

基于数字高程模型的淤地坝地区河网提取方法

张宏鸣 樊世豪 陈茹雪 鱼文虎 张琦 袁琳琳

(西北农林科技大学信息工程学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 淤地坝作为黄土高原水土流失严重地区重要而独特的治沟工程,具有滞洪、拦淤、蓄水等作用,但在该地区利用数字高程模型(DEM)进行流域水系分析时,提取的河网会受淤地坝的干扰出现河网偏移、错位问题。本文提出一种通过对淤地坝进行检测并修正DEM的自动化方法来实现河网的有效提取。该方法先利用区域生长和形态学算法提取河道中心线,以缩小淤地坝检测范围,再基于改进的直线段检测(LSD)算法以及角度滤波确定淤地坝候选轮廓直线,然后构建十字模型定位淤地坝,最后对淤地坝所在栅格高程进行修正以提取河网。该方法在黄土高原两个典型样区中检测淤地坝的F1值分别为86.67%和86.95%,相比于仅使用填充、裂开的两种河网提取方法,本文方法能有效解决河网偏移问题。结果表明,本文方法提取的河网结果更符合真实地形,可为黄土高原淤地坝地区的流域数字地形分析技术提供有益补充与支持。

关键词: 河网提取; 淤地坝检测; 数字高程模型; 直线段检测

中图分类号: S157 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2023)09-0246-08 OSID: 

Channel Network Extraction Method in Check Dam Area Based on DEM

ZHANG Hongming FAN Shihao CHEN Ruxue YU Wenhui ZHANG Qi YUAN Linlin

(College of Information Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: As an important and unique ditch control project in the severe soil erosion area of Loess Plateau, check dams have the functions of flood detention, silt retention, and water storage. However, when using digital elevation model (DEM) for watershed water system analysis in this area, the extracted channel network will be disturbed by the check dam to have offset and dislocation problems. An automatic method for detecting the check dam and correcting the DEM was proposed to realize the effective extraction of the channel network. In this method, using the region growing and morphological algorithms to extract the center line of the channel to narrow the detection area of the check dam. Based on the improved line segment detector (LSD) algorithm and angle filtering, the candidate outline line of the check dam was determined, and then a cross model was constructed to locate the check dam. Finally, the grid elevation where the check dam was located was corrected to obtain a complete channel network. The F1 values of check dams detected by this method in two typical sample areas of the Loess Plateau were 86.67% and 86.95%, respectively. Compared with the two channel network extraction methods of filling and breaching, the method can effectively solve the problem of channel deviation. The experimental results showed that the results of the channel network extracted were more consistent with the real topography, which can provide useful supplements and support for the digital terrain analysis technology of the Loess Plateau check dam area.

Key words: channel network extraction; check dam detection; digital elevation model; line segment detector

0 引言

从数字高程模型(Digital elevation model, DEM)中提取河网是数字流域^[1]、分布式水文模拟^[2-3]、土壤侵蚀模型建立^[4]等的关键技术环节,可为进一步划分流域和计算汇流面积等其他水文参数提供基础^[5]。但在黄土高原土流失严重的地区,淤地坝作为重要而独特的滞洪、拦淤、蓄水工程被广泛修筑于开阔的沟谷区域,在该地区利用DEM进行流域水系分析时,直接提取河网会受到干扰^[6]。原始DEM中存在许多中心栅格高程比周围栅格低的洼地^[7]。在这些洼地内,水流不能确定正确的流向,导致水流路径不连续甚至出现逆流现象^[7],进而影响河网的正常提取。因此,国内外研究人员提出了许多DEM预处理方法以改善河网的流动路径,从而实现河网提取^[8-11]。

DEM数据的预处理是通过修正洼地,使得每个栅格都有明确的水流方向。目前,洼地的处理方法主要分为填充法和裂开法^[7-8]。填充法通过抬升洼地中的栅格来修改地形,直到匹配最低出口栅格的高程^[8,11-13]。而裂开法则是通过降低洼地边缘处阻挡物的栅格高程,来模拟水流下切裂开洼地^[8,14]。虽然这些方法能保证河网的连续性,但在淤地坝地区的河网提取结果存在河网偏移问题。由于淤地坝两侧道路高程较低,河网将其作为洼地出水口穿过淤地坝,而到达出水口位置之前,河网流向与淤地坝的横截面方向基本保持平行。因此针对淤地坝流域,需开发一种新的DEM预处理方法提取河网。

CARLSON等^[15]提出一种桥梁识别并修正其栅格高程的河网提取方法,与填充法相比,这种先识别后处理的方法能建立更真实的河网。然而,位于山地的梯田具有相似的地形特征,对淤地坝检测及河网提取造成负面影响^[16]。ZHU等^[17]提出利用区域生长和形态学处理提取黄土高原沟道,虽然该方法并没有考虑黄土高原地区的淤地坝,但能将淤地坝的检测范围缩小至河道区域,从而避免梯田的影响。此外,SOFA等^[18]提出使用直线段检测(Line segment detector, LSD)算法^[19]提取具有线性特征的梯田,为检测具有类似线性特征的淤地坝提供了一个新的思路。

综上所述,本文提出一种基于线性特征检测淤地坝并修正其所在高程的方法。首先综合淤地坝和河道的地形特征进行区域生长和形态学操作提取河道中心线,并结合改进LSD算法检测结果保留淤地坝轮廓直线,最后构建十字模型检测淤地坝,修正所在高程并填充剩余的洼地以提取河网。

