

丁智强,俞筱桢,高璇,等. 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, 38(3): 325-335.
DOI: 10. 11932/karst20190305

云南石林县域喀斯特洼地空间分布特征及影响因素研究

丁智强¹, 俞筱桢², 高璇¹, 李玉辉¹

(1. 云南师范大学旅游与地理科学学院, 昆明 650500;
2. 黔南民族师范学院旅游与资源环境学院, 贵州 都匀 558000)

摘要:为深化洼地空间分布及其影响因素的认识,以云南石林县为例,在 ArcGIS 中基于 DEM 提取洼地分布及相关数据,并运用 K 函数(Ripley's K)、核密度函数、缓冲区、空间叠加等分析方法,探讨了该区洼地密度分布特征及地理环境对其的影响。结果表明:研究区洼地在 8 km 尺度上为聚集分布模式,可划分为高密度(>6 个·km⁻²)、中密度(5~6 个·km⁻²)和低密度(<5 个·km⁻²)三个区域。受多种地理环境因素影响,研究区洼地密度在不同海拔段、坡度、起伏度、地层岩石和断层缓冲区上均有差异性表现;同时,岩层节理、断层方向在一定程度上控制了洼地长轴的发育。研究区潜在水文连通性、面积—高程积分值两个指标与洼地密度呈现良好的一致性,但两个指标所反映的喀斯特洼地的地貌学意义还需进一步研究。

关键词:喀斯特洼地;连通性;面积—高程积分值;地理信息系统;石林

中图分类号:P931.5

文献标识码:A

文章编号:1001-4810(2019)03-0325-11

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

洼地是喀斯特区的诊断性地貌特征并受到相关学者的重视^[1]。随着获取地表高精度三维数据的手段(地理信息系统软件、全球数字高程模型的共享、机载激光扫描、合成孔径雷达等)不断更新^[2],关于洼地发生与演化^[3-6]、类型划分^[7]、空间分布与形态学描述^[8-9]、全球或区域性洼地数据库建设^[10]等的研究越来越多,其地貌学和环境学意义也进一步凸显。例如,洼地中的沉积物可能储存区域环境变化^[11]和人类活动^[12-13]的丰富信息;形态学分析和空间对比研究可为区域地貌演变提供有效的年代学证据^[14],从而揭示构造运动的强度与结构^[15-16];用洼地空间分布预测地下水资源分布与评价地质灾害风险^[17-18]等。洼地分布有地域性差异,如海拔、坡度、起伏度、断裂、节理等对洼地空间分布的控制及作用机制还存在诸多争议^[1]。因此探索多因素协同的洼地空间分

布与控制因素,有助于深入了解洼地发育机制与科学内涵,促进喀斯特地貌系统发育演化理论的发展。

具有世界意义的石林地貌景观主要保存在石林县的部分洼地中^[19]。基于多方法尺度量化洼地空间分布及其影响因素是揭示地貌格局与区域自然资源管理内在联系的基础。但目前该区域的洼地研究仅见土壤性质对洼地发育的影响^[20],缺乏较大尺度的整体性分析。因此,基于洼地发育特性^[21],采用 GIS(地理信息系统)技术研究石林县洼地空间分布特征及洼地密度与地理环境因素的空间耦合关系,可深化喀斯特高原洼地发育机制的认识。

1 研究区概况

石林县位于滇东喀斯特高原南部,位于师宗—弥勒断裂和小江断裂西支之间,是青藏高原东南缘喀斯特高原向北部湾丘陵平原的过渡带。区内主要有西

基金项目:国家自然科学基金项目(41262013,41371514)

第一作者简介:丁智强(1993—),男,硕士研究生,主要从事喀斯特地貌演化研究。E-mail: zhiqiang_ding9303@163.com。

通信作者:李玉辉(1957—),男,教授,博导,主要从事喀斯特资源环境和生态恢复研究。E-mail: lyh123zhang@163.com。

收稿日期:2018-12-24

部的九乡一石垭口断层、中部的维则断层与东部的圭山断层,三者均是多条小型平行断层构成的断层组,走向为南北向和北东-南西向(图 1a)。受三组断裂和巴江侵蚀基准面控制,县域地貌分为东西两侧的构造侵蚀溶蚀中山、圭山和九蟠山断裂之间的峰丛洼地、溶丘洼地和西南的河谷盆地、石林斜坡(图 1b)。石林县域地层岩石复杂多样,北部为震旦系砾质白云岩夹板岩,西部以寒武系和志留系的泥质灰岩夹粉砂岩为主;泥盆系、石炭系和三叠系以白云岩及灰质白云岩为主,岩层节理裂隙发育,集中分布于九蟠山以

东至圭山一带;中二叠统灰岩、白云质灰岩分布于路南盆地至九蟠山的斜坡带,是大型洼地与地下暗河主要分布区,也是世界著名的石林喀斯特分布区。

石林县地表水系有南盘江一级支流巴江和普拉河,地下暗河主要分布在九蟠山以西。该区现代气候为亚热带高原季风气候,多年平均降水量为 1 040 mm,多年平均气温为 15.6℃。区内植被以暖温性针叶林和次生半湿性常绿阔叶林为主,由于历史上的矿产开采导致植被覆盖度处于较低水平^[22]。

