山克强.基于数字高程模型的岩溶地貌类型划分:以1∶50 000西南岩溶区地质填图试点为例[J].中国岩溶,2021,40(2):334-345.
DOI:10.11932/karst20210210

基于数字高程模型的岩溶地貌类型划分——以1∶50 000西南岩溶区地质填图试点为例

山克强
(中国地质科学院岩溶地质研究所, 广西 桂林 541004)

摘 要:数字高程模型可以定量描述地貌,而基于峰丛洼地实体的岩溶地貌量化统计方法目前尚未确立。文章在1∶50 000地质测量的基础上,将西南岩溶区地质填图试点地区的地层重新划分组合为火山岩层组、碎屑岩层组、灰岩层组、白云岩层组、泥灰岩层组、灰岩碎屑互层层组、白云岩碎屑岩互层层组7种层组类型;基于1∶50 000数字地形图构建了研究区数字高程模型(DEM),通过空间分析技术建立了区域洼地锥峰DEM,以岩溶层组为统计单元,分析出各个单元的锥峰洼地数字特征,并定义锥峰洼地发育系数(k),量化峰丛洼地发育程度,将研究区地貌划分为5种地貌类型:峰丛洼地($k>8.5$),锥峰洼地极为发育;峰丛谷地($1.9<k\leqslant 8.5$),锥峰较为发育,洼地中等发育;丘岭谷地($0.9<k\leqslant 1.9$),锥峰弱发育,洼地极少发育;溶蚀中山($0<k\leqslant 0.9$),锥峰、洼地极少发育;侵蚀中山($k=0$),发育冲沟,无岩溶形态发育。

关键词:乌蒙山;岩溶地貌;高程模型;层组;地貌类型
中图分类号:P931.5;P623 **文献标识码**:A
文章编号:1001-4810(2021)02-0334-12 **开放科学(资源服务)标识码(OSID)**:

0 引 言

云贵高原北部乌蒙山地区属亚热带湿润季风区,水热资源适中,年平均气温为10.5~15.0 ℃,年平均降水量在848.6~1 394.4 mm,70%左右的降水量集中在5-9月;区内灰岩分布广泛,厚度大,经地表水和地下水的溶蚀作用,发育典型的浅碟形峰丛洼地岩溶地貌,是世界上岩溶地貌最为发育的地区之一[1-2]。从岩溶动力学角度看,岩溶作用是碳循环及与其相耦合的水循环及钙循环过程中发生的可溶性岩石的溶蚀或沉积[3-10],岩溶形态则是这一过程的地形体现。因此,对岩溶形态的识别和分类是岩溶地貌研究的一个重要方面。近年来,通过一系列岩溶形态测量工作,建立了多种描述岩溶形态空间结构的数字模型[11-12],促使岩溶地貌的研究由定性描述走向定量分析[13]。本文在1∶50 000地质调查的基础上,综合地质填图试点地区可溶性岩石的类型及其分布特征划分岩溶层组,基于区域数字高程模型(DEM)数据提取了锥峰洼地数字高程模型,量化出不同岩溶层组内洼地、锥峰的空间分布组合特征,并划分了区域地貌类型;以数字高程模型为基础精确刻画了浅碟形峰丛洼地的形态特征,定量分析了峰丛洼地的结构特征,在基于数字高程模型构建峰丛洼地几何结构、以定量数据为基础划分岩溶地貌类型方法方面进行了探索,以期为岩溶地貌的定量演化研究提供数据基础。

资助项目:中国地质调查局地质调查项目(DD20190672、DD20160060、12120114042601、DD20160061)
作者简介:山克强(1984-),男,助理研究员,从事岩溶区碳酸盐岩沉积学及区域地质填图工作。E-mail:shankeqiang@karst.ac.cn。
收稿日期:2020-10-10

1　地质背景

研究区位于上扬子地台西南缘，包括大湾、母享、燕子口、柱钟 4 幅 1∶50 000 标准图幅，总面积有 1 800 km²，其空间跨度小，气候、生物等外部自然环境条件一致，地貌分异的主要因素是地质构造导致的岩溶层组在空间分布上的差异性。区域内出露最古老的地层为寒武系清虚洞组浅海潮坪相灰岩、白云岩组合，陡坡寺组为滨浅海砂岩、粉砂岩组合，娄山关组为厚度巨大的潮坪相白云岩、硅质团块白岩组合；奥陶系—志留系地层出露不全，主体为浅海陆棚相碎屑岩夹灰岩；缺失泥盆系、石炭系及下二叠统地层；中二叠统底部为梁山组滨岸相石英砂岩夹煤线，之上为栖霞组、茅口组巨厚层浅海台地相灰岩；中二叠世晚期区域发生构造隆升，茅口组顶部灰岩遭受不同程度的风化侵蚀，发育古岩溶面；上二叠统龙潭组为三角洲相碎屑岩夹灰岩组合，上部长兴组为浅海台地相灰岩；三叠系下统飞仙关组为潮坪相岩屑砂岩—粉砂岩组合，中上统嘉陵江组、关岭组为浅海台地相灰岩—白云岩组合，顶部为局限台地相白云岩—灰岩组合；侏罗系为陆相河湖碎屑岩沉积。区域内可溶性岩石主要形成于寒武纪芙蓉世、中二叠世及中晚三叠世三个时期，不同时期构造与气候导致的沉积相的变化致使可溶性岩石在类型、结构、构造上各不相同[14]。燕山运动使上述地层岩石发生褶皱变形，构成典型的侏罗山式褶皱，背斜向斜相间分布，随后的喜马拉雅运动使区域发生阶段性的大规模抬升，铸就了区域北东—南西向的构造格局(图 1)。

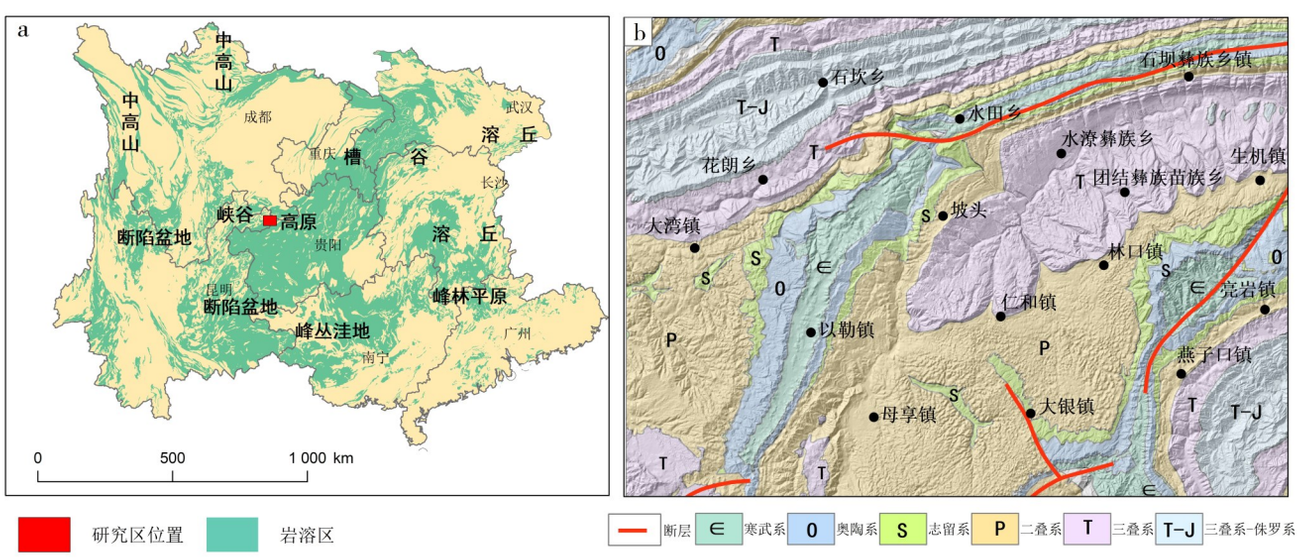

图 1　西南岩溶区分布图[2]及研究区地质简图

Fig. 1　Distribution of karst areas in southwestern China and simplified geologic map of the study area

