

巨型白云岩洞系发育的流域水系分维估算方法适应性研究*

莫贵芬¹, 周文龙^{1,2}, 赵世启¹, 罗书文^{1,2}, 苏维词^{1,3}, 况光显⁴

(1. 贵州省山地资源研究所, 贵阳 550001; 2. 中国地质学会洞穴专业委员会, 广西 桂林 541004;
3. 重庆师范大学地理与旅游学院, 重庆 401331; 4. 绥阳双河洞国家地质公园管理处, 贵州 遵义 563314)

摘要:为考察巨型白云岩洞穴系统的成因与发育演化规律,以贵州绥阳池武溪流域这一典型喀斯特洞系发育区作为研究区,基于1:50 000地形图和12.5 m分辨率ALOS DEM数据提取流域水系,采用Horton定律法、盒维数法和栅格水系法估算研究区水系分维,比较3种方法在研究区的适应性,并分析研究区地貌发育演化趋势。结果表明:1)受喀斯特复杂的地表-地下“二元三维”水文地质结构控制,Horton定律法的适应性较差,研究区高级别河流的分支比和河长比出现明显偏离,不符合Horton定律。2)相近尺度下,不同数据源和方法估算出的水系分维值差异较大,其中通过Horton定律法估算的地形图水系、ALOS水系分维值差异最为明显,分别为2.77、2.55,均超出理论阈值;通过盒维数法和栅格水系法计算得到的不同数据源水系分维值比较接近,在1.41~1.42之间。3)按适应性由好到差对水系分维值估算方法进行排序,依次为:盒维数法、栅格水系法、Horton定律法;盒维数法更适用于喀斯特地区水系分维值的估算,结合盒维数法估算的水系分维值与子流域高程起伏比的分布情况,综合判断研究区地貌发育处于幼年期向壮年期过渡阶段。研究结果可为喀斯特流域地貌演化定量研究方法的优选提供依据。

关键词:数字高程模型;池武溪流域;水系分维;地貌发育;喀斯特

中图分类号:P933;K903

文献标志码:A

文章编号:1672-6693(2025)06-0083-11

分形理论为量化复杂系统的空间自相似性提供了重要的数学工具。在该理论中,分维值被用来表征形态结构的非线性特征,因而也成为了地貌演化研究中的重要参数。20世纪70年代Mandelbrot^[1]首先将分形理论引入水文学,为水系分维研究奠定了理论基础。随着“3S”技术的发展,数字高程模型(DEM)与地理信息系统在水系提取方面得到广泛应用,运用DEM数据提取河流水系估算水系分维的研究进入大发展阶段^[2-5],例如:王启源等人^[6]基于DEM数据提取湟水流域河网水系,利用盒维数法计算水系分维并判断了地貌侵蚀发育阶段;王国重等人^[7]基于ASTER GDEM数据提取了丹江口水库源区及子流域水系,并计算了流域分形维数值。然而,上述研究主要聚焦于常态侵蚀地貌的水系分维,有关喀斯特地区流域水系分维的研究工作却少有报道。

过去流域水系分维估算方法主要有Horton定律法和盒维数法^[8]:前者通过河长比、分支比的对数比值获得分维值,适用于地势平坦、河网结构完整的地表水系;后者通过不同边长的网格覆盖获取网格边长与水系覆盖的网格数的对数,并作拟合曲线求取斜率即分维值,目前被广泛应用于水系分维的研究。然而在喀斯特地貌区,地表水系结构的完整性极易遭到破坏,地下水的流动路径及长度无法准确获得,使得喀斯特地区水系分维估算的理论框架与研究方法均面临挑战。

当前有关水系分维的研究涉及面较广,但多侧重于考察水系分维与地貌发育^[9-10]、水文特征^[11-12]、城镇体系^[13-14]、地质灾害^[15-16]等方面的关系,较少涉及不同估算方法的比较;而水系分维的估算对于理解和认识水系发育特征与地貌演化规律有着重要的指导意义,尤其是在地下河网与地表水系交互强烈的喀斯特发育区。喀斯特地区地表水和地下水明暗交替、“二元三维”水系结构特征明显^[17],不同水系分维估算方法在该类区域的适应性仍不清楚。

池武溪流域位于双河洞地区,而双河溶洞系统主体发育于池武溪流域内,是贵州绥阳双河洞国家地质公园

* 收稿日期:2025-03-14 修回日期:2025-10-20 网络出版时间:2026-01-08T15:23

资助项目:国家自然科学基金地方科学基金项目(No. 42161001);贵州科学院2021年度学术新苗培养及自由探索创新专项项目;贵州省科技计划一般项目(黔科合支撑[2023]一般200);贵州省山地资源研究所创新能力建设项目(黔科山平台[2025]01号)

第一作者简介:莫贵芬,女,研究方向为岩溶水文地质,E-mail:2291077417@qq.com;通信作者简介:周文龙,男,高级工程师,E-mail:karstpro@hotmail.com

网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/50.1165.N.20260108.1326.002

(后简称双河洞地质公园)的核心区域。洞穴专家经过数十年的科考工作,已获取了较为详细的双河溶洞系统水文地质和洞穴调查资料,而该溶洞系统也成为了开展喀斯特水文特征与地貌研究的上佳样本。据 2025 年 10 月 24 日的探测数据显示,双河溶洞系统的探测总长度已达 439.7 km,纵向发育深度达 912 m,是亚洲第 1、世界第 3 长洞,同时也是目前已知全球最长的白云岩洞穴^[18]。双河洞地区一直以来都是相关学者关注的热点区域,已有研究主要涉及双河洞的形成原因和机理、发育演化与分期、洞穴环境、水文地球化学特征、大熊猫化石(*Ailuropoda melanoleuca*)等方面^[19-24],对理解和认识双河洞形成与演化有一定借鉴意义;但系统性地运用分形理论定量分析流域水系特征及与地貌发育演化关系方面的研究十分缺乏。本研究以贵州绥阳巨型白云岩洞系发育区的池武溪流域作为研究区,利用 1:50 000 地形图和 12.5 m 分辨率的 ALOS(advanced land observation satellite) DEM 数据在 ArcGIS 软件提取河网水系,基于 Horton 定律和分形理论,比较 Horton 定律法、盒维数法和栅格水系法在估算研究区水系分维中的适应性,并分析研究区水系分维特征及地貌侵蚀发育阶段,从而为进一步揭示巨型白云岩洞穴系统的成因与发育演化规律提供重要参考资料,并为双河洞地质公园申报世界地质公园或世界自然遗产工作提供科学依据。

