

昆明盘龙江流域数字水系提取及水文特征分析

蔡莹颖, 高震恒

云南师范大学地理学部, 云南 昆明

收稿日期: 2026年1月26日; 录用日期: 2026年2月24日; 发布日期: 2026年3月4日

摘要

本研究以昆明市盘龙江流域为对象, 基于30米分辨率的ASTGTM DEM数据, 运用ArcGIS水文分析模块, 构建了该流域的数字水文网络。研究重点探讨了集水面积阈值对河网提取精度的影响, 通过基于流域面积与像元分辨率的比值关系确定了合理阈值。在此基础上, 系统完成了流域边界提取、河网生成、水系分级及子流域划分, 并利用河流链接与分级方法实现了水系拓扑结构的完整表达, 同时计算了地形湿度指数, 定量刻画了流域内径流汇集区与水分富集潜力的空间分异格局。结果表明, 所提取的盘龙江流域结构与实际水系分布具有较高吻合度, 主干河道形态呈“S”型特征, 支流网络符合地形驱动规律, TWI高值区主要分布于主干河道两侧、河谷平原及子流域出水口, 低值区集中于流域边界附近的山脊、陡坡地带, 其空间分布与双支交流汇格局、主干河道形态形成良好耦合, 验证了地形对径流汇集的显著驱动作用。本研究形成了一套适用于高原城市小流域的数字水文分析方法体系, 成果可为盘龙江流域的水资源管理、洪水模拟及生态保护提供可靠的空间数据基础与决策支持。

关键词

数字高程模型, ArcGIS, 流域特征提取, 水文分析

Digital Drainage Network Extraction and Hydrological Characterization in the Panlong River Basin, Kunming

Yingying Cai, Zhenheng Gao

Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming Yunnan

Received: January 26, 2026; accepted: February 24, 2026; published: March 4, 2026

Abstract

This study focuses on the Panlong River Basin in Kunming. Using 30 m resolution ASTGTM DEM data

and the ArcGIS hydrology analysis module, a digital hydrological network of the basin was constructed. The research specifically investigates the influence of the catchment area threshold on the accuracy of river network extraction, determining an appropriate threshold based on the ratio between the actual basin area and pixel resolution. On this basis, a systematic process was undertaken to extract the watershed boundary, generate the river network, classify the stream order, and delineate sub-basins. The topological structure of the drainage system was fully represented through stream link and ordering methods. In addition, the Topographic Wetness Index (TWI) was calculated to quantitatively characterize the spatial heterogeneity of runoff convergence areas and soil moisture potential within the basin. The results indicate that the extracted basin structure of the Panlong River aligns well with the actual hydrographic distribution. The main channel exhibits an "S"-shaped morphology, and the tributary network conforms to topographically driven patterns. TWI high-value zones are mainly distributed along the main channel, valley plains, and sub-basin outlets, while low-value zones are concentrated along watershed ridges and steep slopes. This spatial distribution shows strong coupling with the dual-tributary confluence pattern and main channel morphology, validating the significant role of topography in driving runoff convergence. This study establishes a methodological framework for digital hydrological analysis applicable to small plateau urban basins. The outcomes provide a reliable spatial data foundation and decision support for water resource management, flood simulation, and ecological conservation in the Panlong River Basin.

Keywords

Digital Elevation Model (DEM), ArcGIS, Watershed Characterization, Hydrological Analysis

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着全球气候变化与人类活动影响加剧,流域水文过程的模拟与水资源管理面临日益复杂的系统性挑战。传统水文研究方法在空间数据获取的广度、物理机制的集成度以及决策支持的动态性方面存在显著局限。在这一背景下,地理信息系统(GIS)、遥感(RS)与“数字地球”(Digital Earth)理念的深度融合,正推动水文科学研究发生深刻的范式革新[1] [2]。自分布式水文模型[3]与基于地形的水文模型[4]提出以来,水文研究已逐步走向空间离散化与物理机制化。而现代 GIS 技术的成熟与高分辨率对地观测体系的发展,进一步推动了水文建模从局部、静态向全球、动态、高分辨率的“数字流域”集成模拟转变[5],为理解与调控流域水循环提供了前所未有的技术路径。

