

# 基于GIS技术的茂兰喀斯特典型地貌提取与空间分布特征研究

柳华富<sup>1</sup>, 覃欧换<sup>2</sup>, 杨婷婷<sup>1</sup>, 陈正仁<sup>1</sup>, 张雁泉<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>贵州茂兰国家级自然保护区管理局, 贵州 荔波

<sup>2</sup>荔波县林业局, 贵州 荔波

收稿日期: 2021年9月4日; 录用日期: 2021年10月6日; 发布日期: 2021年10月14日

## 摘要

茂兰保护区喀斯特地貌十分发育且形态丰富多样, 以峰丛漏斗和峰丛洼地最为典型, 为进一步探索该类型地貌的空间规律和内部关系, 加深典型地貌的理解和认识, 以万分之一地形图为基础, 矢量化得到数字高程模型, 在ArcGis中利用工具提取地貌属性数据, 根据划分原则确定地貌类型, 采用Fisher判别法对分类的地貌结果进行验证, 同时确定未定义的地貌类型, 并建立判别方程。然后回传数据到ArcGis中修正数据, 利用密度制图、3D分析等多种方法相结合, 探讨了茂兰保护区典型地貌空间分布特征。其结果为: 1) 基于Fisher判别分析法对典型地貌分类验证, 正确率为91.9%, 判别方程可用于对典型地貌进行有效分类。2) 典型地貌水平空间分布划分为高、中、低三个密度等级区域, 其中, 漏斗高密度为5.09个·km<sup>-2</sup>、中密度2.93个·km<sup>-2</sup>、低密度0.9个·km<sup>-2</sup>; 洼地高密度为2.21个·km<sup>-2</sup>、中密度1.09个·km<sup>-2</sup>、低密度0.29个·km<sup>-2</sup>。3) 典型地貌在不同海拔上具有显著差异性表现。

## 关键词

漏斗, 洼地, 喀斯特, ArcGis, 判别分析, 茂兰保护区

# Study on Extraction and Spatial Distribution Characteristics of Karst Geomorphology in Maolan based on GIS Technology

Huafu Liu<sup>1</sup>, Ouahan Qin<sup>2</sup>, Tingting Yang<sup>1</sup>, Zhengren Chen<sup>1</sup>, Yanquan Zhang<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Guizhou Maolan National Nature Reserve Management Bureau, Libo Guizhou

<sup>2</sup>Libo County Forestry Bureau, Libo Guizhou

Received: Sep. 4<sup>th</sup>, 2021; accepted: Oct. 6<sup>th</sup>, 2021; published: Oct. 14<sup>th</sup>, 2021

\*通讯作者。

## Abstract

Manlan reserve karst landforms are well-developed and form rich variety, with peak cluster funnel and peak cluster depression is most typical, in order to further explore the types of the landscape space law and internal relations, deepening the understanding and awareness of the typical landforms, on the basis of one over ten thousand topographic maps, digital elevation model, vector quantization in ArcGis attribute data using tools to extract features. The geomorphic types were determined according to the classification principle. Fisher discriminant method was used to verify the classified geomorphic results, and the undefined geomorphic types were determined and the discriminant equation was established. Then, the data were returned to ArcGis to modify the data, and various methods such as density mapping and 3D analysis were used to discuss the spatial distribution characteristics of typical geomorphology in Maolan Reserve. The results were as follows: 1) Fisher discriminant analysis was used to verify the classification of typical landforms, and the accuracy was 91.9%. The discriminant equation could be used to effectively classify typical landforms. 2) The horizontal spatial distribution of typical geomorphology was divided into high, medium and low density regions, among which the density of funnel was  $5.09 \cdot \text{km}^{-2}$ , the density of funnel was  $2.93 \cdot \text{km}^{-2}$  and the density of funnel was  $0.9 \cdot \text{km}^{-2}$ . The high density, medium density and low density of the depression were  $2.21 \cdot \text{km}^{-2}$ ,  $1.09 \cdot \text{km}^{-2}$  and  $0.29 \cdot \text{km}^{-2}$  respectively. 3) There are significant differences in typical landforms at different elevations.

