2025年2月 C	ARSOLOGICA	SINICA	Feb. 2025

符明俊,何阳,董秀军,等. 茂密植被山区岩溶漏斗遥感识别方法[J]. 中国岩溶, 2025, 44(1): 89-99. DOI: 10.11932/karst20250106

# 茂密植被山区岩溶漏斗遥感识别方法

符明俊<sup>1,2</sup>,何阳<sup>3</sup>,董秀军<sup>3</sup>,邓博<sup>3</sup>

 (1.中国地质大学(武汉)环境学院,湖北武汉 430074; 2.海南省地质环境监测总站, 海南海口 570106; 3.成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护
 国家重点实验室、四川成都 610059)

**摘 要:**岩溶渗漏是碳酸盐岩发育地区建设抽水蓄能电站面临最主要的工程地质问题之一, 岩溶漏 斗主要受构造影响, 一般发育在断层附近, 水沿着岩溶漏斗的孔道与地下暗河相通就可能导致水库 渗漏, 受限于岩溶漏斗隐蔽性强的特点, 传统调查手段难以高效实现岩溶漏斗准确排查, 为解决传统 岩溶漏斗调查手段效率低下的问题, 文章以某抽水蓄能电站库区作为研究对象, 提出一种基于点云 主成分分析的岩溶漏斗自动识别方法, 以快速识别并提取库区的岩溶漏斗。其方法首先利用机载 LiDAR 技术获取研究区滤除植被后的地面三维点云数据, 再针对岩溶漏斗下凹形态方向性强的特点, 通过 K-D 树最邻近算法及主成分分析, 提出一种指标特征值比值完成岩溶漏斗的初步提取, 最后采 用基于密度聚类算法的漏斗频数、长度、方向 3 种滤波算法对初提取结果进行背景滤噪。该方法采 用受试者工作特征曲线检验 AUC 值可达 0.854, F-score 为 0.859, 其能适用于高植被覆盖下岩溶地貌 发育地区的岩溶漏斗的识别与调查。

关键词:机载LiDAR; 岩溶漏斗; 三维点云; 自动识别; 主成分分析

**创新点:**利用机载 LiDAR 技术获得的三维点云成果和山体阴影图,通过 K-D 树最邻近算法及主成分分析,并提出特征值比值指标完成四川某抽水蓄能电站库区岩溶漏斗的初步识别,再基于密度聚类算法索引的频数、长度、方向 3 种滤波算法对初始识别结果进行背景噪点滤除,形成在高植被覆盖下复杂地表岩溶漏斗自动识别提取的技术方法。

中图分类号: TP75; P642.25 文献标识码: A 文章编号: 1001-4810 (2025) 01-0089-11

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## 0 引 言

中国岩溶区分布十分广泛,碳酸盐岩在四川、云 南、贵州等 27 个省(区)均有出露,分布总面积达到 344.2 万 km<sup>2</sup>,占国土面积的 1/3<sup>[1]</sup>。四川省的岩溶地 貌主要分布在四川省横断山脉西侧和西北部龙门山 脉地区,面积约为 11.5 万 km<sup>2</sup>,占全省总面积的 15% 左右。一方面,岩溶景观不仅是宝贵的旅游资源,还 具有重要的科学研究价值,对于地质演化、水文地质 和生态环境等方面的研究具有重要意义。另一方面, 岩溶地区又有如岩溶渗漏<sup>[2-3]</sup>等工程地质问题,给人 们的生活生产造成不便。岩溶漏斗又称斗淋(doline)<sup>[4]</sup>, 为漏斗形状或碟形的封闭洼地,是地表水沿节理裂 隙不断溶蚀,并伴有塌陷<sup>[5]</sup>、沉陷、渗透及溶滤作用 发育而成的。漏斗底部常有通道通往地下,起消水 作用<sup>[6]</sup>。岩溶地区的地下水通常会通过岩石裂隙、溶

通信作者:何阳(1999-),男,硕士,主要研究方向为地质灾害早期识别。E-mail: heyn9@qq.com。 收稿日期: 2023-11-23

基金项目:国家自然科学基金 (42072306)

第一作者简介:符明俊(1983-),男,硕士,主要研究方向为地下水污染与防治。E-mail:1061305829@qq.com。

洞等通道进行渗透和流动,岩溶漏斗的形成也会进 一步加剧地下水的渗透和流动,从而促进岩溶作用 的发展。

中国西南山区有着丰富的水电资源,但在其岩 溶发育地区建设抽水蓄能电站碰到的首要工程地质 问题就是水库渗漏<sup>[7-8]</sup>,岩溶漏斗主要受构造影响<sup>[9]</sup>, 一般发育在断层附近,水沿着岩溶漏斗的孔道与地 下暗河相通就可能导致水库渗漏,影响蓄水期水位 抬升。中国的拉浪<sup>[10]</sup>、大龙洞<sup>[11]</sup>、猫跳河四 级<sup>[12]</sup>、桃曲坡<sup>[13]</sup>等水库都出现过严重的渗漏问题,而 在抽水蓄能电站中上水库作为储存水的关键部分<sup>[14]</sup>, 其是否出现渗漏问题显得尤为重要。因此,为避免 水库渗漏问题,如何准确全面地查清库坝区岩溶漏 斗位置成了抽水蓄能电站建设前需要考虑的重要问题。

