

引用格式:周毅阳,代文,王春,陶宇,李敏.数字高程模型空间分辨率对精细尺度地形变化检测的影响[J].山地学报,2023,41(3):446-458.
ZHOU Yiyang, DAI Wen, WANG Chun, TAO Yu, LI Min. Spatial resolution of Digital Elevation Models on fine-scale topographic change detection [J].
Mountain Research, 2023, 41(3): 446-458.

数字高程模型空间分辨率对精细尺度地形 变化检测的影响

周毅阳^{1a},代文^{1b},王春^{2a,2b*},陶宇^{2a,2b},李敏^{2a,2b}

(1. 南京信息工程大学 a. 遥感与测绘工程学院; b. 地理科学学院, 南京 210044;

2. 滁州学院 a. 地理信息与旅游学院; b. 实景地理环境安徽省重点实验室, 安徽 滁州 239000)

摘要:基于数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)的地形变化检测方法易受DEM空间分辨率效应的影响。基于两期DEM相减的地形变化检测研究,目前仍缺乏其对空间分辨率影响的讨论。本文利用两个典型地形变化的实验样区,以实测点云数据作为数据源,使用两类5种方式(点云重采样方式3种,DEM重采样方式2种)构建不同空间分辨率的DEM数据,并在不同空间分辨率下使用不同的操作顺序进行地形变化检测;通过平均误差、标准误差、莫兰指数等多个指标探索DEM空间分辨率对地形变化检测的影响。实验结果表明:(1)DEM空间分辨率对地形变化检测的影响与多空间分辨率DEM的生成方式有关,使用双线性插值法的平均误差、标准误差、莫兰指数均最小,其不仅能有效降低地形变化检测的误差,同时还能优化误差的空间分布。(2)不同的多空间分辨率DEM生成方式得到的分辨率效应的整体趋势基本一致,即空间分辨率变粗,地形变化检测结果的整体偏差和局部偏差均变大,误差的空间自相关性也越来越强,并且误差和空间分辨率之间存在一定的线性关系。(3)地形变化检测和升尺度操作的先后顺序并不影响检测结果,即先对DEM重采样后进行变化检测的结果和先进行地形变化检测再对地形变化进行重采样的结果一致。本研究可为地形变化检测时DEM的生成方式、空间分辨率的选择以及地形变化检测的操作顺序提供参考。

关键词:DEM空间分辨率;地形变化检测;分辨率效应;重采样方式;升尺度操作顺序

中图分类号: P208

文献标志码: A

通过两期或多期DEM相减得到地形变化量DoD(DEM of Difference, DoD)是最直接和最常用的地形变化检测方法之一^[1-2]。相对于传统基于点监测的大地测量(全站仪、GPS)方法,基于DEM的方法可以直接得到面上的地形变化情况,并且随着可获取的地形数据空间分辨率的提高,得到的地形变

化检测精度也相应提高^[3-4]。地形变化检测已广泛应用于地球科学的各个领域,包括用于推断河流系统年度尺度上的地形变化机制^[5]、揭示连续滑坡对地形变化的影响^[6]、监测周期内崩岗的高程变化并计算侵蚀量^[7],以及其他环境(温带、沿海和冰川等地区)中的探索。然而,DEM的地形变化检测不

收稿日期(Received date): 2022-09-16;改回日期(Accepted date): 2023-05-10

基金项目(Foundation item): 安徽省高等学校自然科学研究重大项目(KJ2021ZD0130);2018年度安徽省学术和技术带头人后备人选科研活动经费资助项目(2018H191);江苏省高等学校自然科学研究项目(22KJB170016)。[Major Project of Natural Science Research of the Anhui Higher Education Institutions (KJ2021ZD0130); Project of 2018 Anhui Province Academic and Technical Leader Reserve Candidate Research Activity Funding (2018H191); The Natural Science Foundation of the Jiangsu Higher Education Institutions of China (22KJB170016)]

作者简介(Biography): 周毅阳(1997-),男,浙江嘉兴人,硕士研究生,研究方向:地形变化检测。[ZHOU Yiyang (1997-), male, born in Jiaxing, Zhejiang province, M. Sc. candidate, research on topographic change detection] E-mail: 775808511@qq.com

***通讯作者**(Corresponding author): 王春(1975-),男,博士,教授,主要研究方向:数字地形分析。[WANG Chun (1975-), male, Ph. D., professor, research on digital terrain analysis] E-mail: wangchun93@126.com

可避免地受到 DEM 空间分辨率效应的影响。

DEM 的空间分辨率效应是地理信息科学领域的热点问题。空间分辨率会直接影响基于 DEM 的数字地形分析结果。研究表明^[8-10],DEM 分辨率影响对坡度、坡向、坡长和 LS (Slope length and steepness) 等地形因子的计算,在不同空间分辨率 DEM 下计算的各类地形因子差异较大,且存在一定的函数关系。DEM 空间分辨率也影响各类地理分析模型^[11-13],如 RUSLE、SWAT 和 WEPP 等。地形变化检测涉及到多期不同空间分辨率 DEM 的差值分析。上述研究仍拘泥于对单期 DEM 空间分辨率效应的探索,缺乏对多期 DEM 耦合分析时的空间分辨率效应的研究。此外,较高空间分辨率的 DEM 数据不仅在获取方面困难,并且 DEM 的数据量会随空间分辨率的增加而呈几何级数的增加,从而导致在计算机硬件以及软件的处理能力上有所限制;而较低空间分辨率的 DEM 数据则会造成信息大量损失导致精度降低^[14]。DEM 空间分辨率对地形变化检测有何影响、是否存在地形变化检测的适宜 DEM 空间分辨率等科学问题还亟需探索。

多空间分辨率 DEM 的生成方式影响 DEM 空间分辨率对地形变化检测的精度。在生成多空间分辨率 DEM 数据的过程中,不同的生成方式(采样方式)会得到不同的结果。前期学者已经关注到基于 DEM 重采样的数据精度变化、重采样高程误差及其分布特征^[15-17],也主宰了不同重采样方法影响地形分析结果^[18-19]。这些研究有助于定量理解不同重采样方法对于 DEM 数据质量以及地形分析结果的影响,但是在讨论 DEM 空间分辨率对地形变化检测的影响时,不同的采样方式对分析结果的影响仍缺乏研究。

基于 DEM 的数字分析过程中的操作方式影响地形变化检测精度。当 DEM 的空间分辨率发生变化时,通常有两种方法(操作顺序)可以获取所需空间分辨率下的分析结果^[20]:一种是先对已有的高空间分辨率 DEM 进行重采样得到低空间分辨率 DEM,再计算相关参数;另一种则是先基于已有高空间分辨率 DEM 计算相关参数,而后对得到的参数进行重采样至相应空间分辨率。这种将数据从较高的空间分辨率转换为较低的空间分辨率的过程,被称为升尺度过程。以坡度为例,学者们注意到升尺度

过程对坡度精度有显著的影响,已有研究中建议^[21-22],应该先从高空间分辨率的 DEM 数据中计算地形参数,然后重采样至更低的空间分辨率。后来有学者在研究中比较了两种升尺度过程对 DEM 导出地形坡度精度的影响^[23-24],认为,升尺度操作方式会显著影响所需空间分辨率下的坡度结果。因此,在探索 DEM 的空间分辨率对地形变化的影响时,还需考虑这一操作方式的影响。

DEM 空间分辨率对地形变化检测存在多重复合性影响,包含了空间分辨率自身的变化、多空间分辨率 DEM 的生成方式和分析过程中的操作方式三个方面。当前,亟需对这三个方面的问题进行系统的分析和科学的探索。本文利用两个典型地形变化实验样区的高精度点云数据,通过不同重采样方式生成多空间分辨率 DEM,然后分别使用不同的操作顺序进行地形变化检测,最后通过对比分析不同空间分辨率和不同操作方式下的地形变化检测结果,从数据误差系统地探索 DEM 空间分辨率对地形变化检测的影响,以期对地形变化检测时 DEM 的生成方式、空间分辨率的选择以及地形变化检测的操作顺序提供参考。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究思路