## Keywords

Funnel, Depression, Karst, ArcGis, Discriminant Analysis, Maolan Reserve

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

地貌即地球表面各种形态的总称，是地表自然环境最基本的组成要素，在控制地表自然环境的分异中具有十分重要的作用[1]。随着获取地表高精度三维数据的手段不断更新[2]，关于洼地的类型划分、空间分布[3]、全球或区域性洼地数据库[4]建设等的研究越来越多，其地貌学和环境学意义也进一步凸显。一些学者在GIS和遥感图像处理软件平台上进行地貌类型综合分析[5]，并取得了比较满意的结果，如龙恩、程维明等基于SrtmDEM与遥感对长白山区基本地貌类型方法进行了探讨；唐克斯、王芳等应用ArcGis对乌珠穆沁—蒙古国温都尔汗带海拔和地形起伏度进行叠加分析，得到了适合该区域地形特点的10种地貌类型指标[6]。前人在地貌类型划分主要集中于海拔、高度等单一地形因子进行分析，或单从遥感影像角度获取地貌形态特征，得到的结果不具备全面性和完整性[7]。本文借鉴相关研究成果，结合茂兰喀斯特地貌特点，将万分之一地形图进行人工矢量化，利用多平台进行提取及划分地貌类型，得到的数据更加科学合理。

## 2. 研究区概况

茂兰保护区位于贵州省荔波县境内，与广西壮族自治区接壤，属森林生态系统类型自然保护区，主要保护对象为中亚热带喀斯特森林生态系统、珍稀濒危野生动植物、洞穴、地下河及其生态系统。保护

区国土面积 21,285 hm<sup>2</sup>, 地理位置为 107°52'10"~108°45'40", 25°09'20"~25°20'50", 处于贵州高原向广西丘陵平原过渡的斜坡地带, 为北北东向缓倾斜褶皱构造部位, 地层岩性以白云岩和灰岩为主, 局部可见上石炭统及下二叠统灰岩分布, 岩层倾角多数小于 15°, 区内主要分布有漏斗、洼地、槽谷、盲谷及盆地等多种负向喀斯特形态[8]。全区地势西北高东南低, 最高处海拔 1080 m, 最低处海拔 430 m, 平均海拔 880 m 以上。保护区始建于 1984 年, 1987 年建立省级自然保护区, 1988 年批准为国家级自然保护区, 1996 年被联合国教科文组织批准纳入“人与生物圈”保护区网络成员, 2007 年批准为世界自然遗产保护地之一[9]。

