J. Lake Sci.(湖泊科学), 2025, 37(5):000-000 DOI 10.18307/2025.0541 ©2025 *by Journal of Lake Sciences*

面向水文过程模拟的 DEM 子流域划分优化方法*

朱 旭,周玉良**,周 平,吴成国,崔 毅,张宇亮 (合肥工业大学土木与水利工程学院,合肥 230009)

摘 要:为解决直接利用原始 DEM 提取的模拟河网与实际水系存在偏差,影响子流域划分的问题,论文基于区域实际影像中的河流位置,提取研究流域的主河道;依据主河道栅格高程与垂直主河道方向的洼地栅格高程之差的最大值,降低主河道所在 DEM 栅格的高程值.并采用河网密度法确定河源的最佳集水面积阈值。结合我国一级小流域面积范围标准(50~300 km²),以及每个子流域出口位于河网干流上的准则,确定合适的子流域划分数量及面积,并对不同的子流域划分方案下分布式新安江模型的日模和次模结果进行比较。桃溪流域应用结果表明:将实际水系主河道所在 DEM 栅格的高程降低 40 m,基于河网密度法确定河源的最佳集水面积阈值 0.81 km² 后,所提取的模拟河网更加符合实际。子流域最佳集水面积阈值为 108 km²,划分的子流域数量为7个,子流域的平均面积为 213.2 km²。对主河道所在 DEM 栅格的高程降低处理后划分的7 和 11 个子流域分别 记为方案 A 和 B,未对主河道所在 DEM 栅格的高程降低处理划分的 7 个子流域记为方案 C。利用桃溪流域 1982—2022 年水文气象资料对日径流过程进行模拟(1982—2012 年为训练样本,其余为验证样本),方案 A、B、C 在训练期的确定性系数分别为 0.87、0.87、0.86,验证期分别为 0.9、0.91、0.9,模拟精度基本一致。选取 20 场洪水进行次洪模拟,以洪峰、洪量和峰现时间为精度评定指标,方案 A、B、C 下的合格场次分别为 19、16 场;以确定性系数为精度评定指标,方案 A、B、C 下的平均确定性系数分别为 0.93、0.94、0.93。方案 A 和 B 的洪水模拟合格率高于方案 C,而划分为 7 个子流域的方案 A 相 较 11 个子流域的方案 B 在精度上无明显差异。可见对主河道所在 DEM 栅格进行高程降低处理,以子流域面积处于我国一级小流域面积范围标准(50~300 km²)、子流域出口位于干流上的准则进行子流域划分是合理可行的。 关键词:流域划分;河网提取;河网密度法;集水面积阈值;DEM;实际水系;桃溪流域

Optimization method of DEM subwatershed division for hydrological process simulation^{*}

Zhu Xu, Zhou Yuliang**, Zhou Ping, Wu Chengguo, Cui Yi & Zhang Yuliang

(College of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, P.R.China)

Abstract: To solve the problem that the simulated river network extracted directly from the original DEM deviated from the actual water system and affected the sub-basin division, this paper based on the actual river positions in the regional imagery, extracted the main rivers in the study basin, and then lowered the elevation values of the original DEM grid where the main rivers were located by the maximum difference between the grid elevation of the main rivers and the depression grid elevation

^{* 2024-09-02} 收稿; 2024-12-26 收修改稿;

国家重点研发计划项目(2023YFC3006605)、国家自然科学基金项目(42271084, 52379006, 52209011)和安徽省自然科学基金(230808US13, 2208085QE179)联合资助。

^{**} 通信作者; Email: ZYL54600@163.com。

perpendicular to the main rivers. The optimal watershed area threshold for the river source was determined by the river network density method. Subsequently, combined the standard range of China's first-level small watershed division (50-300 km²) and the criterion that each sub-watershed outlet was located on the mainstream of the river network, the appropriate number and area of sub-watersheds were determined. Finally, by comparing the daily and sub-daily results of the Xin'anjiang model distributed in different sub-watershed division schemes, the rationality of the sub-watershed division was verified. The application results in Taoxi River Basin showed that: Lowering the elevation of the DEM grid where the actual river system's main rivers pass by 40 m and determining the optimal watershed area threshold for the river source by the river network density method, the simulated river network extracted was more consistent with the actual water system. The optimal watershed area threshold for sub-watersheds was 108 km², and the number of sub-watersheds was 7, with an average area of 213.2 km².The 7 and 11 sub-basins divided by the DEM grid elevation reduction treatment after the main river course was passed were scheme A and B, respectively, while the 7 sub-basins divided without the DEM grid elevation treatment after the main river course was passed were scheme C. The daily discharge process was simulated using the hydro-meteorological data of Taoxi River basin from 1982 to 2022 (the years from 1982 to 2012 were used as the training samples, and the rest were used as validation samples). The determination coefficients of the training samples of schemes A, B and C were 0.87, 0.87 and 0.86, respectively, and the validation coefficients were 0.9, 0.91 and 0.9. The simulation accuracy was basically consistent. A total of 20 floods were selected for secondary flood simulation, and the flood peak, flood volume and peak time were used as precision evaluation indexes. The qualified floods under scheme A, B and C were 19, 19 and 16, respectively. Using the certainty coefficient as the accuracy evaluation index, the average certainty coefficient of the next flood simulation in scheme A, B and C was 0.93, 0.94 and 0.93 respectively. Scheme A and scheme B had higher qualified rate of flood simulation than scheme C, and scheme A divided into 7 sub-basins had no obvious difference in accuracy compared with scheme B divided into 11 sub-basins. It can be seen that it is reasonable and feasible to reduce the elevation of the DEM grid through the main river channel and divide the sub-watershed according to the criteria that the outlet of the sub-watershed is located on the main river channel and the area of the sub-watershed is within the classification range of China's first-class small watershed (50~300 km^2).

