

基于山脊线提取的山地风电选址及自动布机研究

彭 莉, 仇 欣

(中国电建集团 成都勘测设计研究院有限公司, 成都 610072)

摘要:针对山地风电场宏观选址和风电机组自动排布方法及流程进行研究, 总结分析风电场宏观选址的一般方法及流程, 针对山地风电场的特点, 提出一种基于山脊线提取的山地风电选址及自动布机方法。该方法结合地理信息技术, 以风能资源数据和地形数据为基础, 初选出山地风电场范围; 利用空间分析工具进行用地分析, 剔除范围内不能用于场址建设的限制性因素, 从而筛选出适宜的山区开发用地; 利用分水岭特征进行山脊线提取, 并考虑设备选型、排布策略和风能密度图谱实现山地风电场风电机组的自动排布。

关键词:山地风电场; 宏观选址; 空间分析; 山脊线; 自动布机

中图分类号:TK89 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2022)01-0363-06

随着能源和环境问题的日益突出, 风能作为一种清洁的可再生能源日益受到众多国家的重视。但建设合适的风电场是一项复杂而长期的工程, 其中, 风电场宏观选址是风电项目建设的首要任务^[1], 其直接决定了风电场的投资与效益。控制一个场址经济潜力的主要因素之一是风能资源, 另外还要结合地形地貌、地质条件、交通运输、生态环保、通信、土地价格、工程投资、接网条件要求等因素进行经济和社会效益的综合评价, 最后确定最佳场址^[2]。

中国整体风能资源丰富, 根据中国气象局《中国风能资源储量估算》的研究成果, 中国风能资源丰富和较丰富的地区主要分布在两个大带里, 分别是沿海及其岛屿地丰富带和三北地区丰富带, 此外还有风资源相对较好的内陆风能丰富地区。内陆风能资源较好的地区多在山区, 风机机位集中在山脊线附近。

目前对于山地风场选址, 邓院昌等基于 SRTM 地形数据, 通过 ArcGIS 软件工具, 提取了已建成风电场的地形起伏度和坡度数据并进行统计分析, 提出了综合地形起伏度和坡度两个指标参数的地形适宜度参数^[3]。该团队进一步应用 GIS 技术对风电场交通条件进行了评价分析^[4], 同时基于遥感图像, 获取了中国已建成风电场的土地利用数据, 并进行统计了分析, 提出了土地利用评价方法^[5]。刘超群基于 GS 和 GIS 技术, 提出了一种综合风力因

子、地形地貌(坡度、地形起伏)和土地利用类型 3 种影响因子的山地风电场宏观选址综合适宜度评价方法^[6]。仲炜等^[7]总结了复杂地形区的风电场微观选址方法, 结合风能资源数据和地形数据, 利用 GIS 空间分析提取山脊线从而确定山顶点的方式进行了选址分析。李枫^[8]结合 ArcGIS 软件的水文分析等工具进行了山脊线的快速提取。

虽然国内外学者对山地风电场选址进行了众多研究, 并取得了一定进展, 但仍没有形成一种较为准确和完整快速的数字化判定方法用于山地风电场宏观选址。因此, 本文提出一种基于山脊线提取的山地风电选址及自动布机方法, 结合地理信息技术, 以风能资源数据和地形数据为基础, 初选出山地风电场范围; 利用空间分析工具进行用地分析, 剔除范围内不能用于场址建设的限制性因素, 从而筛选出适宜的山区开发用地。最后利用分水岭特征进行山脊线提取, 并考虑设备选型、排布策略和风能密度图谱从而实现山地风电场风电机组的自动排布。本文首先总结了风电场宏观选址的一般方法; 然后介绍了山地风电性选址及自动布机的方法; 最后通过实例项目对该方法和流程的合理性和可靠性进行了验证。

1 风电场宏观选址一般方法

1.1 基础资料的收集与整编

基础资料的收集与整编是风电场宏观规划工作的基础, 通过资料的收集了解待规划区域的基本

收稿日期: 2021-09-13

作者简介:彭莉(1990—), 女, 四川绵阳人, 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 工程师, 工学硕士, 研究方向为地理信息、数字流域、智慧能源。

