

# 贵州洞穴空间格局及影响因素分析

张绍云<sup>1,2</sup>, 周忠发<sup>1,2</sup>, 熊康宁<sup>1,3</sup>, 田衷琿<sup>1,2</sup>, 陈 全<sup>1,2</sup>, 闫利会<sup>1,3</sup>, 谢雅婷<sup>1,2</sup>

(1. 贵州师范大学喀斯特研究院, 贵阳 550001; 2. 贵州省喀斯特山地生态环境国家重点实验室培育基地, 贵阳 550001; 3. 国家喀斯特石漠化防治工程技术研究中心, 贵阳 550001)

**摘要:** 以贵州水文地质图和地形图为基础, 利用ArcGIS对境内近5000个洞穴洞口海拔、经纬度提取及所在地层、岩性、水系、构造划分, 并运用最邻近指数、空间分析与耦合分析处理, 研究了贵州全省4960个洞穴的分布特征, 探讨了洞穴空间格局与地理要素之间的关系。通过对贵州洞穴进行点格局分析, 得出最近邻指数为0.53, 泰森多边形检验其变异系数达72.469%, 符合凝聚分布模式; 并采用点密度函数将全省洞穴划分为4个集聚区和1个弱影响区, 即遵义—铜仁强影响区、毕节强影响区、黔西南—六盘水强影响区、贵阳—安顺—黔南强影响区和黔东南弱影响区。其中贵阳—安顺—黔南强影响区是洞穴最主要的分布区, 占全省洞穴总量的36.63%, 该影响区面积占全省面积的24.67%。贵州洞穴分布呈西密东疏的分布特征, 形成明显的“片状”格局。在其研究背景下, 地层、岩性、构造、气候、水文、海拔等因素主要制约洞穴的分布、数量、空间格局及其发育。

**关键词:** 喀斯特洞穴; 地理信息系统; 空间格局; 影响因素; 贵州

DOI: 10.11821/dlxb201611010

## 1 引言

洞穴的空间分布并不是随机的, 而是具有内在的地理空间格局及分布特征, 这些特征与周围的自然环境密切相关, 并在长期的自然演化下形成<sup>[1]</sup>。对洞穴空间格局的研究, 能够了解洞穴发育并不是单因素的结果, 而是受区域自然地理条件、岩溶类型、地质历史以及岩溶的持续发展和间断之间相互配合的过程中所形成的<sup>[2-3]</sup>。

洞穴的研究往往侧重于对单个洞穴的形成及演化研究<sup>[4-5]</sup>, 并通过定性或半定量的方法<sup>[6-8]</sup>, 以洞穴现有的形态及监测数据反演古洞穴环境演变, 透视环境变化的过程与规律。随着GIS的兴起, 部分学者运用空间分析方法对洞穴内部时空分布进行研究, 在洞穴环境方面的研究取得了新的研究成果<sup>[9]</sup>。但对大区域洞穴的空间格局及其影响因素的研究至今较少, 仅Williams从地貌视角下研究了喀斯特洞穴分布及发育的多边形理论<sup>[10]</sup>。

贵州地处云贵高原, 位于103°36'E~109°35'E、24°37'N~29°13'N, 东西长约595 km, 南北相距约509 km。研究区地层从元古代的板溪群到第四纪均有发育, 以浅海相碳酸盐岩沉积为主, 地下形态以地下河、溶洞和溶隙为主, 洞穴发育较为完善。该区洞穴发育

收稿日期: 2016-08-01; 修订日期: 2016-11-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(41361081); 贵州省科技计划([2014]4004-2); 贵州省重大应用基础研究项目([2014]200201) [Foundation: National Natural Science Foundation, No.41361081; Guizhou Science and Technology Plan, No.[2014]4004-2; Guizhou Major Application of Basic Research Project, No.[2014]200201]

作者简介: 张绍云(1992-), 男, 云南曲靖人, 硕士生, 主要从事喀斯特地貌与洞穴研究。E-mail: 724139644@qq.com

通讯作者: 周忠发(1969-), 男, 贵州遵义人, 教授, 博士生导师, 主要从事喀斯特资源环境, GIS与遥感应用研究。

E-mail: fa6897@163.com

数目数以万计, 位于喀斯特山区中低部地区。贵州省主要是含碳酸盐的岩石为主, 其岩系主要分布于寒武系、泥盆系、石炭系、二叠系、三叠系为主, 分布如下: 早古生代仅分布于贵州北部及东部边缘, 相变线呈北西—南东—南西方向展布; 上古生代全省区均分布, 相变线呈北西—南东方向分布; 中生代二叠纪分布亦广布, 相变线呈北东—南西方向分布。这些相变线方向将对洞穴的发育演变奠定了物质基础。根据各时代的沉积相带分布, 拗陷的幅变和形态, 表层褶皱断裂形态格局以及岩聚的活动特征, 结合深部地球物理资料, 推断贵州境内基底具有北东、北西、东西、南北及东南几组断裂网络, 从这一基底走向来看, 对洞穴的形成走向又是一个重要的证据<sup>[11-13]</sup>。本文运用最邻近指数法、空间叠加分析法与耦合分析法研究洞穴分布特征及影响因素, 以揭示洞穴空间分布规律及洞穴的发育。

## 2 数据来源及方法

### 2.1 数据来源

以贵州喀斯特洞穴空间分布为基础, 依据 1:50000 地形图及 1:200000 水文地质图和其他实测资料, 结合 GIS、RS 技术进行处理和矢量化, 得出洞穴位置、地层、岩性以及海拔等信息, 同时利用水文地质图提取全省水系分布及断层、褶皱区, 共采集及实地考察研究洞穴 4960 个<sup>[14]</sup> (图 1)。研究区部分洞穴为实测洞穴。

### 2.2 研究方法

**2.2.1 最邻近分析** 最邻近分析属于点模式的一种分析方法, 在 1954 年由生态学家 Clark 等<sup>[15]</sup>提出, 应用于种群分布格局分析。后来逐渐发展为测度点状空间分布格局的方法中较为成熟的一种方法, 已应用于史前地质灾害空间点<sup>[16]</sup>、流行病<sup>[17]</sup>、居民点分布<sup>[18]</sup>、聚落分布<sup>[19]</sup>、城市空间分布<sup>[20]</sup>、旅游景区<sup>[21]</sup>、产业分布<sup>[22]</sup>等一系列点状空间分布的研究中。Pinder 和 Ebdon 改进了最邻近分析模式<sup>[23-24]</sup>, 促使其可以对任意空间点分布进行评估。改进的最邻近分析模式克服了地形带来的限制, 对研究区添加了正方框。在研究区域形状越接近正方形时, 最邻近比率精确度越高<sup>[25]</sup>。本文将以洞口径纬度为洞穴坐标点, 对其进行点格局分析, 能更科学的探求全省洞穴空间分布。

从宏观上来看, 贵州省洞穴资源在空间上可以看作点状。点状要素有均匀、随机和凝聚 3 种空间分布类型, 最邻近点指数是判别点状要素空间分布类型的最常用方法。研究区采用最邻近点指数  $R$  对全省洞穴的空间分布特征进行分析, 其计算公式为<sup>[26-27]</sup>:

$$R = \frac{\bar{r}_1}{r_E} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_i(S_i) \times \left( \frac{1}{2\sqrt{n/A}} \right) \quad (1)$$

