

周举, 彭光敏, 王绍旭, 等. 多源 DEM 数据在平原流域河网提取中的对比[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(1): 132-142. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.01.011

ZHOU Ju, PENG Guangmin, WANG Shaoxu, et al. Comparison of multi-source DEM data in river network extraction in plain watershed [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(1): 132-142. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.01.011

多源 DEM 数据在平原流域河网提取中的对比

周 举^{1,2}, 彭光敏³, 王绍旭⁴, 聂远雄⁴, 陈炼钢¹, 施 勇¹

(1. 南京水利科学研究院 水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210029; 2. 河海大学 水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 3. 四川省水利规划研究院, 四川 成都 610000; 4. 桂林市水利电力勘测设计研究院, 广西 桂林 541001)

摘要: 【目的】为研究不同数字高程模型 (DEM) 在平原区提取河网时的适用性, 【方法】收集 ALOS DEM、ASTER GDEM、SRTM DEM 3 种 DEM 数据源, 选择 7 个代表性平原河网流域进行研究。通过河网套合差计算, 分析各 DEM 在平原流域的河网提取精度。【结果】结果显示: 各个 DEM 数据在地势较平坦区、湖泊区和城市区提取河网结果均存在较大误差; 基于 ALOS DEM 提取的数字河网精度最高; 使用 Arc Hydro Tools 的 DEM 修正功能, 可明显提高数字河网的精度, 修正后套合差均小于 3%; ASTER GDEM 在丘陵区的精度高于 SRTM DEM, SRTM DEM 在湖泊、农田、城市等地形情况下精度高于 ASTER GDEM; ALOS DEM 提取河网的最佳集水面积阈值为 50 000, ASTER GDEM 最佳集水面积阈值则为 20 000, SRTM DEM 提取河网的最佳集水面积阈值则为 5 000。【结论】研究选取多源 DEM, 从多角度分析提取数字河网的影响, 可以为平原区数字河网提取提供参考。

关键词: DEM 数据; 多源; ArcGIS; 河网提取; DEM 修正; 河网精度; 影响因素

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.01.011

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TV11; P208

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)01-0132-11



Comparison of multi-source DEM data in river network extraction in plain watershed

ZHOU Ju^{1,2}, PENG Guangmin³, WANG Shaoxu⁴, NIE Yuanxiong⁴, CHEN Liangang¹, SHI Yong¹

(1. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, Jiangsu, China; 2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu, China; 3. Sichuan Water Resources Planning and Research Institute, Chengdu 610000, Sichuan, China; 4. Guilin Design and Research Institute, Guilin 541001, Guangxi, China)

Abstract: [Objective] To investigate the suitability of different Digital Elevation Models (DEMs) for extracting river networks in plain areas, [Methods] ALOS DEM, ASTER GDEM, and SRTM DEM data sources were collected. Seven representative watersheds were selected for the study, and the accuracy of river network extraction was analyzed using the fitting difference calculation. [Results] The result showed that all DEM data exhibited significant errors in extracting river networks in flat terrain,

收稿日期: 2023-07-29; 修回日期: 2023-11-23; 录用日期: 2023-11-30; 网络出版日期: 2024-01-07

基金项目: 广西重点研发计划 (AB22080093, AB22035075); 江苏省水利科技项目 (2021033); 国家重点研发计划课题 (2023YFC320900001)

作者简介: 周 举 (1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事水文与水资源研究。E-mail: 404426902@qq.com

通信作者: 聂远雄 (1966—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事水利水电工程研究。E-mail: 273649548@qq.com

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

lake areas, and urban areas. ALOS DEM demonstrated the highest accuracy in extracting digital river networks. The precision of the digital river network can be significantly improved by using the DEM correction function of Arc Hydro Tools. ASTER GDEM exhibited higher accuracy in hilly areas compared to SRTM DEM, while SRTM DEM showed higher accuracy in lake, farmland, and urban terrain conditions compared to ASTER GDEM. The optimal threshold for watershed area extraction using ALOS DEM was 50, 000, for ASTER GDEM it was 20, 000, and for SRTM DEM it was 5, 000. [Conclusion]By selecting multiple DEM sources and analyzing the extraction of digital river networks from different perspectives, this study provides valuable insights for extracting digital river networks in plain areas.

Keywords: DEM data; multi-source; ArcGIS; river network extraction; DEM reconditioning; river network accuracy; influencing factors

0 引 言

基于数字高程地形开展河网和流域的提取划分,是水文、水生态环境研究的重点,也是智慧水利和数字孪生发展的重要保障^[1]。因此,数字河网的精度尤为关键。随着地理信息系统(Geographic Information System, GIS)和数字化技术的不断发展,运用数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)进行水文信息和数字河网、流域的提取^[2-4]已经成为一种快速可行的方法。目前,绝大多数的数字河网提取和子流域的划分都是基于 DEM 数字高程模型来实现的。

DEM 能反映一定分辨率下的局部水文、地形、地貌特征,DEM 数据类型包括不规则三角网(TINs)、矢量等高线及栅格等,其中数字河网提取及子流域划分主要使用栅格数据。现如今可获取的 DEM 数据种类繁多,ALOS DEM、ASTER GDEM、SRTM DEM 等均为常用 DEM 数据源^[5-7]。

基于 DEM 进行数字河网提取的方法,主要分为 3 类:一是使用矩形窗口扫描数字高程模型(DEM)确定洼地,并将其中的栅格单元标记为水系的一部分。这种方法容易导致生成的水系不连续,特别是在地形起伏小的平原地区和地形复杂区域。二是坡面流模拟方法。根据地形高程数据(如 DEM 矩阵),通过计算每个像元的坡度和坡向,确定水流的路径。高坡度和指向下坡方向的像元将成为水流的来源。该方法基于水文学原理来确定水流路径,在目前被广泛采用。然而,在数字高程模型中,存在着凹陷的栅格单元和平坦地区,这会导致水流方向难以确定。因此,在使用该方法前,需要对 DEM 进行预处理,以消除局部洼地。三是谷线搜索方法。该方法以 DEM 中的最低点为起点,沿着河谷向上延伸,逐步确定河网的分布。目前可以进行 DEM 数字流域提取的模型和软件,主要有 ArcGIS 软件中的 Hydrology 模块、ArcSWAT、YOPZA 分布式水文模型、ArcHydroTools 等。已有学者对各软件的优

