

---

# 基于形态计量学的清江流域地下水潜在区研究

王节涛<sup>1, 2, 3</sup> 王彤<sup>4</sup> 裴来政<sup>1</sup> 刘伟<sup>2</sup> 侯保全<sup>1, 2</sup>

周耘<sup>1, 2</sup> 易秤云<sup>1, 2</sup> 龚冲<sup>1</sup> N' dji dit Jacques DEMBELE<sup>51</sup>

(1. 中国地质调查局武汉地质调查中心, 湖北 武汉 430205;

2. 中国地质大学(武汉)地质调查研究院, 湖北 武汉 430074;

3. 古生物与地质环境演化湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430205;

4. 湖北省地质局第六地质大队, 湖北 孝感 432000; 5. Université

des Sciences Sociales et de Gestion de Bamako, Bamako Mali bp2575)

**【摘要】:** 水系形态是内外动力条件共同作用的结果, 通过分析水系形态特征参数, 可以获取流域内河流排泄能力、河流侵蚀能力、地表水下渗能力等信息。清江流域是三峡岩溶区典型的山区河流, 由于交通条件的限制, 如何快速高效地掌握清江流域的地下水资源总体分布特征, 一直是该地区水资源调查工作的难点。为了解决上述问题, 使用 AsterGDEM 数据对清江流域的 24 个子流域(SW1-SW24)的 6 个线性参数、8 个面状参数以及 3 个起伏度参数进行分析。依据不同的参数所指示的地下水潜力特征, 将每个参数赋予一个序列值。将不同参数的序列值求和后的新序列作为不同子流域的优先级序列。通过对比地下水水位统测工作得到的泉流量信息, 对优先级结果进行了验证。发现清江流域的优先级与地下水资源潜在区有较好的对应关系, 流域的优先级高的流域也是地下水资源丰富的地区。清江流域中游北岸地区地下水资源量最为丰富, 上游次之, 而在下游以及南岸地区较少。揭示了 DEM 数据在水系特征评价和相关参数提取中所起到的重要作用, 为水资源评价和管理工作提供了新的思路。

**【关键词】:** 清江流域 优先级 地下水潜在区 GIS 泉流量

**【中图分类号】:** P641.8 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2022)08-1823-13

如何快速低成本的获取地下水资源量的信息一直是困扰水资源评价工作的重要课题。水系形态是外作用力(降水量)以及在条件(地层岩性、构造)因素共同作用的结果, 通过分析水系的形态学特征可以获取流域内的相关水文信息。形态计量学是利用

---

**作者简介:** 王节涛(1983~), 男, 高级工程师, 主要研究方向为地貌学、水文地质与水资源. E-mail: quaternary@163.com

**基金项目:** 国家重点研发计划项目(2020YFC1512402); 国家自然科学基金项目(41501004); 中国地质调查局地质调查项目(DD20190824)



清江干流自上而下分布有水布垭(蓄水位 400m)、隔河岩(蓄水位 200m)、高坝洲(蓄水位 80m)3 个大型水电站,它们所形成的水库对该地区 DEM 数据精度产生了较大影响。此外,在清江下游平原地带,DEM 数据的精度也较差。因此在本研究中选择除干流区和下游平原区外的山区和丘陵区开展研究,一共选择了清江流域内 24 个子流域,这些流域的面积占清江流域总面积的 77.66%,基本可以反映清江流域的整体特征(图 2)。本研究中,采用 GIS 软件提取清江流域内 19 个形态参数,其中 2 个参数用于描述全流域整体特征:坡向和坡度;6 个参数用来描述水系的线性特征:水系等级(U)、水系数量( $N_b$ )、水系长度( $L_b$ )、平均水系长度( $L_{sm}$ )、水系长度比值( $R_b$ )和分叉比( $R_c$ );描述水系的面积特征有 8 个参数:延长比( $R_e$ )、水系密度( $D_b$ )、水系频率( $S_f$ )、圆度( $R_c$ )、形状因子( $R_f$ )、水系质地( $D_t$ )、紧度系数( $C_c$ )和流域长度( $L_b$ );流域的起伏度方面的 3 个参数:总起伏度(H)、起伏度比值( $R_h$ )和相对起伏度( $R_r$ )。通过对计算所得到的参数值进行综合计算,获得不同子流域的合成值,并将其用于评价不同流域的优先级。技术路线图如图 3 所示。