式中:  $\bar{r}_1$  为最邻近的点对距离  $r_1$  的平均值;  $r_E$  为随机分布模式中理论最邻近的点对平均距离;  $n$  为点数;  $r_i(S_i)$  为区域内点  $S_i$  到其最邻近点的距离;  $A$  为区域面积。当  $R=1$  时, 点

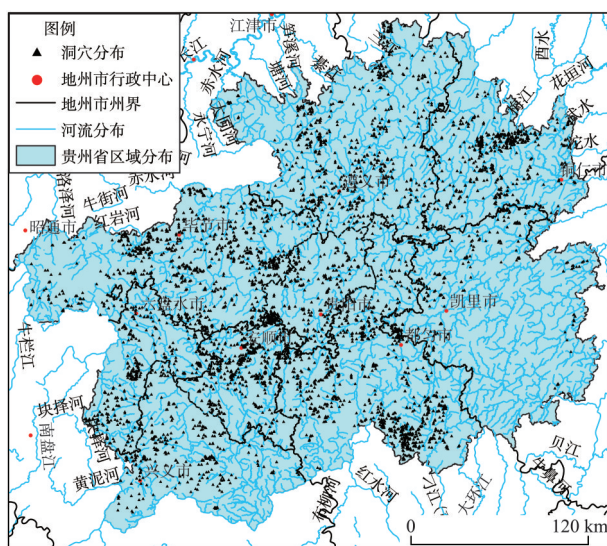


图1 贵州范围与洞穴位置分布图

Fig. 1 Map of Guizhou Province and the location of the caves

状要素分布为随机型;  $R > 1$  时, 点状要素趋于均匀分布;  $R < 1$  时, 点状要素趋于凝聚分布。

**2.2.2 泰森多边形** 泰森多边形法 (Thiessen Polygons) 是对离散的采样点进行区域化的主要方法<sup>[28-31]</sup>。由于最邻近指数在测定点状目标空间分布类型时的界定标准尚有分歧<sup>[32-33]</sup>, 本文采用测算泰森多边形面积变异系数的方法对最邻近指数结果进行进一步检验 (图 2)。变异系数定义为 Voronoi 多边形面积的标准差与平均值的比值, 它可衡量现象在空间上的相对变化程度, 计算公式为:

$$CV = S/M \quad (2)$$

式中:  $S$  为 Voronoi 多边形面积的标准差值;  $M$  为 Voronoi 多边形面积的平均值。

### 3 结果与分析

#### 3.1 洞穴空间格局分析

根据最邻近分析模式, 通过 ArcGIS 软件直接测量。以贵州省洞穴空间分布为研究对象, 通过计算得到  $\bar{r}_1 \approx 1824$  m, 而  $\bar{r}_E \approx 3471$  m, 故最邻近点指数  $R \approx 0.53 < 1$ 。结果表明, 贵州省洞穴分布空间上表现为凝聚的态势, 凝聚分布特征显著性较强<sup>[34]</sup>。

在 ArcGIS 软件中对基于贵州全省洞穴分布点为发生元生成的泰森多边形图 (图 2) 的面积进行统计, 计算得到  $M \approx 81000$  m<sup>2</sup>,  $S \approx 5870000$  m<sup>2</sup>, 故变异系数  $CV \approx 72.469\%$ 。根据 Duyckaerts 的研究, 当点集为随机分布时, 变异系数为 57% (包括 33%~64% 之间的值) 当点状目标为集群分布时, 变异系数为 92% (包括大于 64% 的值); 当点状目标为均匀分布时, 变异系数为 29% (包括小于 33% 的值)<sup>[35-36]</sup>。故验证了以上的结果, 即贵州省洞穴分布呈集群分布态势。

为进一步分析, 制作点密度图 (图 3), 使其可以明显看出全省洞穴在空间分布上呈片状分布的特征, 形成明显的“片状”格局。由此可见, 全省范围内洞穴的分布并非随机的, 而是在自然环境影响下呈现出一定的分布规律。为便于分析空间格局形成的原因, 根据洞穴所在的地理位置、

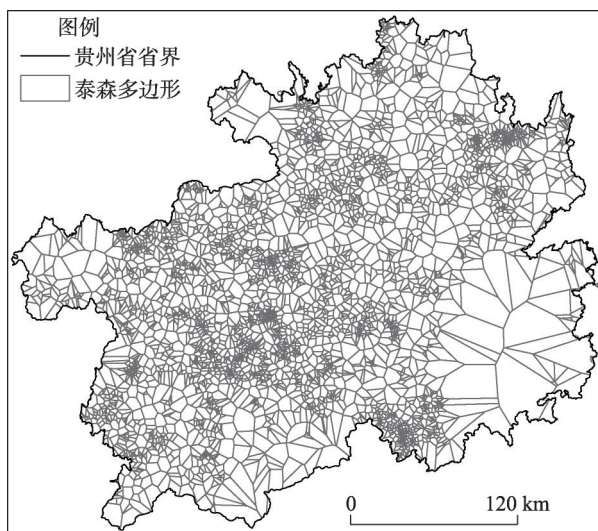


图 2 贵州洞穴泰森多边形空间分布图  
Fig. 2 The Thiessen polygons spatial distribution of the caves in Guizhou Province

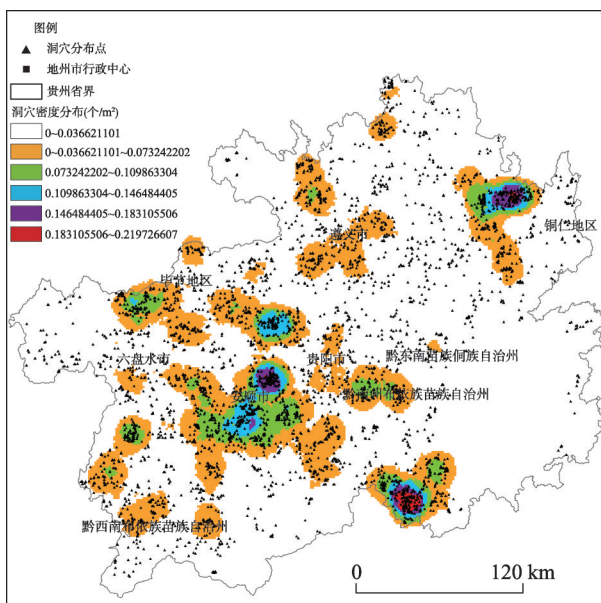


图 3 贵州洞穴密度分布图  
Fig. 3 The density of the caves in Guizhou Province



岩性、地层、水文、构造等因子划分,进一步将4960个洞穴分布点归为遵义—铜仁强影响区、毕节强影响区、黔西南—六盘水强影响区、贵阳—安顺—黔南强影响区、黔东南弱影响区5个区(图3,图4)。

### 3.1.1 遵义—铜仁强影响区

该区分布有1257个洞穴,占全省洞穴总量的25.34%,区域面积占全省面积的27.69%。该区域分布有19处断层区,5处褶皱区,均为北东向,地层以条带状为主。其洞穴分布东西跨度较大,主要分布在遵义市及其西北部,铜仁西北部,均有断层、褶皱及其水系经过。该区水系属于外流水系,绝大部分洞穴分布临河距离较近。