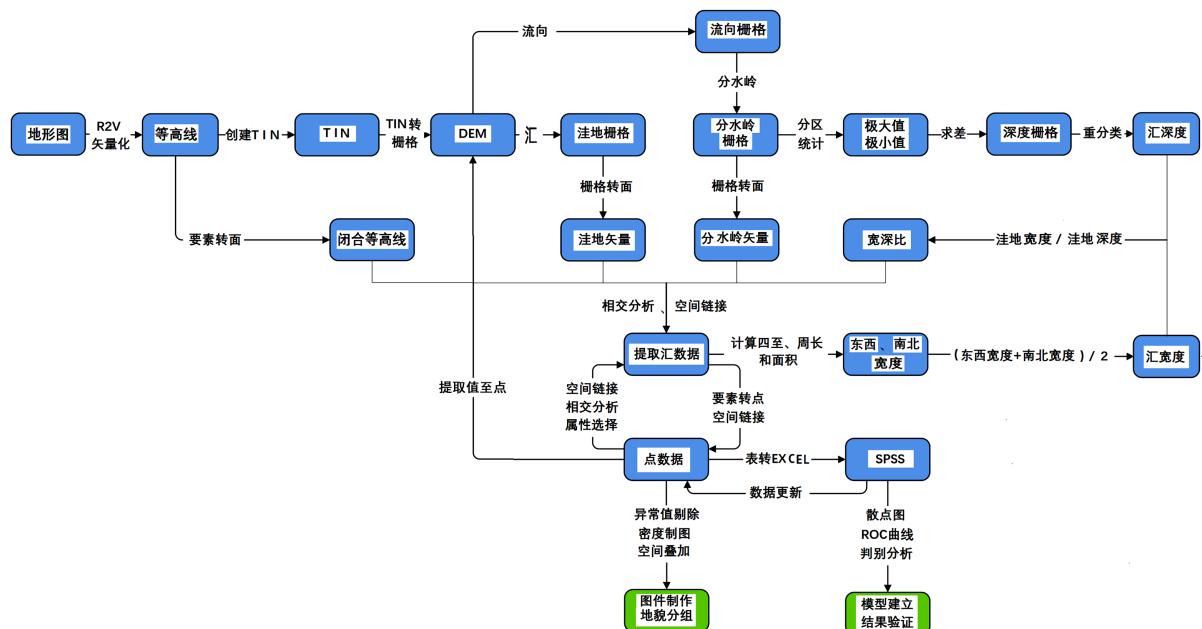
### 3. 材料与方法

#### 3.1. 图件采集

在 R2V (Raster 2 Vector) 中将地形图进行配准后, 矢量化等高线和小地名等并赋予属性值。底图利用高清正射影像图为参考。

#### 3.2. DEM 创建

数字高程模型(DEM/DEM<sub>s</sub>, Digital Elevation Model/Models)是对地形地貌的一种数字化的表达方式, 它是地形表面简单的、离散的数字表示模型[10]。建立 DEM 的方法根据从数据源及采集方式可分为: 一是直接从地面测量, 如利用全站仪进行野外采集; 二是根据遥感影像与无人机相结合, 通过摄影测量途径获取, 如立体坐标仪观测及空三加密法等; 三是从现有地形图上采集, 如格网读点法、数字化仪手扶跟踪及扫描仪半自动采集然后通过内插生成 DEM 等方法[11]。为提高数据精确, 本研究使用数字高程模型采用地形图数字化采集法, 即以茂兰保护区万分之一地形图为基础, 通过 R2V (Raster 2 Vector) 将等高线矢量化并赋高程值, 利用 ArcGis 对矢量化的等高线进行数据修正, 几何校正、裁剪, 由“TIN 工具”生成 TIN (Triangulated Irregular Network), 再转换得到高精度的 DEM, 见图 1。



**Figure 1.** Roadmap for typical landform research of Maolan Protection Reserve  
**图 1.** 茂兰保护区典型地貌研究路线图

### 3.3. 数据提取

在 ArcGis 中低洼地范围的获取可以通过两种方法来实现, 一种是通过确定片区低洼地最高水位值, 用提取等值线的方式[12]得到低洼地的范围线, 另一种是通过水文分析中的填洼 DEM 的方式得到[13]。洼地边界确定主要有以洼地周围最高点的连线、以洼地边缘的分水岭、经过洼地边缘最低点的等高线等三种方法[14]。经过洼地边缘最低点的等高线确定洼地边界, 具有很强的可操作性和结果的一致性[15]。茂兰喀斯特漏斗底部宽度 10~200 m 不等, 深一般为 100~250 m, 底宽与深之比小于 0.5。洼地底部宽度 200~1000 m 不等, 深度 100~300 m 底宽与深之比大于 0.5, 面积一般小于 0.5 平方公里。盆地为面积大于 1 平方公里的大型喀斯特洼地[16], 见表 1。

**Table 1.** Classification of typical karst landforms in Maolan Nature Reserve

**表 1.** 茂兰保护区喀斯特典型地貌划分

地貌类型	形态特征	宽度	深度	底宽与深比	面积
漏斗	形态深陷而陡峻的倒圆锥状、椭圆锥状或不规则状封闭洼地	10~200 m	100~250 m	$\leq 0.5$	
洼地	洼地规模则比漏斗大, 形态相对较宽坦的封闭低洼地形	200~1000 m	100~300 m	$\geq 0.5$	小于 0.5 平方公里
盆地	大型喀斯特洼地				一般大于 1 平方公里

#### 3.3.1. 属性数据的提取

1) 宽度的提取: 以 3.2 得到的 DEM 为基础, 利用“汇”工具提取“汇栅格”, 将“汇栅格”导入到“栅格转面”工具中, 得到矢量汇数据, 这样得到汇矢量数据锯齿形的折刺较多, 线条不够平滑, 因此, 需将该数据与等高线作相交选择, 选择相交的等高线导出新数据, 再由该数据导入“要素转面”工具中得到新的“汇”, 在“汇”属性中分别建立四至、周长和面积等字段并计算相应的属性值, 以四至为基础确定东西和南北宽度, 通过算数平均得到宽度, 见图 1。