传统的岩溶漏斗调查主要使用人工地面调查加 钻探的方法<sup>[15]</sup>,但在中国西南植被覆盖密集的山区 开展人工排查,往往效率十分低下且受限于岩溶漏 斗隐蔽性强等特点难以实现岩溶漏斗快速、准确排 查。机载激光雷达(Airborne LiDAR)技术具有多回 波的特点,可"穿透"地面植被,获取地表三维点云数 据,直接观察到地表形态,从而准确识别岩溶漏斗现 象,能快速采集高精度数据,极大提高地质调查的效 率<sup>[16-18]</sup>。

近年来,国内已有学者将机载 LiDAR 技术应用 于抽水蓄能电站工程测量中<sup>[19-20]</sup>,也有学者尝试使用 机载 LiDAR 技术直接进行岩溶漏斗遥感调查<sup>[21]</sup>,尽 管机载 LiDAR 技术生成的高精度数字高程模型 (DEM)可提供精细的地形信息,但识别地表的岩溶 漏斗仍然需要研究人员的经验判断通过目视解译来 进行,并且提取岩溶漏斗的发育形态几何特征和属 性也需要人工手动进行。受限于岩溶漏斗发育分布 广泛、数量众多且一般长宽较小,基于 DEM 的人工 目视解译依赖研究人员的主观判断<sup>[22-24]</sup>,仍存在一定 的误差性与低效率性。而目前直接利用地表三维点 云数据进行岩溶漏斗识别与提取的方法国内外也鲜 有研究。

为解决人工目视解译岩溶漏斗效率低下的问题, 构建高植被覆盖山区的岩溶漏斗自动识别方法,本 文以四川某抽水蓄能电站库区为示范区,利用机载 LiDAR 技术获得的三维点云成果(Point Cloud)和山 体阴影图(Hillshade),通过 K-D 树最邻近算法及主 成分分析(PCA),并提出特征值比值指标完成岩溶 漏斗的初步识别,再通过基于密度聚类算法索引的 频数、长度、方向3种滤波算法对初始识别结果进行 背景噪点滤除,形成一套在大范围、高植被覆盖下的 复杂地表岩溶漏斗自动识别提取方法体系,以期提 高岩溶漏斗遥感解译的效率。

## 1 岩溶漏斗自动识别方法

#### 1.1 漏斗识别模型及原理

K-D 树数据结构被广泛应用于多维空间关键数 据的近似最近邻查找和近邻查找<sup>[25]</sup>,具有多维空间 分割的特征。因此,本次研究选用 K-D 树创建点云 坐标信息(*X*, *Y*, *Z*)并作为在数据处理过程中在 3D 空 间进行不同查询过程的工具,可高效快速地处理海 量的点云数据。利用 K-D 树最邻近算法从第一个点 开始收集在指定搜索半径 r 内的点云(图 1a)数据, 并遍历所有点云数据实现全域点云的指定半径点云 集合的获取。

漏斗在三维空间中有着明显的局部内凹形态, 其对应的点云在地表平面上会呈现出近似圆锥状的



## 图1 点云特征值比值计算原理

Fig. 1 Calculation principle of the eigenvalue ratio of point clouds

内凹,因而岩溶漏斗在空间中具有明显的方向性。 特征值比值 *p* 是用来表征点云集合是否具有方向性 的一个指标,其获取方法是:利用 K-D 树最邻近算法 收集某点一定搜索半径内的点云数据,并形成一个 点云集合,对该点云集合进行 PCA 主成分分析,得 到该点云集合的 3 个主方向向量,并计算得到 3 个 主方向向量的特征值大小比率<sup>[26]</sup>(图 1b,图 1c),如果 岩溶漏斗具有很强的方向性,则特征值 λ1(最大特征 值)要远大于 λ<sub>2</sub> 和 λ<sub>3</sub>,此时 λ<sub>2</sub> 与 λ<sub>3</sub> 两者接近于 1:1, 且 λ<sub>2</sub>、 λ<sub>3</sub> 的值也非常小,利用特征向量来确定点云集 的空间方向性是非常有效的。获取点云特征值比值 的具体算法步骤如下:

(1)封装位于一定搜索半径内靠近目标点云的 n个点形成点云集,并定义这个点云集为P<sub>n</sub>;

(2)根据质心 *P*<sub>c</sub>与点云集 *P*<sub>n</sub>之间的离散差构建协方差矩阵*C*<sub>3x3</sub>,计算方法如公式(1)所示:

$$C_{3\times3} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \left( \begin{bmatrix} P_{iX} \\ P_{iY} \\ P_{iZ} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \overline{P_{cX}} \\ \overline{P_{cY}} \\ \overline{P_{cZ}} \end{bmatrix} \right) \left( \begin{bmatrix} P_{iX} \\ P_{iY} \\ P_{iZ} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \overline{P_{cX}} \\ \overline{P_{cY}} \\ \overline{P_{cZ}} \end{bmatrix} \right)^{1}$$
(1)

(3)根据协方差矩阵*C*<sub>3×3</sub>,通过矩阵计算得到 从大到小排列的特征值(*λ*<sub>1</sub>, *λ*<sub>2</sub>, *λ*<sub>3</sub>)及与之对应的 特征向量(*e*<sub>1</sub>, *e*<sub>2</sub>, *e*<sub>3</sub>),上述过程可表示如公式(2) 所示:

$$C_{3\times3} = W\Lambda W^{\mathrm{T}} = \begin{bmatrix} \overrightarrow{e_1} \ \overrightarrow{e_2} \ \overrightarrow{e_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0\\ 0 & \lambda_2 & 0\\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1^{\mathrm{T}}\\ e_2^{\mathrm{T}}\\ e_3^{\mathrm{T}} \end{bmatrix}$$
(2)

(4)计算得到目标点云的特征值比值*p*,特征值 比值的计算方法如公式(3)所示:

$$p = \frac{\lambda_3}{\lambda_2} \tag{3}$$

## 1.2 分类滤波方法

为了滤除上凸石块、下凹沟槽等非漏斗点和噪 点,将三维点云数据降维在二维平面上。基于数字 图像处理技术对岩溶漏斗栅格图做滤波处理,并针 对岩溶漏斗的平面形态特点提出基于漏斗像元的频 数滤波、长度滤波与方向滤波算法进行去噪处 理<sup>[27]</sup>,其能够保留漏斗的真实像元并有效滤除掉漏 斗以外的多余噪点。

(1)频数和长度滤波

本文采用 DBSCAN 的密度聚类算法,通过设置 邻域半径(epsilon)和最少点数(MinPts),按照紧密程 度将一定距离内的像元进行聚类,其原理如图 2a 所 示。通过聚类将平面上所有像元分类成多个离散的 漏斗,统计每个岩溶漏斗区域内的像元个数和最小 外接矩形的对角线长度,作为频数滤波和长度滤波 的指标,再根据区域内岩溶漏斗图像的形态特征设 置一定的阈值,对频数过小的噪点和长度过大的非 岩溶漏斗点进行滤除,通过这种 DBSCAN 聚类索 引的方式将漏斗像元进行整体分析,可减少漏斗边 缘因距离稍远被当做噪点滤除的风险,其原理如 图 2b 所示。

(2)方向滤波

岩溶漏斗在平面投影中呈近圆形或椭圆形,不 会沿某一个方向过度延伸,具有较弱空间延展性, 这是区别于非岩溶漏斗点的主要形态特征之一,因 而利用此特征同样采用 DBSCAN 的密度聚类算法,





Fig. 2 Schematic diagram of the principle of the filtering method

以每个岩溶漏斗作为索引单元,同样通过 PCA 主 成分分析计算岩溶漏斗二维平面像素点整体的特 征值比率λ<sub>1</sub>/λ<sub>2</sub>,以此作为方向滤波指标,根据区域 内岩溶漏斗图像的形态特征设定阈值,对平面方向 性过强的非岩溶漏斗点进行滤除,其原理如图 2c 所示。

## 1.3 模型精度分析方法

引入受试者工作特征曲线下的面积(ROC-AUC) 分析法,来评价模型的分类精度。该分析方法是目 前常用的一种二分类模型评估方法<sup>[28]</sup>。在 ROC 检 验中,理想曲线越靠近左上角,表明模型的分类效果 越好,模型的预测能力就越高,一般用 ROC 曲线下 面积(area under the curve,AUC)定量描述。ROC 曲 线的纵坐标是真正阳率(true positive rate,TPR),即不 同阈值下预测正类实际正类样本占所有正类样本的 比例,也叫召回率(Recall);横坐标是假正阳率(false positive rate,FPR),即不同阈值下预测正类实际反类 样本占所有反类样本的比例。真正阳率与假正阳率 的计算方法如公式(4)、(5)所示:

$$TPR = \frac{TP}{TP + FN} \tag{4}$$

$$FPR = \frac{FP}{FP + TN} \tag{5}$$

式中:*TP*为正类中正确分类的样本(ture positive); *FN*为反类中错误分类的样本(false negative);*FP*为 正类中错误分类的样本(false positive);*TN*为反类中 正确分类的样本(ture negative)。

