

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.02.002

西南高山峡谷区金沙江流域河网结构特征

关昊哲, 冶运涛, 顾晶晶, 周政, 曹引, 蒋云钟

(中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室)

摘要: 为研究金沙江流域河网结构特征, 基于 ASTER GDEM V3 数据与河网密度法提取河网, 采用 Horton-Stahler 分级法结合盒维数、分支比、河长比、侧枝比等指标, 分析了金沙江流域的自相似性规律与结构特征及干流形态特征。结果表明: 金沙江流域 1~6 级河流在结构与拓扑上符合自相似性, 而 7~8 级河流自相似性不明显; 盒维数与河网密度在流域尺度上满足自相似性, 且上游地区盒维数较小、河网密度较大, 下游地区相反, 地形因素较气候因素在影响西南高山峡谷型流域(金沙江流域)盒维数与河网密度方面起着主要作用; 高山高原区流域河网整体表现出分支比、河长比较大而侧枝比较小的特性; 金沙江干流上游坡度缓、弯曲半径较大, 中游坡度陡、河道顺直, 下游坡度缓、弯曲半径较小, 且随着研究河段长度的增大, 平均弯曲度、弯曲度极差以及数据离散程度都相应增大, 河段弯曲度与河段比降整体上存在反比关系。

关键词: 西南高山峡谷区; 金沙江流域; 河网; 河流级别; 自相似性; 弯曲度

Characteristics of river network structure in the Jinsha River Basin of high-mountain canyon region in southwest China

Guan Haozhe, Ye Yuntao, Gu Jingjing, Zhou Zheng, Cao Yin, Jiang Yunzhong

(State Key Laboratory of Basin Water Cycle Simulation and Regulation, China Institute of Water Resources and Hydropower Research)

Abstract: To study the structural characteristics of the river network in the Jinsha River Basin, river networks were extracted based on ASTER GDEM V3 data and the river network density method. By using the Horton-Stahler hierarchical method combined with indicators such as box dimension, bifurcation ratio, length ratio, and side-branch ratio, the self-similarity patterns and structural features of the Jinsha River Basin were analyzed, as well as the morphological characteristics of the main stream. The results indicate that rivers of levels 1-6 in the Jinsha River Basin exhibit structural and topological self-similarity, whereas rivers of levels 7-8 show no significant self-similarity. At the basin scale, box dimension and river network density satisfy self-similarity, with upper reaches characterized by smaller box dimensions and higher river network density, while the opposite is observed in the lower reaches. Topographic factors play a more dominant role than climatic factors in influencing box dimension and river network density in high-mountain canyon-type basins in southwestern China, such as the Jinsha River Basin. The river networks in high-altitude plateau regions generally exhibit higher bifurcation and length ratios but lower side-branch ratios. The upper reaches of the main stream of the Jinsha River feature gentle slopes and larger meander radii; the middle reaches have steep slopes and relatively straight channels, and the lower reaches show gentle slopes and smaller meander radii. As the length of the studied river segments increases, the average sinuosity, the range of sinuosity, and data dispersion all increase accordingly. Overall, an inverse relationship exists between river segment sinuosity and channel gradient.

Key words: high-mountain canyon region in southwest China; the Jinsha River Basin; river network; river level; self-similarity; sinuosity

河流作为地球表面水循环的关键组成部分,形成了复杂的河网结构,流域河网结构直接影响径流形成、河道形态、边坡结构以及水沙运输^[1-2]。河网结构的几何特性与拓扑关系,不仅反映了自然界水文过程的内在规律,亦对流域内的生态功能与环境演变具有深远影响^[3-4]。

河网结构的几何特性与拓扑关系可以通过对河网分级、河网盒维数以及河网自相似性规律进行分析研

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFC3209302-03);国家自然科学基金项目(52279031);中国长江电力股份有限公司项目(Z432402001);北京市自然科学基金项目(JQ21029)

作者简介: 关昊哲(2001—),男,硕士研究生,主要从事水文遥感研究。E-mail:guanhaozhe@edu.iwhr.com

通信作者: 冶运涛(1982—),男,正高级工程师,博士,主要从事智慧水利与水文水资源研究。E-mail:yeyuntao@iwhr.com

究。河网分级是理解和分析河流系统结构特征的重要手段,当前分级方法多使用 Horton-Stahler 分级方法,它基于河流的源头和汇合模式分配级别,进而确定河流级别并突出与其他河流间的几何关系^[5-6]。霍顿定律表明,河流级别和顺序与河流数量、平均河流长度、平均集水区面积之间存在几何关系,构成河网的自相似性,揭示了河流系统在不同空间尺度上的重复模式,并为流域水文过程的尺度转换与多尺度模拟提供了可能^[7-8]。

当前已有一些针对河网结构与拓扑特性开展的研究,如黄子叶等^[9]在汉江流域基于 Horton-Stahler 分级法对整个河网分级,并从河宽、霍顿比多个角度验证流域河网自相似性;Shen 等^[10]以 30"的分辨率对河流系统的 30 个形态计量参数进行了全球尺度的统计,其中主要的形态计量参数包括河流数量、河流长度、流域面积、霍顿比、河网密度和河流曲率;张丽等^[11]对黄河中游不同子流域河网的宏观几何形态进行分析,结果表明在一定尺度范围内满足 Horton-Strahler 法则和 Tokunaga 法则,并验证流域河网呈现出结构自相似性;Chen 等^[12]在长江和黄河流域内选取了 60 个代表性子流域,基于 Horton-Strahler 分级法对河流网络进行了系统分级,综合多个指标评估了流域河网的自相似性,在 1~5 级河流中,黄河与长江的子流域河流网络均呈现出显著的自相似性,且流域坡度是影响河流网络结构的关键因素。

