

doi: 10.6046/gtzyyg.2019.04.14

引用格式: 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 and Resources, 2019, 31(4): 104-111.)

## 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

安全<sup>1,3</sup>, 贺中华<sup>1,2,3</sup>, 赵翠薇<sup>1</sup>, 梁虹<sup>1,3</sup>, 焦树林<sup>1,3</sup>, 杨朝晖<sup>4</sup>

(1. 贵州师范大学地理与环境科学学院, 贵阳 550001; 2. 贵州师范大学国家喀斯特石漠化防治工程技术研究中心, 贵阳 550001; 3. 贵州省山地资源与环境遥感应用重点实验室, 贵阳 550001; 4. 贵州省应急管理厅, 贵阳 550001)

**摘要:** 水系分维是地貌发育程度的定量表示方法之一。水系分维的研究对于喀斯特筑坝流域地貌的产汇流机制研究具有重要意义。以 1:5 万地形图提取水系和 30 m 空间分辨率 ASTER-GDEM 为数据源, 利用基于 ArcGIS10.2 的 Horton-Strahler 理论、水系栅格法、渔网法估算黔中筑坝工程区龙场桥流域水系分维, 探讨筑坝区地貌发育对流域水文特征的影响。结果表明: 喀斯特地区复杂地貌组合结构下不同方法、不同数据源估算的水系分维相差较大。Horton-Strahler 法、水系栅格法、渔网法估算 1:5 万地形图提取水系分维值分别为 1.69, 1.53 和 1.54; 估算 ASTER-GDEM 提取水系的分维值分别为 0.66, 1.59 和 1.60。其中 Horton-Strahler 法估算分维值差别显著, 差值达到 1.03。综合分析 Horton-Strahler 理论、水系栅格法、渔网法估算喀斯特筑坝区不同数据源水系分维与实际地貌发育的关系可知, 渔网法估算的水系分维与研究区实际地貌现状最为吻合。根据渔网估算的水系分维可知, 研究区利用渔网法估算的 1:5 万地形图提取水系分维值为 1.54, 通过 ASTER-GDEM 提取水系估算的分维值约为 1.60, 这说明研究区处于地貌发育阶段的幼年晚期、壮年期早期, 此结果与研究区实际发育地貌吻合。此外 3 种方法估算喀斯特筑坝流域的水系分维精度排序为: 渔网法 > 水系栅格法 > Horton-Strahler 法。

**关键词:** GIS; 喀斯特地貌; ASTER-GDEM; 分维; 精度

**中图法分类号:** P 33 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-070X(2019)04-0104-08

## 0 引言

自然界许多系统、要素的空间组合结构具有某种意义上的分形特点。诸多河流发育的支流与干流在空间结构上呈现出一种典型的分形特征。通过传统计算水系分维方法工作量大、费时耗力, 利用地理信息系统 (geographic information system, GIS) 技术并结合 1:5 万地形图水系与 30 m 空间分辨率 ASTER-GDEM 数字高程数据估算流域水系分维, 探讨流域地貌发育与水文水系特征的关系是当前研究的热点

问题。分形是自然界诸多客体表现局部特征与整体的相似性客观几何规律, 在现代数学的发展中逐步演化成一门新的具有独特理论体系与认识的世界观与方法论。在地学领域, 地貌发育与河流水系的演化规律中本质上都潜藏着分形的自相似性特点。分形理论在地学界的快速发展始于 20 世纪 90 年代, 早在 1977 年 Mandelbrot 首先将分形理论引入水文学, 成为水系分维理论的创始人。进入 20 世纪 90 年代后, 国内外对水系分维的研究迅速展开。何隆华等<sup>[1]</sup>利用计盒法对全国 14 个大流域与 67 个小流域进行了计算, 并得出水系分维值 1.6 是流域地

收稿日期: 2018-11-23; 修订日期: 2019-02-25

**基金项目:** 国家自然科学基金项目“中国南方喀斯特流域结构的水文干旱驱动机制研究”(编号: 41471032)、“喀斯特筑坝河流水安全与调控对策”(编号: u1612441)、贵州省国内一流学科建设项目“面向对象技术与多源遥感协同的喀斯特农业干旱驱动机制及其专家决策预警研究——以贵州省为例”(编号: KT201402)、贵州省科技厅自然科学基金项目“基于高光谱技术湖泊富营养化遥感监测机理研究——以贵阳市两湖一库为示范区”(编号: 黔科合 J 字[2010]2026 号)、“喀斯特‘生态水’遥感定量研究”(编号: 黔科合 J 字[2013]2208 号)及贵州师范大学 2015 年博士科研启动项目“基于超光谱遥感的喀斯特湖泊水质评估模型研究——以贵阳市‘两湖一库’为例”共同资助。

**第一作者:** 安全(1991-), 男, 硕士研究生, 主要从事喀斯特水文水资源 GIS、遥感以及产汇流模拟方向研究。Email: 932599540@qq.com。

**通信作者:** 数据(1976-), 男, 教授, 硕士生导师, 博士, 主要从事喀斯特水文水资源与遥感研究。Email: zhonghuahe@gznu.edu.cn。

貌发育阶段的临界值。进入21世纪后,基于数字高程模型(digital elevation model, DEM)提取水系估算水系分维的研究得到快速发展<sup>[2-5]</sup>。往后随着科学技术的快速发展,特别是GIS与DEM的发展与建立使得基于ArcGIS系列技术与DEM模型的流域水系分维研究进入大发展时期<sup>[6-15]</sup>。如王倩<sup>[16]</sup>等利用GIS技术,对秦淮河流域水系分维展开了研究,王林等<sup>[17]</sup>基于ArcGIS8.3和ArcVIEW3.2进行了DEM模型的流域水系分维估算分析。

