统计，2008年至今，巧家县及其周边区域输电线路屡次因覆冰造成线路跳闸、倒塔等事故。

2. 数据源

数字高程模型（Digital Elevation Model，

DEM）是地表形态的数字化表达，因其具有简单的结构，可快速、方便获取，已被广泛应用于水文气象、地质灾害等方面的研究。截至目前，国内外诸多机构均发布了多种覆盖全球范围的DEM数据，包括SRTM（Shuttle Radar Topography Mission）、ASTER GDEM、GTOPO30等。SRTM DEM包括SRTM1和SRTM3两种产品，分别对应分辨率30 m和90 m数据。本文采用的是STRM3 DEM数据，可在地理空间数据云（<http://www.gscloud.cn/>）中免费获取下载，其在昭通市巧家县的DEM高程分布见图1。

此外，本文还收集研究区内风向数据、电网30年一遇覆冰等级（见图1b）以及某条110 kV输电线路数据。

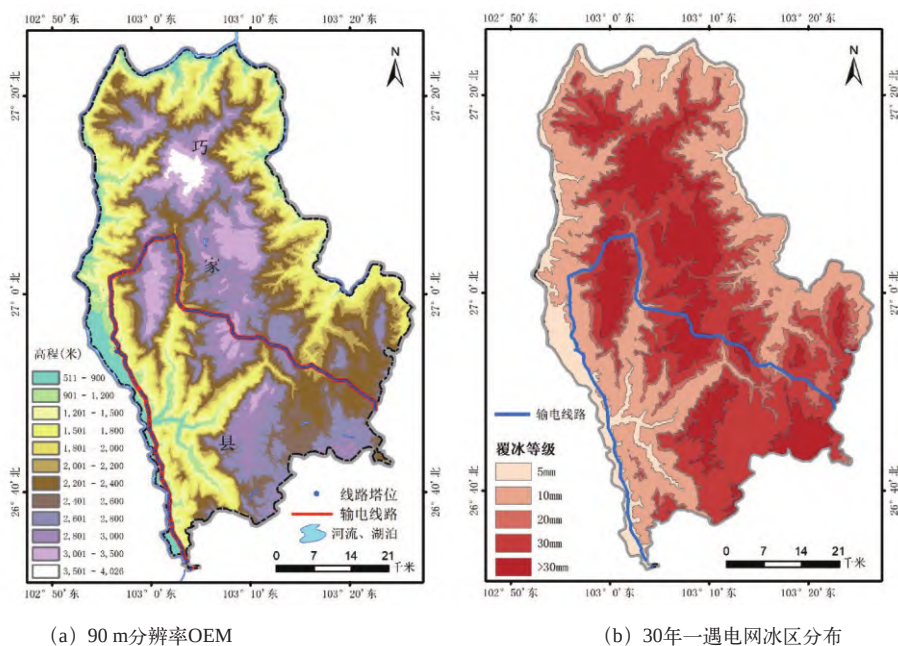


图1 研究区高程及冰区分布概况

易覆冰微地形分类与提取算法研究

1. 易覆冰微地形特征

根据文献调研和电网多年输电线路覆冰巡检以及实际运行经验，本文将区域电网输电线路易覆冰微地形分成6类并研究各个地形的提取方法。

(1) 山脊

山脊是流域分水岭。山脊是由两个坡向相反且坡度不同的斜坡相交而形成的条形、脊状延伸的凸

起地形，是分隔两个流域的山岭或高地，山脊为流域内局部海拔最高点，在山的顶部具有风速流畅，风速偏大的风特性，是高海拔山地冷暖气流交汇地带，水汽辐合增大现象明显。主要覆冰类型为雨雾凇混合冻结、雾凇。

