

文章编号: 1008-2786-(2019)3-316-12

DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.000425

石林县域洼地特征与资源环境效应

丁智强¹, 高璇¹, 李玉辉^{1*}, 俞筱桢^{1,2}

(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: 地貌类型的结构多样性和生态系统各要素耦合的复杂性, 使得喀斯特人地关系地域系统中出现水土流失、石漠化、贫困等各种特殊的生态环境和社会问题。洼地是喀斯特地形分化的元地形, 对其研究有助于从地貌动力学视角深化对喀斯特地区资源环境要素的认识。本文将基于 ASTER-GDEM 地形数据的 GIS、RS 空间分析与野外地质地貌调查成果相融合, 研究石林县域洼地形态特征与空间格局, 揭示洼地发育的资源环境效应。结果表明: (1) 石林县域洼地 8597 个, 总面积 269.45 km², 占县域面积的 15.16%, 洼地平均面积 3.13 ± 6.83 hm², 深度 15.8 ± 11.2 m, 坡度 7.42 ± 2.68°, 长轴长度 237 ± 227 m, 圆度指数 1.26 ± 0.28, 频率分布呈左偏特征, 洼地点蚀指数为 6.14, 显示区域地貌发育处于不成熟的初始分化状态。(2) 石林县域洼地为显著聚集分布模式, 按密度范围可分为高密度(>6 个/km²)、中密度(5~6 个/km²)和低密度(<5 个/km²)三个区域。(3) 洼地高低密度的差异性空间分布与泉眼、暗河、地下水系统流向等具有高度空间相关性, 表现为地下水往往从高密度区向低密度区流动, 暗河的源头区分布于高密度区, 泉眼等地下水排泄通道位于低密度区; 植被覆盖度和石漠化强度等资源环境指标的分布在不同密度洼地区具有显著差异性, 表现为随着洼地密度的增加, 区域内低植被覆盖度和高等级石漠化强度的面积逐渐增加。洼地作为降雨汇聚成地表径流转入地下暗河的有利地形, 其空间格局是区域水土资源流失/漏失的关键性空间格局, 高密度洼地区是水土保持与石漠化治理的重要区域, 这种认识为喀斯特地区资源环境规划及管理提供了地貌学理论与技术基础。

关键词: “3S”技术; 洼地形态参数; 喀斯特水文结构; 石漠化治理; 石林

中图分类号: P931.5

文献标志码: A

全球陆地表面上发育典型喀斯特地貌的碳酸盐岩区占比超过 12%^[1]。地貌类型的结构多样性和生态系统各要素耦合的复杂性, 使得喀斯特人地关系地域系统中出现水土流失、石漠化、贫困等各种特殊的生态环境和社会问题^[2-4]。喀斯特地貌特征研究对于揭示喀斯特地貌类型的差异性、复杂性以及指导喀斯特地区生态恢复、水源保护与管理、精准扶贫等具有重要的理论和现实意义。封闭的洼地是喀

斯特地貌发育演化的元地形, 是碳酸盐岩区的典型地貌类型^[1,5]。洼地密度可以揭示区域喀斯特作用的强度, 反映不同地貌演化阶段的特征^[1], 同时可以有效指导工程建设^[6-7]、污染性企业选址^[8]等。虽然洼地的负地形结构和较深的裂隙通道被认为是地下水的主要补给区和地表水土的漏/流失区^[9-11], 但目前研究主要集中在洼地的成因和分类^[12]、沉积物考古^[13]、生物多样性^[14]、土壤性

收稿日期 (Received date): 2018-7-16; **改回日期** (Accepted date): 2018-11-25

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金项目(41262013; 41371514); 云南师范大学研究生科研创新基金项目(yjs2018114)。[National Natural Science Foundation of China (41262013; 41371514); Graduate Project of Research Innovation Foundation of Yunnan Normal University (yjs2018114)]

作者简介 (Biography): 丁智强(1993-), 男, 云南禄劝人, 硕士研究生, 主要研究方向: 喀斯特地貌演化与资源环境效应。[DING Zhiqiang (1993-), male, born in Luquan, Yunnan province. M. Sc. candidate, research on geomorphological evolution of karst and its resource-environmental effects] E-mail: zhiqiang_ding9303@163.com.

*** 通讯作者** (Corresponding author): 李玉辉(1957-), 男, 教授, 主要研究方向: 喀斯特资源环境和生态恢复。[LI Yuhui (1957-), male, professor, specialized in environment and ecological restoration of karst resources] E-mail: lyh123zhang@163.com

质^[15]、景观格局^[16]、水文过程等^[17]方面,且在空间尺度上多着眼于单个或几个峰丛洼地不同地貌部位和土地利用差异方面的讨论^[18-21],而对区域洼地分布与水文地质结构(暗河、泉眼、地下水系统流向)空间关系的关注不够,更缺乏对高/低密度洼地区与区域资源环境指标(植被覆盖度、石漠化强度等)之间响应关系的研究,这可能使喀斯特地区石漠化的治理缺乏地貌动力学方面的支撑。

选择既有区域重要地貌资源,又与资源环境关系密切的喀斯特区域进行洼地的分析研究,有助于提升喀斯特数字地形分析研究的水平,深化区域地貌发育演化与喀斯特资源环境问题响应关系的认识。石林县域作为中国南方喀斯特世界遗产地的重要组成部分,发育有具世界代表性的石林地貌景观。由于过去三十年来经济的快速发展,区内资源环境保护利用形势日趋严峻^[22-23]。该区目前的研究主要集中在石林地貌的形成条件^[24-25]、发育过程及模式^[26]、发育年代^[27]、古地理环境^[28]等方面,而从区域喀斯特地形演化与喀斯特资源环境整治的关键区选择相融合的角度,依据现代空间技术的喀斯特洼地地貌分析与资源环境效应的整体性研究报道鲜

见。本研究将喀斯特洼地亟待研究的方面与石林地区面临的实际问题相结合,基于 ASTER-GDEM(先进星载热发射和反射辐射仪全球数字高程模型)数据,将 RS、GIS 技术与野外水文地质证据相融合,提取了石林县域洼地的数量,计算洼地的形态参数,确定以下的研究目标:(1)研究石林县域洼地的形态参数及频率分布特征;(2)研究石林县域洼地的空间分布特征;(3)将洼地形态、密度的空间差异格局与县域暗河、泉眼、地下水流向、植被覆盖度、石漠化强度等相关联,用于评估洼地发育的资源环境效应。此外,还讨论了统一洼地提取方法、筛选阈值、分类标准等的必要性。既为石林县域地貌资源保护利用和喀斯特石漠化治理的空间关键区选择提供地貌学理论依据,也深化对喀斯特洼地科学内涵的认识。