1 研究区概况

池武溪流域位于贵州省绥阳县以北与正安县交界处,距离绥阳县城 42 km,地理坐标范围为东经 107.166 667°~107.350 000°、北纬 28.166 667°~28.350 000°,流域面积为 79 km²;池武溪为乌江水系中芙蓉江的二级支流,总体流向为东南向,干流全长约 12 km,坡降为 0.42%^[25]。流域气候为亚热带季风气候,雨热同期;降雨主要集中在 5—10 月,年平均降雨量为 1 139.6 mm;最低、最高气温主要出现在 1 月和 7 月,年平均气温为 15.1℃。流域内地势在总体上呈西北高、东南低,海拔为 660~1 700 m(图 1);在金林山、太阳山至干河沟一带的地貌以构造侵蚀中低山为主,其余地貌以岩溶洼地、峰丛谷地和峰丛峡谷为主。双河溶洞系统主体大部分发育于池武溪流域内,是地下水的主要富集地,同时也是池武溪的重要补给来源。区域地处黄鱼江复背斜、土坪复向斜、正安断裂带等 3 条主要断裂构造围合而成的似三角形的“构造空白区”内^[26],主要出露早古生界寒武系、奥陶系地层,岩性以白云岩、含膏白云岩、白云质灰岩及泥质白云岩为主,岩层产状微向东倾斜,倾角在 7°左右^[27]。

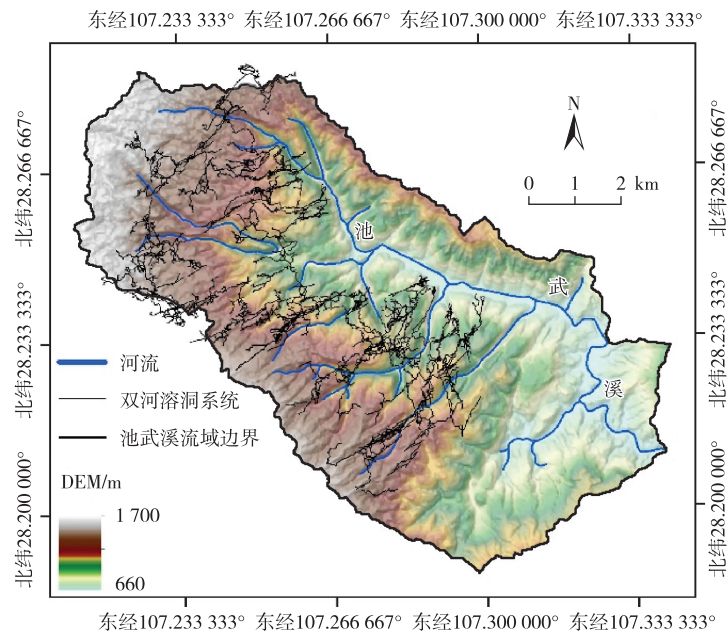


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of the study area

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源与处理

本研究所使用的 DEM 数据共有 2 种:其一为 ALOS DEM 数据,来源于 ASF DACC(<http://search.asf>).

alaska.edu),空间分辨率为 12.5 m,换算成比例尺为 1:47 244;其二是用 1:50 000 地形图生成的 DEM 数据。所选择的 2 个数据源分辨率相近,可保证水系提取精度和数据相对一致;并对它们进行坐标系一致性处理,统一投影坐标系为 Xian_1980_GK_Zone_18。运用 ArcGIS 10.3 软件中的水文分析模块对地形图生成的 DEM 数据和 ALOS DEM 数据依次进行填洼、流向、汇流累积量计算,利用栅格计算器的 con 条件函数设置不同阈值提取水系并计算河网密度,基于汇流阈值与河网密度进行线性拟合,获得曲线斜率变化最大的点作为最优阈值判定依据,最终确定研究区最佳汇流阈值为 700,以此阈值提取研究区河网,并结合遥感影像对提取的水系进行校正和伪节沟去除,再利用水文分析工具的 Strahler 河网分级法进行水系级别划分,如图 2 所示。

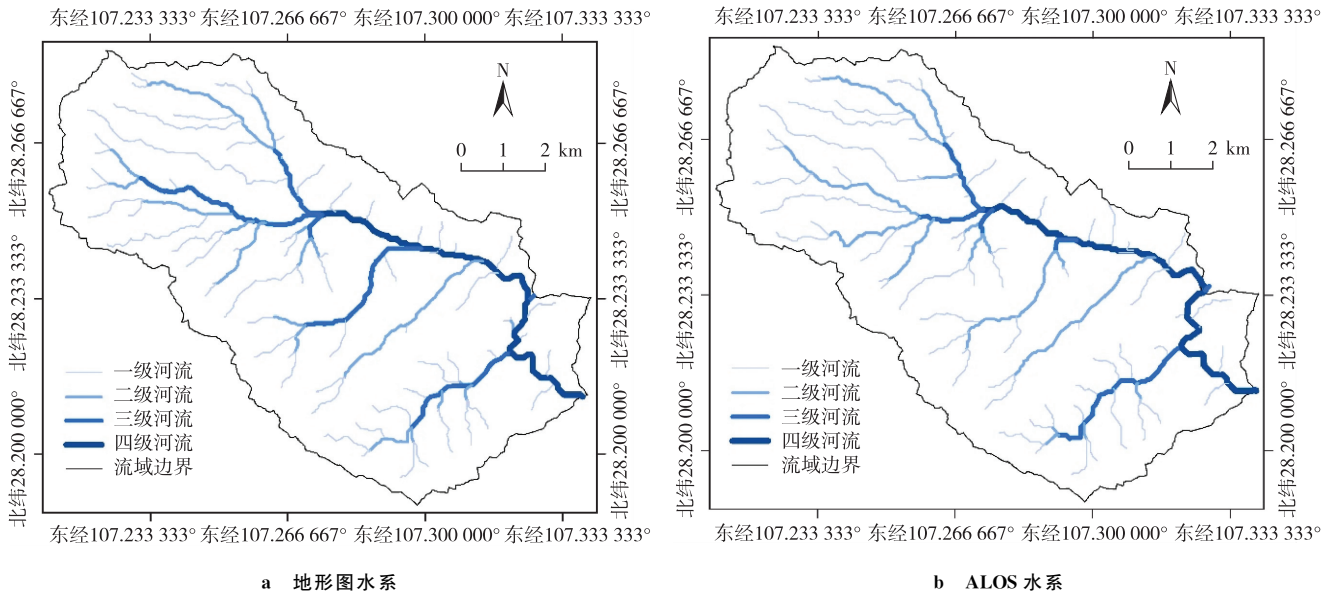


图 2 地形图水系与 ALOS 水系河网提取及分级结果

Fig. 2 River network extraction and Strahler ordering from topographic maps and ALOS DEM