Key words: watershed division; river network extraction; river network density method; catchment area threshold; DEM; actual water system; Taoxi watershed

数字高程模型数据 DEM^{[11}与 GIS 技术相结合,可识别更加贴近实际的流域水系特征。栅格型 DEM 由于处理起来简便有效,被广泛应用于流域水文过程模拟。对于分布式水文模型而言,精确获取流域特征信息,特别是河源位置的准确判定以及子流域的合理划分,对模型最终模拟结果的准确性和可靠性具有至关重要的影响。通过综合应用实际遥感影像数据与 DEM 数据,优化中小流域的子流域划分方法,可提升水文过程模拟精度,为水资源管理与洪水预警等提供科学依据。

众多学者在基于 DEM 提取河网方面开展了大量的研究: Yang 等^[2]提出了一种基于 5 m 分辨率 DEM 的半自动沟谷网络提取方法,该方法通过迭代沟谷汇流阈值深化沟谷网络,并结合"相对沟深 (RGD)"的地形测量方法,可在黄土高原丘陵区能够提取较高精度的沟谷网络;卢庆辉等^[3]提出了一种结合 Priority-Flood 算法漫水思想和改进 D8 算法的流向算法,有效地解决了平地区域生成平行河网的问题;巫 晓玲等^[4]基于 5 m 分辨率 DEM,提出了一种基于沟头点群汇流分布的沟谷汇流阈值确定方法,结果表明 在黄土高原不同地貌类型区适应性较好,但仍可能存在生成平行河网的问题。而根据实际影像确定河流 位置,结合 DEM 提取河网和子流域的研究尚不多见。河网密度法在确定模拟河网的提取阈值的研究中已 有丰富成果:李照会等^[5]分别在贡曲流域、辰清河流域和藤条江流域,拟合了河网密度与集水面积阈值、河源密度与集水面积阈值之间的关系,结果表明,幂函数拟合效果最佳,且结合河网、河源密度与地形 地貌确定阈值的方法是科学的;高翔等^[6]基于 30 m 分辨率 DEM,通过河网密度法确定祁连山国家公园流 域河网阈值为 6000 个栅格时,提取结果相较于全国 1:250000 三级水系数据中的河网更贴近真实水系。河

网密度法可以解决阈值选取的主观性问题,但阈值大小仅影响模拟河网的疏密程度,而不会改变其空间 位置。对于一些中小流域而言,DEM 的分辨率较低(即栅格尺寸较大)时,断面宽度较小的河流所在的 栅格可能会因同在一个栅格内的河流旁地形的平均作用,使得该 DEM 栅格的高程大于河流实际高程。提 取河网时,此类 DEM 栅格可能会被识别为非河道栅格,从而造成提取到的模拟河网与实际水系位置存在 偏差,故需结合区域实际影像对 DEM 进行预处理后,利用河网密度法确定河源提取的最佳阈值,以增加 河网提取的准确性。子流域的划分方面也开展了大量研究: Li 等^[7]基于高分辨率遥感影像,结合 Canny 算法提取流域特征信息, 替代 DEM 数据构建河网, 有效提升了太湖流域的子流域划分精度; Liu[®]等根据 流域内的地貌特征,采用两级划分的方法对西藏内陆河流域进行划分,结果表明该方法在湖泊分类和子 流域划分方面,能够有效地识别流域内的湖泊并保持各子流域的独立性; Stein^[9]通过改进 Pfafstetter 系统, 结合区域划分优化编码方法,在澳大利亚大陆实现了复杂河网的均匀子流域划分,显著提升了主干河道 识别精度。众多学者就子流域划分的不同结果对流域径流等的影响也开展了大量研究^[10-12]: Tripathi 等^[13] 基于 SWAT 模型,分析认为不同子流域划分数量对印度东部南湾流域的土壤含水量等水平衡成分影响显 著,但对地表径流的影响并不显著;Lin 等[14]分析了子流域划分对西溪盆地的山坡泥沙生成模拟及其空间 变化的影响,结果表明随着子流域划分阈值减小,山坡沉积物生成总量下降16.5%,空间变化增加97%; 胡连伍等[15]研究了不同子流域划分结果对丰乐河流域径流、泥沙等的影响,提出不同的子流域划分层次 对模拟结果的影响存在上下两个阈值,超过阈值则失真,低于阈值则难以反映真实空间分布。可见子流 域的划分是分布式水文模型构建中十分重要的环节。目前,面向水文过程模拟的中小流域的子流域划分, 主要是通过模拟的径流过程对子流域数量敏感性分析的统计学方法确定的[10-15]。根据遥感图像中实际水 系的位置确定流域的主河道,再结合 DEM 的高程信息提取流域河网,基于提取的与实际主河道位置一致 的流域河网划分子流域,进而分析划分的子流域的数量及其大小对流域出口断面径流过程模拟结果的影 响等相关研究缺乏。

本文面向水文过程模拟,提出一种基于实际影像对主河道所在 DEM 栅格进行高程降低处理的方法, 减少诸如圩区、洼地等地形地貌因素对于河网提取造成的偏差。采用河网密度法确定河网提取的最佳阈 值^[16],避免河网提取阈值选取的主观随意性。通过分析不同子流域集水面积阈值下的子流域划分结果, 并结合我国一级小流域面积范围标准(50~300 km²),以及子流域出口均位于河网干流上的准则,确定子 流域划分的合适阈值^[17,18]。比较分布式水文模型下不同的子流域划分方案在水文过程模拟中的差别。研究 结果可为分布式水文模型的计算等提供依据。

1 数据与方法

1.1 研究区域概况

丰乐河,古称桃溪,上接大别山区,下入巢湖。其源头有三,分别为北支思古潭河、中支张店河和 南支张母桥河,于龙咀合入丰乐河干流,下游汇入杭埠河后流入巢湖。桃溪流域面积 1492.3 km²,流域范 围(31°47′ N~31°21′ N,116°26′ E~117°1′ E),属江淮丘陵区,气候为亚热带湿润性季风气候,多年平均 降水量为 1020~1200 mm,流域上游为浅山区,中下游多为丘陵、圩区,土壤主要为黄棕壤、潮土、水稻 土等^[19]。桃溪流域范围内高程最大值为 468 m,最小值为-21 m,标准差为 139.9 m,整体趋势为西部浅山 区向东部丘陵区递减。