数字流域,作为“数字地球”在水文领域的具体体现应运而生。它通过集成高精度数字高程模型(DEM)、多源遥感影像及地面监测数据,构建流域的虚拟数字化映射,为核心水文要素的自动提取与过程模拟提供了全新平台。基于 DEM 的水文分析能够客观、高效地识别流域边界、提取河网水系并构建水文响应单元,精准描述地表汇流关系,奠定了数字流域的物理基础[6] [7]。进一步地通过构建多尺度空间地理信息模型,数字流域实现了从宏观流域到局部工程的水文地理多维度表达,为系统研究提供了统一框架[8]。当前,数字流域已从静态描述迈向动态模拟与智能决策的新阶段。先进的流域模拟器整合了水文机理模型与 GIS 空间分析,实现了降水和径流全过程的动态模拟与预报,极大提升了水文模拟的精度与效率[9]。在实践层面,数字流域与实时监控技术结合,构建了“监测-预报-调度-评估”的闭环管理系统,显著增强了水资源实时监控、优化调度与应急响应能力,例如在永定河等流域的成功应用已展现出其巨大

的管理价值[10]。因此,深入研究和构建数字流域,不仅是水文科学发展的前沿方向,更是实现流域智慧管理、保障水安全的重要技术途径。本文以昆明市盘龙区和官渡区的数字高程数据为基础,通过分析地形高程差来推演区域内河流的汇流过程,自动提取流域特征并建立数字化的盘龙江水系水文网络,旨在系统描述该研究区域水系的分布格局与其水文演变过程之间的内在规律,以期在城市流域的精细化管理与水文研究提供具体案例与方法参考。

2. 研究区概况与研究方法

本文以滇池重要入湖河流——昆明盘龙江流域为研究区,采用空间分辨率为30米的ASTGTM DEM数字高程数据,系统提取该流域的水文地形特征参数并重点探讨集水面积阈值对流域结构刻画的影响机制,最终构建盘龙江高精度数字水文网络,为高原城市流域水文模拟与管理提供数据基础。

2.1. 研究区概况

盘龙江是云南省昆明市境内的主要河流,属金沙江水系。其发源于嵩明县西北部的梁王山西麓白沙坡,上游称为牧羊河,整体呈西南流向。河流流经嵩明县及昆明市松华坝水库后,进入昆明主城区,穿越官渡区、五华区 and 盘龙区,最终在官渡区附近注入滇池。盘龙江流域总面积为8.47平方公里,作为滇池的重要入湖河流之一,其水文过程与土地利用变化对昆明城市水环境与生态系统具有重要影响[11]。近年来,在昆明持续推进“城市双修”(生态修复、城市修补)与城市更新背景下,盘龙江沿线空间也逐步从单一排洪通道向复合型生态景观廊道转型[12],其水文特征与空间结构的互动关系日益受到关注。

2.2. 基于 DEM 的数字流域特征提取

2.2.1. 分析工具介绍

在GIS分析中,ArcGIS提供了成熟的水文工具,包括其内置的Hydrology工具集以及Arc Hydro等专业扩展。本研究主要采用ArcGIS原生的水文分析工具,通过模拟地表径流过程提取河流网络、出水口及流域边界。相关工具的工作流程如图1所示。该方法基于DEM数据,通过计算流向与汇流累积量等步骤实现水文特征的自动化提取,在流域分析中被广泛应用,其中确定汇流累积量阈值是提取河网的关键,在GIS分析中,ArcGIS提供了成熟的水文工具,包括其内置的Hydrology工具集以及Arc Hydro等专业扩展,以提高提取结果的准确性[13]。

2.2.2. 数据来源

使用GIS水文分析工具对地表形成径流的模拟,需要借助DEM为计算参数。盘龙江流域的数字高程数据为中科院计算机网络信息中心的地理空间数据云网站下载,可以根据实际需求选择数据类型。本次研究所选择影像由ASTGTM传感器获取,其中GDEM是30米精度,该数据集是利用NASA和METI在基于早期版本基础上联合优化生成。使用GIS水文分析工具模拟地表径流过程需以数字高程模型(DEM)为基础数据。遥感数据具有易获取、可重复观测的特点,为流域地表过程的精细分析与动态监测提供了重要支持。