情况,为后续规划的开展提供数据支撑。基础资料一般包括规划区域各主管部门的法律、法规文件,规划区域的规划现状,专项资料,普查资料,地形图,地质、交通、水文等资料。

1.2 风能资源分析

风能资源分析是风电场建设条件中最基本的条件,准确的风能资源分析是机组选型和风电机组布置的前提和基础。通过对现场采集的气象站或

测风塔测风数据,分析风能资源在时间上和空间上的代表性以及资源储量。对风能资源中风况分析,通过计算空气密度、平均风速、风功率密度、风向和风能玫瑰图、湍流强度、风切变、50 年一遇最大风速等参数指标进行评估。

根据不同高度的风速与风功率密度对风能资源划分等级,共分 7 级,3 级以上为优质风能资源,见表 1。

表 1 风功率密度等级

风功率密度等级	30 m 高度		50 m 高度		70 m 高度		应用于并网风力发电
	风功率密度/ (W/m ²)	年平均风速/ (m/s)	风功率密度/ (W/m ²)	年平均风速/ (m/s)	风功率密度/ (W/m ²)	年平均风速/ (m/s)	
1	<160	5.1	<200	5.6	<230	5.81	
2	160~240	5.9	200~300	6.4	230~345	6.73	
3	240~320	6.5	300~400	7.0	345~460	7.39	较好
4	320~400	7.0	400~500	7.5	460~575	7.92	好
5	400~480	7.4	500~600	8.0	575~690	8.45	很好
6	480~640	8.2	600~800	8.8	690~920	9.24	很好
7	64~1 600	11.0	800~2 000	11.9	920~2 300	12.41	很好

1.3 场址选择和开发条件评估

首先根据区域测风塔测风数据获取风能资源分布情况(年平均风速、风功率密度分布图),找出具有开发利用价值的区域,初步选定风电场场址。

收集初选风电场场址附近的土地利用规划、矿产资源分布、交通和城镇现状及规划资料,分析规划风电场场址与土地利用规划、矿产资源、交通和城镇现状及规划的关系,确定初选风电场的建设是否受土地利用规划、矿产资源、交通和城镇现状及规划的限制,确定初选风电场的场址范围。

收集初选风电场场址附近的环境保护、文物保护、军事保护、寺庙民俗等敏感区(点)资料,分析该规划风电场场址内是否可以兴建风电场,以及兴建风电场对敏感区(点)的影响程度,确定该风电场的建设是否受敏感区(点)影响,优化风电场的场址范围。

收集初选风电场场址附近的地质资料、交通运输资料、电网接入资料和自然灾害资料,分析风电场初选场址的地质条件、交通运输条件、电网接入条件和自然灾害情况。规避可能出现滑坡、泥石流、洪水等不良地质灾害隐患区域,尽可能优先选择交通条件相对较好的区域,优先选择电网接入条件相对较好的区域,最大限度地减少接入成本。

1.4 建设方案拟定

经过对开发条件的分析,剔除不适合兴建风电场的场址,综合分析比较后确定规划风电场场址。

结合风能资源、工程地质、交通运输及施工安装条件,以及现场踏勘,在地形图上拟定规划各风电场场址范围,确定场址范围坐标和面积。

根据区域可开发风电场资源条件、工程建设条件确定风电场可开发范围,提出分期建设方案、各建设场址范围坐标和面积。对于并网型风电场通过对场址所在地区电力电量平衡计算对电网消纳能力进行分析,并结合风电场建设条件,提出风电场装机规模;对于离网型风电场根据拟供电区域主要负荷类型、数量和风电场建设条件,分析提出典型日负荷曲线、储能配置方案和风电场装机规模。

装机容量按照丘陵(起伏地形)按 0.4 万 kW/km² 估算;山地(复杂地形)按 0.2 万 kW/km² 估算。或者按照山地 500 m 一个机位布置,根据山脊的长度估计机组台数;平原风电场按照行距 5 倍列距。