1 材料和方法

1.1 研究区域

如图1所示,本文选择的两块实验区均位于黄土高原地区,且具有不同的地形特征。实验区1为王茂沟流域,位于陕西省绥德县韭园沟中游左岸,是我国最早的治理实验小流域之一^[20]。该流域地貌复杂,以梁、峁为主,沟壑纵横,坡陡沟深,属典型的黄土丘陵沟壑地貌。多年平均降水量513.1 mm,汛期7—9月降水量占年降水量的73.1%。经过近70年治理,坝系布局较为完整,存在淤地坝淤满的情况,坡耕地大幅减少,梯田面积和植被覆盖度提高。实验区2为周屯沟流域的一条支流,位于陕西省延安市安塞区。流域内地貌复杂多样,境内川道狭长、梁峁遍布,土壤以黄绵土为主,物理风化作用强,土壤疏松,多粉沙,易受水力侵蚀。多年平均降水量

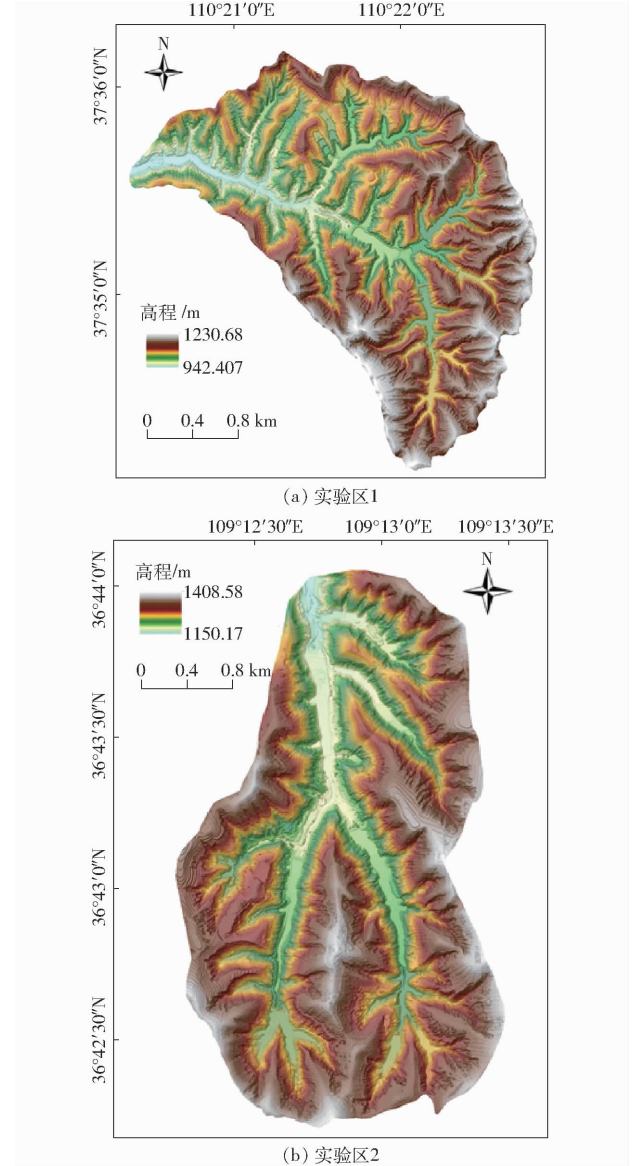


图1 研究样区

Fig. 1 Study sample areas

500 mm 左右,汛期 7—9 月降水量占年降水量的 74%。该流域淤地坝和梯田相对较少,浅沟区域治理以种植草灌为主要措施。图 1 中两流域对于淤地坝区域的河网提取和分析,具有典型的代表意义。

1.2 实验方法

技术路线如图 2 所示,淤地坝地区的河网提取主要为:将无人机航测分辨率 0.15 m DEM 采用最邻近插值法生成高分辨率 DEM 和低分辨率 DEM。将低分辨率 DEM 提取河道中心线,高分辨率 DEM 导出山体阴影图并提取轮廓直线。依据河道中心线进行角度滤波保留淤地坝轮廓直线,构建十字模型定位淤地坝。修正淤地坝栅格高程并填充剩余洼地来提取河网。

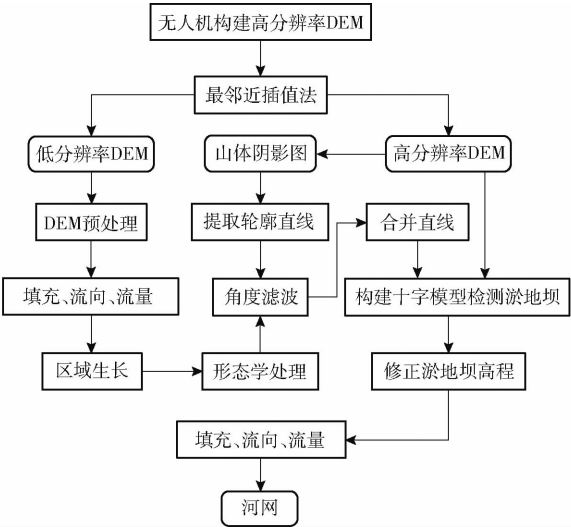


图 2 技术路线图
Fig. 2 Technical roadmap

1.2.1 DEM 平滑处理

高分辨率 DEM 提供详细的地形信息,但其中存在的大量噪声不仅会增加计算复杂性,还会对河道提取产生负面影响。本文主要根据河道两侧高、中间低的地形特征提取河道,不过多关注河道内的地形细节。有研究表明,分辨率 10 m DEM 的坡度统计百分比与分辨率 5 m DEM 相比变化不大,足以满足地形和水文建模应用的需求^[21-23]。分辨率更低的 DEM 会导致更多地形信息的丢失,使得区域生长结果无法有效反映河道的实际情况,因此本方法使用分辨率 10 m DEM 数据进行区域生长。分辨率 10 m DEM 仍存在少部分噪声,为了去除这些噪声并保持河道和山谷的边缘信息,本文使用中值滤波窗口(3×3)进行滤波。如图 3 所示,滤波能有效去除河道内部噪声,且能降低部分淤地坝所在的栅格高程,从而有利于后续区域生长提取连续的河道。