2　研究方法

岩溶形态是岩溶地貌的基本构成单元。研究区内以浅碟形峰丛洼地为主，比高(洼地至锥峰的相对高差)大多小于 200 m，属热带岩溶地貌区，黔中高原浅碟形峰丛洼地亚区(图 1a)[2]。区内岩溶形态类型丰富多样，地表发育锥峰(溶丘和锥峰是研究区发育的两类不同的岩溶形态，分析中侧重锥峰、溶丘两种正地形发育的数量，其形态不作为分析的依据，文中未就二者的形态做进一步的区分，锥峰泛指区域发育的锥峰和溶丘)、谷地、洼地、穿洞、石牙、溶沟、溶槽等，地下发育溶洞、地下河、石笋、石钟乳等。锥峰、洼地两种岩溶形态较为重要，其发育程度同其他类型岩溶形态的发育程度呈正相关，锥峰、洼地发育的区域，形成地貌的主要营力为溶蚀作用，地表水主要通过地下裂隙管道汇入地下河系统，形成地表水匮乏、地下水丰沛的特点，石牙、溶沟、溶洞、石笋等地表及地下岩溶形态类型丰富、数量众多。锥峰、洼地弱发育的区域，地貌发育受溶蚀、侵蚀作用共同主导，地表水一部分通过地表径流汇出，一部份存蓄于地下裂隙管道内，地表及地下岩溶形态类型和数量均随着锥峰、洼地数量的减少而减少。因此，锥峰、洼地两种岩溶形态的发育特征是本文地貌类型划分的重要指标。

基于1∶50 000数字地形图建立研究区数字高程模型，提取锥峰、洼地DEM，通过实地形态测量数据、高精度数字地表模型（DSM，获取无人机航拍倾斜测量数据，空间分辨率为30 cm，由MapGIS、ImageJ及smart3D capture软件处理数据，图2）的验证对比，DEM可以准确反映锥峰、洼地形态的三维空间特征（图3）。锥峰、洼地等岩溶形态仅发育于可溶性岩石出露的区域，可溶性岩石受矿物成分、岩石结构、出露厚度等的影响，溶蚀程度不一。因此，依据岩石可溶性及其出露特征将研究区域划分为不同的岩溶层组，以岩溶层组为基本单元，以不同岩溶层组内部锥峰、洼地的发育特征为依据，划分地貌类型。

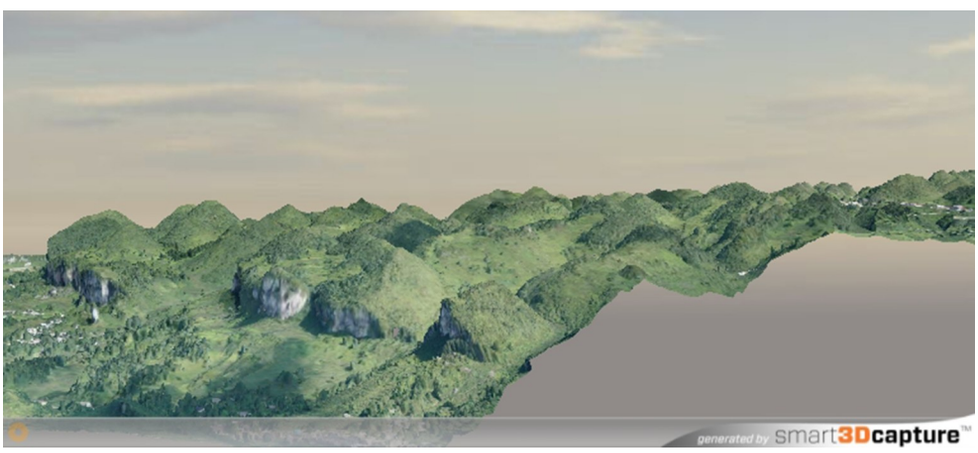

图2 工作区南部母享镇区域地表三维模型

Fig. 2 3D surface model of Muxiang town in southern study area

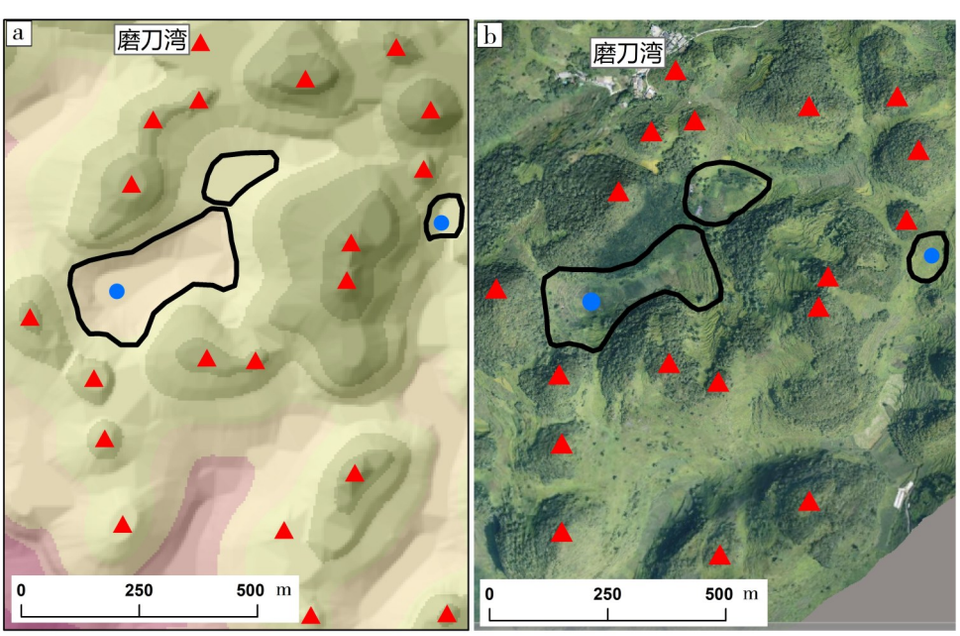

图3 数字地形模型（DEM）同高精度数字地表模型（DSM）数据锥峰洼地解译精度对比

Fig. 3 Comparison of spatial resolution between digital elevation model (DEM) and high resolution digital surface model (DSM)