2 山地风电选址及自动布机

以风能资源数据和地形数据为基础,利用空间分析工具筛选适宜的山区开发用地,并基于山脊线提取实现山地风电场的选址和自动布机。具体流程如图 1 所示。

2.1 风能资源数据

在风电场规划选址前,需要对原始测风数据的完整性、合理性、可靠性进行验证,对缺测数据进行插补、对不合理数据进行替换、并将测风数据订正到代表年。

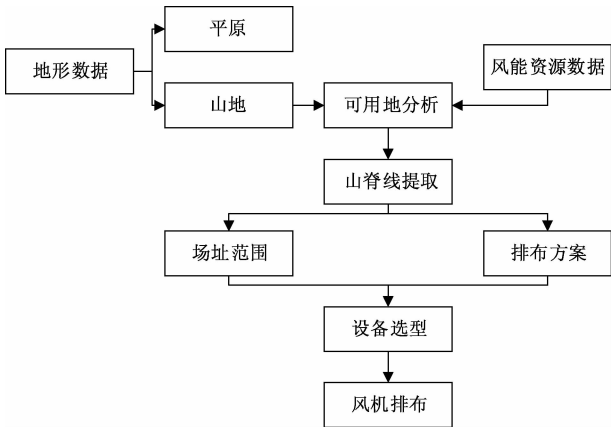


图1 山地风电场宏观选址及自动布机流程

通过风能资源观测数据计算风电场场址区域平均风速、风功率密度及等级、主导风向、平均风速及风功率密度年内变化、平均风速及风功率密度日内变化、风频分布、有效风速小时数、50年一遇最大风速、湍流强度、风切变等指标,确定出风能资源较好区域的范围为待规划区域。

2.2 地形数据分析

在风能资源较好的待规划区域内,进行地形数据分析。利用数字高程模型(DEM)数据计算区域内的坡度数据,进行高程和坡度分析,按照地形分类标准,区分出区域内的平地与山地。平地区域采用行列矩阵式排布方式,山地区域多采用依山脊线的单列布置。

2.3 可用地分析

获取场址周边的水体、地质、交通、环境保护区、土地利用、居民地、已建工程等不能用于场址建设的限制性因素数据。风机本身有噪声等污染,还需与限制性因素保持一定的距离。因此以限制因素数据为中心,以保持的距离为半径生成限制性用地缓冲区域^[9],利用空间分析工具在待规划区域内剔除限制性用地的缓冲面,得到风电场场址的可利用范围。

2.4 山脊线提取

山脊是由两个坡向相反、坡度不一的斜坡相遇组合而成的条形脊状延伸的凸形地貌形态,山脊最高点连线即为山脊线^[10],由于其大体上沿分水岭布设,也称为分水线,是重要的地形特征。通常山脊上的风能资源比山体其他部位更为丰富,山地风电场一般沿山脊线布置风机。由于山脊线具有分水水性特征,采用了类似数字化河网提取的步骤实现山脊线提取,主要包含以下3个步骤:

1)累积流量计算。经过填洼、流向计算和累积流量计算,获得地形数据对应的累计流量分布结果。

2)提取分水岭边界。按照山脊线一般为分水岭边界的特点,其无法形成汇流,在累积流量数据中表现为0值。提取数据中为0的所有值,即得到了分水岭边界。

3)生成山脊线。提取的分水岭边界为栅格数据,无法获得长度等属性信息。将栅格数据转换为矢量数据,修正异常值后,计算长度等属性信息,即获得了山脊线数据。

2.5 设备选型

根据待规划区域的风资源条件选取风电机组,一套风电机组设备主要包括机舱及发电机、轮毂、叶片、塔筒、变速箱等设备。发电机需要确定单机容量、场址空气密度下的机组功率曲线、推力系数曲线;塔筒需要确定塔筒(含轮毂)总的高度;轮毂和叶片需要确定叶片长度、轮毂直径。以目前陆地风电常用的2.5 MW风电机组为例,其轮毂高度为90 m,叶片长度为59.6 m,叶轮直径为121 m。

2.6 风机排布

2.6.1 排布基本策略

山地风电场风电机组主要根据主导风向和地形走势进行单列布置,与主风向垂直方向机组间距不小于2倍叶轮直径,平行于主风向方向机组间距不小于4倍叶轮直径。

当风吹过风机的叶片时,风机会吸收部分风能,同时转动的风机又会导致风的湍动能增加,产生气流畸变、湍流,风速突然减小的现象,即所谓的尾流效应^[11]。由于尾流的存在,风力发电机组之间必须保持一定的距离。但过小间距的会导致因风向改变发生变桨时,相邻风机受尾流、湍流强度的影响程度加大,严重危及风电机组的运行安全,通常风机之间的距离至少应达到4倍风轮直径。