当前研究的区域多为落差小、气候单一的平原中小型流域,并无学者对金沙江流域开展河网结构特征研究,而金沙江流域地形复杂,为典型的高山峡谷型流域,流域面积约 47.3 万 km²,包含 4 种气候特征,拥有丰富的水能资源,因此研究金沙江流域河网结构与拓扑特征能对当地水资源调度、水能开发利用以及河道管理维护提供重要参考与借鉴意义。本文基于 ASTER GDEM V3 数据(30 m)提取金沙江流域河网,通过河网密度法确定最佳集水阈值并提取数字河网,选取分支比、河长比、面积比、侧枝比、盒维数^[13]、河网密度、干流沿程比降、干流沿程弯曲度 8 个指标,研究金沙江流域河网几何特征、拓扑结构的自相似性、干流形态特征,以为金沙江流域水资源管理、流域健康评估和水文模型构建提供参考,同时为河流生态系统以及河流沉积物的运移提供理论基础。

1 研究区概况

金沙江流域(24.54°N ~35.82°N,90.47°E ~104.89°E)位于我国西南部,发源于青海省唐古拉山脉中的各拉丹东雪山,流经青海、西藏、四川、云南四省,是长江重要的水源之一。金沙江流域地势复杂,呈现西北高东南低(图 1),干流全长约 3 364 km,流域面积约 47.3 万 km²,河谷深切,两岸多高山夹峙,河谷宽度一般在 100~200 m,狭窄处仅 50~100 m,流域平均宽度约 120 km,多年平均水资源总量为 1 565 亿 m³^[14-15]。研究金沙江流域的结构特征与拓扑关系,有助于深入理解这一关键水源地的水文动态,优化水资源管理和水电开发,保护生物多样性,应对气候变化,并促进区域经济的均衡发展,确保长江流域的生态安全和能源供应,对实现可持续发展具有重要的战略意义。

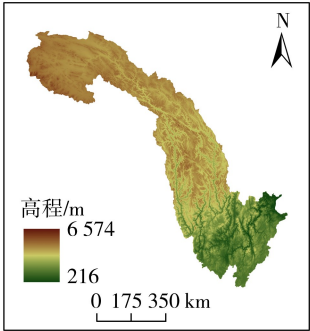


图 1 金沙江流域地形
Fig. 1 Topographic map of the Jinsha River Basin

2 研究方法

2.1 河网提取与分级

河网提取步骤:①对 DEM 数据进行修正,即填洼处理,并削减不合理的局部峰值^[16];②采用 D8 算法计算河流流向^[17]并进行汇流累积量计算^[18];③选取不同集水阈值进行河流链接、河网分级、栅格河网矢量化,完成金沙江流域河网提取。采用河网密度法^[19]确定河网最佳集水阈值,该方法通过计算不同阈值条件下的河网密度,建立河网密度与阈值之间的关系,求取函数拐点,拐点处所对应的阈值即为最佳阈值,能够较为准确地提取沟谷河网及主河道河网。

采用 Horton-Stahler 分级法^[20]进行河网分级,该方法将源头河流定义为 1 级,每两条相同级别的支流汇合,新形成的河流级别增加 1 级;不同级别的支流汇合时,新河流的级别则取原有支流中的最高级别。

2.2 河网分形维数计算

分形几何是一种研究粗糙或碎片化几何形状的数学理论,它允许非整数维度的复杂形状。分形维数是

表征几何形状复杂性的核心参数,其取值通常不是整数,而是介于整数之间的实数。河网的分形维数取值范围为 1~2,本文河网分形维数计算采用计盒法,是用大小不等的盒子覆盖分形对象,记录在每个尺度下所需盒子的数量。随着盒子尺寸的减小,所需盒子数通常会增加。盒维数就是描述这种增加趋势与盒子尺寸的关系,即盒子数与盒子尺寸的倒数之间的幂律指数,它反映了河网的复杂性、发育程度以及地貌的侵蚀发育阶段。计盒法适用于各种自然和人造的复杂形状,能够揭示其内在的分形特性。

2.3 河网结构参数计算

河网的几何特性基于 Horton 定律计算不同河流级别的分支数量、平均河长及流域盒维数的比值,探究河网在多尺度下的自相似性。几何特征参数统称为 Horton 比,包括分支比(取值范围为 3~5)、河长比(取值范围为 1.5~3)和面积比(取值范围为 3~6)^[21-22],通常均遵循 Horton 定律。

河网的拓扑特性基于 Tokunaga 法则进行研究,其核心原理是通过计算不同级别河流之间的汇入比例,即侧枝比(*T*),评估河流网络的自相似性。如果在整个河流网络中,各级别的侧枝比保持恒定,那么可以认为该河网在拓扑结构上具有自相似性。

弯曲度可以展现河段尺度的河流形态与结构,是表征天然河湾弯曲程度最直观的参数,一般将其定义为河道曲线长度与直线长度的比值。比降是指两个河段面间高差与距离的比值,会影响流速进而影响弯曲度。弯曲度和比降对于分析河流的侵蚀作用与结构形态至关重要。

