

李悦,晁会霞,辛永辉,等. 三种河流相对高程模型生成方法对比[J]. 华南地震, 2023, 43(1): 111-120. [LI Yue, CHAO Huixia, XIN Yonghui, et al. Comparison of Three Methods for Generating Relative Elevation Models of River[J]. South China journal of seismology, 2023, 43(1): 111-120]

三种河流相对高程模型生成方法对比

李悦, 晁会霞, 辛永辉, 王兴伟, 王冉

(长安大学地球科学与资源学院, 西安 710054)

摘要: 相对高程模型(REM, Relative Elevation Model的缩写)表示相对于河流水面或活性河道的海拔高度, 衍生于数字高程模型(DEM, Digital Elevation Model的缩写), 能够消除因河流纵向的地势造成的DEM表征不清楚, 高差过大造成细节模糊地势的影响, 从而在平面图上更为清晰地表征河流地形的细微变化, 因而研究REM的生成方法及其适用性具有十分重要的意义。通过文献综述, 选取美国加利福尼亚州内华达山脉的卡森河某河段为实验区, 利用其高精度(米级分辨率)DEM数据, 介绍核密度法、反距离加权法、横截面插值法三种REM生成方法。通过REM和DEM的对比, 以及三种REM的效果对比, 得出: 当高程差过大时, DEM可视化方案往往不能很好地在河流地貌刻画中发挥作用, 尤其是在解译时, 利用REM可解决高差过大造成的细节模糊问题; 横截面插值法主要的优势表现在可根据用户需要做适用性调整, 相对而言鲁棒性强, 较为灵活, 但其自动化程度较低, 且花费的时间较长, 因此需较多的人工干预; 核密度法耗时相对较少, REM结果很少有伪影或错误的相对高程值, 但核密度法导致一些潜在的伪影或者错误的相对高度, 体现在研究河段范围的终点会有偏差; 反距离加权法(IDW, Inverse Distance Weighted的缩写)的优势是创建用时较少, 且只需要输入两个数据: DEM和河流中心线, 但因搜索距离问题不合适易在特殊地段出现失效情况。因此, REM将在河流精细刻画中发挥重要的作用, 其生成方法已经可以实际应用, 但有待进一步提高和完善; REM模型不需经过复杂计算, 适合难以进行现场调查的河流对比研究, 且应用范围较广, 为河流迁移、洪水分析、河流管理和修复、生物栖息地选取以及文化评估方面的研究提供了重要作用。

关键词: 相对高程模型(REM); 数字高程模型(DEM); 核密度法; 反距离加权法(IDW); 横截面插值法

中图分类号: P595

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2023)01-0111-10

DOI: 10.13512/j.hndz.2023.01.14

Comparison of Three Methods for Generating Relative Elevation Models of River

LI Yue, CHAO Huixia, XIN Yonghui, WANG Xingwei, WANG Ran

(School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: The relative elevation model (REM, abbreviation for Relative Elevation Model) represents the altitude relative to the river surface or active river channel, which is derived from the digital elevation model (DEM, abbreviation for Digital Elevation Model), and can eliminate the influence of unclear DEM representation caused

收稿日期: 2022-06-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(42271014)和中央高校基金项目(300102280401)联合资助

作者简介: 李悦(1998-), 女, 硕士研究生, 从事地理信息系统和遥感应用方面的研究。

E-mail: 2020127047@chd.edu.cn

通信作者: 王冉(1980-), 男, 博士, 副教授, 从事地理信息科学与技术方面的研究。

E-mail: shiranwang@qq.com

by the longitudinal terrain of the river and the blurred terrain caused by the large height difference, so that the subtle variations of river topography can be more clearly represented on the floor plan. Therefore, it is of great significance to study the generation method and applicability of REM. Through literature review, this paper selects a section of the Carson River in the Sierra Nevada, California, USA as the experimental area, and uses its high-precision (meter-level resolution) DEM data to introduce three REM generation methods: kernel density method, inverse distance weighting method, and cross section interpolation method. Through the comparison of REM and DEM, as well as the comparison of the effects of three REMs, it is concluded that: When the elevation difference is too large, the DEM visualization scheme often cannot play a good role in the characterization of river landforms, especially in interpretation, while using REM can solve the problem of blurred details caused by excessive height difference; the main advantage of the cross section interpolation method is that it can be adjusted according to the needs of users with relatively strong robust and more flexible, but its degree of automation is low and it takes a long time, so it requires more manual intervention; the kernel density method is relatively less time-consuming, and the REM results rarely have artifacts or wrong relative height values, but the kernel density method leads to some potential artifacts or wrong relative heights, which are reflected in the deviation at the end of the study river range; the advantage of the inverse distance weighted method (IDW, abbreviation for Inverse Distance Weighted) is that it takes less time to create, and only needs to input two data: DEM and river centerline, but it is easy to fail in special areas due to inappropriate search distance. Therefore, REM will play an important role in the detailed description of rivers, and its generation method has been practically applied, but needs to be further improved and perfected. The REM model does not require complex calculations, and is suitable for comparative studies of rivers that are difficult to conduct on-site investigations, which has a wide range of applications and plays an important role in the research on river migration, flood analysis, river management and restoration, biological habitat selection, and cultural assessment.