1.2.2 河道中心线提取

对低分辨率 DEM 的洼地进行填充,并用最陡坡

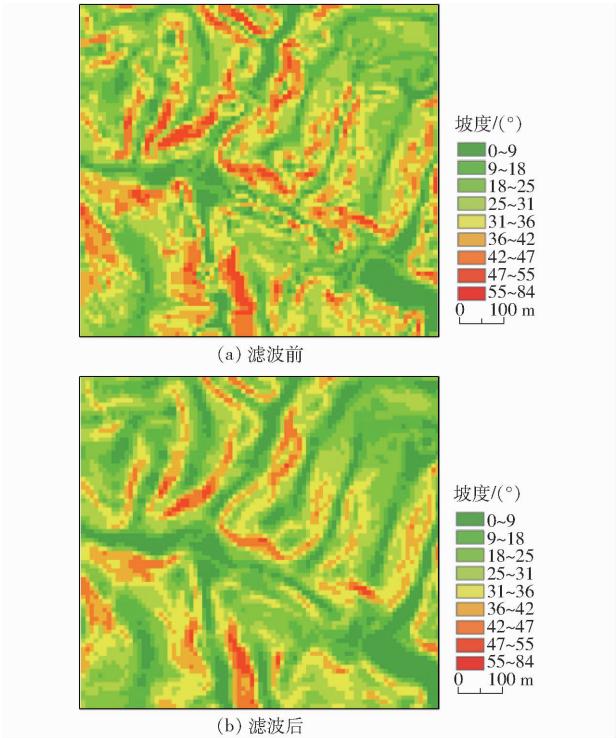


图 3 滤波前后坡度对比
Fig. 3 Comparison of slope before and after filtering

降计算流向和流量。经过中值滤波和填充处理后,河道的整体地形相对平坦。利用坡度和高程之间的关系进行区域生长得到河道,坡度 S 定义为

$$S = \arctan \frac{H}{L} \tag{1}$$

式中 H ——相邻栅格的高程差
 L ——相邻栅格之间的水平距离

为每个栅格设置生长状态,将未标记为河道且大于流量累积阈值 r_{flow} 的流量栅格作为种子点,以避免流量栅格的重复生长,提高算法效率。区域生长的生长准则为

$$\begin{cases} h_a < h_b \\ S < E \end{cases} \tag{2}$$

$$h_a > h_b \tag{3}$$

式中 h ——栅格高程 E ——坡度阈值
栅格 a 向相邻栅格 b 生长,如果满足上述两条件,则将其标记为河道栅格,直到确定河道边界位置。式(2)能确保淤地坝坝顶以及河道等相对平缓地区的生长,而由于淤地坝两侧坡度变化较大,利用式(3)可保证位于坝顶的生长点向淤地坝上下游进行区域生长。不同坡度阈值的生长结果如图 4 所示,当坡度阈值设置为 3°时,区域生长无法覆盖大型淤地坝,导致细化后的河道中心线发生偏移,进而影响后续角度滤波结果的准确性。当将坡度阈值设置为 4°时,可以保证河道的连续性和完整性。然而,当阈值设置为 5°时,沟头区域的生长结果可能

不准确,因为较大阈值可能使生长扩展到坡度较缓的沟头区域。此时,沟头区域的高程较高,而式(3)会将生长过程扩展到所有低于沟头栅格高程的区域,进而导致生长结果的不准确。因此,为确保河网连续性和准确性,取阈值 E 为 4° 。

对分辨率 10 m DEM 的河道生长结果进行形态学闭运算以填补河道中未生长的小区域,并平滑河道边界。然而,在分辨率 10 m 下,淤地坝的特征无法有效表示,因此需用高分辨率 DEM 来检测淤地

坝。为与高分辨率 DEM 嵌套来定位淤地坝,将河道生长结果上采样成高分辨率河道数据,最后利用细化算法生成单栅格大小的河道中心线。

1.2.3 淤地坝特征提取

如图 5 所示,为提高淤地坝的提取精度,本文总结淤地坝的 4 个特征:①淤地坝修建在截面两侧具有陡峭山地的河道上。②淤地坝与河道的流向近乎垂直。③淤地坝为横向线性结构坝工建筑物。④淤地坝的坝顶、上游和下游地势相对平坦。