1.2 数据来源

DEM 数据来源为地理空间数据云平台(www.gscloud.cn)的 GDEMV2 数字高程数据,分辨率为 30 m。 实际影像资料为天地图影像地图(www.tianditu.gov.cn)。水文过程模拟所用的降水、径流等资料由合肥 水文水资源局提供。

1.3 DEM 预处理方法

DEM 的分辨率越高,越能真实地反映实际地形。然而,随着分辨率的提升,会导致基于 DEM 的河 网提取及子流域划分的工作量会呈指数增加。同时,易出现很多集水范围较小的洼地^[20],造成提取的河

网栅格与实际水流方向存在偏差等情况^[21]。通过降低实际水系主河道所在 DEM 栅格的高程,可使基于 DEM 提取的(等级较高的)河网水系与遥感影像中的水系更加一致。DEM 预处理主要包括如下 3 步:

(1)根据实际水系与基于原始 DEM 提取的模拟河网,确定二者的偏差位置。在 GIS 中确定流域边 界^[22],然后根据实际遥感影像中的河道位置,提取流域边界内的实际水系(图 1)。地理坐标系统一为 WGS 1984。基于原始 DEM 提取出模拟河网,将模拟河网的主河道与提取到的实际水系进行叠加分析, 识别主要的偏差位置。图 2 显示,自双河镇起下游区域模拟河网主河道与实际水系存在较大偏差。这表 明,由原始 DEM 直接提取的模拟河网,无法准确识别实际河流栅格。







watershed drainage system diagram





(2)确定主河道所在 DEM 栅格的高程降低值。模拟河网主河道与实际水系存在偏差,可能是河流栅格受其附近 地形的平均作用,导致河流栅格的平均高程值升高,河流栅格不能被准确地识别,而误将其周边的高程较低处识别为 河道栅格;亦或河道周边存在圩区等较大面积的洼地,而洼地与河道之间的水流排泄建筑物未能在 DEM 中体现,易 误将洼地等识别为河道栅格、实际河道识别为坡地栅格。故需依据影像提取实际水系的主河道,降低主河道所在 DEM 栅格的高程值,使流域内的产流都能通过主河道,进而通过出口断面流出。其中,降低河流所在 DEM 栅格的高程与 填洼处理的功效类似,均为使流域内的产流能够通过出口断面流出,且降低河流栅格的高程还可促使提取的模拟河道 与实际水系一致。经计算,实际水系主河道栅格在偏差处的平均高程为26m,垂直于主河道方向上洼地栅格的最低高 程值为-13m,易知主河道栅格平均高程与洼地栅格高程的最大差值为39m。主河道栅格的平均高程值降低后,应低 于垂直主河道方向上洼地栅格的高程最低值,因此确定主河道处栅格高程降低值为40m。DEM 高程降低前后的对比 见图3。

(3)降低主河道所在 DEM 栅格的高程值。进一步验证对桃溪流域实际水系主河道所在原始 DEM 栅格的高程值 降低 40 m 后,提取模拟河网的合理性,其步骤如下:沿着实际水系主河道,以5 m 作为步长增加栅格高程降低值, 重复提取模拟河网并对比实际水系。当高程降低值达到 40 m 时,模拟河网主河道与实际水系完全吻合。进一步增加 降低值,结果与 40 m 时一致,证明降低 40 m 为合理值。此时偏差处实际水系主河道栅格的平均高程值为-14 m,低 于垂直主河道方向上洼地栅格的高程最低值-13 m。将实际水系主河道所在 DEM 栅格的高程降低 40 m,可迫使流域 内的其它河流栅格流向实际主河道栅格,完成对原始 DEM 数据的预处理。DEM 处理后提取河流主河道与实际水系对 比见图 4。

1.4 河网提取阈值确定方法

河网密度法通过设置一系列递增的集水面积阈值,生成对应的一系列模拟河网。计算不同阈值下的河网及河源密度,分别拟合河网密度、河源密度与集水面积阈值之间的关系曲线,随着阈值逐渐增大,等级较小的河流将被去除, 当阈值增加到一定程度,将只保留主河道栅格。寻找关系曲线随集水面积阈值变化趋于平缓的点,即关系曲线拟合函 数的拐点,该点对应的阈值为河源的最佳提取阈值。



图 4 DEM 处理后提取主河道与实际水系对比图 Fig. 4 Comparison of extracted main stem and actual water system after DEM treatment

1.5 子流域划分方法

采用不同的集水面积阈值划分子流域的具体步骤如下:

(1)先设置一个集水面积阈值(如10000栅格数); (2)根据该阈值以及1.3 中计算的流向及流量矩阵确定流域内的河流网络; (3)沿着河流从流域下游向上游依次进行搜索,搜索出每段河流的起点,所有能流入该段河流起点的栅格编号记为该段河流的编号。如以流域出口作为起点的第1段河流编号为1,则全流域的栅格均能够流入到该段河流的起点,将全流域的河网栅格编号为1。再向上游搜索第2段河流起点,若该点所在栅格的上游集水面积超过设定的子流域集水面积阈值,则所有流入该起点的栅格编号改为2,以此搜索到上游每段河流,直至每个栅格都完成编号,栅格编号即为子流域编号。如此根据每段河流编号完成子流域编号,子流域内河流流向与其同编号的那段河流流向相同; (4)对于面积小于设定阈值的小面积子流域,则将其并入其流入的子流域,同时其编号也改为其流入的子流域编号,并且原小面积子流域后面的子流域编号依次减去1,完成修改; (5)将所有子流域编号完成后,就可以得出每个子流域范围,确定每个子流域的边界^[23]。

本文确定最佳子流域提取阈值的方法,是通过设置一系列递增的子流域集水面积阈值生成子流域,计算不同阈值 下的子流域数量及其对应的平均面积,得到子流域划分数量和平均面积与子流域阈值之间的关系曲线。随子流域面积 阈值的逐渐增大,子流域划分数量有明显的减小趋势,子流域平均面积有明显的增大趋势;随阈值增加,当所有子流 域的出口均位于干流上,且集水面积较小的子流域被合并时,此时的集水面积阈值即为最佳阈值。同时,尽量使划分的多个子流域的面积的平均值处于我国一级小流域面积范围标准内,即 50~300 km²。