地层、北东向构造及水系对该区洞穴分布有较强的影响。

**3.1.2 毕节强影响区** 该区分布有962个洞穴,占全省洞穴总量的19.39%,面积占全省面积的15.24%。该区域分布有15处断层区,5处褶皱区,为北东、北西、东西、东南向,洞穴主要集中分布于北东、东西走向,其中洞穴主要分布在二叠系地层。其洞穴东西分布跨度较大,主要分布在中部及东部、东南部地区。该区平均海拔在1600 m,落差较大。水系均属外流河,是乌江、北盘江、赤水河发源地,绝大部分洞穴分布临河距离较远。北东向构造、地层对该区洞穴分布有较强的影响。

**3.1.3 黔西南—六盘水强影响区** 该区分布有692个洞穴,占全省洞穴总量的13.95%,面积占全省面积的15.16%。该区域分布有11处断层区,7处褶皱区,该区主要为北东向。其洞穴分布南北分布跨度较大,主要集中分布在中北部白云岩、石灰岩地区,中南及东南部碎屑岩地区很少分布。该区水系为长江上游和珠江上游水系,属外流区,洞穴分布临河距离较近。北东向构造、岩性对该区洞穴分布有较强的影响。

**3.1.4 贵阳—安顺—黔南强影响区** 该区分布有1817个洞穴,占全省洞穴总量的36.63%,面积占全省面积的24.67%。该区域分布有35处断层区,3处褶皱区,以北东、南北走向为主。同时该区以二叠系、三叠系、石炭系低层为主,为碳酸盐岩白云岩、石灰岩集中分布区。其中洞穴分布南北跨度较大,主要集中分布在安顺西北部及其黔南南部。该区河流密度较大,洞穴分布临河距离较近。其中北东、南北向构造,地层及岩性对该区洞穴分布有较强的影响。

**3.1.5 黔东南弱影响区** 该区分布有232个洞穴,占全省洞穴总量的4.68%,面积占全省面积的17.22%。该区域分布有22处断层区,无褶皱分布。其中洞穴分布较少,主要分布在该区北部—东北部区域。该区河网密度较大,且断层分布也较多,但洞穴分布数量较少,主要是由于该区域属非喀斯特区域,以碎屑岩分布为主。其中地层、岩性对该区洞穴分布有较强的影响。

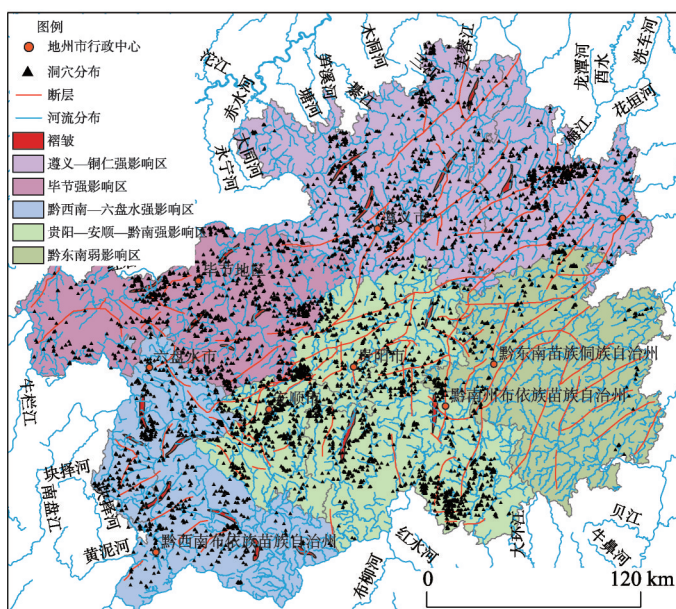


图4 贵州洞穴集聚区划分图

Fig. 4 The zoning of the cave agglomeration area in Guizhou Province

## 4 洞穴空间分布与影响因素

### 4.1 内部影响因素分析

**4.1.1 岩性** 岩性是洞穴发育的基础,可溶性岩石是岩溶发育的物质条件,即地下洞穴发育的物质条件<sup>[14]</sup>。洞穴的发育并不是单因素的结果,而是受区域自然地理条件、岩溶类型、地质历史以及岩溶发展的持续发展和间断之间相互配合的过程中所形成的,并且洞穴的发育必须有可溶性岩石的存在,它的形成、发育与分布受碳酸盐岩的分布、纯度、厚度限制。贵州碳酸盐岩岩石多以质纯、层厚、钙镁含量很高的石灰岩和白云岩为主,其总厚度达6200~8500 m,喀斯特发育强烈<sup>[37]</sup>,计算得出碳酸盐岩的出露面积占全省的61.50%。利用1:20万贵州岩性分布图,使用ArcGIS分别对碎屑岩、石灰岩、白云岩洞穴进行提取分析,得到洞穴与岩性分布图(图5)。结果表明,碎屑岩地区洞穴点分布有771个,占全省洞穴15.54%,出露面积占全省的38.39%,主要分布于黔东南区域;白云岩地区洞穴点有3054个,占全省洞穴61.57%,出露面积占全省的41.23%,主要集中分布于贵阳—安顺—黔南区域;石灰岩地区洞穴点有1133个,占全省洞穴28.84%,出露面积占全省的20.27%,主要分布于毕节—安顺—黔南区域。洞穴的发育以碳酸盐岩分布区为主,碎屑岩为不溶性岩石,受构造的影响,黔东南弱影响区碎屑岩地区洞穴分布较少。