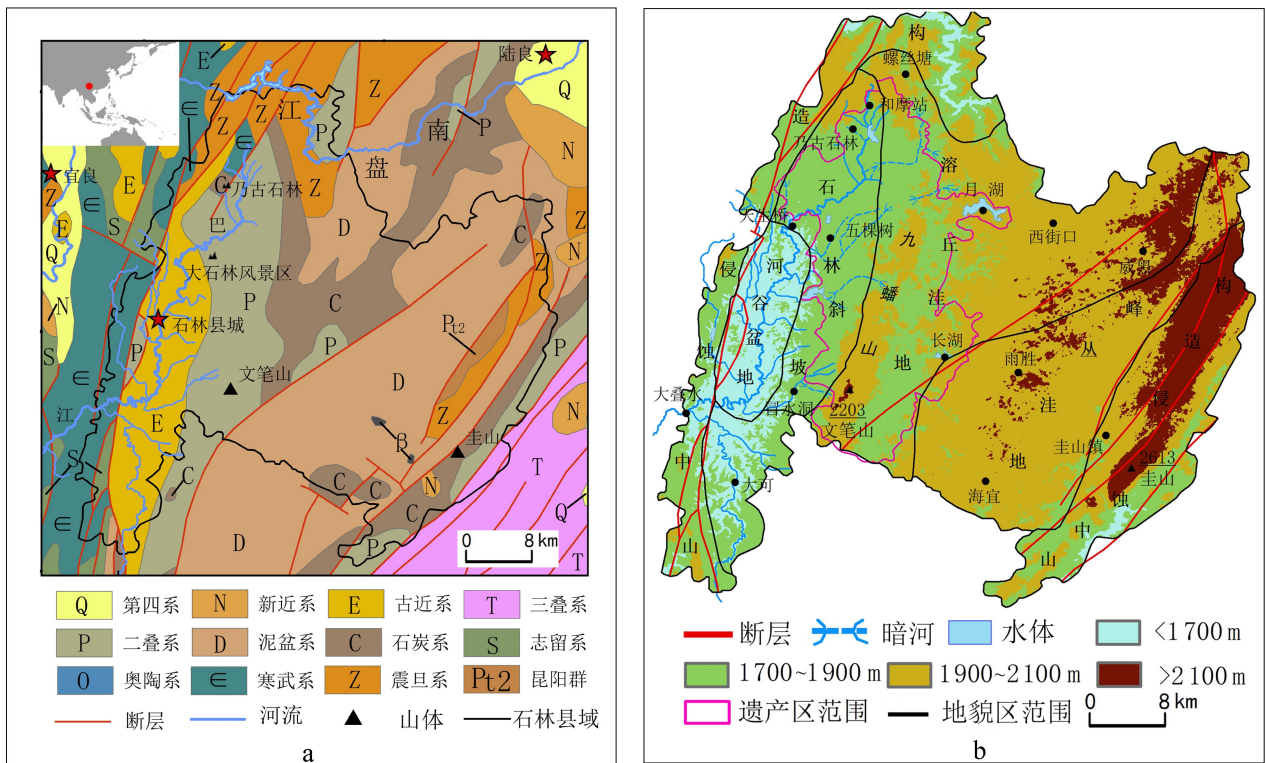


图 1 石林县域地质简图及数字高程图

Fig. 1 Digital elevation model and geological sketch of Shilin county

2 资料与研究方法

2.1 DEM 数据及洼地提取

近年来,随着无人机、三维激光扫描、合成孔径雷达等技术的发展,洼地分析已从利用人工调查、传统纸质地形图解译向高分辨率的数字地形数据自动识别转变,这实质性地提升了洼地分析的效率和精度,但考虑高精度数据获取的高昂成本和空间尺度的限制,免费共享的全球大区域 ASTER-GDEM 数字产品(先进星载热发射和反射辐射仪全球数字高程模型)依然是洼地分析的可信基础地形数据^[23-25]。

本研究使用的 DEM 数据(Digital Elevation Model)下载于中国科学院计算机网络信息中心地理

空间数据云平台[<http://www.gscloud.cn>],像元分辨率为 30 m,对下载的数据做镶嵌、几何校正、矢量裁剪等预处理后,进行洼地的提取工作。

洼地边界的确定是研究洼地空间分布格局及形态参数的关键,目前的研究方法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。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^[26],具体过程为将 Spatial Analysis Tools→表面分析→等值线工具上生成的等高距为 10 m 的等高线,分别叠加到等高距为 10 m 的 1:2.5 万地形图和 Google Earth 上,修改有偏移的洼地出水口等高线,删除余下等高线,并在野外选择部分洼地进行

验证。对提取的面状洼地利用面转点工具转为点图层,以便进行后续分析。

需要指出的是研究区虽有大面积的非可溶性地层,如石林盆地主要为古近系路南群碎屑岩,但其下覆地层仍以二叠系碳酸盐岩为主,地下溶蚀过程导致地表碎屑物质的流失,从而形成与周边可溶性地层区成因相似的大量洼地,因此本研究中的洼地也包括成因相似的非可溶性岩层形成的洼地。

2.2 洼地空间分布的分析方法

基于 2.1 获得的洼地点图层,采用 K 函数(Ripley's K)和核密度函数对洼地空间特征进行分析,因为二者是识别点数据空间分布模式和空间密度差异的有效方法,原理参见文献[27]和[28]。在 K 函数分析中,当观测值曲线高于预测值曲线时认为洼地聚集程度高,反之则是离散程度高;K 观测值大于 HiConfEnv 值(Monte Carlo 空间模式检验上限),则该距离的空间聚集分布具有统计显著性,反之则认为不具有统计显著性[29]。

2.3 地质资料

地质资料参考宜良幅 1:20 万地质图,在 ArcGIS 中对扫描的地质图进行地理配准后与石林县域范围进行叠加,矢量化得到断层数据和地层数据。地层以系为单位进行合并,按地质报告及野外调查,将石林地区出露的岩石划分为硅质白云岩夹板岩、泥质灰岩夹粉砂岩、白云岩及灰质白云岩、石灰岩及白云质

灰岩、碎屑岩五类。在此基础上利用“缓冲区”、“相交”等工具,对洼地与断层及地层岩石的关系进行分析。

2.4 水文连通性指数

水文连通性是指水文过程中提供物质和能量在不同储水空间或一个交叉景观之间转移的能力,通常用于描述集水区上部和下游沟谷之间径流和泥沙源的内部联系[30-31]。Lorenzo Borelli 等提出的模型(Index of Connectivity, IC)考虑了排水区的性质以及物质从上坡到发生沉积的下坡的距离[32],能够对潜在水文连通性进行空间可视化,这已在相关研究中广泛应用[33]。IC 的计算公式为:

$$IC_k = \lg\left(\frac{D_{up,k}}{D_{dn,k}}\right) = \lg\left(\frac{\bar{W}_k \bar{S}_k \sqrt{A}}{\sum_{i=k} \frac{d_i}{W_i S_i}}\right)$$

式中: k 为水文连通性分析的每一个坡面; \bar{W}_k 表示上坡的贡献面积的平均权重因子(无量纲); \bar{S}_k 表示上坡贡献面积的平均坡度; A 是上坡的面积(m^2); d_i 为从上坡到下坡的第 i 个单元的长度; W_i 为从上坡到下坡的第 i 个单元的权重; S_i 为从上坡到下坡的第 i 个单元的坡度梯度。在计算过程中,为避免坡度值为 0,要将研究区的最小坡度修改为 0.005° 。在计算 IC 值时,选择地表粗糙度来表征 W_i 因子,坡度来表征 S_i 因子,在 ArcGIS 中计算得到 IC 指数的空间分布(图 2a)。IC 的取值为 $[-\infty, +\infty]$,值越大,表明水文连通性越大。

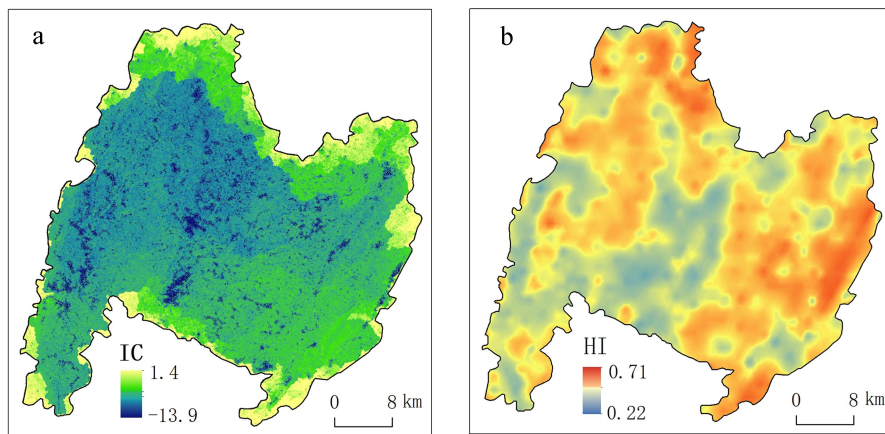


图 2 研究区水文连通性(a)和面积-高程积分值(b)空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of hydrological connectivity (a) and hypsometric integral(b)