1 研究区概况

石林县经纬度位置 $24^{\circ}30'N \sim 25^{\circ}03'N$, $103^{\circ}10'E \sim 104^{\circ}40'E$, 海拔 1476 ~ 2613 m, 面积 1654 km²。石林县域地貌分异受地层岩性、构造、地形及流域位置的控制。本区出露地层有新元古界、

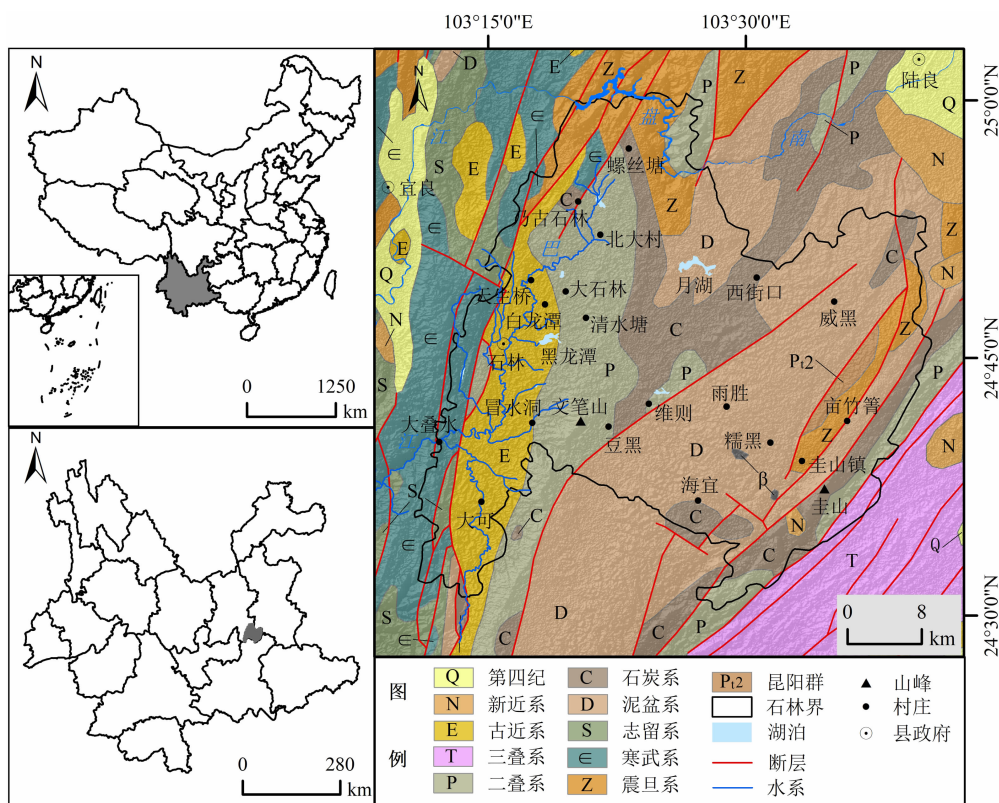


图1 石林县城区位图及地质简图

Fig. 1 Location and geological sketch of Shilin County, China

古生界、新生界(图1),多呈南北向条带状分布^[29]。石林县域的控制性断裂构造主要为石林县西部的九乡—石垭口断裂、中部的维则断裂与东部的圭山断裂,三条断裂均切割古近系路南群,为古近纪以来持续活动的断裂带/组。九乡—石垭口断裂以西和圭山断裂以东为构造侵蚀溶蚀孤丘溶原中山,维则断裂以西至路南盆地为溶原溶丘洼地、石林斜坡,地下暗河发育;维则断裂至圭山断裂一带则是矮峰丛洼地区。九乡—石垭口断裂与圭山断裂带间的上古生界碳酸盐岩区是喀斯特洼地发育区,与石林、溶丘、峰丛、暗河关系密切。

石林县域地形为受差异升降断块活动影响的构造侵蚀溶蚀溶原山地,最高峰为圭山(2601 m),境内有巴江自北往南,经路南盆地转向西南方向流出石林县,汇入南盘江。石林县域气候为高原低纬亚热带半湿性季风气候,多年平均降水量 1040 mm,雨季集中在每年的 5—11 月,降水量占全年的 80%。多年平均气温 15.6 °C,月均温 8.26 °C ~ 25.63 °C。地带性植被为半湿性常绿阔叶林,现状植被以暖性针叶林、石灰山灌丛为主,原生植被主要分布于彝族村寨保护林地(密枝山)。

2 研究方法

2.1 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^[31-32]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^[33],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 数字产品依然是洼地分析的可信基础地形数据^[34-36]。

本研究提取洼地的 ASTER - GDEM 数据下载自中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台^[37],共计四景,地理坐标 WGS_1984,投影坐标 WGS_1984_UTM_Zone_47N,像元分辨率 30 m。在 ArcGIS10.2 中进行数据镶嵌,然后利用石林县域矢量范围裁剪得到研究区 DEM。通过 Spatial Analysis Tools→表面分析→等值线工具,对等高线进行加密处理,得到等高距为 2 m 的等高线,保留每个负地形最外围的一根等高线,删除余下等高线,之后将洼地

叠加到 Google Earth 上进行校正,并在野外进行修正,最终确定石林县域洼地数据库。

2.2 洼地形态参数及定义

洼地是封闭状、中间低洼的负地形^[38]。基本形态参数有周长、面积、深度、体积、平均坡度、长轴、长轴方向、短轴、长轴/深度比值(D/H)、点蚀指数(R_p)、圆度指数等。

洼地深度为封闭洼地的等高线海拔高度与洼地内最低点海拔的差值,基于“分区统计”工具计算;将洼地近似为圆锥体来计算洼地体积,计算公式为: $V_d = A_i * H/3$, V_d 为洼地的近似体积, H 为洼地深度; A_i 为洼地面积(km^2);洼地的长轴和短轴长度利用“最小边界几何”工具计算洼地外接最小矩形的长和宽来确定。

点蚀指数(pitting index):表示喀斯特化作用的强度^[39],喀斯特化程度越高, R_p 越接近 1,计算公式: $R_p = A_k / \sum_i^n A_i$, A_k 为研究区总面积(m^2), A_i 为单个 i 洼地的面积(m^2)。

洼地圆度指数 Gc (Gravelius 系数)计算公式为: $Gc = C/2\sqrt{\pi A} = 0.28C/\sqrt{A}$,式中, C 为洼地周长(m), A 为洼地面积(m^2), Gc 值越接近 1,则洼地形状越圆,说明受外营力的改造越小^[40]。

2.3 空间分析方法

K 函数(Ripley's K)^[41]和核密度函数^[42]是识别点数据分布模式和空间密度差异的有效方法,本文用于分析洼地的空间分布模式和确定洼地的密度分区。