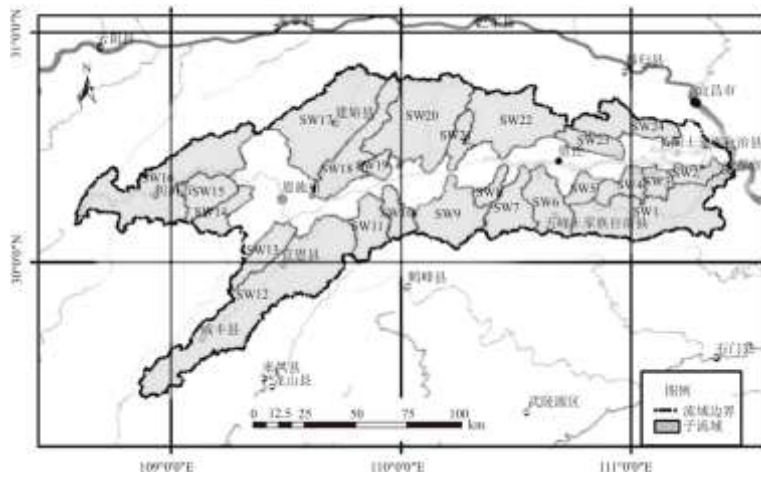


图 2 清江流域内 24 个子流域分布图

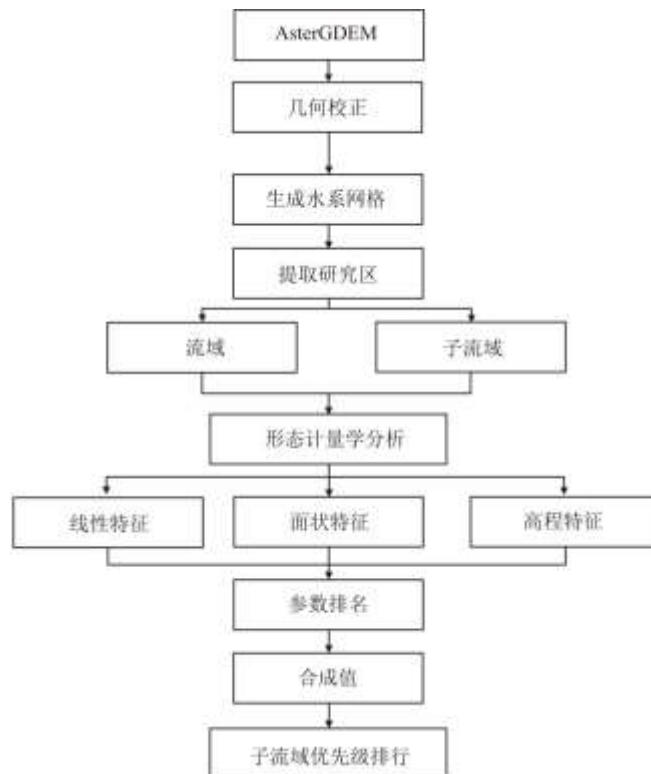


图 3 本研究的研究路线图

采用 GRASSGIS7.8.0 的 r.stream.order 模块生成流域边界和水系网络, 利用 r.stream.stats 模块计算不同的参数值。由于 ArcGIS 在图件制作优势明显, 文中所有地图均由 ArcGIS10.5 制作。本研究中所选择的 24 个子流域位置如图 2 所示, 计算形态学参数所使用数学公式如表 1 所示。

### 3 结果

#### 3.1 坡向

坡向通常指的是山坡面对的方向。该方面对当地气候有显著的影响, 因为坡向会影响太阳辐射的获取强度, 并会影响水份的蒸散发过程。例如, 与北坡相比, 南坡更易获取更多的阳光和暖湿气流, 但是南坡的蒸散速率也要高得多。清江流域的坡向图如图 4 所示。清江流域的坡向以东南向所占比例最高, 占流域总面积的 13.2%; 平面占比最小, 为 7.07% (表 2)。

表 1 形态计量学参数计算公式

No.	形貌参数	公式	参考文献
线性特征			
1	水系等级 (U)	等级排序	Strahler 等 <sup>[8]</sup>
2	水系长度 ( $L_u$ )	水系的长度	Horton 等 <sup>[10]</sup>
3	平均水系长度 ( $L_{sm}$ )	$L_{sm}=L_u/N_u$	Strahler 等 <sup>[8]</sup>
4	水系长度比值 ( $R_l$ )	$R_l=L_u/(L_u-1)$	Strahler 等 <sup>[8]</sup>
5	分叉比 ( $R_b$ )	$R_b=N_u/(N_u+1)$	Strahler 等 <sup>[8]</sup>
平面特征			
6	延长比 ( $R_c$ )	$R_c=D/L$	Schumm 等 <sup>[6]</sup>
7	水系密度 ( $D_i$ )	$D_i=L_u/A$	Horton 等 <sup>[10]</sup>
8	水系频率 ( $S_f$ )	$S_f=N_u/A$	Horton 等 <sup>[10]</sup>
9	圆度 ( $R_c$ )	$R_c=4 \pi A/P^2$	Strahler 等 <sup>[8]</sup>
10	形状因子 ( $R_f$ )	$R_f=A/L^2$	Horton 等 <sup>[10]</sup>
11	水系质地 ( $D_t$ )	$D_t=D_i*F_s$	Horton 等 <sup>[10]</sup>
12	紧凑度 ( $C_c$ )	$0.2841*P/A^{0.5}$	Praveen 等 <sup>[4]</sup>
13	流域长度 $L_b$	流域出水口到流域内任一点最大长度	Schumm 等 <sup>[6]</sup>
14	周长 (P)	流域周长	Schumm 等 <sup>[6]</sup>
15	流域面积 (A)	流域的面积	Schumm 等 <sup>[6]</sup>



坡度的大小受岩石力学性质、区域的气候等因素控制，坡度是影响分水岭和地表形态发展的重要因素<sup>[16,17]</sup>。根据国际土壤学会推荐的地形坡度 SOTER 分类法，按照坡度百分比值，清江流域的坡度分为 0%~2%、2%~5%、>5%~10%、>10%~15%、>15%~30%、>30%~45%和>45%7 个等级<sup>[18]</sup>。坡度值越大的地形对应着河流具有较快的地表径流速度，而较快的地表径流则会造成地下水补给量减少<sup>[19]</sup>。由于坡度对地下水资源量影响成反比，因此按照坡度从小到大，将坡度和地下水资源量等级依次划分为极高、高、中等、低和极低五个等级，其中中等和极低两个等级分别对应了 2 个坡度等级，分别为 3 和 4 级，以及 6 和 7 级(表 3)。