2.5 高程-面积积分值

高程-面积积分法通过构建不同等高线上的面积和相对高差之间的函数关系来评价流域地貌演化阶段和侵蚀动力差异,当 $HI > 0.6$ 时,表示流域物质被侵蚀的量较少,此时流域地貌特征为地表崎岖,起

伏较大,地貌演化阶段处于幼年期;当 $0.35 \leq HI \leq 0.6$ 时,表面流域物质受到强烈侵蚀,地形起伏度达到最大,地貌类型呈现多样化和复杂化,此时流域地貌处于壮年期;当 $HI \leq 0.35$ 时,即表明大部分物质被侵蚀殆尽,此时外动力条件以堆积夷平为主,地形起伏

逐渐减小,地貌向准平原化发展,流域地貌处于演化阶段的老年期^[34-35]。

在 ArcGIS 中以 500 hm² 的汇流累积量提取 1 416 个小流域,在 QGIS 3.1 中利用 CalHypso 插件计算各子流域的 HI^[35],然后使用克里金插值法得到 HI 的空间分布(图 2b)。对 IC 和 HI 值分级后进一步分析二者与洼地分布的关系及其内在机制。

3 结果分析

3.1 洼地空间分布特征

洼地在不同空间分析尺度上具有显著的聚集或离散分布特征(图 3a)。具体来看,在 8 km 尺度上的聚集程度最高(K 观测值与 K 预测值之间的差值最大),据此选择 L=8 km 为搜索半径,得到洼地密度空间分布图(图 3b),从图中可看出,石林县域洼地密

度为 0~7.45 个·km⁻²。依据洼地密度的相对大小,将研究区划分为高密度区(H)、中密度区(M)和低密度区(L)。高密度区洼地密度大于 6 个·km⁻²,包括石林县东偏北的威黑、母竹箐、雨胜、糯衣等地以及石林县北偏西的和摩站、石林镇一带,总面积为 308 km²,平均洼地密度为 7.2 个·km⁻²;中密度区洼地密度为 5~6 个·km⁻²,包括宜奈、豆黑、海宜南部、维则北部,平均洼地密度为 5.74 个·km⁻²;低密度区洼地密度小于 5 个·km⁻²,位于海拔相对较高的支锅山、圭山、维则南部、蓑衣山及石林县域边缘,平均洼地密度为 4.16 个·km⁻²。高密度区的洼地周长、面积小于中密度区,而中密度区的洼地周长、面积又小于低密度区;中、高密度区的洼地深度和边坡坡度大于低密度区,点蚀指数为高密度区(4.99)<中密度区(5.08)<低密度区(7.71)(表 1)。

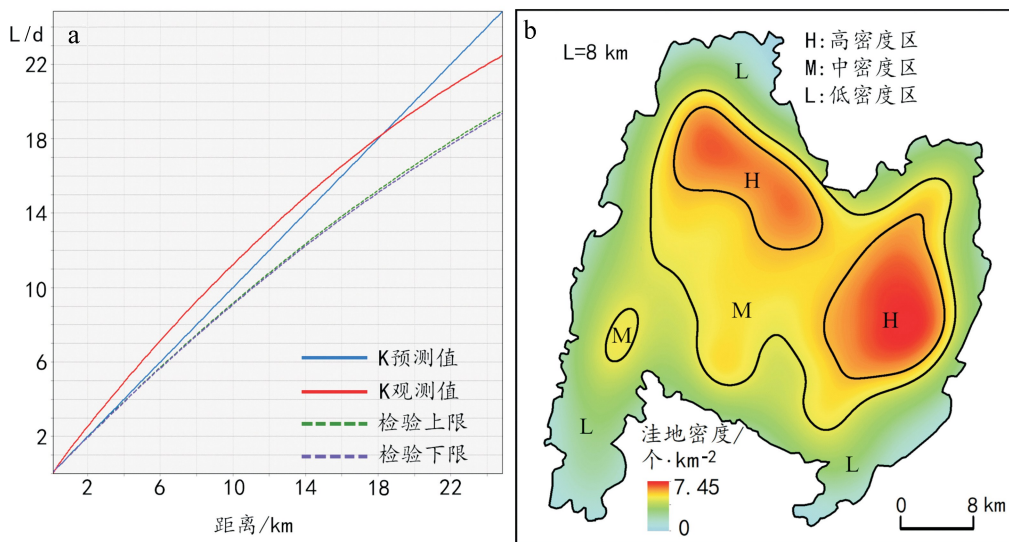


图 3 洼地 K 函数分析(a)及核密度图(b)

Fig. 3 K-function analysis (a) and nuclear density map (b)

表 1 石林县不同密度区的洼地形态参数

Table 1 Morphological parameters of depressions in different density areas of Shilin county

分区	周长/100 m	面积/hm ²	深度/100 m	坡度/°	直径/100 m	平均密度/个·km ⁻²	点蚀指数
高密度区	6.6±7.69	2.8±5.91	14.7±10.00	7.0±2.48	2.2±2.07	7.18	4.99
中密度区	7.4±9.16	3.4±7.66	15.6±10.99	7.3±2.48	2.4±2.32	5.74	5.08
低密度区	8.5±7.06	6.6±3.11	12.1±16.62	2.9±7.78	2.4±2.42	4.16	7.71

3.2 地形因素对洼地分布的控制

3.2.1 海拔、坡度、起伏度

以洼地最外围封闭曲线的等高线值作为洼地的

海拔进行统计(图 4a)。研究区的洼地集中分布在三个海拔段,其中 1 850~1 950 m 的数量最多,为 3 190 个,占总数的 37.1%,密度为 4.8 个·km⁻²;其次是

2 050~2 100 m,有 1 202 个,占洼地总数的 14.1%,密度为 5.6 个·km⁻²;而 1 650~1 700 m 海拔段有 778 个,占总数的 9.0%,密度为 4.6 个·km⁻²。

基于 DEM 数据得到坡度图后,利用焦点统计工具为每个输入像元重新赋值为其周围邻域内的平均坡度值(邻域大小为 1 km²),以表征整个洼地所在位置的坡度趋势,避免以单个像元的坡度值代替洼地所处区域的坡度特征(图 4b)。洼地明显聚集于 6°~12°的区域内,达 7 053 个,占总数的 82%,而在坡度小于 4°和大于 24°的区域分布较少,洼地密度在 4°~6°的区域内最大,为 5.3 个·km⁻²,其次是 8°~10°和 6°~8°的区域,分别为 5.1 个·km⁻²、4.9 个·km⁻²。

与坡度平均值方法相同,以 1·km⁻² 的大小计算得到研究区起伏度(图 4c)。随着起伏度的增加,洼地数量从 0~50 m 的 348 个增加到 100~150 m

的 2 694 个,对应密度从 5.4 个·km⁻²增加到 6.2 个·km⁻²,之后随着起伏度的增加,洼地数量和密度逐渐减小,起伏度大于 600 m 的区域基本无洼地分布。