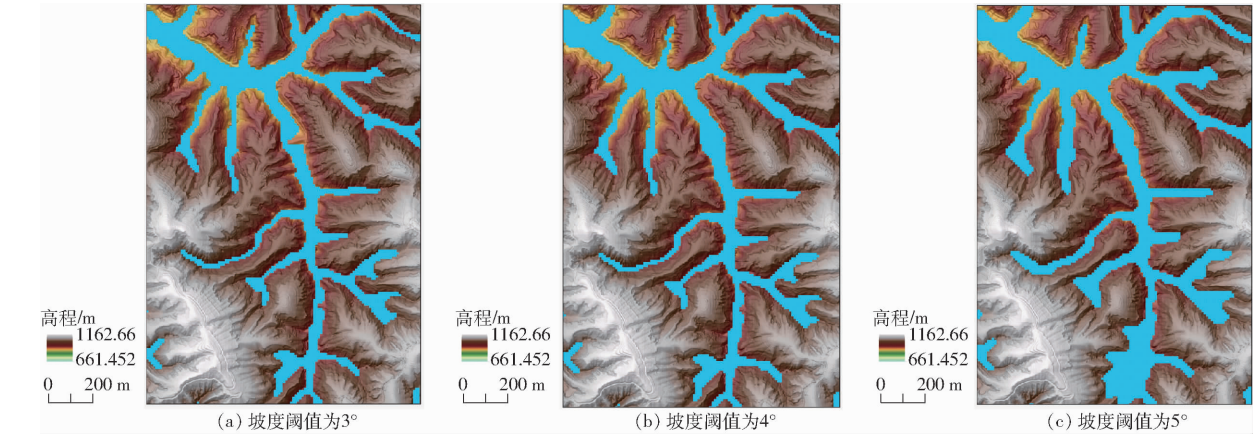


图 4 不同坡度阈值的生长结果
Fig. 4 Growth results for different slope thresholds

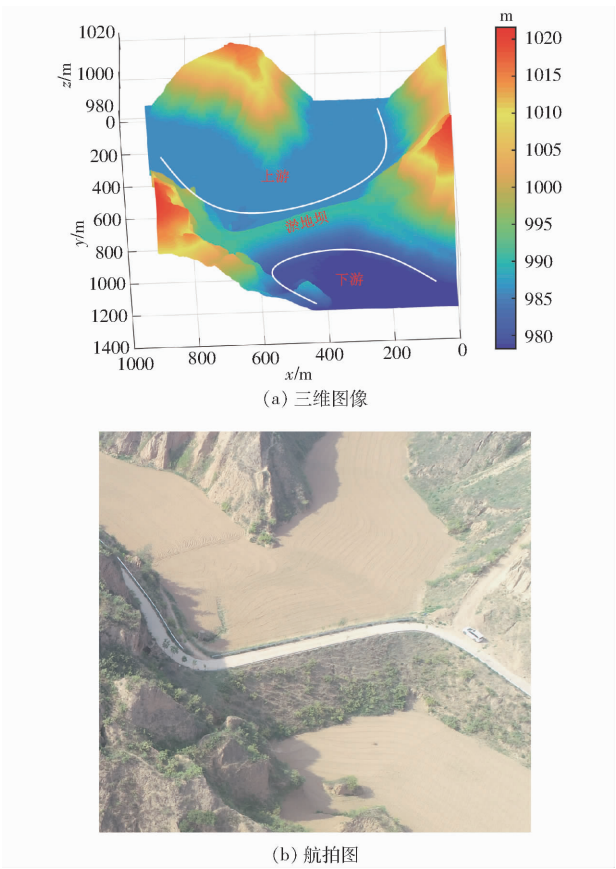


图 5 淤地坝区域示意图
Fig. 5 Display maps of check dam area

由于淤地坝整体呈线性,本文使用 LSD 算法对

分辨率 1、2、5、10 m 的山体阴影图进行轮廓直线提取。如图 6 所示,分辨率 10 m 山体阴影图只能检测到河道两侧的轮廓直线,分辨率 5 m 虽能检测到大型淤地坝的轮廓直线,但对于中小型淤地坝的检测并不理想。在分辨率 2 m 下,能很好地检测各种规模淤地坝的轮廓直线。而在分辨率 1 m 下,检测到的淤地坝轮廓直线与分辨率 2 m 相比并无较大区别,但河道内的噪声轮廓直线数量却大大增加,使得提取淤地坝轮廓直线的方法更为复杂,检测效果也会受到影响。因此,本文选择分辨率 2 m DEM 进行淤地坝检测,以获得较好的检测效果。

1.2.4 有效轮廓直线提取

利用淤地坝与河道近似垂直的位置关系,对轮廓直线进行角度滤波,以保留与河道中心线相交且近乎垂直的轮廓直线。如图 7 所示,淤地坝横跨河道而建,淤地坝的轮廓直线与河道的轮廓直线可能相邻。为了正确计算淤地坝轮廓直线的倾斜角,本文改进 LSD 算法分离倾斜角不同的直线。改进方法如图 7a 所示,由于检测到的轮廓直线按先后顺序输出,若差值在 $0^{\circ} \sim 5^{\circ}$ 范围内,则认为这两条直线属于同一直线,保留栅格 F 并接着检测下一栅格是否满足该条件;相反则将该栅格丢弃,以分离不同倾斜角的轮廓直线。