缺点进行了研究^[8-10],目前使用较多的为 ArcGIS 中的 Hydrology 模块和 ArcHydroTools 模型^[11]。

国内外许多学者开展了基于 DEM 提取数字河网的研究,但目前的研究主要分析各 DEM 在某具体流域的适用性,且以山区流域为主,较少研究分析各 DEM 在平原区适用性。众多研究结果显示,天然流域在山地区域的河网较易提取且精度较高,因其地势起伏较大,汇流累积计算值较为精准^[12-13]。但在平原区域,因地势平缓且人类活动影响较大,城市建筑、农田、圩区等区域以及人工河渠严重影响数字河网精度,结果往往不尽如人意,易造成部分河道断裂、异常变向、生成平行河道等,使子流域划分与实际不符,对此常规 DEM 处理方法已不再适用。对此,也有学者对其进行了大量研究。通过微调平坦栅格单元的数字高程,可以确定栅格单元的水流方向,进而确定整体的汇流水系。通过叠加主干河道,创建栅格点群自动连接成水系的源头追索模型,成功提取河网,避免了因地势平坦造成流向难以辨别的问题。研究方法主要从高程修正、流向修正及 DEM 源的变换入手,通过叠加矢量河网作为 DEM 提取河网的辅助信息,对 DEM 进行强迫性修正,最终提取与实际相符的河网水系。其中,Agree 算法和 Burn-in 算法是两种常用的高程修正、流向修正的河网提取方法。Agree 算法通过微调具有重叠部分的矢量河网的高程值来实现汇水;Burn-in 算法则保持河道栅格像元的值不变,通过调整周围栅格的高程来实现汇水^[14]。

不同的 DEM 源由于采样方法和分辨率不同,在平原区的精度也各不相同,为选择合适的 DEM 提取精确的数字河网,研究各 DEM 源在平原区的适用性十分迫切。本文选取 ALOS DEM、ASTER GDEM、SRTM DEM 3 种不同 DEM 数据源,在 7 个平原河网流域,提取流域内干流和主要支流进行对比研究,试分析各 DEM 数据源在平原区的总体适用性。使用

ArcGIS 水文分析模块提取河网, 目视法与套合差计算^[15]结合, 研究平原区不同 DEM 数据提取出的数字河网的精度, 并通过 Arc Hydro Tools 中 DEM Reconditioning 模块及 Landsat8 卫星图划定的矢量河网, 使用 Agree 算法进行 DEM 修正, 研究修正后各 DEM 在平原区适用性。并分析各 DEM 数据源在不同地形下的适用性。

1 研究区域选取

本文研究多源 DEM 数据在平原区的河网提取比较, 选取南河流域、松滋河流域、裕溪河流域、滁河流域、秦淮河流域、太浦河流域及灵河流域等 7 个代表流域进行研究。

南河、松滋河、裕溪河、滁河、秦淮河均位于长江流域平原区。南河为长江支流岷江右岸支流, 松滋

河为荆江河段分泄江流的主要河道之一, 裕溪河是长江下游左岸一级支流, 滁河为长江下游左岸一级支流, 秦淮河为长江下游右岸支流。太浦河是太湖流域最大的人工河道之一, 其沿线地形平坦, 河湖众多, 大小湖荡共 205 个, 水系极为复杂。灵河, 属于珠江流域的桂江水系, 位于广西壮族自治区兴安县境内。灵河流向由东向西, 将兴安县东面的湘江和兴安县西面的漓江相连, 本次选取平原部分灵河为研究对象。7 个研究区如图 1 所示。底图高程值为 ALOS DEM 数据高程值。

2 DEM 数据选取与研究方法

2.1 DEM 选取

本次研究所选用 DEM 来源于国家地理空间数据

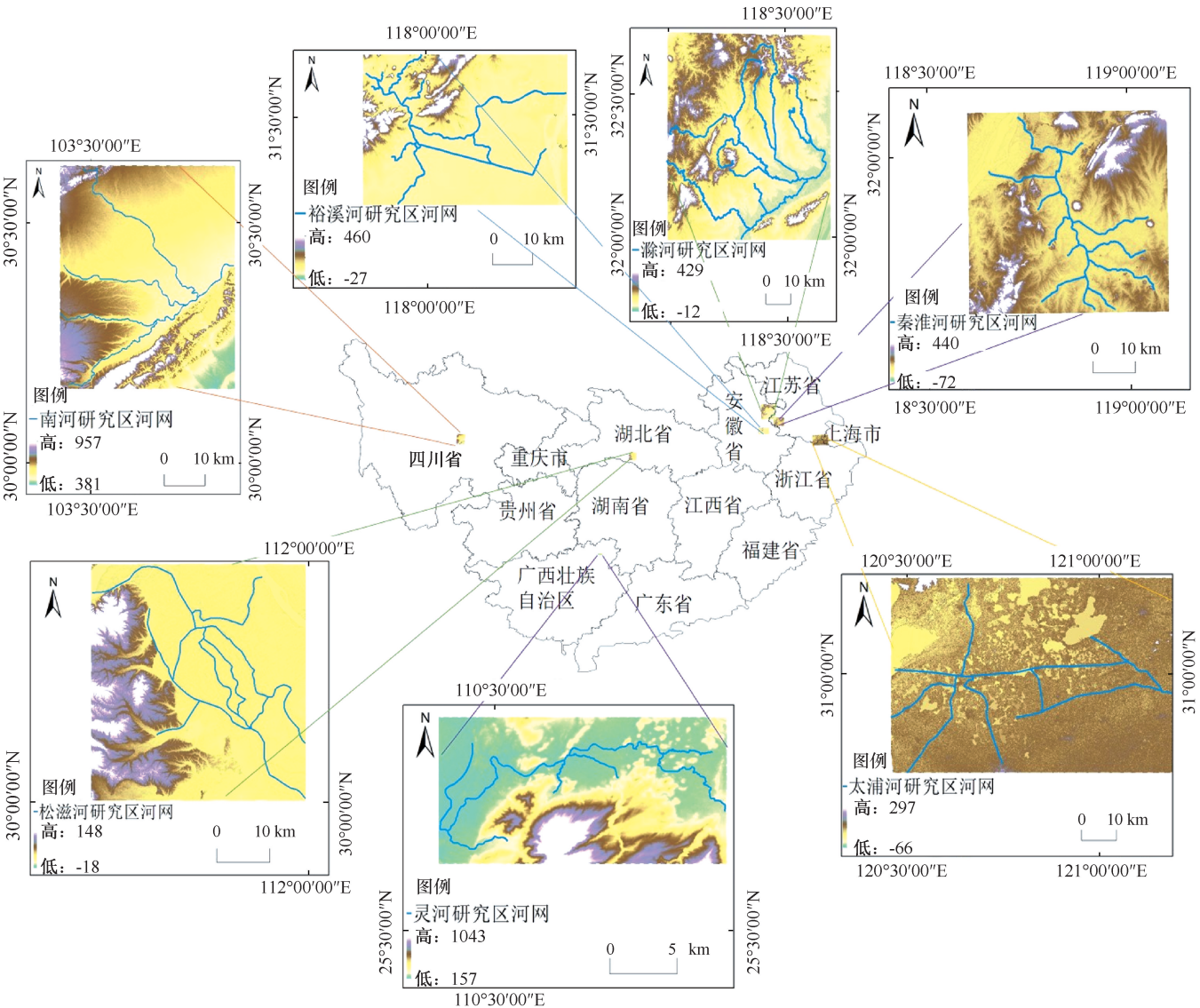


图 1 研究区示意

Fig. 1 Schematic map of the study area

云(<http://www.gscloud.cn/>)和美国国家航空航天局(<https://earthdata.nasa.gov/>)。选取常用的 ALOS DEM、ASTER GDEM、SRTM DEM 3 种 DEM 数据进行对比。DEM 数据基础信息如表 1 所列。