在陆地大气稳定的情况下,山地风电场风电机组依地形单列布置,能有效地减少尾流的影响。

2.6.2 风能密度图谱数据重采样

风能密度图谱的空间分辨率并不统一,低分辨率的有9、3 km,高分辨的有400、250 m等。风轮直径也各不相同,有80、120 m等多种。导致利用风能资源图谱进行排布时需要进行数据的重采样,以适应不同风轮尺寸,同时这个重采样过程还是动态的过程,即同一个风机采用不同分辨率的图谱排布时需重新采样,需考虑重采样的效率。

重采样是更改栅格数据集的空间分辨率并针

对所有新像素计算聚合值或插值的方法。常用的重采样方法有最邻近法、众数法、双线性法、三次卷积法^[12]。一般情况下风资源图谱的分辨率不会低于风轮直径,因此常用的是通过插值方法提高分辨率数据的分辨率。

对于重采样的新像元的大小以风轮直径为准。考虑到重采样的执行效率与风能资源的分布特点,采用众数算法采样。众数重采样方法将在与输出像元中心最接近的输入空间中查找相应的 3×3 像元,并使用 3×3 相邻点的最常用值来确定像元的新值。与最邻近法一样,此方法主要用于离散数据;但与最邻近法相比,众数法通常可生成更平滑的结果。在执行过程中可适当扩大风轮直径使原始像元采样个数为整数,如 250 m 分辨率的风能资源图谱,120 m 的叶轮直径,可将叶轮直径扩大为 125 m,使得 250 m 的像元被重采样为 4 个 125 m 的像元,

这样能尽量保持不引入新值的同时提高效率。

2.6.3 自动布机过程

自动排布过程以风能密度图谱为基础,结合主导风向、叶轮直径、风能密度利用最小值等参数,在区域范围内按照山地排布规则,开展全场寻优。从资源最优点开始排布,逐步形成排布方案,依次再从资源次优点开始排布,以此类推遍历场址内所有符合条件的点,生成多个排布方案。从所有的排布方案中选出装机容量最大的方案或整场发电量最高的方案,并获取对应的风机机位坐标,风机自动排布流程如图 2 所示。

考虑排布效率,设定风能密度利用最小值能有效地减少整场排布方案的数量,并且在单次排布中也能减少步数。对于没有精确图谱(分辨率小于 400 m)的山地风电场,建议不参考图谱排布,而使用按山脊线的规则排布方法,以提高排布的准确性。

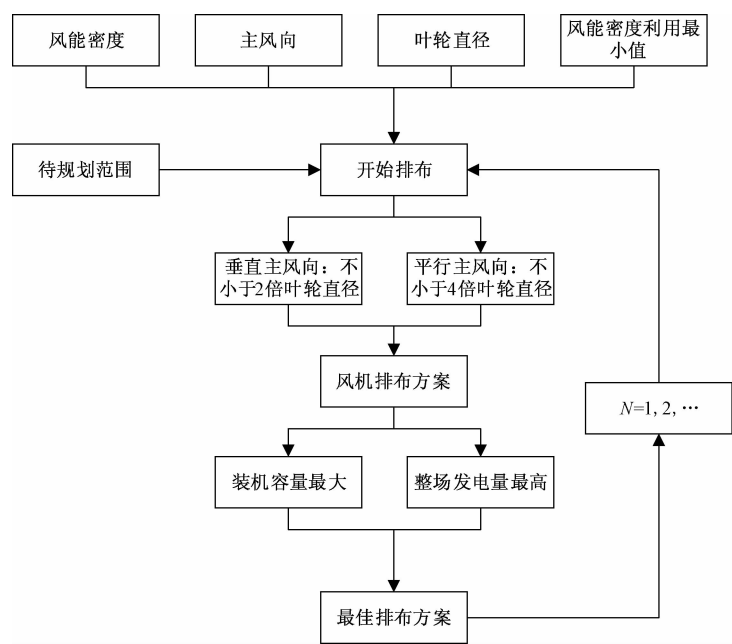


图 2 风机自动排布流程

3 基于山脊线提取的山地风电选址及自动布机验证

3.1 项目简介

普格甘天地二期风电场常规区域位于四川省凉山州甘天地乡、辉龙乡和洛乌沟乡境内,地理坐标介于东经 102°41′37.7″~102°44′22.5″、北纬 27°20′1″~27°25′49″之间。场址区由一条南北向山脊及其支脉组成,总山脊长度约 12 km,海拔在 3 450~3 850 m,总面积约 35 km²。山脊脊线较为连续,起伏不大,顶部较宽,局部较为陡峭,整体山