本研究的技术路线如图 1 所示,首先通过点云重采样和 DEM 重采样共 5 种方式生成多空间分辨率 DEM 数据;然后,通过两期 DEM 相减得到地形变化量 DoD,并且在多空间分辨率 DoD 的计算过程中分别使用不同的地形变化检测操作顺序;最后,通过平均误差、标准误差、莫兰指数等指标对比、分析 DEM 空间分辨率对地形变化检测结果的复合性影响。

1.2 多空间分辨率 DEM 的生成

1.2.1 DEM 空间分辨率序列

为探索 DEM 空间分辨率对地形变化检测的影响,本文生成了一系列不同空间分辨率的 DEM。其空间分辨率设置两个序列,一是在 0.1~0.9 m 空间分辨率范围内以 0.1 m 为间隔生成 9 个 DEM;二是在 1~10 m 空间分辨率范围内以 1 m 为间隔生成 10 个 DEM。考虑到空间分辨率超过 10 m 后,DEM 数据所包含的地形信息严重丢失,难以用于地形变

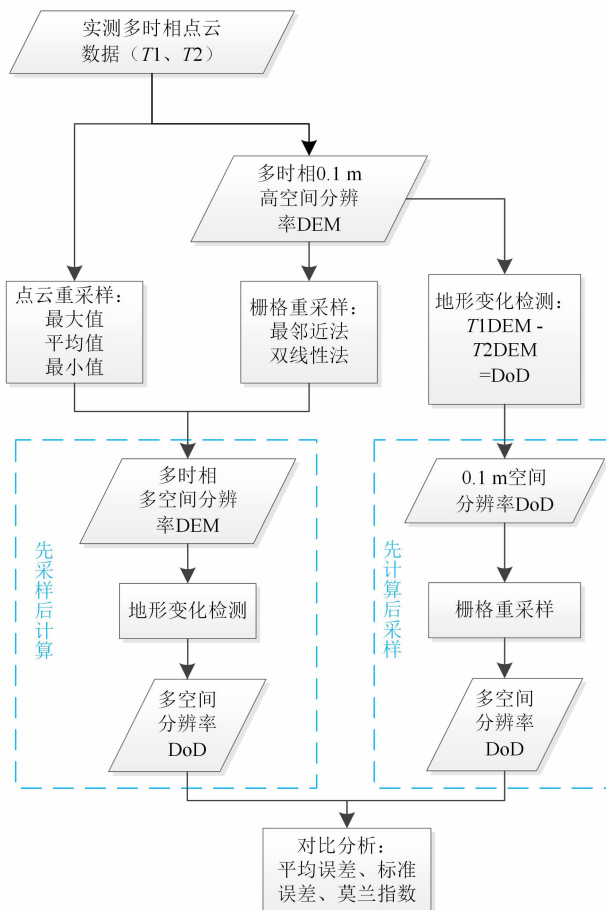


图1 技术路线图

Fig. 1 Research roadmap

化检测^[25],故本文不考虑空间分辨率大于 10 m 的 DEM。

1.2.2 多空间分辨率 DEM 的生成方式

在生成多空间分辨率 DEM 时,选择不同的生成方式可能在一定程度上影响 DEM 空间分辨率对地形变化检测的精度。多空间分辨率 DEM 的生成方式主要可分为两类。

一类是基于原始点云数据生成。其可以自由设置空间分辨率大小来获取所需的多空间分辨率 DEM 数据,包含 3 种重采样方法^[26],分别是最大值 (Max)、最小值 (Min) 和平均值 (Mean)。

另一类是基于高空间分辨率 DEM 生成。其包含 3 种常见的重采样方法^[18],分别是最邻近法 (Near)、双线性插值法 (Bil) 和三次卷积法 (Cub)。一般情况下,三次卷积法进行重采样的使用场景较少,且在已有研究中与双线性法的结果差异很小^[18-19],因此在本研究中不做讨论。

1.3 地形变化检测

基于 DEM 的地形变化检测方式是通过两期 DEM 相减得到地形变化量 DoD。本文将第一期的 DEM 数据作为基准,使用每个测量时段的第二期 DEM 减去第一期 DEM 得到 DoD。其中,DoD 正值表示沉积,负值表示侵蚀。将 DoD 负值、正值分别累加并乘以像元面积可以得到样区的毛侵蚀量和毛沉积量(体积),正值负值一起累加可以得到整个样区的地形净变化量。

在讨论多空间分辨率 DEM 对地形变化检测的影响时,还需要考虑一个因素,即地形变化检测的操作顺序。通常有两种方式:一种是先生成两期不同空间分辨率的 DEM,进而相减得到不同空间分辨率的 DoD,本文中称为 DEM-DEM-DoD 方式,即 EED 的操作顺序。另一种是使用两期高空间分辨率的 DEM 相减计算得到 DoD,再对 DoD 进行重采样至不同的空间分辨率,本文中称为 DEM-DoD-DoD 方式,即 EDD 的操作顺序。此外,在 EDD 操作顺序下的重采样过程使用 1.2.2 节中基于高空间分辨率 DEM 的生成方式,即最邻近法和双线性法。

1.4 不同方式对比分析

由于高空间分辨率的 DEM 能表达更多的地形细节,因此本研究以两期 0.1 m 空间分辨率 DEM 相减得到的 DoD 作为参考真值,将上述不同方式下的多空间分辨率 DoD 分别减去参考真值得到误差栅格,具体计算公式如下:

$$\sum \text{error}_i = \text{DoD}_i - \text{DoD} \quad (1)$$

式中, i 为对应的不同空间分辨率。

为保证对比分析时结果的一致性,本文将所计算误差栅格的空间分辨率统一设置为 0.1 m,进而通过误差栅格的平均误差 (Mean Error, ME) 和标准误差 (Standard Error, STD) 来评估不同 DEM 空间分辨率下地形变化检测的误差水平。平均误差表示 DoD_i 相对于 DoD 的整体偏差,标准误差则表示 DoD_i 相对于 DoD 的局部偏差,具体计算公式如下:

$$\text{ME} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (2)$$

$$\text{STD} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (3)$$

式中, n 为整体数量; x_i 为每一个误差计算值; \bar{x} 为平均值。

此外,为量化误差空间分布的自相关性,本研究计算了不同采样方式下误差栅格的莫兰指数^[27],其反映了误差的空间聚集特征。莫兰指数的值为 $-1 \sim 1$,其值越接近 1 ,表明误差在空间上越聚集分布;其值越接近 -1 ,则表明误差在空间上近似于离散分布;其值为 0 ,则误差在空间上为随机分布。具体计算公式如下:

$$I = \frac{n}{S_0} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{i,j} z_i z_j}{\sum_{i=1}^n z_i^2} \quad (4)$$

式中, I 为莫兰指数值; n 为整体数量; S_0 为所有空间权重的聚合; $w_{i,j}$ 为要素 i 和 j 之间的空间权重; z_i 为要素 i 的误差值与其平均值的偏差; z_j 为要素 j 的误差值与其平均值的偏差。

当使用地形变化检测来描述一个地区的侵蚀/沉积动态时,DoD 中的面积和体积是两个常用的指

标,其均可以使用 Arcgis 中的栅格统计获得。因此,除了对多空间分辨率的 DoD 进行误差分析,本文还引入这两个指标来加以描述误差分析结果。

1.5 样区与数据

黄土高原是我国水土流失最严重的地区之一,可以采集到较丰富的地形变化数据,因而也是地形变化调查的重点区域之一。因此本文样区 A 选择黄土高原桥沟地区,位于陕西省延安市宝塔区;样区 B 则为天山上一处开挖的矿坑,位于新疆乌鲁木齐市天山区。本文利用无人机摄影测量的方式分别采集了 2 个实验样区的两期倾斜影像,样区信息见表 1。样区 T1、T2 两个时期的正射影像见图 2,表 1 中的地面分辨率是指生成正射影像的分辨率,即表示图中一个像素(pixel, pix)代表的地面实际距离,也称为空间分辨率。