目前,水系分维的研究主要是区域流域水系分维与地貌发育关系,人工渠系与自然水系分维对比,水系分维与洪涝、径流过程,水系分维与岩性识别,水系分维与居名点分布特征,水系分维的生态意义等方面的研究<sup>[18-20]</sup>。而针对中国西南喀斯特筑坝流域地区与地貌发育对水文特征影响方面的研究报道还较少。鉴于此,本文以黔中筑坝工程区龙场桥流域为研究对象,以1:5万地形图水系、30 m空间分辨率的ASTER-GDEM和1:10万贵州省综合地貌图数据源,利用基于ArcGIS10.2的Horton-Strahler理论、水系栅格法、渔网法估算黔中筑坝工程区龙场桥流域水系分维,探讨筑坝区地貌发育对流域水文特征的影响,以期对喀斯特地区的生态建

设,经济的可持续发展,筑坝带的洪涝风险评估以及流域综合管理等方面提供一定参考。

## 1 研究区概况及数据源

### 1.1 研究区概况

研究区是以龙场桥水文控制断面提取的流域,位于黔中水利工程区上游地区(图1)。黔中水利枢纽工程是贵州省首个大型跨地区、跨流域长距离水利调水工程,也是黔中地区生存和发展的生命线工程<sup>[23]</sup>。工程区内是长江流域和珠江流域两大流域交错地带,研究区流域面积4 074.15 km<sup>2</sup>,地形西高东低,海拔在1 138~2 888 m之间,流域的西部地貌类型为典型的喀斯特岩溶高原<sup>[27]</sup>,中东部峡谷、峰丛洼地相间分布,气候属于亚热带季风气候,夏季高温多雨,冬季温和湿润,四季分明,多年平均降雨量在1 100~1 400 mm之间,最热月平均气温22℃以上,最冷月0~15℃左右。植被为亚热带常绿阔叶林、灌木林、草地和裸岩相间分布。土壤以黄壤为主,兼有非地带性石灰土分布。流域内发育的乌江水系南源三岔河干流全长325.6 km,流域集水面积7 264 km<sup>2</sup>,是黔中地区大型水利工程集中地。

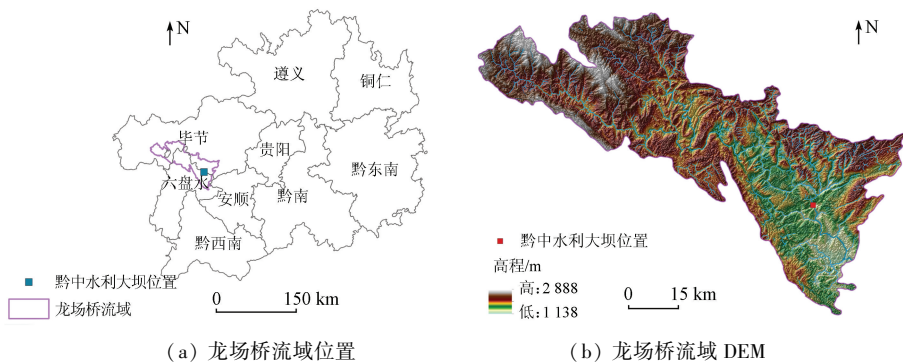


图1 研究区概况图

Fig. 1 Research area overview

### 1.2 数据源及其预处理

本文数据源包括1:5万地形图水系(以下简称地形图水系)和30 m空间分辨率的ASTER-GDEM等。在对数据源的坐标进行一致性处理的基础上,使用30 m空间分辨率ASTER-GDEM数据进行水系提取,利用ArcGIS10.2软件的Hydrology水文分析工具集对中国科学院计算机网络信息中心的地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>)获取的ASTER-GDEM数字高程数据进行填洼、流向、汇流累积量计算处理,利用ArcGIS10.2软件的Con命令设定汇流阈值1 500提取研究区河网栅格水系(以下简称ASTER-GDEM水系)。

## 2 研究方法

利用ASTER-GDEM水系、结合0.6 m空间分辨率Google Earth影像、30 m空间分辨率Landsat 8 OLI遥感影像,对提取的筑坝水库区平行状水系依据Strahler理论进行了分级。依次将提取水系栅格的边长设定为500~10 000 m,步长为500 m;然后利用ArcGIS软件的SQL查询功能分别统计不同边长水系栅格所对应的栅格数目,再对统计的栅格边长、数目与Strahler分级的矢量水系导入相关统计软件,分别求栅格法与Horton定理的水系分维<sup>[28-29]</sup>。

