

doi: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.01.015

DEM超分辨率重构对梯田坡度提取的影响研究

张宏鸣¹ 宋泽鲁¹ 杨江涛² 杨勤科³ 王春梅³ 李锐⁴

(1. 西北农林科技大学信息工程学院, 陕西杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100;
3. 西北大学城市与环境学院, 西安 710069; 4. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

摘要: 坡度对地表水文、土壤侵蚀、土地利用规划有着重要的影响, 区域尺度上的坡度通常基于数字高程模型 (DEM) 提取。区域尺度上, 高分辨率坡度数据由于 DEM 获取途径、方式等原因, 较难获得, 通常通过超分辨率重构 (又称降尺度变换) 得到。以黄土高原地区水平梯田地形为研究对象, 基于无人机摄影测量技术, 生成不同分辨率的 DEM 数据并提取坡度, 设计并给出了基于稀疏混合估计对 DEM 数据进行超分辨率重构的方法及流程, 并与最近邻法、双线性插值法、三次卷积插值法比较, 结果表明所提方法在空间分布和误差方面均优于其他方法。

关键词: 侵蚀; 梯田; 坡度; 超分辨率重构; 稀疏混合估计

中图分类号: S157; TP79 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)01-0112-07

Influence of DEM Super-resolution Reconstruction on Terraced Field Slope Extraction

ZHANG Hongming¹ SONG Zelu¹ YANG Jiangtao² YANG Qinke³ WANG Chunmei³ LI Rui⁴

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

2. College of Water Resource and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

3. College of Urban and Environmental Science, Northwest University, Xi'an 710069, China

4. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Slope is one of the key factors which had a close relationship with soil and water losses and land use planning, and it is one of the most important pieces of information in many natural source spatial databases. Slope was usually extracted from digital elevation model (DEM) in regional scale. However, it is difficult to obtain DEMs with grid size less than 10-m from continental or country scale topographic maps that are needed to include topographic changes due to terraces because of manpower and financial restrictions. Thus the high resolution DEMs were usually obtained by super-resolution reconstruction or down scaling from low resolution DEMs. As a basic data source, high resolution DEMs created by super-resolution methods do influence the extraction of slope. Dry terraced fields in the hilly loess region around Longquan of Yuzhong County were taken as study area. DEMs and orthophotos obtained in March, 2015 by UAV-based photogrammetry were used. The resolution of the DEMs data was generated in 5 m, 10 m, 20 m and 40 m respectively for slope produce. Sparse mixed estimation method (SME), nearest method, bilinear method and cubic method were used for DEMs reconstruction. Finally, the slope was calculated from original DEMs and reconstructed DEMs. The result showed that the SME method was the best method in DEMs super resolution reconstruction for extraction of slope.

Key words: erosion; terrace; slope; super-resolution reconstruction; sparse mixed estimation

引言

地形地貌决定着物质、能量的形成与再分配, 是

影响土壤侵蚀的重要因素之一^[1], 坡度能够定量描述地面的倾斜程度, 是土壤侵蚀和水土保持措施布设的重要地形指标^[2]。在坡面尺度上, 坡度可以通

收稿日期: 2016-10-19 修回日期: 2016-11-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(41301283、41371274、41301507)、陕西省自然科学基金项目(2015JM4142)和中央高校基本科研业务费专项资金项目(QN2013051、2013BSJJ105)

作者简介: 张宏鸣(1979—), 男, 副教授, 博士, 主要从事空间大数据管理和区域土壤侵蚀评价研究, E-mail: zhm@nwsuaf.edu.cn

过实测来获得,在中小流域尺度上,坡度主要利用中低分辨率数字高程模型(DEM)来提取^[3]。研究表明,随着分辨率的降低,坡度呈现衰减趋势,坡度已经不能真实反映实际地表特征,导致与坡度相关的水文模型、侵蚀模型的精度降低^[4-5]。一直以来高精度 DEM 较难获取,为了减少坡度衰减,众多学者对较低分辨率的坡度进行尺度变化的研究^[4,6-10],有部分学者利用地貌学理论采用地形起伏度^[11]、侵蚀势能^[12]、粗糙系数^[13]和河网密度^[14]等来克服坡度衰减引起的宏观尺度变化问题,但很显然坡度更多的是反映微观尺度的最佳指标^[2]。部分研究者通过空间插值算法、统计特征等来增强坡度尺度效应的衰减对地形起伏的表达,如最近邻法^[15]、双线性插值法^[16]、三次卷积插值法^[17]、直方图匹配^[18]、坡度图谱变换^[19]、分形^[7]等。尽管做了大量的研究工作,但目前坡度超分辨率重构(Down scaling,也称降尺度变化)的研究中主要存在两个问题:研究方法有待完善,随着计算机技术的不断发展,信号处理、人工智能等方法不断应用在地学领域,新方法是否适用,需要验证;缺乏高分辨率的数据进行验证,一直以来,利用中低分辨率数据进行研究,容易获得坡度衰变规律,但是缺乏相应高分辨率数据进行结果验证,这也是当前急需解决的问题之一。近年来,DEM 获取技术发展迅速,航空摄影测量、干涉测量法、LiDar(Light detection and ranging techniques),尤其是无人机技术,能够方便、快捷地获得较高精度的 DEM。