（红色三角形为解译的锥峰，黑色线条为解译的洼地边缘，蓝色圆点为解译的洼地的最低位置）

a. 基于1∶50 000数字地形图建立的DEM（空间分辨率为10 m） b. 基于无人机航拍倾斜测量数据建立的DSM（空间分辨率为30 cm）

3 锥峰、洼地高程模型构建

基于1∶50 000地形图建立高精度DEM，以有序数字阵列的形式存储高程数据，将地形图转换为可度量的栅格数据，数字化表达区域地形信息。

基于GIS空间分析，对具有闭环环状构造的数据

值进行洼地填平分析，构建洼地DEM数据，采用相对高差值表示洼地的形态特征。分析中，洼地是指由锥峰和锥峰间的鞍部所形成的环形封闭区域，计算洼地边缘锥峰和鞍部的绝对高程值(H)，统计其中的最小值(H_{min})，将洼地内部坡面上的H_{min}连成一条闭合的线，该闭合线条即为洼地边缘，洼地边缘是一个水平面，以平面处为洼地相对高差值0 m，向下用负数表示洼地内任一点至洼地边缘的相对高差，洼地底部至洼地边缘的最大相对高差，即为洼地的深度。将区域DEM数据高程值(H)作计算：H×(−1)，将高程变为负值，使地形倒转，锥峰转换为洼地，计算倒转后的洼地的边缘即为实际中锥峰的边缘，构建锥峰DEM数据，锥峰基座边缘为一个水平面，以平面处相对高差值为0 m，向上用正数表示锥峰上任一点至锥峰边缘的相对高差。合并锥峰DEM及洼地DEM，建立锥峰、洼地DEM(图4)，图中岩溶层组出露区域锥峰、洼地数量众多，图斑呈孤立岛状，而非岩溶层组出露区域，仅能提取少量洼地，孤立山峰数量少且面积大，为块状图斑。

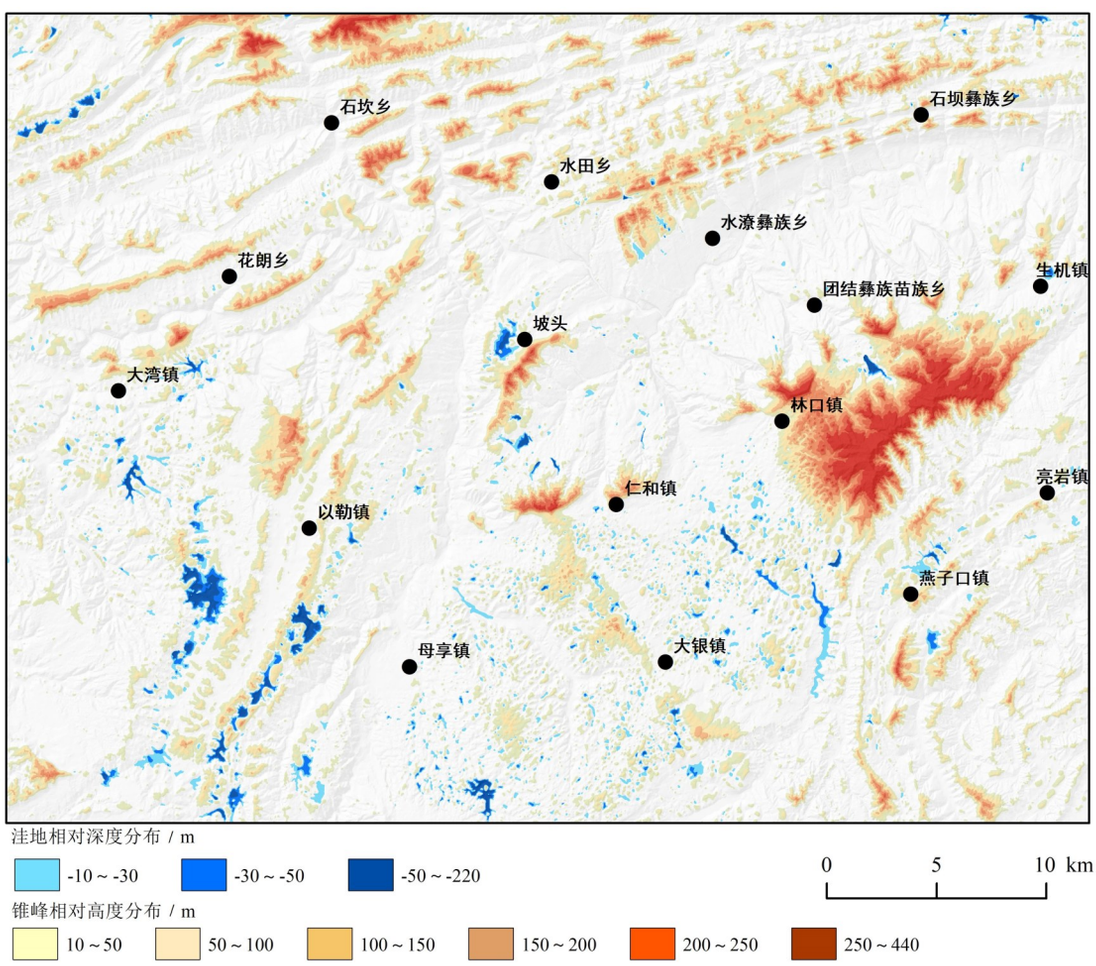

图4　岩溶区峰丛洼地DEM

Fig. 4　DEM of karst peak clusters and depressions

注：蓝色部分指示洼地形态特征及空间分布；红色部分指示峰丛形态特征及空间分布；数值表示洼地和锥峰的相对高差，高差正值表示相对形态边缘上凸的正地形形态高差，高差负值表示相对形态边缘下凹的负地形形态高差。

4　岩溶层组划分

岩溶层组划分是将区域出露的岩石按岩石类型、可溶性、出露厚度、可溶性同非可溶性岩石的组合及相对含量等重新划分为不同的岩石组合[15]，其是岩溶地貌类型划分的基础空间单元。研究区出露的岩石主要为火山岩类、碎屑岩类及化学岩类(表1)，碎屑岩类、火山岩类及其他化学岩类为非可溶性岩石(蒸发岩不发育，不计入统计)，可溶性岩石主体为碳酸盐岩。依据方解石、白云石及黏土的含量将

碳酸盐岩进一步命名为灰岩、白云岩、泥灰岩、泥云岩等(表2,表3)[16-18]。

依据研究区1∶2 000及更大比例尺实测地层剖面数据,以剖面描述中的分层记录为统计单元,利用分层记录中的岩性特征,将连续出露厚度大于10 m的岩性层划分为一个层组[5];对连续出露厚度小于10 m的岩性层,则向上同相邻层合并,灰岩(或白云岩)碎屑岩等厚产出的岩层命名为灰岩(或白云岩)碎屑岩互层层组,如层中某一岩石类型含量超过50%,则按该岩石类型划分层组类型。据此,将研究区岩石地层划分为灰岩层组、白云岩层组、碎屑岩层组、火山岩层组、泥灰岩层组、灰岩碎屑岩互层层组、白云岩碎屑岩互层层组7种类型(表4),并编制出研究区域岩溶层组分布图。

表1 研究区岩石类型

Table 1 Rock types of the study area

岩浆岩	沉积岩			
火山岩类	碎屑岩类		化学岩类	
	陆源	火山碎屑岩	其他化学岩	碳酸盐岩
玄武岩	砾岩	集块岩	铝质岩	蒸发岩
	砂岩	火山角砾岩	铁质岩	
	粉砂岩	凝灰岩	锰质岩	
			磷质岩	
	泥质岩		硅质岩	
			可燃有机岩	
	非可溶性岩石			可溶性岩石