2) 深度的提取: 以 3.2 得到的 DEM 为基础, 利用“流向”工具获得“流向栅格”, 将“流向栅格”导入“分水岭”工具中得到“分水岭栅格”, 以“分水岭”和“DEM”为基础, 通过“分区统计”计算地貌的极大值和极小值, 导入到“地图代数”求差得到“深度栅格数据”, 将该数据重分类后得到的栅格转面, 提取非零值的部分得到所要的低洼地面得到深度, 再由“空间链接”到(1)中的“汇”, 以此计算得到宽深比, 见图 1。

#### 3.3.2. 典型地貌的定义

在 ArcGis 中, 通过表 1 给定的条件筛选出符合的“汇”, 定义地貌类型。漏斗筛选条件为:  $0.1 \leq [\text{深度}] \leq 0.25 \text{ AND } [\text{宽度}] \leq 0.2 \text{ AND } [\text{宽深比}] \leq 0.5$ ; 洼地为:  $0.1 \leq [\text{深度}] \leq 0.3 \text{ AND } 0.2 \leq [\text{宽度}] \leq 1 \text{ AND } [\text{宽深比}] \geq 0.5 \text{ AND } [\text{面积}] \leq 0.5$ ; 盆地为:  $[\text{面积}] \geq 0.5$ 。将定义的地貌类型分别叠加到万分之一地形图和正射影像图中, 利用“边界修饰”修改有偏移的地貌边界并剔除异常值, 将修改后的结果导出到外业调查软件中, 在野外选择部分地貌进行验证。

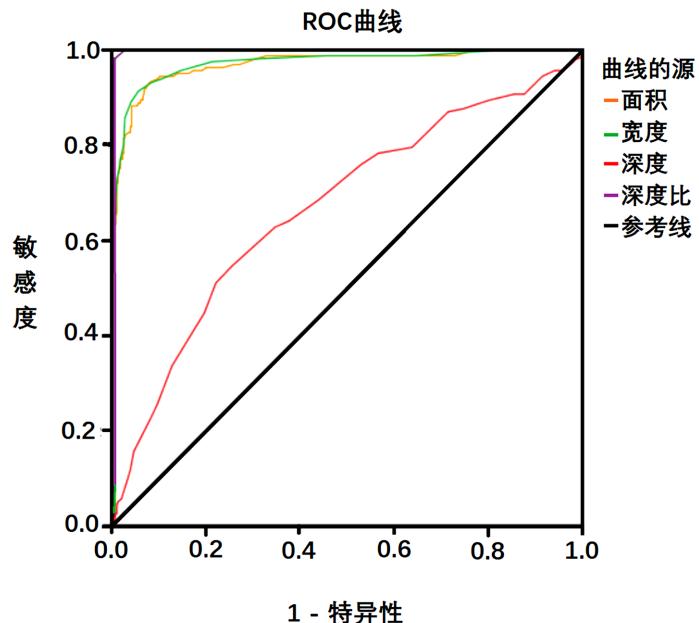
## 4. 结果与分析

### 4.1. 判别分析与多重比较

#### 4.1.1. 判别函数建立

判别分析是根据判别对象若干个指标的观测结果判定其应属于哪一类的数据统计方法[17]。判别分析

可在已知分类情况下, 通过计算提取特征值对样本进行归属统计[18]。根据表1, 对判定因子进行 Pearson 相关性检验, 深度与宽深比、宽度相关性较强, 存在多重共线性, 基于 ROC 曲线进行变量重要性分析, 结果表明深度面积仅为 0.668, 对地貌判别的敏感度最低(面积为 0.966, 宽度为 0.969, 宽深比为 0.993), 见图2, 剔除“深度”变量, 以面积、宽度和宽深比为基础, 建立 Fisher 判别分析模型。



**Figure 2.** ROC curve of the decision variable  
**图 2.** 判定变量 ROC 曲线

**Table 2.** Abstract of discriminant function  
**表 2.** 判别函数摘要

函数	特征值	方差百分比	累积 %	规范相关性
1	1.637a	60	60	0.788
2	1.092a	40	100	0.723

通过表2可知, 根据地貌划分变量数据特征计算出2个判别函数的特征值为均大于1, 各自占有较大的方差百分比(分别为60%和40%), 表明两函数对样本特征都具有较强的解释性。规范相关性相关系数越大, 说明该函数轴上的类别差异越明显, 两函数规范相关性均在0.7以上, 因此接受两个判别函数。