Keywords: REM; DEM; Kernel density method; Inverse distance weighting (IDW) method; Cross section interpolation method

0 引言

相对高程模型(REM, Relative Elevation Model的缩写)表示相对于河流水面或活性河道的海拔高度,通过去除下游与河道梯度相关的海拔变化来生成。该过程也被称为“去趋势”^[1]。REM将河道的整体河谷坡度从数字高程模型(DEM, Digital Elevation Model的缩写)中去除,将DEM的地形由倾斜状态变为水平状态,可保留河流地形的细微变化,并使低海拔地区地物清晰可见^[2]。REM是由DEM减去“去趋势”DEM生成的。DEM是以海平面作为基准高程,而REM是以河流的水面高度作为参考基准。在河流及河床的变迁研究之中,相比DEM表征河道梯度海拔变化,利用REM可以简化突出重点信息,获得较好的研究价值,有利于研究河流中的河道迁移^[3-5]以及洪水^[6]的变化等情况,获取精细的地貌细节信息。但是DEM涉及的应用范围较广,包括地质、地貌、土壤、测绘、气象、水文、军事、工程建设等国民经济和国防

建设以及人文和自然科学等领域,REM并不适应于所有场景。可根据需要,选择DEM或者REM作为研究辅助资料。

在相对高程模型的应用中,最初Jones在2006年提出河上高度法(Har, Height-above-river的缩写),Har主要描述了相对高程模型(REM)在河流地貌研究方面的应用,用于沿河流走廊识别侧沟^[7]。在水文分析中,最近排水高度(HAND, Height Above the Nearest Drainage的缩写)常用于地形模型分析中^[8-12],HAND模型还可以被应用于检测河流通道的内部结构,可消除地物之间较大的高差。与HAND模型不同,去趋势过程中无需精确通道的内部结构,只要求地貌形态不改变。

目前,国外一些学者将REM应用在很多不同的场景之中,例如洪水^[6, 13]、植被^[14, 15]、土壤^[16]、地形^[17]、海岸线^[1]以及河流流域^[3-5, 18]等。在河流刻画中,研究应用的范围大小不一样。在小范围专题研究中,主要是核密度法、反距离加权法以及横截面插值法^[1]。而在大尺度的河流解译研究中,2020年有学者提出了通过引导滤波法创建去

趋势DEM,从而来求古河流的REM^[2]。此类去趋势DEM保留了原始DEM的地形结构,并在不受表面光谱和遮挡影响的情况下显示了物体的细节。同时,该方法消除了整体上不利于显示对象的梯度。另外,去趋势DEM解译得到的古河道图像,可以弥补古河道图缺乏地理坐标和与实际地形不匹配的缺陷。本次研究主要是从河流专题研究出发,主要针对小范围高分辨率数据进行河流精细地貌的刻画研究。

鉴于REM的上述优势和较好的应用前景,本文通过文献调研,选取美国加利福尼亚州内华达山脉的卡森河某河段为实验区,利用其高精度(米级分辨率)DEM数据,介绍核密度法、反距离加权法、横截面插值法三种REM生成方法的流程和注意事项,并对比它们各自的适用性。

1 实验区及数据获取

1.1 研究区域

卡森河(Carson River)位于美国加利福尼亚州,全长200公里,发源于内华达山脉,向东北流入内华达西部,后消失在卡森湖沼中^[19]。卡森河的两个主要支流在盆地的上游部分,一般向北流动,并在卡森山谷的北部汇合^[20]。实验区为河流的东北部

河段,位于冲积平原地区,河床平坦,河流曲折,具有较高的研究价值。

1.2 数据来源与处理

1.2.1 数据来源

激光雷达(LiDAR)是一种利用光脉冲收集三维信息的技术,常用于河流可视化研究,可以获取可能会被较低分辨率DEM数据遗漏的细微的地形特征,从而常用于精细地貌的实地调查。本次研究的主要数据是从美国地质调查局(USGS)网站获取空间分辨率为1米的激光雷达点云衍生的DEM资料。

1.2.2 数据预处理

利用ArcGIS 10.8软件,将精度为1米的激光雷达DEM数据进行拼接和镶嵌,通过镶嵌至新栅格工具对其进行处理,获得目标对象的研究数据,对DEM数据进行了裁剪,选取卡森河某河段作为感兴趣区。

1.2.3 REM的生成

REM生成主要包括三个方面:沿着河流的通道提取它的水面高程;在激光雷达点云衍生的DEM数据中创建“去趋势DEM”;从DEM中减去“去趋势DEM”,即可得到REM。技术流程图如下(图1)。



图1 生成REM的技术流程图
Fig.1 Technical flow chart for generating REM

2 三种REM生成方法的操作流程、结果及精度评价说明

2.1 横截面插值法

横截面插值法是Jones^[7]提出的一种沿河流走廊识别侧沟和其他河流地貌的可视化方法。通过绘制河道中心线与河流横截面,从河道中心的高程往外推得到通道的高程。

原理:横截面插值法使用GIS中的线(横截面)数据,这些数据拥有与河流表面对应的高程,对这些数据进行插值以创建新的栅格表面,再从

原始DEM栅格中减去这些数据以创建REM。有时,需要多次迭代模型才能准确表示高程为0处的水面。

利用横截面插值法对激光雷达DEM数据进行处理的首要流程(图2):

(1)将初步处理过的激光雷达DEM数据加载至ArcGIS 10.8中,手动跟踪河流通道线,沿着河流通道生成点,提取高程。

(2)生成通道线和横截面:手动跟踪通道线路,绘制横截面(图3)。

(3)分配通道高程到横截面:在绘制的横截面与河流通道中心线的交点处创建点特征;提取各通道点的高程值,再将点高程分配到截面。

(4)生成去趋势DEM和REM: 使用创建TIN工具(3D Analyst工具-数据管理-TIN)从横截面创建一个三角不规则网络(TIN);使用TIN转栅格工具(3D Analyst工具-转换-TIN转出),从TIN生成去趋势DEM;使用重采样工具(数据管理工具-栅格-栅格处理)更改去趋势DEM的单元格大小,以匹配LiDAR DEM的单元格大小;最后使用减号工具(Spatial Analyst工具-地图代数-栅格计算器)从原始DEM中减去去趋势DEM,得到REM。

通过横截面插值法生成的REM如图所示(图

4)。横截面插值法核心是横截面的制作,当绘制横截面时,控制其横截面间距以及对突变地形作横截面支撑线是REM可视化的关键点,对比其余两种方法,当其高度参考点未达到其余两种方法的点数,因绘制截面具有主观性,即容易遗漏一些重要的河流特征,失去部分细节,且可视化效果不够精细。