分离轮廓直线后,利用最小二乘法拟合轮廓直

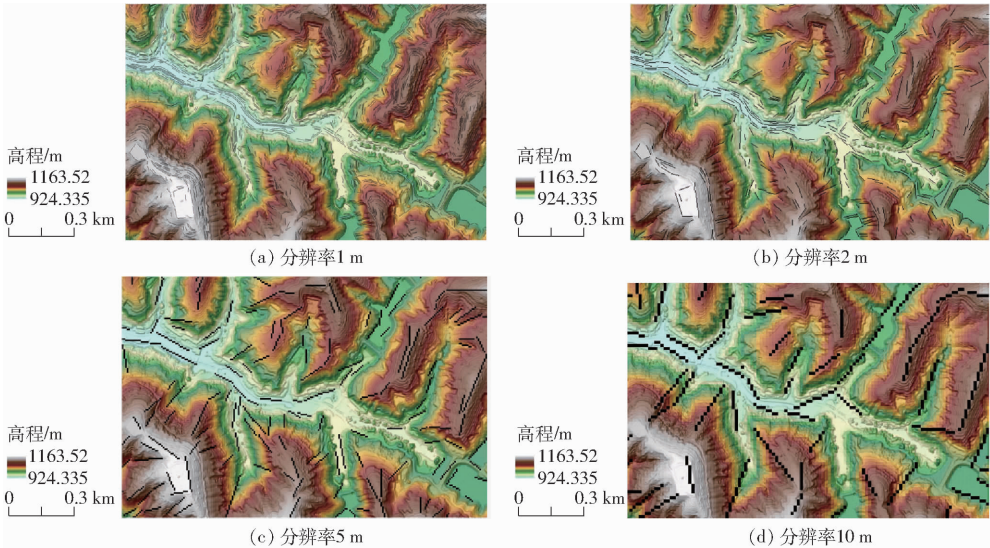


图 6 不同分辨率 LSD 检测结果示意图

Fig. 6 Detection results of LSD with different resolutions

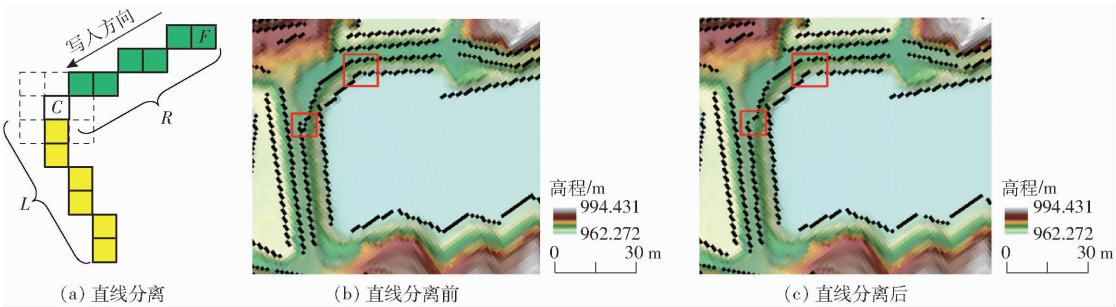


图 7 直线分离示意图及效果对比

Fig. 7 Linear separation diagrams and effect comparison

线 l 与河道中心线 j 的倾斜角, 分别为 θ_l 和 θ_j 。如果这两倾斜角的差值满足

$$|\theta_l - \theta_j| \in [90^\circ - \alpha, 90^\circ + \alpha] \quad (4)$$

则认为直线 l 属于淤地坝轮廓直线; 反之则认为直线 l 为噪声轮廓直线并丢弃。由于淤地坝和河道中心线并非完全垂直, 且基于栅格的倾斜角计算存在误差, 本文将 α 设置为 30° , 尽可能避免淤地坝轮廓直线的丢失及噪声轮廓直线的影响。

1. 2. 5 十字模型检测

角度滤波后仍存在少部分的噪声直线, 需对每条轮廓直线构建十字模型以确定最后淤地坝的位置。由于多条轮廓直线表示同一个淤地坝, 将其合并以避免十字模型的重叠构建。合并的判断依据: 若距离较近的两直线倾斜角差值小于 5° , 则合并两直线。如图 8 所示, 确定合并之后的轮廓直线中点 U , 则有

$$\bar{k}k = -1 \quad (5)$$

式中 $\bar{k}$ ——淤地坝横截面的斜率

k ——垂直淤地坝横截面的直线斜率

根据淤地坝坝顶和上下游区域地势平坦的特征, 设置平缓值 S_A 以确定垂直淤地坝横截面直线的

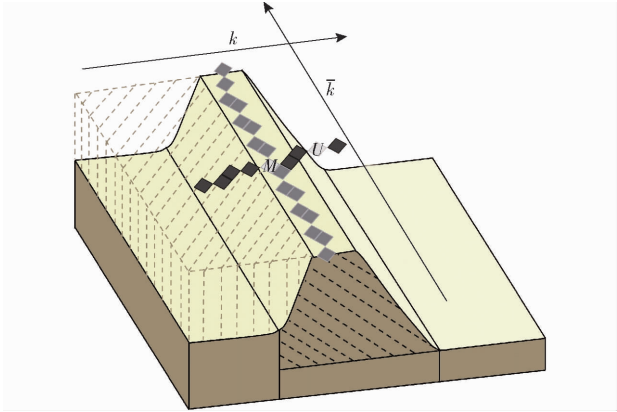


图 8 识别淤地坝的十字模型示意图

Fig. 8 Diagram of cross model for identifying check dams

延伸长度, 平缓值 S_A 只根据相邻两栅格整型高程是否相等来变化。

建立十字模型检测淤地坝具体步骤为:

(1) 将轮廓直线中点 U 作为垂直淤地坝横截面直线的起点, 并存储在链表的第 1 个节点。利用式(5)计算垂直淤地坝横截面的直线斜率 k , 其中标准高程 c_h 初始化为中心点 U 的高程, 平缓值 S_A 初始化为 3, 可根据分辨率进行调整。

(2) 根据 Bresenham 算法沿斜率 k 确定下一点的坐标 u_1 。判断 u_1 与 c_h 的整形高程值是否相等, 若相等且 $S_A = 0$, 则停止向该方向的延伸并执行步骤(3), 否则将 u_1 存储至链表, 并把 c_h 更新为 u_1 的高程; 相反若两栅格高程相等且 $S_A > 0$, 则将 S_A 减 1, 并重复步骤(2), 计算下一个点 u_2 。

(3) 根据反向斜率 $-k$, 重复步骤(1) ~ (2)。

(4) 根据垂直淤地坝横截面直线所对应的高程数据, 确定高程最高的栅格坐标 $M(x, y)$ 为淤地坝坝顶。

(5) 从坝顶栅格 M 沿 $\bar{k}$ 方向延伸至两端, 直至高程发生突变, 并记录向淤地坝横截面两侧延长的栅格数 len_l 和 len_r , 此过程完成十字模型的构建。若十字模型横截面的高程差过大, 则将该十字模型视为噪声并丢弃。否则执行步骤(6)。

(6) 根据垂直淤地坝横截面直线上的每个栅格, 分别向横截面的对应方向延长 len_l 和 len_r 来构造淤地坝所对应的矩形。

(7) 利用形态学闭运算来填补遗漏的栅格。

1.2.6 淤地坝高程修正

确定淤地坝位置后, 使用侵蚀操作符修正淤地坝高程。侵蚀操作符是一个 9×9 的窗口, 以淤地坝所在栅格为窗口中心, 窗口内的高程最小值替代为窗口中心的高程。根据经验, 连续 5 个侵蚀操作符能完全处理淤地坝高程, 这些参数可根据分辨率进行调整。除淤地坝外, 一些因其他原因形成的洼地仍然存在, 使用填充法处理剩余的洼地, 最后采用 D8 算法提取河网。