本文使用的地形数据由无人机倾斜摄影测量生

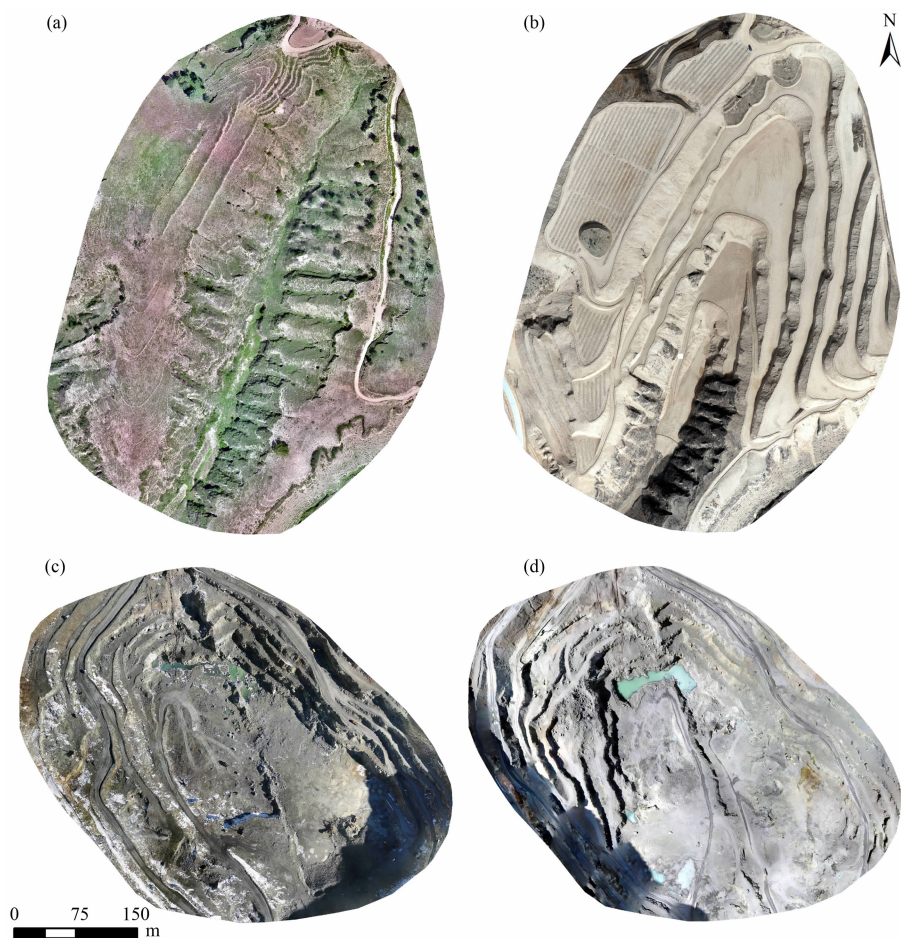


图 2 A、B 样区两个时期的正射影像图:(a) A 样区 T1 时期(2019 年);

(b) A 样区 T2 时期(2021 年);(c) B 样区 T1 时期(2017 年);(d) B 样区 T2 时期(2019 年)

Fig. 2 Orthophoto images of two periods of the A and B sample areas: (a) T1 period of A sample area (2019);

(b) T2 period of A sample area (2021); (c) T1 period of B sample area (2017); (d) T2 period of B sample area (2019)

表 1 样区介绍

Tab. 1 Introduction of sample area

样区	地点	拍摄时间	经纬度	面积/km ²	地面分辨率/(cm/pix)	地形特征	地形变化
样区 A	黄土高原桥沟	2019 年 (T1)	37°34'2"N	0.15	3.5	沟谷区域	2021 年该区域较 2019 年在坡面修筑了梯田
		2021 年 (T2)	110°16'48"E				
样区 B	天山矿坑	2017 年 (T1)	43°18'60"N	0.17	4.7	山地区域	2019 年该区域较 2017 年整体向下开挖
		2019 年 (T2)	85°3'48"E				

成。首先利用大疆精灵 4pro 无人机进行影像数据采集,而后使用 photoscan 软件,依据多视影像的联合平差与多视影像的密集匹配的计算方法对影像数据进行空三加密,最终得到研究区的稀疏点云和密集点云。密集点云数据使用 CloudCompare 软件进行处理,包括点云配准、点云裁剪以及点云滤波,并利用点云插值转栅格的方法得到研究区的 DEM 数据。其中 A 样区第一时期获取的点云总数约为 5400×10^4 个,平均密度为 360 个/m^2 ,第二时期获取的点云总数约为 5150×10^4 个,平均密度为 343 个/m^2 ;B 样区第一时期获取的点云总数约为 4700×10^4 个,平均密度为 276 个/m^2 ,第二时期获取的点云总数约为 4900×10^4 个,平均密度为 288 个/m^2 。点云数据生成 DEM 的初始空间分辨率设置为 0.1 m。由于测量过程中在两个样区中均设置了相应的控制点并用于点云数据的地理配准,从而保证两期采集得到地形数据的坐标系完全一致,可直接用于地形变化检测。

2 结果与分析

2.1 多空间分辨率 DEM 的生成方式对地形变化检测的影响

本文由实测点云数据得到的两个实验样区的 0.1 m DoD 如图 3 所示,两个样区检测到的地形变化结果呈现出不同的情况,样区 A 整体上表现为沉积,由于在坡面修筑梯田,导致地形变化的空间分布呈侵蚀/沉积变化交替分布,其中沉积部分为泥土堆积,侵蚀部分为坡面开挖。样区 B 整体上表现为侵蚀(挖方),地形变化在空间上相对聚集,其中沉积部分为矿土堆积,多发生在坡面上;侵蚀部分为矿土向下开挖,发生在坡面及坑底。

图 4 为两类 5 种不同的多空间分辨率 DEM 生成方式得到的多空间分辨率 DoD 误差对比结果,包括平均误差和标准误差。可以发现,基于 DEM 的地形变化检测结果存在明显的空间分辨率效应,随着

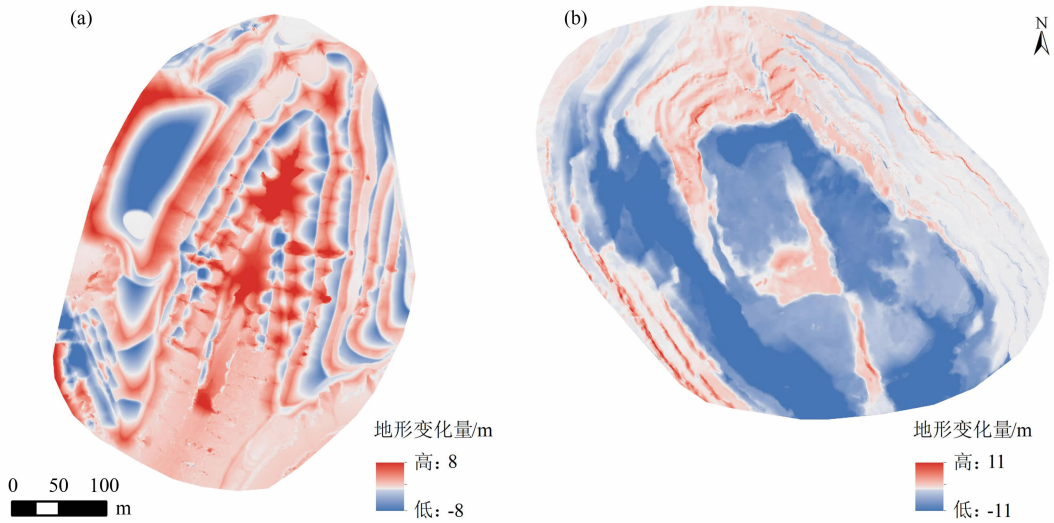


图 3 两个样区 0.1 m 空间分辨率下的地形变化检测结果:(a)样区 A;(b)样区 B

Fig. 3 Results of topographic change detection at 0.1 m spatial resolution in two sample areas: (a) sample area A; (b) sample area B