图4中,观察到横截面插值法生成的REM的河流通道清晰可见,靠近河流中心部分河流迁移细节较多,远离河流中心部分存在较多阶地和梯田。

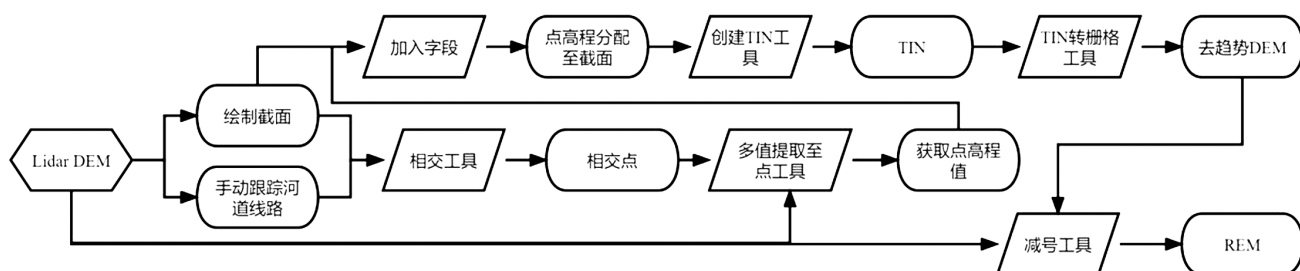


图2 横截面插值法技术流程图

Fig.2 Technical flow chart of cross section interpolation method

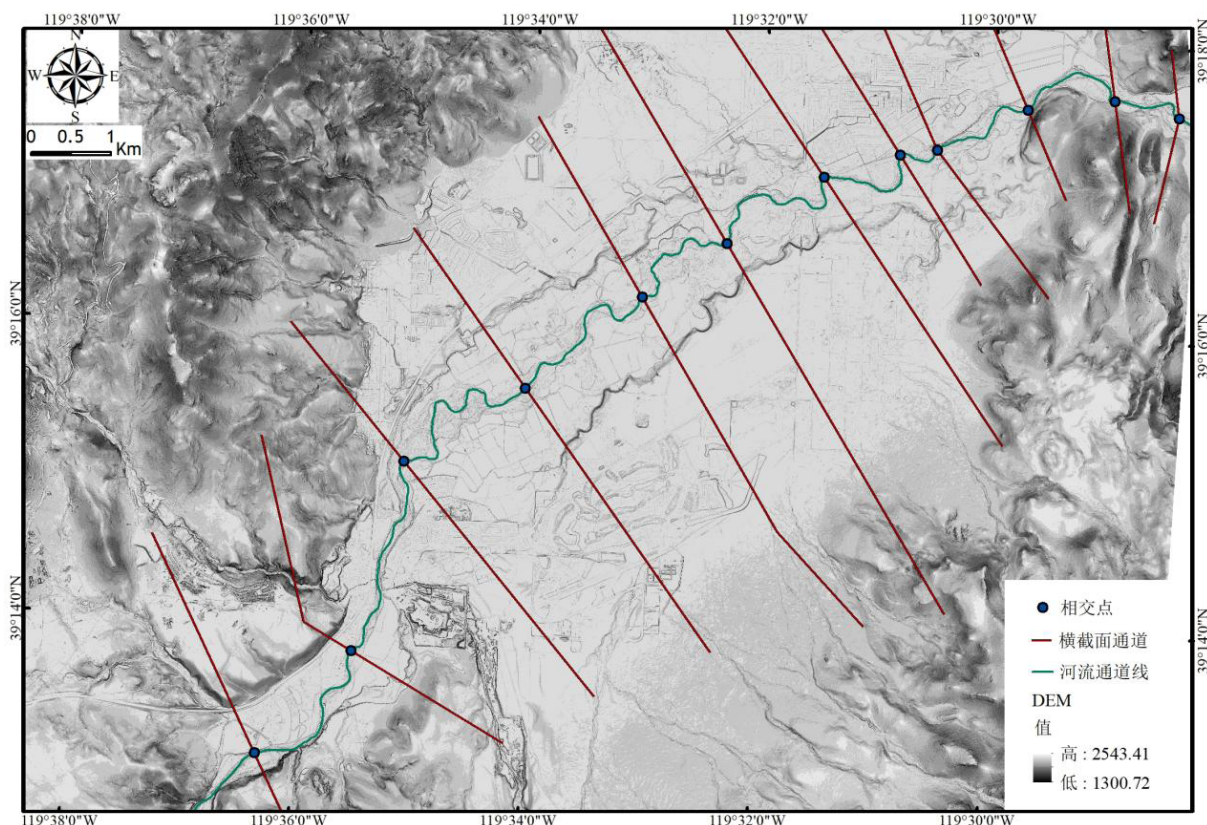


图3 创建REM的通道横截面示例图

Fig.3 The example of channel cross sections drawn to create a REM

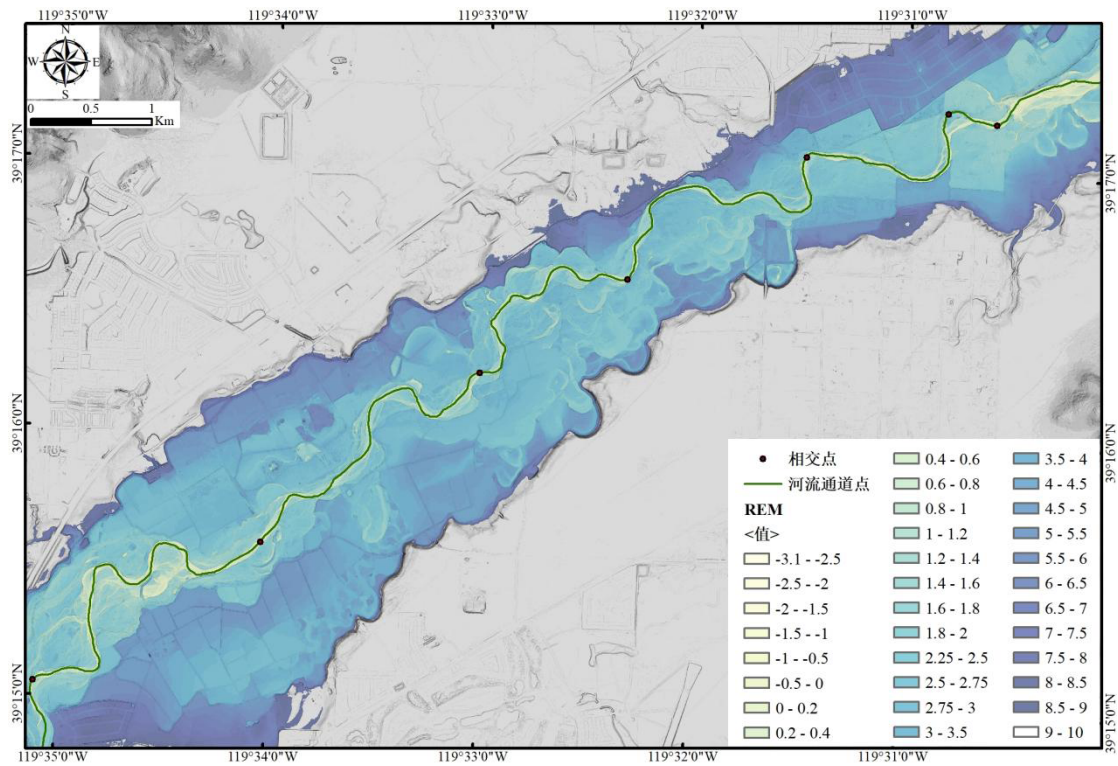


图4 使用横截面插值法创建的REM

Fig.4 REM created by using the cross section interpolation method

2.2 核密度法

核密度法是国外学者 Diltz 等提出的一种方法^[21], 通过计算河流核心的高程值作为河流的参考高度, 获取河流迁移区域的详细信息。核密度方法创建所需的时间较短, 产生的 REM 很少有伪影或错误的高程值。

原理: 核密度分析用于计算每个输出栅格像元周围的点要素的密度, 目的是获得能够近似表示数据分布的密度函数的每一点的估计值, 从而表示出数据的分布情况。核密度工具使用核密度函数来计算河流海拔的距离加权平均值, 其中河流中更靠近高地网格的单元比位于更远的单元获得更大的权

重, 再从单个网格单元的高程中减去加权平均河流高程, 得到每个位置的高程值。

利用核密度法对激光雷达 DEM 数据进行处理 的简要流程(图5):

(1)将初步处理过的激光雷达 DEM 数据加载至 ArcGIS 10.8 中, 手动跟踪河流通道线, 沿着河流通道生成点, 提取高程。