### 2.1 Horton 定理

Horton - Strahler 计算原理为利用 ArcGIS 10.2 提取 1:5 万地形图水系,应用 Strahler 分级原理对提取的水系进行河流分级;同理,以 ASTER - GDEM 为数据源,利用 ArcGIS 10.2 的 con 函数对 30 m 空间分辨率 DEM 分别设定汇流阈值 100 ~ 10 000 自动提取水系,并与 1:5 万地形图尺度下提取的水系不断做叠加试验,通过汇流阈值与河网密度的拟合曲线变点分析,确定用以提取研究区河网水系的最佳汇流阈值为 1 500,再根据 Strahler 河网分级理论对矢量河网进行分级;最后统计地形图水系和 ASTER - GDEM 通过最佳阈值 1 500 提取水系的每一级河流分级的河道数及其河道长度,计算 2 个数据源提取水系的的分叉比与河长比,对分叉比与河长比取对数,比值即为所求分维。计算公式如下:

$$R_b = N_{i-1}/N_i, \quad i = 2, 3, \dots, n, \quad (1)$$

$$R_L = \bar{L}_i/\bar{L}_{i-1}, \quad i = 2, 3, \dots, n, \quad (2)$$

$$D_H = \min[\max(\lg \bar{R}_b/\lg \bar{R}_L, 1), 2], \quad (3)$$

式中:  $R_b$  为分叉比;  $R_L$  为河长比;  $N_i$  为各级河道数;  $i$  为河道等级;  $D_H$  为 Horton - Strahler 水系分维值。

### 2.2 栅格法

栅格法又称覆盖法、网格法、计盒维数法,其原理是:取边长为  $r$  的正方形网格与水系图求取交集,得到水系覆盖的网格数目为  $N(r)$ ,当  $r$  不断变化时,与之相对应会得到一系列的  $N(r)$  值,二者关系为

$$N(r) \propto r^{-D}。 \quad (4)$$

左右两边求取对数,以点  $(\lg r, \lg N(r))$  为坐标作双对数图,采用最小二乘法可拟合出一条直线,即

$$\lg N(r) = -D \lg r + b, \quad (5)$$

式中:  $r$  为正方形网格的边长;  $N(r)$  为对应边长网格与水系图求取交集所覆盖的网格数目;  $b$  为待定系数;  $D$  为双对数曲线的斜率值,即所求的水系分维<sup>[25]</sup>。

## 3 结果与分析

### 3.1 黔中筑坝流域水系分维提取分析

利用 ArcGIS10.2 软件对提取水系进行 Strahler 二次分级,通过 Horton - Strahler 法求得地形图水系与研究区 ASTER - GDEM 水系的水系分维,再通过水系栅格法、渔网法对提取地形图水系与

ASTER - GDEM 水系,分别依次将栅格边长设定为 500 ~ 10 000 m,步长为 500 m,分别统计不同栅格边长的栅格个数,并求取栅格边长与不同边长栅格数的对数,利用 Oringing9.1 统计软件作栅格边长与不同边长栅格数双对数拟合线,求其斜率即为分维值,统计结果如表 1—4 所示。

表 1 基于地形图水系的 Horton - Strahler 法参数  
Tab.1 Horton - Strahler method parameters based on water system of topographic map

河流等级	数目/条	平均长度/km	分叉比/ $R_x$	河长比/ $R_L$	$\lg R_x$	$\lg R_L$
1	1 557	1 191.470				
			1.981	0.559	0.297	-0.252
2	786	666.210				
			2.005	0.560	0.302	-0.520
3	392	373.230				
			3.187	0.458	0.503	-0.298
4	123	171.010				
			2.617	0.481	0.418	-0.379
5	47	82.330				
			5.875	0.395	0.769	-0.114
6	8	32.520				

表 2 基于 ASTER - GDEM 水系的 Horton - Strahler 法参数

Tab.2 Horton - Strahler method parameters based on water system of ASTER - GDEM

河流等级	数目/条	平均长度/km	$R_b$	$R_L$	$\lg R_b$	$\lg R_L$
1	877	1 363.910				
			2.016	0.486	0.305	-0.516
2	435	663.030				
			2.112	0.464	0.325	-0.489
3	206	307.920				
			1.392	0.622	0.144	-0.843
4	148	191.470				
			2.056	0.526	0.313	-0.505
5	72	100.750				
			72.000	0.028	1.857	0.269
6	1	2.850				

表 1 和表 2 的统计结果表明,河流数与河流平均长度随着河流级数的增大而减少。河流的分叉比随着河流级数的增大而增大,与河流数、河流平均长度成反比;河长比随河流级数越大而减少。总体而言,河流分叉比、河长比除了受到河流数及其河流长度的影响,与河流的分级存在一定的相关性。

表 3 和表 4 是地形图水系与 ASTER - GDEM 水系栅格参数和渔网法参数。统计结果表明,栅格水系法与渔网法统计的栅格数目随着试验设定的栅格边长的增加而减少,栅格边长与栅格数目之间存在明显的线性关系。