表 3 根据 SOTER 对清江流域坡度进行分类

坡度等级	坡度 (%)	所占面积比例 (%)	地下水资源量
1	0~2	8.07	极高
2	>2~5	1.97	高
3	>5~10	4.32	中等
4	>10~15	5.63	
5	>15~30	22.12	低
6	>30~45	21.51	极低
7	>45	36.39	

清江流域的坡度分析显示 8.07%的面积位于 0%~2%之间，1.97%的面积位于 2%~5%之间，4.32%的面积位于 5%~10%之间，5.63%的面积位于 10%~15%之间，22.12%的面积位于 15%~30%之间，21.51%的面积位于 30%~45%之间，36.39%的面积位于>45%区间。这表明清江流域的地形以陡峭至非常陡峭的斜坡为主(图 5)。与此相对应，由于清江流域总体上具有较高侵蚀速率，流域内易出现水土流失灾害的地区占清江流域总面积的 36.39%，且地下水资源量大部分处于低和极低的水平。

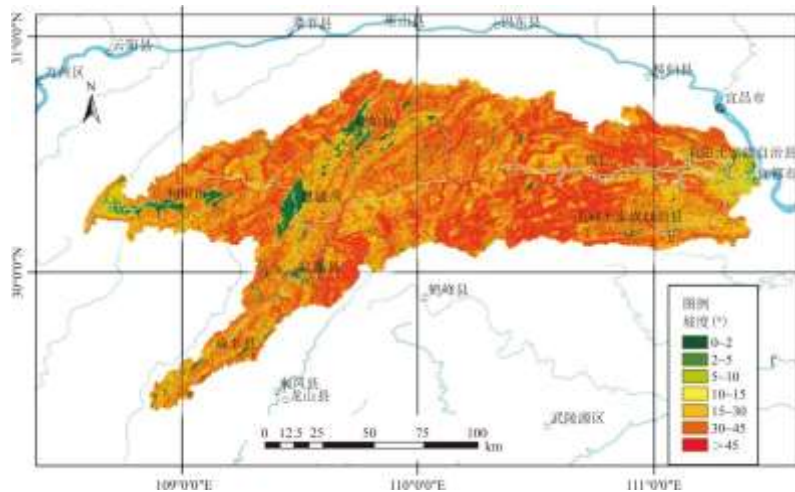


图 5 清江流域坡度图

### 3.3 线性特征

### 3.3.1 水系等级(U)

目前水系等级的划分方法常用 Strahler(1964)提出的水系等级划分规则。Strahler(1964)将河流源头位于分水岭附近的水系命名为1级水系,两条1级水系汇合后水系等级升级为2级水系,两个2级水系汇合后的水系升级为3级水系,以此类推。此外还规定,低级水系与高级水系汇合后水系等级不变。

采用 Strahler 分级规则,可以计算出 24 个子流域水系的等级,其中 3 级河流有 3 个,包括 SW2、SW8 和 SW19;4 级河流有 14 个,包括 SW3~SW7、SW9~SW11、SW13~SW15、SW21、SW23 和 SW24;5 级河流有 6 个,包括 SW1、SW16~SW18、SW20 和 SW22;6 级河流 1 个,为 SW12(表 4)。

表 4 清江流域子流域的线性特征

	U	$N_u$	$L_u$	$L_{sm}$	$R_i$	$R_b$
SW1	5	426	863.42	13.42	2.35	3.49
SW2	3	50	133.73	8.82	3.42	4.38
SW3	4	46	90.15	4.29	1.64	3.35
SW4	4	91	163.04	7.35	2.57	3.07
SW5	4	56	109.94	4.30	1.63	2.85
SW6	4	184	310.67	11.29	3.10	4.03
SW7	4	148	279.83	10.88	2.98	3.68
SW8	3	39	87.13	8.82	4.04	3.87
SW9	4	204	412.34	11.94	2.95	4.16
SW10	4	91	175.01	7.43	2.41	3.19
SW11	4	113	251.88	10.85	2.63	3.39
SW12	6	657	1438.47	15.06	1.87	3.20
SW13	4	106	227.32	8.04	2.44	3.26
SW14	4	90	171.35	9.38	2.75	3.77
SW15	4	116	278.64	8.46	2.32	3.39
SW16	5	448	1076.93	17.25	2.36	3.46
SW17	5	356	909.59	12.14	2.02	3.31
SW18	5	163	413.42	12.08	2.11	2.83
SW19	3	38	79.09	5.34	2.71	1.81

SW20	5	402	951.64	13.36	2.22	3.40
SW21	4	52	118.16	6.41	2.05	2.73
SW22	5	311	636.99	9.20	1.97	3.99
SW23	4	89	167.10	7.27	2.31	3.54
SW24	4	171	327.31	13.09	3.13	3.87