1.6水文过程模拟方法

采用三水源新安江模型对桃溪流域不同的子流域划分方案下的日径流和次洪过程进行模拟。其中,子流域内的河 网汇流采用滞后演算法,子流域出口至流域出口之间的河道汇流采用分段马斯京根连续演算法^[24]。日径流过程模拟和 次洪过程模拟的初始状态,均通过日尺度资料进行预热,预热期为1个月。日径流过程模拟以1982—2012年作为训 练期,2013—2022年作为验证期,模型输入及输出资料均为日尺度;次洪过程模拟选取1982—2022年间20场最大洪 水过程,以前15场作为训练样本,后5场作为验证样本,输入及输出资料的时间尺度均为6h,以模拟流量过程与实 测流量过程的确定性系数最大化为目标函数^[25]。新安江模型所用参数个数为17个(包括流域蒸散发折算系数、上层张 力水容量、下层张力水容量、深层蒸散发折算系数、流域平均张力水容量、张力水蓄水容量曲线指数、不透水面积占 全流域面积比例、表层自由水蓄水容量、表层自由水蓄水容量曲线指数、表层自由水蓄水库对地下径流的日出流系数、 表层自由水蓄水库对壤中流的日出流系数、地面径流消退系数、壤中流消退系数、地下径流消退系数、河网汇流滞时、 马斯京根法河段传播时间和马斯京根法流量比重系数),各子流域之间产汇流参数取值不同,模型参数通过遗传算法 率定。

2结果与分析

2.1 河网提取阈值确定

由于河网提取过程中,不同集水面积阈值提取的河网有一定的差别²⁰,尤其是河源的位置,且集水面积阈值的选取尚无明确的指导原则,具有一定的主观性。采用河网密度法,并以河源密度作为辅助验证,可有效避免阈值选取的主观性。分别以100至2400个栅格作为集水面积阈值,提取的流域面积为1492.3 km²,计算出不同阈值下的河网密度与河源密度,结果见表1。

		140.1	Water Syster	ii enalaeteriba		on or ruon	i waterbried		
阈值	ī 河段数	河网总长度	河网密度	河源密度	阈值	河段数	河网总长度	河网密度	河源密度
/栅格3	数 /个	/km	/(km • km ⁻²)	/(个•km ⁻²)	/栅格数	/个	/km	/(km • km ⁻²)	/(个•km ⁻²)
100	10332	4113.61	2.76	6.92	1300	792	1201.16	0.80	0.53
200	5306	2962.66	1.99	3.56	1400	742	1162.30	0.78	0.50
300	3540	2427.25	1.63	2.37	1500	690	1128.24	0.76	0.46
400	2616	2103.77	1.41	1.75	1600	660	1094.45	0.73	0.44
500	2108	1892.05	1.27	1.41	1700	614	1067.07	0.72	0.41
600	1759	1695.09	1.14	1.18	1800	582	1035.09	0.69	0.39
700	1499	1573.41	1.05	1.00	1900	556	1007.85	0.68	0.37
800	1300	1507.16	1.01	0.87	2000	532	984.47	0.66	0.36
900	1133	1422.13	0.95	0.76	2100	520	962.77	0.65	0.35
1000) 1027	1356.47	0.91	0.69	2200	502	944.42	0.63	0.34
1100) 933	1295.02	0.87	0.63	2300	476	923.04	0.62	0.32
1200) 850	1246.36	0.84	0.57	2400	459	904.80	0.61	0.31

表1 桃溪流域水系特征信息

Tab. 1 Water system characteristic information of Taoxi Watershed

采用幂函数分别拟合河网密度、河源密度与集水面积阈值(栅格数)之间的关系,见图5。拟合函数变化趋于平缓的点即为最佳集水面积阈值点。



Fig. 5 Fitting function diagram of river network density, source density and catchment area threshold

河网密度、河源密度与集水面积阈值(栅格数)的关系如下:

$$N = 24.217 n^{-0.475} \quad R^2 = 0.999 \tag{1}$$

$$S = 661.86 n^{-0.991} \quad R^2 = 0.999 \tag{2}$$

式中,N为河网密度(km/km^2);n为集水面积阈值对应的栅格数(个);S为河源密度(h/km^2); R^2 为确定性系 数。

0 475

可见,两者拟合函数的确定性系数均接近1,拟合效果很好。再分别对式(1)、式(2)求二阶导数(图6),寻 找拟合函数的拐点对应的栅格数作为最佳阈值。当栅格数为 900, 即集水面积为 0.81 km²时,河网密度与河源密度拟 合函数对应二阶导数值几乎为0且后续数值几乎无变化,故选取该值为最佳集水面积阈值。



Fig. 6 Graphs of the second derivative of the fitting function for river network density and river source density 2.2 子流域划分

小流域作为水土保持治理的基础单元四,可作为划分的子流域面积大小的重要依据。本文以我国一级小流域面积 范围标准(50~300 km²)为子流域平均面积大小的参考,以每个子流域出口位于河网干流上为子流域划分的准则,划 分桃溪流域的子流域。设置集水面积阈值从 9 km²开始逐渐增加 144 km²(文中 DEM 栅格为 30 × 30 m, 即每 10000 个栅格对应9km²集水面积,将集水面积阈值选为9km²的倍数,便于确定子流域对应栅格数),计算出不同阈值下对 应子流域数量与平均面积。划分出的不同阈值下子流域数量与平均面积见表 2, 子流域的数量、平均面积与子流域集 水面积阈值的关系见图7。