3.2.2 地貌区

石林县有河谷盆地、石林斜坡、溶丘洼地、峰丛洼地、构造侵蚀中山五个地貌区(图 1b)^[36]。通过叠加分析,洼地数量从多到少为溶丘洼地区(2 946,34.3%)>峰丛洼地区(2 237,26%)>构造侵蚀中山区(1 585,18.4%)>石林斜坡区(1 331,15.5%)>河谷盆地(497,5.8%);洼地密度从大到小为溶丘洼地区(6.2 个·km⁻²)>峰丛洼地区(5.8 个·km⁻²)>河谷盆地(5.3 个·km⁻²)>石林斜坡区(5.1 个·km⁻²)>构造侵蚀中山区(3.6 个·km⁻²) (图 4d)。

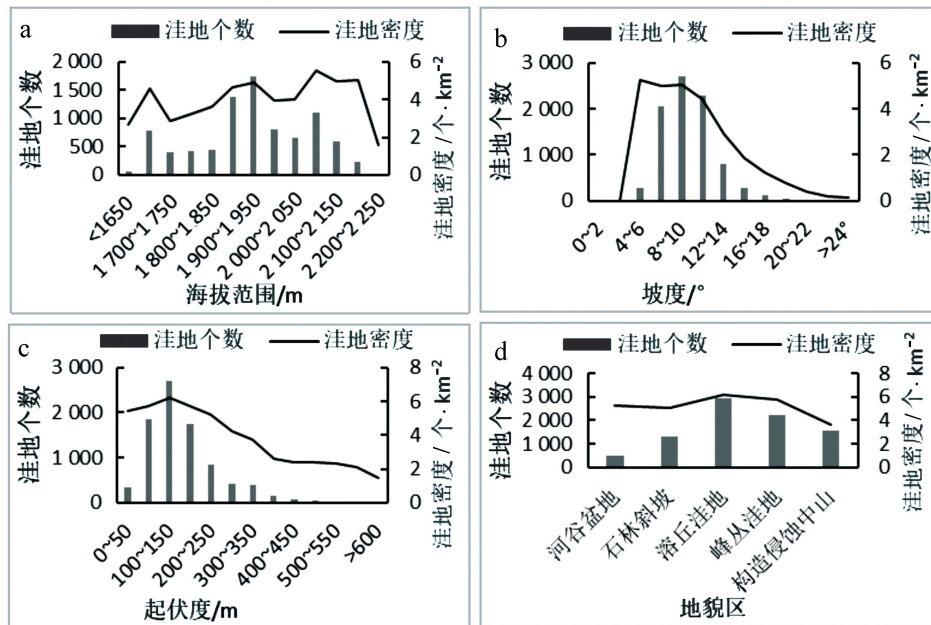


图 4 海拔、坡度、起伏度和地貌区对洼地密度的控制作用

Fig. 4 Controlling effects of altitude, slope, relief and geomorphic categorized area on depression density

3.3 地质因素对洼地的控制

3.3.1 地层岩石

在石林县域出露的地层中,洼地密度从昆阳群的 6.2 个·km⁻²减少到志留系的 2.2 个·km⁻²,在泥盆系地层中又增加到 5.8 个·km⁻²,之后密度持续减小到三叠系的 3.2 个·km⁻²。新生界以第四系洼地密度(5.8 个·km⁻²)>古近系(4.4 个·km⁻²)>新近系(2.3 个·km⁻²)(图 5a)。

按出露的五个岩石类型叠加洼地进行分析,各类岩石上分布的洼地密度大小顺序为白云岩及灰质白

云岩(5.6 个·km⁻²)>石灰岩及白云质灰岩(4.7 个·km⁻²)>碎屑岩(4.6 个·km⁻²)>硅质白云岩夹粉砂岩(4.2 个·km⁻²)>泥质灰岩夹粉砂岩(2.8 个·km⁻²)(表 2)。

3.3.2 断层组

三条断层组中,在 0.5~5 km 的缓冲区距离内洼地密度的变化具有差异(图 5b)。九乡断层中洼地密度从 0~0.5 km 的 4.83 个·km⁻²下降到 2~2.5 km 的 3.81 个·km⁻²,之后又增加到 4.5~5 km 的 5.32 个·km⁻²;维则断层各缓冲区距离内的洼地密度在

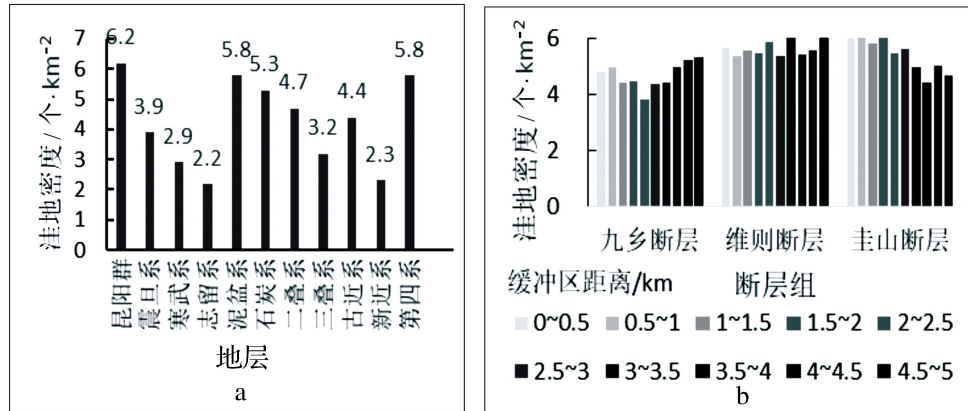


图5 地层组、断层组对洼地密度的控制作用

Fig. 5 Controlling effects of the stratigraphic group and fault group on depression density

表2 石林县域岩石类型对洼地密度的控制作用

Table 2 Controlling effect of rock mass in Shilin county on depression density

岩石类型	硅质白云岩夹板岩	泥质灰岩夹粉砂岩	白云岩、灰质白云岩	石灰岩、白云质灰岩	碎屑岩
洼地个数	723	298	4 940	1 589	1 046
密度/个·km ⁻²	4.2	2.8	5.6	4.7	4.6

5.6个·km⁻²上下波动;圭山断层则随着缓冲区的距离增加,洼地密度从6.22个·km⁻²下降到4.7个·km⁻²。

3.3.3 断层与节理方向

研究区洼地长轴方向主峰为95°~105°和115°~135°,在30°~45°、60°~80°方向上有两个小峰(图6b-1),而断层走向集中于50°~65°,在150°~155°有一个小峰(图6b-2),这说明断层走向对洼地有一定控制作用,但只影响了30°~45°、60°~80°的洼地,对95°~105°和115°~135°的影响较弱。分断层组对照发现(图6a),在4km缓冲区内,九乡断层范围的洼地长轴方向以80°~140°为主,与九乡断层走向夹角较小;维则断层范围的洼地长轴方向以20°~50°和95°~120°为主,其中20°~50°方向的洼地与维则断层走向一致,而95°~120°方向则与断层垂直,这一特征同样存在于圭山断层中,圭山断层的洼地长轴方向主要以45°~60°、65°~80°、115°~120°为主,前两个方向与圭山断层走向一致,而后一个方向与断层走向有约60°的夹角。