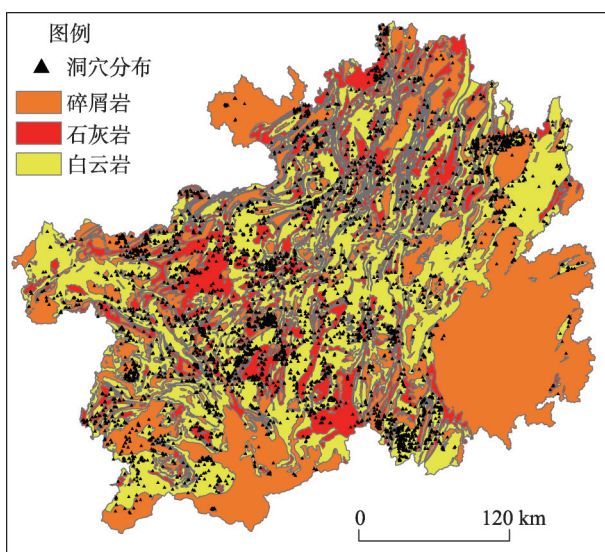


图5 贵州洞穴与岩性分布图

Fig. 5 The distribution of the cave and lithology in Guizhou Province

**4.1.2 地层** 地层分布是洞穴布局的有力保证。依据图6贵州省洞穴与地层分布图可知,贵州地层分布齐全,由震旦系至第四系地层均有分布。按洞穴在不同地层分布情况,震旦系地层洞穴分布有14个,占全省洞穴数的0.28%,主要分布于黔东南、铜仁区域;寒武系地层洞穴分布有576个,占全省洞穴数的11.61%,主要分布于遵义、铜仁区域;奥陶系地层洞穴分布有322个,占全省洞穴数的6.49%,主要分布在遵义区域,且呈条带状分布;志留系地层洞穴分布有146个,占全省洞穴数的2.94%,其地层同样呈条带状分布于遵义区域;泥盆系地层洞穴分布有158个,占全省洞穴数的3.18%,主要分布于黔南区域;石炭系地层洞穴分布有621个,占全省洞穴数的12.52%,主要分布于毕节、黔南区域;二叠系地层洞穴分布有1602个,占全省洞穴数的32.29%,其地层全省均有分布;三叠系地层洞穴分布有1330个,占全省洞穴数的26.81%,主要分布于贵州中西部、南北部区域,东部无分布;侏罗系地层洞穴分布有163个,占全省洞穴数的3.28%,其地层呈条带状分布于遵义区域;白垩系地层洞穴分布有18个,占全省洞穴数的0.36%,主要分布于遵义西北部区域;第三系地层无洞穴分布,其地层主要分布于毕节区域;第四系地层洞穴分布有10个,占全省洞穴数的0.20%,其地层在全省零星分布且面积较小。据此可知,洞穴在不同地层下由大到小分布为,二叠系>三叠系>石炭系>寒武系>奥陶系>侏罗系>泥盆系>志留系>白垩系>震旦系>第四系>第三系。

贵州碳酸盐岩层存在于震旦系到三叠系地层中,厚度达到600 m以上,处于一个新的



水平, 凡层厚, 质纯的块状灰岩, 喀斯特发育强烈, 岩溶地貌典型。以S-Sn白云岩为主, 地貌以喀斯特丘陵、洼地为主, 主要分布于黔北, 峰林不显著; D-C碳酸岩发育强烈, 地下河系发育, 规模较大, 峰林类型地貌为主; P-T地层, 质地纯、岩溶地貌形状多样<sup>[11-13]</sup>。其他地层岩溶发育不强烈。所以黔东南地区洞穴发育较少, 而贵阳—安顺—黔南地区洞穴发育最密集。

**4.1.3 构造** 褶皱与断层构造是地壳运动的表现形式, 对洞穴形成与发育起着主导作用<sup>[38-39]</sup>。本文以1:20万贵州省水文地质图为基础, 使用ArcGIS分别对褶皱与断层0~500 m、500~2000 m、2~3 km缓冲区, 并将全省洞穴分布点与褶皱、断层的缓冲区进行叠加分析, 得到洞穴分布与褶皱、断层叠加分析图(图7)。结果表明, 距离褶皱、断层0~500 m之内的洞穴点分布有66个、187个, 占洞穴总数的1.33%、3.77%; 距离褶皱、断层500~2000 m的洞穴点有56个、485个, 占洞穴总数的1.13%、9.78%; 距离褶皱、断层2~3 km的洞穴点有44个、358个, 占洞穴总数的0.89%、7.22%。毕节—黔西南—安顺交界处洞穴受褶皱、断层影响较显著。受褶皱、断层影响的洞穴发育可分为: 与褶皱构造的轴部方向一致、背斜区、向斜区、构造断裂带和构造隙区、挤压性断裂区、张扭性断裂区、扭性断裂区、节理(裂隙)区、构造的迭加复合区、断裂复合区、断裂区、褶皱复合区均易于洞穴的发育<sup>[37, 40-41]</sup>。说明构造在一定程度上对洞穴的布局起着凝聚作用。

综合地层、岩性与构造等因素分析, 贵州洞穴在震旦系到三叠系地层碳酸岩层内均有分布, 并集中于地质较为复杂的地段。洞穴的分布与岩性密切相关, 同时受构造控制十分明显。厚层灰岩岩溶最强, 白云岩仅为中等发育程度, 碎屑岩层发育极为微弱。厚层碳酸盐岩含不溶物较少, 溶解度大。凡岩石中含有50%以上的方解石或文石为石灰岩类; 含有50%以上白云石为白云岩类。在碳酸盐岩、碎屑岩混层岩组中含有大量燧石结核, 碎屑岩层起隔水作用, 使岩溶作用受阻, 故黔东南洞穴发育较少。构造是岩溶发育

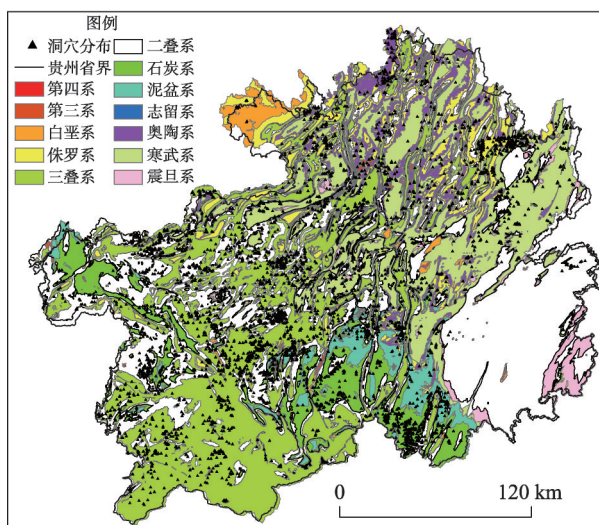


图6 贵州洞穴与地层分布图

Fig. 6 The distribution of the caves and strata in Guizhou Province

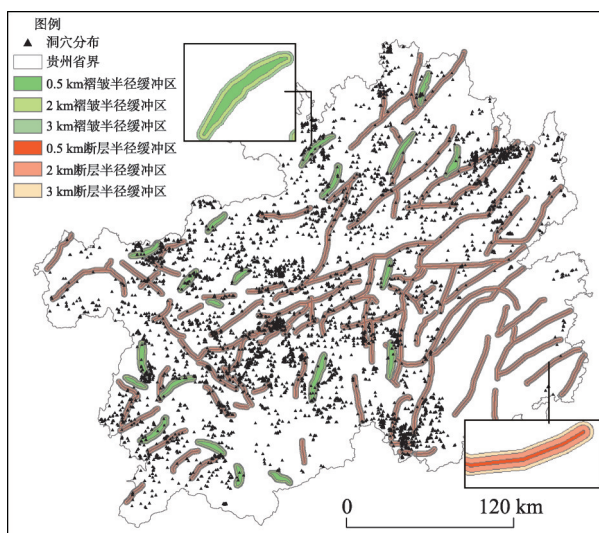


图7 贵州洞穴分布与褶皱、断层缓冲区叠加分析图

Fig. 7 Overlay analysis of the cave distribution, folds and faults in Guizhou Province

的主导因素,不同的构造部位及构造面的不同力学性质,均严格控制着洞穴的发育。受构造抬升,地下暗河下切,地下水下渗,使原有洞穴洞口出露地表。研究区洞穴从震旦系到三叠系分布占洞穴总量的96.14%,震旦系至三叠系地层为碳酸盐岩的存在提供了广阔的空间,为洞穴的发育提供了保证。碳酸盐岩主要集中分布在贵州中部、南部区域,其余区域相对较弱,特别是贵州东南部区域,绝大部分为不溶性岩(碎屑岩)。这是造成贵州其他区域洞穴密度明显高于贵州东南部的重要因素之一。