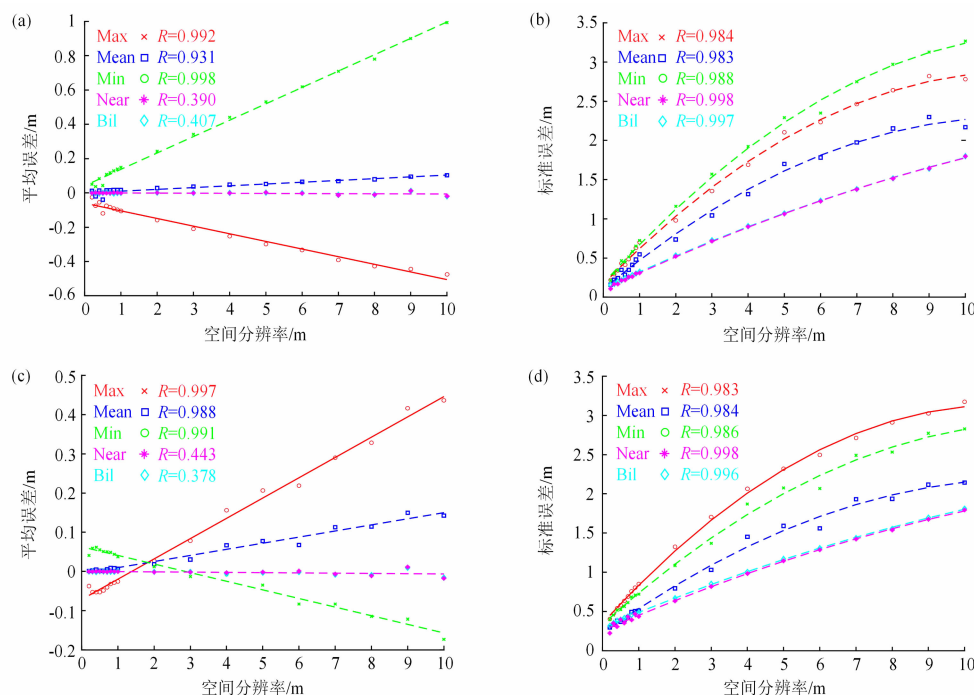


图4 不同的多空间分辨率 DEM 生成方式下地形变化检测的误差结果:

(a)样区 A 平均误差;(b)样区 A 标准误差;(c)样区 B 平均误差;(d)样区 B 标准误差

Fig. 4 Error results of topographic change detection with different multi-spatial resolution DEM generation methods:

(a) mean error of sample area A; (b) standard error of sample area A; (c) mean error of sample area B;

(d) standard error of sample area B

DEM 空间分辨率的变粗,地形变化检测结果的误差也随之增加。并且这种空间分辨率效应在误差上表现为明显的相关性变化,即随着空间分辨率间隔的增大,其变化速率保持不变,说明 DoD 的整体偏差呈线性增加趋势。在标准误差上则表现为非线性增加,说明 DoD 的局部偏差依然随空间分辨率的变粗而增加;而非线性变化是由于当分辨率变粗到某一值时,局部区域地形被平滑为平地,此时空间分辨率再增大,其高程值不变,故地形变化检测结果的标准误差逐渐趋向于稳定。

DEM 空间分辨率对地形变化检测的影响与多空间分辨率 DEM 的生成方式有关,不同的重采样方法所产生的地形变化检测空间分辨率效应之间有明显差异。相比基于高空间分辨率 DEM 的生成方式,基于原始点云数据的生成方式所得到的平均误差和标准误差曲线均明显较高,说明其对于地形变化检测空间分辨率效应的影响较大。

在基于原始点云数据的生成方式下,平均值法在两个样区中的平均误差与空间分辨率呈正相关,说明该方法下 DEM 空间分辨率的变大会使地形变

化检测的结果整体更偏向沉积,并且其两个误差指标所表现的误差曲线均相较于最大值法和最小值法更低,对于地形变化检测空间分辨率效应的影响也较小。而最大值和最小值法的影响则较大,平均误差曲线所表示的整体偏差说明,这两种方法会导致明显地出现高估或者低估地形变化的情况,并且两者会由于样区不同的地形变化情况而呈现出相反的变化趋势,最大值法在 A 样区会随着空间分辨率的变大使地形变化检测结果整体更偏向侵蚀,从而低估了原本地形变化是沉积的情况,最小值法则相反;同理,在 B 样区最大值法与最小值法的结果则与在 A 样区时刚好相反。

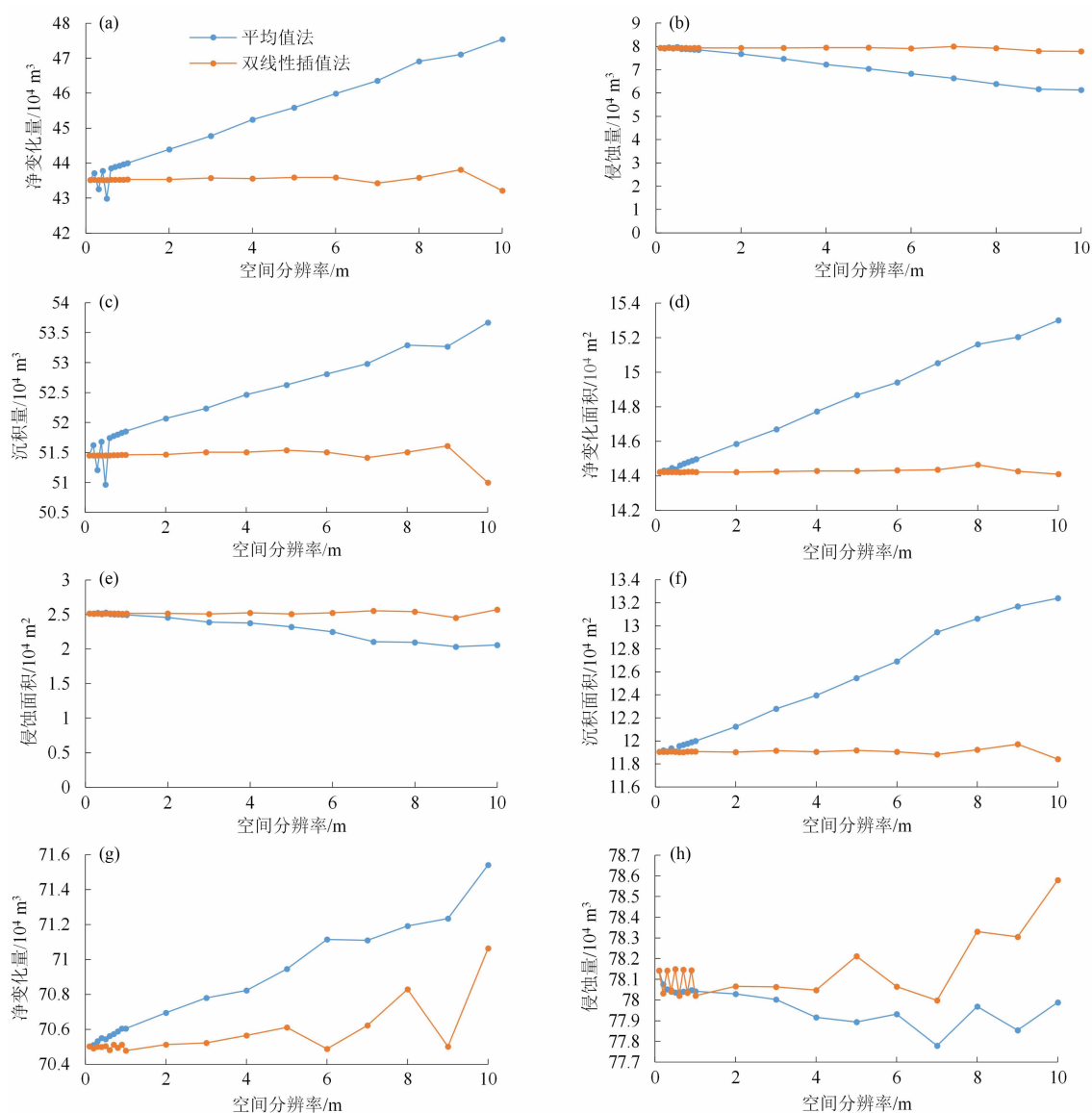
在基于高空间分辨率 DEM 的生成方式下,最邻近法和双线性法对于空间分辨率效应的误差变化曲线几乎相同。虽然两种方法的结果中平均误差与空间分辨率的相关性都较低,但平均误差值均在 0 附近,说明这两种方法下 DEM 空间分辨率的变大不会使地形变化检测结果产生明显偏差,其中双线性法在误差数值上较最邻近法略低一些,说明这种方法对地形变化检测空间分辨率效