泥盆系、石炭系、二叠系碳酸盐岩地层占石林县域面积的66.2%(图1a),而三个地层中发育的洼地数量占全县洼地的75%。因此将三个地层中的岩石节理与洼地长轴方向进行对比可反映出二者之间的控制关系。泥盆系节理以40°~50°和150°~170°为主,而洼地长轴主要在35°~50°、115°~120°、130°~

135°(图6c-1、c-2);石炭系发育有130°、80°及东西向三组节理,而洼地长轴主要在5°~35°、55°~75°、95°~110°、120°~125°、135°~150°五个方向(图6d-1、d-2);二叠系地层中发育有30°~50°、110°~120°两组节理,而洼地长轴主要分布在25°~80°、90°~120°、135°~150°、160°~170°四个方向(图6e-1、e-2)。

3.4 潜在水文连通性、面积-高程积分值与洼地密度的关系

3.4.1 潜在水文连通性指数

研究区潜在水文连通性参数范围在-13.9~1.4之间,以2单位为等间距间隔将潜在水文连通性划分为8个等级,其中等级-14~-12、-2~0、0~2三个等级所占面积较小,故分别归并入-12~-10和-4~-2两个等级,最终得到五个等级(图7a)。随着潜在水文连通性的增加,洼地数量在减少,同时洼地密度也从-14~-10级的7.3个·km⁻²降低到-4~1.4级的2个·km⁻²,这说明区域水文连通性与洼地密度呈显著负相关(R²=0.81,n=5)。

3.4.2 面积-高程积分值

石林县域面积-高程积分值范围为0.22~0.71,按已有的认识划分为老年期(<0.35)、壮年期(0.35~0.6)、幼年期(>0.6)三个等级,再通过等分法将壮年期(0.35~0.6)划分为壮年早期(0.35~0.475)、壮年晚期(0.475~0.6)两个等级。

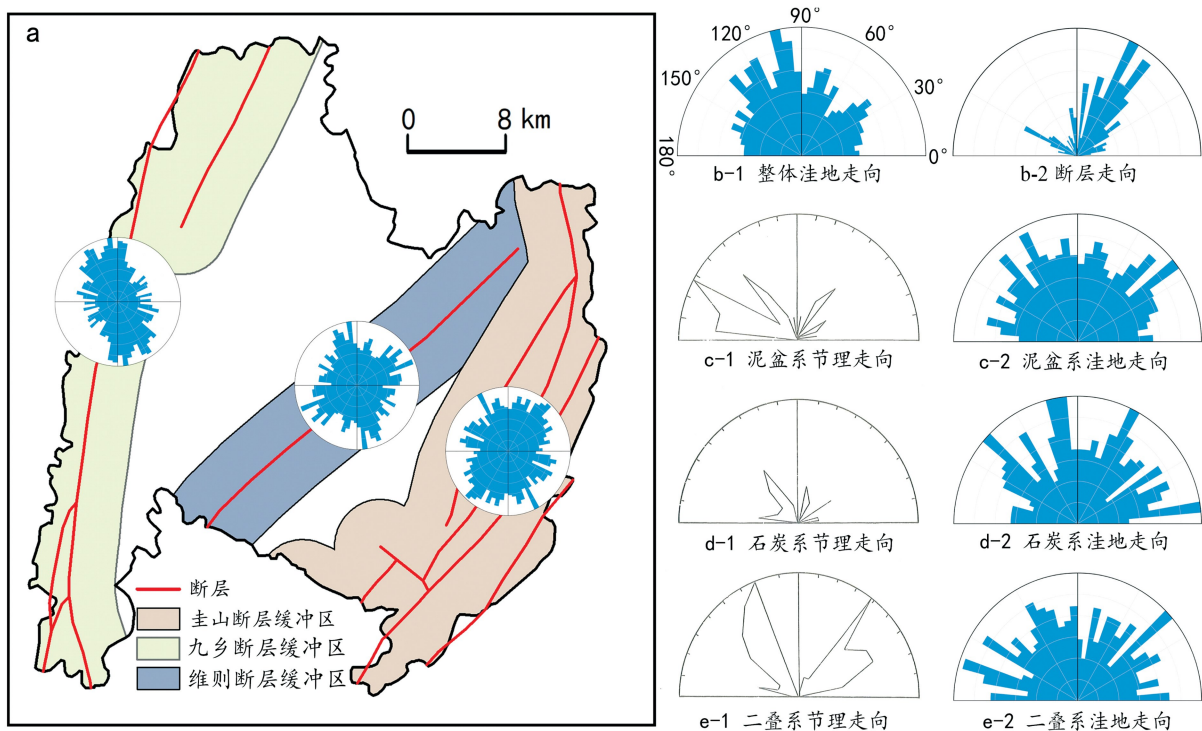


图 6 断层组、地层岩石节理方向对洼地长轴方向的控制作用

Fig. 6 Controlling effects of fault group and joint direction of rocks in stratum on the direction of depression long axis

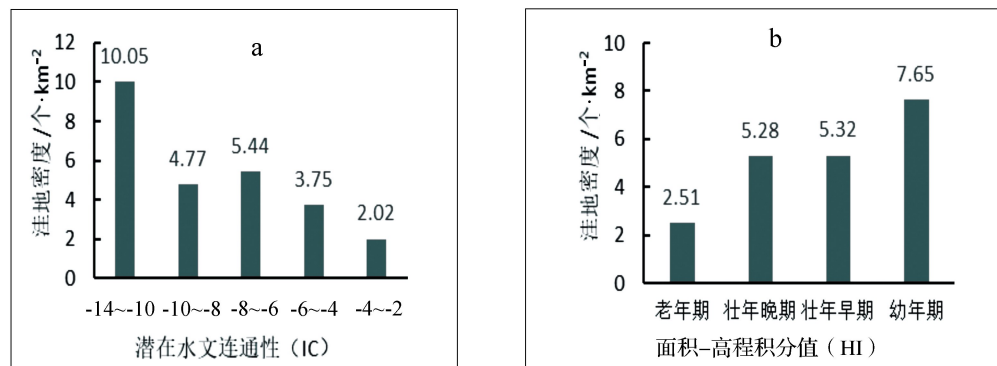


图 7 潜在水文连通性、面积-高程积分值对洼地密度的控制作用

Fig. 7 Controlling effects of potential hydrological connectivity and hypsometric integral value on depression density

如图 7b,随着面积-高程积分值的增加而洼地密度逐渐增加($R^2 = 0.9, n = 4$),不同地貌演化阶段的洼地密度为幼年期($7.65 \text{ 个} \cdot \text{km}^{-2}$)>壮年早期($5.32 \text{ 个} \cdot \text{km}^{-2}$)>壮年晚期($5.28 \text{ 个} \cdot \text{km}^{-2}$)>老年期($2.51 \text{ 个} \cdot \text{km}^{-2}$)。