(2)创建点密度栅格: 利用核密度分析工具 (Spatial Analyst 工具-密度分析) 的首次运行创建了一个“点密度”栅格, 表示每个网格单元的搜索距离内的点的数量。生成的“点密度”栅格则表示每个网格单元在搜索距离内的点数。因此, 点密度值在河流通道附近最大, 在输出栅格边缘附近最小。

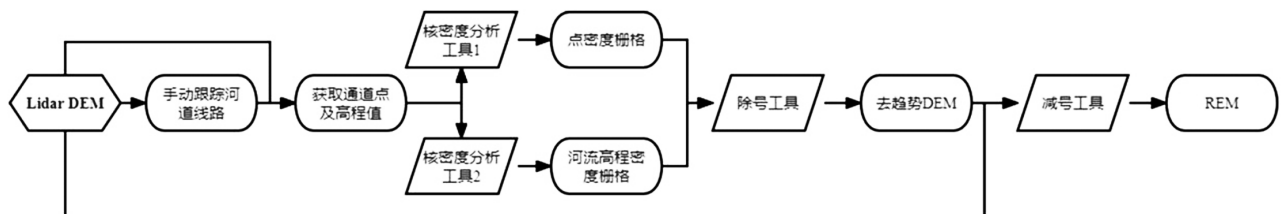


图5 核密度法技术流程图

Fig.5 Technical flow chart of the kernel density method

(3)创建河流高程密度栅格:利用核密度分析工具(Spatial Analyst工具-密度分析)的二次运行,创建一个“河流海拔密度栅格”。每个网格单元的河流高程密度值是该网格单元在一定搜索距离内的高程值之和。

(4)创建去趋势DEM:使用前两步的输出栅格生成去趋势DEM。去趋势DEM是前两步中选择的搜索半径内通道点高程的加权平均值。使用除号工具(Spatial Analyst工具-数学分析-逻辑运算),将河流海拔密度栅格除以点密度栅格,得到去趋势DEM数据。

(5)生成REM:REM是使用减号工具(Spatial Analyst工具-地图代数-栅格计算器)生成的,从原始DEM中减去去趋势DEM。除了位于相邻河道下方的低洼漫滩地区,去趋势DEM相对高程值通常为正^[4]。

通过核密度分析工具的两次运行得到的点密度栅格和河流海拔密度栅格,可以将其利用除号工具(Spatial Analyst工具-数学分析-逻辑运算),得到去趋势DEM图。将得到的去趋势DEM数据调整合适的色带,并将透明度设置为50%,即可得到效果较好的去趋势DEM图(图6)。通过核密度方法生成的REM如图所示(图7)。图中细节部分较为明显,围绕河道通道点往海拔变大,上游河段坡度突变处,可观察到河道左右两侧存在两处矿区,