应的影响最小。

上述实验结果表明,在使用平均值、最邻近和双线性法生成多空间分辨率 DEM 的情况下,两个样区的 DoD 误差曲线趋势基本相同,即空间分辨率效应相同。而由于最邻近法和双线性法的结果之间几乎没有差异且双线性法的影响最小,因此下文选用平均值法和双线性法进一步对比两类方式中各自最优方法的区别。结果如图 5,这两种方法在两个样区上呈现出的面积和体积变化的空间分辨率效应具有一致性,即平均值法所产生的分辨率效应较双线性法更明显,具体表现为随着 DEM 空间分辨率的变大,地形变化检测到的毛侵蚀的体积和面积在减小,毛沉积的体积和面积在增大,从而导致样区在整体上偏向沉积,而标准误差曲线上的波动也反映了局部偏差的波动,造成面积和体积变化的波动,分析原

因是误差均发生在坡度较大地方,坡度较陡和地形起伏较大的区域对 DEM 空间分辨率的变化更加敏感。因此,这种方法所带来的空间分辨率效应会导致地形变化检测的结果随 DEM 空间分辨率的变大而偏向沉积并发生误判。相反,双线性法表现出的空间分辨率效应则更小,说明其对于地形变化检测结果的影响最小。

此外,本文还计算了上述两种方法在 DoD 误差栅格上的莫兰指数, P 值均小于 0.01, Z 值均大于 2.58(图 6)。两种方法在两个样区上的莫兰指数随空间分辨率的变化趋势呈现出较强的一致性,即两种方法的莫兰指数都随空间分辨率的增加而增加,莫兰指数值在 0.2~4 m 呈明显增加趋势,在 4 m 之后趋于稳定,说明误差一直呈现空间聚类分布并且这种效果越来越明显,且当空间分辨率超过一定值



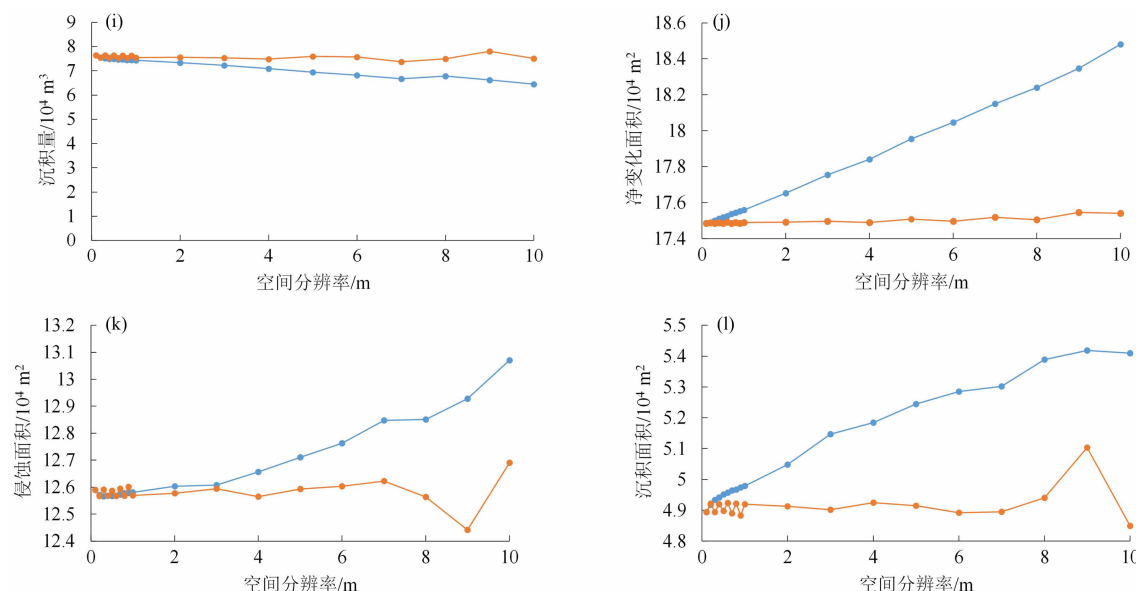


图5 平均值法和双线性插值法重采样情况下空间分辨率与地形变化检测结果:

(a)(b)(c)为A样区的体积变化(净变化量、侵蚀量、沉积量);(d)(e)(f)为A样区的面积变化

(净变化面积、侵蚀面积、沉积面积);(g)(h)(i)为B样区的体积变化;(j)(k)(l)为B样区的面积变化

Fig. 5 Results of spatial resolution and topographic change detection in the case of resampling by the mean and bilinear interpolation methods:

(a)(b)(c) are the volume changes of sample area A (net change volume, erosion volume, deposition volume);

(d)(e)(f) are the area changes of sample area A (net change area, erosion area, deposition area);

(g)(h)(i) are the volume changes of sample area B; (j)(k)(l) are the area changes of sample area B

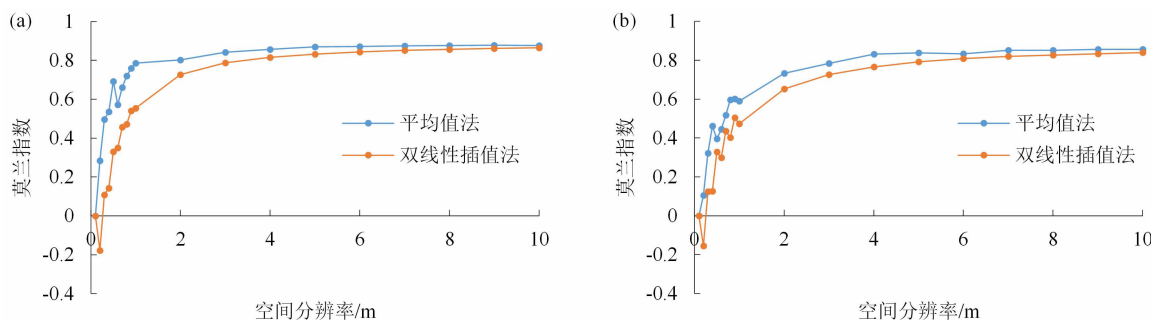


图6 平均值法和双线性插值法重采样情况下空间分辨率与莫兰指数结果:(a)样区A;(b)样区B

Fig. 6 Results of spatial resolution and Moran's Index in the case of resampling by the mean and bilinear interpolation methods:

(a) sample area A; (b) sample area B

时,其误差空间分布不再改变。

然而两种方法在误差空间分布上则呈现出完全不同的分布情况(图7)。使用平均值法重采样得到的误差空间分布图表现为误差发生在坡度较大的地方,且在0.2~10 m的空间分辨率下均呈现出空间正相关性和明显的空间聚集分布,而使用双线性法重采样得到的误差空间分布图则在0.2 m处表现为空间负相关,在其他空间分辨率下表现为空间正相关,并且其误差空间分布表现为全局分布。从误差空间分布的角度来看,莫兰指数和误差空间分布图

均验证了上述实验结果。

2.2 操作顺序对地形变化检测的影响

2.1节均为在EED操作顺序下得到的实验结果与分析。使用与EED操作顺序中相同的两种重采样方法,通过EDD操作顺序得到DoD空间分辨率效应的结果,如图8所示。在EDD操作顺序下,两种重采样方法所对应的误差曲线几乎相同,并且在两个样区上也表现出一致性,说明此时无论此时采用哪一种采样方法,其对地形变化检测空间分辨率效应的影响都相同且均较小。与EED操作顺序

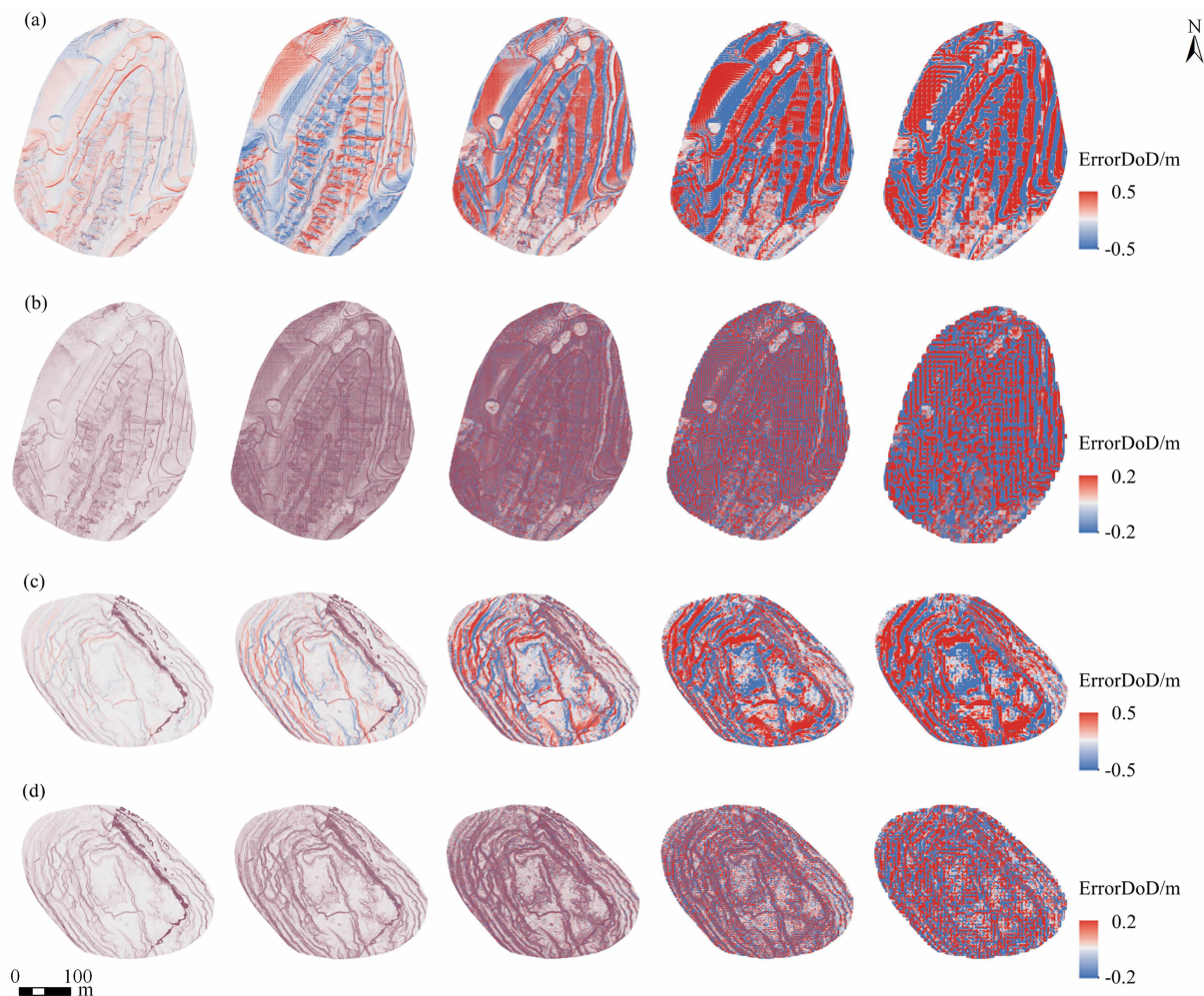


图 7 平均值法和双线性插值法重采样情况下空间分辨率与误差空间分布结果:(a)样区 A 使用平均值法重采样;

(b)样区 A 使用双线性插值法重采样;(c)样区 B 使用平均值法重采样;(d)样区 B 使用双线性插值法重采样

Fig. 7 Results of spatial resolution and error spatial distribution in the case of resampling by the mean and bilinear interpolation methods;

(a) result of resampling in sample area A using mean method; (b) result of resampling in sample area A using bilinear interpolation;

(c) result of resampling in sample area B using mean method; (d) result of resampling in sample area B using bilinear interpolation

注:每种方法的结果从左到右依次为 0.2 m、0.5 m、2 m、5 m、10 m 空间分辨率 DoD 与 0.1 m 空间分辨率 DoD 相减的误差栅格。

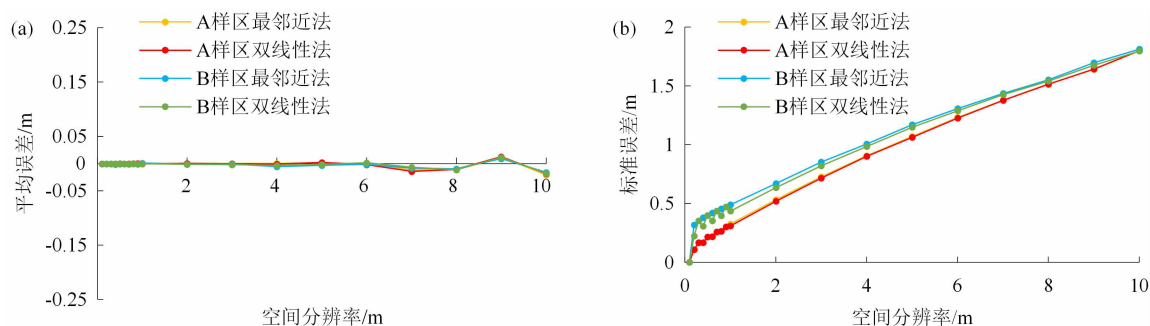


图 8 EDD 操作顺序下使用最邻近法和双线性插值法重采样的空间分辨率与地形变化检测误差结果:

(a)平均误差结果;(b)标准误差结果

Fig. 8 Results of spatial resolution and topographic change detection errors for resampling using the nearest neighbor and bilinear interpolation methods in the EDD operation sequence; (a) result of mean error; (b) the result of standard error

下的结果相同的是,双线性法在误差数值上略低于最邻近法。因此,在后续研究中,讨论不同操作顺序对于地形变化检测空间分辨率效应的影响时,在两种操作顺序中均使用双线性插值法。

比较在 A、B 样区下两种操作顺序之间的区别,如图 9 所示。结果发现在同使用双线性法重采样的情况下,不同的操作顺序得到相同的结果,两者的误差曲线以及所产生的空间分辨率效应完全相同,并且在两个样区上都呈现出一致性,说明此时地形变化检测的操作顺序对空间分辨率效应无影响。