2.2 研究方法

2.2.1 Horton 定律法

Horton 定律法^[28]基于 Strahler 分级体系对河网水系进行拓扑分类,然后统计各等级河道数量及平均长度,通过计算分支比和河长比这 2 个参数的对数比值求得分形维数,具体计算公式如下:

$$R_B = \frac{N_{i-1}}{N_i},$$

$$R_L = \frac{\bar{L}_i}{\bar{L}_{i-1}},$$

$$D = \min \left[\max \left(\frac{\lg \bar{R}_B}{\lg \bar{R}_L}, 1 \right), 2 \right],$$

其中: R_B 、 R_L 分别为分支比、河长比; N_i 、 N_{i-1} 分别为第 i 级、第 $i-1$ 级河道数量; \bar{L}_i 、 \bar{L}_{i-1} 分别为第 i 级、第 $i-1$ 级河道平均长度; \bar{R}_B 、 \bar{R}_L 分别为分支比、河长比的算术平均值; D 为水系分维值。

2.2.2 盒维数法

盒维数法采用不同边长的网格对整个河网进行多尺度覆盖,求取不同边长网格下包含有水系的网格数目即非空网格数,两者满足如下关系:

$$N(r) \propto r^{-D},$$

其中: r 、 $N(r)$ 分别为网格边长、非空网格数。将两者分别求取对数值并绘制双对数图,得到 1 条拟合直线,即:

$$\lg N(r) = -D \lg r + a,$$

其中: a 为拟合直线的截距^[29]。

2.2.3 栅格水系法

栅格水系法是基于栅格格式的水系数据,不断扩大栅格边长,然后统计栅格边长与所覆盖水系的栅格数量,将两者取对数并作双对数曲线,曲线斜率即为水系分维值,具体计算公式与盒维数法相同。

2.2.4 高程起伏比法

高程起伏比法是 Pick 等人^[30]利用经验公式推导得出的可用于计算面积高程积分(hypsometric integral, HI)的方法,它能够反映流域地形起伏状况,并用来快速、准确地判断流域地貌侵蚀阶段,具体计算公式如下:

$$V_{ER} \approx V_{HI} = \frac{H_{mean} - H_{min}}{H_{max} - H_{min}},$$

其中: V_{ER} 为相当于 $HI(V_{HI})$ 的高程起伏比, H_{mean} 、 H_{min} 和 H_{max} 分别为流域内平均海拔、最低海拔和最高海拔。

3 结果与分析

3.1 池武溪流域水系结构特征分析

对池武溪流域地形图水系与 ALOS 水系进行 Strahler 河网分级,分别统计各级河流的河道数量、河道平均长度,运用 Horton 定律法计算上述 2 种水系的分支比和河长比。从表 1 可以看出,池武溪流域共划分出 4 个等级的河道,其中第 1 级河道数量最多,第 4 级河道则是池武溪干流。河道数量随着河流等级的增大而减少,而河道平均长度基本上随着河流等级的增大而增加。分支比和河长比随着河流等级的增大呈增大趋势。大量研究表明,自然河流系统普遍遵循 Horton 定律的标度特性,表现为 Horton 分级比即分支比和河长比在不同级别河流几乎相同且不同河网也较为接近,一般分支比多在 3~5 这一区间,河长比则稳定在 2 左右^[31]。在本研究中,地形图水系和 ALOS 水系低等级河流的 Horton 分级比数值基本接近,符合 Horton 定律;高等级河流的 Horton 分级比出现了明显的偏离,不符合 Horton 定律。这一结果表明 Horton 定律在估算喀斯特地区水系分维时的适应性较差。其中原因在于喀斯特地区岩溶作用强烈,裂隙、溶洞的发育改造了地表水系,易使诸多主干河流水系发生变迁向地下河转变,地表水、地下水转换频繁,导致高等级河流的树状河网拓扑结构发生了改变。

表 1 Horton 定律计算结果

Tab. 1 Calculation results of Horton's law

河流等级	地形图水系				ALOS 水系			
	河道数量/条	河道平均长度/m	分支比	河长比	河道数量/条	河道平均长度/m	分支比	河长比
1	68	897.07	4.08		71	856.24	4.14	
2	19	1 238.86	4.36	1.38	17	1 586.32	4.12	1.85
3	6	2 549.80	6.00	1.69	6	1 572.48	6.00	1.36
4	1	9 902.02		2.23	1	10 664.60		2.32
总计	94				95			
平均值		3 646.94	4.81	1.76		3 669.91	4.75	1.84

3.2 池武溪流域水系分维估算

采用盒维数法和栅格水系法对池武溪流域地形图水系和 ALOS 水系进行水系分维值计算,在本研究中,通过设置边长为 200~2 000 m、间隔 200 m 共 10 个标度的正方形网格分别覆盖 2 个水系,用 ArcGIS 统计工具逐个整理 10 个标度下的非空网格数,并对网格边长、非空网格数的对数值进行线性拟合,从而得到水系分维值。由表 2 可以看出,运用盒维数法和栅格水系法统计出的非空网格数与网格边长呈线性递减,两者的对数值之间呈明显的负相关。由表 3 可知,在相近尺度下,不同数据来源和计算方法对水系分维估算的影响较大,其中 Horton 定律法的适应性较差,用此方法对 2 种水系进行水系分维值计算,结果都超出了理论范围 ($D \leq 2$)。由此可见,运用 Horton 定律法估算池武溪流域的水系分维值不甚合理。这可能是由于池武溪流域溶洞、裂隙极为发育,地表、地下二元结构特征明显,地表河流在径流过程中遇到洼地、落水洞、消水洞、溶洞、天坑等喀斯特地貌中的常见形态后会下渗或直接汇入地下,使得在水系提取时无法判断地下水系的流动路径,从而产生较大误差。相比之下,采用盒维数法和栅格水系法得到的结果更好,均在理论范围内。从 R^2 值来看,采用盒维数法和栅格