3 结果与分析

3.1 河网提取

设置阈值范围为 0~100 km² 共 18 个阈值点提取流域河网,得到河网密度与阈值函数关系,拟合函数为幂函数形式,决定系数为 0.961 1,拟合程度较好(图 2),对函数求 2 阶导,得到最佳阈值为 2.7 km²。以 2.7 km² 为阈值提取河网,利用 Horton-Stahler 分级法对金沙江流域河网进行分级,分级结果为 1~8 级,8 级为级别最高的干流,结果如图 3 所示(2~8 级河流)。

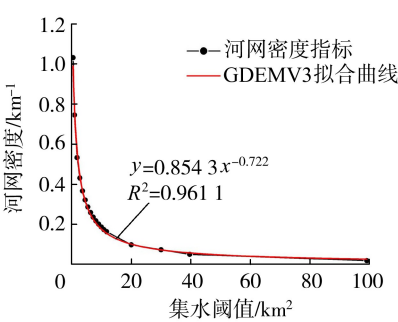


图 2 河网密度曲线

Fig. 2 River network density curve

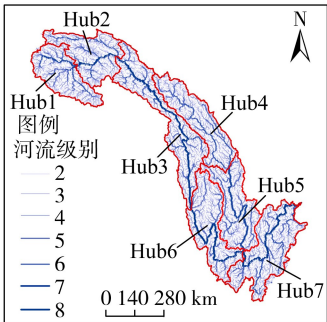


图 3 河网提取及子流域划分结果

Fig. 3 Results of river network extraction and sub-basin delineation

3.2 河网盒维数与河网密度

设置集水阈值为 100 000 (90 km²) 进行流量提取与子流域划分,在流域尺度上研究金沙江流域河网密度指标的自相似性。结合金沙江流域 DEM 数字高程与山脉地形,以自动和人工相结合的方法将金沙江流域划分为 7 个子流域(Hub1~7,图 3),河网密度计算结果见表 1,总流域河网密度为 0.433 3 km⁻¹,子流域河网密度范围为 0.409 7~0.492 9 km⁻¹,河网密度标准差为 0.029 km⁻¹,子流域与总流域之间河网密度相差小于 15%,金沙江流域河网密度在流域尺度上满足河流发展的自相似性。上游子流域河网密度较下游子流域河网密度普遍偏大,这与上游流域地形起伏较大,河流的侵蚀作用强烈有关,容易产生长又集中的河流,这些河流快速汇集,形成了较高的河网密度;下游地区的地形相对平坦,河流的流速较慢,侧蚀作用更为显著,导致河道较为宽阔和弯曲,河网密度相对较低。

基于子流域划分利用计盒法计算总流域与各子流域河网盒维数。分别设置盒子边长为 1 500、2 500、3 500、4 500、5 500、7 000、9 000、15 000 m 共 8 组数据,盒维数结果见表 1。

表 1 各流域盒维数与河网密度

Table 1 Box dimensions and river network density for each basin

流域	主要河流	lnr 与 lnN 拟合		盒维数	河网密度/km ⁻¹
		拟合关系式	R ²		
总流域	金沙江	$y = -1.7036x + 22.289$	0.9658	1.7036	0.4333
Hub1	沱沱河	$y = -1.6461x + 19.768$	0.9707	1.6461	0.4786
Hub2	通天河	$y = -1.6402x + 19.866$	0.9726	1.6402	0.4929
Hub3	金沙江上游	$y = -1.6551x + 20.273$	0.9670	1.6551	0.4179
Hub4	雅砻江上游	$y = -1.6455x + 19.898$	0.9676	1.6455	0.4184
Hub5	雅砻江下游	$y = -1.6562x + 19.952$	0.9658	1.6562	0.4154
Hub6	金沙江中游	$y = -1.6572x + 20.02$	0.9661	1.6572	0.4097
Hub7	金沙江下游	$y = -1.6673x + 20.345$	0.9685	1.6673	0.4251

注: r 为盒子长度, N 为盒子数量。

由表 1 可知,总流域盒维数为 1.7036,其余子流域盒维数范围为 1.6402~1.6673,盒维数均大于 1.6,表明该流域水系发育属于地貌发育壮年期,地势起伏减缓,侵蚀作用减弱^[11]。各子流域盒维数与总流域盒维数差距在 2.13%~3.72%之间,标准差为 0.0054,符合河流自相似性。且下游子流域盒维数值略高于上游,表明下游河流系统更加复杂,河流分支更多,河网的连通性更强,上游地区由于地势起伏较大,河流的分支和交汇受到限制,河网结构相对简单。

金沙江流域虽然受横断山脉影响,但河网形态仍可依据水系提取结果将 7 个子流域细分为梳状水系、羽状水系、树枝状水系 3 种水系。Hub1 与 Hub6 支流主要分布在河流的一侧,可归为梳状水系;Hub2、Hub5、Hub7 支流较多,干流和支流以及支流与支流间呈锐角相交,排列如树枝状,归为树枝状水系;Hub3 与 Hub4 支流在干流两侧近似对称分布,归为羽状水系。分别对每种水系计算盒维数与河网密度平均值,梳状水系、树枝状水系、羽状水系盒维数平均值分别为 1.6517、1.6546、1.6503,河网密度平均值分别为 0.4442、0.4445、0.4182,树枝状水系盒维数与河网密度平均值均为最大,发育最为完整,梳状水系与羽状水系盒维数值相差微小,但羽状水系河网密度远低于梳状水系与树枝状水系,与其地处横断山脉、地势起伏较大、高山峡谷较多有关。