### 3.3.2 水系数量 ( $N_n$ )

水系数量是指不同级数水系的个数。根据 Horton 定律,“流域中不同级数的水系的个数呈现近似的等比数列,相邻级数河流的比值为分叉比”<sup>[10]</sup>。该定律指出,水系的数量随着级数的增加而逐渐减少。水系的数量取决于该地区的地理、地貌和地质条件。在 GDEM 数据的基础上,在清江流域总共识别出 4447 条水系,其中水系最多的是 SW12,共有 657 条水系;最少是 SW19,共有 38 条水系(表 4)。

### 3.3.3 水系长度 ( $L_n$ )

Horton (1945)将水系长度定义为流域内中所有水系的长度之和。流域内的不同级别的水系长度遵循着几何级数关系。流域的水文特征与水系长度有关,渗透性较高的地层,河水易于下渗,进而造成水系长度较小,而渗透性较差岩石地层则对应着较大的河流长度<sup>[20]</sup>。清江流域内的 24 个子流域中,SW12 水系长度最大为 1438.47km;SW19 最短,其长度为 79.09km(表 4)。

### 3.3.4 平均水系长度 ( $L_{sm}$ )

流域内水系的平均水系长度揭示了水系网络中各个等级水系的长度及其汇水面积的关系<sup>[8]</sup>。将每个顺序中的水系总长度除以该级数中的水系总数,即可得出平均水系长度的值。通常情况下,水系的  $L_{sm}$  值随着级数的增加而增大。24 个子流域的平均水系长度从 4.29(SW3)到 17.25km(SW16), $L_{sm}$  的平均值为 9.85(表 4)。

### 3.3.5 水系长度比值 ( $R_i$ )

水系长度比值是给定级数 ( $U$ ) 水系平均长度与低一级 ( $U-1$ ) 水系平均长度的比值。在不同级数水系中  $R_i$  值受坡度和地形条件影响较大,同时也与地表水径流量和侵蚀能力有关<sup>[21]</sup>。为了揭示水系长度比值与水系级别的关系,本研究分别对 24 个子流域的水系长度比值制作分布散点图。水系长度比值大多数均位于 1~4 之间(图 6)。

### 3.3.6 分叉比 ( $R_b$ )

分叉比是低级水系与相邻高级水系的数量的比值,是一个无量纲参数。常作为描述流域内构造地质条件对水系影响程度的指标,比值高的流域表示水系受构造控制程度较高,而较低的值表示流域受构造扰动的影响较小<sup>[7,22]</sup>。24 个子流域中有 13 个子流域的  $R_b$  值大于 5.0,其中 SW14 的  $R_b$  值最大可达 9.5。这表明在清江流域内,清江水系受构造地质条件的控制程度较高(图 7)。

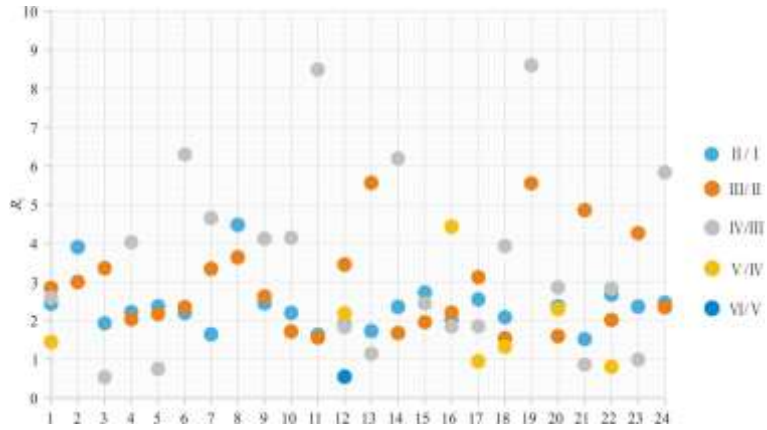


图6 水系长度比值分布情况



图7 各子流域的水系分叉比

### 3.4 面状特征

#### 3.4.1 延长比( $R_e$ )

具有与流域相同面积的圆的直径与最大流域长度之比定义为延长比( $R_e$ )<sup>[6]</sup>。延长比指数值与降水入渗能力成正比，与河流径流流量成反比。相对于细长的流域，圆形的流域的径流排泄能力更强。根据延长比大小，延长比可分为较大( $<0.5$ )、中等( $0.5\sim 0.7$ )、较小( $0.7\sim 0.8$ )、椭圆( $0.8\sim 0.9$ )和圆形( $0.9\sim 1.0$ )5个类别<sup>[20]</sup>。根据 Horton 公式计算得出的清江流域 24 个子流域的延长比范围为  $0.28\sim 0.42$ ，均属于延长比较大的类别(表 5)。

#### 3.4.2 水系密度( $D_i$ )

水系密度是总河流长度与流域面积的比值，是衡量流域内水系发育程度的指标，它反映了水系之间的接近程度，与流域内各种地层的风化作用强度、起伏度和降雨等因素有关。在高渗透性的区域常表现为较低的水系密度，而在弱透水性或不透水地区，常表现为较高的水系密度<sup>[23]</sup>。根据公式计算得出的清江流域 24 个子流域的水系密度范围为  $0.61\sim 0.79\text{km}^2/\text{km}^2$ (表 5)。