为更好评估模型的准确性使用 F-score 进行计算, 它能够综合表征召回率与准确率两项指标,可评价 模型识别结果的总体优劣性,其中准确率(Precision) 指正确预测为正的占全部预测为正的比例。准确率 与 F-score 的计算方法如公式(6)、(7)所示:

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} \tag{6}$$

$$F\text{-}score = \frac{2Precision \times Recall}{Precision + Recall}$$
(7)

#### 2 抽水蓄能电站示范区

#### 2.1 示范区概况

抽水蓄能电站库区位于四川省东北部,四季分

明,终年湿润,雨量丰富,年平均降雨量1300mm,属 亚热带季风性湿润气候区;地处前龙门山地与四川 盆地西北部的结合地带,属于构造侵蚀溶蚀中山地 形。示范区面积为10km<sup>2</sup>,地形坡度一般在30°以上, 区内相对高差最大1070m,主要为森林植被,为常绿 阔叶次生林与灌木丛相间发育分布。工程区位于仰 天窝倒转向斜核部,上水库区基岩主要为泥盆系上 统沙窝子组(D<sub>3</sub>s)薄—中厚层灰岩、白云质灰岩和泥 盆系上统茅坝组(D<sub>3</sub>m)薄—中厚层泥晶灰岩、生物 碎屑灰岩等,下水库区基岩以泥盆系上统沙窝子组 (D<sub>3</sub>s)薄—中厚层白云质灰岩、薄层灰岩,泥盆系上 统茅坝组(D<sub>3</sub>m)中厚层泥晶灰岩及少量粉砂质泥岩, 部分泥盆系中统观雾山组(D<sub>2</sub>g)中厚层灰质白云质 灰岩、石英砂岩为主,岩溶发育强烈。抽水蓄能电站 工程布置及机载LiDAR影像如图3所示。

#### 2.2 数据来源

因示范区内植被茂密且高差较大,为保证区内 影像分辨率和点云密度一致性,本次机载 LiDAR 数 据获取采用飞马 D20 无人机平台,其具有结构稳定、 大载重、长航时、任务载荷能力强等优点。机载 LiDAR 系统与光学相机各项参数如表1所示。

通过设置无人机变高飞行保证数据获取达到精度要求,设计激光点云密度 60 点·m<sup>-2</sup>。航向重叠 80%,旁向重叠 70%,设计影像地面分辨率为 6 cm,飞行时速 10 m·s<sup>-1</sup>。具体航线规划如图 4 所示。

对获取的点云数据进行滤波去噪、剔除植被等 前处理,得到分类后的点云成果数据(图 5a)。根据 点云分类成果,采用 1985 国家高程基准进行坐标转 换,采用 TerraSolid 软件生成格网间距为 0.2 m 的数 字高程模型,并使用机载同步光学影像生成影像分 辨率为 0.1 m 的数字正射影像图(图 5b)。从正射影 像图中可看到研究区植被十分发育,在这种植被条 件下展开平面影像人工目视解译岩溶漏斗是不现实的。

#### 2.3 库区岩溶漏斗特征形态

库区植被发育,且十分茂密,基于光学影像对岩 溶漏斗遥感解译是不现实的,使用机载 LiDAR 技术 可发现植被茂密地区因植物遮挡难以发现岩溶漏斗。 库区内典型岩溶漏斗的正射影像图、机载 LiDAR 影 像、三维点云剖面图以及现场照片(图 6),在正射影 像图中因植被遮挡严重,岩溶漏斗完全不可见。在 滤除植被后的机载 LiDAR 影像山体阴影显示中可



图 3 调查区工程布置图

Fig. 3 Engineering layout of the survey area

#### 表 1 机载 LiDAR 系统与光学相机各项参数

Table 1 Parameters of airborne LiDAR system and optical camera

雷达型号	RIEGL VUX-1 LR激光雷达系统	激光发射频率	750000点/秒
尺寸	227×180×125 mm	扫描速度	200次扫描/秒
重量	3.5 kg	相机型号	SONY A7RII
测量精度	15 mm	相机焦距	24 mm
最大测量范围	1 350 m	相机像素	4240MP



图 4 航线规划图 Fig. 4 Route plan

观察到岩溶漏斗的边界轮廓,结合三维解译软件 EarthSurvey可观察到漏斗的立体效果,而三维点云 剖面可直观展示岩溶漏斗的整体形态特征,具有较 好的解译准确性。