势较平缓。甘天地二期风电场常规区建设规模 82.5 MW,拟安装单机容量为 2 500 kW 风电机组 33 台。

本次验证以《普格甘天地二期常规区域 82.5 MW 风电场工程初步设计报告》为参照,对规划模型的风能资源评估、风电场规划、自动布机等功能进行验证。

3.2 风能资源评估

风能资源评估使用的观测数据来源于全球尺度风资源数据,模拟高度 100 m。为保证评估的

准确性中尺度测风点位的选择与风场内 3457 # 测风塔位置相同。根据初设报告的描述,3457 # 测风塔高 80 m,位于风场南边山脊及北边山脊上,有较好的代表性;数据完整性较好,选取测风代表年为 2018 年。

1)风速与风功率月变化。比较中尺度与测风塔风速与风功率月变化,发现中尺度数据值偏小。但两者风速、风功率密度的年内变化基本一致,11 月至次年 3 月风速、风功率密度较大,4—10 月的风速、风功率密度较小。

2)风速与风功率日变化。比较中尺度与测风塔风速与风功率日变化,发现中尺度数据值偏小。但两者风速、风功率密度的日变化较小,10~12 点相对风较小。风速、风功率密度在 3~6 点、16~21 点较大。

3)风速和风能频率分布。比较中尺度与测风塔风速和风能频率分布,分布频率形态基本相同。

4)风向与风能玫瑰图。比较中尺度与测风塔风向与风能玫瑰图,其频率分布基本相同。以西南西(WSW)、西南(SW)方向的风速、风能最大,频次最高,盛行风向稳定。

3.3 风电场规划

从初设报告可知,甘天地二期风电场主要位于四川省凉山州拖县与普格县的分界线两侧,地处布拖县包谷坪乡、龙潭镇与普格县甘天地乡、辉龙乡、洛乌沟乡的中间地带。场址区由一条南北向山脊及其支脉组成,总山脊长度约 12 km,海拔在 3 450~3 850 m,总面积约 30 km²。山脊脊线较为连续,起伏不大,顶部较宽,局部较为陡峭,整体山势较平缓。

风场为典型的山地风电场,需在场址范围内提取山脊线用于风机排布。利用山脊线分析模型,提取 2 800 m 高程以上地形的主山脊线,共计 73 km。结合风能资源图谱,选取资源条件好、易于排布的一条南北向山脊及其支脉用于布机,总山脊长度约 30 km。

3.4 自动布机

从初设报告可知,甘天地二期风电场推荐使用 WTG4 机型作为设计方案。该方案机型单机容量 2 500 kW,轮毂高度 90 m,风轮直径 121 m。

根据初设报告中风电机组布置原则:按列距不低于 3 倍风轮直径、行距不低于 5 倍风轮直径考虑,在垂直于主风能方向的山脊上,适当地缩减机组的列距,列距暂缩短至 2 倍。本次布机列距采用

250 m,行距采用 600 m,主风向西南西(WSW),资源点选取 300 W/m² 以上,根据风能资源图谱采用自动寻优方式开展布机,布机效果如图 3 所示。图中绿色图标代表系统自动布机选取的点位,深蓝色点代表初设报告中选取的实际机位。可见,自动布机选取的点位覆盖了资源条件好的区域,与实际机位大部分重叠。存在偏差的原因是实际机位会根据现场情况、植被覆盖、电场容量、交通等条件优选部分点位或人工优化机位。