水系法所得 R^2 值在 0.994 2~0.995 2 之间,且对于相同数据源而言,用盒维数法计算得到的 R^2 值更高。上述结果说明,非空网格数的对数与网格边长的对数具有较好的相关性,用盒维数法计算得到的相关性更好,因此这一方法更适用于对池武溪流域水系分维的估算。

表 2 盒维数法和栅格水系法计算参数

Tab. 2 The calculation parameters of box dimension method and grid water system method

水系数据分类	盒维数法				栅格水系法			
	网格边长(r)	非空网格数($N(r)$)	$\lg r$	$\lg N(r)$	网格边长(r)	非空网格数($N(r)$)	$\lg r$	$\lg N(r)$
地形图水系	200	628	2.30	2.80	200	623	2.30	2.79
	400	286	2.60	2.46	400	287	2.60	2.46
	600	165	2.78	2.22	600	165	2.78	2.22
	800	107	2.90	2.03	800	108	2.90	2.03
	1 000	78	3.00	1.89	1 000	78	3.00	1.89
	1 200	57	3.08	1.76	1 200	57	3.08	1.76
	1 400	42	3.15	1.62	1 400	42	3.15	1.62
	1 600	36	3.20	1.56	1 600	37	3.20	1.57
	1 800	29	3.26	1.46	1 800	29	3.26	1.46
	2 000	27	3.30	1.43	2 000	27	3.30	1.43
ALOS 水系	200	625	2.30	2.80	200	604	2.30	2.78
	400	283	2.60	2.45	400	279	2.60	2.45
	600	166	2.78	2.22	600	166	2.78	2.22
	800	107	2.90	2.03	800	107	2.90	2.03
	1 000	75	3.00	1.88	1 000	75	3.00	1.88
	1 200	57	3.08	1.76	1 200	57	3.08	1.76
	1 400	44	3.15	1.64	1 400	44	3.15	1.64
	1 600	37	3.20	1.57	1 600	37	3.20	1.57
	1 800	29	3.26	1.46	1 800	29	3.26	1.46
	2 000	26	3.30	1.41	2 000	26	3.30	1.41

表 3 3 种方法提取的水系分维值结果

Tab. 3 Results of fractal dimension values extracted by three methods

计算方法	地形图水系		ALOS 水系	
	水系分维值(D)	R^2	水系分维值(D)	R^2
Horton 定律法	2.77		2.55	
盒维数法	1.42	0.994 5	1.42	0.995 2
栅格水系法	1.42	0.994 2	1.41	0.994 3

3.3 池武溪流域水系分维与地貌发育关系

水系的分形维数能够反映流域地貌发育的程度。水系分维值越大,表明河网结构越复杂,河流发育越成熟。何隆华等人^[32]提出:当 $D \leq 1.6$ 时,流域地貌处于幼年期;当 $1.6 < D \leq 1.89$ 时,流域地貌处于壮年期;当 $D > 1.89$ 时,流域地貌处于老年期。在本研究中,因受到地下水系的干扰,采用 Horton 定律法估算出的水系分维值超出了理论范围,也与实际地貌发育不符;而盒维数法和栅格水系法通过空间覆盖机制规避分级误差,可有效表征流域实际地貌特征,由二者估算出的水系分维值在 1.41~1.42 之间,由此判断出池武溪流域地貌侵蚀发育阶段处于幼年期。

此外,本研究还利用高程起伏比法对何隆华等人^[32]的划分标准进行了验证。通过计算各子流域的 HI 值并根据戴维斯地貌侵蚀旋回理论划分标准进行分级^[30],得到池武溪流域 HI 值分级空间分布情况。为了更加准确地判断池武溪流域地貌侵蚀发育的阶段,本研究将壮年期的划分标准进行了细分:当 HI 值为 $>0.35\sim 0.40$ 时,地貌发育处于壮年期(偏老);当 HI 值为 $>0.40\sim 0.50$ 时,地貌发育处于壮年期;当 HI 值为 $>0.50\sim 0.60$ 时,地貌发育处于壮年期(偏幼)。从图 3 可以看出:池武溪流域中 HI 值不高于 0.35 的子流域面积占比为 7.04%,HI 值为 $>0.35\sim 0.40$ 的子流域面积占比为 7.04%,HI 值为 $>0.40\sim 0.50$ 的子流域面积占比为 21.13%,HI 值为 $>0.50\sim 0.60$ 的子流域面积占比为 46.48%,HI 值大于 0.6 的子流域面积占比为 18.31%。池武溪流域大部分子流域的 HI 值在 0.35~0.60 之间,且它们主要分布在池武溪干流的东侧;流域地貌发育更多处于幼年期和壮年期(偏幼)。这一结果与通过水系分维值进行判断而得到的结果基本一致。

4 讨论

本研究采用 Horton 定律法、盒维数法、栅格水系法等 3 种水系分维估算方法对池武溪流域这一典型喀斯特洞系发育区地貌发育特征进行了综合研判。盒维数法和栅格水系法通过多尺度方形网格覆盖,运用 GIS 技术进行水系分维值计算,规避了地下水系发育导致的河网分级误差,精度更高,计算更加便捷高效;但栅格水系法涉及矢量数据向栅格数据转换过程,其中可能产生计算误差。Horton 定律法是基于水系分支比和河长比的对数求取水系分维值,对河网结构完整性要求较高。在喀斯特地区,溶蚀作用强烈,地下溶洞、裂隙极为发育^[33],地表水极易下渗或流入地下,从而导致径流方向和流动路径无法识别和计算,加上有关高精度水文地质资料又较难获取,因此 Horton 定律法在此类区域水系分维研究中的应用在一定程度上受到了制约。洪时中等人^[34]的研究也表明,Horton 定律具有一定的尺度效应,在特殊的喀斯特小流域,水系的发育不一定符合 Horton 定律;本研究采用该方法计算得到的结果也证实了这一点。池武溪流域是一个典型的喀斯特小流域,处于“构造空白三角区”内,区域构造活动较为稳定,地表地下溶蚀侵蚀作用同时发生,特殊的双重含水介质所组成的地表-地下独特的“二元三维”空间结构使该流域水文地貌发育与常态流水地貌系统存在较大差异。因此,在喀斯特地区,运用盒维数法计算流域水系分维值更加准确和高效。