K 函数的公式为:

$$K(d) = \frac{A}{n^2} * \sum_{i \neq j} \sum I_d(d_{ij}) \quad (1)$$

式中, A/n^2 为半径 d 对应圆内的洼地密度, n 研究区面积(m^2)内的洼地数量; $I_d(d_{ij})$ 为研究区以第 j 个洼地为中心,第 i 级半径 d_i 所对应的表征量。实际进行洼地空间分布分析时应用基于该算法的 ArcGIS 工具获取 K 观测值曲线、 K 预测值(数学期望)曲线以及显著性水平曲线^[43]。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;如果 K 观测值小于 LwConfEnv 值(Monte Carlo 空间模式检验下限),则该距离的空间

离散分布具有统计显著性。

2.4 植被覆盖度及石漠化区提取

(1) 植被覆盖度利用 Landsat8 OLI 数据提取(图 2a),影像成像时间为 2018 年 3 月。对影像进行几何校正、辐射定标、大气校正等预处理后,基于李苗苗等^[44]提出的像元二分模型计算:

$$VFC = \frac{NDVI - NDVI_{soil}}{NDVI_{veg} - NDVI_{soil}} \tag{2}$$

式中,VFC 为植被覆盖度,NDVI_{soil}为完全是裸土或无植被覆盖区的 NDVI 值,而 NDVI_{veg}代表完全被植被覆盖的像元的 NDVI 值,即纯植被像元的 NDVI 值。

两个值的计算公式分别为:

$$NDVI_{soil} = \frac{VFC_{max} * NDVI_{min} - VFC_{min} * NDVI_{max}}{VFC_{max} - VFC_{min}} \tag{3}$$

$$NDVI_{veg} = \frac{(1 - VFC_{min}) * NDVI_{max} - (1 - VFC_{max}) * NDVI_{min}}{VFC_{max} - VFC_{min}} \tag{4}$$

当 VFC_{max} 和 VFC_{min} 取近似值 VFC_{max} = 100%, VFC_{min} = 0% 时,模型简化为:

$$VFC = \frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \tag{5}$$

此时,NDVI_{max} 和 NDVI_{min} 一般取一定置信度范围内的最大值与最小值,置信度的取值主要根据图像实际情况来定。本文根据研究区 NDVI 频率的分布情况,分别取累积概率为 5% 和 95% 的 NDVI 值作为 NDVI_{min} 和 NDVI_{max},即 NDVI_{max} = 0.4187,NDVI_{min} = 0.0654。

(2) 石漠化区提取是利用已下载处理的 Landsat8 OLI 数据,在 ENVI5.1 软件中通过监督分类获得。最后再依据石漠化区的植被覆盖度、坡度两个指标因子^[23],结合石林县石漠化监测结果,将石漠化区划分为潜在石漠化、轻度石漠化、中度石漠化、重度石漠化和极重度石漠化五个等级(图 2b,表 1)。

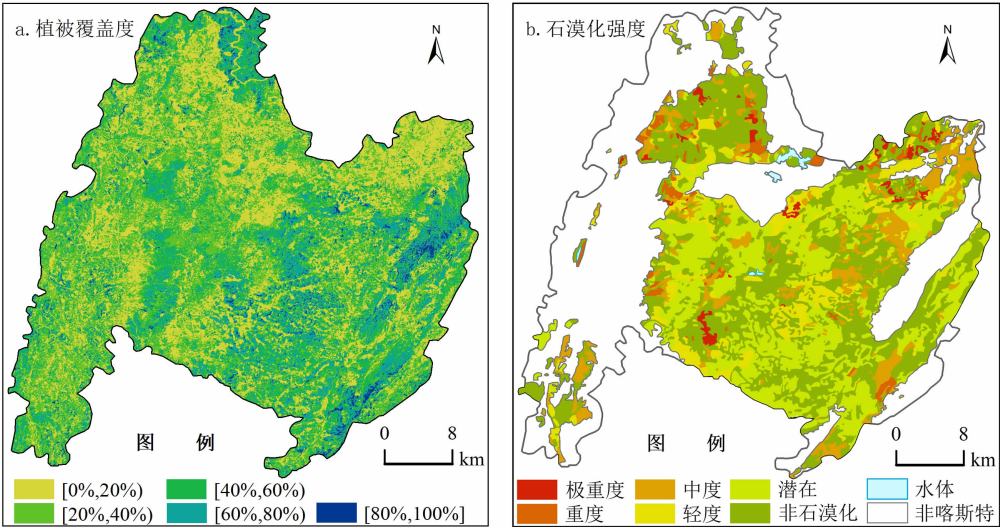


图 2 石林县域植被覆盖度及石漠化强度空间分布图

Fig.2 Spatial distribution of vegetation coverage and stony desertification intensity of Shilin County, China

表 1 研究区石漠化分级指标

Tab.1 Grading indexes for karst rocky desertification in the study area

石漠化强度	极强度	强度	中度	轻度	潜在	无石漠化
植被覆盖度	<10%	10% ~ 20%	20% ~ 30%	30% ~ 40%	40% ~ 60%	>60%
坡度	>30°	25° ~ 30°	22° ~ 25°	18° ~ 22°	15° ~ 18°	<15°

3 结果分析

3.1 洼地形态参数频率分布

石林县域洼地总面积 269.45 km^2 , 占石林县域面积 15.16%, 点蚀指数为 6.14, 洼地密度 5.20 个/km^2 。

石林县域洼地形态差异较大, 其频率分布具有左偏特征(图 3)。提取的 8597 个洼地平均周长 705.60 m , 97.20% 的洼地周长 $< 3000 \text{ m}$; 洼地平均面积 3.13 hm^2 , 90.00% 的洼地面积 $\leq 7 \text{ hm}^2$, 47.90% 的洼地面积 $\leq 1 \text{ hm}^2$, $> 10 \text{ hm}^2$ 的洼地仅有 6.70%; 洼地的平均近似体积 0.34 hm^3 , $\leq 0.07 \text{ hm}^3$ 的洼地占 90.30%, $\leq 0.01 \text{ hm}^3$ 的洼地占 66.50%。洼地平均坡度 7.4° , 82.00% 的洼地平均坡度 $5 \sim 15^\circ$ 。洼地深度 $3 \sim 109 \text{ m}$, 平均深度 15.79 m , 46.03% 的洼地深度 $6 \sim 13 \text{ m}$, 43.40% 洼地深度 $14 \sim 50 \text{ m}$, 深度小于 6 m 和大于 50 m 的洼地占 10.57%。洼地长轴 $41.41 \sim 2930.85 \text{ m}$ 之间, 均值 237.65 m , 90.00% 的洼地长轴长度 $< 500 \text{ m}$ 。洼地长轴/深度比 $2.92 \sim 70.79$, 均值 15.40 , $10 \sim 25$ 之间的洼地占 66.98%。圆度指数 $1.04 \sim 3.62$, 均值 1.26 。