2.2.3. 数据预处理

本次研究所需数据按经纬度范围下载。为完整覆盖盘龙江流域,在对照盘龙区行政边界后,确定需获取中心坐标约为25°N、102°E的影像数据,其坐标系为WGS_1984。本研究中图片为基于公开DEM数据生成的流域地形分析图,仅包含由水文分析提取的自然水文特征(流域边界、河网),未对任何基础地理要素(包括国界、行政界线等)进行修改或添加。借助ArcGIS平台的Extract by Mask的掩膜提取工具,依据流域范围对原始DEM进行了初步裁剪,并核查了范围内高程值的合理性,确认无误值或异常数据。精

确可靠的 DEM 是后续水文分析的重要基础, 具体数据范围及质量情况见图 2 所示。

工具	描述
流域分析	创建描绘所有流域盆地的栅格。
填洼	通过填充表面栅格中的汇来移除数据中的小缺陷。
流量	创建每个像元累积流量的栅格。可选择性应用权重系数。
流向	创建从每个像元到其最陡下坡相邻点的流向的栅格。
水流长度	计算沿每个像元的流路径的上游(或下游)距离或加权距离。
汇	创建识别所有汇或内流水系区域的栅格。
捕捉倾泻点	将倾泻点捕捉到指定范围内累积流量最大的像元。
河流连接	向各交汇点之间的栅格线状网络的各部分分配唯一值。
河网分级	为表示线状网络分支的栅格线段指定数值顺序。
栅格河网矢量化	将表示线状网络的栅格转换为表示线状网络的要素。
分水岭	确定栅格中一组像元之上的汇流区域。

水文分析工具集中的工具

Figure 1. Hydrological analysis toolset

图 1. 水文分析工具集

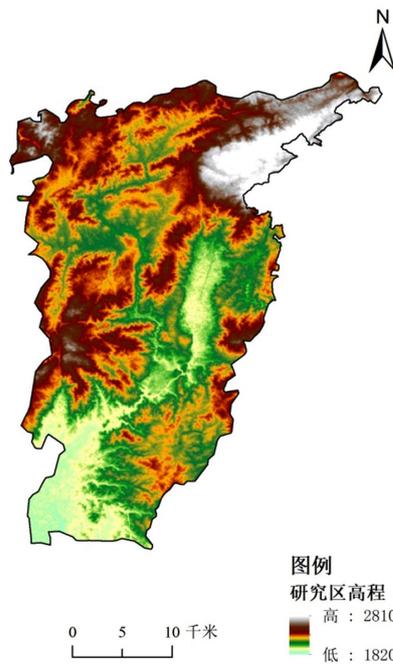


Figure 2. DEM data of the Panlongjiang River Basin in the study area

图 2. 研究区盘龙江流域的 DEM 数据

(1) 伪洼地填充

Arc GIS 中的洼地【Fill】工具就采用了这种方法, 通过选择目标流域的 DEM 作为输入数据, 系统进行垫高处理。在基于 DEM 的水文分析中, 模拟过程主要依据地形因子驱动, 并不涉及具体流量的精确计算。为确保径流模拟能够正确、连续地进行, 分析的先决条件是使用无异常凹陷的 DEM 数据。此类凹陷在 GIS 中常被称为“伪洼地”, 即栅格单元的高程值低于其相邻单元, 导致水流在此中断。伪洼地的形成主要源于 DEM 数据生产过程中的采样误差、高程取整化处理, 也与影像空间分辨率有关——通常像元尺寸越大, 伪洼地数量越多。因此, 在进行小流域水文分析时, 若数据精度不足、伪洼地过多, 将严重影响径流路径的连续性, 导致模拟失真。

目前广泛采用的洼地处理方法是 Jenson 与 Domingue 提出的填平算法。该方法的基本原理是识别洼地区域, 并将其高程逐步抬升至至少一个相邻栅格的高程值, 从而消除水流障碍。在 ArcGIS 中【填洼】工具即基于此算法实现。操作时以研究区 DEM 作为输入数据, 系统将自动执行填平处理, 生成水文分析可用的无洼地 DEM。

(2) 流向分析

水流方向指水流离开每个栅格单元的指向, 反映了流域内地表径流的运动路径与流量分配规律。其判断基于 DEM 数据, 通过在 3×3 的局部窗口中分析栅格单元之间的高程关系来实现。根据水流分配方式, 可分为单流向法与多流向法两类。通过逐栅格追踪水流方向, 可串联形成流域整体的河网流向。