**Table 3.** Canonical discriminant function coefficients  
**表 3.** 规范判别式函数系数

	函数	
	1	2
面积	41.307	-4.47
宽度	-3.813	6.247
宽深比	-2.681	0.11
(常量)	1.121	-0.896

根据表3, 求得其判别式为:

$$Y_1 = -2.681X_{\text{宽深比}} - 3.813X_{\text{宽度}} + 41.307X_{\text{面积}} + 1.121;$$

$$Y_1 = -0.11X_{\text{宽深比}} - 6.247X_{\text{宽度}} - 4.47X_{\text{面积}} - 18.397$$

#### 4.1.2. 判别函数检验

由表4可知, 在原始地貌定义中, 漏斗和盆地全部定义正确, 将45个洼地定义成漏斗, 将2个洼地定义成盆地。原始分类正确率为91.9%, 采用留一个类法交叉验证, 正确率也为91.9%, 表明581个典型地貌样本所构建的判别分析模型不仅对已知类别样本分类效果良好, 并且对经过交叉验证的未知类别的地貌也能很好地分类[19], 实现了对典型地貌分类的目的, 该方法能对典型地貌进行有效的分类识别。

Table 4. Classification Results Verification Table a, c

表4. 分类结果验证表 a, c

分类	预测组成员资格			总计	
	漏斗	洼地	盆地		
原始	漏斗	417	0	0	417
	计数	洼地	45	114	161
		盆地	0	0	3
		漏斗	100	0	100
	%	洼地	28	70.8	100
		盆地	0	0	100
交叉验证 <sup>b</sup>	漏斗	417	0	0	417
	计数	洼地	45	114	161
		盆地	0	0	3
		漏斗	100	0	100
	%	洼地	28	70.8	100
		盆地	0	0	100

(a) 91.9%正确分类的原始分组个案;

(b) 仅为分析中的个案进行交叉验证;

(c) 91.9%正确分类的交叉验证分组个案。

#### 4.2. 水平空间分布

通过密度制图, 茂兰保护区典型喀斯特地貌水平空间分布具有显著的聚集或离散分布特征。依据地貌密度的相对大小, 将保护区划分为高密度区、中密度区和低密度区。其中:

漏斗高密度区平均密度为5.09个·km<sup>-2</sup>, 总数为80个, 区域面积15.6950 km<sup>-2</sup>。均位于保护区内部, 主要分为3个片区, 第一片区包括务阶、浪岜、弄堂一带, 近似纵向分布; 第二片区包括下洞登、小卡、里古洞等地, 第三片区涉及蓝靛和洞多, 总体呈东北-西南走向。中密度区数量庞大, 个数占总数0.59%, 中密度区的个数占整个保护区主导地位, 其平均密度2.93个·km<sup>-2</sup>, 主体分布于高密度区外围, 集中分布在中部和东部, 中部片区包括格浪、高山、洞地、麻洞、万里卡、洞登坡等, 呈“L”型; 东部片区分布于茂兰西北角, 包括洞梁、洞约、旺牌山等; 低密度区为0.9个·km<sup>-2</sup>, 受中密度分割影响, 低密度区分

布在东西两个片区, 见图3和表5。

洼地高密度区为2.21个· $\text{km}^{-2}$ 、集中分布于保护区核心地段, 呈东北-西南走向, 包括坡报、四北洞、洞棒等; 中密度区为1.09个· $\text{km}^{-2}$ 、分布区域与漏斗中部区域相重叠, 以龙塘、洞翁、水倒、闷水一线以北分布。低密度为0.29个· $\text{km}^{-2}$ , 分布于保护外围, 其中西北角和东北角总体呈近似纵向分布, 西南角呈水平分布, 由于中密度区的分割, 低密度区分布相对分散。高、中、低三个密度区呈明显包含关系, 见图4和表5。