## 3 岩溶漏斗自动识别结果

#### 3.1 特征值比值提取

较小的 K-D 树搜索半径会更好地凸显局部地形 的平整状况,也将反映出特征值比值的变化情况,但 过小的搜索半径会增加对上凸山脊或下凹沟槽等噪 音的敏感性,并且库区内岩溶漏斗大小不一。针对



图 5 调查区数据成果

Fig. 5 Data results of the survey area



图 6 岩溶漏斗 Fig. 6 Doline

库区内岩溶漏斗形态特征,将 K-D 树最邻近算法的 搜索半径设置为 3~7 m 进行实验,以不同的采样半 径对点云数据进行收集,并将得到的特征值比值结 果转化为与山体阴影图像单位像元大小相同的栅格 数据,目的是将特征值比值结果栅格数据与山体阴 影图像对齐,初步识别结果如图 7 所示。图 7 中平 面呈近圆形且特征值比值结果较大的位置即为岩溶 漏斗,由剖面图(图 7c,图 7e,图 7f)可观察到其呈现 出明显的下凹状漏斗形态。

## 3.2 滤波处理

特征值比值指标对于下凹的岩溶漏斗有着较好 的识别效果,通过设置一定的特征值比值阈值可对 岩溶漏斗进行提取,但在识别出下凹漏斗的结果中 也包含了上凸的山脊线和部分下凹的水沟。为去除 岩溶漏斗初步提取结果中的噪点和非漏斗点,将岩 溶漏斗初步提取结果插值转化为与山体阴影图像单 位像元大小相同的栅格数据进行去噪滤波,滤波过 程如图 8 所示。像素点由 DBSCAN 算法聚类为多 个漏斗在图中显示不同的颜色,一种颜色即代表聚 类形成的一个类别(图 8a)。由图 8a 到图 8b 可发现 通过频数滤波,滤掉了位置分散的细小噪点;通过长 度滤波,滤掉了聚类后长度过大的像素点,例如山脊 线,如图 8b 到图 8c 所示;最后通过方向滤波,滤掉了 方向性较强的留下较为圆润的像素点(图 8c-图 8d), 但在部分低洼汇水处,仍有部分平面形态与岩溶漏 斗类似的局部凹槽与长度较小的上凸山包被错误识 别为岩溶漏斗。

#### 3.3 最优采样半径

调查区中的岩溶漏斗大小不等、形态各异,为研 究最适宜岩溶漏斗识别的 K-D 树搜索半径,对实验



图 7 点云特征值比值识别效果(a.特征值比值栅格图; b.三维点云显示; d.岩溶漏斗; c.e.f.岩溶漏斗剖面图) Fig. 7 Recognition effect of point cloud eigenvalue ratio (a.eigenvalue ratio grid map; b.3D point cloud display; d.doline; c, e, f.sectional views of doline)

区内的地面三维点云使用 3~7 m 采样半径并以特征 值比值 0.07 作为阈值提取漏斗,再经过相同阈值的 滤波处理,最终得到岩溶漏斗识别结果。将各采样 半径获得的岩溶漏斗识别结果与室内解译及野外复 核成果进行对比分析,对前述不同采样半径的识别 结果随机选取正负样本的各 7.5 万个像素绘制 ROC 曲线,分析不同采样半径对识别结果的影响,结果如 图 9 所示。

从图 9 中可知, 各采样半径的 ROC-AUC 面积均达 0.8 以上, 模型识别效果良好, 其中使用 6 m 作为采样半径的二分类模型识别效果最好, ROC-AUC 值可达 0.854。

对各采样半径模型进行计算得到 F-score,其评价结果如表 2 所示。由表 2 可知,各采样半径的 F-score 均达 0.8 以上,模型识别准确度较高,其中使用6 m 作为采样半径的二分类模型识别效果最好,F-

score 达到了 0.859。将自动提取结果与室内解译及 野外复核成果进行对比,岩溶漏斗识别准确性较高, 表明本文提出的岩溶漏斗自动识别方法可有效识别 茂密植被覆盖下的岩溶特征。

#### 3.4 岩溶漏斗识别结果

将进行滤波后得到的自动提取结果与室内解译 及野外复核的成果进行对比,识别结果与现场实际 情况匹配良好,将6m采样半径模型的识别结果与 实际岩溶漏斗对比,如图10所示。调查区内共自动 提取出岩溶漏斗305处,对比人工解译成果259处, 新增46处未发现的岩溶漏斗,自动提取岩溶漏斗结 果如表3所示。

## 4 结论

(1)因岩溶漏斗大小不一、形态各异,对比了不



图 8 漏斗滤波过程 Fig. 8 Doline filtering process





同采样半径对于岩溶漏斗自动识别结果的影响,对不同采样半径的识别模型进行 ROC 检验, ROC-AUC 值均大于 0.8, 当采样半径为 6 m 时 ROC-AUC 值达到 0.854, F-score 达 0.859, 能够较好满足实际工程