3.2 洼地空间分布特征

如图 4a, 石林县域洼地在不同空间分析尺度上具有显著的聚集或离散分布。具体来看, 当空间分析尺度在 $0 \sim 18 \text{ km}$ 时 K 观测值大于 K 预测值, 且在 8 km 尺度上 K 观测值与 K 预测值之间的差值最大, 说明洼地在 $0 \sim 18 \text{ km}$ 的空间尺度内为聚集分布

模式, 在 8 km 的空间分析尺度上达到最显著的聚集分布; 当空间分析尺度大于 18 km 后, K 观测值小于 K 预测值, 说明在这一空间尺度内洼地的分布模式为显著的离散分布。所以 K 函数分析揭示了洼地的空间分布模式具有空间尺度依赖性, 这与 Jeanpert 等学者的研究一致^[45]。

依据 K 函数分析结果, 应用核密度分析原理, 选择洼地聚集最显著的空间分析尺度 $L = 8 \text{ km}$ 为搜索半径, 得出洼地密度分布特征(图 4b)。从图中可以看出, 在 8 km 的空间尺度上, 石林县域洼地密度 $0 \sim 7.45 \text{ 个/km}^2$ 。依据该区域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), 其中高密度区为洼地密度大于 6 个/km^2 的区域, 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 km^2 , 平均洼地密度为 7.18 个/km^2 , 高于县域平均密度(5.20 个/km^2), 点蚀指数为 4.99; 中密度区为洼地密度在 $5 \sim 6 \text{ 个/km}^2$ 之间的区域, 包括宜奈、豆黑、海宜南部、维则北部, 平均洼地密度 5.74 个/km^2 , 点蚀指数为 5.08; 低密度区为洼地密度小于 5 个/km^2 的区域, 多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 4.16 个/km^2 , 点蚀指数为 7.71。研究区洼地密度的空间分布与“石林县溶丘洼地主要分布在研究区北部和东部”的描述一致^[29]。高密度区的洼地周长、面积小于中低密度区; 洼地的深度和边坡坡度是高中密度区高于低密度区, 点蚀指数是高密度区 $<$ 中密度区 $<$ 低密度区(表 2)。

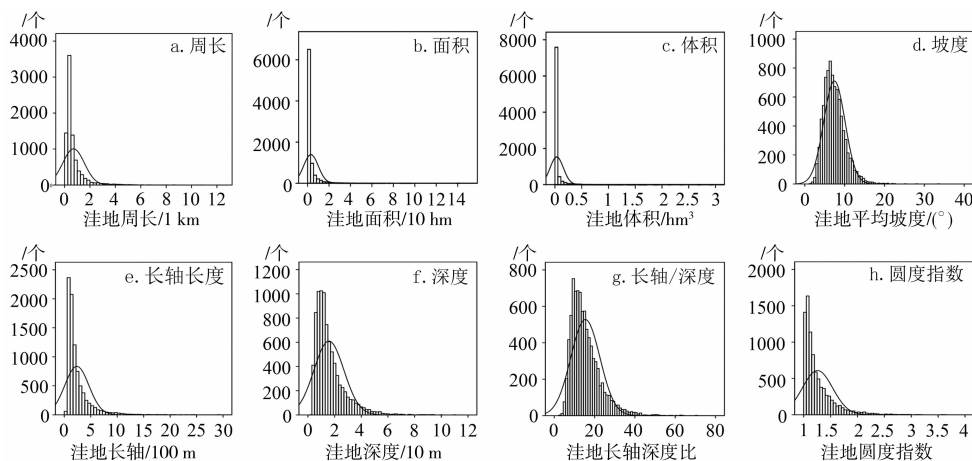


图 3 洼地形态参数频率分布图

Fig. 3 Frequency distribution of the depressions' morphological parameters

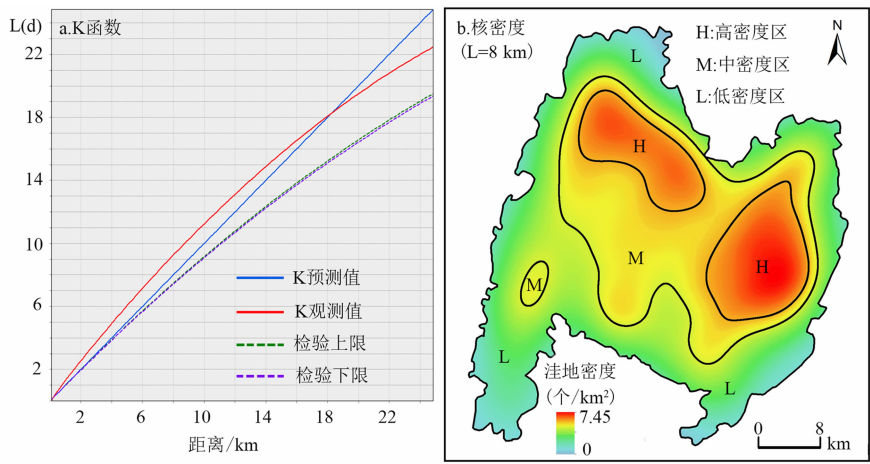


图 4 洼地 K 函数分析及核密度图

Fig. 4 K function analysis and kernel density map of the depressions

表 2 石林县不同密度区的洼地形态参数

Tab. 2 Depression morphological indexes in Shilin County

分区	周长/100m	面积/hm ²	深度/100m	坡度/°	直径/100m	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

3.3 洼地与暗河、泉眼、地下水流向的空间关联性

从图 4b 来看,8 km 的搜索半径概化了不同洼地密度区的边界,为分析洼地密度与水文地质要素的空间相关性,经过多次试验尝试,选择 $L = 3\text{ km}$ 计算得到洼地空间密度图,最后叠加上暗河、泉眼及地下水流向等数据进行分析。

喀斯特暗河主要分布在石林县域九蟠山以西(图 5a),除天生桥暗河的源头区、径流区、排泄区为洼地密度相对低的区域外,其他暗河多发源于洼地密度较高的区域,如白龙潭暗河、黑龙潭暗河、冒水洞暗河(图 5ab),它们的源头为月湖至长湖一带的洼地高密度区,这一区域也是石林地区重要的湿地群,其径流区的洼地密度低于源头区,在排泄区有泉眼分布,洼地密度亦相对较低,暗河沿线有多个天窗和落水洞(图 5c),这些落水洞和天窗所在的洼地也是发育典型石林地貌景观的重要区域。北大村暗河发源于洼地密度较高的区域,其径流区洼地密度亦相对较高,其排泄区位于洼地高密度区的边缘(图 5a),这里的洼地与暗河是巴江河流源头,发育注入式源头的暗河系统。