根据盒维数法估算水系分维值并结合高程起伏比法综合推断出池武溪流域地貌发育处于幼年期向壮年期发展阶段,这与杨太华等人^[35]、安全等人^[36]对贵州喀斯特流域地貌侵蚀发育阶段研究的结果一致。从区域喀斯特地貌特征来看,池武溪流域内北侧和西侧发育高峰从洼(谷)地地貌,中部为峰丛谷地和峰丛峡谷地貌,靠近池武溪干流为峰丛河谷地貌^[21],地表切割强烈,河谷大多呈“V”字型,河网较为稀疏,表现出地貌发育的初期阶段,本研究结论与上述实际地貌现状相吻合。此外,池武溪流域内溶洞极为发育,拥有亚洲第 1、世界第 3 长的溶洞即双河溶洞系统,洞穴的发育使得大量地表水系转为地下水系,河流稀疏甚至出现断尾河^[37]——这在龙塘子天坑、团堆窝天坑和母猪塘峡谷区域表现最为明显(图 4),并使得地表侵蚀溶蚀程度相对弱于地下,用盒维数法估算出的水系分维值偏低,反映出当地地貌发育处于偏幼年期阶段。

采用盒维数法计算池武溪流域的水系分维值为 1.42,与其他同为喀斯特地区的流域水系分维值相比较低,如龙场桥流域^[36]的水系分维值为 1.54 和 1.6、金沙江流域^[38]的水系分维值为 1.6、蒙江流域^[39]的水系分维值为 1.65。其他喀斯特小流域计算的分维值同样较低,如暗河流域、头堡河流域的水系分维值分别为 1.47、1.28^[39]。上述结果表明池武溪流域受大型洞穴发育的影响,地表水系发育不如其他喀斯特地区,同时也说明喀斯特小流域具有一定的典型性。常态流域水系如大清河流域、雅鲁藏布江流域的水系分维值分别为 1.10、1.14^[40-41],池武溪流域的水系分维值与之相比则相对较高。这可能是由于池武溪流域位于水资源相对丰富的贵州省境内,因而水系分维值也较高。窦明等人^[42]对中国十大水资源分区进行水系分维估算,发现水系分维值大多在 1.3 左右,低于本研究结果,表明大尺度的流域水系分维的受控因素更多也更加复杂。本研究主要聚焦于洞穴极为发育的喀斯特小流域,研究结论不一定具有普适性;水系分形维数的计算方法都是基于大量的研究而得出的普遍规律,小流域对方法的敏感度较高^[43],因此,后续研究可将研究区放大到更大的流域尺度上来验证本研究结果的准确性。此外,在喀斯特地区,地下水系的发育对地表水系的发育影响很大,并影响了区域的水系分维值;限于地下水系发育的不确定性,本研究暂未将地下水系纳入水系分维的估算。后续研究可通过高分辨率地质雷达探测、示踪实验等方法对地下水系的流动路径进行追踪,构建地表水和地下水的水力联系,获取流域完整水系信息,结合研究区地形地貌、地质构造、地层岩性等地质条件,更加细致、全面地分析流域水系分维及地貌发育演化阶段,

从而为双河洞地质公园洞穴、水资源的合理开发利用和该地质公园申报世界地质公园或世界自然遗产工作提供理论支撑。

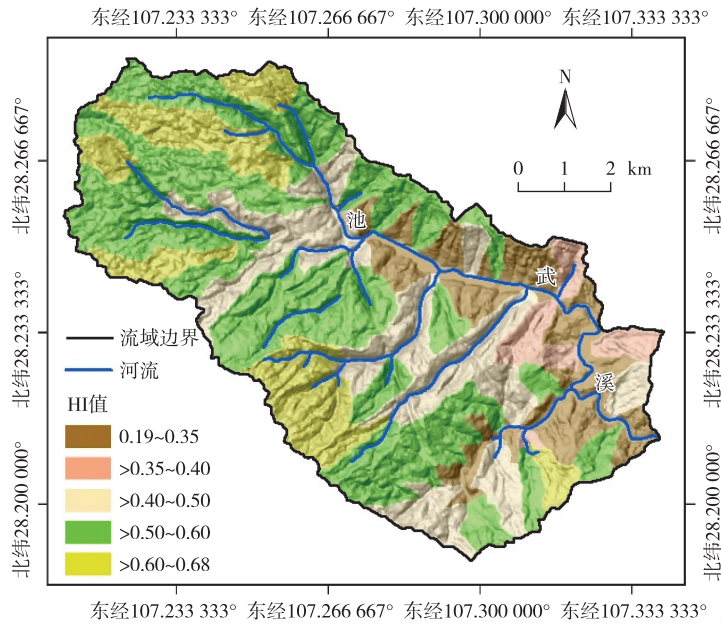


图 3 池武溪流域 HI 分级空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of HI classes in the Chiwuxi Basin

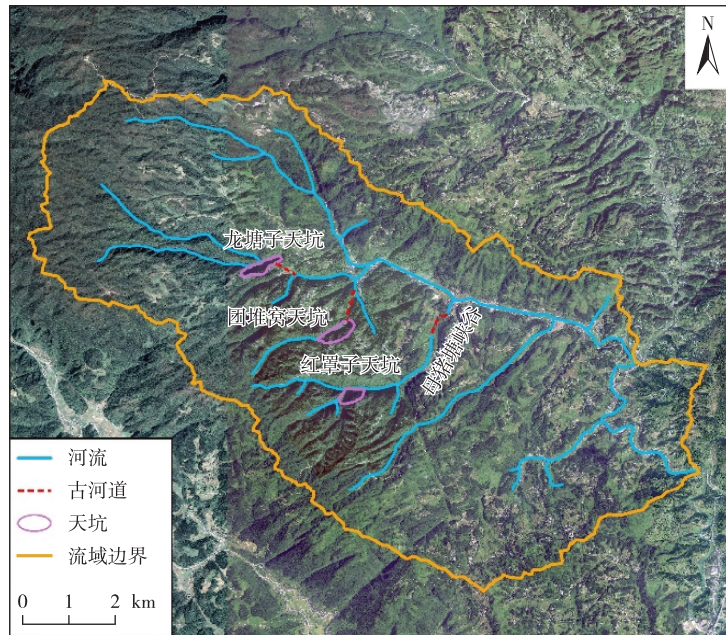


图 4 池武溪流域水系与断尾河分布

Fig. 4 Distribution of water system and beheaded streams in Chiwuxi Basin

5 结束语

本研究以位于巨型白云岩洞系发育区的池武溪流域作为研究区,基于 1 : 50 000 地形图和 12.5 m 空间分辨率的 ALOS DEM 数据,通过多源数据与多方法对比揭示池武溪喀斯特非常态流水地貌区水系分维特征及对地貌发育的控制作用,得到如下主要结果:

1) 受控于地表-地下“二元三维”水文地质结构, Horton 定律法在估算喀斯特小流域水系分维值方面的适应性较差,地形图水系和 ALOS 水系的 Horton 分级比(分支比和河长比)均随着河流等级的升高呈增大趋势,高级

别河流的 Horton 分级比出现了明显偏离,不符合 Horton 定律。

2) 地下水系的发育对水系分维值的估算影响较大。在相近尺度下,不同数据源和方法估算出的水系分维值存在较大差异。Horton 定律法估算的地形图水系、ALOS 水系分维值差异最为明显,分别为 2.77、2.55,均超出了理论阈值,表明这一方法对数据源敏感且易受地下径流干扰。盒维数法和栅格水系法估算出的水系分维值更为稳定,估算的地形图水系分维值均为 1.42、估算的 ALOS 水系分维值分别为 1.42 和 1.41。

3) 相对于 Horton 定律法和栅格水系法,采用盒维数法估算池武溪流域水系分维值更加稳定、高效,且最符合流域实际地貌发育阶段;按适应性由好到差对水系分维值估算方法进行排序,依次为:盒维数法、栅格水系法、Horton 定律法。综合盒维数法估算所得流域水系分维值和子流域 HI 值的分布情况,综合推断出池武溪流域地貌侵蚀发育阶段处于幼年期向壮年期过渡阶段。

参考文献:

- [1] MANDELBROT B B. Stochastic models for the earth's relief, the shape and the fractal dimension of the coastlines, and the number-area rule for islands[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1975, 72(10):3825-3828.
- [2] 张宏才, 汤国安. 基于 GIS 的河网分形研究[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2006, 36(4):659-662.
ZHANG H C, TANG G A. The research on drainage networks fractal by GIS[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2006, 36(4):659-662.
- [3] 王林, 陈兴伟. 基于 DEM 的流域水系分维计算与结果分析[J]. 地球信息科学, 2007, 9(4):133-137.
WANG L, CHEN X W. Study on relationship between extracted river network and fractal dimension based on DEM[J]. Geo-Information Science, 2007, 9(4):133-137.
- [4] 蒋甜, 陈端吕. 基于 DEM 的河网水系分形特征研究:以常德市桃源县为例[J]. 中国农学通报, 2013, 29(2):166-171.
JIANG T, CHEN D L. Fractal geometry analysis of river system based on DEM: an example of Taoyuan County, Changde City [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, 29(2):166-171.
- [5] 罗娅, 刘莉, 王青, 等. 应用 30 m ASTER GDEM 数据估算贵州县域地表河网密度的适应性[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2017, 35(6):9-15.
LUO Y, LIU L, WANG Q, et al. Adaptability of 30 meters ASTER GDEM data for estimating county-level surface drainage network density of Guizhou Province[J]. Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences), 2017, 35(6):9-15.
- [6] 王启源, 宋宇洋. 基于 DEM 的湟水流域河网阈值分析[J]. 水电能源科学, 2022, 40(6):6-9.
WANG Q Y, SONG Y Y. River network threshold analysis of Huangshui Basin based on DEM[J]. Water Resources and Power, 2022, 40(6):6-9.
- [7] 王国重, 李中原, 屈建钢, 等. 基于 DEM 的丹江口水库水源区水系分形特征研究[J]. 中国农村水利水电, 2017(4):121-124.
WANG G Z, LI Z Y, QU J G, et al. Research on the fractal features in Danjiangkou Reservoir catchment areas by DEM[J]. China Rural Water and Hydropower, 2017(4):121-124.
- [8] 孟宪萌, 张鹏举, 周宏, 等. 水系结构分形特征的研究进展[J]. 地球科学进展, 2019, 34(1):48-56.
MENG X M, ZHANG P J, ZHOU H, et al. Recent advances in fractal characteristics of river network structure[J]. Advances in Earth Science, 2019, 34(1):48-56.
- [9] 文力, 魏鹏飞, 李学敏, 等. 丹江口水库库区及周边地区河网形态、地貌特征及构造活动性意义[J]. 地质力学学报, 2020, 26(2):252-262.
WEN L, WEI P F, LI X M, et al. Study on the river network, geomorphological features and tectonic activity in the Danjiangkou Reservoir and its surrounding areas[J]. Journal of Geomechanics, 2020, 26(2):252-262.
- [10] MENG X M, ZHANG P J, LI J, et al. The linkage between box-counting and geomorphic fractal dimensions in the fractal structure of river networks: the junction angle[J]. Hydrology Research, 2020, 51(6):1397-1408.
- [11] 凌红波, 徐海量, 乔木, 等. 1958—2006 年玛纳斯河流域水系结构时空演变及驱动机制分析[J]. 地理科学进展, 2010, 29(9):1129-1136.
LING H B, XU H L, QIAO M, et al. Temporal-spatial evolution of stream construction and its driving forces in Manas River Basin during 1958—2006[J]. Progress in Geography, 2010, 29(9):1129-1136.
- [12] 宋向阳, 吴发启, 赵龙山, 等. 基于 DEM 的延河流域水文特征提取与分析[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(4):200-206.
SONG X Y, WU F Q, ZHAO L S, et al. Extraction and analysis of hydrological characteristics of Yanhe Watershed based on