本文在前期研究基础上^[3,20-24],通过无人机航空摄影测量获取大面积、高精度梯田 DEM,应用稀疏混合估计及常用的空间差值方法对不同 DEM 数据进行超分辨率重构,获取相应更高精度的 DEM,提取坡度进行对比。该算法的优势在于对图像中非直线型边缘和曲面处,能提供稳定高效的近似最优表示,它可以捕捉图像中边缘轮廓的细节信息,也可以更加稳定的表示自然图像的各种复杂的形态结构成分^[25]。坡度数据在高频部分的特征容易丢失,而稀疏混合估计方法对此具有一定的优势,本文以此进行试验。

1 研究方法

1.1 重构算法

DEM 的超分辨率重构问题与图像采集和恢复中的逆问题类似,是当今图像超分辨率算法研究的重点^[25]。使用稀疏混合估计^[25]的方法可以使图像在超分辨率重构时得到更加精确的结果。本文将算法引入到 DEM 数据中计算坡度。经过稀疏混合权

重计算后的系数在稀疏信号中表示一个基本的块,并且它们最小化的 L1 范数(即块中的各个元素绝对值之和)考虑到了每个块中的 DEM 数据中地形的规律性。稀疏混合估计的模型为

$$y = \sum_{\theta \in \Theta} \sum_{q \in \theta} \tilde{\alpha}(\theta, q) y_{\theta, q} + y_r \quad (1)$$

其中 $y_{\theta, q} = \sum_{p \in B_{\theta}} c(p) \tilde{\Psi}_p$

此模型可以针对非标准源分离问题进行解释。 $y_{\theta, q}$ 是对应每组块的稀疏近似值,它是由字典中的稀疏估计系数 c 确定的, $\tilde{\Psi}_p$ 是该块中的数据。其中,混合参数 $\tilde{\alpha}(\theta, q)$ 必须是从一组已知来源 $y_{\theta, q}$ 中获得,即高度冗余的估计,目的是为了对它们的二次规律性进行先验信息检测。 y_r 是残差量,没有具体的规律性。而稀疏混合估计的核心是引入了加权 L1 范数来进行优化。线性混合估计公式为

$$\sum_{\theta \in \Theta} \sum_{q \in \theta} \|\tilde{R}_{\theta} \tilde{\alpha}_{\theta, q} y_{\theta, q}\|^2 = \sum_{\theta \in \Theta} \sum_{q \in \theta} |\tilde{\alpha}_{\theta, q}|^2 \|\tilde{R}_{\theta} y_{\theta, q}\|^2 \quad (2)$$

式中 \tilde{R}_{θ} ——坡度数据中规则性信息组合的正则化结果

针对坡度数据,单纯应用上述线性混合估计考虑不到它的稀疏性。因为对于坡度数据,许多地形不复杂的地形坡度有一定的规律性,也有许多位置的坡度为零,因此使得 $y_{\theta, q}$ 中的许多值都接近或者等于零。对于那些比较复杂的地形,则假定坡度模型具有特定的规律性。这意味着,当参数 θ 存在一个或者不存在时,混合参数 $\tilde{\alpha}(\theta, q)$ 在局部上不能被忽略,所以它是稀疏的。稀疏先验被用于标准的盲源分离问题,它也适合坡度数据的重构,在这种情况下,稀疏不施加在来源上面,而是施加在稀疏混合系数上面。L1 范数更换带来的偏差为

$$\mathcal{A}(\tilde{\alpha}) = \frac{1}{2} \left\| y - \sum_{\theta \in \Theta} \sum_{q \in \theta} \tilde{R}_{\theta} \tilde{\alpha}_{\theta, q} y_{\theta, q} \right\|^2 + \lambda \sum_{\theta \in \Theta} \sum_{q \in \theta} |\tilde{\alpha}_{\theta, q}|^2 \|\tilde{R}_{\theta} y_{\theta, q}\|^2 \quad (3)$$