### 3.4.3 水系频率( $S_f$ )

水系频率( $S_f$ )是一个流域中所有水系的总数与该流域面积之比<sup>[5]</sup>。也有人指出,具有较低 $S_f$ 值的流域表明水系拥有较低的径流量和较高的渗透率<sup>[24]</sup>。公式计算得出的清江流域24个子流域的水系频率范围为0.28~0.42(表4)。

### 3.4.4 圆度( $R_c$ )

圆度是流域面积与圆周长与流域周长相同的圆的面积之比<sup>[8]</sup>。 $R_c$ 是用来衡量水系形状是否处于树枝状水系阶段的指标,可以用来揭示流域所处的演化阶段。 $R_c$ 较低的值表明流域处于青年期阶段,而较高的值指示流域生命周期处于老年阶段,壮年期河流的 $R_c$ 值处于前两者之间。圆度与流域的几何形状有关,圆度值的大小受地质背景、土地利用/土地覆盖、地形、坡度和气候等因素控制。根据公式计算得出的清江流域24个子流域的 $R_c$ 值范围为0.08~0.47之间(表5)。

### 3.4.5 形状因子( $R_f$ )

形状因子是流域面积与流域长度平方的比值<sup>[5]</sup>。但是通常流域的形状不会达到圆形,形状因子的值不会大于0.79<sup>[22]</sup>。分水岭的延长特性与其值的大小成反比,值越小,延长性越大。前人研究表明,高形状因子的流域中出现了持续时间明显较短的较高峰值流量。根据公式计算得出的清江流域24个子流域的 $R_f$ 值范围为0.14~0.63之间(表5)。

### 3.4.6 水系质地( $D_i$ )

水系质地是所有级数水系总数与该区域周长之比<sup>[10]</sup>。Horton(1945)认为渗透能力是影响水系质地的唯一重要因素,并包括水系密度和水系频率的特征。水系质地分为5类,即非常粗糙(<2)、粗糙(2~4)、中等(4~6)、精细(6~8)和非常精细(>8)<sup>[2]</sup>。清江流域24个子流域的水系纹理最大为SW1(1.50),最小为SW21(0.42),所有子流域的水系质地均属于非常粗糙这一类别(表5)。

表5 清江流域子流域的面状特征

子流域	A (km <sup>2</sup> )	P (km)	$R_c$	$D_a$	$S_f$	$R_c$	$R_f$	$D_i$	$C_c$	$L_b$ (km)
SW1	1202.03	284	0.54	0.72	0.35	0.19	0.23	1.50	2.33	73
SW2	173.05	94	0.59	0.77	0.29	0.25	0.28	0.53	2.03	25
SW3	148.87	73	0.76	0.61	0.31	0.35	0.46	0.63	1.70	18
SW4	230.32	105	0.78	0.71	0.40	0.26	0.48	0.87	1.97	22
SW5	154.17	64	0.78	0.71	0.36	0.47	0.48	0.88	1.46	18
SW6	441.90	156	0.66	0.70	0.42	0.23	0.34	1.18	2.11	36
SW7	415.40	176	0.62	0.67	0.36	0.17	0.30	0.84	2.45	37
SW8	129.53	90	0.54	0.67	0.30	0.20	0.22	0.43	2.25	24
SW9	606.99	200	0.77	0.68	0.34	0.19	0.47	1.02	2.31	36
SW10	228.52	133	0.63	0.77	0.40	0.16	0.31	0.68	2.50	27

SW11	350.62	161	0.62	0.72	0.32	0.17	0.30	0.70	2.44	34
SW12	2020.02	524	0.45	0.71	0.33	0.09	0.16	1.25	3.31	113
SW13	310.83	162	0.49	0.73	0.34	0.15	0.18	0.65	2.61	41
SW14	244.44	141	0.59	0.70	0.37	0.15	0.27	0.64	2.56	30
SW15	353.47	153	0.73	0.79	0.33	0.19	0.42	0.76	2.31	29
SW16	1418.33	486	0.62	0.76	0.32	0.08	0.30	0.92	3.67	69
SW17	1276.04	287	0.71	0.71	0.28	0.19	0.39	1.24	2.28	57
SW18	582.32	300	0.42	0.71	0.28	0.08	0.14	0.54	3.53	65
SW19	111.75	81	0.80	0.71	0.34	0.21	0.50	0.47	2.18	15
SW20	1244.46	305	0.83	0.76	0.32	0.17	0.54	1.32	2.46	48
SW21	179.51	124	0.49	0.66	0.29	0.15	0.19	0.42	2.63	31
SW22	904.38	231	0.89	0.70	0.34	0.21	0.63	1.35	2.18	38
SW23	232.56	127	0.57	0.72	0.38	0.18	0.26	0.70	2.37	30
SW24	471.96	222	0.57	0.69	0.36	0.12	0.26	0.77	2.90	43

#### 3.4.7 紧凑度( $C_c$ )

紧凑系数是流域的实际周长与流域面积相等的圆形区域周长的比值<sup>[4,10]</sup>。 $C_c$ 是一个与坡度有关的值，与流域面积大小无关。清江流域 24 个子流域的  $C_c$  值最小的为 SW5 (1.46)，最大的为 SW16 (3.67)。

#### 3.4.8 流域长度( $L_b$ )

流域长度是指从流域出水口到流域边界上最远点的长度<sup>[25]</sup>。利用 GIS 测距功能，已经确定了清江流域 24 个子流域的流域长度最小的子流域为 SW19 (15km)，最大的为 SW12 (113km)。