表 1 DEM 数据基础信息

Table 1 DEM data basic information

| 数据源 | 水平分辨率/m | 垂直分辨率/m | 开发机构 | 观测类型 |
|------------|---------|---------|-----------|--------|
| ALOS DEM | 12.5 | 12.5 | JAXA | 对地观测卫星 |
| ASTER GDEM | 30 | 20 | NASA/METI | 对地观测卫星 |
| SRTM DEM | 90 | 16 | NASA/NIMA | 航天飞机雷达 |

ALOS DEM 数据, 是 ALOS (Advanced Land Observing Satellite, 2006 年发射) 卫星相控阵型 L 波段合成孔径雷达 (PALSAR) 采集的高程数据。ALOS 是日本宇宙航空研究所 (JAXA) 的项目。其水平分辨率和垂直分辨率均为 12.5 m。

ASTER GDEM 为美国航空航天局 (NASA) 与日本经济产业省 (METI) 共同推出的最新的地球电子地形数据, 该数据是根据 NASA 的新一代对地观测卫星 Terra 的详尽观测结果制作完成的。ASTER GDEM 的水平分配率为 30 m, 垂直分辨率为 20 m。

SRTM DEM 是美国航空航天局 (NASA) 和国防部国家测绘局 (NIMA) 以及德国与意大利航天机构合作完成联合测量, 由美国发射的“奋进”号航天飞机上搭载 SRTM 系统完成。SRTM 数据为雷达影像数据。亚洲区域的 SRTM 数据水平分辨率为 90 m, 垂直分辨率为 16 m。

2.2 研究方法

2.2.1 河网提取

本文使用 ArcGIS 软件的 Hydrology 水文分析工具进行数字河网提取。为方便研究, 对流域 DEM 数据进行矩形裁剪, 使各数据源范围一致。首先对 DEM 进行填洼和削峰, 移除数据中的异常凹陷点和凸起点, 避免后续过程中产生错误流向; 然后使用 D8 算法, 即坡面累积法, 进行 Flow Direction 和 Flow Accumulation 计算, 生成流向和流量栅格。基于流量栅格, 在栅格计算器中设置合适阈值以提取栅格河网。

2.2.2 最佳阈值计算

张世安等^[16]对阈值设置的方法进行了大量研究, 试错法是较早的确定阈值的方法。孔凡哲等^[17]根据集水阈值与河网密度的变化, 提出最佳集水阈值可选择河网密度变化趋于平缓时所对应的阈值, 此法易于操作, 能确定最佳阈值的近似范围。叶章蕊等^[18]通

过拟合集水阈值与河网密度之间函数的一阶导数然后求解得到转折点的方法来确定最佳集水阈值。关颖慧等^[19]则进一步求解拟合函数的二阶导数然后求拐点以获取最佳的集水阈值。

拟合曲线拐点较难寻找且受主观因素影响较大^[20], 为减小误差, 研究采用孔凡哲等的趋近方法和均值变点分析法选取流域的最佳集水面积阈值。

均值变点分析法分析步骤为: 针对 $n (n \geq 2)$ 序列, 变点 $X_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 将序列分为两段, 计算两段序列的离差平方和并叠加得到 S_i , 总样本离差平方和 S 与 S_i 的差值的最大值点为最佳集水面积, 其计算公式如下

$$S_i = \sum_{t_1=1}^{i-1} (x_{t_1} - \bar{x}_{i_1})^2 + \sum_{t_2=i}^n (x_{t_2} - \bar{x}_{i_2})^2 \quad (1)$$

$$S = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (2)$$

式中, \bar{x}_{i_1} 、 \bar{x}_{i_2} 、 \bar{x} 分别为变点左侧平均值、右侧平均值和样本总体平均值; S_i 为变点两侧离差平方和之和; S 为总样本离差平方和。

通过设置多个阈值拟合 $y = kx^a$, 式中, x 为集水面积阈值, y 为数字河网密度, 总样本的离差平方和 S 与变点两侧离差平方和之和 S_i 的差值随着阈值的增加呈先涨后落的趋势, 故各曲线均存在一个峰值点, 即最佳集水面积阈值点。

2.2.3 河网精度计算

利用卫星影像, 手工绘制河网, 并与实际地区的河网进行水系对比验证, 确保真实河网的准确性。使用河网套合差来描述基于 DEM 提取的数字河网与真实河网的吻合度。数字河网与真实河网相交产生细碎多边形, 多边形面积之和与流域总面积之比即为河网套合差。数字河网套合差示意图如图 2 所示。

河网套合差数学计算公式可以表示为

$$D = \frac{\sum A_i}{S} \times 100\% \quad (3)$$

式中, D 为套合差; A_i 为真实河网与基于 DEM 提取出的数字河网叠加产生的多边形面积 (km^2); S 为河网流域面积 (km^2)。套合差越小则数字河网与真实河网吻合度越高。

2.2.4 DEM 修正

D8 算法的基本原理为在流入与之相邻的 8 个网格中, 采用最陡坡度确定水流的方向。但在平原区域, 坡度变化较小, 易导致栅格有多个可能方向, 加上人类活动剧烈, 城市和人工河道修建, 无法准确判

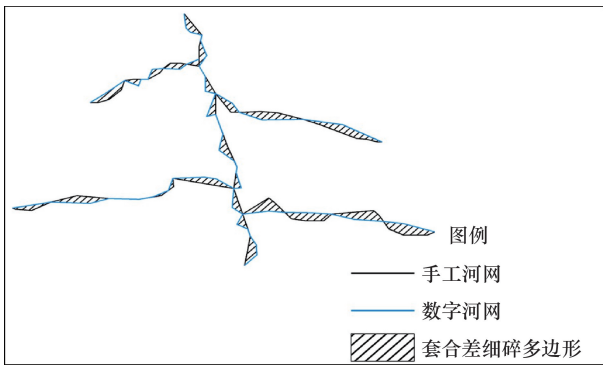


图 2 数字河网套合差示意

Fig. 2 Schematic diagram of digital river network sleeve difference

断流向, 易出现错误河道和平行河道。本文使用基于 AGREE 算法的 Arc Hydro Tools 工具 DEM Reconditioning 模块, 对 DEM 进行修正, 并研究修正后 DEM 所提取河网的精度变化。