表2 灰岩白云岩划分

Table 2 Classification of limestone and dolomite

岩类	方解石/%	白云石/%	岩石名称
灰岩类	50~100	0~50	灰岩
白云岩	0~50	50~100	白云岩

表3 灰岩、白云岩与泥岩的过渡类型岩石

Table 3 Transitional type rocks of limestone, dolomite and mudstone

岩类	方解石或白云石/%	黏土矿物、有机质、硅质/%	岩石名称
灰岩或白云岩类	75~100	0~25	灰岩、白云岩
不纯灰岩或不纯白云岩类	50~75	25~50	泥灰岩、泥云岩、燧石灰岩、燧石白云岩
泥岩类、有机质岩、硅质岩	0~50	50~100	泥岩、煤、硅质岩

表4 研究区岩溶层组类型的特征

Table 4 Characters of the karst strata

岩溶层组类型	分层描述岩石组合	说明
灰岩层组	灰岩	连续出露厚度>10 m
白云岩层组	白云岩	
碎屑岩层组	砾岩(陆源)、砂岩、粉砂岩、泥质岩、凝灰岩	
火山岩层组	玄武岩	
泥灰岩层组	黏土质灰岩、泥灰岩	
灰岩碎屑岩互层层组	灰岩碎屑岩互层	单个岩性层连续厚度<10 m,灰岩(白云岩)、碎屑岩大致等厚产出
白云岩碎屑岩互层层组	白云岩碎屑岩互层	

区内可溶性岩石同非可溶性岩石均有出露,可溶性岩溶层组占区域总面积的53.4%,其中以灰岩层组为主(695.19 km^2,38%),白云岩层组次之(162.54 km^2,8.9%),而灰岩碎屑岩互层层组(50.2 km^2,2.7%)、白云岩碎屑岩互层层组(43.3 km^2,2.4%)及泥灰岩层组(26.7 km^2,1.5%)出露较少。空间分布上受褶皱构造的控制,不同岩溶层组呈条带状相间产出。区域北部、中东部石坎乡—水田乡—生机镇一带为向斜—背斜—向斜紧闭构造,地层产状陡倾,各类岩溶层组呈细长条带状展布,岩溶形态类型单一、数量少。南部大湾镇—母享镇—以勒镇—大银镇一带,岩溶层组的分布受宽缓背斜的控制,地层产状平缓,灰岩层组、白云岩层组呈面状展布,岩溶形态类型丰富、数量多(图5)。

5 岩溶形态发育特征

研究区构造线走向呈北东—南西向,平行于构

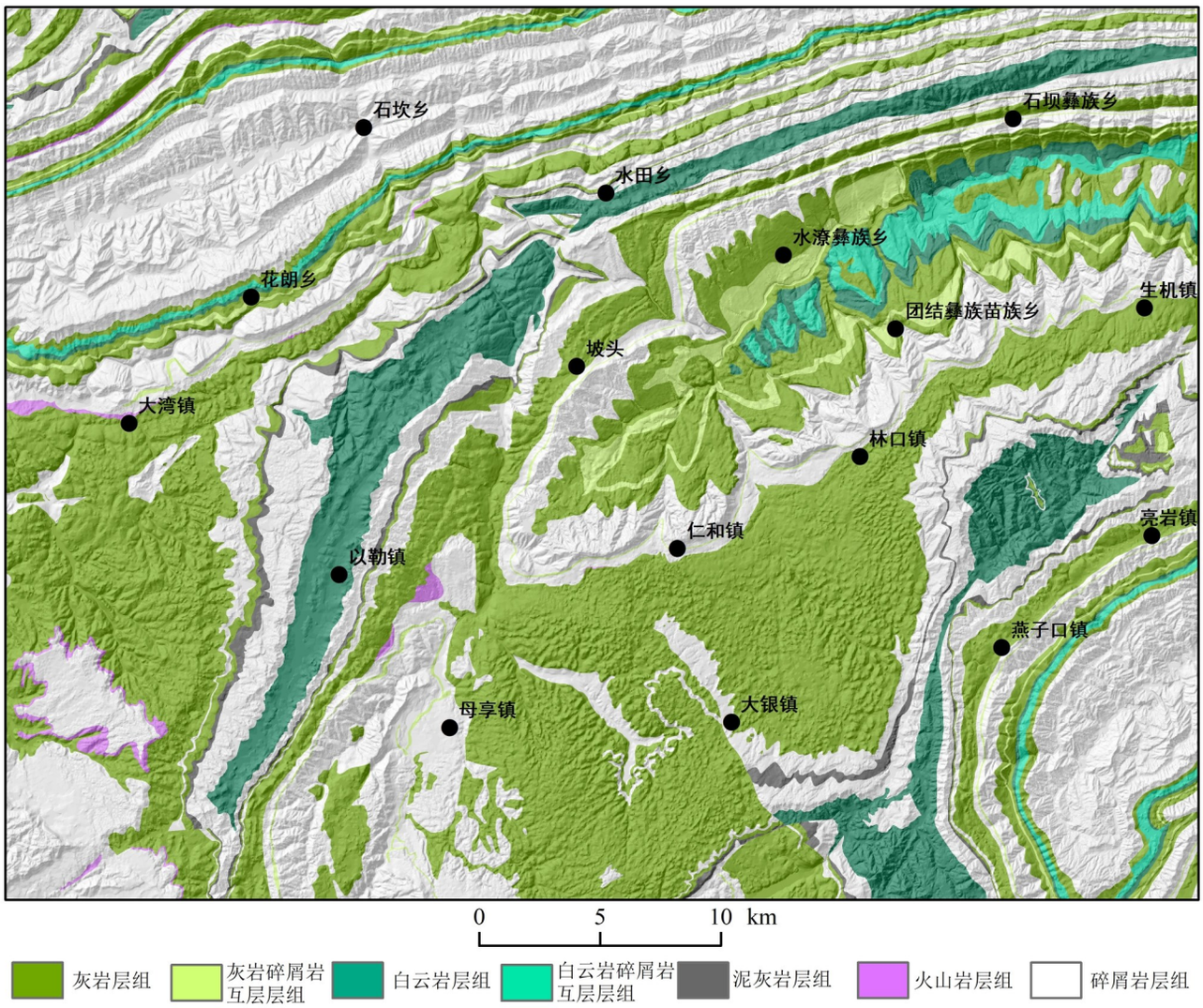

图 5　研究区岩溶层组分布图

Fig. 5　Distribution of karst strata of the study area

造线走向发育一系列的背斜向斜构造，岩溶地貌同非岩溶地貌呈条带状平行于构造线走向交替出现（图 1）。岩溶形态的分布及发育特征同可溶性岩石的空间分布密切相关（图 6），可溶性岩石同流动的可溶性水的接触面积越大，岩溶作用越强烈，岩溶形态的规模和类型越丰富，反之岩溶形态趋于微小，类型趋于单调。在宽缓褶皱区，灰岩层组出露面积大，地表地下岩溶形态丰富，组合多样，表层发育锥峰、洼地，地下形成完整的地下河系统，构成地表及地下双层结构；在紧闭褶皱区，灰岩层组地层产状陡倾，出露面积狭窄，岩溶作用受到抑制，灰岩层组呈条带状展布，地下岩溶发育程度明显减弱，地表锥峰、洼地及地下河数量密度减小；在白云岩层组出露的区域（主要为寒武系娄山关组出露区域），其溶蚀量较低且多位于地势较低的部位，未见洞穴及地底下河系统，地表发育少量的锥峰形态，洼地发育也较少。