## 4.2 外部影响因素分析

**4.2.1 气候** 降水作为洞穴发育的一个气候环境条件。喀斯特洞穴是含碳酸的水溶蚀、侵蚀所形成的,水量、水的理化性质、水的运动方式和强度对洞穴发育有直接的影响<sup>[41-42]</sup>。贵州位于副热带东亚大陆的季风区内,气候类型属中国亚热带高原季风湿润气候为主,以高原气候、温热气候并存,常年雨量充沛,平均年降水量在1100~1300 mm之间,年平均气温在14~16℃之间,7月平均气温达到22~25℃。区内热量丰富,降水充沛,这为促进喀斯特作用的水条件提供充足的来源,大部分降水都下渗到地下,为地下洞穴的形成创造了良好的条件和动力,但这也是导致贵州省降水丰富而地表径流不发达的主要因素。地下水径流和排泄较好,以管道流为主,所以溶蚀、侵蚀作用能持续进行,这就导致贵州洞穴普遍发育,对洞穴的空间分布产生一定影响。

**4.2.2 水文** 水文是洞穴形成的外部主要影响因素之一。研究区地表与地下河交替分布,其地表河谷两岸附近是洞穴分布的密集区域,由于河谷在每个小流域内均属该区最低区域,均为该区地下、地表河流的排泄基准面<sup>[43]</sup>,大部分地表河与地下河交替出现,被称为“伏流”,这就促使洞穴普遍出露于排泄基准面区域。利用1:20万贵州水系分布图,使用ArcGIS分别对河流0~500 m、500~2000 m、2000~3000 m进行缓冲,并将全省洞穴分布点与河流缓冲区叠加分析,得到洞穴分布与河流缓冲区图(图8a)。结果表明,距离河岸0~500 m之内的洞穴点分布有723个,占14.58%;距离河岸500~2000 m的洞穴点有1468个,占29.60%;距离河岸2~3 km的洞穴点有889个,占17.92%。同时计算得出距河流3 km以内的洞穴占全省洞穴总数的62.10%,说明洞穴的分布濒水性较强。距河流3 km以外的洞穴,主要是受构造运动与地下河分布的影响。

地下暗河是指具有河流主要特征的岩溶地下水通道,它的发育受地层岩性、地质构造、地形地貌及地表水网等多因素制约,并且通常是多因素综合作用的结果。由地下河

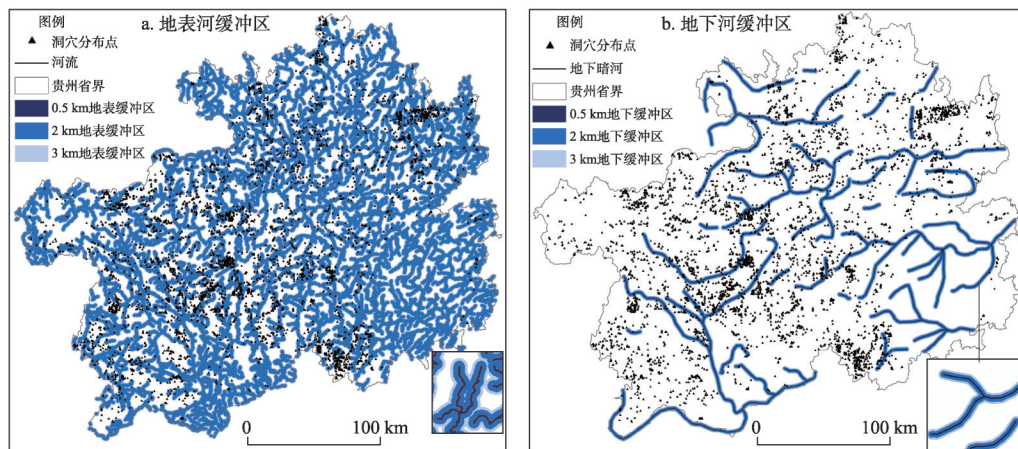


图8 贵州洞穴分布与地表、地下河缓冲区叠加分析图

Fig. 8 Overlay analysis of the cave distribution and surface rivers and underground rivers



主流和支流组成的地下水通道系统,称为地下河系。地下暗河是岩溶地下水径流与排泄的主要形式。距地下暗河0~500 m之内无洞穴点分布<sup>[43]</sup>(图8b);距离河岸500~2000 m的洞穴点有219个,占洞穴总量的4.41%;距离河岸2~3 km的洞穴点有206个,占洞穴总量的4.15%。据此可知,地下洞穴(暗河)的发育与地表出露洞穴空间分布存在较弱影响,但地下暗河对洞穴的形成与发育却是主要动力来源,也是地表出露洞穴的来源。研究区不论地表与地下水资源均较丰富,对洞穴发育提供主要动力作用。

**4.2.3 海拔** 海拔是造成洞穴纵向布局的影响因素之一。由于全省数据量太大,难于生成DEM数据进行可视化叠加分析,对海拔高程采用SPSS19进行统计分析,以得出结果(图9)。从图中可看出全省洞穴分布大致有3个分布洞穴较多的海拔高度范围:①在海拔1100~1500 m范围洞穴分布最多,占洞穴总数的36.96%;②在海拔900~1100 m范围分布着大量的洞穴,占洞穴总数的20.56%;③在海拔700~900 m范围也分布着较多的洞穴,占洞穴总数的12.56%。洞穴分布数量在高程上呈现“两头小,中间大”的特点。

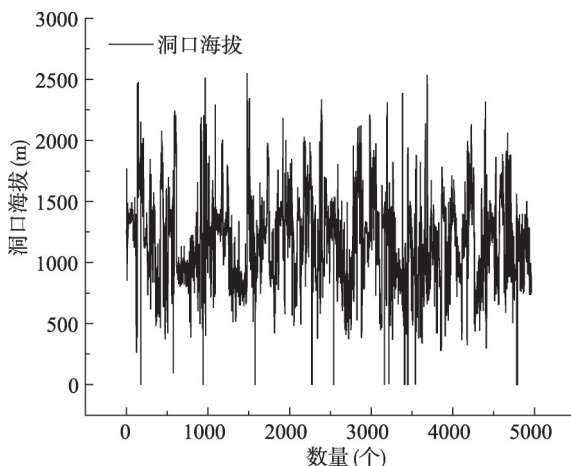


图9 贵州洞穴海拔分布图

Fig. 9 The distribution of cave elevation in Guizhou Province

总体上来看,洞穴的垂直分布是呈正态分布,这与贵州地形结构、岩性、构造等因素分不开,特别是受喀斯特地区锥状地貌的影响<sup>[38, 44]</sup>。喀斯特的广泛发育造成洞穴在不同海拔高度多有分布,只是不同海拔分布的洞穴数量不同。洞穴集中分布在海拔700~1500 m范围内,洞穴数量占总数的70.08%。主要受岩性及锥状喀斯特地貌影响,山体中部较为宽敞,同时绝大部分属碳酸盐岩分布区,且岩层较厚,适宜洞穴的发育。分布在1500 m以上的洞穴,受岩性及其锥状喀斯特地貌的影响,洞穴发育数量锐减。在700 m以下洞穴,由于大部分处于洼地或峡谷区域,洞穴数量也相对较少。这对洞穴的纵向分布产生了一定影响。