1.3 结果对比

本研究将所述方法与 LINDSAY^[24] 提出改进的填充法(填充法)和最小代价裂开法(裂开法)进行对比, 其中裂开法的最大搜索距离设为 100 m。填充法对填充洼地后的平坦地区进行微小抬升来避免平行流向问题, 而裂开法提取的河网更自然, 能够在合适的位置穿过洼地^[24]。

为了评估淤地坝的检测效果, 将本方法应用于两处典型的实验区, 并与人工标记的淤地坝进行比较。采用精确率(P)、召回率(R)和 F1 值来验证淤地坝检测的有效性。此外, 在相同河网阈值的条件下, 将本文与填充法、裂开法提取的河网结果进行比较。

2 结果与讨论

2.1 淤地坝检测结果

在 2 个实验区上进行淤地坝检测, 实验结果如表 1 所示。

表 1 实验区 1 和实验区 2 的实验结果

Tab.1 Statistical results of two experimental areas

			%
研究区域	精确率	召回率	F1 值
实验区 1	89.66	83.87	86.67
实验区 2	100	76.92	86.95

该方法在 2 个实验区中检测淤地坝的 F1 值分别为 86.67% 和 86.95%, 结果表明该方法能较为准确地检测淤地坝。淤地坝的检测结果如图 9 所示, 所述方法中改进 LSD 算法, 确保在进行角度滤波时能正确计算淤地坝轮廓直线的倾斜角, 且角度滤波操作能有效避免位于山地中梯田轮廓直线的干扰。此外, 淤地坝存在淤满和未淤满的两种地形特征, 如图 8 所示上游虚线部分表示淤地坝已蓄满, 其上游高程近似等于坝顶高程。本文构建的十字模型能有效识别这两种情况的淤地坝, 因为十字模型中设置的平缓值 S_A 仅用于判断淤地坝上下游高程是否平缓, 而不考虑其上下游和坝顶之间的高程关系, 从而提高了淤地坝的整体检测效果。本方法利用线性特征检测黄土高原地区的淤地坝, 但该方法也可拓展到具有相似线性特征的建筑物, 如桥梁、道路等。

由于淤地坝地区地形复杂, 检测过程中可能存在淤地坝误检和漏检的情况。位于河道交汇处两侧的道路轮廓直线可能与河道中心线近似垂直, 并且道路与淤满淤地坝的特征相似, 导致误检情况的发生。此外, 溃坝或淤地坝周围的植被可能会破坏淤地坝的地形特征, 导致部分淤地坝漏检。当淤地坝上下游存在植被时, 植被高度会使所在区域的高程整体高于真实地面高程, 垂直误差高达 10 m 以上, 这些高程更高的植被栅格会代替原本的坝顶, 导致在十字模型建模时会因横截面高程差过大而将被舍弃。

2.2 河网提取结果对比

仅使用填充法提取的河网结果误差最大, 尤其是位于淤地坝上游区域的河网会出现大角度的偏移。这是因为淤地坝两侧的道路栅格高程较低, 可能被误判为洼地的出口栅格, 导致河网沿着两侧的道路穿过淤地坝。在到达出口栅格之前, 河网流向与淤地坝的横截面方向基本保持平行。裂开法提取的河网在地形平缓的实验区 1 中能较为准确地穿过淤地坝, 但相较于填充法的河网提取结果更为曲折, 此外, 在复杂地形中仍存在河网偏移问题, 这表明裂开法的效果并不理想。