该模块通过输入 DEM 及河流要素, 设置缓冲值和平滑值, 运算之后会将河流刻入到 DEM 中, 参数说明如下。

(1) Stream Buffer: 用于对河流要素进行缓冲的单元格数。

(2) Smooth drop: 指河流要素在垂直方向上将要下降的值, 用于控制 DEM 值在缓冲区边界和河流要素之间的平滑效果。正值表示下降, 负值表示上升。

(3) Sharp drop: 指河流要素在垂直方向上额外下降或上升的值。在相同 Sharp drop 条件下, 较大的 Smooth drop 值会使得河道矢量线所经过栅格的 DEM 值骤减, 缓冲区内与区外形成较大落差。当 Smooth

drop 值相同时, 较大的 Sharp drop 值会使河道 DEM 值更低, 缓冲区内 DEM 值不受其控制。河流要素经过的栅格的高度值为原始 DEM 值减去 (Smooth drop + Sharp drop)。河流缓冲区的高度值也较原来 DEM 有所减少。

3 结果与分析

3.1 多源 DEM 对数字河网提取的影响

3.1.1 各 DEM 数据对比

本文截取各流域相同大小的矩形区域为研究区域。不同 DEM 数据进行填洼和削峰后的基本特征如表 2 所列。ASTER GDEM 的最小高程较另外两种偏小, 最大高程较另外两种偏大, 在太浦河区域则相反。根据高程绘制高程概率分布图, 结果表明, ALOS DEM 数据和 SRTM DEM 所表达的地形特征状况较为接近, ASTER GDEM 与其他两种有偏差, 主要表现在最大概率高程值所占比例较大。图 3 展示南河研究区和太浦河研究区的高程概率分布, 其他研究区结论与上述相同。

3.1.2 最佳集水面积阈值确定

集水面积阈值的确定影响数字河网的疏密长短, 阈值设置过小, 会产生实际不存在的伪河道, 阈值设置过大会导致河网缺失。为保障提取出的数字河网疏密一致, 不影响后续套合差计算, 采用孔凡哲等^[17]的趋近方法和均值变点分析法相结合的方式以选取流域的最佳集水面积阈值。因当数字河网较疏或者较短时, 会使得套合差计算时的细碎多边形面积减少, 造成精度更高的假象, 当无法保证数字河网长短疏密完

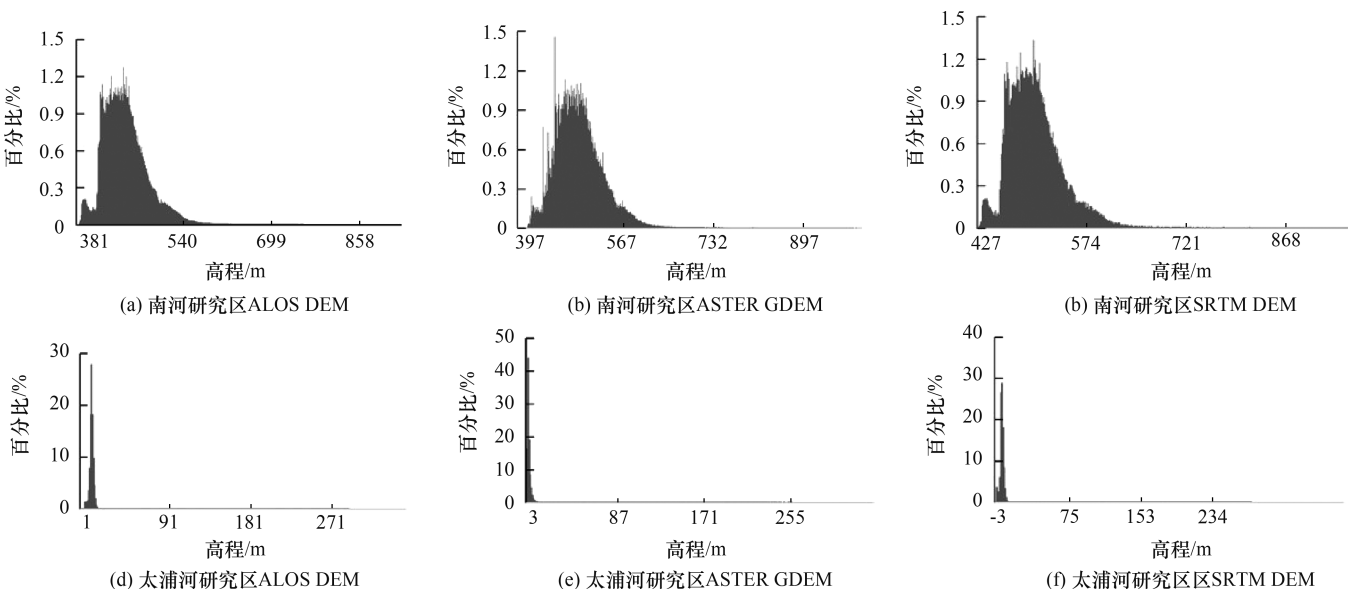


图 3 南河、太浦河研究区各 DEM 数据高程概率分布

Fig. 3 Elevation probability distribution of DEM data in the Nanhe and Taipu River research areas

表 2 填洼和削峰后 DEM 数据特征

Table 2 DEM data characteristics after filling and peak shaving

| 流域 | 数据源 | 最小高程/m | 最大高程/m | 平均高程/m | 标准差/m |
|-------|------------|--------|--------|--------|-------|
| 南河流域 | ALOS DEM | 381 | 957 | 470 | 50.1 |
| | ASTER GDEM | 275 | 998 | 509 | 52.3 |
| | SRTM DEM | 427 | 996 | 513 | 49.8 |
| 松滋河流域 | ALOS DEM | -18 | 148 | 31 | 25.4 |
| | ASTER GDEM | -88 | 196 | 47 | 25.2 |
| | SRTM DEM | 21 | 165 | 53 | 25.5 |
| 裕溪河流域 | ALOS DEM | -27 | 460 | 20 | 40.3 |
| | ASTER GDEM | -137 | 480 | 17 | 41.9 |
| | SRTM DEM | -14 | 441 | 20 | 40.2 |
| 滁河流域 | ALOS DEM | -12 | 429 | 52 | 32.1 |
| | ASTER GDEM | -140 | 439 | 49 | 45.6 |
| | SRTM DEM | -6 | 423 | 52 | 44.6 |
| 秦淮河流域 | ALOS DEM | -72 | 440 | 29 | 33.5 |
| | ASTER GDEM | -102 | 448 | 30 | 34.4 |
| | SRTM DEM | -46 | 431 | 28 | 33.3 |
| 太浦河流域 | ALOS DEM | -66 | 297 | 14 | 6.9 |
| | ASTER GDEM | 1 | 277 | 7 | 6.6 |
| | SRTM DEM | -36 | 281 | 7 | 6.7 |
| 灵河流域 | ALOS DEM | 157 | 1 043 | 296 | 164.4 |
| | ASTER GDEM | 49 | 1 040 | 310 | 165.0 |
| | SRTM DEM | 180 | 1 048 | 317 | 165.9 |