表 3 地形图水系与 ASTER - GDEM 水系栅格参数

Tab. 3 Water system of topographic map and ASTER - GDEM grid parameters

1:5 万栅格水系法				30 m 空间分辨率 ASTER - GDEM 栅格水系法			
栅格边长 $r$	栅格数目 $N(r)$	$Lgr$	$LgN(r)$	栅格边长 $r$	栅格数目 $N(r)$	$Lgr$	$LgN(r)$
500	4 975	2.699	3.697	500	5 754	2.699	3.760
1 000	2 161	3.000	3.335	1 000	2 614	3.000	3.417
1 500	1 225	3.176	3.088	1 500	1 526	3.176	3.184
2 000	810	3.301	2.908	2 000	1 004	3.301	3.002
2 500	569	3.398	2.755	2 500	675	3.398	2.829
3 000	424	3.477	2.627	3 000	491	3.477	2.691
3 500	328	3.544	2.516	3 500	374	3.544	2.573
4 000	269	3.602	2.430	4 000	295	3.602	2.470
4 500	216	3.653	2.334	4 500	244	3.653	2.387
5 000	187	3.699	2.272	5 000	205	3.699	2.312
5 500	161	3.740	2.207	5 500	163	3.740	2.212
6 000	143	3.778	2.155	6 000	146	3.778	2.164
6 500	117	3.813	2.068	6 500	131	3.813	2.117
7 000	106	3.845	2.025	7 000	114	3.845	2.057
7 500	93	3.875	1.968	7 500	100	3.875	2.000
8 000	85	3.903	1.929	8 000	90	3.903	1.954
8 500	78	3.929	1.892	8 500	79	3.929	1.898
9 000	70	3.954	1.845	9 000	76	3.954	1.881
9 500	65	3.978	1.813	9 500	69	3.978	1.839
10 000	59	4.000	1.771	10 000	64	4.000	1.806

表 4 地形图水系与 ASTER - GDEM 渔网法参数

Tab. 4 Water system of topographic map and ASTER - GDEM fishing net method parameters

地形图水系渔网法				ASTER - GDEM 水系渔网法			
栅格边长 $r$	栅格数目 $N(r)$	$Lgr$	$LgN(r)$	栅格边长 $r$	栅格数目 $N(r)$	$Lgr$	$LgN(r)$
500	5 023	2.699	3.701	500	5 723	2.699	3.758
1 000	2 169	3.000	3.336	1 000	2 574	3.000	3.411
1 500	1 238	3.176	3.093	1 500	1 561	3.176	3.193
2 000	800	3.301	2.903	2 000	996	3.301	2.998
2 500	566	3.398	2.753	2 500	686	3.398	2.836
3 000	427	3.477	2.630	3 000	491	3.477	2.691
3 500	322	3.544	2.508	3 500	373	3.544	2.572
4 000	264	3.602	2.422	4 000	295	3.602	2.470
4 500	221	3.653	2.344	4 500	238	3.653	2.377
5 000	177	3.699	2.248	5 000	200	3.699	2.301
5 500	154	3.740	2.188	5 500	172	3.740	2.236
6 000	131	3.778	2.117	6 000	143	3.778	2.155
6 500	121	3.813	2.083	6 500	126	3.813	2.100
7 000	101	3.845	2.004	7 000	113	3.845	2.053
7 500	92	3.875	1.964	7 500	101	3.875	2.004
8 000	80	3.903	1.903	8 000	90	3.903	1.954
8 500	74	3.929	1.869	8 500	82	3.929	1.914
9 000	68	3.954	1.833	9 000	71	3.954	1.851
9 500	64	3.978	1.806	9 500	65	3.978	1.813
10 000	57	4.000	1.756	10 000	61	4.000	1.785

表 5 是结合表 1 至表 4 统计数据,利用分维计算公式根据表 1 和表 2 分别求出 1:5 万地形图提取水系和 ASTER - GDEM 提取水系的 Horton - Strahler 分维;利用 Oring9.1 统计软件根据表 3 和表 4 分别作 1:5 万水系和 ASTER - GDEM 的栅格水系法及渔网水系法试验得到栅格边长与栅格数的双对数拟合曲线。结果见表 5。

表 5 不同方法提取地形图水系与 ASTER - GDEM 分维值对比表

Tab. 5 Comparison of fractal values from water system of topographic map and ASTER - GDEM by different methods

参数	地形图水系			ASTER - GDEM 水系		
	Horton - Strahler 法	栅格水系法	渔网法	Horton - Strahler 法	栅格水系法	渔网法
分维值	1.69	1.53	1.54	0.66	1.59	1.60
$R^2$		0.996 6	0.996 4		0.994 1	0.993 4



从表 5 中可以看出,同一地区不同方法、不同数据源估算的水系分维相差较大。其中 Horton - Strahler 法估算地形图水系差别显著,根据 Horton - Strahler 法估算地形图水系与 ASTER - GDEM 水系的分维值分别为 1.69 和 0.66,二者相差 1.03。根据河数定律与河长定律的分叉比、河长比理论取值范围可知,针对二元三维地表地下结构,溶洞、裂隙发育的典型喀斯特地貌而言,由于诸多干流沿途遇到溶洞,大型溶蚀管道、裂隙时会转入地下流一段距离等特殊现象,使得在地形图上提取水系时无法判断地下的水流状况导致提取水系误差增大,根据地形图水系计算的河流的分叉比、河长比的比值范围未在理论值范围,以至于所计算出的水系分维值与水系栅格法、渔网法估算的分维值大相径庭,不能稳定的判断研究区地貌发育状况。与此同时,表 1 和表 2 根据 Horton - Strahler 法提取的地形图水系与 ASTER - GDEM 水系的河段数差别尤为显著,总体上相差 1 174 段,河流分级的河段数差别主要体现在 1~3 级。这种显著差异可能是