洼地相对深度是指洼地底部至洼地内某一点的相对高差，以岩溶层组为统计单元，统计不同层组中锥峰、洼地的形态和空间分布（表 5）。研究区总面积为 1 800 km^2，灰岩层组总面积为 695. 19 km^2，其中洼地面积占灰岩总面积的 5. 81%，洼地平均深度为 14 m；白云岩层组总面积为 162. 54 km^2，其中洼地面积占白云岩总面积的 0. 20%，洼地发育率最低，洼地平均深度为 7. 09 m。在非岩溶层组中同样显示有洼地的发育（图 6），对这些区域的详细调查发现，该类型洼地主要位于可溶性岩溶层组同非可溶性岩溶层组交界区域，且洼地最低点均位于岩溶层组内部，非岩溶层组中的洼地是由于可溶性岩溶层组中洼地发育扩张到非可溶性岩溶层组的结果。

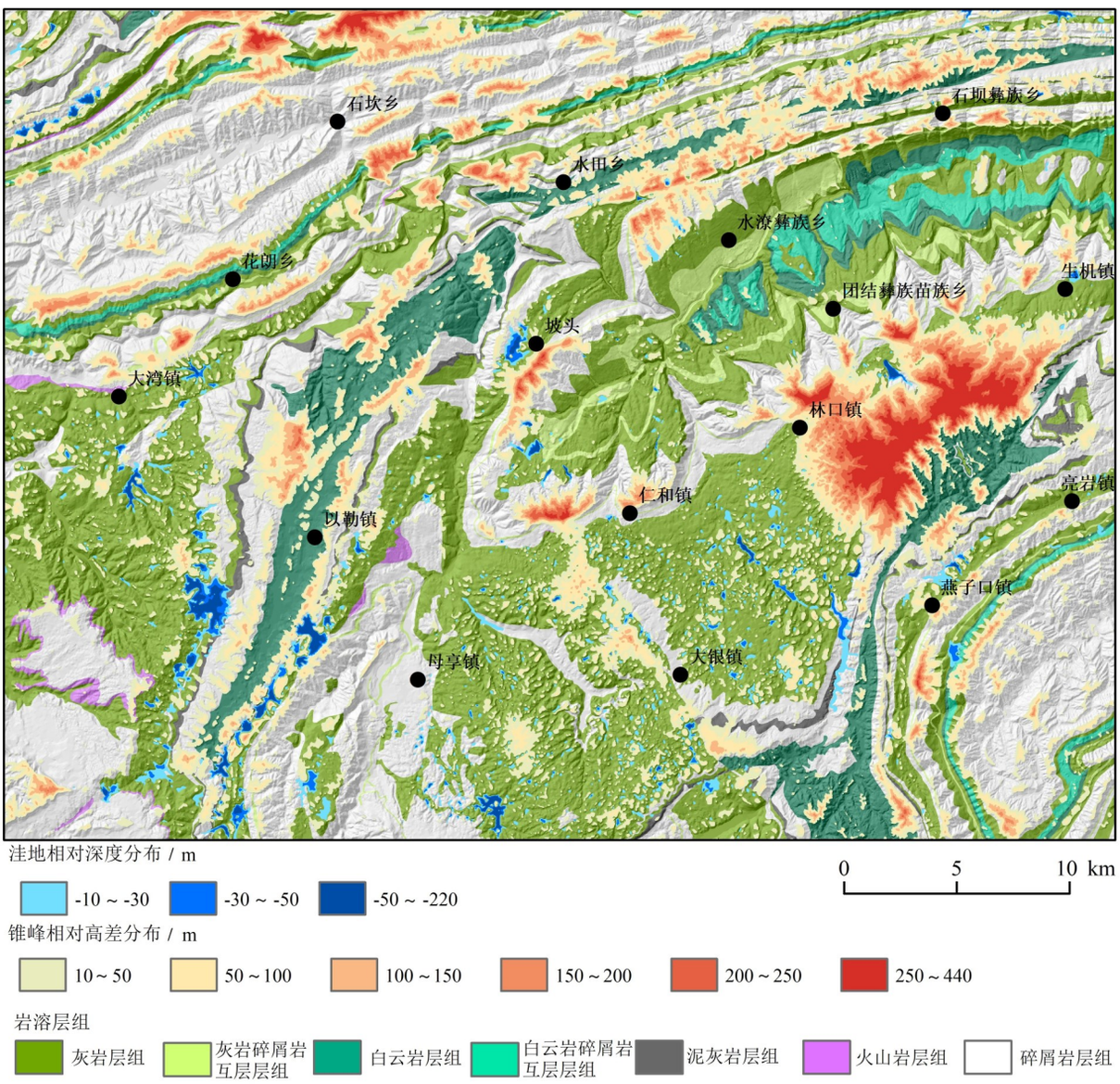

图 6　研究区锥峰、洼地同岩溶层组空间分布的相对关系

Fig. 6　Spatial relationship between karst peaks, depressions and strata

表 5　锥峰—洼地形态参数统计

Table 5　Parameter statistics of karst peaks and depressions

岩溶层组	面积/km²	锥峰数量/个	锥峰密度/个·km⁻²	洼地面积/km²	洼地面积比/%	洼地深度平均值/m
灰岩层组	695.19	6872	9.89	40.36	5.81	14.09
泥灰岩层组	26.87	23	0.86	1.01	3.77	6.88
白云岩碎屑岩互层层组	43.33	144	3.32	0.66	1.53	9.47
灰岩碎屑岩互层层组	50.17	121	2.41	0.49	0.99	4.19
白云岩层组	162.54	354	2.18	0.32	0.20	7.09

寒武系清虚洞组下部为灰岩层组，上部为白云岩层组，仅出露于研究区燕子口幅东北角背斜核部，发育石牙、溶沟等中小型岩溶形态，未见锥峰、洼地等，以溶蚀中山地貌为主。

寒武系石冷水组、娄山关组、桐梓组、红花园组为白云岩层组，出露于背斜轴部，产状平缓，出露面

积大。其岩石物理刚性强度高，原生孔隙及次生裂隙极为发育[7]，相对溶解速度为 0.17～0.68[19]，受后期构造破坏产生大量的节理和裂隙，这些节理及裂隙密集分布在岩石内部，沿裂隙面的发育溶蚀作用，存储大量的裂隙水，构成了区域内最主要的含水岩组。锥峰相对高差平均值为 154 m，锥峰、洼地比高平均值为 120.87 m，锥峰间发育冲蚀沟谷，洼地发育率为 1.9‰（图 7a）。岩石受溶蚀、侵蚀的共同作用，地表及地下岩溶形态不发育，仅发育溶痕、溶隙等小微型岩溶形态。

图 7　研究区岩溶形态

Fig. 7　Karst forms in the study area

a. 娄山关组白云岩发育溶痕　b. 茅口组发育峰丛洼地　c. 嘉陵江组沿构造线方向发育峰丛谷地　d. 嘉陵江组一段峰丛洼地边缘的天生桥

宝塔组、栖霞组、茅口组、嘉陵江组一段、嘉陵江组三段、关岭组二段以灰岩层组为主。其岩石刚性强度高，受构造的控制发育节理裂隙[7]，灰岩相对溶解速度为 0.7~1.34[19]，在地表水和地下水的溶蚀作用下，形成类型多样、数量众多的岩溶形态，受岩溶层组分布面积及出露形态的控制，岩溶形态发育有所差异。