随着河道的海拔越低,河道左右两侧的河堤,部分梯田以及阶地特征愈发明显。

2.3 反距离加权法

反距离加权法是华盛顿生态部门的杰里·富兰克林和帕特里夏·奥尔森学者提出的一种针对河流迁移研究可视化的方法^[22]。利用IDW工具,对河流的基线高程进行插值,生成去趋势DEM,再利用减号工具从原始DEM中减去去趋势DEM生成REM。反距离加权法(IDW)创建所需的时间也较少,且方法类似于核密度法,涉及到提取河流通道的高程,此过程与核密度法相同。

原理:利用地物之间距离较近的事物要比彼此距离较远的事物更相近,这种方法为距离预测位置最近的点分配的权重较大,而权重却作为距离的函数而减小,IDW工具根据指定搜索范围内高程点的距离加权平均值为去趋势DEM分配高程半径,加权方案能有效地使距离较近的高程在平均计算中获得较大的权重,因此可利用反距离加权法进行河流中心线的高程插值。

利用反距离加权法对激光雷达DEM数据进行处理的首要流程(图8):

(1)将初步处理过的激光雷达DEM数据加载至ArcGIS 10.8中,手动跟踪河流通道线,沿着河流通道生成点,提取高程。

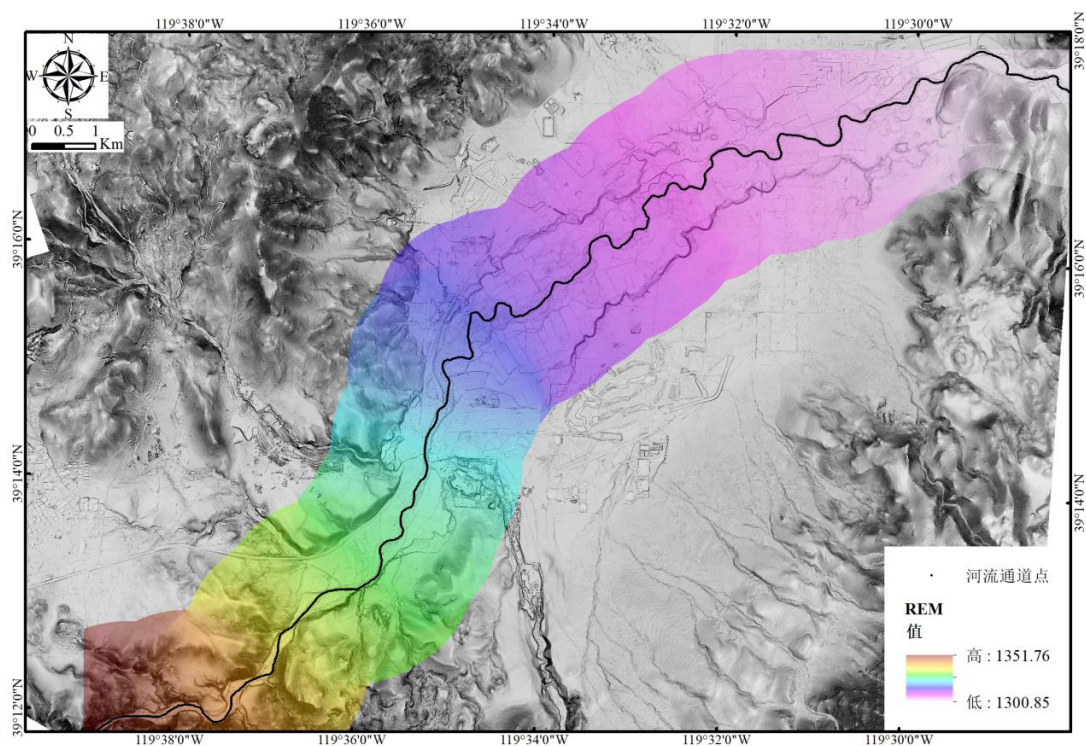


图6 使用核密度法创建的去趋势DEM

Fig.6 The detrended DEM created by using the kernel density method

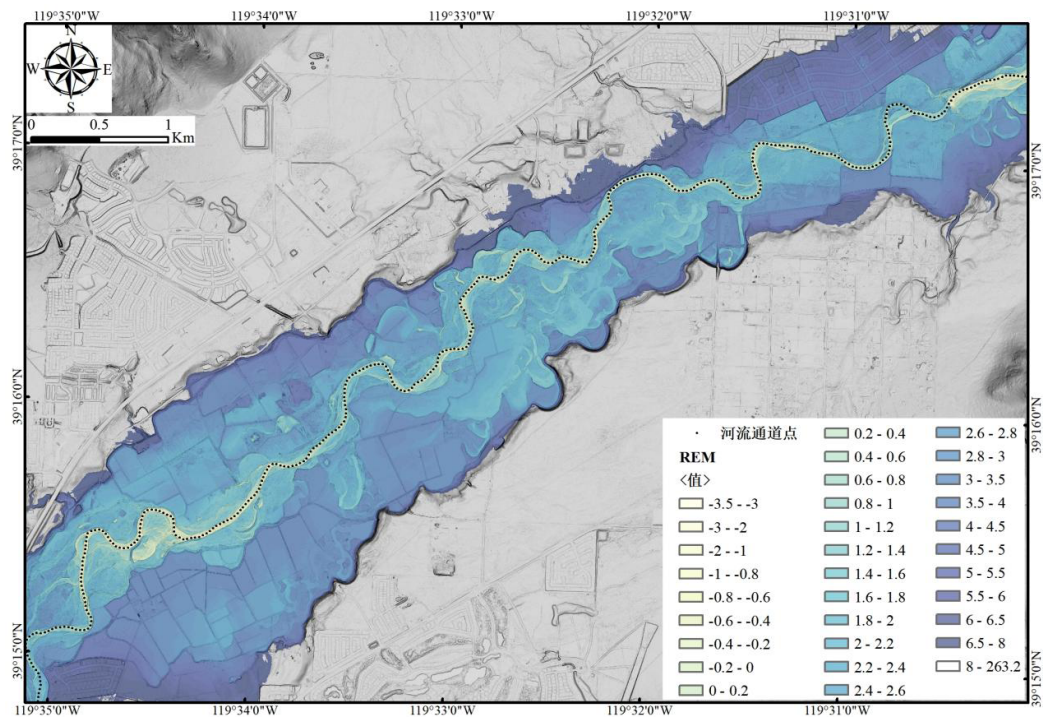


图7 使用核密度法创建的REM

Fig.7 REM created by using the kernel density method

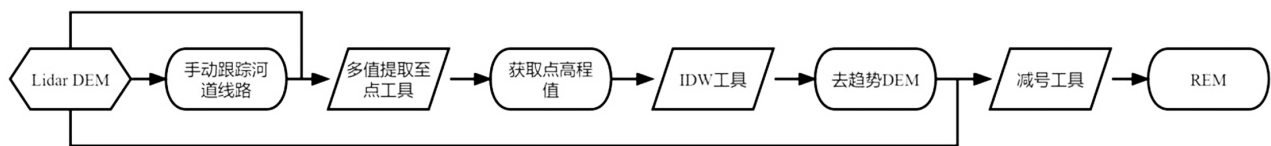


图8 反距离加权法技术流程图

Fig.8 Technical flow chart of inverse distance weighting method

(2)创建去趋势DEM: 使用反距离权重法工具(3D Analyst 工具-栅格插值)生成去趋势DEM。IDW 工具根据指定搜索范围内高程点的距离加权平均值, 为去趋势DEM 分配高程半径。加权方案能有效地使距离较近的高程在平均计算中获得较大的权重。