(2) 山谷

山谷是流域汇水区。通常在山谷地形区由于河流冲刷形成峡谷和局部风道，冬季受到寒潮影响，

具有风速流畅、风速较周边明显偏大且处在适宜覆冰快速增长的风速范围的风特性，主要覆冰类型为雨凇、雨雾凇混合冻结。

(3) 垭口

垭口指两山间的狭窄地方，即连续山梁的一块平坦且相对较低的位置，或高大山脊的鞍状坳口，如图2所示。主要地形和气象特征为：海拔500 m以上，坳口处地面垂直尺度相对高差50 m以上。容易形成雨雾凇混合冻结、雾凇，具有风速流畅、风速较周边明显增大且处在适宜覆冰快速增长的风速范围的风特性，云雾滞留频繁、时间长、水汽辐合增大现象明显。

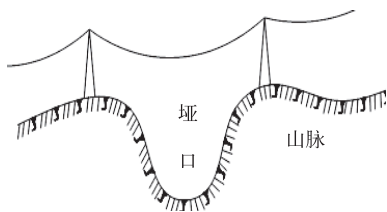


图2 垭口地形特征

(4) 迎风坡与背风坡

本文主要考虑迎风坡地形划分方法，在山地区域，可设定除去山谷、山脊和垭口地形以外的区域为山坡地形，则迎风坡和背风坡是在山坡区域内坡向与区域冬季主风向相迎或相背的栅格单元，地形特征如图3所示。在迎风坡区，由于地势落差和地形抬升影响，迎风坡由下至上风速逐渐加强，云雾易滞留堆积、局部水汽辐合增大及“腰凌”现象突出，主要覆冰类型为雨雾凇混合冻结、雾凇。

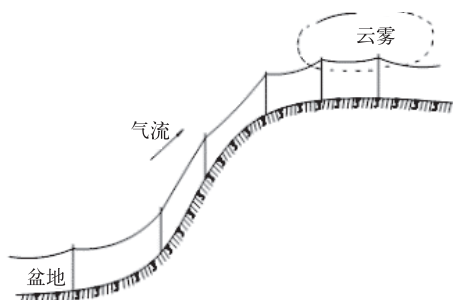


图3 迎风坡地形特征

(5) 水汽上行区

本文中提出水汽上行区微地形的概念：定义位于大型水体缓冲区范围内且属于迎风坡地形的区域为水汽上行区。地形特征如图4所示。水汽上行区与山坡地形密切相关，通常在大型水库、湖泊和河

流附近容易造成水汽聚集，在风场和地形的配合作用下极易导致输电线路覆冰，因此在进行微地形的划分必须考虑区域水体的影响。



图4 水汽上行区地形特征

2. 基于GIS的易覆冰微地形提取方法

提取区域微地形和地形特征提取的常用方法有：基于图像处理的方法、基于地形几何分析方法和基于地表流水物理模拟方法等。地表流水物理模型方法采用的是基于GIS提取流域的思想，提出山脊、山谷地形的提取等价于提取流域的分水岭和汇水区。本文在该方法上对提取算法进行改进，通过引入遥感影像、冬季风向，采用GIS技术进一步提出迎风坡、背风坡、垭口地形划分方法。特别地，输电线路覆冰通常与附近大型河流、湖泊在冬季形成的聚集水汽密切相关，为丰富电网覆冰微地形划分类型，提出了水汽上行区地形的概念和提取算法。

对于山脊、山谷和垭口地形提取，本文基于规则格网DEM进行地表汇流累积量计算，通过提取零值汇流累积量值区域即得到流域分水岭，也即山脊地形。山谷实质上是流域的汇水区，山谷地形的识别原理与山脊相同，通过对原始DEM数据进行倒置，得到反地形DEM，那么水流方向将变得完全相反，水流流入的变成流出，流出的变成流入，这样就可以用求山脊地形的方法求出山谷线。垭口地形的主要特征是其位置通常集中在山顶点、山谷点，以及山脊线和山谷线构成的特征线交汇处，因而，可以认为垭口位于山脊上相对汇水的区域。特别地，DEM数据生成过程中，由于地形阴影等因素的影像，容易形成地形伪洼地。本文引入卫星遥感影像识别DEM中的真实洼地和伪洼地，在对DEM进行洼地填充过程中更有效地对真实洼地进行填充处理，三种地形的GIS提取算法流程如图5所示。