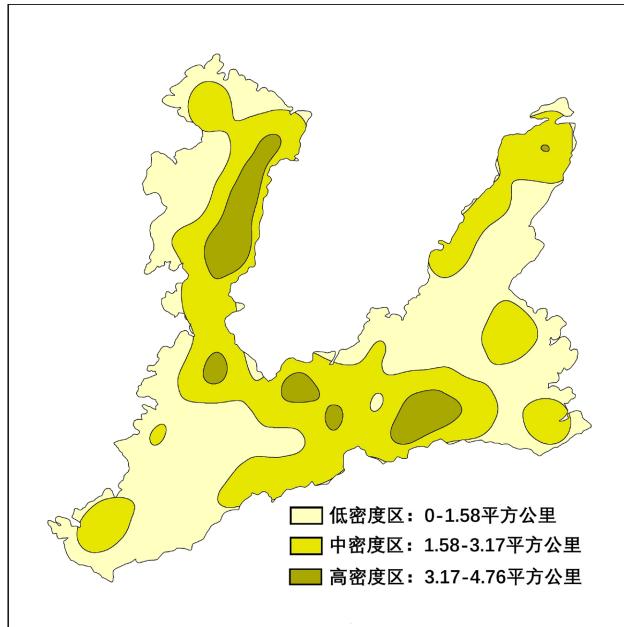


Figure 3. Funnel density diagram

图3. 漏斗密度图

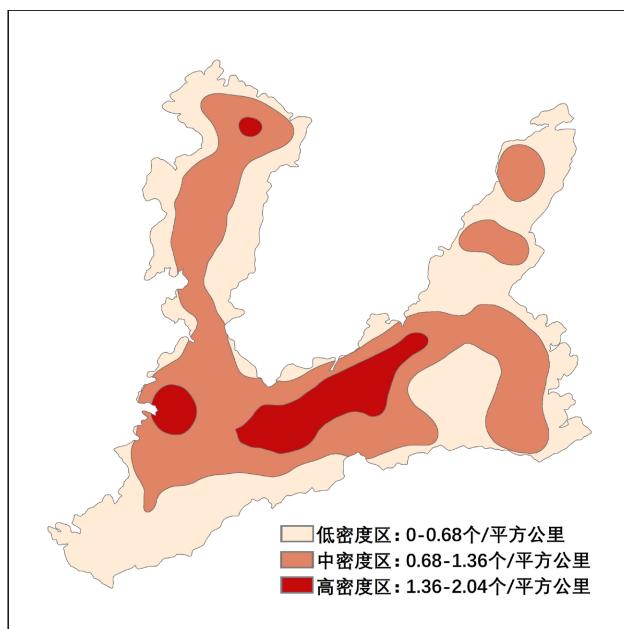


Figure 4. Density map of depressions

图4. 洼地密度图

**Table 5.** Statistical table of typical landform density grade distribution**表 5. 典型地貌密度等级分布统计表**

地貌	分区	面积/km <sup>2</sup>	面积百分比/%	个数	个数百分比/%	密度/(个·km <sup>-2</sup> )
漏斗	低密度区	99.3568	0.50	89	0.21	0.90
	中密度区	84.5660	0.42	248	0.59	2.93
	高密度区	15.6950	0.08	80	0.19	5.09
洼地	低密度区	95.2244	0.45	28	0.17	0.29
	中密度区	96.3455	0.46	93	0.55	1.09
	高密度区	18.0479	0.09	48	0.28	2.21

### 4.3. 垂直空间分布

茂兰保护区喀斯特漏斗的形态、分布高程等随所处地貌部位均有所差异。以板寨北东向断裂侧为界,东、西两侧漏斗及分布有差异最为明显。根据漏斗形态特点在高程上分布的不同,可将漏斗划分为三级,见表 6。

第一级的漏斗剖面形态比较宽浅,高程最高。板寨以东为 640~670 m,板寨以西为 830~870 m,属于局部地带分布,位于洞多、比巴等地。第二级的漏斗剖面形态相对较陡,分布高程中等,板寨以东为 520~600 m,板寨以西为 720~760 m。其分布最为广泛,规模最大,形态复杂,以莫干东南、板寨东南一带最为典型。第三级的漏斗剖面形态深邃,底部狭窄,是区内高程最低的漏斗,板寨以东从为 440~480 m,板寨以西为 600~660 m,分布于干排、洞落、板寨一线以南。