4 讨论与结论

4.1 讨论

研究区洼地在三个海拔段上有聚集分布特征(图

4a),这种现象也存在于土耳其托罗斯山脉(海拔 $1\ 100 \sim 2\ 400 \text{ m}$)^[37]、克罗地亚韦莱比特地区($1\ 000 \sim 1\ 200 \text{ m}$)^[38]、中国广西七百弄($590 \sim 740 \text{ m}$)^[39]、巴巴多斯($60 \sim 150 \text{ m}$)^[40]、墨西哥尤卡坦半岛(30 m 以下)^[41]。但从实际情况看,海拔对洼地分布的控制没有直接的作用机制,而是由于其他因素在海拔上的分异所导致,如在一些喀斯特山脉,巨大的高差带来温度和降水的垂向差异影响了碳酸盐岩的溶蚀速率,使得洼地在降雨丰富且温度较高的区域出现集中分布^[37]。但在研究区,除圭山一带具有明显的降水增

加外,其他区域的降雨和温度差异不大,所以可能的原因是不同海拔段的坡度和起伏度结构差异,同时三个海拔段从低到高分别是河谷盆地区向石林斜坡区、石林斜坡区向溶丘洼地、峰丛洼地区向构造侵蚀中山区的过渡带,这些过渡带的水动力条件较好,有利于洼地的发育。最后,洼地聚集于不同海拔段可能反映研究区岩溶发育的期次或后期地壳运动特征,这需要今后结合洼地沉积物、钙化等相关资料做进一步的探索。

目前较普遍的认识是随着坡度增加,洼地密度逐渐减小^[42]。研究区洼地集中的坡度等级和太平洋地区的特征一致^[43],而高于克罗地亚韦莱比特地区^[38],洼地分布的最大坡度阈值(24°)低于韦莱比特地区的 32° 和土耳其托罗斯的 30° ^[37]。洼地密度与起伏度的关系是先增后减,100~150 m起伏度的洼地数量最多,密度最大,大于600 m的区域无洼地分布(图4c)。洼地在各等级坡度和起伏度上的分布特征说明在坡度和起伏度较大的区域,地表水以快产、快排为主,下渗能力弱,碳酸盐岩溶解的水动力条件差,洼地不发育,而在中等坡度和起伏度区域,面状溶蚀和垂直下渗过程融合促进了洼地的发育,导致洼地密度的增加^[44-46]。

洼地分布与地层岩石的关系有用上覆地表物质均匀分布来解释的^[47],但这可能不符合石林地区洼地分布与地层岩石的关系。研究区各地层岩石上的洼地密度具有一定差异性和规律性(图5a),虽然洼地发育受到表面覆盖土壤的水分及化学组成的影响^[20],但不同时代地层包含了松散的、破碎的、含泥质的、含生物碎屑的以及白云化的碳酸盐岩,从而导致其在矿物含量、机械强度和节理密度上的差异^[48]。石林地区的白云岩、灰质白云岩的洼地密度大于灰岩及白云质灰岩、碎屑岩的洼地密度(表2),而不是传统认识中灰岩上的洼地密度大于其他岩石类型,这反映了石林地区洼地发育还受地质构造、地形参数等的影响^[1]。

有成果认为逆冲断层间厚层灰岩上发育的断层和节理体系对洼地密度有影响,而逆冲断层前的侧向走滑断层、正断层和节理体系对洼地的几何形状影响更大^[37]。断层活动对洼地长轴方向有控制作用,但在巴巴多斯、克罗地亚布拉奇岛地区的研究显示,洼地长轴和断层延伸方向无显著的对应关系,靠近逆断层的区域基本无洼地发育^[21,40],这种现象被解释为

断层、裂隙的缺失或者是均匀的环境背景和岩石节理的发育。石林县域的三条主断层对洼地发育的控制作用存在差异(图5b),这实则是断层活动控制下的节理发育与地形结构差异对洼地发育的影响。圭山断裂构造活动强度高,形成的一系列节理和裂隙成为地表水的入渗通道,之后随着溶蚀作用的增强,裂隙、节理扩张成为洼地,随着距断层距离的增加,节理、裂隙密度减小,洼地密度随之减小。维则断层是一条舒缓渡状的逆断层,断层面倾角约 21° ^[19],断层两侧地势起伏和缓,是溶丘洼地区和峰丛洼地区,随着距断层距离的增加,洼地密度变化平稳。九乡断层和圭山断层一致,在距离主断层2.5 km以内,随着距离的增加,洼地密度减小,但在大于2.5 km的区域,特别是在断层东侧的巴江河谷盆地边缘,靠近巴江侵蚀基准面使得面状溶蚀与垂直淋滤过程强烈,洼地密度进一步增大。

石林县域地形结构和动力因素受三组断裂及巴江侵蚀基准面控制。地层岩石具有不同的溶解性,断裂、节理增加了土壤水与岩石的接触面积^[49],而海拔带来其他要素的分异,坡度和起伏度则控制了坡面水流的下渗能力和汇聚水量。因此,洼地的空间差异是其发育因子差异性制约的时空反映。已有成果显示,即使在同一区域,洼地发育的主导因素也有差异^[37],所以选择综合性指标研究洼地空间分布特征,更能揭示其发育演化机制,区域性对比才更有可信性和科学性。

潜在水文连通性是地表形态对水空间格局及水过程的定量表达,而面积-高程积分值可反映区域内外营力对地貌格局的塑造和地表动力强度,二者是区域异质性结构的综合性指标,可揭示洼地空间分布规律。石林县域洼地密度随着水文连通性的增加(—14到2)而减少(10.05 个 $\cdot\text{km}^{-2}$ 到 2.02 个 $\cdot\text{km}^{-2}$)(图7a),这表明洼地的发育使地表与地下的连通性增加,而地表各个洼地位置之间的连通性减小,进而改变了地表水文过程和水动力条件;洼地密度随面积-高程积分值增加(0.2到0.71)而增加(2.51 个 $\cdot\text{km}^{-2}$ 到 7.65 个 $\cdot\text{km}^{-2}$)(图7b),这反映了洼地发育是喀斯特地貌分化的重要过程,在地貌发育的不平衡阶段,洼地数量多而小,随着时间进程的变化,洼地合并和扩张导致洼地密度急剧下降,对应地貌发育的平衡和夷平过渡阶段。所以洼地发育在时间上的进程可通过面积-高程积分值来进行表达,积分值大的区

域说明洼地发育处于初始状态,积分值小的区域洼地发育逐渐向均衡状态转变;而在发育动力上可通过潜在水文连通性进行表达,在洼地密度小的区域,水体以在不同地表空间位置之间的迁移运动为主,而地表地下的转换过程较少,水平溶蚀过程强于垂直淋滤过程,洼地向平面方向扩展,所以潜在水文连通性的值较大,而当洼地密度逐渐增大时,洼地内部形成独特的水文结构单元^[47],水体多由洼地边缘向中间渗透进入地下水系统,在空间不同位置之间运移的阻力却逐渐加大,此时地表的潜在水文连通性值减小。但两个指标与洼地密度之间的关系是否存在于其他喀斯特区,将是未来继续研究的方向。