从地下水系统的流动方向与洼地密度的空间关

系来看(图 5a),区域地下水流向往往从洼地高密度区向低密度区流动,如亩竹箐—威黑一带为洼地密度相对高的区域,其地下水以该区域为中心向四周扩散,说明这一区域是地表水经过洼地汇集后转变为地下水的重要区域,即高密度洼地区是降雨、地表径流汇聚区,成为暗河、喀斯特泉的源头;暗河系统径流方向始终是从洼地高密度区流向低密度区,体现了碳酸盐岩区地表地下水资源动态过程的介质功能属性。

3.4 洼地与植被覆盖度、石漠化强度的相关性

基于 3.2 中对洼地密度的划分,本节分析洼地高密度、中密度区、低密度区与植被覆盖度、石漠化的关系。

如图 6a 显示了不同密度洼地区的不同植被覆盖度等级所占面积百分比的情况。在高和中密度洼地区,随着洼地密度的减小,高植被覆盖度的区域在增加。而在低密度洼地区,植被覆盖度小于 20% 的区域占比(27.05%)和大于 60% 的区域占比(17.00%)相较中、高密度区有所增加,而植被覆盖度在 20% ~ 60% 的区域有所减少,这可能是由于低密度区为城镇分布区,大面积的耕地和大规模的城

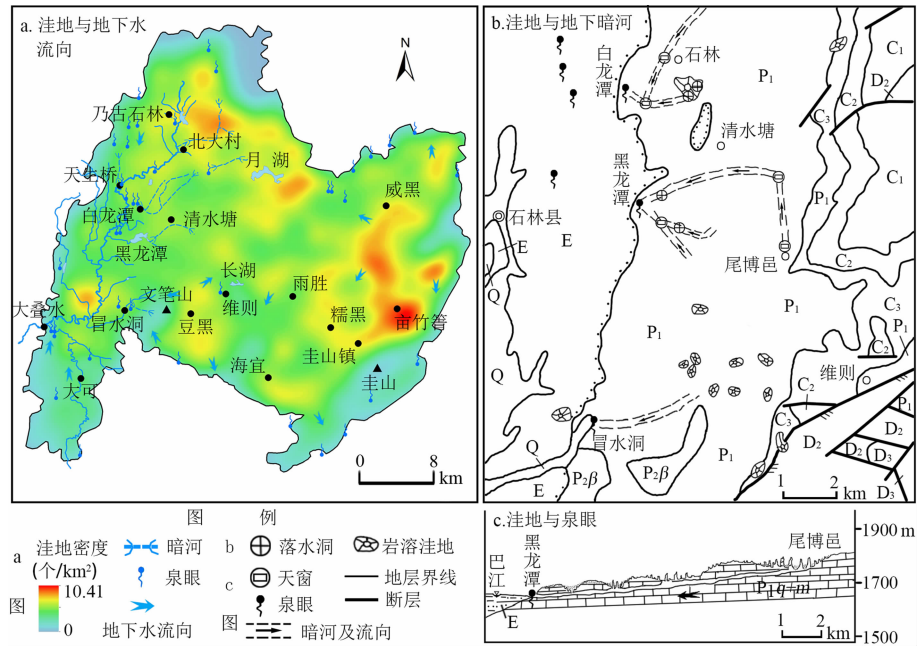


图5 不同洼地密度区与暗河、泉眼、地下水流向的空间相关性

Fig. 5 Spatial correlation of depression density with underground river, spring, and groundwater

镇建设、绿化工程使得该区低和高植被覆盖度区增加,中植被覆盖度区减少,此时洼地的空间密度不是资源环境要素演化的主要因素,而是强烈的人类活动干扰。

图6b显示了不同洼地密度区域范围内不同石漠化强度的面积占比情况。总体反映了从低密度洼地区到高密度洼地区,石漠化程度逐渐加重,极重度、重度、中度和轻度石漠化区的面积占比呈增加趋势,即洼地密度从低到高,极重度石漠化区从0.62%增加到1.77%,重度石漠化从1.26%增加到

2.33%,中度石漠化从6.64%增加到11.96%,轻度石漠化从4.57%增加到9.44%。而潜在石漠化区域在中密度洼地区的占比最大,为30.23%,轻度石漠化区次之,为13.14%,中度石漠化区最小,为9.37%。

4 讨论与结论

4.1 讨论

石林县地域地形结构为受三组断裂和巴江侵蚀基准面控制^[29],地形以溶原洼地为主,县域洼地形态参数频率的左偏特征(图3)与6.14的点蚀系数,反映了石林县喀斯特高原夷平溶原面的初始性分化,而K函数与核密度分析显示的密度图(图4,表2)揭示了洼地发育的空间差异。洼地圆度系数近于1的形态特征反映了石林县地表径流汇聚与洼地发育和地下径流转化的机制,即持续隆升的夷平溶原地形中的节理交汇处,成了降雨汇聚成地表径流的有利场所,侵蚀溶蚀过程没有明显的方向性。石林县洼地密度5.2个/km²,与全球其他地方相比,小于墨西哥尤卡坦半岛的135.9个/km²^[46],新喀里多尼亚格兰德特地区的50.1个/km²^[45]、克罗地亚格拉查茨地区的10.6个/km²^[47]和巴巴多斯的9.5个/km²^[32],接近美国佛罗里达苏门尼河流域下

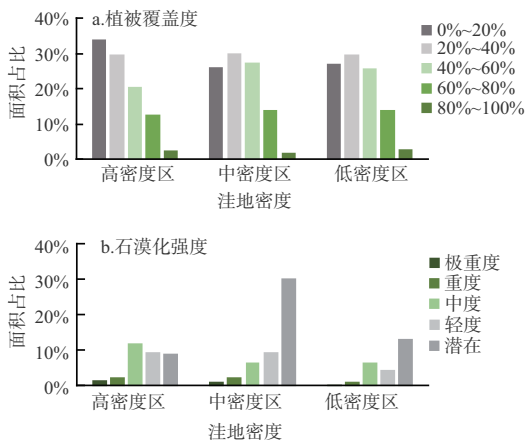


图6 植被覆盖度与石漠化强度

Fig. 6 Vegetation coverage, rocky desertification degree and depression density

游盆地的 $6.1 \text{ 个}/\text{km}^2$ [48]。另外,洼地的形态参数在各个区域存在更大的差异。洼地的形成和演化除受气候条件的控制以外,还和区域地层岩性、断裂构造、坡度、起伏度、海拔等密切相关,所以影响洼地形态的因素及作用机制如何,是揭示洼地发育的重要内容,将在未来开展的工作中进一步讨论。