由于复杂的喀斯特地貌组合结构所致。

然而,栅格水系法与渔网法估算的水系分维无论是地形图水系还是 ASTER - GDEM 水系,估算的分维值均比较接近。就表 5 数据表明,通过 ASTER - GDEM 水系利用 2 种方法估算的分维略比地形图水系大。另外,从水系提取的  $R^2$  值来看,1:5 万地形图尺度下栅格水系法与渔网法提取水系分维的  $R^2$  值分别为 0.996 6 和 0.996 4,而基于 ASTER - GDEM 采用栅格水系法与渔网法提取水系分维的  $R^2$  值分别为 0.994 1 和 0.993 4,这表明前者提取水系的无标度区间在 0.996 4 ~ 0.996 6 之间,而后者为 0.993 4 ~ 0.994 1 之间。

### 3.2 黔中筑坝流域水系分维与地貌发育关系分析

图 2 为研究区根据 1:10 万贵州省综合地貌图矢量化研究区地貌发育现状图和 30 m 空间分辨率 ASTER - GDEM 数字高程数据利用 ArcGIS10.2 制作的研究区山体阴影图。表 6 为研究区各类型地貌类型及其面积比例。

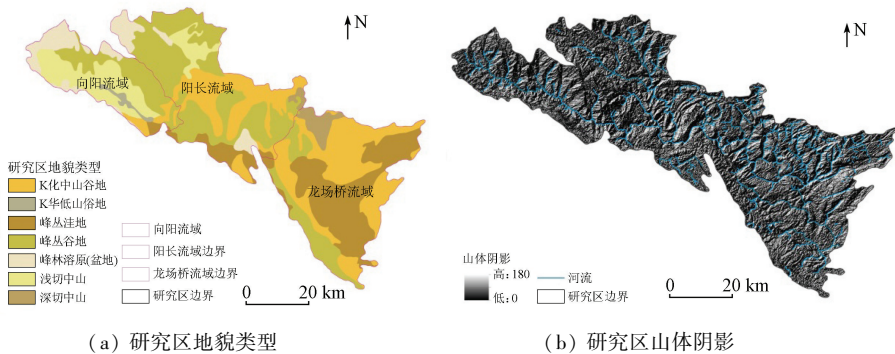


图 2 研究区各流域地貌类型与山体阴影图

Fig. 2 Landform types and mountain shadow maps of various watersheds in the study area

表 6 不同流域地貌发育参数及其面积比例

Tab. 6 Geomorphological development parameters and area ratio of different watersheds

流域	地貌类型	面积/km <sup>2</sup>	占向阳流域比例	占研究区比例	成因类型 <sup>①</sup>
向阳流域	K 化低山谷地	29.46	3.54	0.72	F
	K 化中山谷地	59.01	7.09	1.45	K2
	峰丛谷地	193.88	23.31	4.76	K1, K2
	峰丛洼地	60.94	7.33	1.5	K2
	峰林溶原(盆地)	173.25	20.83	4.25	K1, K2
阳长流域	浅切中山	316.39	38.04	7.77	F
	K 化中山谷地	427.07	26.75	10.48	F, K1, K2
	峰丛谷地	757.33	47.43	18.59	K1, K2
	峰丛洼地	185.6	11.62	4.56	K1, K2
龙场桥流域	峰林溶原(盆地)	128.82	8.07	3.16	K1, K2
	浅切中山	102.38	6.41	2.51	F
	深切中山	36.65	3.01	0.9	F
龙场桥流域	K 化低山谷地	16.88	1.03	0.41	K2
	K 化中山谷地	711.24	43.23	17.46	K1, K2
	峰丛谷地	196.62	11.95	4.83	K1, K2
	峰丛洼地	676.79	41.14	16.61	K1, K2
	深切中山	43.53	2.64	1.07	F

①字母 F, K1, K2, 分别表示地貌发育的侵蚀 - 剥蚀类型、溶蚀为主型、溶蚀 - 侵蚀类型。

从图 2(a)中可以看出,整个研究区地貌发育类型以中山谷地、峰丛谷地、峰丛洼地为主,其中龙场桥流域、阳长流域少部分地区出现深切中山型地貌。从图 2(b)山体阴影图可以看出,研究区地貌发育破碎程度大,河谷多呈“V”型,越往研究区的东部即阳长、龙场桥一带,地势起伏越大。地貌发育组合以深切中山、中山谷地、峰丛洼地复合型组合为主。从表 6 中可以看出,向阳流域地貌发育组合以峰丛谷地、峰林溶原(盆地)、浅切中山为主,所占流域面积比例分别为 23.31%, 20.83% 和 7.77%; 阳长流域地貌发育组合以 K 化中山谷地、峰丛谷地、峰丛洼地为主,所占流域面积比例分别为 26.75%, 47.43% 和 11.62%; 研究区比例分别为 10.48%, 18.59% 和 4.56%; 龙场桥流域地貌发育以 K 化中山谷地、峰丛谷地、峰丛洼地为主,所占流域面积比例分别为 43.23%, 11.95% 和 41.14%, 研究区比例