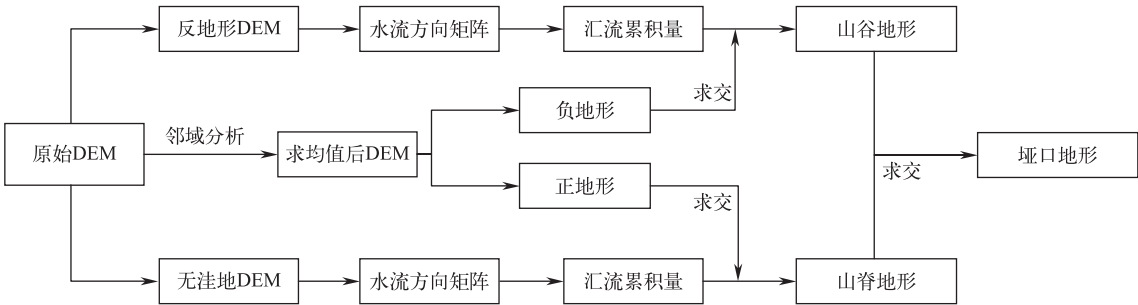


图5 基于GIS的山谷与山脊地形提取方法

除山脊、山谷和垭口地形外的区域为山坡区域，在进行山坡地形的迎风坡与背风坡识别时，可借助邻近气象站的冬季风向数据以及山坡自身坡向信息来精准划分。具体操作流程如下：首先，精准提取出每一个待识别的山坡单元，随后循环计算各山坡单元的坡向数值。针对每一个待区分的山坡单元，在地理数据库中迅速定位并搜索与之位置最为邻近的气象站，调取该气象站的多年冬季平均风向

数据，将其作为关键参照指标。第二步，展开坡向与冬季风向的细致比对工作。当某一山坡单元的坡向和对应邻近气象站的冬季风向夹角处于 $30^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 区间时，该山坡单元便被划定为迎风坡；倘若二者夹角不在此范围之内，那么该山坡单元则被判定为背风坡。这种利用风向与坡向夹角判定山坡地形的方法，能够直观且高效地区分区域内的迎风、背风坡面，其识别流程示意如图6所示。