全一致时, 选取稍密和稍长情况下的河网, 多出的河道不会与真实河网形成细碎多边形, 从而不影响套合差计算。

根据趋近方法得出, 尝试各集水面积阈值, 最终尝试结果为, ALOS DEM 提取河网的最佳集水面积阈值为 50 000 左右, ASTER GDEM 最佳集水面积阈值为 20 000 左右, SRTM DEM 提取河网的最佳集水面积阈值则为 5 000 左右。

对 ALOS DEM、ASTER GDEM、SRTM DEM 计算河网密度与集水面积阈值拟合, 拟合公式的决定系数 R^2 均大于 0.99, 表征其相关性较好。图 4 展示南河研究区拟合图, 其他研究区采用相同方法, 不一一赘述。由均值变点分析法计算得到, 采用 ALOS DEM 提取河网的最佳集水面积阈值为 50 000, ASTER

GDEM 最佳集水面积阈值则为 20 000, SRTM DEM 提取河网的最佳集水面积阈值则为 5 000, 与趋近方法所得结果一致。

3.2 数字河网精度对比

3.2.1 套合差计算

基于不同 DEM 数据提取出的数字河网与真实河网的套合差结果如表 3 所列。研究表明, 当套合差大于 3% 时, 吻合度较差, 而基于 3 种 DEM 提取出的数字河网在除南河研究区域外的 6 个流域的套合差均大于 3%, 秦淮河流域和太浦河流域数字河网与真实河网的偏差尤为严重。

由套合差结果定量分析可知, 基于 ALOS DEM 提取的数字河网精度最高, 基于 ASTER GDEM 提取的数字河网精度最低。

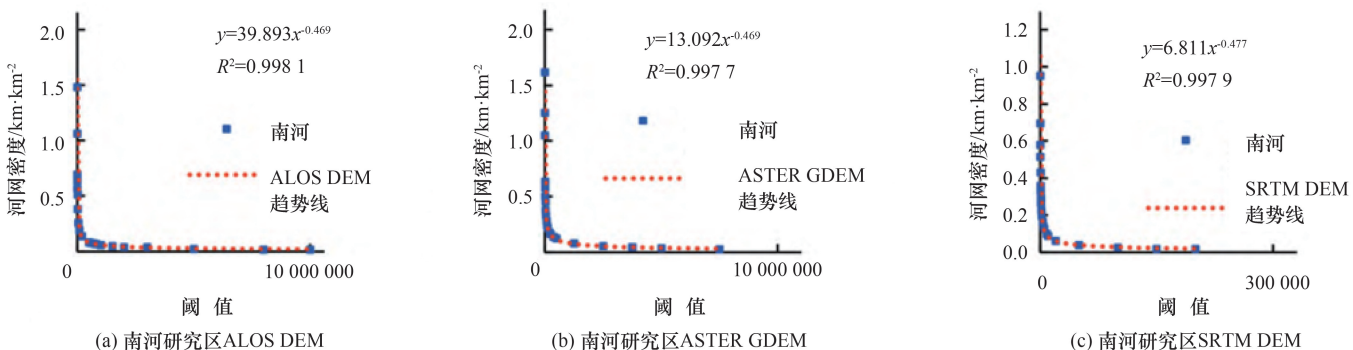


图 4 河网密度与集水面积阈值拟合

Fig. 4 Fitting of river network density and catchment area threshold

表 3 基于各 DEM 数字河网套合差

Table 3 Based on the set difference of each DEM digital river network

| 流 域 | 各 DEM 数据源套合差/% | | |
|-------|----------------|------------|----------|
| | ALOS DEM | ASTER GDEM | SRTM DEM |
| 南河流域 | 1.01 | 2.80 | 1.09 |
| 松滋河流域 | 4.69 | 11.61 | 4.68 |
| 裕溪河流域 | 4.90 | 7.32 | 4.39 |
| 滁河流域 | 3.28 | 3.79 | 3.75 |
| 秦淮河流域 | 22.15 | 24.28 | 23.12 |
| 太浦河流域 | 23.34 | 24.69 | 24.13 |
| 灵河流域 | 4.05 | 6.83 | 5.01 |

将 3 种 DEM 数据提取的数字河网与真实河网对比, 并叠加无偏移卫星影像地图, 由于篇幅原因, 本文只展示了两个研究区各 DEM 提取结果, 如图 5 所示, 采用 DEM 据提取平原区的水系河网, 在湖泊区易出现平行河道, 在河流交汇区、农田区、城市区等地方, 易出现河道断裂、河道偏移等问题。基于 ASTER GDEM 提取的数字河网精度最低, 基于 SRTM DEM 提取的数字河网与基于 ALOS DEM 提取的数字河网较为接近, 精度较之稍低。

3.2.2 修正 DEM 后数字河网变化

使用 Arc Hydro Tools 工具 DEM Reconditioning 模块进行 DEM 修正, 本次研究中 Stream Buffer 取值为 5, Smooth drop 取值为 10, Sharp drop 取值为 1 000, 该取值情形下修正效果较好。修正后的各数字河网套合差计算结果如表 4 所列。

进行 DEM 修正后数字河网与真实河网的套合差

表 4 各 DEM 修正后数字河网套合差

Table 4 The digital river network sleeve difference after each DEM is corrected

| 流 域 | 各 DEM 数据源套合差/% | | |
|-------|----------------|------------|----------|
| | ALOS DEM | ASTER GDEM | SRTM DEM |
| 南河流域 | 0.19 | 0.27 | 0.25 |
| 松滋河流域 | 0.47 | 0.58 | 0.55 |
| 裕溪河流域 | 0.41 | 0.63 | 0.54 |
| 滁河流域 | 0.27 | 0.39 | 0.34 |
| 秦淮河流域 | 2.57 | 2.72 | 2.69 |
| 太浦河流域 | 2.53 | 2.69 | 2.67 |
| 灵河流域 | 0.84 | 0.92 | 0.90 |