本文采用的 GIS 流向分析工具基于 D8 (八方向) 单流向算法。该方法假设每个栅格单元的水流只能流向周围八个相邻单元中坡度最陡的一个, 是目前应用最广泛、认可度最高的流向判定方法之一。D8 算法的核心步骤是: 计算中心栅格与各邻域栅格的高程差与距离之比(即距离权落差), 选择具有最大距离权落差值的相邻栅格作为该中心栅格的流出方向。具体实现流程如图 3 所示。在实际操作中, 流向分析须基于经过填洼处理的 DEM 数据, 以确保地形表面无闭合洼地, 保障水流路径连续。在 ArcGIS 中, 可直接调用水文分析工具箱的【流向】工具完成该分析过程。

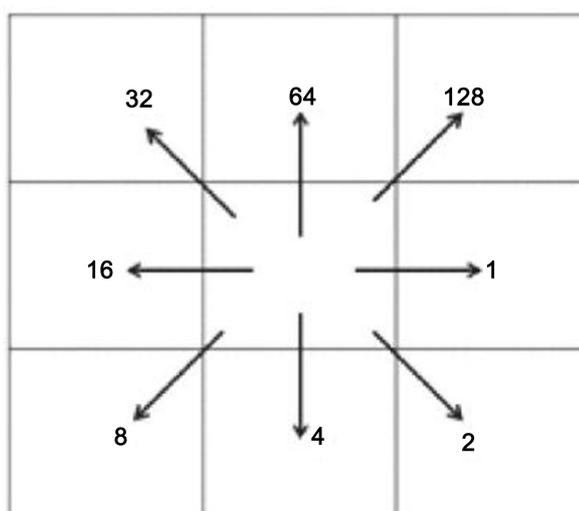


Figure 3. Flow representation of the D8 algorithm
图 3. D8 算法的流向表示

(3) 流量统计

在 ArcGIS 水文分析中, “流量栅格”(Flow Accumulation)并非水文学中实测的河流流量, 两者概

念截然不同。此处的“流量”是一个空间累积概念，代表汇流至某一栅格单元的汇水单元总数，反映的是上游贡献面积的空间分布。若将其与水文学术语对应，可类比为水文站点所对应的上游集水区面积。

该流量栅格的生成需以流向栅格为基础，其计算原理是对每个栅格的上游汇流区域进行累加统计。通过运行【流量】工具，系统可自动计算出盘龙江流域内各栅格单元的累计汇流量，从而识别河网结构：上游河段汇流栅格数较少，数值较小；随着水流向下游汇集，累计数值逐步增大，对应河道等级也随之提高，清晰呈现出水系自上游至下游的空间汇流路径。

2.3. 径流阈值的确定

在进行数字流域分析时，计算得到的流量栅格本身仅表示上游汇水区的空间累积规模，若直接可视化并无明确水文意义。其核心价值在于通过设定合理的流量阈值来识别实际河网：只有当汇流量达到某一临界值时，才认为该处已形成稳定地表径流，可被视为河流通。因此，阈值的选取直接影响河网提取的准确性与结构合理性。

集水面积阈值的确定是数字河网提取中的关键步骤，需兼顾科学性与实用性。合理的阈值应在保持流域主体结构完整的前提下，过滤掉地形噪声引起的细小伪河道，使提取的河网既符合自然形态，又便于后续分析与可视化表达。

本研究采用基于真实流域面积与数据空间分辨率的比值方法确定盘龙江的集水面积阈值。已知盘龙江实际流域面积为 8.47 km^2 (即 $8,470,000 \text{ m}^2$)，所使用的 DEM 空间分辨率为 $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ (单个像元覆盖 900 m^2)。通过计算流域总面积与单像元面积的比值 ($8,470,000 \div 900 \approx 9411$)，并参考该数值确定集水面积阈值为 10,000，以实现对手干河网的合理提取。

在 ArcGIS 水文分析工具中，基于流量栅格提取河网主要有两种方式：一是通过设定固定阈值直接提取连续河网；二是基于河链分级进行选择提取。本研究采用第一种方法，使用上述确定的阈值从流量栅格中生成盘龙江数字河网。