表 2 各采样半径提取漏斗模型评价结果 Table 2 Evaluation results of the funnel model extracted by each sampling radius

by each sampling factors						
类型	真正阳率	假正阳率	准确率	F-score		
3 m采样半径	81.03%	14.88%	82.14%	0.816		
4 m采样半径	81.97%	15.31%	83.47%	0.827		
5 m采样半径	82.55%	14.85%	84.53%	0.835		
6 m采样半径	83.99%	11.33%	87.96%	0.859		
7 m采样半径	83.35%	13.49%	85.38%	0.844		

需要。

(2)利用本文提出的岩溶漏斗自动识别方法,在 调查区进行岩溶漏斗自动提取,快速准确地发现了 库区林下的岩溶漏斗,共自动提取出岩溶漏斗 305处,对比人工解译成果 259处,重叠数为 243处, 重叠率达 93.8%,识别准确率较高,且新增 46 处未发 现的岩溶漏斗,弥补了人工解译的不足,提高了解译 效率。



(a) 人工解译结果

(b) 自动提取结果

图 10 自动提取与人工解译结果对比

Fig. 10 Comparison between automatic extraction and manual interpretation

## 表 3 自动提取岩溶漏斗结果

Table 3 Results of automatic extraction of dolines

	总数量	重叠数量	未发现数量	新增数量	重叠率
自动提取/个	305	243	16	46	93.8%

#### 参考文献

- [1] 曹建华, 蒋忠诚, 袁道先, 夏日元, 章程. 岩溶动力系统与全球 变化研究进展[J]. 中国地质, 2017, 44(5): 874-900.
   CAO Jianhua, JIANG Zhongcheng, YUAN Daoxian, XIA Riyuan, ZHANG Cheng. The progress in the study of the karst dynamic system and global changes in the past 30 years[J].
   Geology in China, 2017, 44(5): 874-900.
- [2] 曾洁,潘晓东,任坤,刘伟,彭聪,郑智杰.贵州省碧云湖岩溶渗 漏水文地质条件与渗漏管道位置识别[J].中国岩溶,2024, 43(1):201-208.

ZENG Jie, PAN Xiaodong, REN Kun, LIU Wei, PENG Cong, ZHENG Zhijie. Hydrogeological conditions of karst leakage and locating of leakage channels in Biyun lake, Guizhou[J]. Carsologica Sinica, 2024, 43(1): 201-208.

 [3] 冯志刚, 韦国建, 张汉猛, 许国. 西南某水电站断裂构造和层间 溶蚀带组合岩溶渗漏研究[J]. 中国岩溶, 2022, 41(5): 728-735.

> FENG Zhigang, WEI Guojian, ZHANG Hanmeng, XU Guo. Study on karst leakage caused by the combination of fault structure and interlayer corrosion zone of a hydropower station in Southwest China[J]. Carsologica Sinica, 2022, 41(5): 728-735.

- [4] 袁道先,蔡桂鸿. 岩溶环境学[M]. 重庆: 重庆出版社, 1988.
- [5] 蒋小珍, 冯涛, 郑志文, 雷明堂, 张伟, 马骁, 伊小娟. 岩溶塌陷 机理研究进展[J]. 中国岩溶, 2023, 42(3): 517-527.

JIANG Xiaozhen, FENG Tao, ZHENG Zhiwen, LEI Mingtang, ZHANG Wei, MA Xiao, YI Xiaojuan. A review of karst collapse mechanisms[J]. Carsologica Sinica, 2023, 42(3): 517-527.

- [6] 袁道先. 现代岩溶学[M]. 北京:科学出版社, 2016.
- [7] 伍法权.西部水利水电开发与岩溶水文工程地质学术研讨会 学术总结报告[J].工程地质学报,2004,12(4):441-444.
   WU Faquan. Academic summary on the western conference of hydro-power development and karst hydro-engineering geology[J]. Journal of Engineering Geology, 2004, 12(4): 441-444
- [8] 卢耀如. 岩溶地区水利水电建设中一些环境地质问题的探讨 [C]//喀斯特与环境地学——卢耀如院士 80 华诞祝寿论文选 集, 2011: 98-104.
- [9] 李芳涛, 李华明, 胡志平, 陈南南, 晏长根. 峨汉高速廖山隧道 岩溶发育规律及其工程效应浅析[J]. 中国岩溶, 2020, 39(4): 592-603.
   LI Fangtao, LI Huaming, HU Zhiping, CHEN Nannan, YAN

Changgen. Features of karst development and geotechnical effects in the Liaoshan tunnel on the E-Han expressway[J]. Carsologica Sinica, 2020, 39(4): 592-603.