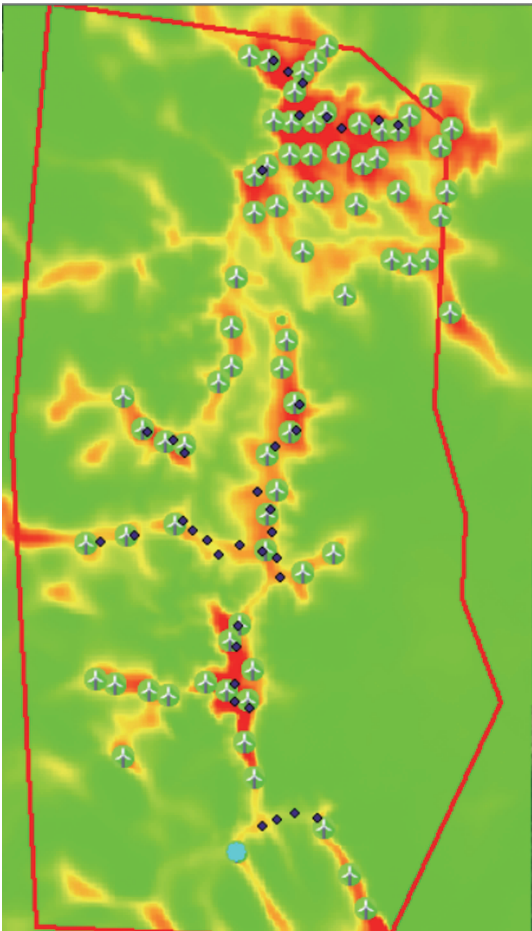


图 3 自动布机与实际机位对比

4 结论

通过对风电场宏观选址的方法,以及针对山地风电选址和自动布机的研究,得到以下结论。

1)利用山脊线具有分水性特征,进行累积流量计算和分水岭边界提取,可以获得较为完整的山脊线数据。

2)对于没有精确图谱的山地风电场,在风电机组自动排布中,建议不参考图谱排布,而使用按山脊线的规则排布方法,以提高排布的准确性。

3)采用山地风电场风电机组排布策略,结合图

谱和山脊线成果进行山地风电场风电机组排布能获得较好的效果。

参考文献

[1] 陶奕衫,闫广新,王建军,等. 风电场宏观选址综合决策方法的研究[J]. 四川电力技术,2014,37(2):27-30.

[2] 吴培华. 风电场宏观和微观选址技术分析[J]. 科技情报开发与经济,2006,15(16):154-155.

[3] 邓院昌,余志,钟权伟. 风电场宏观选址中地形条件的分析与评价[J]. 发电技术,2010,38(8):1244-1247.

[4] 邓院昌,余志,周卉. 风电场宏观选址中交通条件的一种评价方法[J]. 华东电力,2010,38(2):281-284.

[5] 邓院昌,余志,李相源. 基于遥感图像的风电场选址土地利用分类与评价[J]. 可再生能源,2011,29(1):140-143.

[6] 刘超群. 基于 RS 和 GIS 的风电场宏观选址研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2018.

[7] 仲炜,葛莹,张杰,等. 基于 GIS 的高海拔山区风电场智能微观选址研究[J]. 地理信息世界,2018,25(1):130-134.

[8] 李枫. 基于数字高程模型自动提取山脊线的实现方法[J]. 绿色科技,2019(2):157-158.

[9] 李建松. 地理信息系统原理[M]. 武汉:武汉大学出版社,2006:276.

[10] 李枫. 基于数字高程模型自动提取山脊线的实现方法[J]. 绿色科技,2019(2):157-158.

[11] 张志阳,魏敏,胡蓉,等. 风力机错列布置的尾流效应[J]. 科学技术与工程,2020,20(1):207-212.

[12] 王泉轩,左小清,杨泽楠. 遥感影像重采样方法实现与应用研究[J]. 软件,2019,40(7):42-46.

Research on Mountain Wind Power Site Selection and Automatic Arrangement Based on Ridgeline Extraction

PENG Li, CHOU Xin

(PowerChina Chengdu Engineering Corporation Limited,Chengdu 610072,China)

Abstract: The methods and processes of macro site selection and wind turbine automatic arrangement of mountain wind farm are studied. The general methods and processes of macro site selection of wind farm are summarized and analyzed. According to the characteristics of mountain wind farm, a method of mountain wind farm site selection and automatic arrangement based on ridgeline extraction is proposed. Based on wind energy resource data and terrain data, this method combines geographic information technology to preliminarily select the range of mountain wind farm. Using spatial analysis tools to carry out landuse analysis, the restrictive factors that can not be used for site construction within the range was eliminated, so as to screen out the suitable mountain development land. Watershed feature is used to extract ridgeline, and equipment selection, layout strategy and wind energy density map are considered to realize automatic arrangement of wind turbines in mountain wind farm

Keywords: mountain wind farm;macro site selection;spatial analysis;ridgeline;automatic arrangement