如图 10 所示, 本文通过先修正淤地坝所在高程, 再使用填充法提取河网, 能有效解决河网偏移问题。相较于仅使用填充法直接改变整个淤地坝上游

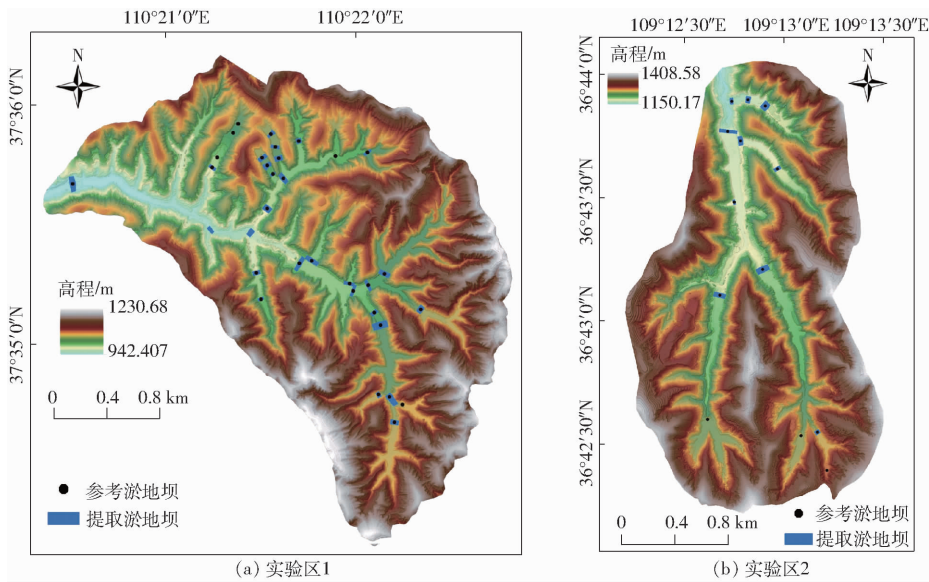


图 9 淤地坝检测结果
Fig. 9 Check dam detection results

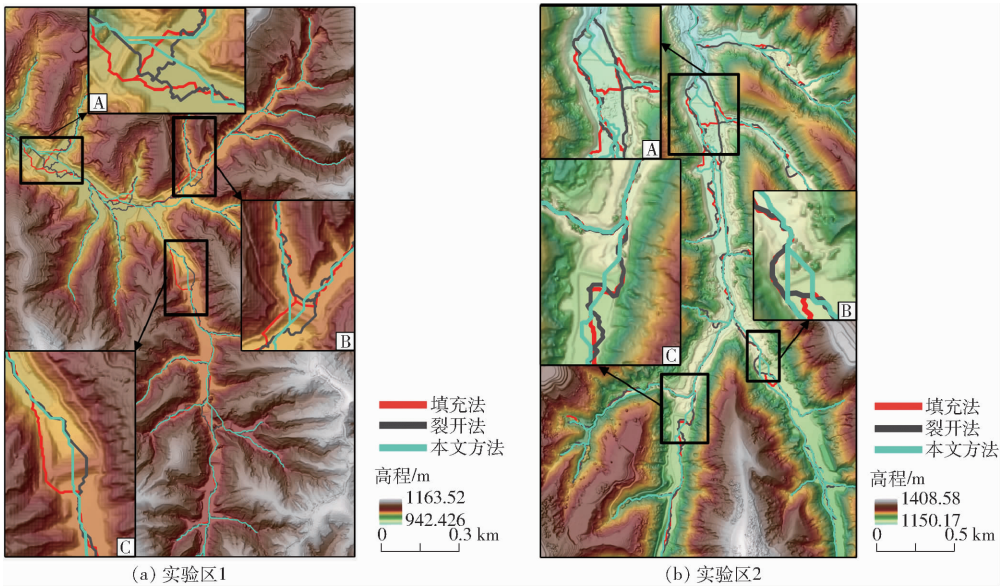


图 10 河网检测结果对比
Fig. 10 Comparison of channel network extraction results

高程,修正后的淤地坝上游不存在洼地,提取的河网结果能更好地反映淤地坝上游的真实地形。与裂开法的河网提取结果相比,本文方法的河网提取结果更为平滑,且能有效地穿过淤地坝。在平坦河道中,这 3 种方法都存在共有的问题,即当多条支流汇入主干河网时,支流可能会沿着河道穿过一段距离后才汇入主干河网,这主要由于平坦区域的河网流向分配不理想所导致的。

2.3 淤地坝检测误差分析

淤地坝存在误检和漏检的情况,需要使用填充法来填补剩余的洼地。如图 11a 所示,因溃坝而导致淤地坝漏检时对河网的影响最小,因为破损淤地坝上游并未形成洼地,河网会沿破损处穿过淤地坝。如图 11b 所示,当受淤地坝下游植被影响而导致漏

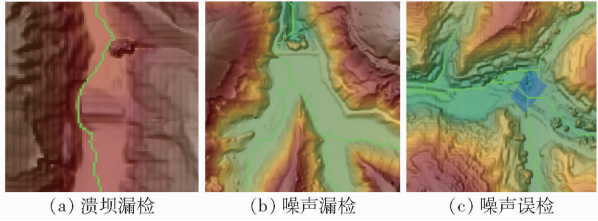


图 11 淤地坝漏检、误检的影响
Fig. 11 Impact of omission and misjudgment on channel network extraction

检时,河网提取结果仍存在偏移问题,而由于淤地坝检测的精确率较高,整体的河网提取结果仍能得到有效的改善。图 11c 中误判为淤地坝区域的最小高程替代成整个区域的高程,改变了原始区域的地形,导致该区域的河网发生轻微偏移。将来可利用高程

关系判断淤地坝的上下游,在其两侧确定一条合理的单栅格路径,并只修正路径所在的栅格高程,这样既能减少对DEM的修改,又能尽可能降低误判对河网提取结果的影响。

3 结束语

提出了一种通过对淤地坝进行检测并修正其高程的自动化方法来实现河网的有效提取。在2个典

型的实验区上进行验证,结果表明,该方法能较为准确地检测不同规模的淤地坝,并能有效解决河道偏移问题。然而,该方法仍有一定的局限性,例如溃坝或淤地坝上下游植被的影响可能会导致漏检和误检,使提取的河网结果发生轻微偏移。与目前的河网提取方法相比,本文方法提取的河网结果更符合真实地形,为黄土高原淤地坝地区的水土保持规划以及流域数字地形分析提供了良好的补充与支持。

参 考 文 献

[1] 刘家宏,王光谦,王开. 数字流域研究综述[J]. 水利学报, 2006,37(2): 240-246.
LIU Jiahong, WANG Guangqian, WANG Kai. Review on advancement of study on digital riverbasin in China[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006,37(2):240-246. (in Chinese)

[2] 王纲胜,夏军,牛存稳. 分布式水文模拟汇流方法及应用[J]. 地理研究, 2004, 23(2): 175-182.
WANG Gangsheng, XIA Jun, NIU Cunwen. Flow routing method and its application in distributed hydrological modeling[J]. Geographical Research, 2004, 23(2):175-182. (in Chinese)

[3] 宋瑞明,宁亚伟,李敬茹. 基于DEM的中小流域数字河网提取与分析[J]. 中国水利, 2022(12): 61-64.
SONG Ruiming, NING Yawei, LI Jingru. DEM-based extraction and analysis of digital river network in small and medium-sized basins[J]. China Water Resources, 2022(12):61-64. (in Chinese)

[4] 刘学军,卢华兴,卞璐,等. 基于DEM的河网提取算法的比较[J]. 水利学报, 2006,37(9):1134-1141.
LIU Xuejun, LU Huaxing, BIAN Lu, et al. Comparison of algorithms for extracting drainage network from grid-based digital elevation model[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006,37(9):1134-1141. (in Chinese)

[5] 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[J]. 地理与地理信息科学, 2017, 33(4): 40-46,2.
LU Qinghui, XIONG Liyang, JIANG Ruqiao, et al. A drainage networks extraction algorithm by integrating the characteristics of Priority-Flood and D8 algorithm[J]. Geography and Geo-Information Science, 2017, 33(4): 40-46,2. (in Chinese)