综合气候、水文、海拔等外部因素分析,贵州热量丰富,降水充沛,这为进行喀斯特作用的水条件提供充足的来源,大部分降水都下渗到地下,为地下洞穴的形成创造了良好的条件和动力,这也是贵州省降水丰富而地表径流不发达的主要因素。据此贵州洞穴应全省分布,但黔东南部洞穴仅发育有232个洞穴,占全省洞穴总量的4.68%,面积占全省面积的17.22%。说明研究区洞穴发育受气候、水文、海拔等外部影响因素小,其主要受内部因素影响。综合上文所述,岩性是洞穴发育必不可少的条件,气候、水文、海拔等外部因素均间接对其产生影响。以黔东南为例,该地区分布以碎屑岩为主,这是造成黔东南地区洞穴密度明显低于其他地区的主要因素之一。洞穴主要分布在碳酸盐岩地区,且距河流、构造分布区域较近地段。洞穴海拔以及水文因素影响洞穴的分布,绝大部分洞穴分布在700~1500 m且洞口朝向河流分布区,说明其为某个地质时期流域最低排泄基准面。

#### 4.3 内外部因素对次空间格局影响

贵州位于亚热带季风气候区,雨热同期,降水丰富,大部分降水都下渗到地下,为地下洞穴的形成创造了良好的条件和动力。洞穴发育与地质构造、岩性岩相、水系演化、新构造运动和地貌发育均有密切的关系,同时也受到地层岩性、地质构造等多种因



素制约。岩性是洞穴与地下暗河发育的物质基础,可溶性岩石是岩溶发育的物质条件,即地下暗河发育的物质条件。可溶性岩石的分布、纯度、厚度对地下暗河的形成、发育与分布具有一定限制。贵州碳酸岩层存在于从震旦系到三叠系地层中,厚度达到一个新的水平 600 m 以上,凡层厚,质纯的块状灰岩,喀斯特发育强烈,岩溶地貌典型。构造是岩溶发育的主导因素,不同的构造部位以及各种构造面的不同力学性质,都严格控制着岩溶的发育。紧密的褶皱造成碳酸盐岩层呈条带状展布,因而岩溶发育也呈条带状,其长轴方向和岩溶管道走向,都与岩层走向一致。压性、压扭性断裂,一般结构面破裂宽度小,胶结良好,不利于岩溶发育,往往在其旁侧特别是在上盘影响带,宽度较大,并有大量裂隙分布,岩溶相当发育。张性、张扭性断裂利于地下水活动,岩溶也较发育。

在新第三纪至第四纪早期以自东向西大面积大幅度的间歇隆升为主,其中上新世末期和早更新世末期等为强烈隆升阶段。第四纪以来,特别是中更新世以来,新构造运动活动频繁,产生了不等量的断陷和上升运动,改变了原始地形,洞穴不同海拔高度的垂直分布上造成巨大影响。新构造运动对岩溶管道的发育有着极为明显的影响。当地壳相对稳定时,管道以水平或近于水平发育,管道规模较大;在地壳上升阶段,管道则以倾斜状或垂直状发育,形成地下竖井;当地壳又处于稳定时,管道则又以水平状发育。这就造成洞穴的横向与纵向分布。

综上所述,洞穴空间分布影响区划分主要依据点密度函数以及岩性、地层、水文、构造、气候、海拔等因子划分,同时结合贵州全省行政区划分布情况进行探讨。由遵义—铜仁强影响区可知,该区地层主要以寒武系、三叠系地层为主,则该区洞穴主要发育于白云岩、石灰岩内。并结合该区构造、水文特征可知,该区洞穴分布以片状为主,追溯地层、构造集中分布;由毕节强影响区可知,该区地层主要以二叠系、三叠系、石炭系为主,而贵州碳酸岩层存在于从震旦系到三叠系地层中,则该区洞穴主要发育于石灰岩、白云岩内。并结合该区构造、水文特征可知,该区洞穴分布主要追溯二叠系石灰岩分布;黔西南—六盘水强影响区,该区地层主要以寒武系、二叠系为主,则洞穴也主要发育于白云岩、石灰岩内。并结合该区构造、水文特征可知,该区构造呈西南—东北走向,洞穴分布主要追溯构造集中分布;贵阳—安顺—黔南强影响区,该区地层主要以二叠系、三叠系、石炭系为主,洞穴主要发育于白云岩与石灰岩内。并结合该区构造、水文特征可知,该区洞穴主要追溯地层、构造集中分布;黔东南弱影响区,该区地层主要以二叠系为主,但洞穴主要分布于石炭系、志留系地层内。主要是该区二叠系地层岩性以碎屑岩为主,石炭系、志留系地层岩性以碳酸盐为主。并结合该区构造、水文特征可知,该区洞穴主要追溯地层岩性分布。

## 5 结论

(1) 研究表明,贵州洞穴分布呈西密东疏的分布特征,形成明显的“片状”格局。全省范围内洞穴的分布并非随机的,而是在自然环境影响下呈现出一定的分布规律。根据对洞穴所在的地理位置、岩性、地层、水文、构造等因子进行分析,将全省 4960 个洞穴划分为 5 个影响区,分别是:遵义—铜仁强影响区、毕节强影响区、黔西南—六盘水强影响区、贵阳—安顺—黔南强影响区和黔东南弱影响区。

(2) 从洞穴的内外部影响因素可以看出,贵州洞穴更多分布在碳酸盐岩地层、褶皱及裂隙、水系分布区,该区受地层、岩性、构造、水文等控制,表现出明显的“自然资源指向性”。以贵阳—安顺—黔南强影响区为例,区域内分布有 35 处断层区,3 处褶皱

区,以二叠系、三叠系、石炭系地层为主,为碳酸盐岩白云岩、石灰岩集中分布区,且区内河流密度较大,该区的洞穴总数占全省洞穴总量的36.63%,区域面积占全省面积的24.67%。

(3)运用最邻近分析法和泰森多边形法,对贵州省4960个洞穴进行点格局分析,得出最近邻指数为0.53,表明贵州省洞穴分布空间上表现为凝聚的态势,凝聚分布特征显著性较强;运用泰森多边形检验其变异系数达72.469%,表明贵州省洞穴分布呈集群分布态势,符合凝聚分布模式。这为今后寻找新的洞穴提供了依据。