宝塔组灰岩层组厚度、出露面积小，呈条带状夹于非岩溶层组中，岩溶作用受到抑制，岩溶形态类型单调，锥峰较为发育，洼地发育率为 44.1‰，也较为发育，但这些洼地在空间上的分布极不均匀，集中发育于南部同栖霞组相连的区域。

栖霞组、茅口组为灰岩层组，多出露于宽缓褶皱两翼，地层产状平缓，出露面积大，以溶蚀作用为主，发育锥峰、洼地、溶洞等岩溶形态（图 7b），锥峰相对高差平均值为 151.6 m，洼地发育率为 128.6‰，洼地平均深度为 51.38 m，锥峰、洼地比高平均值为 168.72 m。在研究区西北角及东南角紧闭褶皱部位，地层产状直立，地表出露面积小而地下厚度极大，发育峰丛深洼，洼地平均深度为 80 m。锥峰基座相连构成峰丛，其间为洼地，洼地多为浅碟形。栖霞组、茅口组出露地区地下河极为发育，已查明的 8 条地下河全部发育于栖霞组、茅口组之中。

嘉陵江组一段、嘉陵江组三段为灰岩层组，发育锥峰、洼地，锥峰相对高差平均值为 179.72 m，锥峰基座相连构成峰丛，洼地发育率为 72.5‰，洼地平均深度为 32.31 m，发育有少量溶洞，洞体规模较小。该层组主要分布于褶皱两翼，峰丛呈线状延伸，洼地不

发育，峰丛间为谷地。而在研究区东北角向斜构造的核部及南部向斜核部，岩层产状平缓，出露面积大，发育岩溶峡谷、锥峰、洼地、溶洞及天生桥等岩溶形态（图7c）。

十字铺组为泥灰岩层组，龙马溪组、石牛栏组二段、长兴组、嘉陵江组二段为灰岩碎屑岩互层层组，嘉陵江组四段为白云岩层组，关岭组一段为白云岩碎屑岩互层层组。上述层组以白云岩、灰岩同碎屑岩的互层为主，平行于构造线方向呈条带状产出于向斜两翼，出露面积多狭小，地表地下岩溶作用均不明显，仅发育溶痕等小微型岩溶形态，类型单调且数量少，发育锥峰，峰丛基座相连，呈线状延伸，洼地不发育，峰丛间为谷地（图7d）。

陡坡寺组、湄潭组、龙马溪组、新滩组、松坎组、石牛栏组、韩家店组、梁山组、峨眉山玄武岩、龙潭组/宣威组、飞仙关组、二桥组、自流井组、沙溪庙组、遂宁组，各地层单元出露厚度小，主体为硅质碎屑岩、火山岩，夹有少量煤层及火山碎屑岩，地貌形态以冲沟为主。

6 基于高程模型定量划分地貌类型

以岩溶层组图和锥峰洼地分布图为基础数据，将研究区用方格网分割，每个方格网面积为1 km^2，统计每个方格网中的最大海拔值（E_{max}），该值同岩溶洼地底部的海拔值之差定义为溶蚀高度（h），洼地边缘所包围的平面面积定义为洼地面积（S），使用这两个参数计算洼地发育地区的溶蚀程度（V）：

$$V=\frac{1}{3}S\cdot h$$

以岩溶层组为单元，统计岩溶层组单元面积（A）、岩溶层组单元周长（L）、溶蚀程度（V）和锥峰数量（F），定义出岩溶层组单元的锥峰、洼地发育系数（k）：

$$k=(\lg\sum V+\lg\sum F)\times\lg L/(\lg A)^2$$

k=0的区域主体为碎屑岩，出露湄潭组、龙马溪组、新滩组、松坎组、石牛栏组、韩家店组、梁山组、峨眉山玄武岩、龙潭组、飞仙关组、须家河组、自流井组、沙溪庙组、遂宁组等地层，海拔均在1 000 m以上。受构造控制，多出露于背斜向斜两翼，岩层产状陡倾，同岩溶地貌相间分布，山脊走向平行于构造线走向，呈线型延展，垂直于山脊走向发育大量的冲沟，属侵蚀中山地貌，文中特指受流水物理侵蚀而成的地貌类型。

$0<k\leqslant 0.9$的区域，出露地层主要为石冷水组、清虚洞组、十字铺组、宝塔组、长兴组，呈狭长条带状夹于碎屑岩之中。地表及地下岩溶形态不发育，仅在基岩出露的部位发育石牙、溶痕、溶沟等小微型岩溶形态。山峰呈圆锥状，发育馒头状、长垣状锥峰，洼地不发育，沟谷切割呈V型，属溶蚀中山地貌。

$0.9<k\leqslant 1.9$的区域，出露地层主要为娄山关组、桐梓组、红花园组、十字铺组、宝塔组，多位于褶皱核部，地层产状平缓，分布面积大，地下岩溶形态不发育。地表岩溶形态类型单调，锥峰较为发育，多形成基座相连的峰丛，峰丛间为谷地，洼地弱发育，沟谷切割呈V型（图8a），属丘岭谷地地貌。

$1.9<k\leqslant 8.5$的区域，出露地层主要为栖霞组、茅口组、嘉陵江组及关岭组，岩溶层组同非岩溶层组受构造控制呈条带状相间分布，发育石牙、溶沟、天生桥等地表岩溶形态，地下岩溶形态不发育。锥峰较发育，多形成基座相连的峰丛，峰丛脊线呈线型延伸，线状峰丛间为谷地（图8b），洼地中等发育，属峰丛谷地地貌。

$k>8.5$的区域，出露地层主要为十字铺组、宝塔组、栖霞组及茅口组，地表及地下岩溶形态极为发育，类型丰富，数量众多。锥峰、洼地极为发育，锥峰基座相连构成峰丛，中间包围区域构成洼地，属峰丛洼地地貌（图8c）。

研究区地貌类型划分方案如表6，分布如图9。区域可溶性岩溶层组的出露受走向北东南西方向背斜向斜褶皱构造的控制，岩溶层组呈条带状相间产出。非岩溶岩层组分布的区域不发育岩溶地貌，以冲沟微地貌为主要特征，总体构成侵蚀中山地貌。在可溶性岩溶层组出露的地区，岩溶层组的厚度、地表分布范围同岩溶发育程度呈正相关，厚度越大，分布面积宽广的地区，岩溶形态组合类型丰富，反之，形态则趋于单调。区域北部、中东部石坎乡—水田乡—生机镇一带为紧闭向斜构造，地层产状陡倾，灰岩层组、白云岩层、灰岩碎屑岩互层层组、白云岩碎屑岩互层层组密集相间产出，空间上呈细长条带状展布，岩溶作用受到抑制，岩溶地貌不发育，地貌形态受溶蚀作用和侵蚀作用的共同控制，锥峰不呈簇状结构而呈单列线状结构，平行于构造线走向延展，构成一系列平行排布的北西—南东向走向的锥峰垄岗，垄岗两侧同非可溶性岩组接触的位置则发育洼地，未见地下河、溶洞等岩溶形态；在河流通过的区域，洼地不发育，内部发育树枝状沟谷，沟谷间台地