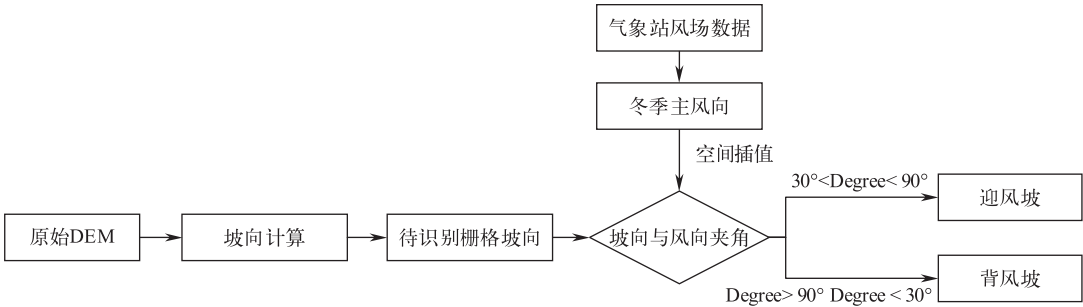


图6 迎风坡与背风坡地形识别流程

地区的水汽上升区域与山地地形紧密相连，尤其在大规模水库、湖泊及河流流经的地带，大气中的水汽含量相对较高，易于在空中积聚。在风力与

地形因素的共同作用下，这样的条件极易诱发输电线路结冰现象。本文对水汽上行区的提取方法如图7所示。

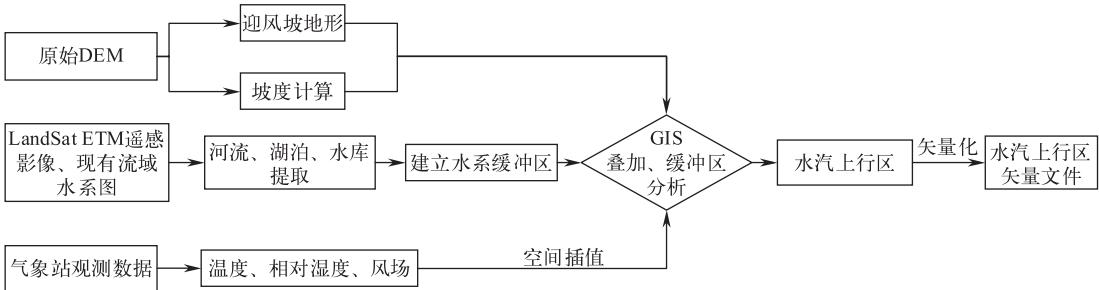


图7 基于GIS的水汽上行区地形提取方法

识别水汽上行区需要提取准确的水体边界，由于大型水库、湖泊及河流的建造以及枯水季节会造成水域面积变化。卫星遥感的实时数据获取和

大范围对地观测能够很好地监测和反映真实水体变化，因此本文采用近实时Landsat8 OLI多光谱遥感影像数据来进行水体边界提取，通过卫星影像计算

改进归一化差异水体指数 (Modified Normalized Difference Water Index, MNDWI) 可以获取水体覆盖范围, 计算公式如公式 (1) 所示, 然后基于MNDWI指数进行阈值分割划分出水体和非水体边界。

$$MNDWI = \frac{Green - MIR}{Green + MIR} \quad (1)$$

式中, Green为遥感影像的绿光波段; MIR为中红外波段, 在Landsat 8影像中分别为第3和第5波段。

对提取的水域面积进行缓冲区分析, 考虑不同

面积大小的水域对周边区域大气水汽的影响有较大的差异, 本文通过计算单个水域面积大小来定义该水域的缓冲距离, 对于大于10 km²的水域采用10 km缓冲区分析, 对10 km²以内的水域, 采用该面积大小的公里数作为缓冲距离。最后, 将水体缓冲区与迎风坡地形区进行栅格叠置分析, 求取交叉栅格单元, 确定每个待分山坡单元的微地形类型。