2.3.1. 重分类方法

重分类工具的操作虽简便，但其关键与难点在于分类阈值的科学确定，必须紧密结合研究对象的实际地理与水文特征。本研究以小流域为对象，基于前述流域面积与数据空间分辨率的换算关系，确定盘龙江形成稳定地表径流的累积流量阈值宜大于 9500。据此，在重分类工具中设置划分规则：将累计流量值小于 9500 的栅格归为非河道像元，大于等于 9500 的归为河道像元。执行后，栅格数据被清晰地划分为上述两个类别。

2.3.2. 基于栅格计算器的河流提取

为更灵活地根据流量阈值提取河流网络，本研究选用 ArcGIS 中的【栅格计算器】工具，通过其内嵌的条件函数(Con)对像元进行逻辑筛选。具体操作步骤如下：在工具箱中调用【栅格计算器】，输入条件表达式： $\text{Con}(\text{"Flow_Acc"} \geq 10000, 1)$ ，其中“Flow_Acc”为流量累积栅格数据，10,000 为最终采用的流量阈值。需说明的是，该阈值与提取所得河网的密度呈反比关系：阈值越高，河网结构越简化；阈值越低，保留的河道细节越丰富。

2.3.3. 结果验证

图 4 展示了通过上述方法提取的数字河网结果。本文所提取的河网在较好地保持了盘龙江主干及主要支流的形态特征的同时，有效滤除了因 DEM 误差或微小地形起伏导致的伪河道与冗余细流，实现了主干结构清晰与重要细节保留之间的平衡，满足后续水文分析的要求。

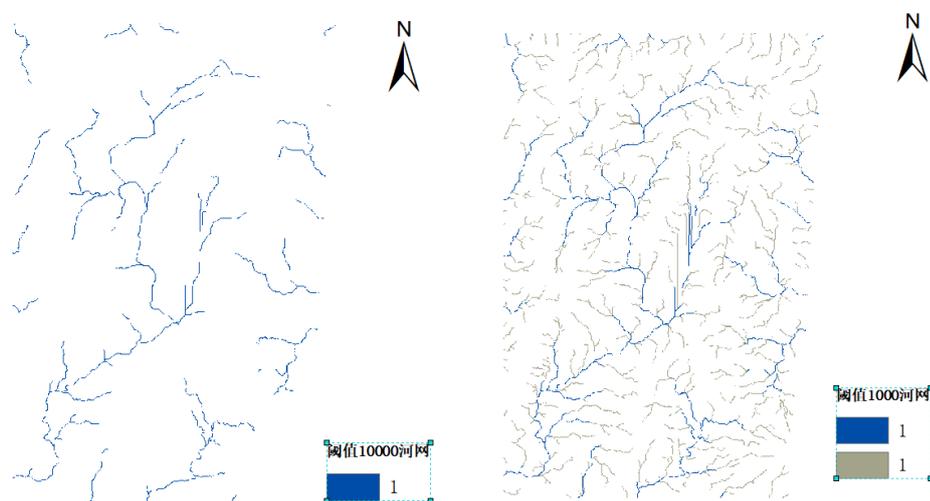


Figure 4. shows the river network extraction results with thresholds of 10000 and 1000
图 4. 阈值为 10000 和 1000 不同河网提取结果

2.4. 河网分级与流域提取

2.4.1. 河网分级

通过流量阈值提取的河网仅表现为具有相同属性的离散像元, 缺乏真实的拓扑连接关系。因此, 需使用【河流链接】工具, 基于流向数据将相邻的河道像元连接为连续的线状河流, 并依据汇流关系识别不同的河段, 使其具备真实水系的连通性与结构性。链接后的河网由离散像元转化为具有完整路径的独立河流, 为后续分析奠定基础。

在水文学中, 河流链接的主要目的并非生成矢量河流, 而是为河流分级提供结构准备。其核心在于揭示河流之间的汇流关系及河流与流域的系统联系, 而非单纯制图表达。经链接处理后, 河网即可适用于系统化的分级分析。当前主流的河流分级理论包括霍顿分级、斯特拉勒分级、施里夫分级及沙依达格分级等。

ArcGIS 中主要集成了斯特拉勒与施里夫两种分级方法。斯特拉勒法的原则是: 无支流汇入的河段为 1 级; 当两条同级河流汇合时, 下游河段等级加 1; 若汇合河流等级不同, 则下游河段继承较高等级。施里夫法采用累积分级逻辑: 无支流河段为 1 级; 河流汇合时, 下游河段等级为所有汇入支流等级之和。