较原先明显降低, 秦淮河流域和太浦河流域可以提取出较准确的数字河网, 其他 5 个流域套合差均小于 1%。DEM 修正后所提取河网虽仍与真实河网有差别, 但已经基本一致, 主河道基本重叠, 河道偏移和交汇点错误等问题得到明显改善。基于 ALOS DEM 提取的数字河网修正对比结果如图 6 所示。以数字河网提取效果较差的太浦河研究区为例, 湖泊区等复杂水系对数字河网提取的干扰大大降低, 城区河道提取精度也得到较大提高, 能够很好地提取出复杂水系处的干流。试验表明, DEM 修正功能可以很好地提高平原区提取数字河网的准确度。其中, 仍是基于 ALOS DEM 的数字河网套合差最小, 表明修正后在平原区提取数字河网时依旧是 ALOS DEM 适用性最高; ASTER GDEM 在修正后仍然表现最差。

3.3 地形地貌对数字河网提取的影响

地形地貌对数字河网的影响较大^[21], 且由上文

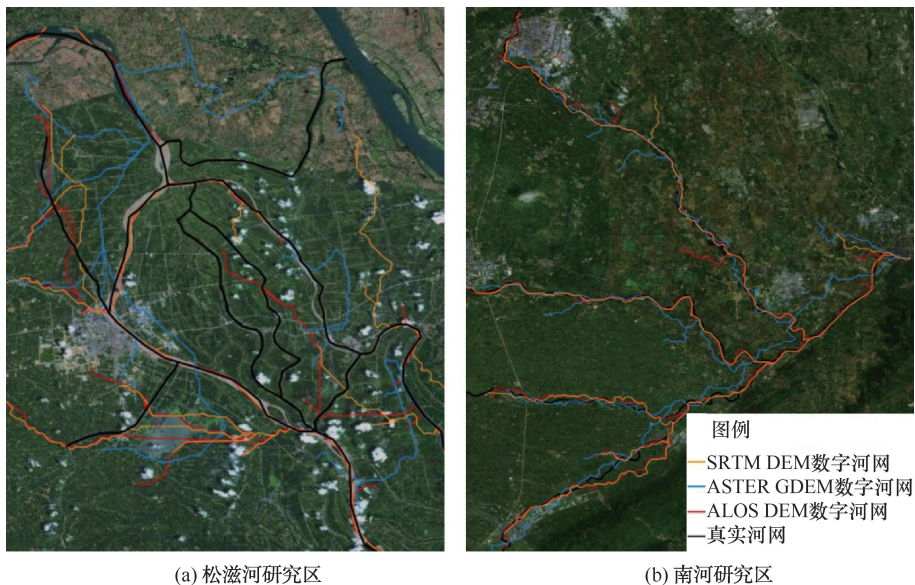


图 5 松滋河、南河研究区各 DEM 数字河网对比

Fig. 5 Comparison of DEM digital river networks between Songzi River and Nanhe River

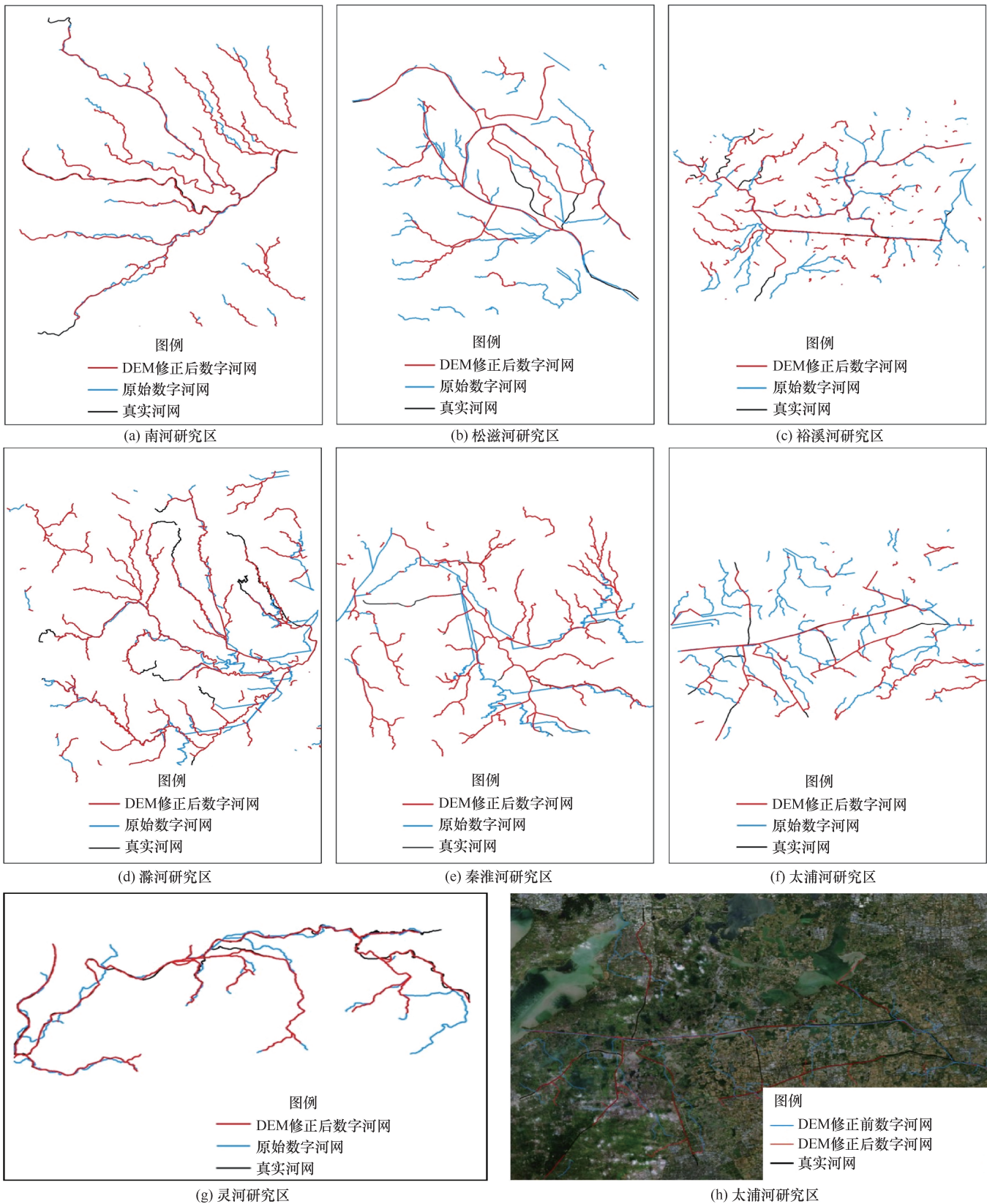


图 6 修正前后数字河网对比

Fig. 6 Comparison of digital river network before and after correction

研究可知, 数字河网在城市、农田等地形地貌情况下确实存在误差很大的情形。为定量分析地形地貌对数

字河网提取的影响, 采用套合差分析研究区各类地形的河网提取情况。根据卫星影像资料, 筛选出丘陵区、

城市区、湖泊区和农田区 4 种典型地形地貌, 分别计算各情况下的数字河网套合差, 4 种分区如图 7(a)~(d)所示, 并给出滁河研究区分区示意[见图 7(e)]。