分别为 17.46% , 4.83% 和 16.61% 。

### 3.3 不同流域地貌发育成因分析

从表 6 中可以看出,向阳流域、阳长流域和龙场桥流域 3 个流域的地貌发育成因主要为侵蚀-剥蚀类型,溶蚀为主类型、溶蚀-侵蚀类型,向阳流域由于侵蚀-剥蚀成因下发育的地貌类型深切中山面积占整个流域的 38.04% ,这说明整个流域地貌的发育主要以侵蚀-剥蚀为主,其次为溶蚀、溶蚀-侵蚀型。阳长流域由于溶蚀、溶蚀-侵蚀成因下发育的地貌类型峰丛谷地面积占整个流域的 47.43% ,其地貌发育主要以溶蚀、溶蚀-侵蚀为主。龙场桥流域由于溶蚀、溶蚀-侵蚀成因下发育的地貌类型 K 化中山谷地、峰丛洼地面积占整个流域的 34.07% ,故其地貌发育主要以溶蚀、溶蚀-侵蚀为主。从地貌发育的角度看皆属于地貌发育幼年期的中晚期阶段。

综合水系估算分维值来看,根据何隆华的计算的水系分维与地貌发育阶段的关系可知,当  $D$  或  $D_H \leq 1.6$  时,流域地貌发育属于侵蚀发育阶段的幼年期;当  $D > 1.6$  或  $D_H \leq 1.89$  时,流域地貌发育属于侵蚀发育阶段的壮年期;当  $D$  或  $D_H > 1.89$  时,流域地貌发育属于侵蚀发育阶段的老年期。Horton - Strahler 法、水系栅格法、渔网法提取除了 Horton - Strahler 法估算水系分维与研究区实际出入较大外,水系栅格法、渔网法估算的水系分维与研究区地貌发育较为吻合。结合表 5 和表 6 数据来看,综合分析典型喀斯特复杂的地貌结构与水系分维关系,渔网法估算的水系分维与研究区实际地貌现状最为吻合。根据渔网估算的水系分维可知,研究区利用渔网法估算的 1:5 万地形图提取水系分维值为 1.54,通过 ASTER - GDEM 提取水系估算的分维值约为 1.60,这说明研究区正处于地貌发育阶段的幼年晚期、壮年期早期。此结果与研究区实际发育地貌吻合。

## 4 结论与展望

本文以黔中筑坝工程区龙场桥流域为研究对象,以 1:5 万地形图水系、30 m 空间分辨率的 ASTER - GDEM 和 1:10 万贵州省综合地貌图为数据来源,利用基于 ArcGIS10.2 的 Horton - Strahler 理论、水系栅格法、渔网法估算流域水系分维,探讨筑坝区地貌发育对流域水文特征的影响,结果表明:

1) 喀斯特地区复杂地貌组合结构下不同方法、不同数据源估算的水系分维相差较大。Horton - Strahler 法、水系栅格法、渔网法估算地形图水系分维值分

别为 1.69, 1.53 和 1.54; 估算 ASTER - GDEM 水系的分维值分别为 0.66, 1.59 和 1.60。其中 Horton - Strahler 法估算分维值差别显著,差值达到 1.03。

2) 综合分析 Horton - Strahler 理论、水系栅格法、渔网法估算喀斯特筑坝区不同数据源水系分维与实际地貌发育的关系可知,渔网法估算的水系分维与研究区实际地貌现状最为吻合。根据渔网估算的水系分维可知,研究区利用渔网法估算的地形图水系分维值为 1.54, ASTER - GDEM 水系估算的分维值约为 1.60,这说明研究区正处于地貌发育阶段的幼年晚期、壮年期早期。此结果与研究区实际发育地貌吻合。此外,3 种方法估算喀斯特筑坝流域的水系分维精度排序为:渔网法 > 水系栅格法 > Horton - Strahler 法。

### 参考文献 (References):

- [1] 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. Fractal dimension of water system and its implications[J]. Geographical Science,1996,16(2):124-128.
- [2] 郭忆,毕硕本,闫业超,等.拉林河流域水系分维研究[J].测绘科学,2015,40(4):63-66,140.  
Guo Y,Bi S B,Yan Y C, et al. Study on fractal dimension of water system in Lalin River Basin[J]. Journal of Surveying and Mapping,2015,40(4):63-66,140.
- [3] 贺晓晖,张树君,胡志博,等.基于 DEM 的南水北调中线水源区水系分维估算[J].测绘与空间地理信息,2016(9):92-95.  
He X H,Zhang S J,Hu Z B, et al. Estimation of fractal dimension of water system in the Middle Route of South - to - North Water Transfer Project based on DEM[J]. Surveying and Spatial Geography Information,2016(9):92-95.
- [4] 吕爱锋,陈嘻,王纲胜.基于 DEM 的流域水系分维估算方法探讨[J].干旱区地理,2002,25(4):315-320.  
Lv A F,Chen X,Wang G S. DEM - based method for estimating fractal dimension of watershed system[J]. Arid Land Geography,2002,25(4):315-320.
- [5] 江滔,武伟,刘洪斌.基于 DEM 的重庆长江流域水系分维估算[J].中国农学通报,2010,26(15):365-368.  
Jiang T,Wu W,Liu H B. Estimation of fractal dimension of water system in the Yangtze River Basin of Chongqing based on DEM[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,2010,26(15):365-368.
- [6] 曹小敏,罗明良,刘承翔.基于 ASTER - GDEM 的延河流域水系分维特征分析[J].遥感信息,2013,28(1):34-37.  
Cao X M,Luo M L,Liu C Y. Analysis of fractal dimensions of the Yanhe River Basin based on ASTER - GDEM[J]. Remote Sensing Information,2013,28(1):34-37.
- [7] 郑楠炯,周买春,刘远.基于 GIS 的 Horton 水系分维值估算——以韩江流域为例[J].中国农村水利水电,2017(12):81-85.  
Zheng N J,Zhou M C,Liu Y. Estimation of fractal dimension of Horton water system based on GIS——Taking Hanjiang River Ba-