Tab. 2 The number and average area of sub-basins under different thresholds											
集水面积	子流域	平均面积	集水面积	子流域	平均面积	集水面积	子流域	平均面积	集水面积	子流域	平均面积
阈值/km ²	数量/个	/km ²	阈值/km ²	数量/个	/km ²	阈值/km ²	数量/个	/km ²	阈值/km ²	数量/个	/km ²
9	136	11.0	45	26	57.4	81	19	78.5	117	7	213.2
18	66	22.6	54	26	57.4	90	15	99.5	126	7	213.2
27	49	30.5	63	25	59.7	99	11	135.7	135	7	213.2
36	36	41.5	72	24	62.2	108	7	213.2	144	7	213.2
			160 140 - 120 - - - - - - - - - - - - - - - - - - -	18 30	 子流域划: 子流域平式 子流域平式 6 54 7 集水面积 	分数量 匀面积 2 90 1 测衡值/km ²	08 126	250 200 cmy/沿迴宕士 150 加州沿迴宕士 50 144			

表2 不同阈值下划分子流域数量与平均面积



Fig. 7 The relationship of the number of subbasins and their average area with the dividing threshold

将桃溪流域的集水面积阈值从9km²逐步增加至108km²。结果表明,划分的子流域数量由136个减少至7个, 平均面积从11 km²增加至213.2 km²;当阈值从108 km²增加至144 km²时,子流域数量均为7个,平均面积均为213.2 km²。分析发现,当子流域划分的集水面积阈值较小时,划分出数量众多的小面积子流域(如阈值为9km²至36km²时,子流域平均面积小于我国一级小流域面积范围标准),子流域的出口断面分布复杂,导致产汇流计算难度增加; 而当阈值过大时,划分的子流域数量较少,难以充分反映不同区域的水文特性差异,从而影响模型对流域水文过程的 真实模拟。进一步分析发现,当阈值为99km²及108km²时,子流域数量分别为11个和7个,平均面积分别为135.7km² 和213.2km²,均符合我国一级小流域面积范围标准,且子流域的出口均位于干流上。与划分11个子流域相比,阈值 为108km²时子流域数量减少了4个,说明流域内部分集水面积较小的子流域被进一步合并。在划分7个子流域的情 况下,分布式水文模型不仅能够反映子流域内水文特性的空间异质性,还能显著减少计算工作量,提高模拟效率。对 划分出的7个子流域进行空间拓扑关系编号(图8)。



图 8 子流域划分结果 Fig. 8 Division results of sub-watershed

分布式水文模型的构建与计算中,合适的子流域划分既有助于保持水文特性,又可优化计算效率。已有研究表明, 子流域数量在一定范围内对径流模拟影响较小,而超过范围则会产生显著影响。例如,邱临静等²⁸¹通过设置不同阈值 划分杏子河流域子流域,采用 SWAT 模型模拟多年径流过程,该文将阈值从 10 km² 增加至 100 km² 过程中,划分出子 流域数量最低为7个,平均面积为 216.4 km²,同时径流模拟结果没有较大变化;胡连伍等¹¹⁵应用 SWAT 模型,分析 了丰乐河流域(该文提取的流域面积稍小于本文)子流域的不同划分结果对径流等模拟的影响,划分出子流域数量最 低为5个,平均面积为 257.8 km²。这些子流域的面积均位于我国一级小流域面积范围标准(50~300 km²)内。本文中 当子流域集水面积阈值为 108 km²时,桃溪流域被划分为7个子流域,平均面积为 213.2 km²,与上述文献中所划分的 子流域的平均面积相近。尽管这些流域气候区和地形地貌存在差异,但划分出的子流域的平均面积却十分接近,表明 子流域面积在我国一级小流域面积范围标准内的划分方法适用性较强,这一现象的潜在机理需要进一步研究。

2.3 日径流过程模拟

为验证上述对实际水系主河道所在 DEM 栅格的高程降低 40 m 后提取河网,以及将桃溪流域划分出不同数量的子流域,对水文过程模拟结果的影响。设置三种子流域划分方案:方案 A 为对实际水系主河道所在 DEM 栅格的高程降低 40 m 后,集水面积阈值 108 km²划分的 7 个子流域;方案 B 为对实际水系主河道所在 DEM 栅格的高程降低 40 m 后,集水面积阈值 99 km²划分的 11 个子流域;方案 C 为由原始 DEM,集水面积阈值 108 km²划分的 7 个子流域。基于 1982—2022 年的日降水、径流和蒸发资料,采用三水源新安江分布式模型^[29]对三种方案下日径流过程进行模拟,模型参数以实测流量和模拟流量的确定性系数最大为目标,采用遗传算法率定参数,其中每个子流域参数取值不同。以 1982—2012 年为训练期,2013—2022 年为验证期。日尺度下的模拟结果:方案 A、B、C 在训练期确定性系数分别为 0.87、0.87、0.86、在验证期确定性系数分别为 0.9、0.91、0.9。日径流过程模拟结果中,三种方案在训练期和验证期的确定性系数结果差别不大。包含最大洪水的 2022 年 7 月的模拟和实测日径流过程见图 9。



2.4 次洪过程模拟

为进一步比较三者的模拟效果,基于桃溪流域时段长6h的降水、径流等数据,选取1982—2022年间20场最大 洪水过程进行次洪模拟分析。其中,前15场作为训练样本,后5场作为验证样本,次洪模拟结果见表3。训练期的15 场洪水中,方案A、B、C的洪量相对误差在20%以内均为14场,洪峰相对误差在20%以内分别为15、15、14场, 峰现时间在±6h以内分别为15、15、14场,平均确定性系数分别为0.93、0.94、0.93。验证的5场,方案A、B、C 的洪量相对误差在20%以内均为5场,洪峰相对误差在20%以内均为5场,峰现时间在±6h以内分别为5、5、4场, 平均确定性系数分别为0.94、0.93、0.94。根据国家标准《水文情报预报规范》(GB/T 22482 - 2008)对20场洪水的合 格率及精度等级进行评定。按照标准,每场洪水的洪量、洪峰预报相对误差绝对值小于许可误差(20%),峰现时间预报 误差绝对值小于许可误差(6h)为合格,方案A、B、C的合格场次分别为19、19、16场,合格率分别为95%、95%、 80%。在20场洪水中,以确定性系数作为精度评定指标,方案A为甲级16场,乙级4场;方案B为甲级18场,乙 级2场;方案C为甲级18场,乙级2场。选取4场洪水过程绘制径流过程线(图10)。