基于以上各类微地形的特征和GIS提取技术方法, 同时引入电网覆冰等级分布图, 本文对6种易覆冰微地形分类算法建模过程如图8所示。

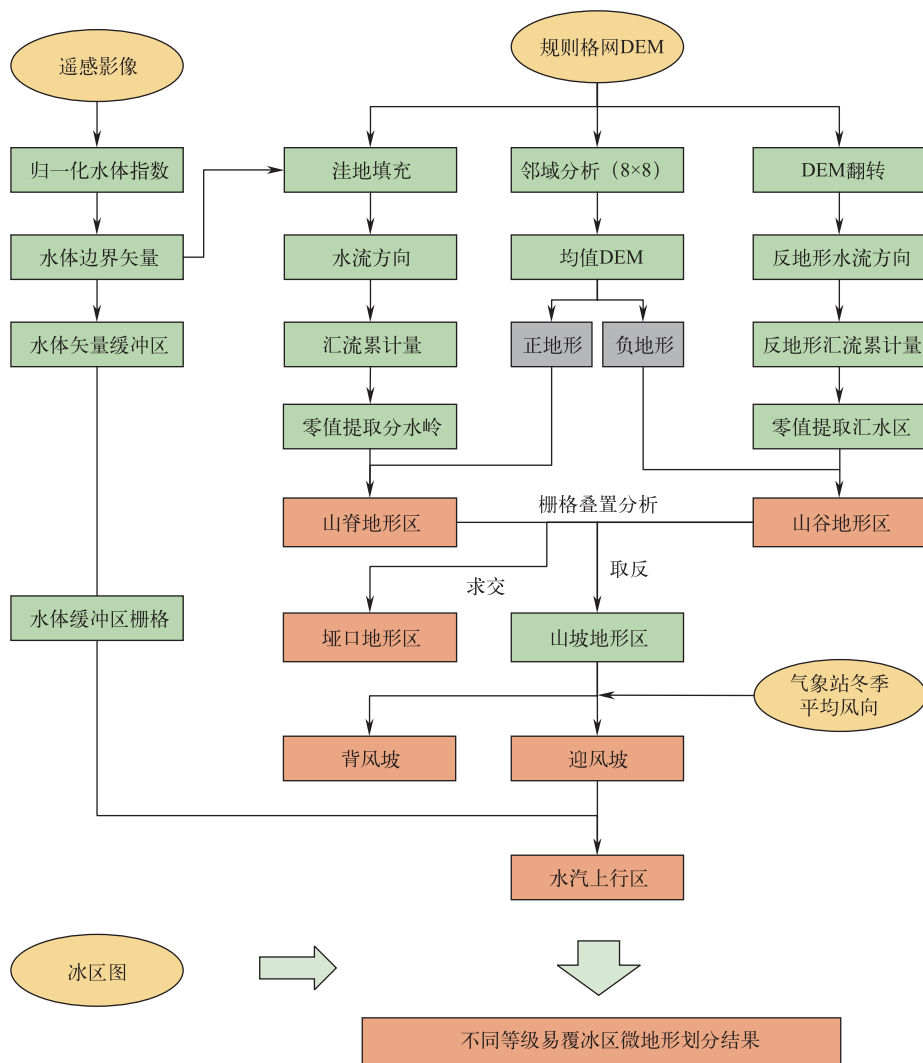


图8 输电线路易覆冰微地形分类算法建模技术流程

实验结果与分析

1. 易覆冰微地形分类提取结果分析

对基于DEM提取微地形的算法过程进行较多的改进, 并尝试在不同地形区选择了不同的阈值划

分, 提取准确度较好, 能够较好地识别复杂地形区域的山脊、山谷和迎风坡等地形类型。基于图8所示电网易覆冰微地形分类算法建模过程, 将研究区内的易覆冰等级分布与6种地形划分结果进行空