- DEM[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2012, 30(4):200-206.
- [13] 刘继生,陈彦光. 河南省城镇体系空间结构的多分形特征及其与水系分布的关系探讨[J]. *地理科学*, 2003, 23(6):713-720.
LIU J S, CHEN Y G. Multifractal measures based on man-land relationships of the spatial structure of the urban system in Henan[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2003, 23(6):713-720.
- [14] 张凤,陈彦光,刘鹏. 京津冀城镇体系与水系结构的时空关系研究[J]. *地理科学进展*, 2020, 39(3):377-388.
ZHANG F, CHEN Y G, LIU P. Spatiotemporal relationships between urban system and water system in the Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. *Progress in Geography*, 2020, 39(3):377-388.
- [15] 韩杰,陆桂华,李海涛. 水系分维在滑坡泥石流灾害区划中的应用[J]. *自然灾害学报*, 2009, 18(4):63-71.
HAN J, LU G H, LI H T. Application of fractal analysis of water system to landslide/debris flow disasters zoning[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2009, 18(4):63-71.
- [16] 戴梦兰,陈志波,施国栋. 基于分形理论的浙江省地质灾害分布特征与影响因素分析[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2022, 33(6):63-69.
DAI M L, CHEN Z B, SHI G D. Analysis of the distribution characteristics and influencing factors of geological hazards in Zhejiang Province based on fractal theory[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2022, 33(6):63-69.
- [17] 杨明德. 论贵州岩溶水赋存的地貌规律性[J]. *中国岩溶*, 1982, 1(2):81-91.
YANG M D. The geomorphological regularities of karst water occurrences in Guizhou plateau[J]. *Carsologica Sinica*, 1982, 1(2):81-91.
- [18] 中国日报网. 最新科考成果发布!贵州绥阳双河洞长度刷新至 439.7 公里[EB/OL]. (2025-10-24)[2025-11-10]. <https://cn.chinadaily.com.cn/a/202510/24/WS68fb5b9aa310c4deea5ee1c9.html>.
CHINADAILY.COM.CN. Latest scientific expedition results released! Shuanghe cave in Suiyang County, Guizhou Province extends to 439.7 kilometers [EB/OL]. (2025-10-24)[2025-11-10]. <https://cn.chinadaily.com.cn/a/202510/24/WS68fb5b9aa310c4deea5ee1c9.html>.
- [19] 罗书文,李坡,陈伟海,等. 贵州绥阳双河洞系统发育机理与演化研究[J]. *重庆师范大学学报(自然科学版)*, 2019, 36(1):111-118.
LUO S W, LI P, CHEN W H, et al. Study on development mechanism and evolution of Shuanghe cave system in Suiyang, Guizhou[J]. *Journal of Chongqing Normal University (Natural Science)*, 2019, 36(1):111-118.
- [20] 周忠发,丁圣君,张结,等. 贵州绥阳麻黄洞壶穴形态特征及其成因分析[J]. *贵州师范大学学报(自然科学版)*, 2024, 42(5):1-8.
ZHOU Z F, DING S J, ZHANG J, et al. Morphological characteristics and causal analysis of cavernous potholes in Mahuang cave, Suiyang County, Guizhou Province[J]. *Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences)*, 2024, 42(5):1-8.
- [21] 韦跃龙,罗书文,陈伟海,等. 贵州绥阳地质公园白云岩喀斯特景观特征及其形成演化分析[J]. *地球学报*, 2018, 39(3):365-383.
WEI Y L, LUO S W, CHEN W H, et al. Characteristics and formation and evolution analysis of the dolomite karst landscape of Suiyang geopark, Guizhou Province[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2018, 39(3):365-383.
- [22] 徐亚,周忠发,范宝祥,等. 岩溶洞穴生态环境容量及影响因素分析:以绥阳大风洞-响水洞为例[J]. *环境科学与技术*, 2021, 44(2):186-195.
XU Y, ZHOU Z F, FAN B X, et al. Analysis of ecological environment capacity and influencing factors of karst cave: taking Dafeng-Xiangshui caves, Suiyang as an example[J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 44(2):186-195.
- [23] 黄静,周忠发,丁圣君,等. 双河洞流域氢氧同位素特征及其指示意义[J]. *地球与环境*, 2022, 50(4):516-525.
HUANG J, ZHOU Z F, DING S J, et al. Hydrogen and oxygen isotope characteristics and their indicative significance in Shuanghe cave basin[J]. *Earth and Environment*, 2022, 50(4):516-525.
- [24] WANG D Y, GAO Z D, BOTTAZZI J, et al. Significance of the preservation of 'pseudo-thumb' in fossil skeletons of giant panda (*Ailuropoda melanoleuca*) in Shuanghe cave, Guizhou Province, Southern China[J]. *Historical Biology*, 2022, 34(11):2188-2194.
- [25] 周文龙, BOTTAZZI J, 况光显, 等. 绥阳双河洞国家地质公园边界优化[J]. *科学技术与工程*, 2023, 23(27):11540-11549.
ZHOU W L, BOTTAZZI J, KUANG G X, et al. Optimization of the boundary of Shuanghe cave national geopark in Suiyang County[J]. *Science Technology and Engineering*, 2023, 23(27):11540-11549.
- [26] 李坡,贺卫,钱治,等. 双河洞地质公园研究[M]. 贵阳:贵州人民出版社,2008.
LI P, HE W, QIAN Z, et al. Study on Shuanghe cave geopark[M]. Guiyang: Guizhou People's Publishing House, 2008.
- [27] 蒋玺,龙克树,刘纯军,等. 贵州绥阳双河洞白云岩溶洞群成因研究[J]. *地质论评*, 2018, 64(3):674-684.
JIANG X, LONG K S, LIU C J, et al. Research on formation and evolution of Shuanghe dolostone cave system, Suiyang,