(3)生成相对海拔模型 (REM): REM 是使用减号工具(Spatial Analyst 工具-地图代数-栅格计算器)从原始DEM 中减去去趋势DEM 生成的。

使用反距离加权法生成的REM 如图所示(图9)。图中河流轮廓清晰可见, 河流边缘部分能识别出阶地以及沙洲等重要河流特征。部分河段的中心河道能清晰观察到河流改道迁移的情况。

2.4 精度评价说明

REM 的精度主要取决于DEM 的精度高低, 低分辨率的DEM 很难检测到海拔的细微变化, 米级分辨率的DEM 生成的REM 比低空间分辨率DEM 生

成的REM 更能揭示细微的地形特征, 且多色梯度可以应用于REM, 以实现科学解释所必须的细微海拔变化的展示效果, 然而, 当用于制图目的时, 单色梯度会产生更加美观。地形数据的质量通常限制了REM 的性能, 使用激光雷达数据开发的大多数DEM 通常不完整, 缺乏漫滩地形的详细信息, 模型的建立依赖于一个高分辨率的DEM。

3 REM 三种生成方法的优劣与适用性分析

3.1 REM 三种生成方法的优势与不足

REM 非物理模型, 它不需要重复的计算或粗糙度估计等。REM 更适合于难以进行详细现场调查的河流漫滩的比较。但是完全基于激光雷达数据的研究将严重低估漫滩及其河流的作用, 单独使用激光雷达数据提供的粗糙的水面, 且不规则。激光

雷达数据可结合声纳系统，激光雷达与声纳系统组合的集成，可以改善河床的表面细节^[13]。

通过REM生成实验，本研究得到三种方法在耗时、自动化程度、准确性、鲁棒性等方面存在一定差异。

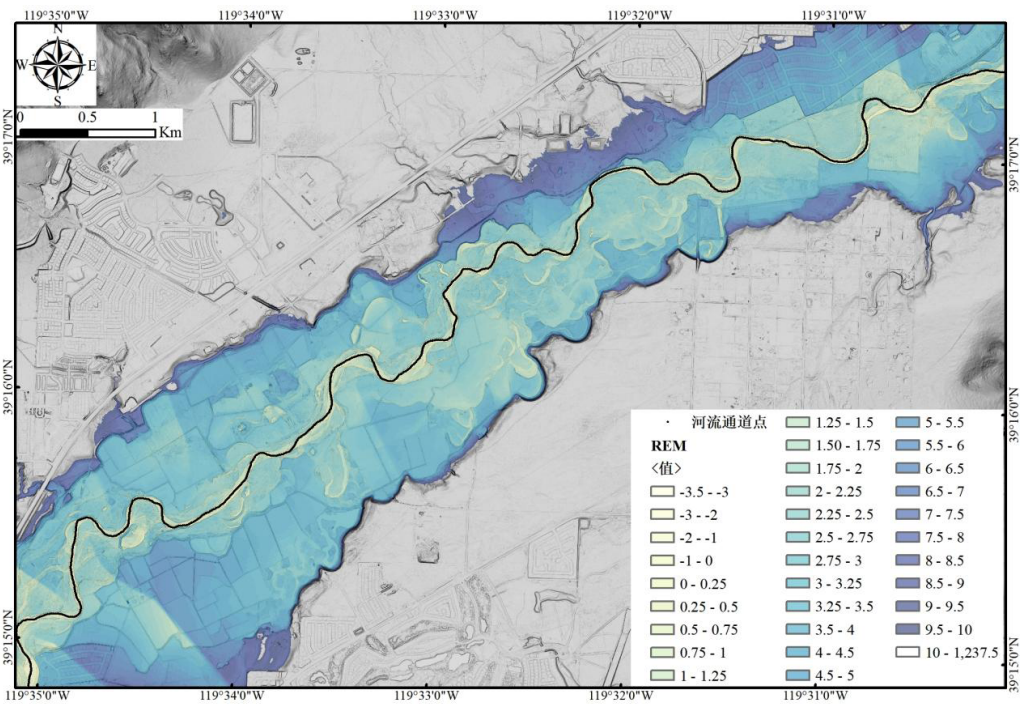


图9 使用IDW法创建的部分河段REM

Fig.9 REM of a section of the river created by using the inverse distance weighting method

对于横截面插值法而言，主要的优势表现在可根据用户需要做适用性调整，相对而言鲁棒性强，较为灵活。但是横截面法的自动化程度较低，且花费的时间较长，因此较多的人工干预，所以横截面绘制需要注意事项有：