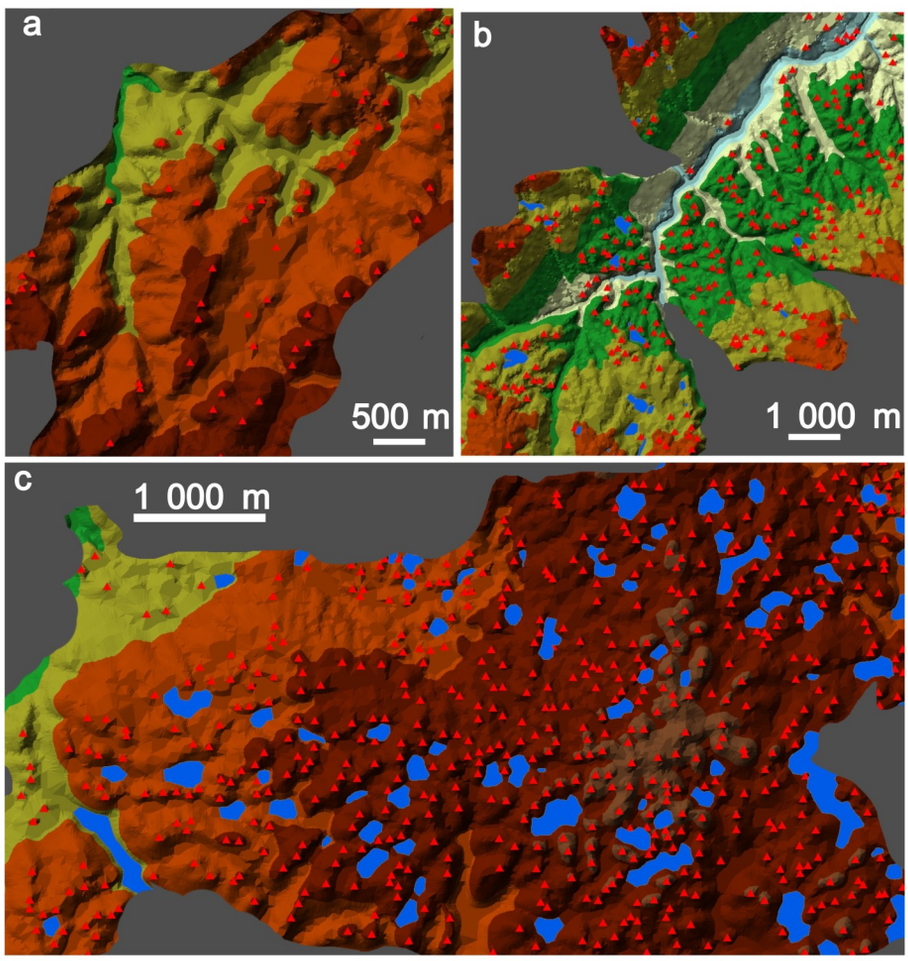

图 8　丘岭谷地(a),峰丛谷地(b),峰丛洼地(c)示意图

Fig. 8　Sketch of hills and valleys (a), karst peak clusters and valleys (b) and peak clusters and depressions (c)

注:红色三角形为锥峰,蓝色斑块为洼地,背景为DEM。

表 6　研究区地貌类型划分

Table 6　Landscape classification of the study area

成因类型	形态类型	地貌参数	个体形态
非岩溶地貌	侵蚀中山	$k=0$	冲沟
岩溶地貌	溶蚀中山	$0<k\leqslant 0.9$	石牙、溶沟、溶痕、锥峰,冲沟
	丘岭谷地	$0.9<k\leqslant 1.9$	溶沟、溶痕、锥峰、谷地,冲沟
	峰丛谷地	$1.9<k\leqslant 8.5$	溶沟、溶痕、石牙、天生桥、锥峰、谷地、洼地
	峰丛洼地	$k>8.5$	溶沟、溶痕、石牙、天生桥、锥峰、洼地、谷地、溶洞、地下河

或垄岗上发育密集的锥峰,构成峰丛谷地地貌,石牙溶沟的小微地貌极为发育,而地下岩溶形态稀少,不发育地下河。区域南部大湾镇—母享镇—以勒镇—大银镇一带,岩溶层组的分布受宽缓背斜的控制,地层产状平缓,灰岩层组呈面状展布,出露面积大,地表及地下岩溶过程均极为发育,地表发育典型的峰丛洼地形态组合,石牙、溶沟极为发育,地下则发育地下河、溶洞以及各种岩溶溶蚀形态及沉积形态,内部发育区域主要的地下河系统;背斜核部出露古老的寒武系白云岩,均呈面状展布,但岩溶形态极为特殊,内部发育低缓的溶丘,石牙、溶沟不发育,溶丘间发育冲蚀沟谷,不发育洼地,构成丘岭谷地地貌。区域南侧泥灰岩层组出露面积相对较大,地表及地下岩溶形态不发育,未见峰丛洼地等形态,以冲沟微地