### 3.5 起伏度特征

#### 3.5.1 总高差(H)

通常将此参数也称为流域起伏度，可以在数学上将其定义为流域最高点和最低点之间的垂直距离/水位差。流域起伏度与流域内水系的坡度有关，进而影响土壤侵蚀速率<sup>[15]</sup>。起伏度值的最小值为 SW3 (964m)，最大值为 SW7 (2076m)。SW1、SW5、SW6、SW7 的总起伏度均超过了 2000m，表明该地区极易产生水土流失。

#### 3.5.2 起伏度比值( $R_b$ )

起伏度比值定义为流域的总起伏度与流域的长度之比，它通过将总  $R_h$  值除以流域长度来消除尺寸效应的影响<sup>[6]</sup>。起伏度比值越高表明其干流具有较高的陡度，堤岸的侵蚀速率会变得越快，河道输沙能力也越强。本研究中，起伏比值从 13.48m/km(SW12) 到 114m/km(SW5) (表 6)。

表 6 清江流域 24 个子流域的起伏度指标

子流域	H(m)	$R_h$ (m/km)	$R_r$ (m/km)
SW1	2017	27.63	7.10
SW2	1021	40.84	10.86
SW3	964	53.56	13.21
SW4	1778	80.82	16.93
SW5	2052	114.00	32.06
SW6	2074	57.61	13.29
SW7	2076	56.11	11.80
SW8	1967	81.96	21.86
SW9	1932	53.67	9.66
SW10	1698	62.89	12.77
SW11	1622	47.71	10.07
SW12	1523	13.48	2.91
SW13	1112	27.12	6.86
SW14	1272	42.40	9.02
SW15	1036	35.72	6.77
SW16	1452	21.04	2.99
SW17	1603	28.12	5.59
SW18	1525	23.46	5.08
SW19	1335	89.00	16.48
SW20	1583	32.98	5.19
SW21	1231	39.71	9.93
SW22	1833	48.24	7.94
SW23	1782	59.40	14.03

SW24	1835	42.67	8.27
------	------	-------	------

### 3.5.3 相对起伏度( $R_r$ )

最大流域起伏度与流域周长之比定义为  $R_r$ 。 $R_r$  值越高,表明该流域内水系对土壤的侵蚀能力越强。本研究中,相对起伏度值在 2.91(SW12)至 32.06m/km(SW5)之间变化。

## 4 基于形态计量学参数的子流域的优先级

### 4.1 优先级计算

通过清江流域不同子流域所开展的形态计量分析,可以为流域管理提供基础信息。利用形态参数分析对于识别和确定地下水潜力区和高侵蚀速率区具有重要意义<sup>[26]</sup>。为了确定子流域治理的优先顺序,需要根据形态参数(线性、面状和起伏度)的相应值对所有子流域进行排序。这种基于形貌学参数的排序方法也称之为流域优先级分析。

水系密度( $D_d$ )、水系频率( $S_f$ )、分叉比( $R_c$ )和水系纹理( $D_t$ )等线性特征参数与地表径流和排泄能力成正比。因此,具有这些参数的最高数值的子流域排名第 1,其次排名第 2,依此类推。而延伸率( $R_e$ )、圆度( $R_o$ )、形状因子( $R_r$ )和紧度系数( $C_c$ )之类的面状特征参数与地表径流和排泄能力成反比关系。因此,将这些参数中具有最低值的子流域指定为第 1,其次是第 2,依此类推。由于总起伏度( $H$ )、起伏度比值( $R_b$ )和相对起伏度( $R_r$ )参数与排泄能力成正比。这些参数的最大值排名第 1,其次排名第 2。最后,将所有排序值求和,得到综合排序值。根据综合排序值的排名对子流域的综合等级值进行排序(表 7)。因此,综合排序值最大的流域(即最终排序为 1 的流域),同时也是地表径流最小、地下水资源最丰富的流域。

由表 7 可知,SW3 具有最高优先级(综合排序值为 17.09)。SW23 的优先级最低(综合排序值为 9.00)。流域水源靶区的选择应当从优先级靠前的子流域开始,依次进行;而水土流失方面的治理工作应从靠后的子流域开始并倒序进行(表 7)。

### 4.2 有效性检验

为了验证流域优先级与地下水资源潜在区的关系,本文采用 2019~2020 年地下水水位统一测量资料中的泉流量信息对子流域的优先级进行检验。本研究团队曾于 2019 年 7 月和 2020 年 12 月分别在清江流域开展地下水水位统一测量工作,对清江流域的主要泉点的泉流量进行了丰水期和枯水期两期调查。其中 2019 年共统测 227 个泉点,流量范围为 0.01~6650L/s;2020 年共有 124 个泉点,流量范围为 0.01~3590L/s。将这些泉点按照<10L/s、10~100L/s、100~1000L/s 和>1000L/s 范围分成 5 个类别,以圆圈大小表示泉点流量大小,在 ArcGIS 中绘制生成泉点分布图层,并将其叠加在优先级图层之上(图 8)。

表 7 清江流域各子流域优先级及其排序

子流域	$D_d$	$S_f$	$R_c$	$R_r$	$R_e$	$R_b$	$H$	$R_o$	$R_r$	$D_t$	$C_c$	综合排序值	最终排序
SW1	9	9	13	6	6	10	4	20	17	1	12	9.73	22
SW2	2	22	21	10	10	1	23	15	10	21	4	12.64	12
SW3	24	19	23	18	18	24	24	10	7	19	2	17.09	1