[6] 万民,熊立华,卫晓婧. 数字高程模型预处理方法的研究进展[J]. 水文, 2008,28(5):11-17,42.
WAN Min, XIONG Lihua, WEI Xiaojing. Review of the preprocessing methods of digital elevation models[J]. Journal of China Hydrology, 2008,28(5):11-17,42. (in Chinese)

[7] 司巧灵,杨传国,汪亚腾,等. AGREE 算法在秦淮河流域河网水系提取中的应用[J]. 江淮水利科技, 2022(5):27-29,48.
SI Qiaoling, YANG Chuanguo, WANG Yateng, et al. Application of AGREE algorithm in river network extraction in Qinhuai River Basin[J]. Jianghuai Water Resources Science and Technology, 2022(5):27-29,48. (in Chinese)

[8] 程品,孙法圣,张博,等. 水文模型中DEM低洼地处理的新算法[J]. 中国农村水利水电, 2014,56(5):38-41,44.
CHENG Pin, SUN Fasheng, ZHANG Bo, et al. A new algorithm for DEM depressions processing in hydrological models[J]. China Rural Water and Hydropower, 2014,56(5):38-41,44. (in Chinese)

[9] 许捍卫,何江,余远见. 基于DEM与遥感信息的秦淮河流域数字水系提取方法[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2008,36(4):443-447.
XU Hanwei, HE Jiang, SHE Yuanjian. Method for extraction of digital drainage network in the Qinhuai River Basin based on DEM and remote sensing[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2008,36(4):443-447. (in Chinese)

[10] MAKINEN V, OKSANEN J, SARJAKOSKI T. Automatic determination of stream networks from DEMs by using road network data to locate culverts[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2019, 33(2): 291-313.

[11] WANG L, LIU H. An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modelling[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2006, 20(2): 193-213.

[12] LIDBERG W, NILSSON M, LUNDMARK T, et al. Evaluating preprocessing methods of digital elevation models for hydrological modelling[J]. Hydrological Processes, 2017, 31(26): 4660-4668.

[13] 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 information extracting of digital river-network based on GIS[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2023,51(7):231-234. (in Chinese)

[14] MARTZ L W, GARBRECHT J. The treatment of flat areas and depressions in automated drainage analysis of raster digital elevation models[J]. Hydrological Processes, 1998, 12(6): 843-855.

[15] CARLSON R, DANNER A. Bridge detection in grid terrains and improved drainage enforcement[C]//Proceedings of the 18th SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems, 2010: 250-259.

[16] LI S J, XIONG L Y, HU G H, et al. Extracting check dam areas from high-resolution imagery based on the integration of object-based image analysis and deep learning[J]. Land Degrad. Dev., 2021, 32(7): 2303-2317.

[24] 王相友,李晏兴,杨振宇,等. 基于改进 YOLO v4 模型的马铃薯中土块石块检测方法[J]. 农业机械学报,2021,52(8): 241 – 247,262.
WANG Xiangyou,LI Yanxing,YANG Zhenyu, et al. Detection method of clods and stones from impurified potatoes based on improved YOLO v4 algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(8):241 – 247,262. (in Chinese)

[25] 史方青,王虎林,黄华. 基于卷积神经网络的马铃薯芽眼检测检测研究[J]. 中国农机化学报,2022,43(6):159 – 165.
SHI Fangqing, WANG Hulin, HUANG Hua. Research on potato buds detection and recognition based on convolutional neural network[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43(6): 159 – 165. (in Chinese)

[26] WOO S, PARK J, LEE J Y, et al. CBAM: convolutional block attention module [C] // Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV), 2018; 3 – 19.

[27] SONG G, LIU Y, WANG X. Revisiting the sibling head in object detector[C] //Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2020; 11563 – 11572.

[28] SELVARAJU R R, COGSWELL M, DAS A, et al. Grad-cam: visual explanations from deep networks via gradient-based localization[C] // Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision, 2017; 618 – 626.

(上接第 253 页)

[17] ZHU H C, HUANG W, LIU H Y. Loess terrain segmentation from digital elevation models based on the region growth method [J]. Phys. Geogr. , 2018, 39(1): 51 – 66.

[18] SOFIA G, BAILLY J S, CHEHATA N, et al. Comparison of pleiades and LiDAR digital elevation models for terraces detection in farmlands[J]. IEEE J. Sel. Top Appl. Earth Observ. Remote Sens. , 2016, 9(4): 1567 – 1576.

[19] VON GIOI R G, JAKUBOWICZ J, MOREL J M, et al. LSD: a fast line segment detector with a false detection control[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2008, 32(4): 722 – 732.

[20] 侯建才,李占斌,李勉. 黄土高原丘陵沟壑区一副区小流域淤地坝系效益分析——以王茂沟小流域为例[J]. 水土保持研究, 2007, 61(2): 34 – 36.
HOU Jiancai, LI Zhanbin, LI Mian. Benefit analysis of check dams system in small watershed in first sub-region of hilly-gully loess plateau—a case study in Wangmaogou watershed[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2007, 61(2): 34 – 36. (in Chinese)

[21] GARBRECHT J, MARTZ L W. Digital elevation model grid size, landscape representation, and hydrologic simulations-comment[J]. Water Resources Research, 1996, 32(5): 1461 – 1462.

[22] TAROLLI P. High-resolution topography for understanding earth surface processes: opportunities and challenges [J]. Geomorphology, 2014, 216: 295 – 312.

[23] 萨出拉,刘万青. DEM 分辨率对小流域地形水文特征提取的影响[J]. 测绘工程, 2015, 24(5): 72 – 76.
SA Chula, LIU Wanqing. Effects of DEM resolution on extracting topographical and hydrological parameters of small drainage basin[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2015, 24(5): 72 – 76. (in Chinese)

[24] LINDSAY J B. Pit-centric depression removal methods[C] // Proceedings of the GEOMORPHOMETRY 2020 Conference, 2020.