Fig. 10 Simulation diagram of 4 flood process

洪号	洪量/m ³				洪峰/(m ³ ·s ⁻¹)				峰现时间误差/h			确定性系数		
	实测	А	В	С	实测	А	В	С	А	В	С	А	В	С
19820717	11950	12578	12190	12805	731	770	747	732	0	0	0	0.97	0.97	0.96
19840830	9778	10730	10200	9829	770	903	845	779	6	6	18	0.85	0.90	0.95
19860715	8410	9021	8700	8461	476	415	396	366	0	6	6	0.92	0.92	0.90
19870701	9952	10752	10633	10822	563	597	585	568	-6	-6	-6	0.96	0.97	0.96
19890704	5918	5527	5890	6183	401	355	377	390	-6	-6	-6	0.93	0.95	0.95
19910701	12631	12689	12792	12114	755	755	752	702	-6	-6	-6	0.97	0.97	0.96
19930628	5354	5594	5220	5554	591	615	576	624	0	0	0	0.91	0.92	0.93
19960714	8238	8714	8396	8067	709	740	718	680	6	6	6	0.94	0.94	0.95
19990627	13374	15010	14189	14159	870	945	913	839	0	0	0	0.95	0.97	0.97
20020620	4704	4899	4975	5113	405	473	469	483	0	0	0	0.97	0.97	0.95
20030708	12051	12587	11998	11916	893	975	933	880	0	0	0	0.97	0.98	0.98
20050902	9452	9338	9286	9490	752	726	738	706	-6	-6	-6	0.98	0.98	0.96
20090629	5385	4514	4598	4384	486	458	464	437	-6	-6	-6	0.89	0.90	0.86
20100711	17714	17968	17779	18168	688	701	720	691	-6	-6	-6	0.90	0.93	0.94
20100902	11148	8911	8754	8336	719	696	694	644	6	6	6	0.83	0.83	0.78
20150627	5015	4991	4922	5018	461	446	456	444	0	0	0	0.93	0.90	0.90
20180816	5701	5673	5598	5698	455	475	484	460	-6	-6	-6	0.97	0.95	0.97
20200621	10438	10106	9988	10363	775	815	818	789	-6	-6	-6	0.96	0.94	0.95
20200715	30708	30531	28341	30682	1600	1869	1794	1739	-6	-6	-12	0.86	0.88	0.91
20210812	6382	6337	6283	6331	395	417	421	414	-6	-6	-6	0.98	0.97	0.98

表3 桃溪流域20 场洪水过程模拟结果

Tab. 3 Simulation results of 20 flood processes in Taoxi watershed

对桃溪流域三种子流域划分方案下的分布式水文模型进行计算分析。结果显示,对主河道所在 DEM 栅格的高程 进行降低处理的方案 A和B,在20场次洪模拟中有19场合格,而未对 DEM 处理的方案 C 仅有16场合格。上述选 取的2020715号洪水,方案 A、B的确定性系数分别为0.86、0.88,方案 C 的确定性系数为0.91。而方案 C 的峰现时 间为-12h,方案 A、B 均为-6h,方案 A、B 在峰现时间上优于方案 C。结合降水资料,该场洪水期间桃溪站的降水 强度大于上游雨量站,而流域面降水量通过泰森多边形法划分,方案 C 中桃溪站降水量在下游的子流域范围内占比相 对方案 A、B 更大,因此,方案 C 中桃溪站降水显著影响下游汇流速度,导致洪峰提前。19840830号洪水,方案 A、 B 的峰现时间均为6h,方案 C 为18h,由于流域上游雨量站的降水强度大于下游雨量站,且对主河道所在 DEM 栅格 的高程降低处理后的方案 A、B 提取的主河道长度小于方案 C,由此可见方案 C 从上游到下游汇流时间更长,因此计 算的洪峰到达时间更晚。20100902号洪水,三种方案的洪量误差绝对值均超过 20%,因为该场次洪水位于汛期末,且 洪水前连续多日无降水,从而预热期计算出初始土壤含水量较低,进而导致整体洪量偏小,洪峰也均小于实测洪峰。 综上,对主河道所在 DEM 栅格的高程降低处理的方案 A和B,对比未处理的方案 C,在次洪模拟合格率上提升 15%。 同样对主河道所在栅格的 DEM 高程降低处理,划分 7 个子流域的方案 A和划分 11 个子流域的方案 B,在 20场次洪 模拟的平均确定性系数分别为 0.93 和 0.94。方案 A 虽然将更多小面积子流域进行合并,但在次洪模拟精度上并没有明 显下降,说明划分为 7 个子流域是合理可行的。

3 讨论

(1) 桃溪流域由于中下游丘陵区域的河道周边分布大量圩区,基于 DEM 栅格数据的河网提取中,高程较低的圩

区栅格易被误识为河网栅格。同时,由于河堤等建筑抬高主河道栅格高程,导致模拟河网与实际主河道存在偏差。文中高程降低处理方法在桃溪流域的适用性表明:对于地形更加平坦的平原地区来说,对实际水系主河道所在 DEM 栅格进行高程降低处理对河流栅格流向调整的影响更为明显,从而减少周边地形因素对河网提取的影响;而对于地形起伏较大的高山峡谷地区,由于不同河流栅格与周围的山地栅格高程数值相差较大,所以仅进行高程降低处理能否有效,仍需更多实例验证。同时,部分地区存在实际影像资料难以获取等问题,无法提取准确的实际水系位置,则本文方法不再适用,如何增加本文方法在缺资料或无资料流域的适用性,值得进一步研究;