综上,金沙江流域满足河网密度与盒维数在流域尺度上的自相似性规律,且上游地区河网密度较高,但盒维数较小,反映了上游地区因山脉阻隔河网分支结构较简单,但单位面积的河流长度较大;下游地区的河网密度较低,但盒维数较大,反映了下游地区地形更加平坦,河网拥有更为复杂的分支结构,但单位面积的河流长度较小。这两个指标从不同的角度描述了河网结构的特征,揭示了地形和地貌条件对河网发育的影响。

3.3 河网自相似性

3.3.1 河网结构自相似性

分别计算金沙江流域河网分支比、河长比与面积比,结果如图 4 所示(图中分级关系中 1-2 表示 1 级与 2 级的关系)。1~6 级河流的河长比和面积比较为稳定,其中河长比平均值为 2.226,面积比平均值为 4.765,符合自相似性规律,但 7-8 的河长比为 0.306 小于 1.5,面积比为 1.747 小于 3,不符合河流发育自相似性规律;1~5 级河流分支比较为稳定,其平均值为 4.572,符合自相似性规律,当河流级别关系为 6-7 与 7-8 时,分支比在自相似性规律上表现出不符合,6-7 的分支比为 7.667 大于 5,7-8 关系的分支比为 2.997 小于 3。较低级别的河流能很好满足 Horton-Strahler 法则,呈现出结构自相似性;较高级别河流则难以满足 Horton-Strahler 法则。由此亦可推断,河网的几何结构自相似性具有尺度性,结构自相似性仅在金沙江流域低级别河流中有所体现。

3.3.2 河网拓扑自相似性

计算各河流级别关系间的侧枝比,探究河网拓扑自相似性,结果如下 $T_{1,2} = 1.763, T_{2,3} = 1.854, T_{3,4} = 1.986, T_{4,5} = 2.04, T_{5,6} = 2.21, T_{6,7} = 2.67, T_{7,8} = 5.5$, ($T_{i,j}$ 为汇入 j 级支流的 i 级支流数目与 j 级支流总数的比值)。1~6 级河流侧枝比差距较小,稳定在一定范围内,其平均值 $T_1 = 1.971$,各侧枝比与平均值差值在

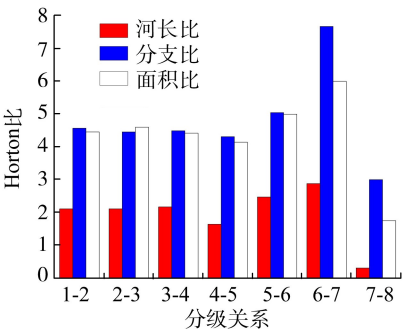


图 4 Horton 比计算结果

Fig. 4 Horton's ratio calculation

10%以内,满足 $T_{i,i+1} \approx T_1$,符合河网拓扑自相似性规律,7 级和 8 级河流侧枝比数值波动较大,不符合拓扑自相似性;将河流级别关系跨度由级别为 1 调整为 2 进行改变,得到结果 $T_{1,3} = 2.506, T_{2,4} = 2.56, T_{3,5} = 2.73, T_{4,6} = 3.04, T_{5,7} = 6.67, T_{6,8} = 10.1$,1~6 级河流侧枝比差距较小,其平均值 $T_2 = 2.71$,各侧枝比与平均值差值在 10%以内,满足 $T_{i,i+1} \approx T_2$,符合河网拓扑自相似性,7 级和 8 级河流侧枝比与其他侧枝比差异过大,不符合河网拓扑自相似性。因此金沙江拓扑特征与结构特征共同表现低级河流(1~6 级)符合自相似性规律,高级河流(7 级和 8 级)不符合自相似性规律。

3.4 参数适用性与影响因素

3.4.1 河网自相似性的地形因素分析

为探究 7 级和 8 级河流不满足自相似性的影响因素,引入汉江^[9]、尼洋河^[11]、年楚河^[11]、奥兰治河^[11]、清涧河^[11]的研究结果,对比分析自相似性与河网结构参数在不同地形条件下的表现。以平均高程 500、1 000、3 000 m 为临界值,辅以平均坡度将流域归类为高山高原区、中低山区、丘陵区和平原区等 4 类不同地形流域^[23]。金沙江流域、年楚河流域、尼洋河流域为高山高原区,奥兰治河流域为中低山区,清涧河流域为丘陵区,汉江流域为平原区。

由图 5 可知,除了汉江流域与奥兰治河流域,其他流域河网分支比在其高级别河流处均表现出不同程度的突变,河长比稳定的流域为尼洋河流域、奥兰治河流域与汉江流域,其他流域在其高级别河流处表现出不同程度的突变,金沙江变化大于清涧河大于年楚河。侧枝比表现为,所有流域在 4-5 河流之前均能表现出较好的相似性,但河流级别过大时,侧枝比变化幅度增大远脱离平均侧枝比 T_k 。综上,最能满足河网自相似规律的为平原区的汉江流域,最不满足河网自相似性的流域为高山高原区的金沙江流域与年楚河流域。高级别河流不满足河网自相似性这一规律普遍存在不同地形条件下的流域河网中,但每个流域河网不满足自相似性的河流级别不同,且高山高原区流域更有可能表现且表现程度更强,平原区流域更不易表现出此特性。