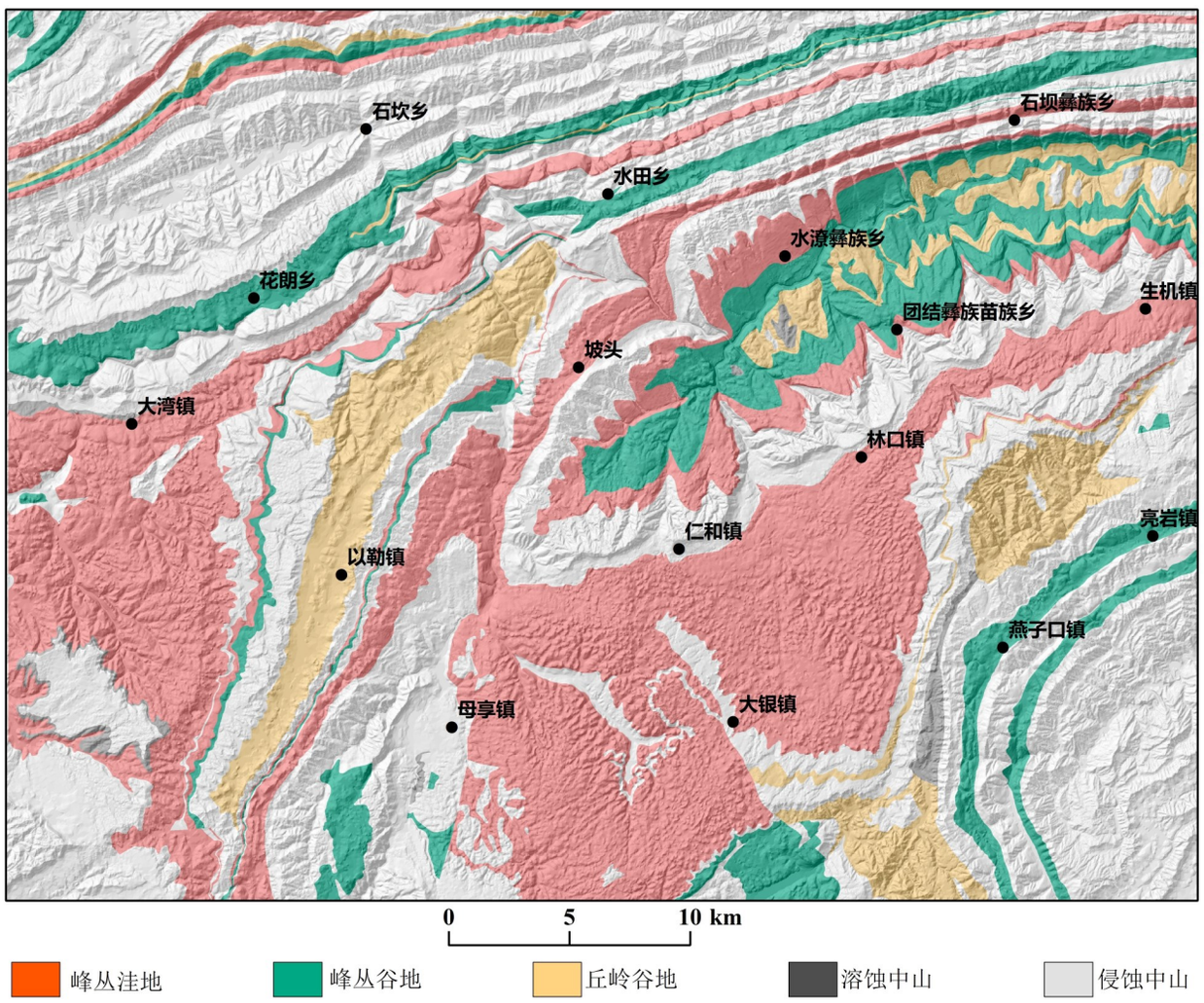

图9 岩溶地貌类型分布图

Fig. 9 Distribution of karst landform types in the study area

貌为主,但在基岩出露的部分,岩石表面发育一些细微性的溶痕、溶沟及小型石牙等,受溶蚀作用和侵蚀作用的共同影响,发育溶蚀中山地貌。

7 结论与建议

利用地形图建立区域数字地形模型,并提取了锥峰—洼地数字高程模型,以岩溶层组为统计单元,分析了不同岩溶层组内部峰丛洼地的量化特征,建立了岩溶层组单元的锥峰、洼地发育系数,量化岩溶发育程度,将岩溶地貌划分为峰丛洼地、峰丛谷地、丘岭谷地、溶蚀中山四类岩溶地貌类型,其地貌分类结果同实际地貌分布情况吻合,可较好显示出不同地区峰丛洼地的发育程度;划分过程中,以数字地形量化指标为主,提高了地貌类型划分的精度,构建了岩溶地貌区数字地貌分析及地貌分区的工作方法。

研究区岩溶地貌以浅碟形峰丛洼地为主,高峰丛深洼地地区、峰林平原不发育,该方法在区域上的适用性需要重新分析;区内开展过高精度的1∶50 000万地质填图,为岩溶层组的提取提供了详细的岩石层组资料,建立了以岩溶层组为基础的统计单元,而在不能建立精细岩溶层组的地区,需要重新构建统计单元。针对上述问题,需在进一步的研究中扩大区域范围,优化地貌实体统计单元,以推进岩溶地貌的数字化研究。

参考文献

[1] 袁道先. 岩溶学词典[M]. 北京: 地质出版社, 1988: 55.

[2] 王世杰,张信宝,白晓永. 中国南方喀斯特地貌分区纲要[J]. 山地学报, 2015,33(6): 641-648.

[3] 任美锷. 岩溶学概论[M]. 北京:商务印书馆, 1983.
[4] 袁道先, 刘再华, 林玉石, 等. 中国岩溶动力系统[M]. 北京: 地质出版社, 2002.
[5] 张之淦. 岩溶发生学——理论探索[M]. 桂林:广西师范大学出版社,2005.
[6] 钱海涛, 谭朝爽, 王思敬. 岩溶发育深度问题研究现状与展望[J]. 人民黄河,2014, 36(11): 114-116, 126.
[7] 佘敏, 寿建峰, 沈安江, 等. 碳酸盐岩溶蚀规律与孔隙演化实验研究 [J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(4): 564-572.
[8] 粟俊江, 董兴文. 重庆地区茅口灰岩的岩溶类型与发育特征[J]. 四川地质学 报, 2013,33 (1): 82-83, 96.
[9] 宋林华. 喀斯特洼地的发育机理及其水文地质意义[J]. 地理学报, 1986,41(1):41-50.
[10] 覃厚仁,朱德浩. 中国南方热带、亚热带岩溶地貌分类方案[J]. 中国岩溶,1984,3(2):72-78.
[11] 宋林华. 喀斯特地貌研究进展与趋势[J]. 地理科学进展, 2000, 19(3): 193-202.
[12] 杨先武, 钱叶青, 郑春霞. 喀斯特峰林峰丛地貌形态表达研究综述[J]. 地理与地理信息科学, 2017,33 (4): 22-27.
[13] 罗伟, 鄢志武, 薛重生. 基于DEM的岩溶地区地形地貌特征提取与分析[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2013,47 (3): 436-439.
[14] 江新荣. 贵州不同海拔高度地形台面及其地貌组合特征[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 1990,25 (2): 12-16.
[15] 中国北方寒武—奥陶系岩溶层组类型及其区域变化规律[J]. 中国岩溶, 1991,10(2): 29-38.
[16] 路凤香,桑隆康. 岩石学[M]. 北京:地质出版社, 2002.
[17] 朱筱敏. 沉积岩石学[M]. 北京:石油工业出版社, 2008.
[18] 黄振义. 中国地质科学院喀斯特研究组. 鄂西地区岩性对喀斯特发育影响的初步研究[R]. 喀斯特学术会议文件,1996.
[19] 范鹏,董兆雄,李君,等. 孔隙铸模法在碳酸盐岩孔隙结构微观实验研究中的应用[J]. 海相油气地质,2009, 14(2):67-70.

Landscape classification in karst areas based on DEM: A case study of 1:50,000 pilot geological mapping of karst areas in southwestern China

SHAN Keqiang

(*Institute of Karst Geology, CAGS, Guilin, Guangxi* 541004, *China*)

Abstract Digital elevation model (DEM) can quantitatively describe landforms. While the statistic approach of karst entities based on peck-cluster depression has not been established yet. Based on 1:50,000 digital topographic maps of Dawan, Muxiang, Yanzikou and Zhuzhong in the Wumengshan mountains, this work builds the DEM of the study area and the peak-cluster depression DEMs by spatial analysis. On the basis of 1:50,000 geology surveys, the strata in the survey area are reclassified into seven karst strata association types, volcanic strata group, clastic strata group, limestone strata group, dolomite strata group, marl strata group, limestone-clastic interbed group and dolomite-clastic interbed group. Taking karst strata association as a statistical unit, the parameters of peak-cluster depression of each unit are analyzed. Peak-cluster depression development coefficient (k) is defined to quantify the development degree of karst. The geomorphology of the survey area is divided into 5 landscape types. Of them, Ppeak-cluster depression, $k>8.5$, peak depression is extremely developed. Ridged-hill valley, $1.9<k\leq 8.5$, the cone peak is relatively developed, and the depression is moderately developed. Clustered-hill valley, $0.9<k\leq 1.9$, the cone peak is weakly developed, and the depression is rare. Karst mountain, $0<k\leq 0.9$, cone peak depression is also rare. Middle mountain, k=0, developed gullies, no karst. The karst geomorphologic types established are consistent with the combined characteristics of karst entities. The classification results reflect the distribution and differentiation characteristics of different karst landscape in a small range.

Key words Wumengshan mountains, karst landscape, DEM, karst strata association, landscape classification

(编辑　黄晨晖)