## 参考文献(References)

- [1] Han Jie, Li Tiecheng, Mao Dongli, et al. Basic Researches on Karst Caves in Jilin Province. Journal of Northeast Normal University (Natural Science Edition), 1995(3): 113-117. [韩杰, 李铁成, 毛东利, 等. 吉林省喀斯特洞穴的基础研究. 东北师大学报(自然科学版), 1995(3): 113-117.]
- [2] Bogli A. Karst Hydrology and Physical Speleology. Berlin: Springer-Verlag, 1980: 1-248.
- [3] Chen Changming. Karst caves in diwas (geodepressions), China. Geological Review, 1992, 38(3): 215-223. [陈长明. 试论我国地洼区喀斯特洞穴的发育与演化. 地质论评, 1992, 38(3): 215-223.]
- [4] Zhang Xiaoman, Wang Jian, Zhen Qianhua, et al. Geomorphic features, sedimentary characteristics and their influencing factors of Kongsan Baiyun Cave in Lincheng, Hebei Province. Journal of Palaeogeography, 2013, 15(1): 49-58. [张晓曼, 王健, 郑清华, 等. 河北临城崆山白云洞溶洞地貌和沉积特征及其影响因素. 古地理学报, 2013, 15(1): 49-58.]
- [5] Xiong Kangning, Zhu Wenxiao. Karst geomorphology and speleogenesis of the Zhijin Cave area. Carsologica Sinica, 1994, 13(3): 281-292. [熊康宁, 朱文孝. 织金洞地区的喀斯特地貌与洞穴成因. 中国岩溶, 1994, 13(3): 281-292.]
- [6] Wang Xiaoxiao. The character of carbon variation and source of CO<sub>2</sub> in Xueyu Cave [D]. Chongqing: Southwest University, 2014. [王晓晓. 雪玉洞洞穴系统碳的变化特征及洞内CO<sub>2</sub>来源研究[D]. 重庆: 西南大学, 2014.]
- [7] Ban Fengmei, Cai Binggui. Research on seasonal variations of the air's main environmental factors in the Shihua Cave, Beijing. Carsologica Sinica, 2011, 30(2): 132-137. [班凤梅, 蔡炳贵. 北京石花洞空气环境主要因子季节性变化特征研究. 中国岩溶, 2011, 30(2): 132-137.]
- [8] Chen Weihai, Deng Yadong, Han Daoshan, et al. The environment of the reed flute cave and the great cave in Guilin. Carsologica Sinica, 2004, 23(2): 29-35. [陈伟海, 邓亚东, 韩道山, 等. 桂林市芦笛岩、大岩洞穴环境特征. 中国岩溶, 2004, 23(2): 29-35.]
- [9] Baldini, Lisa M. Baldini. Carbon dioxide sources, sinks, and spatial variability in shallow temperate zone caves: Evidence from Ballynamindra Cave, Ireland. James U. L. Journal of Cave and Karst Studies, 2006, 68(1): 4-11.
- [10] Williams P. Polygonal karst and palaeokarst of the King Country, North Island, New Zealand. Zeitschrift für Geomorphologie, 2004, 136(Suppl.): 45-67.
- [11] Stratigraphic Paleontology Task Force in Guizhou. Regional Strata Table (archies of Guizhou Province) of Southwest China. Beijing: Geological Publishing House, 1977. [贵州省地层古生物工作队. 西南地区区域地层表(贵州省分册). 北京: 地质出版社, 1977.]
- [12] Dong Weiping. Stratigraphy (Lithostratic) of Guizhou Province (Multiple Classification and Correlation of the Stratigraphy of China (52)). Beijing: China University of Geosciences Press, 1997. [董卫平. 贵州省岩石地层(全国地层多重划分对比研究(52)). 北京: 中国地质大学出版社, 1997.]
- [13] Xie Junbang, Wang Kexian, Han Baozhi. Regional Geology of Guizhou Province. Beijing: Geological Publishing House, 1987. [谢俊邦, 王克贤, 韩宝智. 贵州省区域地质志. 北京: 地质出版社, 1987.]
- [14] Zhou Zhongfa. Design and application of karst cave information system of Guizhou [D]. Guiyang: Guizhou Normal University, 2004. [周忠发. 贵州喀斯特洞穴信息系统研制与应用[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2004.]
- [15] Clar P J. Distance to nearest neighbour as a measure of spatial relationships in populations. Ecology, 1954, 35: 445-453.
- [16] Qiu Haijun, Cao Mingming, Liu Wen, et al. Research on the spatial point pattern of geo-hazard: A case of Ningqiang county. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2014, 28(3): 107-111. [邱海军, 曹明明, 刘闻, 等. 区域地质灾害的空间点格局分析研究: 以宁强县为例. 干旱区资源与环境, 2014, 28(3): 107-111.]
- [17] Gao Jie, Wang Zhiqiang, Shao Qi. Ripley's L index and the nearest neighbor 'hot spots' analysis in epidemiological spots map analysis. Journal of Shandong University (Health Sciences), 2009, 47(3): 89-93, 97. [高杰, 王志强, 邵琦. Ripley's L指数与最近邻空间热点分析在流行病学标点地图分析中的应用. 山东大学学报(医学版), 2009, 47(3): 89-93, 97.]