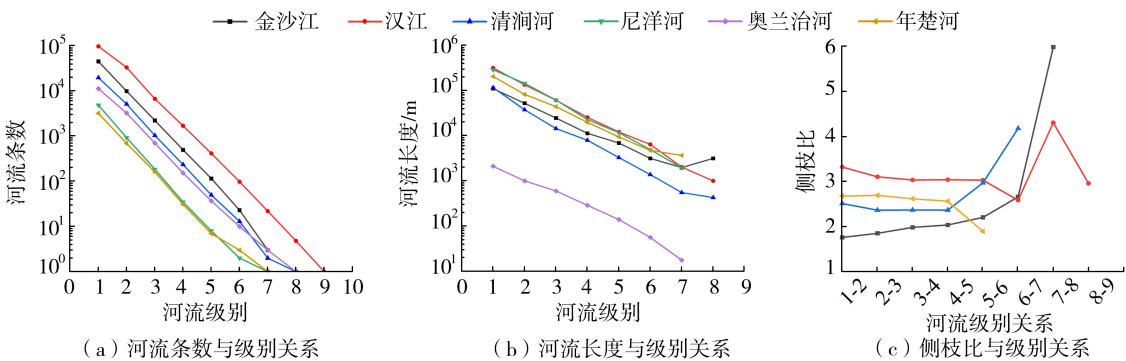


图 5 不同流域自相似性结果

Fig. 5 Self-similarity results for different basins

3.4.2 分支比、河长比、侧枝比适用性分析

除去各个流域不满足河网自相似性的河流级别,对满足河网自相似性的河流计算分支比、河长比、侧枝比平均值,结果见表 2。不同区域在分支比和河长比等参数上存在显著差异,高山高原区的分支比和河长比普遍高于中低山区、丘陵区及平原区,而后三者差异并不显著。平原区侧枝比最大,丘陵区次之,高山高原区最小,且平原区的侧枝比远高于其他区域。

表 2 不同地形特征流域的参数平均值

Table 2 Mean values of parameters for basins with different topographic features				
流域名称	地形特征	分支比	河长比	侧枝比
金沙江流域	高山高原区	4.57	2.20	1.97
年楚河流域	高山高原区	4.64	2.25	2.26
尼洋河流域	高山高原区	5.19	2.22	
奥兰治河流域	中低山区	4.31	2.07	
清涧河流域	丘陵区	4.36	2.14	2.41
汉江流域	平原区	4.35	2.07	3.11

高山高原区分支比与河长比大说明低级别河流比高级别河流的条数与长度占比大,这与高山高原区容

易形成雪山融水有关,同时受到山脉地形影响,不同山脉的雪山融水从不同峡谷流出,增加了低级别河流的数量与长度。侧枝比较小说明低级别河流没有补给到相邻的高级别河流中,往往是跨级别河流的补给,因为山脉阻挡,低级别河流只能临近汇流补给,逐级汇流的概率降低,导致很多低级别河流跨级别汇流,进而导致侧枝比低于平原区。

3.4.3 盒维数、河网密度适用性分析

获取每个金沙江子流域平均降水数据、平均气温与平均高程、平均坡度数据,分析盒维数与河网密度两个参数的影响因素以及在不同地理与气候因素条件下的适用性。

由表3可知,平均气温、平均高程、年平均降水和平均坡度4个因素对盒维数影响程度各异,平均气温与平均高程对盒维数影响最为显著,相关系数分别为0.814和0.812;年平均降水影响次之,相关系数为0.721;平均坡度相关性最小,相关系数为0.474。4个因素中,仅平均高程与盒维数成反比关系,其余因素均与盒维数成正比关系。河网密度结果与盒维数情况相反,平均坡度对河网密度的影响最为显著,相关系数为0.914;年平均降水次之,相关系数为0.531;平均气温和平均高程最小,相关系数分别为0.444和0.347。在这些因素中,仅平均高程与河网密度成正比关系,其余因素均与河网密度成反比关系。综上,地形因素较气候因素在影响西南高山峡谷型流域盒维数与河网密度方面起着主要作用。

表3 盒维数、河网密度影响因素拟合结果

Table 3 Fitting results for factors affecting box dimension and river network density

影响因素	与盒维数拟合		与河网密度拟合	
	拟合关系式	R^2	拟合关系式	R^2
平均高程	$y = -0.000008x + 1.68$	0.812	$y = 0.000019x + 0.36$	0.347
平均坡度	$y = 0.001x + 1.63$	0.474	$y = -0.00515x + 0.529$	0.914
年平均降水	$y = 0.000035x + 1.63$	0.721	$y = -0.00011x + 0.511$	0.531
平均气温	$y = 0.00009x + 1.61$	0.814	$y = -0.0078x + 0.562$	0.444

3.5 沿程比降与弯曲度

选取数字河网中5~8级的河网进行河段弯曲度分析,一般而言,弯曲度节点设定为1.05与1.30,将河道分为顺直河道、弯曲河道与蜿蜒河道3种^[24]。选取河网干流结合DEM数据计算沿程比降,依据金沙江干流高差与地形特点,比降节点设定为0.8‰,将河道分为平缓河道与湍急河道^[25]。在河道平面结构与纵向高程上分析形态特征,结果如图6所示。

由DEM提取金沙江干流全长3237 km,与中国长江三峡集团公布的3364 km河长仅差3.8%,提取结果精度较高。整体落差4391 m,直接计算比降为0.14%,以5 km为间隔段计算平均比降为0.13%,总体表现为上下游坡度较缓,中游坡度较陡,整体比降变化趋势为先上升后下降,中游最高区间比降为0.22%,上下游最低区间比降为0.05%,落差差距明显,且由于人工干预,中下游水电站、水库对沿程比降变化影响明显。经过验证,中下游湍急河道比降骤变的河段均为建设完成的水电站,通过对水面比降的研究,可以了解河流沿程高程变化,依据比降变化的异常点可以识别水电站的分布特征,甚至滑坡、堰塞湖等地理特征。