SW4	14	3	22	21	21	17	10	4	3	10	3	11.64	16
SW5	10	6	24	20	20	21	3	1	1	9	1	10.55	18
SW6	17	1	20	15	15	6	2	7	6	6	5	9.09	23
SW7	21	8	10	13	13	7	1	8	9	11	15	10.55	19
SW8	22	20	17	5	5	2	5	3	2	23	8	10.18	21
SW9	20	13	15	19	19	4	6	9	13	7	10	12.27	15
SW10	3	2	8	14	14	15	11	5	8	16	17	10.27	20
SW11	8	17	11	12	12	14	12	12	11	14	14	12.45	13
SW12	12	15	3	2	2	20	16	24	24	4	22	13.09	10
SW13	6	11	6	3	3	11	21	21	18	17	19	12.36	14
SW14	18	5	7	9	9	9	19	14	14	18	18	12.73	11
SW15	1	14	14	17	17	8	22	17	19	13	11	13.91	8
SW16	5	18	1	11	11	13	17	23	23	8	24	14.00	7
SW17	11	24	16	16	16	16	13	19	20	5	9	15.00	3
SW18	13	23	2	1	1	23	15	22	22	20	23	15.00	4
SW19	15	12	19	22	22	3	18	2	4	22	6	13.18	9
SW20	4	16	9	23	23	18	14	18	21	3	16	15.00	5
SW21	23	21	5	4	4	22	20	16	12	24	20	15.55	2
SW22	16	10	18	24	24	19	8	11	16	2	7	14.09	6
SW23	7	4	12	8	8	12	9	6	5	15	13	9.00	24
SW24	19	7	4	7	7	5	7	13	15	12	21	10.64	17

由图可知，优先级越靠前的流域主要分布于源头至资丘段的清江上、中游地区，如清江流域北部的 SW15~22，清江流域内流量超过 100L/s 的泉点绝大多数都分布在这些地区。与此产生强烈对比的是清江下游地区北岸的 SW23~SW24，以及南岸的 SW1、SW3~SW11 则很少有大流量的泉点出露。这表明流域优先级与地下水潜在区有良好的对应关系。由图 8 可知，清江流域的地下水资源分布差异较为明显，其中清江中游北岸地区最为丰富，上游次之，而在清江下游以及南岸地区较少。

根据前文所述的 Strahler (1964) 分级规则，在 GIS 软件中设定 1 级水系的长度(也称之为阈值)是生成水系网络的前提。利用 GIS 软件提取河网水系时，1 级水系的阈值具有较大的随机性。一些学者采用将 GIS 软件提取的水系与卫星图片对比的办法，通过不断调整阈值大小，使 GIS 软件生成的水系与卫星图片上的河流长度相当。但是这一方法仅适用于干旱半干旱地区，在以清江流域为代表的岩溶区并不适用。因为南方植被覆盖率较高，即使拿到高精度卫星图片，也难以判断哪些河流为常年性河流。此

外，在自然条件下，河流长度会随着丰水期和枯水期的交替而发生变化，是个不断变化的数值。由于不同学者选择的阈值差别较大，造成所对应的水系等级、数量、长度、长度比值等参数值也千差万别。本研究得到的一些有量纲的参数并不能直接与同行学者的数据进行对比。但是，无量纲的参数是不受阈值的影响。由于优先级分析排序是依据不同参数的排名得到的，不同学者关于优先级分析的结果也是可以用来对比的。

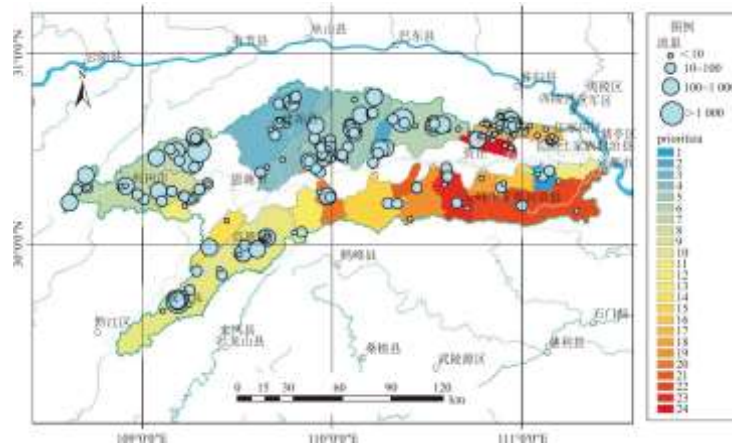


图8 清江流域子流域优先级地图及泉点分布图

## 5 结论

对于资料获取困难或资料匮乏的地区，采用 GIS 技术对研究区进行水系形态计量学分析，是快速获取该地区的水系形态特征、径流强度以及水土侵蚀状况的有效手段。本研究使用 AsterGDEM 对清江流域的坡向和坡度，以及 24 个子流域的 6 个线性特征、8 个面状特征和 3 个起伏度特征进行分析，并据此对优先级进行计算。通过对比野外统测资料，可以发现清江流域的优先级与地下水资源潜在区有较好的对应关系。优先级高的子流域主要位于清江上、中游北岸地区，而在清江下游地区，以及南岸的 SW1、SW3~SW11 优先级较低。采用该方法，可以非常快速获取山区和偏远灾区的地下水潜在区范围，同时为流域的水土流失治理、水利工程建设、寻找水源等方面提供帮助。