本研究选用施里夫分级法对提取的盘龙江水系进行分级处理, 结果如图 5 所示。

2.4.2. 河流矢量化

即栅格河流转矢量河流, GIS 对栅格计算的支持远没有对矢量数据的多, 所以大多数情况下都需要将栅格数据转换为矢量数据进行分析。Arc GIS 提供了【栅格河流矢量化】工具将栅格河流转换为矢量河流。利用分级后的河网可以绘制河流的分级显示图, 利用 `grid_code` 作为标注显示等级, 进行符号化表示以便更形象。

2.4.3. 流域提取

流域, 亦称集水区或流域盆地, 是指以某一公共出水口为终点、汇集地表径流并集中排出的地理区域。出水口作为流域的最低点, 是水流的最终出口。流域提取建立在河网提取的基础上, 其关键仍在于河流的准确定义, 即通过合理阈值确定河网结构。流域边界即分水岭, 其划分需依据不同河流的流向自然形成的汇水范围。



Figure 5. Classification of the Panlongjiang River System
图 5. 盘龙江水系分级

利用水文分析中的【集水区】工具，以流向数据为输入，可将汇向同一出水口的像元合并为独立流域。基于本研究生成的流向数据，成功提取了以盘龙江主流域为主的多个子流域。该过程模拟了自然水系“水往低处流”的汇流规律，处理结果能够准确反映盘龙江主干流域及其周边子流域的空间分布，具体如图 6 所示。

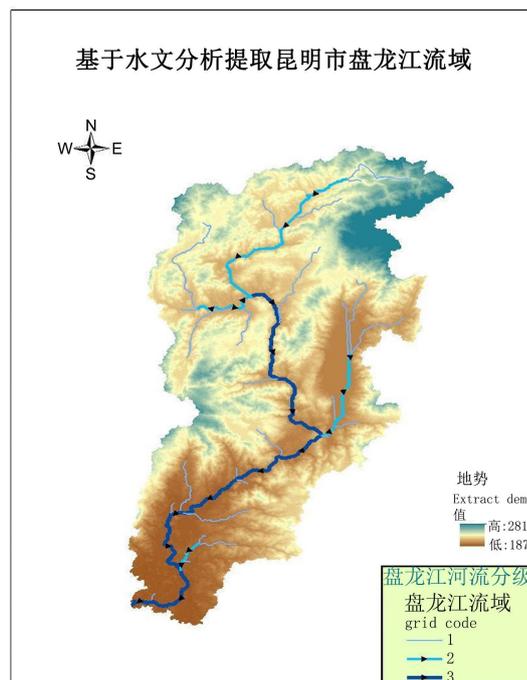


Figure 6. shows the extracted Panlongjiang River basin and its water system
图 6. 提取得到的盘龙江流域及水系

3. 研究结果

3.1. 盘龙江水文分析结果

在基于 DEM 数据的水文特征分析与流域提取基础上, 本研究获得的盘龙江流域范围及水系结构与现有地理资料基本吻合, 在空间位置、形态规模及河道特征方面均具有较高一致性。

盘龙江水系呈典型双支流交汇格局, 交汇点位于寺山附近。其主要源头为牧羊河, 发源于嵩明县西北梁王山西麓白沙坡及竹园村一带。上游牧羊河河道呈现弧状延伸, 流经盘龙区阿子营街道时出现明显弯曲转向, 随后转为东南走向, 最终在刺梨山附近汇入盘龙江主流。该河段蜿蜒曲折, 流经区域以起伏的山谷地形为主, 坡面径流沿山谷汇集形成二级河流特征。另一支流起源于青龙禅寺附近, 该河段形态平直、结构简单, 自北向南流动, 河道狭窄水量较小, 为典型一级河流。分析表明, 此支流的形态特征与其流经区域地势较为平缓且受人类活动影响密切相关。上述两支流于刺梨山附近交汇形成盘龙江干流, 随后流经松华坝水库, 进入昆明市盘龙区城区段呈“S”型蜿蜒流动, 最终注入滇池。整体河道形态与地形特征及流域水文过程表现出显著的相关性。