(2)科学合理的子流域划分是流域分布式水文模型构建的基础,子流域面积的大小及其数量的确定尚无公认的准则。从水文过程模拟的角度看,无论是子流域所属的流域亦是更大尺度流域的子流域,划分的最小子流域应能使该子流域范围内产生的地表径流、壤中流和地下径流均能从该子流域的出口断面流出,即子流域出口断面处的河床应切割到基岩,这样水文模型能准确和方便地模拟出以子流域为单元、各子流域间通过河网建立水力联系的实际水文过程。目前,流域出口断面的河道深度以及河道下基岩埋深等相关数据难以获取。同时,本文方法主要面向水文过程模拟,仅从水文学角度进行计算。后续可以考虑结合行政区划边界,并增加从水力学角度考虑的因素进行子流域边界划分,该方面的研究值得拓展深入;

(3)本文以我国一级小流域面积范围标准(50~300 km²)作为桃溪流域划分子流域平均面积的参考,且结合每个 子流域出口均位于河网的干流上的准则,与其他学者研究的一些子流域划分的结果进行了对比,发现这些子流域的面 积都在我国一级小流域面积范围标准内,但对于更多的中小流域而言,以我国一级小流域面积范围标准作为中小流域 的子流域划分标准是否仍然适用,值得进一步研究。

4结论

根据桃溪流域的实际影像资料提取实际水系,对原始 DEM 中主河道栅格进行适当高程降低处理,采用河网密度 法寻找最佳集水面积阈值,再通过不同阈值划分子流域得到最合适的子流域数量,最后进行水文过程模拟比较,主要 结论如下:

1)对主河道所在的 DEM 栅格进行高程降低 40 m 处理,可减少圩区、河堤等局部地形因素对河网提取结果的干扰。基于河网密度法,确定桃溪流域河源集水面积的最佳阈值为 0.81 km²。通过数理方法确定集水面积阈值,有助于避免阈值选取的主观性,提取出的模拟河网可有效减少伪河道的生成。

2)以108 km²作为子流域集水面积阈值,划分出7个子流域,每个子流域的出口均位于河网干流上。子流域平均面积为213.2 km²,划分结果与我国一级小流域面积范围标准(50~300 km²)一致,也与一些其它地区划分的子流域平均面积接近。

3)分别进行 DEM 高程降低后划分 7 个子流域、高程降低后划分 11 个子流域和原始 DEM 划分 7 个子流域三种 不同方案下的新安江模型水文过程模拟, 日尺度下三种方案在训练期确定性系数分别为 0.87、0.87、0.86, 验证期分别 为 0.9、0.91、0.9, 三者精度差别不大; 20 场洪水过程模拟中, 三种方案的合格率分别为 95%、95%、80%, 前两种 方案的合格率明显高于第三种方案, 而前两种方案次洪模拟的平均确定性系数分别为 0.93、0.94, 差别很小, 表明将 桃溪流域划分为 7 个子流域, 有助于提高次洪模拟合格率, 减少分布式水文模型计算的工作量。

5 参考文献

 Nguyen BQ, Vo ND, Le MH et al. Quantification of global Digital Elevation Model (DEM) - A case study of the newly released NASADEM for a river basin in Central Vietnam. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2023, 45: 101282. DOI: 10.1016/j.ejrh.2022.101282.

[2] Yang X, Na JM, Tang GA *et al.* Bank gully extraction from DEMs utilizing the geomorphologic features of a loss hilly area in China. *Frontiers of Earth Science*, 2019, **13**(1). DOI: 10.1007/s11707-018-0700-5.

[3] Lu QH, Xiong LY, Jiang RQ et al. A Drainage Networks Extraction Algorithm by Integrating the Characteristics of Priority-Flood and D8 Algorithm. Geography and Geo-Information Science, 2017, **33** (4): 40-46+2.[卢庆辉, 熊礼阳, 蒋如乔等. 一种融合 Priority-Flood 算法与 D8 算法特点的河网提取方法. 地理与地理信息科学, 2017, **33** (4): 40-46+2.] [4] Wu XL, Xiong LY, Hu EL et al. An Adaptive Approach to Selecting Accumulation Threshold for Gully Networks Extraction from DEMs. Geography and Geo-Information Science, 2017, 33 (04): 93-98.[巫晓玲, 熊礼阳, 胡二乐等. 基于 DEM 的黄土高原沟谷提取汇流阈值自适应研究. 地理与地理信息科学, 2017, 33 (04): 93-98.]

[5] Li ZH, Guo L, Liu RH *et al.* The relationship between the threshold of catchment area for extraction of digital river network from DEM and the river source density. *Journal of Geo-information Science*, 2018, **20**(9): 1244-1251.[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. 地球信息科学学报, 2018, **20**(9): 1244-1251.]

[6] Gao X, Dang QW, Sun XX et al. Small watershed division of the Qilian Mountain National Park based on Arc Hydro Tools. Journal of Lanzhou University(Natural Sciences), 2023, **59**(4): 500-505+511.[高翔, 党倩文, 孙小霞等. 基于 Arc Hydro Tools 的祁连山国家公园小流域划分. 兰州大学学报 (自然科学版), 2023, **59**(4): 500-505+511.]

[7] Li LL, Yang JT, Wu J. A method of watershed delineation for flat terrain using sentinel-2a imagery and DEM: A case study of the Taihu basin. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2019, 8(12): 528. DOI: 10.3390/ijgi8120528.

[8] Liu K, Song C, Ke L et al. Automatic watershed delineation in the Tibetan endorheic basin: A lake-oriented approach based on digital elevation models. Geomorphology, 2020, 358: 107127. DOI: 10.1016/j.geomorph.2020.107127.

[9] Stein JL. An enhanced Pfafstetter catchment reference system. Water Resources Research, 2018, 54(12): 9951-9963. DOI: 10.1029/2018wr023218.

[10] Zhang HP, Cheng XW, Jin L *et al.* A method for dynamical sub-watershed delimitating by no-fill digital elevation model and defined precipitation: A case study of Wuhan, China. *Water*, 2020, **12**(2): 486. DOI: 10.3390/w12020486.

[11] Stanislawski LV, Shavers EJ, Wang S et al. Extensibility of U-Net neural network model for hydrographic feature extraction and implications for hydrologic modeling. Remote Sensing, 2021, 13(12): 2368. DOI: 10.3390/rs13122368.