- [18] Li Xiuli, Liu Zhanbo, Zhao Jun. Space distribution type of residential area in Shiyang River Basin. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2008, 29(4): 97-101. [李秀丽, 刘占波, 赵军. 石羊河流域居民地空间分布类型研究. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2008, 29(4): 97-101.]
- [19] Wu Huihua. The research on spatial patterns of the distribution of prehistoric settlements in Central Plains [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2010. [武慧华. 中原地区史前聚落分布空间模式研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2010.]
- [20] Guo Jie, Lyu Yongqiang, Shen Tiyan. Urban spatial structure based on point pattern analysis: Taking Beijing metropolitan area as a case. *Economic geography*, 2015, 35(8): 68-74, 97. [郭洁, 吕永强, 沈体雁. 基于点模式分析的城市空间结构研究: 以北京都市区为例. 经济地理, 2015, 35(8): 68-74, 97.]
- [21] Qin Zhaoxiang, Zhang Wei. Analysis for tourism spatial organization in Ordos. *Modern Urban Research*, 2012(12): 100-104. [秦兆祥, 张薇. 鄂尔多斯市旅游空间组织分析. 现代城市研究, 2012(12): 100-104.]
- [22] Gao Cheng, Liu Qinyou. Tourism cluster- based study on the development of sceinc areas: A case of Xuanwu Lake, Nanjing. *Tourism Forum*, 2013, 6(3): 75-80. [高成, 刘庆友. 南京玄武湖景区旅游产业集群实证研究. 旅游论坛, 2013, 6(3): 75-80.]
- [23] Pinder D A. Nearest neighbour analysis of linear point patterns. *Tijdschr Econ Soc Geography*, 1973, 64: 160-163.
- [24] Ebdon D. On the underestimation inherent in the commonly used formulae. *Area*, 1976(8): 165-169.
- [25] Wang Degen, Lu lin, Chen Tian, et al. Spatial organization analysis of tourism region in Hulun Buir- Aershan. *Geographical Research*, 2006, 25(1): 161-170. [汪德根, 陆林, 陈田, 等. 呼伦贝尔—阿尔山旅游区空间组织. 地理研究, 2006, 25(1): 161-170.]
- [26] Ruan Haobo, Wang Nai'ang, Niu Zhenmin, et al. Spatial pattern of ancient city sites and its driving forces in Mu Us Sandy Land during Han Dynasty. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(5): 873-882. [阮浩波, 王乃昂, 牛震敏, 等. 毛乌素沙地汉代古城遗址空间格局及驱动力分析. 地理学报, 2016, 71(5): 873-882.]
- [27] Wang Jinfeng, Liao Yilan, Liu Xin. *Spatial Data Analysis Tutorial*. Beijing: Science Press, 2010: 76-77. [王劲峰, 廖一兰, 刘鑫. 空间数据分析教程. 北京: 科学出版社, 2010: 76-77.]
- [28] Zeng Hongwei, Li Lijuan. Accuracy validation of TRMM 3B43 Data in Lancang River Basin. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(7): 994-1004. [曾红伟, 李丽娟. 澜沧江及周边流域 TRMM 3B43 数据精度检验. 地理学报, 2011, 66(7): 994-1004.]
- [29] Liu Xiaofei, Zhang Zhao, Shuai Jiabing, et al. Effect of chilling injury on rice yield in Heilongjiang Province. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(9): 1223-1232. [刘晓菲, 张朝, 帅嘉冰, 等. 黑龙江省冷害对水稻产量的影响. 地理学报, 2012, 67(9): 1223-1232.]
- [30] Duan Dezhong, Du Debin, Liu Chengliang. Spatial-temporal evolution mode of urban innovation spatial structure: A case study of Shanghai and Beijing. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(12): 1911-1925. [段德忠, 杜德斌, 刘承良. 上海和北京城市创新空间结构的时空演化模式. 地理学报, 2015, 70(12): 1911-1925.]
- [31] Zhu Qian, Zhang Wanchang, Zhao Dengzhong, et al. Topography-based spatial daily precipitation interpolation by means of PRISM and Thiessen polygon analysis. *Scientia Geographica Sinica*, 2005, 25(2): 233-238. [朱求安, 张万昌, 赵登忠, 等. 基于 PRISM 和泰森多边形地形要素日降水量空间插值研究. 地理科学, 2005, 25(2): 233-238.]
- [32] Hu Meijuan, Hou Guolin, Zhou Nianxing, et al. Spatial distribution patterns and multi-scale features of the Lushan forest landscape. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(16): 5294-5305. [胡美娟, 侯国林, 周年兴, 等. 庐山森林景观空间分布格局及多尺度特征. 生态学报, 2015, 35(16): 5294-5305.]
- [33] Zhang hong, Wang Xinsheng, Yu Ruilin. Voronoi diagram to study the spatial distribution pattern of point sets. *Journal of Central China Normal University: Natural Science*, 2005, 39(3): 422-426. [张红, 王新生, 余瑞林. 基于 Voronoi 图的测度点状目标空间分布特征的方法. 华中师范大学学报: 自然科学版, 2005, 39(3): 422-426.]
- [34] Zhang Yongping, Wu Jiansheng, Huang Xiulan, et al. A study on the tourism spatial structure over the west coast of the Taiwan Strait Economic Zone. *Resources Science*, 2011, 33(9): 1799-1805. [张永平, 吴健生, 黄秀兰, 等. 海峡西岸经济区旅游景区(点)空间结构分析. 资源科学, 2011, 33(9): 1799-1805.]
- [35] Zhu Dehao, Tan Houren. In genetic research of cave types and Karst caves. *Tourism Tribune*, 1988(Suppl.1): 41-46. [朱德浩, 覃厚仁. 洞穴类型及岩溶洞穴成因研究. 旅游学刊, 1988(Suppl.1): 41-46.]
- [36] Duyckaerts C, Godeffroy G. Voronoi tessellation to study the numerical density and the spatial distribution of neurons. *Journal of Chemical Neuroanatomy*, 2000, 20: 83-92.
- [37] Dai Chuangu, Wang Min, Chen Jianshu, et al. Tectonic movement characteristic and its geological significance of Guizhou. *Guizhou Geology*, 2013, 30(2): 119-124. [戴传固, 王敏, 陈建书, 等. 贵州构造运动特征及其地质意义. 贵州地质, 2013, 30(2): 119-124.]



- [38] Xiong Kangning. Development of cone karst in response to neotectonism in Guizhou. *Guizhou Geology*, 1996, 13(2): 181-186. [熊康宁. 新构造运动对贵州锥状喀斯特发育的影响. *贵州地质*, 1996, 13(2): 181-186.]
- [39] Chen Changming. Karst cave development and mineral deposit feature in hunan boundary. *Geotectonica et Metallogenia*, 1994, 18(2): 183-190. [陈长明. 试论湖南境内喀斯特洞穴发育及成矿特征. *大地构造与成矿学*, 1994, 18(2): 183-190.]
- [40] Zhang Meiliang, Lin Yushi. The characteristics of karst caves development in Libo, Guizhou. *Carsologica Sinica*, 2000, 19(1): 15-22. [张美良, 林玉石. 贵州荔波岩溶洞穴发育特征. *中国岩溶*, 2000, 19(1): 15-22.]
- [41] Zhang Yaoguang. The regional difference of karst cave development in China. *Geographical Research*, 1986, 5(4): 36-46. [张耀光. 中国喀斯特洞穴发育的区域分异. *地理研究*, 1986, 5(4): 36-46.]
- [42] He Yubin, Zou Chengjie. On the depth of karst cave development. *Carsologica Sinica*, 1997, 16(2): 72-80. [何宇彬, 邹成杰. 关于喀斯特洞穴发育深度问题. *中国岩溶*, 1997, 16(2): 72-80.]
- [43] Cao Weifeng. Water resources involving karst large spring and underground river in Guizhou Province. *Guizhou Geology*, 2001, 18(1): 37-43. [曹卫峰. 贵州岩溶大泉和地下河水资源. *贵州地质*, 2001, 18(1): 37-43.]
- [44] Xiong K N. Morphometry and evolution of fenglin karst in the Shuiheng area, western Guizhou, China-Z. *Geomorph*, 1992, 36(2): 227-248.

## Spatial pattern of the caves in Guizhou Province and their the influencing factors

ZHANG Shaoyun<sup>1,2</sup>, ZHOU Zhongfa<sup>1,2</sup>, XIONG Kangning<sup>1,3</sup>,  
TIAN Zhonghui<sup>1,2</sup>, CHEN Quan<sup>1,2</sup>, YAN Lihui<sup>1,3</sup>, XIE Yating<sup>1,2</sup>

(1. School of Karst Science, Guizhou Normal University, Guiyang, Guizhou 550001, China;

2. The State Key Laboratory Incubation Base for Karst Mountain Ecology Environment of

Guizhou Province, Guiyang 550001, China; 3. State Engineering Technology Institute for

Karst Desertification Control, Guiyang, Guizhou 550001, China)

**Abstract:** Based on the hydrogeological and topographic map of Guizhou Province, ArcGIS was used to extract the information of nearly 5000 caves in the province, including the altitude, latitude and longitude, the strata, lithology, water system, and structure division. The nearest neighbor index, spatial analysis and coupling analysis methods were used to examine the distribution of 4960 caves in Guizhou Province. The relationship between cave spatial pattern and geographical elements was discussed. Through the point pattern analysis of the caves, it is found that the nearest neighbor index is 0.53, and the variation coefficient is 72.469% tested by Thiessen polygons, which is consistent with the model of aggregate distribution. Through the dot density function method, all the caves were divided into 4 clusters, namely, Zunyi-Tongren strong influence area, Bijie strong influence area, Liupanshui-Qianxinan strong influence area, and Guiyang-Anshun-Qiannan strong influence area, and one weak influence area (Qiandongnan weak influence area). Among them, Anshun-Qiannan-Guiyang strong influence area is the most important area, accounting for 36.63% of the total number of the caves, and 24.67% of the total area of the province. The caves in Guizhou are concentrated in the west and sparsely distributed in the east, showing clear "flake"-shaped pattern. Results indicated that the natural factors such as strata, lithology, structure, climate, hydrology, and elevation mainly affect the distribution, quantity, spatial pattern and development of the caves.

**Keywords:** karst cave; geographic information system; spatial pattern; influencing factors; Guizhou