间分析，对研究区域进行细致的微地形分类，针对10 mm、20 mm及30 mm以上不同覆冰风险，绘制微地形分布图，具体结果展示在图9中。所采用的分类

方法有效地区分了不同覆冰程度下的微地形特征，较好地揭示了山脊、山谷、迎风坡以及水汽易积聚区等冬季易导致输电线路覆冰的关键地形分布规律。

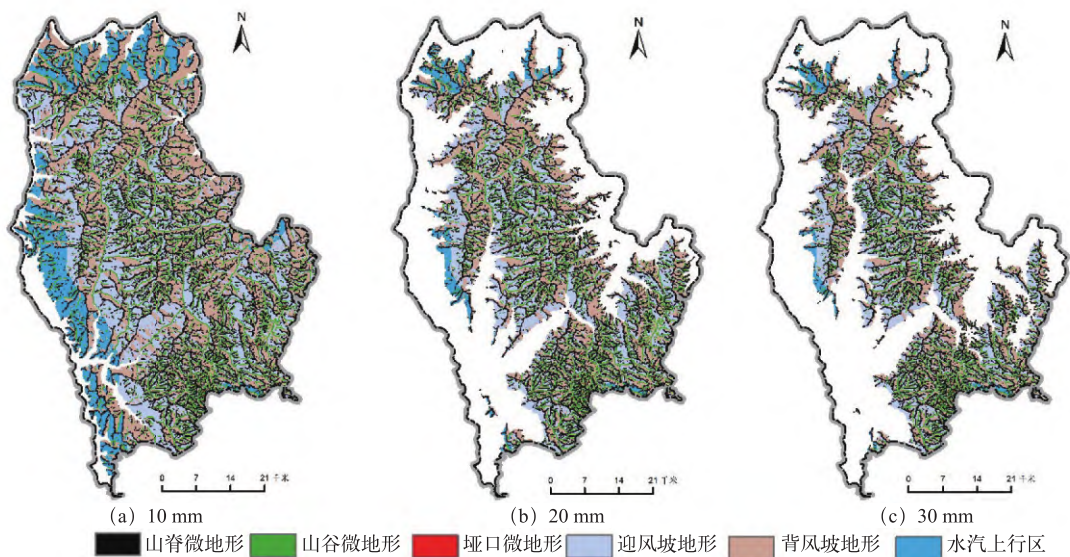


图9 云南省巧家县不同易覆冰等级微地形分类结果

2. 微地形分类结果精度分析

基于上述结果，选择了4个区域作为验证区，验证区的分布如图10左所示。首先，根据图1所示DEM分布计算4个验证区的等高线分布，并叠加易覆冰微地形的分类结果（见图10a~d），根据验证区a~d的分类结果分析可知，该分类算法能够较好地识别大尺度范围内的山脊、山谷、迎风坡、背

风坡、水汽上行区和垭口微地形，特别是对易覆冰山脊、山谷的区分较好。该算法能够识别区域内明显的垭口地形，但存在将低海拔、小区域的鞍部地形识别为垭口。此外，本算法能够较好地识别山坡地形，但在对山坡区域的迎风坡和背风坡地形划分上，本文选择的是山坡区域最邻近气象站冬季平均风向作为判定依据，其识别准确性依赖于区域内气

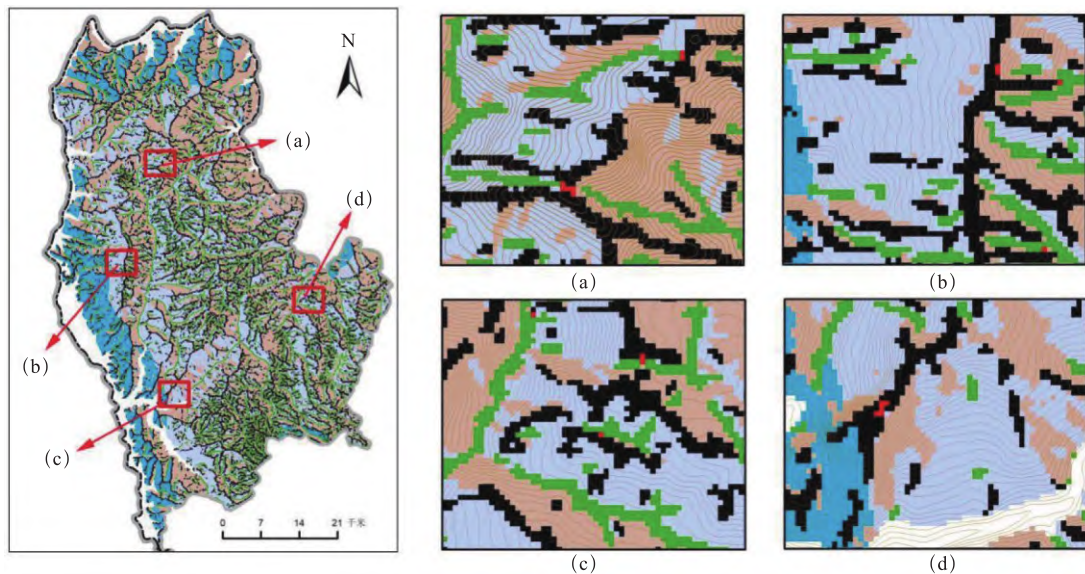


图10 微地形划分结果在研究区内4个验证区叠加地形等高线结果

象站的监测准确度和密度。山坡区域里气象站分布越近，冬季平均风向计算越准确，其迎风坡和背风坡识别准确度高。

为了定量分析分类算法提取易覆冰微地形的准确度，高效、准确地提取复杂地形区输电线路塔位所处易覆冰微地形区，本文选择图1中所分布的输电线路塔位（共计340基塔位点）进行易覆冰微地形分类准确度的验证。首先，本文根据等高线地形图对每个输电线路铁塔进行微地形的人工经验判定，然后基于输电线路塔位矢量数据与上述算法提取的易覆冰微地形结果进行叠加分析，获取每个输电线路塔位的算法识别微地形类型，从而对人工判定结果与算法提取结果进行对比分析，并计算混淆矩阵（见图5）和相应的分类准确度指标。