由图6可知,随着河段长度的增加,弯曲度的平均值和离散程度随之增加。在10、5 km河段,上游地区的河流弯曲度最高,其次是下游,而中游地区的弯曲度最低,且上下游的河流多呈现蜿蜒河段,中游则以弯曲河段为主。然而,1 km河段,下游的弯曲度最高,上游次之,中游最低,这与10、5 km的结果不一致。表明下游和上游的河流弯曲河段较多,而中游则以顺直河段为主,且下游的河流多以小弯道为主,上游则以大弯道为主。由表4可知,1 km河段弯曲度数据较为集中,波动较小,均值和中位数接近,5 km河段弯曲度数据分布适中,有一定波动,整体较为均衡,10 km河段弯曲度数据分布较离散,存在较高值,均值和中位数均大于其余两组。这些数据表明,河段长度的选择对弯曲度结果有显著影响,随着选取河段长度的增加,弯曲度平均值、中位数、最大值、最小值、标准差都有所增大。河段长度越长,所得河段弯曲度越大,数据离散程度越高,但不排除河段足够大时,结果呈相反态势。

由图7可知,当河道分别为顺直河道($K < 1.05$, K 为弯曲度)、弯曲河道($1.05 \leq K \leq 1.30$)、蜿蜒河道($K > 1.30$)时,比降数据集特点不同,弯曲河道对应比降数据集离散程度最大,顺直河道离散程度最小。顺直河道、弯曲河道、蜿蜒河道比降(J)平均值分别为0.152%、0.153%、0.081%,中位数分别为0.141%、0.116%、0.080%,箱体有下降趋势,说明河段弯曲度与比降整体存在反比关系,河段弯曲度越大比降越小。在弯曲度

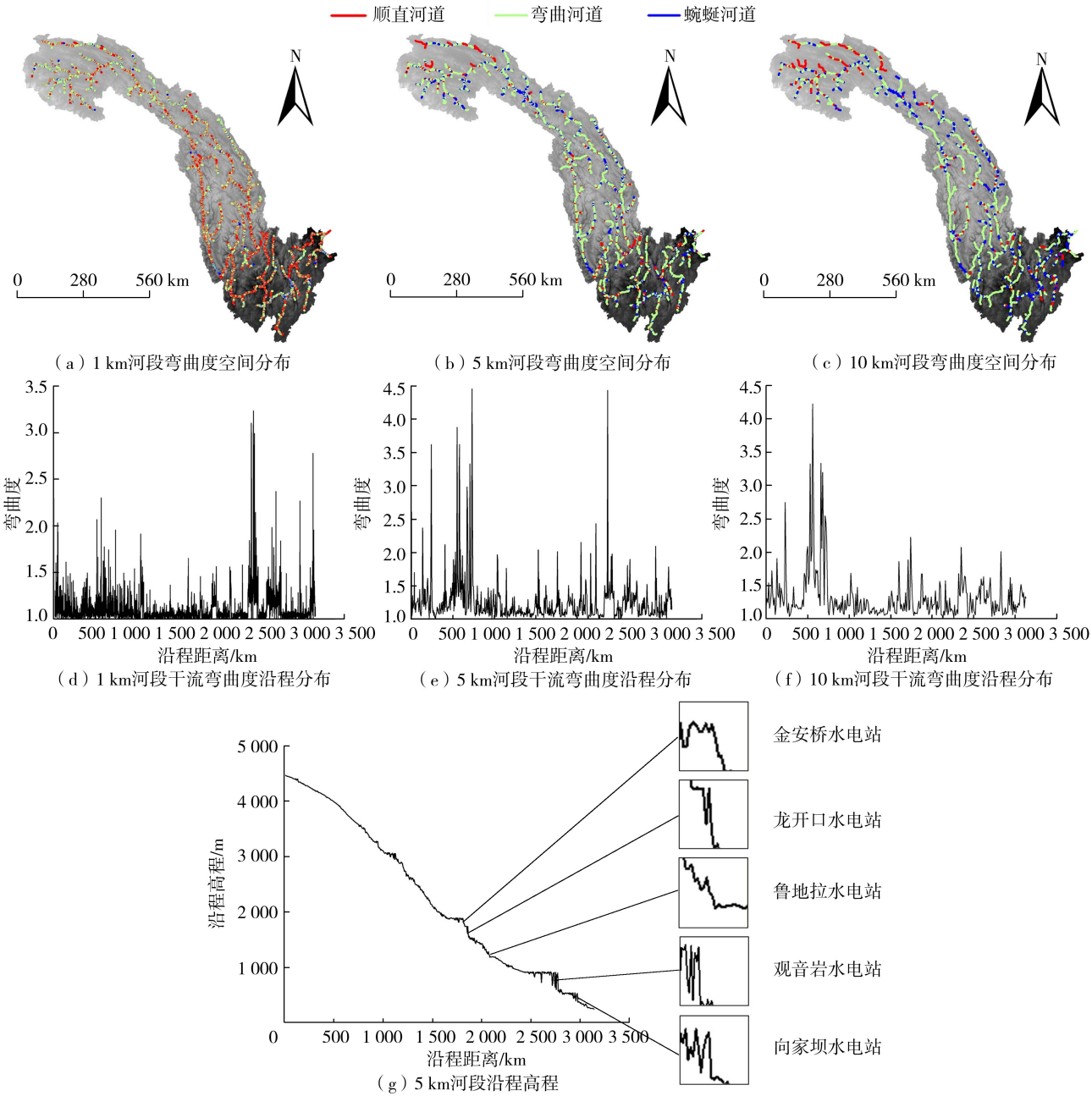


图 6 干流沿程比降与弯曲度

Fig. 6 Gradient and sinuosity along main stream

表 4 弯曲度计算结果

Table 4 Sinuosity calculation results

河段长度/km	弯曲度				
	平均值	中位数	最大值	最小值	标准差
1	1.10	1.05	4.39	1.01	0.16
5	1.26	1.15	4.45	1.02	0.36
10	1.34	1.21	5.33	1.04	0.45