石林县域洼地密度空间的差异性与暗河水源区、地下径流、泉眼展布格局具有明显的对应特征(图5),不同密度洼地区内的各级植被覆盖度和石漠化强度的占比有规律性变化,即高密度洼地区的植被覆盖度低于低密度洼地区,石漠化强度高于低密度洼地区,这是石林县域节理构造、河流侵蚀基准面控制、地表径流与地下径流转化的协同效应的综合反映。洼地密集区多是石林县域喀斯特湿地/湖泊、竖井、落水洞发育区,为地下暗河源头区(图5a),因此,洼地是降雨汇聚成地表径流转入地下暗河的有利地形,由于竖井、落水洞等暗河通道的发育,汇聚洼地的地表径流持续向下溶蚀,一方面促进了地表水向地下径流的转化,另一方面地表的土壤随径流漏/流失进入地下,洼地成为地表水通向暗河流失的关键点,这与“喀斯特完全入渗式流域特点”、“高原剥夷面逐渐向喀斯特浅丘洼地转化”的水文地质结构的分析结论 [49-50] 相吻合,这也是喀斯特地区石漠化、水土流失等资源环境问题的根本性机制,洼地密集区是石林县域表层水土资源流失/漏失的“汇”与地下水补给的“源”关键区,体现了喀斯特区域水土资源的动态性 [51]。同时,供给石林县域路南盆地重要水源如黑龙潭水库、白龙潭、天生桥、冒水洞等暗河的源头区(图5)位于高密度洼地区,同时这一区域也是植被覆盖度低、石漠化程度高的区域(图6),具有潜在的生态安全风险,因此,高密度洼地区应是县域水土保持、石漠化治理的重要空间节点和生态修复的重点。

最后,由于洼地在喀斯特地貌研究及指导喀斯特区相关机构如何有效地进行环境管理、规划中的积极地位 [1],越来越多的喀斯特研究者将目光聚集在洼地识别、分类、数据库建设及全球对比等开创性的工作中 [52]。本研究基于 DEM 数字地形数据构建的石林县域洼地数据库,是该区域洼地定量化研究的一次有益尝试,但考虑到 DEM 栅格大小为 $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$,数据精度的限制以及洼地沉积物的存在 [53] 往往会忽略中小型的洼地,导致对区域洼地

总体数量、深度等的估计不足 [33,54]。高精度的机载激光扫描仪(ALS)有助于解决这个问题,但获取数据的成本过高 [50]。另外对于相同的数据精度,洼地识别和提取方法的差异也会影响最终的总体数量和形态参数 [50]。所以如何建立具有世界对比意义的统一高效的洼地提取方法、筛选阈值和分类标准 [55],形成世界喀斯特洼地数据库 [56-57],是进行喀斯特地貌研究的重要基础性问题之一。

4.2 结论

本研究将基于 ASTER - GDEM 地形数据的 GIS、RS 空间分析与野外地质地貌调查成果相融合,以石林县域为研究对象,首次从区域空间尺度上分析了洼地密度差异分布与水文地质结构和资源环境指标之间的相关性,结果与野外区域地质地貌调查成果相吻合。最后得出:洼地是降雨汇聚成地表径流再转入地下暗河的有利地形,其空间格局是区域水土资源流失/漏失的关键性空间格局,高密度洼地区是水土保持与石漠化治理的重要区域,水土流失、石漠化等问题的发生、发展过程除了人为活动的干预外,作为喀斯特地区典型地貌之一的洼地的发育、演化也是其存在和治理成效甚微的重要地貌基础,这为喀斯特地区石漠化发生及其治理提供了新的视角,而这种认识在之前的研究中往往被忽略。通过对基本参数和形态特征的分析,石林县域洼地为聚集分布模式,其左偏的频率分布和较高的点蚀指数(6.14)表明该区域喀斯特夷平溶原山地分化的初始性和不完全性,洼地的数量和面积还处于一个增长的阶段,未来随着更多洼地的发育和扩张,区域生态环境具有逐渐恶化的潜在风险。

参考文献(References)

- [1] FORD D C, WILLIAMS P W. Karst hydrogeology and geomorphology[M]. Hoboken: John Wiley and Sons Ltd., 2007: 3-10.
- [2] 贵州师范大学喀斯特生态文明研究中心《喀斯特生态文明研究》委员会. 喀斯特生态文明研究[M]. 北京: 中国社会科学出版社, 2011: 3-62. [Research Committee of Karst Ecological Civilization Research of Karst Ecological Civilization Research Center of Guizhou Normal University. Study on karst ecological civilization[M]. Beijing: China Social Science Press, 2011: 3-62]
- [3] 胡宝清. 喀斯特人地系统研究[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 43-79. [HU Baoqing. Study on human-land systems in karst areas [M]. Beijing: Science Press, 2014: 43-79]