[10] 谭先亮. 拉浪水电站左岸绕坝渗漏问题的探讨[J]. 中国岩溶, 1986, 5(1): 25-34.

TAN Xianliang. Discussion on bypassing leakage problem at left abutment of Lalang hydroelectric power atation[J]. Carsologica Sinica, 1986, 5(1): 25-34.

- [11] 姚臣良.大龙洞水库漏水量测验初析[J].广西水利水电, 1991(1):46-50
- [12] 肖万春,王占元. 猫跳河四级水电站坝肩及坝基渗漏稳定分析[J]. 贵州水力发电, 1999(2): 20-24.
   XIAO Wanchun, WANG Zhanyuan. Analysis on seepage and stability of dam abutments and foundation in Cascade IV hydropower station on Maotiaohe river[J]. Guizhou Water
- [13] 吴宗信,梁纪信,王德成.桃曲坡水库灰岩库区的漏水情况及 治理措施[J].水利水电技术,1990(12):49-52.

Power, 1999(2): 20-24

[14] 曹建文,杨海洋,王喆,赵良杰,林玉山,栾崧,李录娟.湖北某 抽水蓄能电站建设中地下河系统多元信息综合分析评价[J]. 中国岩溶,2023,42(4):699-710.

CAO Jianwen, YANG Haiyang, WANG Zhe, ZHAO Liangjie, LIN Yushan, LUAN Song, LI Lujuan. Comprehensive analysis and evaluation of the multi-information on the underground river system in construction of a pumped-storage hydropower station in Hubei[J]. Carsologica Sinica, 2023, 42(4): 699-710.

- [15] 任启磊. 岩溶地区工程地质勘察方法技术应用[J]. 资源信息 与工程, 2018, 33(3): 12-13, 15.
- [16] 许强, 董秀军, 李为乐. 基于天一空一地一体化的重大地质灾 害隐患早期识别与监测预警[J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2019, 44(7): 957-966.

XU Qiang, DONG Xiujun, LI Weile. Integrated space-airground early detection, monitoring and warning system for potential catastrophic geohazards[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2019, 44(7): 957-966.

- [17] Chen Weitao, Li Xianju, Wang Yanxin, Chen Gang, Liu Shengwei. Forested landslide detection using LiDAR data and the random forest algorithm: A case study of the Three Gorges, China[J]. Remote Sensing of Environment, 2014, 152: 291-301.
- [18] Meirman Syzdykbayev, Bobak Karimi, Hassan A Karimi. Persistent homology on LiDAR data to detect landslides[J]. Remote Sensing of Environment, 2020, 246: 111816.
- [19] 姜丙波,柳忠伟,彭云,徐生望,邓勇.无人机机载激光雷达在 抽水蓄能电站大比例尺地形图测绘中的应用[J].测绘通报, 2021(Suppl.1);248-251.

JIANG Bingbo, LIU Zhongwei, PENG Yun, XU Shengwang, DENG Yong. Application of UAV airborne LiDAR in large scale topographic mapping of pumped storage power stations[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2021(Suppl.1): 248-251.

[20] 徐晓臣,谢津平. 机载激光雷达技术在乌龙山抽水蓄能电站工程测量中的应用[J]. 水利水电技术, 2017, 48(10): 136-141.
 XU Xiaochen, XIE Jinping. Application of airborne-LiDAR technique to engineering survey for Wulongshan pumped storage hydropower station[J]. Water Resources and Hydropower

Engineering, 2017, 48(10): 136-141.

[21] 郑鹏,魏星灿,李宁,李强,陈江攀.无人机机载 LiDAR 技术在 抽水蓄能电站库区岩溶识别中的应用[J].测绘通报,2023(4): 121-127.

> ZHENG Peng, WEI Xingcan, LI Ning, LI Qiang, CHEN Jiangpan. Application of UAV airborne LiDAR technology in karst identification of pumped storage power station reservoir area[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2023(4): 121-127.

[22] 刘汉湖,杨武年,夏涛.高精度遥感三维可视化在岩溶地区工 程初勘调查中的应用:以云南小哨机场为例[J].测绘科学, 2007,32(5):111-113,205.

LIU Hanhu, YANG Wunian, XIA Tao. Application of highaccuracy remote 3D visualization in engineering exploration of karst: A case study of Yunnan Xiaoshao airport[J]. Science of Surveying and Mapping, 2007,32(5): 111-113, 205.