**Table 6.** Funnel elevation grade distribution table**表 6. 漏斗高程等级分布表**

级别	剖面形态	高程分布	板寨以东	板寨以西	分布范围	主要分布区域
一	比较宽浅	最高	640~670 m	830~870 m	局部地带	洞多、比巴等
二	相对较陡	中等	520~600 m	720~760 m	全区分布	莫干、板寨等
三	比较深邃	最低	440~480 m	600~660 m	全区分布	干排、洞落等

茂兰喀斯特洼地的形态、规模及发育程度,随构造地貌部位不同而有较大的差异。板寨以东为 450~600 m,板寨以西为 680~800 m。喀斯特洼地在高程分布上呈明显的成层性:东部必达分布为 610~620 m、520~530 m 两级洼地;塘边以南为 580~600 m、450~470 m 两级洼地。洞多、比巴一带,成层性喀斯特洼地十分发育,普遍可分三级,例如从洞多至更久,有三级底面平坦的喀斯特洼地作梯级下降,其高程为 680~700 m、610~620 m、560~570 m;洞多以南,三级洼地地面的高程分别为 740~760 m、680~700 m、620~640 m;比巴至落一带则分别为 750~760 m、710~720 m、610 m,茂兰喀斯特部分地貌剖面见图 5。

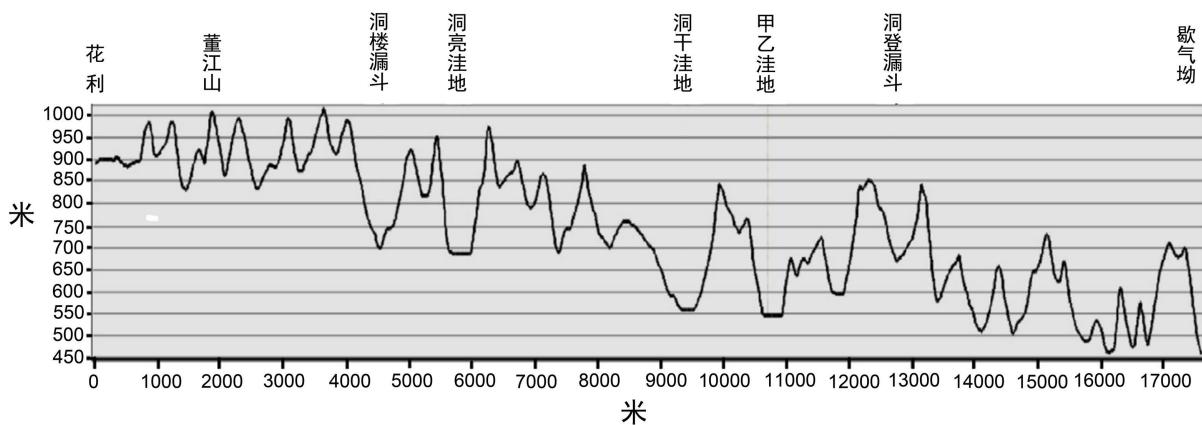


Figure 5. Georophic profile of Huali to Xieao  
图5. 花利至歇气坳地貌剖面图

## 5. 结论

一、传统的地貌类型划分是在地形图上简单描绘或者野外勾绘，多以定性为主，由于人为误差等主观因素，导致精度低，数据可操作性不强[20]，喀斯特地貌类型复杂多样，区域差异显著，不能按传统的指标来划分地貌类型。

二、本研究探索了茂兰喀斯特地貌在空间上的分布规律和内在关系，对茂兰保护区漏斗、洼地和盆地三种典型地貌进行了科学地划分，建立了漏斗和洼地地貌的分类模型，模型分类效果极佳，实现了对典型地貌分类的目的，该模型同样适用于邻近的喀斯特地区的地貌分类，为指导喀斯特地貌划分中提供了一定的参考依据。

三、在数据处理中，将电子栅格地形图作为底图，采用 R2V 软件对地形图进行矢量化，提高了图形数据采集的自动化程度和数据采集速度，精度更有保证，且方法简单易行、成本经济小，采用 ArcGis 和 SPSS 等软件来进行其他后续处理，有效地实现了软件之间的优势互补[21]。