地形变化检测的操作顺序不影响 DEM 空间分辨率所带来的效应,这可能与 DEM 的生成方式和地形变化检测方法有关。这里采用双线性插值法生成多空间分辨率 DEM,然后通过两期 DEM 相减技术得到 DoD 的方式检测地形变化。双线性法得到的重采样 DEM 可以视作原始 DEM 的线性函数,两期 DEM 作差,也是线性函数。当两个线性函数组合成交换计算顺序时,并不影响其最终计算结果,这一点从数学上解释了本节的实验结果。

3 结论

本文通过不同的方式构建不同空间分辨率的 DEM 数据,并且在不同操作顺序下进行地形变化检测,通过平均误差、标准误差、莫兰指数等指标探索 DEM 空间分辨率对地形变化检测的影响。主要研究结论为:

(1) DEM 空间分辨率对地形变化检测的影响与多空间分辨率 DEM 的生成方式有关。在基于点

云生成多空间分辨率 DEM 数据的 3 种 (Max、Mean 和 Min) 重采样方法中,采用平均值法的空间分辨率效应最小。在基于高空间分辨率 DEM 生成多空间分辨率 DEM 数据的两种 (Near 和 Bil) 重采样方法中,采用双线性插值法的空间分辨率效应最小。同时,使用双线性插值法的平均误差、标准误差、莫兰指数均小于使用基于点云生成方式中的平均值法。说明使用双线性插值法生成多空间分辨率 DEM 不仅能有效降低地形变化检测的误差,还能优化其误差的空间分布。在以地形变化检测为目标时,应当使用双线性插值法生成多空间分辨率 DEM。

(2) 尽管使用不同的多空间分辨率 DEM 生成方式的效应不尽相同,但其空间分辨率效应的整体趋势基本一致,即随空间分辨率变粗、地形变化检测结果的整体偏差和局部偏差均变大、空间分辨率和误差存在一定的线性关系;并且随着空间分辨率变粗,其误差的空间自相关也越来越强。

(3) 在使用不同的操作顺序进行多空间分辨率的地形变化检测时,不论是先使用高空间分辨率 DEM 相减得到 DoD,再对 DoD 重采样,还是先对 DEM 重采样成低空间分辨率 DEM 再计算 DoD,二者的结果几乎无差别。因此在对不同空间分辨率的 DEM 进行地形变化检测时,操作顺序并不重要。

本文选取了两个地形变化明显的区域作为实验样区。尽管其地形特征和地形变化情况不相同,两个样区的实验结果均呈现了相同的 DEM 空间分辨率效应,可为其他样区的地形变化检测选择合适的 DEM 空间分辨率或评估地形变化检测的误差数量级提供参考和指导。

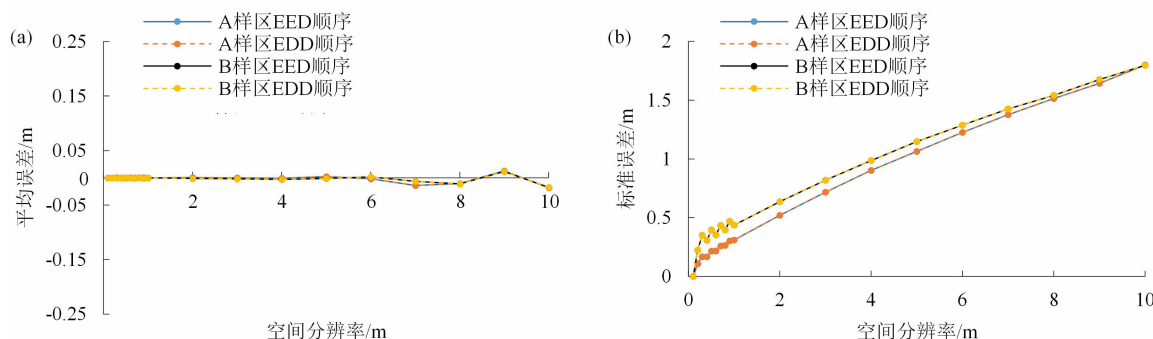


图9 两种不同操作顺序下空间分辨率与地形变化检测误差结果:(a)平均误差结果;(b)标准误差结果

Fig. 9 Results of spatial resolution and topographic change detection error under two different operation sequences:

(a) result of mean error; (b) result of standard error

参考文献 (References)

- [1] 李德仁, 夏松, 江万寿, 等. 一种地形变化检测与 DEM 更新的方法研究[J]. 武汉大学学报信息科学版, 2006, **31**(7): 565 – 568. [LIDeren, XIA Song, JIANG Wanshou, et al. Approach for terrain change detection and DEM updating [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2006, **31**(7): 565 – 568] DOI: 10.3321/j.issn:1671-8860.2006.07.001
- [2] WHEATON J M, BRASINGTON J, DARBY S E, et al. Accounting for uncertainty in DEMs from repeat topographic surveys: Improved sediment budgets [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2010, **35**(2): 136 – 156. DOI: 10.1002/esp.1886
- [3] VERICAT D, WHEATON J M, BRASINGTON J. Revisiting the morphological approach: Opportunities and challenges with repeat high-resolution topography [J]. Gravel-Bed Rivers: Processes and Disasters, 2017: 121 – 158. DOI: 10.1002/9781118971437.ch5
- [4] GRAMS P E, BUSCOMBE D, TOPPING D J, et al. How many measurements are required to construct an accurate sand budget in a large river? Insights from analyses of signal and noise [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2019, **44**(1): 160 – 178. DOI: 10.1002/esp.4489
- [5] WHEATON J M, BRASINGTON J, DARBY S E, et al. Morphodynamic signatures of braiding mechanisms as expressed through change in sediment storage in a gravel-bed river [J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2013, **118**(2): 759 – 779. DOI: 10.1002/jgrf.20060
- [6] YANG Dongdong, QIU Haijun, HU Sheng, et al. Influence of successive landslides on topographic changes revealed by multitemporal high-resolution UAS-based DEM [J]. Catena, 2021, **202**: 105229. DOI: 10.1016/j.catena.2021.105229
- [7] 周小荃, 余宏亮, 魏玉杰, 等. 无人机倾斜航空摄影监测崩岗侵蚀量变化的方法[J]. 农业工程学报, 2019, **35**(21): 51 – 59. [ZHOU Xiaoquan, YU Hongliang, WEI Yujie, et al. Method for monitoring change in Benggang erosion based on oblique aerial images of UAV [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, **35**(21): 51 – 59] DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.21.007
- [8] 师动, 朱齐峰, 杨勤科, 等. DEM 分辨率对坡度算法选择影响的分析[J]. 山地学报, 2020, **38**(6): 935 – 944. [SHI Dong, ZHU Qifeng, YANG Qinke, et al. DEM resolution influence on slope algorithm selection [J]. Mountain Research, 2020, **38**(6): 935 – 944] DOI: 10.16089/j.cnki.10008-2786.000569
- [9] 杨颖楠, 李子夫, 刘梦云, 等. 基于不同分辨率 DEM 的永寿县地形信息差异分析[J]. 水土保持研究, 2018, **25**(6): 131 – 136. [YANG Yingnan, LI Zifu, LIU Mengyun, et al. Analysis of topographic difference of Yongshoucountry based on different resolutions of DEM [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, **25**(6): 131 – 136] DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2018.06.020
- [10] 樊宇, 郭伟玲, 吴江, 等. 基于 DEM 分辨率的侵蚀学坡长尺度效应研究[J]. 人民黄河, 2019, **41**(4): 78 – 82. [FAN Yu, GUO Weiling, WU Jiang, et al. Changes of derived distributed erosion slope length with DEM resolution [J]. Yellow River, 2019, **41**(4): 78 – 82] DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2019.04.017
- [11] 郭春香, 梁音, 曹龙熹. 基于四种分辨率 DEM 的侵蚀模型地形因子差异分析[J]. 土壤学报, 2014, **51**(3): 482 – 489. [GUO Chunxiang, LIANG Yin, CAO Longxi. Geomorphic factors in DEM-based soil erosion models as affected by resolution [J]. Acta Pedologica Sinica, 2014, **51**(3): 482 – 489] DOI: 10.11766/trxb201304230200
- [12] 吴江, 胡胜. DEM 分辨率对 SWAT 模型水文模拟的影响研究[J]. 灌溉排水学报, 2016, **35**(11): 18 – 23. [WU Jiang, HU Sheng. Response of DEM scale effect and hydrological simulation of SWAT model [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2016, **35**(11): 18 – 23] DOI: 10.13522/j.cnki.gggs.2016.11.004
- [13] 周国乾. 基于 WEPP 模型的丹江口库区水力侵蚀动态变化分析[D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2018: 2 – 5. [ZHOU Guoqian. Dynamic change analysis of water erosion in Danjiangkoureservoir area based on WEPP model [D]. Hohhot: Inner Mongolia Normal University, 2018: 2 – 5]
- [14] BANGEN S G, WHEATON J M, BOUWES N, et al. A methodological intercomparison of topographic survey techniques for characterizing wadeable streams and rivers [J]. Geomorphology, 2014, **206**: 343 – 361. DOI: 10.1016/j.geomorph.2013.10.010
- [15] 王雷, 龙永清, 杨勤科. 重采样方法对 DEM 数据质量的影响[J]. 水土保持通报, 2016, **36**(4): 72 – 77. [WANG Lei, LONG Yongqing, YANG Qinke. Effects of resampling method on data quality of DEMs [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2016, **36**(4): 72 – 77] DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2016.04.013
- [16] 陈永刚, 汤国安, 祝士杰. DEM 重采样误差空间分布格局及差异性分析[J]. 中国矿业大学学报, 2011, **40**(4): 653 – 659. [CHEN Yonggang, TANG Guoan, ZHU Shijie. Spatial point pattern of DEM resampling error and difference analysis of influence factor [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2011, **40**(4): 653 – 659]
- [17] 王春, 江岭, 徐静, 等. DEM 地面形态重构方法的精度差异特征研究[J]. 地理与地理信息科学, 2014, **30**(4): 18 – 21 + 26 + 2. [WANG Chun, JIANG Ling, XU Jing, et al. Accuracy differences among approaches of DEM surface morphology reconstruction [J]. Geography and Geo-Information Science, 2014, **30**(4): 18 – 21 + 26 + 2] DOI: 10.3969/j.issn.1672-0504.2014.04.004
- [18] 梁倍瑜, 徐亚莉, 罗明良, 等. 三种重采样方法对冲沟坡度坡长因子的影响[J]. 土壤学报, 2018, **55**(1): 64 – 74. [LIANG Beiyu, XU Yali, LUO Mingliang, et al. Difference analysis of three resampling methods for calculating LS of gullies different in