- sin as an example[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2017(12): 81-85.
- [8] 贺中华, 梁虹, 黄法苏, 等. 基于 DEM 的喀斯特流域地貌发育影响因素分析[J]. *测绘科学*, 2008, 33(4): 70-72.  
He Z H, Liang H, Huang F S, et al. Analysis of influencing factors of geomorphological development in Karst basin based on DEM[J]. *Journal of Surveying and Mapping*, 2008, 33(4): 70-72.
- [9] 原晓平, 刘少峰, 田贵中, 等. 基于 DEM 的格尔木河流域水系分维分析[J]. *国土资源遥感*, 2013, 25(1): 111-116. doi: 10.6046/gtzyyg. 2013. 01. 20.  
Yuan X P, Liu S F, Tian G Z, et al. Fractal dimension analysis of the water system in the Golmud River Basin based on DEM[J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2013, 25(1): 111-116. doi: 10.6046/gtzyyg. 2013. 01. 20.
- [10] 丰满, 张征, 朱凌, 等. 基于 DEM 的滇池流域水系提取及分维值探讨[J]. *环境科学与技术*, 2010, 33(2): 11-14.  
Feng M, Zhang Z, Zhu L, et al. Extraction and fractal dimension of water system in Dianchi Lake Basin based on DEM[J]. *Environmental Science and Technology*, 2010, 33(2): 11-14.
- [11] 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. Fractal characteristics of water system in Danjiangkou Reservoir water source area based on DEM[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2017(4): 121-124.
- [12] 黄晶晶, 张卫华, 魏朝富. 基于 ArcGIS 的丘陵山区局地水系提取及分维值估算[J]. *中国农村水利水电*, 2012(11): 1-3.  
Huang J J, Zhang W H, Wei C F. Extraction and fractal dimension estimation of local water system in Hilly Mountainous area based on ArcGIS[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2012(11): 1-3.
- [13] 黎武, 王汝兰, 徐珍, 等. 基于 DEM 的延河流域河网水系分形特征研究[J]. *安徽农学通报*, 2017, 23(5): 121-124.  
Li W, Wang R L, Xu Z, et al. Fractal characteristics of river network in Yanhe River Basin based on DEM[J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2017, 23(5): 121-124.
- [14] 刘涓, 郑畅, 张卫华, 等. 四川盆地丘陵山区局地水系分形分维研究[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2012, 34(3): 76-82.  
Liu J, Zheng C, Zhang W H, et al. Fractal dimension of local water system in hilly area of Sichuan Basin[J]. *Journal of Southwest University(Natural Science)*, 2012, 34(3): 76-82.
- [15] 陈彦光, 刘继生. 水系结构的分形和分维——Horton 水系定律的模型重建及其参数分析[J]. *地球科学进展*, 2001, 16(2): 178-183.  
Chen Y G, Liu J S. Fractal and fractal dimension of water system structure——model reconstruction and parameter analysis of Horton water system[J]. *Advances in Earth Science*, 2001, 16(2): 178-183.
- [16] 王倩, 邹欣庆, 朱大奎. 基于 GIS 技术的秦淮河流域水系分维研究[J]. *水科学进展*, 2002, 13(6): 751-756.  
Wang Q, Zhou X Q, Zhu D K. Study on fractal dimension of water system in Qinhuai River Basin based on GIS technology[J]. *Advances in Water Science*, 2002, 13(6): 751-756.
- [17] 王林, 陈兴伟. 基于 DEM 的流域水系分维计算与结果分析[J]. *地球信息科学学报*, 2007, 9(4): 133-134.  
Wang L, Chen X W. Fractal dimension calculation and results analysis of watershed system based on DEM[J]. *Journal of Earth Information Science*, 2007, 9(4): 133-134.
- [18] 范林峰, 胡瑞林, 张小艳, 等. 基于 GIS 和 DEM 的水系三维分形计盒维数的计算[J]. *地理与地理信息科学*, 2012, 28(6): 28-30.  
Fan L F, Hu R L, Zhang X Y, et al. Calculation of three-dimensional fractal box dimension of water system based on GIS and DEM[J]. *Geography and Geography Information*, 2012, 28(6): 28-30.
- [19] 严宝文, 罗欢. 泾、洛河水系与径流过程的分形特征及相互关系研究[J]. *中国农村水利水电*, 2017(7): 116-119.  
Yan B W, Luo H. Fractal characteristics and correlation of water system and runoff process in Handan and Luohe Rivers[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2017(7): 116-119.
- [20] 杨秀春, 朱晓华. 中国七大流域水系与洪涝的分维及其关系研究[J]. *灾害学*, 2002, 17(3): 9-13.  
Yang X C, Zhu X H. Study on the fractal dimension and relationship of water system and flood in seven large watersheds in China[J]. *Journal of Catastrophology*, 2002, 17(3): 9-13.
- [21] 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 in Yanhe River basin based on DEM[J]. *Agriculture Research in the Arid Areas*, 2012, 30(4): 200-206.
- [22] 易卫华, 杨平. 基于 DEM 数字河网提取时集水面积阈值的确定[J]. *江西水利科技*, 2008, 34(4): 259-262.  
Yi W H, Y P. Determination of the catchment area threshold based on DEM digital river network extraction[J]. *Journal of Jiangxi Water Science and Technology*, 2008, 34(4): 259-262.
- [23] 张行南, 刘羽婷, 刘伯娟. 基于地形带分类的最佳阈值与河网密度关系研究[J]. *长江科学院院报*, 2014, 31(4): 17-20.  
Zhang X N, Liu Y T, Liu B J. Research on the relationship between optimal threshold and river network density based on terrain classification[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2014, 31(4): 17-20.
- [24] 张树君, 朱勤东. GIS 环境下泾河流域水系特征的提取及探讨[J]. *人民黄河*, 2014, 36(10): 55-57.  
Zhang S J, Zhu Q D. Extraction and discussion of water system characteristics in the Weihe River Basin under GIS environment[J]. *People's Yellow River*, 2014, 36(10): 55-57.
- [25] 任娟, 杨武年, 许娟. 基于 GIS 与 DEM 的岷江上游流域水系分维值计算[J]. *地理空间信息*, 2015(1): 77-79.  
Ren J, Yang W N, Xu J. Calculation of fractal dimension of water system in the upper reaches of Minjiang River based on GIS and DEM[J]. *Geospatial Information*, 2015(1): 77-79.
- [26] 芮孝芳. 水文学原理[M]. 北京: 水利水电出版社, 2004.  
Rui X F. Principles of Hydrology[M]. Beijing: Water Resources and Hydropower Press, 2004.
- [27] 周忠发, 朱昌丽, 谭玮颐, 等. 基于空间开发适宜性评价的石漠化地区可持续发展研究——以贵州省盘州市为例[J]. *贵州师范大学学报(自然科学版)*, 2019, 37(1): 1-9.  
Zhou Z F, Zhu C L, Tan W Y. Study on sustainable development of