较大的河段,水流在弯曲处受到离心力作用,摩擦力增大并容易导致水流速度在凹岸加快、凸岸减慢,形成螺旋减缓流速,促进泥沙沉积,减少河道纵向侵蚀;同样在比降较缓的河段水流速度较小,下蚀能力减弱而侧蚀能力增强,河道更容易形成弯曲河道。

综上,金沙江干流下游坡度较缓、弯曲度大于中游但弯曲半径整体小于上游,多为半径较小的弯道;中游坡度较陡且河道较上下游整体顺直;上游坡度较缓、弯曲度大于中游且弯曲半径整体大于下游,多为半径较

大的弯道。

4 结 论

a. 以金沙江流域为代表的高山峡谷型河网的 1~6 级河流在结构与拓扑关系上可以很好满足河网自相似性,但 7~8 级河流不能满足河网自相似性。高级别河流不满足河网自相似性的现象普遍存在不同地形条件下的流域河网中,但每个流域河网对应的河流级别不同,且在高山高原区流域中更为常见且表现更为明显。此外,高山高原区较中低山区、丘陵区、平原区表现出分支比、河长比高而侧枝比低的特性。

b. 金沙江流域上游地区河网密度较高但盒维数较低,下游地区河网密度较低但盒维数较高,表明上游地区分支结构较简单多为较长的河流,下游地区分支结构较复杂多为较短的河流。地形因素较气候因素在影响西南高山峡谷型流域盒维数与河网密度方面起着主要作用。

c. 不同长度河段的弯曲度表现结果不同,随着河段长度的增大,弯曲度数据整体增大,数据离散程度增大。金沙江干流整体表现为上下游较缓、中游较陡,上下游整体弯曲程度较高且上游多为半径较大的弯道,下游多为半径较小的弯道,中游弯曲程度较低整体顺直。金沙江河段弯曲度与比降整体上存在反比关系。

参考文献:

[1] Ranjbar S,Hooshyar M,Singh A,et al. Quantifying climatic controls on river network branching structure across scales[J]. Water Resources Research,2018,54(10):7347-7360.

[2] 付晓花,董增川,韩锐,等. 复杂河网地区气候-水文-水动力耦合模型模拟[J]. 水资源保护,2023,39(3):162-169. (Fu Xiaohua,Dong Zengchuan,Han Rui,et al. Simulation of climate-hydrologic-hydrodynamic coupling model in complex river network area[J]. Water Resources Protection,2023,39(3):162-169. (in Chinese))

[3] 许伟,刘培,黄鹏飞,等. 珠江河口复杂河网的水资源调度方案评价[J]. 水资源保护,2022,38(4):75-79. (Xu Wei,Liu Pei,Huang Pengfei,et al. Evaluation of water resources regulation scheme for complex river network in the Pearl River Estuary [J]. Water Resources Protection,2022,38(4):75-79. (in Chinese))

[4] Kovchegov Y,Zaliapin I,Foufoula-Georgiou E. Critical Tokunaga model for river networks[J]. Physical Review E,2022,105(1): 014301.

[5] Strahler A N. Quantitative analysis of watershed geomorphology[J]. Eos,Transactions American Geophysical Union,1957,38 (6):913-920.

[6] 刘佳嘉,周祖昊,贾仰文,等. 基于 DEM 河网干支拓扑关系的子流域编码规则[J]. 河海大学学报(自然科学版),2013,41 (4):288-293. (Liu Jiajia,Zhou Zuhao,Jia Yangwen,et al. A rule for delineation and codification of sub-watersheds based on stem-branch topological relationship of DEM digital river network[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2013,41 (4):288-293. (in Chinese))

[7] Horton R E. Erosional development of streams and their drainage basins;Hydrophysical approach to quantitative morphology[J]. GSA Bulletin,1945,56(3):275-370.

[8] 童睿轩,吴勇拓,王春阳,等. 基于自相似河网结构的中小流域蓄量消退系数计算方法[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023,51(2):17-25. (Tong Ruixuan,Wu Yongtuo,Wang Chunyang,et al. Study on estimating method of confluence parameter for small and medium-sized watershed based on self-similar river networks[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023,51(2):17-25. (in Chinese))

[9] 黄子叶,王易初,倪晋仁. 汉江流域河网分级特征研究[J]. 北京大学学报(自然科学版),2021,57(2):351-360. (Huang Ziye,Wang Yichu,Ni Jinren. Hierarchical characteristics of river network in Hanjiang Basin[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis,2021,57(2):351-360. (in Chinese))

[10] Shen Xinyi,Anagnostou E N,Mei Yiwen,et al. A global distributed basin morphometric dataset[J]. Scientific Data,2017,4(1): 160124.