- (1)横截面绘制线必须穿过河流通道中心线；
- (2)每条横截面绘制线不能与其余任何横截面的绘制线相交；
- (3)尽量将每条横截面绘制线垂直于河流通道中心线，使河流通道高程向外推算；当遇到曲折的河道时，横截面绘制线应倾斜于河流通道中心线；
- (4)横截面的绘制间距需要考虑到研究区域所需的详细程度；
- (5)当绘制截面遇到特殊地形(海拔或坡度突变)时，例如陡坡、瀑布等情况，应将横截面在河道上游和下游两侧支撑这些变化。

对于核密度法，主要优势是创建所需时间相对较少，生成的REM很少有伪影或错误的相对高程值，但是也存在一些值得改进的方面。

例如，核密度法导致一些潜在的伪影或者错

误的相对高度主要体现在研究河段范围的终点会有偏差，河流上游端去趋势DEM较低，河流下游端去趋势DEM较高，基于这些偏差，河流的相对高程值将高于实际的上游端和低于实际的下游端地区。且这些偏差出现的原因则是创建点密度栅格及河流海拔密度栅格时选择的搜索距离，搜索距离过大，海拔或坡度出现突变的地段容易失去细节特征。生成REM阶段时，靠近搜索距离缓冲边缘的尖锐沟道拐弯处出现多余步骤，产生这种偏差时，可调整搜索距离的范围，将其距离设置为超出研究的河流漫滩区域。

对于反距离权重插值法，主要优势是创建用时较少，且只需要输入两个数据：DEM和河流中心线。

在生成REM时产生的误差与核密度法类似，当创建去趋势DEM时的搜索距离设置越大，其创建的平滑效果也越大，河流斜率的突变可能会消失，导致出现与实际不符的部分特征。在生成REM阶段，当创建去趋势DEM时的搜索距离设置小于河漫滩的宽度值时，在河流弯曲等特殊河段的REM容易出现多余的部分，这些是反距离权重

插值法算法中的偏差,无法反映真实的河流特征地形。

3.2 REM的适用性

DEM在拉伸之后,河流上下游的特征逐渐消失,在同一参考高度下,离参考距离越远,河流中心的细节特征容易被模糊掉,就算是将DEM数据进行拉伸,也只是解决部分问题,河流的细节特征依旧会被掩盖。当DEM进行整体拉伸而无法呈现出河流上下游的详细特征时,REM的优势体现在此。它主要是把河流干流的中心高度作为河段的参考高度,可以在小范围的专题研究中,通过三种获取REM的应用方法,得到不同的参考高度点,保证当河流的上下游高差过大时,不会失去河流的细节特征,这对于研究河流和河床的变化具有参考价值。REM与DEM对比效果如图所示(图10)。

REM通过生动地显示蜿蜒河道、梯田和牛轭湖等河流特征,在辨别过去河道迁移的位置方面非常有用。此类信息在河道迁移和洪水研究以及许多其他工程、栖息地的选取和文化评估中提供了重要作用。REM主要可用于以下几方面的参考借鉴:

(1)为河流变迁的成因研究提供精细的地貌参考资料,对于河漫滩的研究具有参考作用^[5]。REM可为河漫滩的连通性、漫滩森林和其他生态功能的

评估过去和正在发生的历史遗留问题提供基础,为水资源和漫滩管理的潜在政策提供信息,并为进一步研究提供了基线。

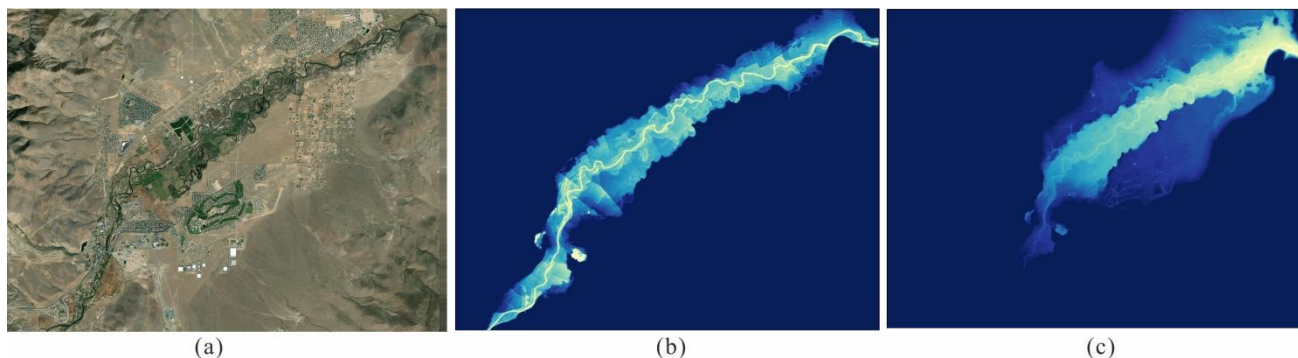
(2)在河流的管理和修复过程中,包括流量调节、生态系统影响和河流恢复需求。通过DEM得到的研究资料,河流的边缘细节缺失,会影响研究的整体精度,降低最终结果的准确性,REM可以较好地弥补这个缺陷。

(3)REM为提取河流大范围迁移的详细信息提供了可能。古河道的位置及流经地形复杂且范围大,由于粗糙的光谱和空间分辨率、障碍物的存在等原因,古河道的痕迹通常只部分可见^[2],REM是一种新的DEM可视化技术,可以很好地解决这一问题。

(4)REM可以帮助分析洪泛区地形,确定河道的低洼地区,通过地形的了解,针对修复最有可能成功的灾害地区来帮助降低成本^[13]。分析河流洪等灾害的发展,为河流的研究和治理提供参考。