3.2. 流域地形湿度指数(TWI)空间分布特征

为进一步揭示盘龙江流域地形对地表径流汇集与土壤水分空间分布的控制作用, 本研究基于填洼后的 DEM 数据, 依据以下公式计算了流域内各栅格单元的地形湿度指数(Topographic Wetness Index, TWI):

$$TWI = \ln \left(\frac{\alpha}{\tan \beta} \right)$$

其中, α 为单宽汇流面积(m^2/m), $\tan \beta$ 为该点局部坡度。TWI 值越高, 表示该位置更易积水或具有更高的土壤含水量潜力。为保证统计结果的有效性, TWI 栅格在统计前已按盘龙江流域边界进行掩膜提取, 排除流域外无效像元干扰; 坡度计算采用弧度制, 并添加极小值(0.0001)以避免分母为零。

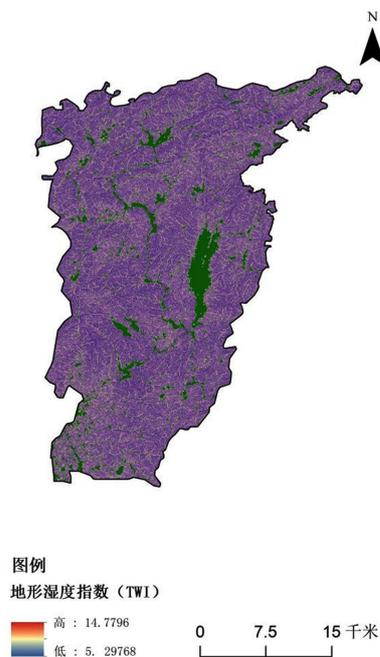


Figure 7. Topographic humidity index of the Panlongjiang River Basin
图 7. 盘龙江流域地形湿度指数

如图 7 所示, 盘龙江流域 TWI 值分布呈现显著的空间异质性。经流域边界裁剪与统计, 盘龙江流域 TWI 值范围为 5.29~14.78, 均值为 7.82, 标准差为 3.12。整体来看, TWI 高值区(>10)主要集中于主干河道两侧、河谷平原及子流域出水口附近, 这些区域地形平缓、汇流面积大, 易于形成地表径流汇集与水分滞留; 而 TWI 低值区(<6)则广泛分布于流域边界附近的山脊、陡坡地带, 地形起伏大、汇流能力弱, 径流产生能力较低。

值得注意的是, TWI 空间分布与前述河网结构、子流域划分结果高度吻合。例如在刺梨山附近的双支流交汇区及松华坝水库上游区域, TWI 值普遍高于 10, 反映出该区域具有显著的汇流优势与湿润条件, 与盘龙江主干“S”型蜿蜒形态及双支流交汇格局形成良好的空间对应关系。而在青龙禅寺附近的一级支流源头区域, TWI 值普遍低于 8, 进一步验证其河道狭窄、径流贡献能力有限的地形驱动特征。

上述结果表明, 盘龙江流域的产汇流过程受地形控制显著, TWI 作为地形-水文耦合参数, 能够有效识别流域内潜在的径流贡献区与水分汇集区。该分布特征与流域“S”型主干形态、双支流交汇格局高度吻合, 表明 TWI 能够有效刻画地形对径流汇集的驱动作用。该指数不仅为后续开展面源污染模拟、生态流量评估提供了空间量化基础, 也为理解高原城市小流域的地貌发育阶段与水文响应机制提供了新的视角。

4. 结论与意义

本研究以盘龙江流域为研究对象, 基于 DEM 数据运用 ArcGIS 平台进行水文特征提取与分析, 探讨了不同集水面积阈值对流域结构提取的影响, 系统阐述了数字流域构建的基本流程与方法。研究获得了盘龙江流域的河网分布、子流域划分及河流分级结果, 验证了数字技术在中小流域水文分析中的适用性。

本研究的开展具有以下三方面的意义。

一是为高原城市流域的精细化管理提供了基础数据支撑。盘龙江作为滇池的重要入湖河流, 其水文过程直接影响滇池的水量平衡与水质状况。研究通过构建数字水文网络, 明确了流域汇流路径与子流域空间格局, 为后续开展城市面源污染估算、生态流量调控及防洪排涝规划提供了基础地理信息框架, 有助于推动从经验管理向数据驱动决策的转变。