- Guizhou[J]. *Geological Review*, 2018, 64(3): 674-684.
- [28] HORTON R E. Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1945, 56(3): 275.
- [29] 姜瑾斐, 褚忠信, 朱晓洁, 等. 柴汶河袭夺地区流域地貌发育阶段研究[J]. *海洋湖沼通报*, 2024, 46(1): 176-181.
JIANG J F, CHU Z X, ZHU X J, et al. Studies on the developing stages of the watershed landform in Chaiwen River captured area[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2024, 46(1): 176-181.
- [30] PIKE R J, WILSON S E. Elevation-relief ratio, hypsometric integral, and geomorphic area-altitude analysis[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1971, 82(4): 1079-1083.
- [31] 王兆印, 李志威, 徐梦珍. 青藏高原河流演变与生态[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
WANG Z Y, LI Z W, XU M Z. *River morphodynamics and stream ecology in Qinghai-Tibet Plateau*[M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [32] 何隆华, 赵宏. 水系的分形维数及其含义[J]. *地理科学*, 1996, 16(2): 124-128.
HE L H, ZHAO H. The fractal dimension of river networks and its interpretation[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 1996, 16(2): 124-128.
- [33] 魏兴萍, 刘文. 当前国际岩溶洞穴学界研究热点: 袁道先院士访谈录[J]. *重庆师范大学学报(自然科学版)*, 2014, 31(1): 1-5.
WEI X P, LIU W. Current research hotspots of international karst speleology: interview with academician Yuan Daoxian[J]. *Journal of Chongqing Normal University (Natural Science)*, 2014, 31(1): 1-5.
- [34] 洪时中, 洪天明. 地质学中的分维研究水系、地震及其它[J]. *大自然探索*, 1988(2): 33-40.
HONG S Z, HONG S M. A study of fractals in geoscience: drainages, earthquakes and others[J]. *Discovery of Nature*, 1988(2): 33-40.
- [35] 杨太华, 苏维箴, 何凡锋. 黔南曹渡河流域水系的分形分维研究[J]. *贵州科学*, 1992, 10(1): 60-66.
YANG T H, SU W C, HE F F. A study on the drainage fractal dimensions of valley drainage in the Caodu River of south Guizhou[J]. *Guizhou Science*, 1992, 10(1): 60-66.
- [36] 安全, 贺中华, 赵翠薇, 等. 基于地貌视角的喀斯特流域水系分维估算方法适应性分析[J]. *国土资源遥感*, 2019, 31(4): 104-111.
AN Q, HE Z H, ZHAO C W, et al. GIS-based estimation of fractal dimension and geomorphological development of the water system in the dam construction area[J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2019, 31(4): 104-111.
- [37] 罗书文, 贺卫, 张远海, 等. 绥阳双河洞发育对区内地表水系变迁影响[J]. *中国岩溶*, 2021, 40(6): 920-931.
LUO S W, HE W, ZHANG Y H, et al. Influence of Shuanghe cave development on the changes of surface water system in Suiyang County, Guizhou, China[J]. *Carsologica Sinica*, 2021, 40(6): 920-931.
- [38] 关昊哲, 冶运涛, 顾晶晶, 等. 西南高山峡谷流域河网结构特征研究: 以金沙江流域为例[EB/OL]. (2025-02-25)[2025-03-14]. <https://link.cnki.net/urlid/32.1117.TV.20250225.0939.007>.
GUAN H Z, YE Y T, GU J J, et al. Characterization of river network structure in southwestern alpine canyon watersheds: a case study of Jinsha River Basin[EB/OL]. (2025-02-25)[2025-03-14]. <https://link.cnki.net/urlid/32.1117.TV.20250225.0939.007>.
- [39] 安全. 基于渔网算法的喀斯特流域水系特征提取与地貌发育阶段识别研究[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2020.
AN Q. Study on feature extraction and landform development stage identification in karst basin based on fishing net algorithm [D]. Guiyang: Guizhou Normal University, 2020.
- [40] 李秋梅, 杨建英, 吴海龙, 等. 大清河流域水系分形及连通性研究[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2023, 56(3): 296-303.
LI Q M, YANG J Y, WU H L, et al. Study on fractal and connectivity of water system in Daqing River Basin[J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2023, 56(3): 296-303.
- [41] 费俊源, 吴鹏飞, 刘金涛. 基于盒维数的雅鲁藏布江流域水系分形维数及影响因素研究[J]. *中国农村水利水电*, 2021(11): 78-82.
FEI J Y, WU P F, LIU J T. Research on the fractal dimension of river network and its influencing factors in Yarlung Zangbo River Basin based on box dimension[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2021(11): 78-82.
- [42] 窦明, 余佳琦, 关键, 等. 基于水资源分区的中国水系发育度与连通度相关性[J]. *水科学进展*, 2023, 34(6): 877-886.
DOU M, YU J Q, GUAN J, et al. Study on relationship between water system development and connectivity in China based on water resource zoning[J]. *Advances in Water Science*, 2023, 34(6): 877-886.
- [43] 梁虹, 卢娟. 喀斯特流域水系分形、熵及其地貌意义[J]. *地理科学*, 1997, 17(4): 310-315.
LIANG H, LU J. The fractal, entropy and geomorphological meaning of karst drainage[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 1997, 17(4): 310-315.

Resources, Environment and Ecology in Three Gorges Area**Adaptability of Fractal Dimension Estimation Methods for Watershed Systems in Basins with Giant Dolomite Cave Systems**

MO Guifen¹, ZHOU Wenlong^{1,2}, ZHAO Shiqi¹, LUO Shuwen^{1,2}, SU Weici^{1,3}, KUANG Guangxian⁴

(1. Guizhou Institute of Mountain Resources, Guiyang 550001;

2. Committee on Speleology of GSC, Guilin Guangxi 541004;

3. School of Geography and Tourism, Chongqing Normal University, Chongqing 401331;

4. Administration of Suiyang Shuanghe Cave National Geopark, Zunyi Guizhou 563314, China)

Abstract: In order to investigate the genesis and developmental evolution patterns of giant dolomite cave systems, focus on the Chiwuxi Basin in Suiyang, Guizhou, a typical karst cave system development area. Based on 1 : 50 000 topographic maps and 12.5 m resolution ALOS DEM data, extracted watershed water system. The Horton's law, box-counting method, and grid water system method were employed to estimate the fractal dimension of the water system in the study area. Comparing the applicability of three methods in the study area and analyzing the developmental trends of its landforms. The results indicate: 1) Controlled by the complex surface-underground "binary and three-dimensional" hydrogeological structure of karst, Horton's law exhibits poor adaptability. The branch ratio and river length ratio of higher-order rivers in the study area show significant deviations, failing to comply with the Horton's law. 2) At similar scales, significant discrepancies exist between water system fractal dimension values estimated from different data sources and methods. The most pronounced difference was observed between topographic map water systems and ALOS water systems values using the Horton's law method, yielding 2.77 and 2.55 respectively, both exceeding theoretical thresholds. The fractal dimension values obtained from different data sources using the box-counting method and grid water system method were relatively close, ranging between 1.41 and 1.42. 3) Ranking the methods for estimating water system fractal dimension from best to worst adaptability yields the following order: box-counting method, grid water system method, Horton's law method. The box-counting method is more suitable for estimating water system fractal dimensions in karst regions. Integrating the distribution of water system fractal dimensions estimated by this method with the elevation variation ratio of sub-basins, it is comprehensively determined that the study area's landform development is transitioning from an early to a mature stage. These findings provide a basis for selecting optimal quantitative research methods for studying landform evolution in karst basins.

Keywords: digital elevation model; Chiwuxi Basin; fractal dimension of water system; geomorphological development; karst

(责任编辑 方 兴)