## 参考文献

- [1] 李炳元, 潘保田, 程维明, 等. 中国地貌区划新论[J]. 地理学报, 2013, 68(3): 291-306.
- [2] Theilenwillige, B., Malek, H., Charif, A., et al. (2014) Remote Sensing and GIS Contribution to the Investigation of Karst Landscapes in NW-Morocco. *Geosciences*, **4**, 50-72. <https://doi.org/10.3390/geosciences4020050>
- [3] Wall, J., Bohnenstiehl, D.W.R., Wegmann, K.W., et al. (2017) Morpho-Metric Comparisons between Automated and Manual Karst Depression Inventories in Apalachicola National Forest, Florida and Mammoth Cave National Park, Kentucky, USA. *Natural Hazards*, **85**, 729-749. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2600-x>
- [4] Chen, Z., Auler, A.S., Bakalowicz, M., et al. (2017) The World Karst Aquifer Mapping Project: Concept, Mapping Procedure and Map of Europe. *Hydrogeology Journal*, **25**, 771-785. <https://doi.org/10.1007/s10040-016-1519-3>
- [5] 龙恩, 程维明, 周成虎, 等. 基于 SRTM-DEM 与遥感的长白山基本地貌类型提取方法[J]. 山地学报, 2007, 25(5): 557-564.
- [6] 唐克斯, 王芳, Bat-Erdene Tsedev, Dash D, 乌兰图雅. 基于 DEM 数据对典型草原地貌特征提取与分析[J]. 内蒙古科技与经济, 2020(9): 50-51, 54.
- [7] 常直杨, 王建, 白世彪, 等. 基于 SRTM DEM 数据的三峡库区地貌类型自动划分[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(12): 1665-1669.
- [8] 周政贤. 茂兰喀斯特森林综合考察报告[C]//马归燕, 毛志忠, 等. 茂兰喀斯特森林科学考察集. 贵阳: 贵州人民出版社, 1987: 1-5.
- [9] 蒙惠理, 兰洪波. 茂兰自然保护区野生动植物资源现状及保护对策[J]. 黔南民族师范学院学报, 2010(3): 54-55.

- 
- [10] 黄健. 数字高程模型的质量检查[J]. 测绘通报, 2002(2): 55-56.
  - [11] 百度文库. 建立 DEM 的方法[DB/OL].  
<https://wenku.baidu.com/view/ba561b3167ec102de2bd890b.html>, 2011-11-10.
  - [12] 胡鹏, 黄杏元, 华一新. 地理信息系统教程[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2002: 120-125.
  - [13] 蒋芳芳, 曹起铜. ARCGIS 环境下基于 DEM 的城市低洼地信息提取应用研究[J]. 浙江测绘与地理信息, 2016(2): 222-223.
  - [14] 丁智强, 俞筱押, 高璇, 李玉辉. 云南石林县域喀斯特洼地空间分布特征及影响因素研究[J]. 中国岩溶, 2019(3): 326-327.
  - [15] Telbisz, T., Draguica, H. and Nagy, B. (2009) Doline Morphometric Analysis and Karst Morphology of Biokovo Mt (Croatia) Based on Field Observations and Digital Terrain Analysis. *Hrvatski Geografski Glasnik*, **71**, 5-22.  
<https://doi.org/10.21861/HGG.2009.71.02.01>
  - [16] 李忠兴, 李双岱. 茂兰喀斯特森林地貌景观[C]//马归燕, 毛忠志, 等. 茂兰喀斯特森林科学考察集. 贵州: 贵州人民出版社, 1987: 44-49.
  - [17] 陈强正, 曾凡清, 周建军, 梁卫民. 3104 铝合金易拉罐划模缺陷产生的原因及其控制措施[J]. 轻合金加工技术, 2019(10): 58-61.
  - [18] 马枭, 王丹, 姜红, 满吉. 判别分析结合系统聚类对易拉罐环的 XRF 检验[J]. 山东化工, 2020(14): 142-143.
  - [19] 何欣龙, 王继芬, 刘文浩, 等. 拉曼光谱结合聚类分析法区分检验塑钢窗[J]. 化学研究与应用, 2017, 29(9): 1387-1392.
  - [20] 杨晏立, 何政伟, 杨斌, 等. 最佳因子复合的四川省地貌类型自动划分[J]. 陕西理工学院学报(自然科学版), 2009, 25(4): 74-79.
  - [21] 糜万林, 张成宇, 高平伟, 韩钢, 郑昊伦. R2V 中扫描地图矢量化研究[J]. 内蒙古林业调查设计, 2018(5): 55-56.