4.2 结论

研究区作为中国南方喀斯特世界自然遗产的重要组成部分,具有世界意义的石林地貌景观主要保存在洼地中。研究区洼地在8 km尺度上为聚集分布模式,按密度大小可划分为高密度(>6 个 $\cdot\text{km}^{-2}$)、中密度($5\sim 6$ 个 $\cdot\text{km}^{-2}$)和低密度(<5 个 $\cdot\text{km}^{-2}$)三个区域;洼地的数量以及密度在各海拔段、坡度、起伏度、地层岩石和断层缓冲区内均有差异性,岩层节理、断层方向对洼地长轴表现出一定的控制作用,洼地密度这种受多因素控制的特点也出现在世界其他喀斯特区;随潜在水文连通性的增加,洼地密度逐渐减小,随面积-高程积分值的增加,洼地密度逐渐增加,两个指标与洼地密度具有较好的相关性,但这种相关性及内在机制需要在更多的案例中进行对比研究,以得到二者关系的规律性认识。

参考文献

- [1] Ford D C, Williams P W. Karst hydrogeology and geomorphology [M]. USA: Hoboken, Wiley & Sons Ltd., 2007.
- [2] Theilenwillige B, Malek H, Charif A, et al. Remote Sensing and GIS Contribution to the Investigation of Karst Landscapes in NW-Morocco[J]. Geosciences, 2014, 4(2):50-72.
- [3] Panno S V, Luman D E. Characterization of cover-collapse sink-hole morphology on a groundwater basin-wide scale using lidar elevation data: A new conceptual model for sinkhole evolution [J]. Geomorphology, 2018, 318(10):1-17.
- [4] Kemmerly P R. Modeling doline populations with logistic growth functions[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2007, 32(4):587-601.
- [5] 朱学稳. 桂林岩溶地貌与洞穴研究[M]. 北京:地质出版社,1988.
- [6] Franci Gabrovšek, Uroš Stepišnik. On the formation of collapse dolines: A modelling perspective[J]. Geomorphology, 2011, 134(1-2):23-31.
- [7] Péntek, K, Veress M, Lóczy, D. A morphometric classification of solution dolines[J]. Zeitschrift Fur Geomorphologie, 2007, 51(1):19-30.
- [8] Wall J, Bohnenstiehl D W R, Wegmann K W, et al. Morphometric comparisons between automated and manual karst depression inventories in Apalachicola National Forest, Florida, and Mammoth Cave National Park, Kentucky, USA[J]. Natural Hazards, 2017, 85(1):1-21.
- [9] Bauer C. Analysis of dolines using multiple methods applied to airborne laser scanning data[J]. Geomorphology, 2015, 250(2):78-88.
- [10] Chen Z, Auler A S, Bakalowicz M, et al. The world karst aquifer mapping project: concept, mapping procedure and map of Europe[J]. Hydrogeology Journal, 2017, 25(3):771-785.
- [11] Sauro U, Ferrarese F, Francese R, et al. Doline Fills-Case Study of the Faverghera Plateau (Venetian Pre-Alps, Italy) [J]. Acta Carsologica, 2009, 38(1):51-63.
- [12] Breg Valjavec M, Zorn M, Čarni A. Human-induced land degradation and biodiversity of Classical Karst landscape: On the example of enclosed karst depressions(dolines)[J]. Land Degradation & Development, 2018, 29(10):3823-3835.
- [13] Siart C, Hecht S, Holzhauser I, et al. Karst depressions as geoarchaeological archives: The palaeoenvironmental reconstruction of Zominthos (Central Crete), based on geophysical prospection, sedimentological investigations and GIS[J]. Quaternary International, 2014, 216(1):75-92.
- [14] Čeru T, Šegina E, Gosar A. Geomorphological dating of pleistocene conglomerates in central slovenia based on spatial analyses of dolines using LiDAR and ground penetrating radar[J]. Remote Sensing, 2017, 9(12):1213.
- [15] Florea L J. Using State-wide GIS data to identify the coincidence between sinkholes and geologic structure[J]. Journal of Cave & Karst Studies, 2005, 67(2):120-124.
- [16] Faivre S, Reiffsteck P. Spatial distribution of dolines as an indicator of recent deformations on the Velebit mountain range [J]. Géomorphologie Relief Processus Environnement, 1999, 5(2):129-142.
- [17] Gutiérrez F, Parise M, Waele J D, et al. A review on natural and human-induced geohazards and impacts in karst[J]. Earth-Science Reviews, 2014, 138(11):61-88.
- [18] Siska P P, Goovaerts P, Hung I K. Evaluating susceptibility of karst dolines (sinkholes) for collapse in Sango, Tennessee, USA[J]. Progress in Physical Geography, 2016, 40(4):579-597.
- [19] 石林研究组. 中国路南石林喀斯特研究[M]. 昆明:云南科技出版社,1997.
- [20] 梁福源, 宋林华, 唐涛. 石林地区土壤性质与喀斯特洼地发育