### 参考文献:

- [1]AGARWAL C S.Study of drainage pattern through aerial data in Naugarh area of Varanasi district,U.P[J].Journal of the Indian Society of Remote Sensing,1998,26(4):169-175.
- [2]MARK D M.Geomorphometric parameters:A review and evaluation[J].Geografiska Annaler:Series A,Physical Geography,1975,57(3-4),165-177.
- [3]NAG S,CHAKRABORTY S.Influence of rock types and structures in the development of drainage network in hard rock area[J].Journal of the Indian Society of Remote Sensing,2003,31(1):25-35.
- [4]PRAVEEN K R,VARUN N M,KSHITIJ M.A study of morphometric evaluation of the Son basin,India using geospatial approach[J].Remote Sensing Applications:Society and Environment,2017,7:9-20.
- [5]HORTON R E.Drainage-basin characteristics[J].Eos,Transactions American Geophysical Union,1932,13(1):350-

---

361.

[6]SCHUMM S A. Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey[J]. Geological Society of America bulletin, 1956, 67(5):597-646.

[7]STRAHLER A N. Dynamic basis of geomorphology[J]. Geological Society of America Bulletin, 1952, 63(9):923-938.

[8]VEN TE CHOW. Bibliography:1) Handbook of Applied Hydrology. International Association of Scientific Hydrology. Bulletin[J]. 1965, 10(1):82-83.

[9]EVANS I S. General geomorphometry, derivatives of altitude, and descriptive statistics[M].// RICHARD J. CHORLEY. Spatial analysis in geomorphology. London:Routledge, 1972.

[10]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):275-370.

[11]MERRITTS D, VINCENT K R. Geomorphic response of coastal streams to low, intermediate, and high rates of uplift, Medocino triple junction region, northern California[J]. Geological Society of America Bulletin, 1989, 101(11):1373-1388.

[12]MUELLER J E. An introduction to the hydraulic and topographic sinuosity indexes[J]. Annals of the Association of American Geographers, 1968, 58(2):371-385.

[13]SHREVE R L. Stream lengths and basin areas in topologically random channel networks[J]. The Journal of Geology, 1969, 77(4):397-414.

[14]DAR R A, CHANDRA R, ROMSHOO S A. Morphotectonic and lithostratigraphic analysis of intermontane Karewa basin of Kashmir Himalayas, India[J]. Journal of Mountain Science, 2013, 10(1):1-15.

[15]OZDEMIR H, BIRD D. Evaluation of morphometric parameters of drainage networks derived from topographic maps and DEM in point of floods[J]. Environmental Earth Sciences, 2009, 56(7):1405-1415.

[16]GAYEN S, BHUNIA G S, SHIT P K. Morphometric analysis of Kangshabati-Darakeswar Interfluvies area in West Bengal, India using ASTER DEM and GIS techniques[J]. Journal of Geology & Geophysics, 2013, 2(4):1-10.

[17]MAGESH N S, CHANDRASEKAR N, KALIRAJ S. A GIS based automated extraction tool for the analysis of basin morphometry[J]. Bonfring International Journal of Industrial Engineering & Management Science, 2012, 2(1):32-35.

[18]DOBOS E, DAROUSSIN J, MONTANARELLA L. An SRTM-based procedure to delineate SOTER Terrain Units on 1:1 and 1:5 million scales[M]. European Communities, 2005.

[19]MOGAJI K, LIM H, ABDULLAH K. Regional prediction of groundwater potential mapping in a multifaceted geology terrain using GIS-based Dempster-Shafer model[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2015, 8(5):3235-3258.

---

[20] SETHUPATHI, NARASIMHAN L, VASANTHAMOHAN, et al. Prioritization of miniwatersheds based on morphometric analysis using remote sensing and GIS techniques in a draught prone Bargur–Mathur subwatersheds, Ponnaiyar River basin, India[J]. International Journal of Geomatics & Geosciences, 2011, 2(2):403–414.

[21] SREEDEVI P D, OWAIS S, KHAN H H, et al. Morphometric analysis of a watershed of South India using SRTM data and GIS[J]. Journal of the Geological Society of India, 2009, 73(4):543–552.

[22] CHOPRA R, DHIMAN R D, SHARMA P K. Morphometric analysis of sub-watersheds in Gurdaspur district, Punjab using remote sensing and GIS techniques[J]. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 2005, 33(4):531–539.

[23] SMITH, K. G. Standards for grading texture of erosional topography[J]. American Journal of Science, 1950, 248(9):655–668.

[24] REDDY G, MAJI A K, GAJBHIYE K S. Drainage morphometry and its influence on landform characteristics in a basaltic terrain, Central India—a remote sensing and GIS approach[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2005, 6(1):1–16.

[25] GARDINER V, PARK C. Drainage basin morphometry: Review and assessment[J]. Progress in Physical Geography, 1978, 2(1):1–35.

[26] YADAV S K, DUBEY A, SZILARD S, et al. Prioritisation of sub-watersheds based on earth observation data of agricultural dominated northern river basin of India[J]. Geocarto International, 2018, 33(4):339–356.