- development stage [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, **55**(1): 64 – 74] DOI: 10.11766/trxb201706140087
- [19] 谭壮. 高精度 DEM 重采样及其对土壤侵蚀模拟的影响[D]. 南充: 西华师范大学, 2017: 47 – 48. [TAN Zhuang. Hight resolution DEM resampling and it's effects on soil erosion simulation [D]. Nanchong: Northwest Normal University, 2017: 47 – 48]
- [20] ZHOU Qiming, LIU Xuejun. Error analysis on grid-based slope and aspect algorithms [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2004, **70**(8): 957 – 962. DOI: 10.14358/PERS.70.8.957
- [21] HODGSON M E. What cell size does the computed slope/aspect angle represent [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1995, **61**(5): 513 – 517. DOI: 10.1016/0148 – 9062(96)87559 – 0
- [22] KIENZLE S. The effect of DEM raster resolution on first order, second order and compound terrain derivatives [J]. *Transactions in GIS*, 2004, **8**(1): 83 – 111. DOI: 10.1111/j.1467 – 9671.2004.00169.x
- [23] GROHMANN C H. Effects of spatial resolution on slope and aspect derivation for regional-scale analysis [J]. *Computers and Geosciences*, 2015, **77**: 111 – 117. DOI: 10.1016/j.cageo.2015.02.003
- [24] ZHANG Qianing, SHANG Haibin. The effect of some upscaling procedures on the slope derived from digital elevation models [J]. *Transactions in GIS*, 2021, **25**(1): 382 – 395. DOI: 10.1111/tgis.12693
- [25] 李思进, 代文, 熊礼阳, 等. DEM 分辨率对黄土侵蚀沟形态特征表达的不确定性分析[J]. *地球信息科学学报*, 2020, **22**(3): 338 – 350. [LI Sijin, DAI Wen, XIONG Liyang, et al. Uncertainty of the morphological feature expression of loess erosional gully affected by DEM resolution [J]. *Journal of Geo-information Science*, 2020, **22**(3): 338 – 350] DOI: 10.12082/dqxxkx.2020.190352
- [26] COZ M L, DELCLAUX F, GENTHON P, et al. Assessment of Digital Elevation Model (DEM) aggregation methods for hydrological modeling: Lake Chad basin, Africa [J]. *Computers and Geosciences*, 2009, **35**(8): 1661 – 1670. DOI: 10.1016/j.cageo.2008.07.009
- [27] 代文, 汤国安, 胡光辉, 等. 基于无人机摄影测量的地形变化检测方法与小流域输沙模型研究[J]. *地理科学进展*, 2021, **40**(9): 1570 – 1580. [DAI Wen, TANG Guoan, HU Guanghui, et al. Modelling sediment transport in space in a watershed based on topographic change detection by UAV survey [J]. *Progress in Geography*, 2021, **40**(9): 1570 – 1580] DOI: 10.18306/dlkxjz.2021.09.011

Spatial Resolution of Digital Elevation Models on Fine-Scale Topographic Change Detection

ZHOU Yiyang^{1a}, DAI Wen^{1b}, WANG Chun^{2a,2b*}, TAO Yu^{2a,2b}, LI Min^{2a,2b}

(1. a. School of Remote Sensing and Geomatics Engineering; b. School of Geographical Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 211800, China; 2. a. School of Geographic Information and Tourism;

b. Anhui Province Key Laboratory of Physical Geographic Environment, Chuzhou University, Anhui Province Chuzhou 239000, China)

Abstract: Topographic change detection methods based on Digital Elevation Model (DEM) are susceptible to DEM spatial resolution. In the common case of topographic change detection obtained by subtractions from two-stage DEMs, it lacks proper estimation of its impact on spatial resolution.

In this study, two experimental sample plots with typical topographic changes were selected for an investigation into the influence of DEM spatial resolution on terrain change detection.

It took measured point cloud data as analitical source; it constructed DEM data with different spatial resolutions using two types of 5 methods (3 methods of point cloud resampling, 2 methods of DEM resampling); then it applied different operation procedures for topographic change detection at different spatial resolutions. The influence of DEM spatial resolution on the topographic change detection was evaluated through multiple indicators, such as mean error, standard error, and Moran' Index.

It has the following results. (1) The influence of DEM spatial resolution on topographic change detection ultimately depended on the generation mode of multi-spatial resolution DEM. By a bilinear interpolation method, there were the smallest values in mean error, standard error and Moran' Index. It not only effectively reduced the error of topographic change detection, but also optimized the spatial distribution of the error. (2) The overall trend of the resolution effect obtained by different DEM generation methods with multi-spatial resolution was consistent. The lower the spatial resolution was, the larger global deviation and local deviation of terrain change detection results obtained, with higher spatial autocorrelation of the errors. There was a certain linear relationship between the errors and the spatial resolution. 3) The operation procedures in any of topographic change detection methods and upscaling operations did not affect the detection results. It had almost the same results in the order of detection execution either after resampling DEM or before resampling DEM.

This study can provide a reference for the selection of DEM spatial resolution in topographic change detection and the selection of topographic change detection methods under different DEM spatial resolutions.

Key words: DEM spatial resolution; topographic change detection; resolution effect; resampling mode; scaling up operation order

(责任编辑 李嵘)