各地形地貌下套合差结果如表 5 所列, 可以得出在同一流域内丘陵区提取效果最佳, 印证地形起伏越大越有利于河网的提取, 城市、湖泊、农田均不利于河网的提取。其中秦淮河流域城市密集, 人类活动严重影响河网的提取。太浦河流域存在众多湖泊, 导致

流向计算困难, 无法准确提取河网。这也印证了基于 Arc Hydro Tools 的 DEM 修正功能的作用, 通过高程和流向的强迫修正, 降低了城市、湖泊、农田等地形对流向计算的影响, 从而使数字河网更加贴近真实水系。ALOS DEM 在各地形表现均最佳, 在丘陵区 ASTER GDEM 的精度稍高于 SRTM DEM, 在城市区、湖泊区、农田区则为 SRTM DEM 精度高于 ASTERGDEM。

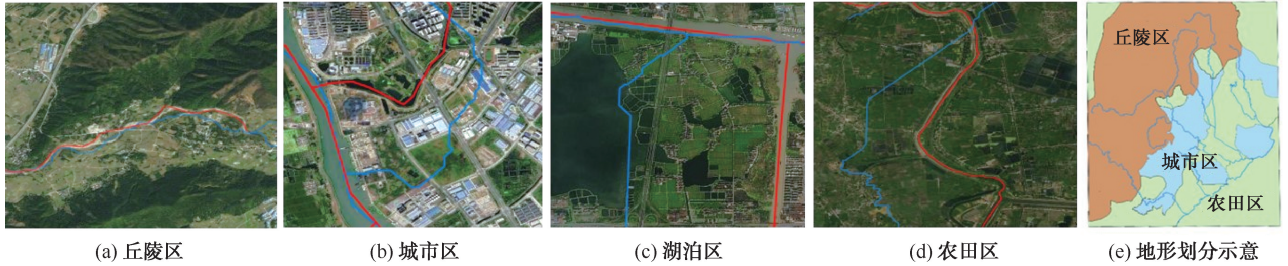


图 7 地形地貌分区示意

Fig. 7 Schematic diagram of terrain and geomorphology zoning

表 5 各地形数字河网套合差对比

Table 5 Comparison of digital river network sleeves in various terrains

| 流域 | DEM | 丘陵区 | | 城市区 | | 湖泊区 | | 农田区 | |
|-------|------------|--------------------|-------|--------------------|-------|--------------------|-------|--------------------|-------|
| | | 面积/km ² | 套合差/% | 面积/km ² | 套合差/% | 面积/km ² | 套合差/% | 面积/km ² | 套合差/% |
| 南河流域 | ALOS DEM | | 0.09 | | 3.35 | | — | | 4.23 |
| | ASTER GDEM | 132 | 0.10 | 79 | 3.49 | — | — | 425 | 5.17 |
| | SRTM DEM | | 0.12 | | 3.46 | | — | | 5.01 |
| 松滋河流域 | ALOS DEM | | 0.15 | | 6.36 | | 8.23 | | 12.13 |
| | ASTER GDEM | 12 | 0.20 | 92 | 9.89 | 21 | 12.77 | 492 | 18.67 |
| | SRTM DEM | | 0.21 | | 7.26 | | 9.67 | | 13.59 |
| 裕溪河流域 | ALOS DEM | | 0.12 | | 7.02 | | — | | 11.53 |
| | ASTER GDEM | 57 | 0.14 | 221 | 9.43 | — | — | 721 | 15.38 |
| | SRTM DEM | | 0.15 | | 8.47 | | — | | 13.27 |
| 滁河流域 | ALOS DEM | | 0.06 | | 6.98 | | — | | 7.87 |
| | ASTER GDEM | 1 721 | 0.10 | 1 489 | 8.34 | — | — | 1 004 | 10.23 |
| | SRTM DEM | | 0.11 | | 7.93 | | — | | 8.39 |
| 秦淮河流域 | ALOS DEM | | 0.13 | | 36.79 | | — | | 15.23 |
| | ASTER GDEM | 234 | 0.15 | 875 | 43.24 | — | — | 785 | 18.93 |
| | SRTM DEM | | 0.16 | | 40.47 | | — | | 17.87 |
| 太浦河流域 | ALOS DEM | | — | | 18.23 | | 33.24 | | 15.17 |
| | ASTER GDEM | — | — | 1 225 | 20.92 | 975 | 40.26 | 1 560 | 17.23 |
| | SRTM DEM | | — | | 19.99 | | 38.27 | | 16.77 |
| 灵河流域 | ALOS DEM | | 0.08 | | 7.67 | | — | | 17.23 |
| | ASTER GDEM | 92 | 0.12 | 38 | 9.24 | — | — | 29 | 19.75 |
| | SRTM DEM | | 0.12 | | 8.17 | | — | | 18.41 |

4 结果讨论

本文使用 ArcGIS 水文分析模块提取河网, 该方法为最常用的数字水系提取方法, 适用性广。使用 Agree 算法进行 DEM 修正后, 各 DEM 在平原区精度明显增强, 但 Agree 算法需要精准的真实河网矢量

图, 在河网资料缺乏地区难以使用, 且本文对于用地类型的划分需要精准的遥感资料, 具有一定局限性。王欢等曾针对不同地形地貌区, 计算分析与水文密切相关的 DEM 衍生特征的精度, 发现在地势起伏大的地区, 除 SRTM 外各 DEM 对水系形态的描述精度较高; 地势起伏小的地区, 除 ALOS 能准确描述河口区

域水系结构关系外, 其余 DEM 均不能准确描述河口区域水系形态。董吴欣等^[22]研究各 DEM 在山区适用度, 发现修正前后 ALOS DEM 提取效果均最优且适用于不同流域, 未修正前的 SRTM 优于 ASTER。这些研究与本文结果较为一致, 可验证本文结论准确性, 但当前研究多为山区, 且较少研究不同用地类型, 本文研究可为平原区数字河网提取提供参考。本文基于 ArcGIS 水文分析提取了数字河网, 对使用其他方法提取时, 各 DEM 的适用度情况是否改变有待研究。当前研究仅分析出各 DEM 在平原区适用度, 造成精度差异的原因也尚待进一步探索。