[12] Zhong XM, Zhong KY, Gao YT et al. Effect of Land Use Caused by Sub-watershed Divison in SWAT Model on Runoff and Sediment Simulation. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(6): 52-58.[钟小敏, 钟科元, 高怡婷等. SWAT 模型子流域划分引起的土地利用变化对径流和输沙模 拟结果的影响.水土保持研究, 2022, 29(6): 52-58.]

[13] Tripathi MP, Raghuwanshi NS, Rao GP. Effect of watershed subdivision on simulation of water balance components. *Hydrological Processes*, 2006, 20(5): 1137-1156. DOI: 10.1002/hyp.5927.

[14] Lin B, Chen X, Yao H. Threshold of sub-watersheds for SWAT to simulate hillslope sediment generation and its spatial variations. *Ecological Indicators*, 2020, **111**: 106040. DOI: 10.1016/j.ecolind.2019.106040.

[15] Hu LW, Wang XJ, Luo DG et al. Effect of sub-watershed partitioning on flow, sediment and nutient predictions Case study in Fengle river watershed. Advances in Water Science, 2007, (2): 235-240. [胡连伍, 王学军, 罗定贵等. 不同子流域划分对流域径流、泥沙、营养物模拟的影响一丰乐河流域个例研究. 水科 学进展, 2007, (2): 235-240.]

[16] Li CF, Feng XZ, Zhao R. The Methods and Application of Automatically Extracting Stream Network of Watershed. J Lake Sci, 2003, (3): 205-212. DOI: 10.18307/2003.0303.[李昌峰, 冯学智, 赵锐, 流域水系自动提取的方法和应用. 湖泊科学, 2003, (3): 205-212.]

[17] Wang Y, Zhong P, Zhu F *et al.* A modified Xin'anjiang model and its application for considering the regulatory and storage effects of small-scale water storage structures. *Journal of Hydrology*, 2024, 630: 130675. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2024.130675.

[18] Harsha J, Ravikumar AS, Shivakumar BL. Evaluation of morphometric parameters and hypsometric curve of Arkavathy river basin using RS and GIS techniques. *Applied Water Science*, 2020, 10(3): 86. DOI: 10.1007/s13201-020-1164-9.

[19] Zhang MW, Lu CW. Spatial Variabilities of Topsoil Organic Carbon in Fengle River Basin. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, 27(7): 1576-1583.[张梦薇, 吕成文. 丰乐河流域表层土壤有机碳空间变异特征研究. 长江流域资源与环境, 2018, 27(7): 1576-1583.]

[20] Yao BG, Zhou WB. Research on hydrological characteristics extraction of Chanba Basinbased on DEM and ArcGIS. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2017, 28(6): 8-13.[姚炳光,周维博. 基于 DEM 和 ArcGIS 的浐灞流域水文特征提取研究. 水资源与水工程学报, 2017, 28(6): 8-13.]
[21] He C, Yang CJ, Turowski JM et al. A global dataset of the shape of drainage systems. Earth System Science Data, 2024, 16(2): 1151-1166. DOI: 10.5880/GFZ.4.6.2023.004.

[22] Said S, Siddique R, Shakeel M. Morphometric analysis and sub-watersheds prioritization of Nagmati River watershed, Kutch District, Gujarat using GIS based approach. *Journal of Water and Land Development*, 2018. DOI: 10.2478/jwld-2018-0068.

[23] 解河海 TOPMODEL 的应用及参数不确定性研究[学位论文]. 南京: 河海大学, 2006.

[24] Li BQ, Zhu CC, Liang ZM et al. Integration of process forecast, real-time correction and probabilistic forecast of inflow floods in Houziyan Reservoir of Dadu River. J Lake Sci, 2023, **35** (4): 1481-1490. DOI: 10.18307/2023.0443.[李彬权,朱畅畅,梁忠民等. 大渡河猴子岩水库入库洪水过程预报-实时校正-概率预报集成 湖泊科学, 2023, **35** (4): 1481-1490.]

[25] Fan HX, He HD, Xu LG et al.Simulation and attribution analysis based on the long-short-term-memory network for detecting the dominant cause of runoff variation in the Lake Poyang Basin. *J Lake Sci*, 2021, **33**(3): 866-878. DOI: 10. 18307/2021. 0319.[范宏翔,何菡丹,徐力刚等. 基于长短记忆模型的鄱阳 湖流域径流模拟及其演变的归因分析. 湖泊科学, 2021, **33**(3): 866-878.]

[26] Anish AU, Baiju KR, Thomas PK et al. Status of GIS-enabled morphometric analysis of river basins of Kerala, Southern India: A review and assessment. Regional Studies in Marine Science, 2021, 44: 101792. DOI: 10.1016/j.rsma.2021.101792.

[27] Li F, Zhou Y, Chen R *et al.* Quantitative analysis of topographic features of Loess Tableland slopes based on DEM. *Scientia Geographica Sinica*, 2023, **43**(5): 932-942.[李凡,周毅,陈荣等. 基于 DEM 的黄土塬坡地形特征量化分析研究. 地理科学, 2023, **43**(5): 932-942.]

[28] Qiu LJ, Zheng FL, Yin RS. Effects of DEM resolution and watershed subdivision on hydrological simulation in the Xingzihe watershed. Acta Ecologica Sinica, 2012, **32**(12): 3754-3763.[邱临静, 郑粉莉, Yin Runsheng. DEM 栅格分辨率和子流域划分对杏子河流域水文模拟的影响. 生态学报, 2012, **32**(12): 3754-3763.]

[29] Huo WB, Li ZJ, Li QL. Hydrological models comparison and ensemble forecasting in semi-humid watersheds. *J Lake Sci*, 2017, **29**(6): 1491-1501. DOI:
 10. 18307 /2017.0621.[霍文博,李致家,李巧玲. 半湿润流域水文模型比较与集合预报. 湖泊科学, 2017, **29**(6): 1491-1501.]