其中 λ 为 \tilde{R}_{θ} 的特征值。而通过这个未知 $\tilde{\alpha}(\theta, q)$ 的二次函数的最小化可以作为计算的标准算法,比如阈值迭代。

作为使用了 L1 与 L2(即块中各个元素平方和的 1/2 次方)混合规范的算法,不仅与一组块的稀疏恢复后的坡度数据有关系,而且也每个基本块内施加的一个坡度的规律性规则化分解有关系。此外,它不会对每个混合系数的分解参数进行优化。而每个基本块中的坡度数据具有一定的规律性,由这些通过平均混合得到的最终混合估

计的结果为

$$\hat{\alpha}(\theta q) = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I \hat{\alpha}_i(\theta q) \quad (4)$$

针对 DEM 数据源,本文应用稀疏混合方法,主要包括读取 DEM 数据、修改数据格式、稀疏混合估计因素放大(包括 T1 小波变换、T1 小波逆变换、正交分块匹配追踪、计算混合系数、读取混合系数并存入相应位置等),得到高分辨率 DEM,对该 DEM 提取坡度。

算法流程可描述为:

(1) 获取 DEM 数据源,将 DEM 数据保存在一个二维数组中,并保存 DEM 数据头信息。

(2) 处理二维数组,并将处理的二维数组以及一组预设的外插标记一起输入,进行稀疏混合估计因素放大。

(3) 将数据进行 T1 小波变换和 T1 小波逆变换。

(4) 正交分块匹配追踪。

(5) 计算混合系数。

(6) 控制输出的数据格式,并将其转化成 DEM 数据格式(ASCII)。

(7) 从高分辨率 DEM 数据中提取坡度。

基本流程见图 1。

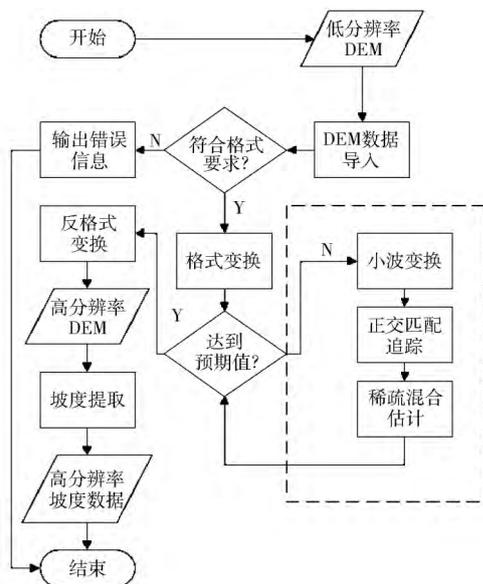


图1 算法流程图

Fig.1 Algorithm flow chart

1.2 研究区域

鉴于坡度对水土流失影响严重,同时坡度衰减多集中于高频部分^[26],因此本文选取黄土高原地区坡度变化较极端的梯田地区进行测试。

本文以榆中地区龙泉乡周围黄土丘陵区典型旱梯田为样区,该样区梯田具有一定的代表性,地理坐标范围东经 104°10′58″~104°19′51″,北纬 35°34′4″~

35°40′56″。该实验样区 DEM 数据及所在黄土高原地区的位置如图 2 所示,高程范围 1951.03~2545.55 m,研究区在黄土高原的位置如图 2 右下角红色边框标注范围所示。梯田根据田面坡度的不同,一般分为水平梯田、坡式梯田、隔坡梯田和软埝梯田^[27],研究区以水平梯田为主。