5 结 论

(1) 采用 ALOS DEM、ASTER GDEM、SRTM DEM 的原始数据提取平原区的水系河网, 精度都难以满足水文分析的要求; 河流交汇区、农田区、圩区、城市区等地方, 易出现平行河网、河道断裂、河道偏移等问题。基于 Agree 算法的 DEM Reconditioning 功能可以很好的修正 DEM, 明显提升平原区河网的提取精度。

(2) 3 种 DEM 数据中, ALOS DEM 在平原区提取数字河网精确度最高, 而 ASTER GDEM 在平原区适用性最差。DEM 修正后仍是 ALSO DEM 精度最高, ASTER GDEM 精度最低。ALOS DEM 在各地形均精度最高; ASTER GDEM 在丘陵区精度高于 SRTM DEM, SRTM DEM 在湖泊、农田城市区等地形情况下精度高于 ASTER GDEM。

参考文献 (References):

- [1] 钟国雄, 朱正平. 基于 GIS 的数字河网特征信息提取研究[J]. 安徽农业科学, 2023, 51(7): 231-234.
ZHONG Guoxiong, ZHU Zhengping. Research on feature information extraction of digital river network based on GIS [J]. Agricultural Science, 2023, 51 (7): 231-234.
- [2] LI H, ZHAO J, YAN B, et al. Global DEMs vary from one to another: an evaluation of newly released Copernicus, NASA and AW3D30 DEM on selected terrains of China using ICESat-2 altimetry data[J]. International Journal of Digital Earth, 2022, 15(1): 1149-1168.
- [3] ABRAMS M, CRIPPEN R, FUJISADA H. ASTER global digital elevation model (GDEM) and ASTER global water body dataset (ASTWBD)[J]. Remote Sensing, 2020, 12(7): 1156.
- [4] XING Z Y, CHI Z H, YANG Y, et al. Accuracy evaluation of four Greenland Digital Elevation Models (DEMs) and assessment of river

network extraction [J]. Remote Sensing, 2020, 12(20): 3429-3429.

- [5] YAN D, WANG K, QIN T, et al. A data set of global river networks and corresponding water resources zones divisions [J]. Scientific Data, 2019, 6(1): 1-11.
- [6] EHTIAT M, MOUSAVI S J, SRINIVASAN R. Groundwater modeling under variable operating conditions using SWATMODFLOW and MT3DMS: A catchment scale approach to water resources management [J]. Water Resources Management, 2018, 32(5): 1631-1649.
- [7] LI D, WU B, CHEN B, et al. Open-surface river extraction based on Sentinel-2 MSI imagery and DEM data: case study of the Upper Yellow River [J]. Remote Sensing, 2020, 12(17): 2737.
- [8] 李纪人. 遥感技术在水利数字孪生建设中的作用[J]. 水利发展研究, 2024, 24(9): 54-58.
- [9] COSTA R T D, MAZZOLI P, BAGLI S. Limitations posed by free DEMs in watershed studies: the case of river Tanaro in Italy [J]. Frontiers in Earth Sciences, 2019.
- [10] YONG W, QIAN G. Novel approach for InSAR sensors imaging vi gradient-based algorithm for the sparse signal reconstruction [J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(6): 2385-2394.
- [11] 韩萍, 王晋, 张相忠. 基于多源 DEM 数据的小流域水文特征提取分析[J]. 中国农村水利水电, 2022(5): 133-137, 146.
HAN Ping, WANG Jin, ZHANG Xiangzhong. Extraction and analysis of hydrological features of small watersheds based on multi-source DEM data [J]. China Rural Water and Hydropower, 2022(5): 133-137, 146.
- [12] 周妍, 白国营, 赵洪岩, 等. 分布式地表水-地下水耦合数值模型研究进展[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(3): 435-446.
ZHOU Y, BAI G Y, ZHAO H Y, et al. Research advances in distributed coupled surface-subsurface numerical model [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(3): 435-446.
- [13] 周紫蕊, 廖卫红, 雷晓辉, 等. 基于 InfoWorks ICM 的城市河网调控与分析: 以福州市仓山区龙津阳岐片区为例[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(4): 770-779.
ZHOU Z R, LIAO W H, LEI X H, et al. InfoWorks ICM-based urban river network regulation and analysis: A case study of Longjin Yangqi area in Cangshan District, Fuzhou City [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(4): 770-779.
- [14] 乔之轩. 基于 DEM 的多分辨率水文特征提取[D]. 北京: 北京林业大学, 2019.
QIAO Zhixuan. Multi-Resolution Hydrological Feature Extraction

- Based on DEM[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2019.
- [15] 詹蕾. SRTM DEM 的精度评价及其适用性研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2008.
- ZHAN Lei. Research on the Accuracy Evaluation and Applicability of SRTM DEM[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2008.
- [16] 张世安, 徐坤, 吴婧捷. 无人机航测技术在水利领域的应用现状与发展方向分析[J]. 水利发展研究, 2023, 23(6): 37-42.
- ZHANG Shi'an, XU Kun, WU Zhijie. Analysis of the application status and development direction of unmanned aerial vehicle aerial survey technology in the water conservancy field [J]. Water Resources Development Research, 2023, 23 (6): 37-42.
- [17] 孔凡哲, 李莉莉. 利用 DEM 提取河网时集水面积阈值的确定[J]. 水电能源科学, 2005(4): 65-67, 93.
- KONG Fanzhe, LI Lili. Determination of catchment area threshold when extracting river network using DEM[J]. Water Resources and Power, 2005(4): 65-67, 93.
- [18] 叶章蕊, 卢毅敏, 张永田. 基于曲线割线斜率法的水文特征提取[J]. 人民黄河, 2016, 38(2): 28-31.
- YE Zhangrui, LU Yimin, ZHANG Yongtian. Hydrological feature extraction based on curved secant slope method[J]. Yellow River, 2016, 38(2): 28-31.
- [19] 关颖慧, 郑粉莉, 王彬, 等. 基于 DEM 的黑龙江宾州河流域水系提取试验研究 [J]. 水土保持通报, 2012, 32(1): 127-131.
- GUAN Yinghui, ZHENG Fanli, WANG Bin, et al. Experimental study on water system extraction in Pennsylvania River Basin, Heilongjiang Province based on DEM[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012, 32(1): 127-131.
- [20] 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. Research on the relationship between the threshold of catchment area and the density of river source when extracting digital river network based on DEM [J]. Journal of Earth Information science, 2018, 20 (9): 1244-1251.
- [21] 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. Digital river network extraction and analysis of Tarim River basin based on DEM [J]. Water Resources and Hydropower Technology, 2020, 51 (8): 54-61.
- [22] 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 extracting river networks in mountainous watersheds [J]. China Rural Water Resources and Hydropower, 2023 (8): 149-156.

(责任编辑 康健)