- [23] 夏涛,杨武年,马安青.遥感影像三维可视化在岩溶漏斗解译中的应用[J].测绘科学,2009,34(6):266-267,167.
   XIA Tao, YANG Wunian, MA Anqing. Application of 3D visualization of remote sensing images in doline interpretation[J].
   Science of Surveying and Mapping, 2009, 34(6): 266-267, 167.
- [24] 尹盛虎,米德才,成功,骆俊晖,叶琼瑶.无人机三维遥感在岩溶隧址区构造解译中的应用研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2021,44(3):60-63.
  YIN Shenghu, MI Decai, CHENG Gong, LUO Junhui, YE Qiongyao. Research on application of unmanned aerial vehicle 3D remote sensing in structural interpretation of karst tunnel site[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2021, 44(3): 60-63.
- [25] Chen Yewang, Zhou Lida, Tang Yi, Jai Puneet Singh, Nizar Bouguila, Wang Cheng, Wang Huazhen, Du Jixiang. Fast neighbor search by using revised k-d tree[J]. Information Sciences, 2019, 472: 145-162.
- [26] Abdulla Al Rawabdeh, Fangning He, Adel Moussa, Naser El Sheimy, Ayman Habib. Using an unmanned aerial vehicle-based digital imaging system to derive a 3D point cloud for landslide scarp recognition [J]. Remote Sensing, 2016, 8(2): 95.
- [27] 邓博, 许强, 董秀军, 巨袁臻, 胡武婷. 点云与数字图像数据融合的斜坡变形裂缝自动检测[J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2023, 48(8): 1296-1311.
  DENG Bo, XU Qiang, DONG Xiujun, JU Yuanzhen, HU Wuting. Automatic detection of deformation cracks in slopes fused with point cloud and digital image[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2023, 48(8): 1296-1311.
- [28] Hajian Tilaki Karimollah. Receiver operating characteristic (ROC) curve analysis for medical diagnostic test evaluation[J]. Caspian Journal of Internal Medicine, 2013, 4(2): 627-635.

## Research on remote sensing identification of dolines with dense vegetation cover based on point cloud principal component analysis point cloud principal component analysis

FU Mingjun<sup>1,2</sup>, HE Yang<sup>3</sup>, DONG Xiujun<sup>3</sup>, DENG Bo<sup>3</sup>

(1. School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China; 2. Hainan Geological Environment Monitoring Station, Haikou, Hainan 570106, China; 3. State Key Laboratory of Geological Hazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract China's karst areas are widely distributed, with a total area of over 3.4 million square kilometers, accounting for one-third of the country's total land area. Karst engineering geological problems are widespread and difficult issues in the development of water conservancy and hydropower in Southwest China. In order to achieve the goals of "carbon peak" and "carbon neutrality", China is currently accelerating the construction of pumped storage power stations. However, karst leakage is one of the most important engineering geological problems faced by the construction of pumped storage power stations in areas with carbonate rock development. Therefore, in order to avoid reservoir leakage, it is of great significance to comprehensively, quickly, and accurately identify locations of dolines in reservoir and dam areas for water conservancy and hydropower engineering construction.

The traditional investigation of dolines in reservoirs mainly uses the method of manual ground investigation and drilling. However, in the mountainous areas with dense vegetation cover in Southwest China, manual investigation is often very inefficient and limited by the strong concealment of dolines, making it difficult to achieve accurate and efficient investigation of large-scale dolines. To solve the problem of low efficiency in the investigation of dolines in dense vegetation areas, this article takes a reservoir area of pumped storage power station as a study area and proposes an automatic identification method for dolines based on point cloud principal component analysis to quickly identify and extract dolines in the reservoir area.

The study area is located in the northeast of Sichuan Province, with an area of  $10 \text{ km}^2$ . It is situated at the junction of the Qianlongmen mountains and the northwest of the Sichuan basin, in the tilted core of the Yangtianwo area. The terrain slope is generally above  $30^\circ$ , and the maximum relative height difference in the area is 1,070 m. The main vegetation in the area is forest, consisting of evergreen broad-leaved secondary forests and shrubs. In the study area, carbonate rock formations, such as the Upper Devonian Maoba Formation (D<sub>3</sub>m), Shawozi Formation (D<sub>3</sub>s), and Middle Devonian Guanwushan Formation (D<sub>2</sub>g), are mainly exposed with strong karst development.

Firstly, airborne LiDAR technology was used to obtain ground 3D point cloud data in the study area after vegetation was filtered out. Then, in response to the strong directional characteristics of the concave shape of dolines, a preliminary extraction of dolines was achieved by the K-D tree nearest neighbor algorithm and principal component analysis, and an indicator eigenvalue ratio p was proposed. Finally, three filtering algorithms based on density clustering algorithm, namely, funnel frequency, length, and direction, were used to filter the background noise of the initial extraction results. The method used Receiver Operating Curve (ROC) to test the AUC value which was 0.854, and F-score is 0.859. This method is suitable for identifying and investigating dolines in karst areas with dense vegetation cover.

Key words airborne LiDAR, doline, point cloud, automatic identification, principal component analysis

(编辑 黄晨晖)