由图11所示的输电线路塔位区域的易覆冰微地形分类准确度混淆矩阵可知，该分类算法能够较好地提取山脊、山谷、迎风坡、背风坡和水汽上行区地形，算法分类结果对比人工判定结果的整体分类准确率为91.15%。垭口地形区由于识别点位较少，仍需要进一步验证。该算法对于山脊和山谷地形的区分较好，部分山脊地形与山坡地形（迎风坡、背风坡）较难区分。这些区域大多分布在山脊与山坡地形的分界线区域，这与分类算法所选择的阈值以及DEM分辨率的不同均存在依赖关系，不同区域地形特征差异明显，在算法应用过程中应该恰当的选择DEM分辨率和分类阈值。

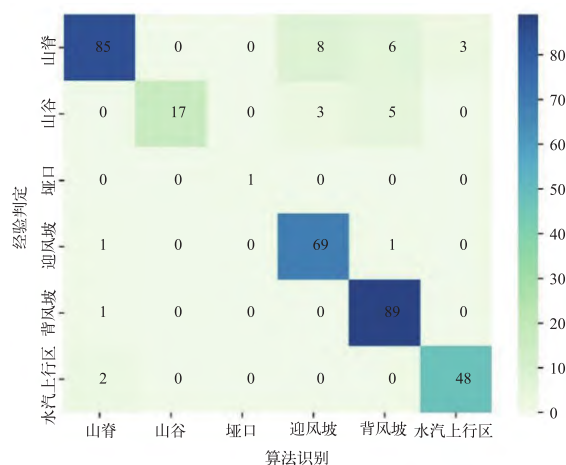


图11 易覆冰微地形分类算法精度混淆矩阵

结束语

本文以云南省巧家县为研究区域，基于栅格DEM开展输电线路易覆冰微地形分类算法研究，结论如下。

1) 在基于流域分割算法的基础上进行了山脊、山谷、垭口、迎风坡和背风坡地形的划分，并对算法进行改进，通过引入遥感影像识别水体边界，改进洼地填充算法，并进行水汽上行区地形的划分，在巧家县的整体识别准确率达到90%以上。

2) 大型水域附近山坡区域由于地形抬升，在冬季极易形成聚集水汽，是造成线路覆冰的重冰区，本文在其他地形分类的基础上提出水汽上行区地形的概念及其识别方法，有效识别存在水汽增大和聚集的典型易覆冰微地形。EA

（收稿日期：2025-01-13）

参考文献

- [1] 何相奎，孔韬，董能伦，等．几种典型的微地形微气象区对输电线路的影响．湖北电力，2020，44(2)：33-38．
- [2] 周访滨，邹联华，张晓炯，等．栅格DEM微地形分类的BP神经网络法．测绘通报，2019(10)：101-104．
- [3] 张晓炯，郭云开，周访滨，等．基于随机森林的栅格DEM微地形分类方法．测绘与空间地理信息，2019，42(10)：107-109．
- [4] 王文娟．规则格网DEM的地形特征线提取研究[D]．西安：长安大学，2018．
- [5] 吴国强，郭新春．基于支持向量机的区域覆冰模型．电力勘测设计，2019，31(A01)：6．
- [6] 马小敏，高剑，吴驰，等．基于灰色支持向量机的输电线路覆冰厚度预测模型．中国电力，2016，49(11)：5．
- [7] 赵栋，刘亚峰，穆红文，等．甘肃陇南某输电线路覆冰事故微地形影响分析．电力勘测设计，2016(S2)：183-186．
- [8] 康基伟．微地形和小气候区线路覆冰影响因素分析及工程实例．郑州大学学报(工学版)，2013，34(1)：103-107．