- [4] 陈喜. 西南喀斯特地区水循环过程及其水文生态效应[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 253–267. [CHEN Xi. Water circulation process and its hydro-ecological effects in karst areas of Southwest China[M]. Beijing: Science Press, 2014: 253–267]
- [5] CVIJIC J. Das karstphänomen: versuch einer morphologischen monographie[J]. Geographische Abhandlungen, 1893, **5**(3): 217–330.
- [6] SISKAP 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.
- [7] GUTIERREZ F, PARISE M, DE WAELE J, et al. A review on natural and human-induced geohazards and impacts in karst[J]. Earth-Science Reviews, 2014, **138**(11): 61–88.
- [8] RUDZIANSKAITE A, TREIJA S, SKUJENIECE S. The change of water quality in the sinkholes in Lithuanian karst zone [C]// Jelgava: Research for rural development-annual 19th international scientific conference proceedings, 2013: 153–160.
- [9] ANTONIC O, HATIC D, PERMAR R. DEM-based depth in sink as an environmental estimator[J]. Ecological Modelling, 2001, **138**(1/3): 247–254.
- [10] LI Xiaoyan, CONTRERAS S, SOLE-BENET A. Unsaturated hydraulic conductivity in limestone dolines: influence of vegetation and rock fragments[J]. Geoderma, 2008, **145**(3/4): 288–294.
- [11] 蒋忠诚, 罗为群, 邓艳, 等. 岩溶峰丛洼地水土漏失及防治研究[J]. 地球学报, 2014, **35**(5): 535–542. [JIANG Zhongcheng, LUO Weiqun, DENG Yan, et al. The leakage of water and soil in the karst peak cluster depression and its prevention and treatment[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2014, **35**(5): 535–542]
- [12] GABROVSEK F, STEPISNIK U. On the formation of collapse dolines: a modelling perspective[J]. Geomorphology, 2011, **134**(1/2, SI): 23–31.
- [13] ETIENNE D, RUFFALDI P, DUPOUEY J L, et al. Searching for ancient forests: a 2000 year history of land use in northeastern French forests deduced from the pollen compositions of closed depressions[J]. Holocene, 2013, **23**(5): 678–691.
- [14] BATORI Z, CSIKY J, FARKAS T, et al. The conservation value of karst dolines for vascular plants in woodland habitats of Hungary: refugia and climate change[J]. International Journal of Speleology, 2014, **43**(1): 15–26.
- [15] 张川, 陈洪松, 聂洪鹏, 等. 喀斯特地区洼地剖面土壤含水率的动态变化规律[J]. 中国生态农业学报, 2013, **21**(10): 1225–1232. [ZHANG Chuan, CHEN Hongsong, NIE Yunpeng, et al. Dynamics of soil profile water content in peak-cluster depression areas in karst region[J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, **21**(10): 1225–1232]
- [16] 张盼盼, 胡远满, 肖笃宁, 等. 岩溶洼地石漠化景观格局[J]. 生态学杂志, 2010, **29**(9): 1860–1865. [ZHANG Panpan, HU Yuanman, XIAO Duning, et al. Stony desertification landscape pattern in karst depressions region[J]. Chinese Journal of Ecology, 2010, **29**(9): 1860–1865]
- [17] 常勇, 吴吉春, 姜光辉, 等. 峰丛洼地岩溶泉流量和水化学变化过程中地面径流的作用[J]. 水利学报, 2012, **43**(9): 1050–1057. [CHANG Yong, WU Jichun, JIANG Guanghui, et al. The impact of overland flow on the variation of discharge and hydrochemistry of karst spring in peak cluster[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, **43**(9): 1050–1057]
- [18] 胡文帙, 王世杰, 罗维均, 等. 喀斯特峰丛洼地土地利用演变及其土壤侵蚀效应[J]. 生态学杂志, 2012, **31**(4): 975–980. [HU Wenzhi, WANG Shijie, LUO Weijun, et al. Land use change and its effects on soil erosion in karst cluster-peak depression region[J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, **31**(4): 975–980]
- [19] 李阳兵, 罗光杰, 白晓永, 等. 典型峰丛洼地耕地、聚落及其与喀斯特石漠化的相互关系——案例研究[J]. 生态学报, 2014, **34**(9): 2195–2207. [LI Yangbing, LUO Guangjie, BAI Xiaoyong, et al. The correlations among arable land, settlement and karst rocky desertification-cases study based on typical peak-cluster depression[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, **34**(9): 2195–2207]
- [20] 张伟, 陈洪松, 王克林, 等. 典型喀斯特峰丛洼地坡面土壤养分空间变异性研究[J]. 农业工程学报, 2008, **24**(1): 68–73. [ZHANG Wei, CHEN Hongsong, WANG Kelin, et al. Spatial variability of soil nutrients on hillslope in typical karst peak-cluster depression areas[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, **24**(1): 68–73]
- [21] 张信宝, 白晓永, 刘秀明. 洼地沉积的¹³⁷Cs 法断代测定森林砍伐后的喀斯特小流域土壤流失量[J]. 中国科学: 地球科学, 2011, **41**(2): 265–271. [ZHANG Xinbao, BAI Xiaoyong, LIU Xiuming. Application of a ¹³⁷Cs fingerprinting technique for interpreting responses of sediment deposition of a karst depression to deforestation in the Guizhou Plateau, China[J]. Science China Earth Sciences, 2011, **41**(2): 265–271]
- [22] 童立强, 刘春玲, 聂洪峰. 中国南方岩溶石山地区石漠化遥感调查与演变研究[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 72–93. [TONG Liqiang, LIU Chunling, NIE Hongfeng. Remote sensing survey and evolution research on stony desertification in karst rocky mountain area of Southern China[M]. Beijing: Science Press, 2013: 72–93]
- [23] 王宇. 云南岩溶石山地区重大环境地质问题及对策[M]. 昆明: 云南科技出版社, 2013: 17–27. [WANG Yu. Major environmental geological problems and countermeasures in karst rock mountain area of Yunnan Province[M]. Kunming: Yunnan Science and Technology Press, 2013: 17–27]
- [24] 俞锦标, 王雪瑜, 王宗汉. 路南石林形成时代及古地理环境的初步分析[J]. 南京大学学报: 自然科学版, 1983(2): 170–182. [YU Jinbiao, WANG Xueyu, WANG Zonghan. A preliminary study of age and palaeogeographical environment of

- pinnacles in Lunan, Yunnan Province [J]. Journal of Nanjing University: Natural Science, 1983(2): 170–182]
- [25] 林钧枢. 路南石林形成过程与环境变化[J]. 中国岩溶, 1997, **16**(4): 66–70. [LIN Junshu. Formation of Lunan stone forest and environmental change[J]. Carsologica Sinica, 1997, **16**(4): 66–70]
- [26] 张寿越. 路南石林发育及其演进[J]. 中国岩溶, 1984(2): 83–93. [ZHANG Shouyue. The development and evolution of Lunan stone forest[J]. Carsologica Sinica, 1984(2): 83–93]
- [27] 李玉辉, 梁永宁. 滇中路南石林的发育年代[J]. 中国区域地质, 1998, **17**(1): 45–52. [LI Yuhui, LIANG Yongning. The ages of development of the Lunan stone forest in Central Yunnan [J]. Regional Geology of China, 1998, **17**(1): 45–52]
- [28] 李玉辉, 杨一光, 梁永宁, 等. 云南石林岩溶发育的古环境研究[J]. 中国岩溶, 2001, **20**(2): 9–13. [LI Yuhui, YANG Yiguang, LIANG Yongning, et al. Study of paleo-environment of Shilin Karst (stone forest) development, Yunnan, China [J]. Carsologica Sinica, 2001, **20**(2): 9–13]
- [29] 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: 15–20. [Shilin Research Group. Karst study in Lunan Shilin, China [M]. Kunming: Yunnan Science and Technology Press, 1997: 15–20]
- [30] 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. [LI Yuhui, DING Zhiqiang, WU Xiaoyue. A quantitative study on the karst geomorphic evolution of Shilin County in Yunnan Province of China based on Strahler hypsometric analysis[J]. Acta Geographica Sinica, 2018, **73**(5): 973–985]
- [31] WILLIAMS P W. Morphometric analysis of polygonal karst in New-Guinea[J]. Geological Society of America Bulletin, 1972, **83**(3): 761–796.
- [32] DAY M. Doline morphology and development in Barbados[J]. Annals of the Association of American Geographers, 2015, **73**(2): 206–219.
- [33] WALL J, BOHNENSTIEHL D R, WEGMANN K W. 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**(2): 729–749.
- [34] HUANG Wei, DENG Chengbin, 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.
- [35] LIANG Fuyuan, XU Bo. Discrimination of tower-, cockpit-, and non-karst landforms in Guilin, Southern China, based on morphometric characteristics[J]. Geomorphology, 2014, **204**(1): 42–48.
- [36] LIANG Fuyuan, SHI Yurao, 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.
- [37] 中国科学院计算机网络信息中心. 地理空间数据云[DB/OL]. [2017–01–15]. <http://www.gscloud.cn> [Computer Network Information Center of Chinese Academy of Sciences. Geospatial data cloud[DB/OL]. [2017–01–15]. <http://www.gscloud.cn>]
- [38] 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, **44**(1): 41–50. [SONG Linhua. Mechanism of karst depression evolution and its hydrogeological significance [J]. Acta Geographica Sinica, 1986, **44**(1): 41–50]
- [39] WILLIAMS P W. The geomorphic effects of groundwater [G]// CHORLEY R. I. Water, earth and man. London: Methuen, 1969: 269–284.
- [40] FRAGOSO-SERVON P, BAUTISTA F, FRAUSTO F, et al. Caracterizacion de las depresiones karsticas (forma, tamaño y densidad) a escala 1:50000 y sus tipos de inundación en el Estado de Quintana Roo, Mexico [J]. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 2015, **31**(1): 127–137.
- [41] RIPLEY B D. The second-order analysis of stationary point processes[J]. Journal of Applied Probability, 1976, **13**(2): 255–266.
- [42] SILVERMAN B W. Density estimation for statistics and data analysis [G]// COX D, ISHAM V, KEIDING N, et al. Monographs on statistics and applied probability. London: Chapman and Hall, 1986: 8–9.
- [43] BESAG J, DIGGLE P J. Simple Monte Carlo tests for spatial pattern[J]. Applied Statistics, 1977, **26**(3): 327–333.
- [44] 李苗苗, 吴炳方, 颜长珍, 等. 密云水库上游植被覆盖度的遥感估算[J]. 资源科学, 2004, **26**(4): 153–159. [LI Miaomiao, WU Bingfang, YAN Changzhen, et al. Estimation of vegetation fraction in the Upper Basin of Miyun reservoir by remote sensing[J]. Resources Science, 2004, **26**(4): 153–159]
- [45] 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 and Landforms, 2016, **41**(13): 1854–1868.
- [46] AGUILAR Y, BAUTISTA F, MENDOZA M E, et al. Density of karst depressions in Yucatan State, Mexico[J]. Journal of Cave and Karst Studies, 2016, **78**(2): 51–60.
- [47] MARKOVIC J, BOCIC N, PAHERNIK M. Spatial distribution and density of dolines in the southeastern velebica area[J]. Geodria, 2016, **21**(1): 1–28.
- [48] DENIZMAN C. Morphometric and spatial distribution parameters of karstic depressions, Lower Suwannee River basin, Florida[J]. Journal of Cave and Karst Studies, 2003, **65**(1): 29–35.
- [49] FAIVRE S, PAHERNIK M. Structural influences on the spatial distribution of dolines, Island of Brac, Croatia[J]. Zeitschrift Fur