- [J]. 地理研究, 2004, 23(3):321-328.
- [21] Faivre S, Pahernik M. Structural influences on the spatial distribution of dolines, Island of Brač, Croatia[J]. Zeitschrift Für Geomorphologie, 2007, 51(4):487-503.
- [22] 李玉辉, 冯正清, 俞筱押, 等. 云南石林公园植被重大变化与意义[J]. 中国岩溶, 2005, 24(3):212-219.
- [23] Huang W, Deng C, Day M J. Differentiating tower karst (fenglin) and cockpit karst (fengcong) using DEM contour, slope, and centroid[J]. Environmental Earth Sciences, 2014, 72(2):407-416.
- [24] Liang F, Xu B. Discrimination of tower, cockpit, and non-karst landforms in Guilin, Southern China, based on morphometric characteristics[J]. Geomorphology, 2014, 204(1):42-48.
- [25] Liang F Y, Shi Y R, Abrook G. Mapping cockpit karst in Southern China from ASTER stereo images: DEM validation and accuracy assessment[J]. Carsologica Sinica, 2011, 30(2):233-242.
- [26] Telbisz T, Dragušica H, Nagy B. Doline morphometric analysis and karst morphology of Biokovo Mt (Croatia) based on field observations and digital terrain analysis. [J]. Hrvatski Geografski Glasnik, 2009, 71(2):5-22.
- [27] Ripley, B D. The second-order analysis of stationary point processes[J]. Journal of Applied Probability, 1976, 13(2):255-266.
- [28] Silverman B W. Density estimation for statistics and data analysis[M]. London: Chapman & Hall, 1986:34-74.
- [29] Besag J, Diggle P J. Simple monte carlo tests for spatial pattern[J]. Journal of the Royal Statistical Society, 1977, 26(3):327-333.
- [30] Pringle C M. Hydrologic connectivity and the management of biological reserves: a global perspective[J]. Ecological Applications, 2001, 11(4):981-998.
- [31] Bracken L J, Wainwright J, Ali G A, et al. Concepts of hydrological connectivity: Research approaches, pathways and future agendas[J]. Earth-Science Reviews, 2013, 119(4):17-34.
- [32] Borselli L, Cassi P, Torri D. Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape: A GIS and field numerical assessment[J]. Catena, 2008, 75(3):268-277.
- [33] Tobias H, Marco C, Olivier C, et al. Indices of sediment connectivity: opportunities, challenges and limitations [J]. Earth-Science Reviews, 2018, 187(12):77-108.
- [34] Davis W M. The Geographical Cycle[J]. The geographical Journal, 1899, 14(5):481-504.
- [35] Strahler A N. Hypsometric(area-altitude) analysis of erosional topography[J]. Bulletin of the Geological Society of America, 1952, 63(1):1117-1142.
- [36] 李玉辉, 丁智强, 吴晓月. 基于 Strahler 面积—高程分析的云南石林县域喀斯特地貌演化的量化研究[J]. 地理学报, 2018, 73(5):973-985.
- [37] Öztürk M Z, Şener M F, Şener M, et al. Structural controls on distribution of dolines on Mount Anamas (Taurus Mountains, Turkey)[J]. Geomorphology, 2018, 317(9):107-116.
- [38] Markovic J, Bočić N, Pahernik M. Spatial distribution and density of dolines in the southeastern Velebit Area[J]. Preliminary Communication, 2016, 21(1):1-28.
- [39] 许基伟, 方世明, 黄荣华. 广西七百弄国家地质公园高峰丛深洼地空间形态特征及其成因研究[J]. 地球学报, 2017, 38(6):961-970.
- [40] Day M. Doline Morphology and Development in Barbados[J]. Annals of the Association of American Geographers, 2015, 73(2):206-219.
- [41] Aguilar Y, Bautista F, Mendoza M E, et al. Density of karst depressions in Yucatán state, Mexico[J]. Journal of Cave and Karst Studies, 2016, 78(2):51-60.
- [42] Gams I. Doline morphogenetic processes from global and local viewpoints[J]. Acta Carsologica, 2000, 29(2):123-138.
- [43] Jeanpert J, Genthon P, Maurizot P, et al. Morphology and distribution of dolines on ultramafic rocks from airborne LiDAR data: the case of southern Grande Terre in New Caledonia (SW Pacific)[J]. Earth Surface Processes & Landforms, 2016, 41(13):1854-1868.
- [44] Bočić N, Pahernik M, Mihevc A. Geomorphological significance of the palaeodrainage network on a karst plateau: The Una-Korana plateau, Dinaric karst, Croatia[J]. Geomorphology, 2015, 247(10):55-65.
- [45] Daura J, Sanz M, Josep Forn S J, et al. Karst evolution of the Garraf Massif (Barcelona, Spain): doline formation, chronology and archaeo-palaeontological archives [J]. Journal of Cave and Karst Studies, 2014, 76(5):69-87.
- [46] Sauro U. Landforms of mountainous karst in the middle latitudes: reflections, trends and research problems [J]. Acta Carsologica, 2011, 42(1):5-16.
- [47] Day M. The morphology and hydrology of some Jamaican karst depressions[J]. Earth Surface Processes & Landforms, 1976, 1(2):111-129.
- [48] 章程, 谢运球, 姜光辉, 等. 云南路南石林裂隙渗透张量特征[J]. 中国岩溶, 2001, 20(2):97-100.
- [49] Dreybrodt W. Processes in karst systems—physics, chemistry, and geology[M]. Berlin Heidelberg: Springer, 1988:288.

Study on spatial distribution characteristics and influencing factors of karst depressions in Shilin county, Yunnan Province

DING Zhiqiang¹, YU Xiaoya², GAO Xuan¹, LI Yuhui¹

(1. School of Tourism and Geographical Sciences, Yunnan Normal University, Kunming, Yunnan 650500, China;

2. School of Tourism and Resource Environment, Qiannan Normal University for Nationalities, Duyun, Guizhou 558000, China)

Abstract It is of significance to study the distribution and the factors of karst impact on the development of karst depression in the fields of geomorphology and environmental science. This paper takes Shilin county with abundant karst depressions as the study area, which is in subtropical monsoon climate zone, the south of the karst plateau in eastern Yunnan Province. The area is sandwiched between the Shizong-Mile fault and the west branch of Xiaojiang fault, and at the transition zone between the southeastern margin of Qinghai-Tibet plateau and the Beibuwan hilly plain.

Based on digital elevation model (DEM), the methods of Ripley's K function, nuclear density, buffer analysis, and spatial superposition in ArcGIS are used to analyze the distribution characteristics of the depressions and the influence of geographical environment on them. The results show that, (1) The distribution of karst depression in study area presents an aggregate pattern on a scale of 8 km, and the area can be divided into three sub-areas, namely high-density ($>6 \cdot \text{km}^{-2}$), medium-density ($5 \sim 6 \cdot \text{km}^{-2}$) and low-density ($<5 \cdot \text{km}^{-2}$) areas. The high-density area has a total area of 308 km^2 , which is concentrated in two areas, namely Weihei, Muzhujing, Yusheng, Nuoyi in the east, and Hemo station and Shilin town in the northwest, with an average depression density of $7.20 \cdot \text{km}^{-2}$. The medium-density area is in the surroundings of the high-density area, including Yinai, Douhei, Southern Haiyi, and Northern Weize, with an average density of $5.74 \cdot \text{km}^{-2}$; and the low-density area is mainly at the edge of county, with an average density of $4.16 \cdot \text{km}^{-2}$. From the aspect of morphological parameters of the depression individuals, perimeter and area of them are high-density area $<$ medium-density area $<$ low-density area; depth and side slope are high-density area \approx medium-density area $>$ low-density area. (2) The spatial distribution of the depressions is controlled by the factors such as topography, geomorphology and geology. They have different quantity and density at different locations in elevation, relief, slope, rock type and fault buffer. At the altitude of $1,850 \sim 1,950 \text{ m}$, the maximum number of depressions is 37.1% , while the slope of $6^\circ \sim 12^\circ$ accounts for the most as 82.0% , the relief of $100 \sim 150 \text{ m}$ is 31.3% , and the landform classification of karst hilly zone is 34.3% . In terms of rock type, the depression density in the Quaternary deposit area is $5.8 \cdot \text{km}^{-2}$, and in dolomite area is $5.6 \cdot \text{km}^{-2}$, which are both dominant distributions due to lithostratigraphy. There are differences among the density in the buffer zone of three fault groups, with similar trend of density variation at each fault group. Tectonic joints and fractures developed in the Devonian, Carboniferous and Permian strata and the Jiuxiang, Weize and Guishan faults in study area strongly control the development of karst depressions along their long axis directions. (3) The spatial variation of the depression density is well correlated with two comprehensive indicators of regional heterogeneous structure of potential hydrological connectivity (IC) and hypsometric integral (HI). As the IC value increases, the depression density decreases, showing a significant negative correlation ($R^2=0.81$). While with the increase of HI value, the depression density gradually increases, showing a significant positive correlation ($R^2=0.90$).

The spatial distribution of karst depressions is affected by geographical factors, and IC and HI can comprehensively reflect the distribution characteristics of depressions in study area, however, whether this law is universal still need further study.

Key words karst depression, connectivity, hypsometric integral, geographic information system, Shilin country

(编辑 黄晨晖)