rocky desertification region based on suitability evaluation of spatial development—Taking Panzhou City of Guizhou Province as an example[J]. Journal of Guizhou Normal University (Natural Science), 2019, 37(1): 1–9.

[28] 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(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(6): 9–15.

[29] 钱莉莉, 贺中华, 梁 虹, 等. 基于降水 Z 指数的贵州省农业干旱时空演化特征[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2019, 37(1): 10–14.

Qian L L, He Z H, Liang H, et al. Spatial-temporal evolution characteristics of agricultural drought based on precipitation Z index in Guizhou[J]. Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences), 2019, 37(1): 10–14.

## GIS – based estimation of fractal dimension and geomorphological development of the water system in the dam construction area

AN Quan<sup>1,3</sup>, HE Zhonghua<sup>1,2,3</sup>, ZHAO Cuiwei<sup>1</sup>, LIANG Hong<sup>1,3</sup>, JIAO Shulin<sup>1,3</sup>, YANG Chaohui<sup>4</sup>

(1. School of Geographic and Environmental Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China; 2. State Engineering Technology Institute For Karst Desertification Control, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China; 3. Key Laboratory of Remote Sensing Application on Mountain Resources and Environment in Guizhou Province, Guiyang 550001, China; 4. Department of Emergency Management of Guizhou Province, Guiyang 550001, China)

**Abstract:** The fractal dimension of water system is one of the quantitative representation methods for determining geomorphic development degree. The study of water system fractal dimension is of great significance for the investigation of the sedimentation mechanism of karst dam basin landform. Advanced space borne thermal emission and reflection radio mater global digital elevation model (ASTER – GDEM) was used as a data source for extracting water system and 30 m resolution ASTER – GDEM. Based on the ArcGIS 10.2, Horton – Strahler theory, water grid method and fishing net method, the authors estimated the water system fractal dimension of Longchangqiao watershed in the dam construction area of Yuzhong, and explore the influence of landform development on the hydrological characteristics of the basin in dam construction. Some conclusions have been reached: The fractal dimensions of the water system estimated by different methods and different data sources under the complex geomorphic structure of the karst area are quite different. The fractal dimension values of the extracted water system of 1.50 million topographic maps estimated by the Horton – Strahler method, the water grid method and the fishing net method are 1.69, 1.53, 1.54 respectively. The fractal dimensions estimated by 30 m resolution ASTER – GDEM extraction water system are 0.66, 1.59, 1.60. Among them, the fractal dimension values estimated by the Horton – Strahler method are significantly different, with the difference reaching 1.03. Comprehensive analysis of Horton – Strahler theory, water grid method and fishing net method for estimating the relationship between the fractal dimension of different data source water systems and actual landform development in karst dam construction area shows that the water system fractal dimension estimated by the fishing net method and the actual landform status of the study area are most consistent with each other. According to the estimation of the water system estimated by the fishing net, the fractal dimension of the extracted water system estimated by the fishing net method is 1.54, and the fractal dimension estimated by the 30 m resolution ASTER – GDEM extraction system is about 1.60, which suggests that the study area is at the late stage of the young period and the early stage of mature period in geomorphological development, and the results coincide with the actual development of the study area. In addition, three methods were used to estimate the fractal dimension accuracy of the water system in the karst dam basin, and the results show the following order: fishnet method > water grid method > Horton – Strahler method.

**Keywords:** GIS; karst landform; ASTER – GDEM; fractal dimension; adaptive analysis

(责任编辑: 李 瑜)