- Geomorphologie, 2007, **51**(4): 487–503.
- [50] BAUER C. Analysis of dolines using multiple methods applied to airborne laser scanning data[J]. Geomorphology, 2015, **250**(2): 78–88.
- [51] 梁虹, 杨明德, 彭建, 等. 路南石林喀斯特流域水文特征初探[J]. 中国岩溶, 2001, **20**(4): 24–28. [LIANG Hong, YANG Mingde, PENG Jian, et al. The hydrological characteristics of the karst basin in Lunan stone forest[J]. Carsologica Sinica, 2001, **20**(4): 24–28]
- [52] SUSTERSIC F. A power function model for the basic geometry of solution dolines: considerations from the classical karst of south-central Slovenia[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2006, **31**(3): 293–302.
- [53] PARDO-IGUZZQUIZA E, PULIDO-BOSCH A, LOPEZ-CHICANO M, et al. Morphometric analysis of karst depressions on a Mediterranean Karst Massif[J]. Geografiska Annaler Series A-Physical Geography, 2016, **98**(3): 247–263.
- [54] ZANDBERGEN P A. The effect of cell resolution on depressions in digital elevation models[J]. Applied GIS, 2006, **2**(1): 1–35.
- [55] YANG Xianwu, TANG Guoan, MENG Xin, et al. Saddle position-based method for extraction of depressions in fengcong areas by using digital elevation models[J]. Isprs International Journal of Geo-information, 2018, **7**(4): 1–13.
- [56] CHEN Zhao, 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.
- [57] Pennsylvania Department of Conservation and Natural Resources. Interactive map of sinkholes[DB/OL]. Florida: Digital Ready Marketing LLC. [2018–3–15]. <http://sinkholemaps.com>.

Regional Characteristics and Resource-Environmental Effects of Karst Depressions in Shilin County, China

DING Zhiqiang¹, GAO Xuan¹, LI Yuhui^{1*}, YU Xiaoya^{1,2}

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

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

Abstract: The diversity of landform types and the coupling complexity of ecosystem elements significantly contribute to distinctive environmental and social problems in karst human-land system, such as soil erosion, rocky desertification and poverty. The karst depression, an initial unit of karst topographic differentiation, play active role in the understanding of resources and environment in karst region in the perspective of geomorphic dynamics. In this paper, the ASTER-GDEM topographic data of Shilin County (China) was analyzed to study the morphological characteristics, spatial pattern, geomorphologic development and resource-environmental effects of depressions by using spatial analysis in Geographical Information System (GIS) and Remote Sensing (RS) with geological and geomorphological surveys. The results were the followings: (1) there were 8597 karst depressions with a total area of 269.45 km², accounting for 15.16% of the county area. The basic geomorphic features of the individual depression were 3.13 ± 6.83 hm² in mean area, 15.8 ± 11.2 m in mean depth, $7.42^\circ \pm 2.68^\circ$ in mean slope, and 237 ± 227 m in mean length of long axis with the roundness index of 1.26 ± 0.28 . The frequency shapes of the depressions' geomorphic parameters were characteristic of the peak skewed to the left; and the point-erosion index was 6.14, indicating that the geomorphological development of the Shilin County was in the initial and immature differentiation stage. (2) The spatial distribution pattern of the depressions in Shilin County showed significant aggregation that three levels of depression density existed, respectively being the high density depression area with over 6 depressions per km², the middle density depression area with 5~6 depressions per km² and the low density depression area with less 5 depressions per km². (3) The spatial feature of depression density was highly correlated with the flow direction of springs, underground rivers, and groundwater. Namely, the springs, as the groundwater

drainages, were located in the low-density areas, while the water source areas of the underground rivers were in the high-density areas, and the outlets of the groundwater rivers basically were in the low-density areas. Meanwhile, the vegetation coverage was negatively related to the depression density and the rocky desertification grades were positively related with the depression density in terms of their spatial distribution. The results gave the fact that the depressions, as a favorable topography for surface runoff transferring into underground river, were the key sites of loss and leakage of the regional water and soil, and the high-density area was critical to water and soil conservation and rocky desertification control. Therefore, the results support that geomorphological study of the key landforms could play role in karst resource and environment planning and management.

Key words: “3S” technology; morphological parameters of depressions; karst hydrological structure; rocky desertification control; Shilin County