[11] 张丽,傅旭东,王光谦,等. 黄河中游典型河网的结构自相似性[J]. 清华大学学报(自然科学版),2013,53(1):24-28. (Zhang Li,Fu Xudong,Wang Guangqian,et al. Structural self-similarity of river networks in the Middle Yellow River basin[J]. Journal of Tsinghua University (Science & Technology),2013,53(1):24-28. (in Chinese))

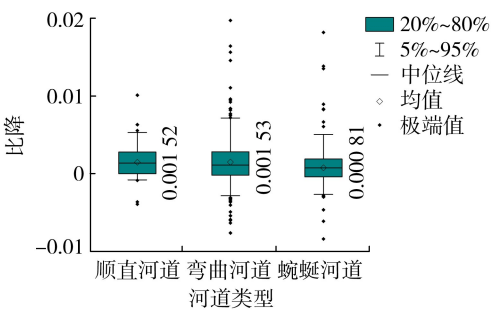


图 7 5 km 河段弯曲度与比降关系
Fig. 7 Relationship between sinuosity and gradient along 5 km river segment

[12] Chen Xiabin, Wang Yichu, Ni Jinren. Structural characteristics of river networks and their relations to basin factors in the Yangtze and Yellow River basins[J]. Science China Technological Sciences, 2019, 62(11): 1885-1895.

[13] 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 Ming, Yu Jiaqi, Guan Jian, 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. (in Chinese))

[14] 程清平, 任钊潼, 金韩宇. 金沙江流域 1961—2020 年干湿日时空演变特征分析[J]. 中国水土保持科学, 2024, 22(1): 42-51. (Cheng Qingping, Ren Yitong, Jin Hanyu. Analysis of the spatio-temporal evolution characteristics of dry and wet days in the Jinsha River Watershed from 1961 to 2020[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2024, 22(1): 42-51. (in Chinese))

[15] Chen Qihui, Chen Hua, Zhang Jun, et al. Impacts of climate change and LULC change on runoff in the Jinsha River Basin[J]. Journal of Geographical Sciences, 2020, 30(1): 85-102.

[16] 宁忠瑞, 李虹彬, 刘亚婷, 等. 基于 DEM 的塔里木河流域数字河网提取与分析[J]. 水利水电技术, 2020, 51(8): 54-61. (Ning Zhongrui, Li Hongbin, Liu Yating, et al. DEM-based extraction and analysis of digital river network of Tarim River Basin [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020, 51(8): 54-61. (in Chinese))

[17] 王莹, 杨玫, 庞海熔, 等. 不同 DEM 分辨率下山西省数字河网阈值分析[J]. 水利水电技术(中英文), 2024, 55(9): 71-84. (Wang Ying, Yang Mei, Pang Hairong, et al. Threshold analysis of digital river network in Shanxi Province under different DEM resolutions[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2024, 55(9): 71-84. (in Chinese))

[18] 董吴欣, 施召云, 李铭, 等. 多源 DEM 数据在山区流域河网提取中的对比[J]. 中国农村水利水电, 2023(8): 149-156. (Dong Wuxin, Shi Zhaoyun, Li Ming, et al. Comparison of multi-source DEM data in river network extraction in mountain watershed[J]. China Rural Water and Hydropower, 2023(8): 149-156. (in Chinese))

[19] 李照会, 郭良, 刘荣华, 等. 基于 DEM 数字河网提取时集水面积阈值与河源密度关系的研究[J]. 地球信息科学学报, 2018, 20(9): 1244-1251. (Li Zhaohui, Guo Liang, Liu Ronghua, et al. The relationship between the threshold of catchment area for extraction of digital river network from DEM and the river source density[J]. Journal of Geo-information Science, 2018, 20(9): 1244-1251. (in Chinese))

[20] Touya G. River network selection based on structure and pattern recognition[C]//23rd International Cartographic Conference. Moscou: HAL, 2007.

[21] Gupta V K, Ayalew T B, Mantilla R, et al. Classical and generalized Horton laws for peak flows in rainfall-runoff events[J]. Chaos, 2015, 25(7): 075408.

[22] Samal D R, Gedam S S, Nagarajan R. GIS based drainage morphometry and its influence on hydrology in parts of western Ghats region, Maharashtra, India[J]. Geocarto International, 2015, 30(7): 755-778.

[23] 李发文, 刘慧婉, 仇昊雨, 等. 流域水系地貌定律的适应性与异质性研究[J]. 水资源保护, 2025, 41(2): 19-29. (Li Fawen, Liu Huiwan, Qiu Haoyu, et al. Study on adaptability and heterogeneity of water system geomorphic laws in watersheds[J]. Water Resources Protection, 2025, 41(2): 19-29. (in Chinese))

[24] 何萍, 史培军, 刘树坤, 等. 河流分类体系研究综述[J]. 水科学进展, 2008, 19(3): 434-442. (He Ping, Shi Peijun, Liu Shukun, et al. Classification of rivers systems[J]. Advances in Water Science, 2008, 19(3): 434-442. (in Chinese))

[25] 王汝兰, 罗明良, 蒲阳, 等. 多尺度 DEM 提取河流比降的对比分析[J]. 中国农学通报, 2017, 33(24): 74-79. (Wang Rulan, Luo Mingliang, Pu Yang, et al. Contrastive analysis of stream gradient based on multiscale DEM[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2017, 33(24): 74-79. (in Chinese))

(收稿日期: 2024 - 10 - 30 编辑: 刘晓艳)