二是探索了中小尺度流域数字建模的阈值确定方法。研究结合流域实际面积与 DEM 空间分辨率, 提出确定思路, 对类似中小流域(尤其是缺乏长序列水文观测的地区)的数字提取具有参考价值。同时, 研究也表明, 在高精度建模中仍需进一步探索阈值参数与流域地貌、数据源及分析目标的动态适配关系。

三是为数字流域技术在本地应用与拓展提供了实证案例。研究以盘龙江这一典型高原城市河流为对象, 验证了从数据准备、洼地填平、流向计算到河网提取与分级的完整技术路径的可行性。所得成果不仅可直接服务于盘龙江流域的综合治理与生态修复, 也为昆明乃至云南地区其他中小河流的数字流域构建提供了可复制、可推广的方法参考, 对推动区域水治理体系和治理能力现代化具有实践意义。

四是深化了对高原城市小流域水文地貌耦合机理的认识。本研究通过提取流域形状系数、河网密度及 Horton 水系定律参数(河数比、河长比), 定量揭示了盘龙江流域河网发育处于中等偏成熟阶段, 其支流发育充分、主干形态稳定, 符合区域构造抬升与侵蚀基准面(滇池)共同控制下的地貌演化规律。结合 TWI 空间分布与径流汇流路径的耦合分析, 进一步明确了地形驱动型产汇流机制在该类流域中的主导地位, 为揭示高原湖泊入流小流域的水文响应规律提供了新的实证依据。

参考文献

- [1] Gore, A. (1998) The Digital Earth: Understanding Our Planet in the 21st Century. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **65**, 528-530.

-
- [2] Wood, E.F., Roundy, J.K., Troy, T.J., van Beek, L.P.H., Bierkens, M.F.P., Blyth, E., *et al.* (2011) Hyperresolution Global Land Surface Modeling: Meeting a Grand Challenge for Monitoring Earth's Terrestrial Water. *Water Resources Research*, **47**, W05301. <https://doi.org/10.1029/2010wr010090>
- [3] Abbott, M.B., Bathurst, J.C., Cunge, J.A., O'Connell, P.E. and Rasmussen, J. (1986) An Introduction to the European Hydrological System—Systeme Hydrologique Europeen, "SHE", 1: History and Philosophy of a Physically-Based, Distributed Modelling System. *Journal of Hydrology*, **87**, 45-59. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(86\)90114-9](https://doi.org/10.1016/0022-1694(86)90114-9)
- [4] Beven, K.J. and Kirkby, M.J. (1979) A Physically Based, Variable Contributing Area Model of Basin Hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin*, **24**, 43-69. <https://doi.org/10.1080/02626667909491834>
- [5] Maidment, D.R. (2016) GIS Hydrology. In: Maidment, D.R., Ed., *Arc Hydro: GIS for Water Resources*, 2nd Edition, Esri Press, 1-18.
- [6] 吴雯希. 基于 GIS 的数字流域提取和水文网络构建[J]. 广西水利水电, 2021(6): 135-138.
- [7] 汪建宏. 基于 DEM 的流域水文模拟尺度研究[J]. 水电站机电技术, 2022, 45(8): 42-45.
- [8] 赵杏英, 毛肖钰, 徐红权, 等. 数字流域多尺度空间地理信息模型构建及应用——以钱塘江流域为例[J]. 人民长江, 2021, 52(S2): 293-297.
- [9] 夏军, 骆文广, 余敦先, 等. 流域模拟器在数字流域建设及水电预报调度能力提升中的应用与展望[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(7): 1-12.
- [10] 齐师杰, 啜瑞媛, 吕天慧. 数字流域视域下永定河水资源实时监控与调度系统设计与实现[J]. 水资源开发与管理, 2023, 9(7): 61-66+80.
- [11] 魏雯, 林军, 李瑞敏. 近 20 年昆明盘龙江流域土地利用及景观格局演变研究[J]. 园林, 2022, 39(2): 100-106
- [12] 林玲. 基于“城市双修”理论背景下的城市更新设计研究——以昆明盘龙江桃源广场为例[J]. 中外建筑, 2020(9): 104-106.
- [13] Clubb, F.J., Mudd, S.M., Milodowski, D.T., Hurst, M.D. and Slater, L.J. (2014) Objective Extraction of Channel Heads from High-Resolution Topographic Data. *Water Resources Research*, **50**, 4283-4304. <https://doi.org/10.1002/2013wr015167>