(5)利用激光雷达数据生成REM,描绘由其衍生的树木分布地图,用于绘制鸟类栖息地,可改进流域现有的植被地图^[21]。

(6)REM能为河流修复计划提供帮助,建立稳定的生物栖息地。可快速识别生物潜在的具有最高创造力和恢复潜力的地区^[7]。



(a)卫星影像图,(b)REM,(c)DEM

图10 卫星影像图与REM及DEM效果对比图

Fig.10 Comparison of satellite images with REM and DEM

4 结论

DEM一直都是地形地貌和河流几何形态研究的重要数据,但它无法解决河流解译中高差过大导致的地物模糊不清等问题。REM即是为此应运而生的。REM的生成方法包括核密度法、反距离加权法以及横截面插值法。根据上述实验,我们

得出如下认识:

(1)核密度法、反距离加权法以及横截面插值法等三种REM生成方法都是通过创建一个去趋势DEM,将河流中的河谷坡度减去,去除高差过大带来的影响。通过对原始DEM进行去趋势的处理能够保留河流原有的地形结构与特征,增强相邻地物之间的差异,更有利于解释河流地物之间的关系。

(2)三种方法各有特点:核密度法创建时间较短,生成的相对高程模型(REM)相对高程值正确率较高,但是河流的上下端出现偏差是受创建点密度栅格以及河流海拔密度栅格中的搜索距离影响,搜索距离过大,海拔或坡度突变处缺少细节特征。反距离加权法所需时间相对较少,但是其生成的相对高程模型(REM)存在潜在的误差:搜索距离过大河流斜率消失,特征不明,搜索距离过小,出现多余特征。横截面插值法自动化程度相对较低,创建花费时间也相应增加。横截面插值法与核密度法及反距离加权法的主要区别在于去趋势DEM的生成,该方法未使用基于算法的自动方式,而是利用绘制的横截面的方式来定义如何从河流通道外推出河流通道高程,绘制过程中需注意河段的实际变化。

参考文献

- [1] Olson P L, Legg N T, Abbe T B, et al. A methodology for delineating planning-level channel migration zones[R]. Washington D.C.: Washington(State). Dept. of Ecology, 2014.
- [2] Zhang S, Ma Y, Chen F, et al. A new method for supporting interpretation of paleochannels in a large scale-detrended digital elevation model interpretation[J]. *Geomorphology*, 2020(369):107374.
- [3] Notebaert B, Verstraeten G, Govers G, et al. Qualitative and quantitative applications of LiDAR imagery in fluvial geomorphology[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2009,34(2):217-231.
- [4] Mcqueen R. Bed particle displacement in a wandering gravel-bed river[D]. Ontario: Western University, 2019.
- [5] Hou J M, Ma Y Y, Wang T, et al. A river channel terrain reconstruction method for flood simulations based on coarse DEMs[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2021(140): 105035.
- [6] Appleby C A, Williams M C, Anthony L H, et al. Flood depth and channel migration zone maps, Benton, Marion, Morrow, and Washington Counties, OREGON[R]. Oregon: Oregon Department of Geology and Mineral Industries, 2022:70.
- [7] Jones J L. Side channel mapping and fish habitat suitability analysis using lidar topography and orthophotography[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2006,72(11):1202.
- [8] Nobre A D, Cuartas L A, Hodnett M, et al. Height above the nearest drainage-a hydrologically relevant new terrain model [J]. *Journal of Hydrology*, 2011,404(1-2):13-29.
- [9] Chow C, Twele A, Martinis S. An assessment of the height above nearest drainage terrain descriptor for the thematic enhancement of automatic SAR-based flood monitoring services[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016(9998):999808-11.
- [10] Speckhann G A, Borges Chaffe P L, Fabris Goerl R, et al. Flood hazard mapping in Southern Brazil: a combination of flow frequency analysis and the HAND model[J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2018,63(1):87-100.
- [11] Zheng X, Tarboton D G, Maidment D R, et al. River channel geometry and rating curve estimation using height above the nearest drainage[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2018,54(4):785-806.
- [12] Johnson J M, Munasinghe D, Eyelade D, et al. An integrated evaluation of the national water model(NWM)-height above nearest drainage (HAND) flood mapping methodology[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2019,19(11): 2405-2420.
- [13] Chen Y, Mossa J, Singh K K. Floodplain response to varied flows in a large coastal plain river[J]. *Geomorphology*, 2020(354):107035.
- [14] Levick S R, Rogers K H. Context-dependent vegetation dynamics in an African savanna[J]. *Landscape Ecology*, 2011,26(4):515-528.
- [15] Colgan M S, Asner G P, Levick S R, et al. Topo-edaphic controls over woody plant biomass in South African savannas[J]. *Biogeosciences*, 2012,9(5):1809-1821.
- [16] Liu Y, Jing W L, Wang Q, et al. Generating high-resolution daily soil moisture by using spatial downscaling techniques: a comparison of six machine learning algorithms[J]. *Advances in Water Resources*, 2020(141):103601.
- [17] Orengo H A, Petrie C A. Multi-scale relief model(MSRM): a new algorithm for the visualization of subtle topographic change of variable size in digital elevation models[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2018,43(6):1361-1369.
- [18] Verheust L, Johnson G. The watershed database for sub-equatorial Africa, structure and user interface[M]. [S.l.]: Aquatic Resource Management for Local Community Development Programme, 1998.
- [19] Peakall J. Axial river evolution in response to half-graben faulting: Carson River, Nevada, U. S. A. [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1998,68(5):788-799.
- [20] Glancy P A, Katzer T L. Water-resources appraisal of the Carson River Basin, western Nevada[R]. [S.l.]: United States Geological Survey, 1975.
- [21] Dilts T E, Jian Y, Weisberg P J. Mapping riparian vegetation with Lidar data predicting plant community distribution using height above river and flood height[J]. *ArcUser Online*: Redlands, CA, USA, 2010:18-21.
- [22] Olson P, Franklin J. Quality assurance project plan for channel migration assessments of Puget sound SMA streams [M]. Washington D. C.: Washington State Department of Ecology publication, 2012.