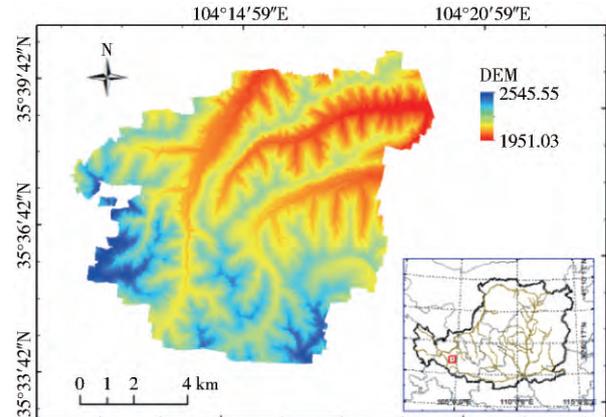


图2 甘肃省榆中县龙泉乡 DEM 及所在黄土高原位置图

Fig.2 DEM and location of study area

1.3 方法对比

本文方法(简称混合估计法)分别与最邻近法^[15]、双线性插值法^[16]和三次卷积插值法^[17]进行对比。

基于无人机摄影测量获得的点云数据,生成不同分辨率的 DEM 数据(40 m、20 m、10 m、5 m)。应用不同重构方法,将 3 个分辨率(40 m、20 m、10 m)的 DEM 数据生成对应 DEM 数据(20 m、10 m、5 m),使用最大坡降法分别计算两套数据,并进行对比。40 m 到 20 m 的重构称为 R20,20 m 到 10 m 的重构称为 R10,10 m 到 5 m 的重构称为 R05。为方便查看结果,本文截取了实际 DEM 部分坡度计算结果,如图 3 所示。为了清楚地了解实际数据与重构数据的差别,将 3 种分辨率下的重构计算结果与实际计算结果做差,并统计结果频率及累计频率,对规律进行分析。

以均方根误差(Root-mean-square error, RMSE)对客观模型的准确性进行度量,其值越小,表明客观评价算法对主观评分值预测越准确,模型的性能越好,反之越差。实际图像的 RMSE 为零。本文以高精度 DEM 计算的坡度作为真值,以重构后计算的坡度作为观测值,进行计算。

2 实验结果分析

2.1 坡度空间分布结果

4 种方法对不同分辨率 DEM 如图 4 所示,由上到下 3 幅图分别为 R20、R10、R05,颜色由绿到红表示坡度逐渐增大,得到如下结果:

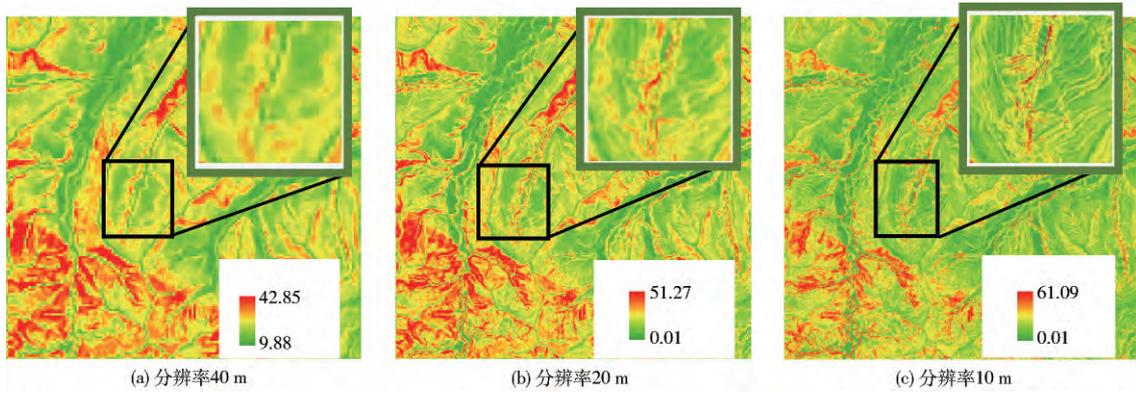


图 3 3 种分辨率坡度数据

Fig. 3 Slope gradient maps under three different resolutions

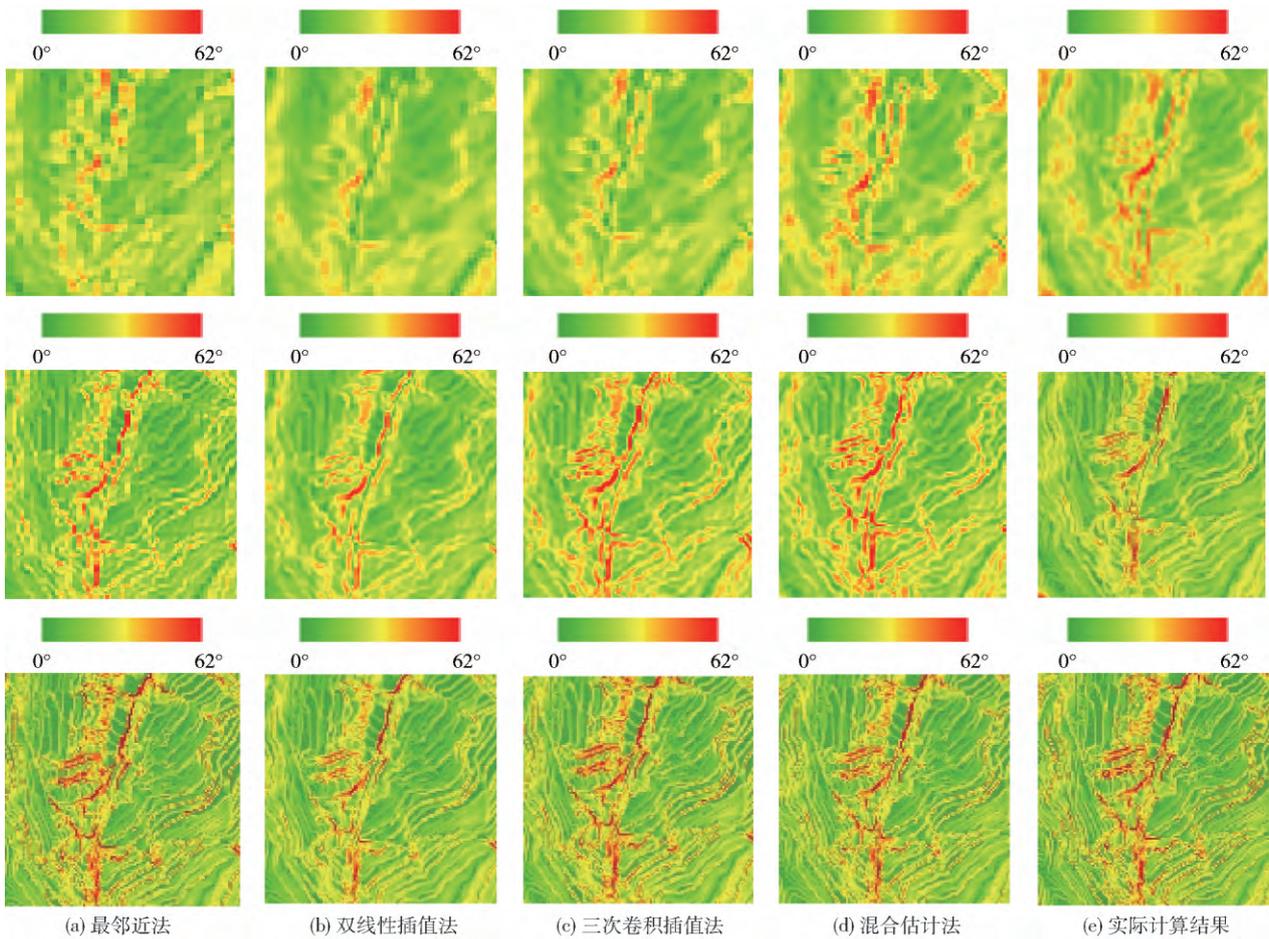


图 4 重构后坡度计算结果

Fig. 4 Slope calculation results after reconstruction

(1) 4 种方法对应的 R20、R10、R5 重构结果得出的坡度与实际 20 m、10 m、5 m 分辨率 DEM 数据计算结果相比较,均为实际计算精度数据更好。同时随着分辨率的升高,重构结果的空间分布与实际计算结果的空间分布情况越来越接近。

(2) 从重构结果中可以看到,中频部分(黄色)的重构结果好于低频部分(绿色)和低频(红色)部分。对于 R20,由于 DEM 精度不高,梯田的地形特征已经模糊,因此坡度重构情况表现并不明显,但与实际计算结果对比,坡度较陡的地方在 4 种算法的

重构中,混合估计法均效果好;对于 R10,与实际结果相比较,坡度连续变换之处(梯田处),混合估计法的效果更加明显,可以看见其明显的纹理界限;对于 R05,由于 DEM 本身精度较高,因此在 3 种分辨率的重构结果中,坡度与地形特征的吻合度最好。对于梯田的坡度特征,混合估计法的结果较其它 3 种算法的结果在纹理上更加细腻,空间分布与高程变化特征更加吻合,这表明:混合估计方法对 DEM 降尺度变化后的数据提取坡度空间分布效果最好。

2.2 计算结果的统计分析

本文以 R05 过程为例,将混合估计法得到的坡度数据和和其它算法得到的坡度数据分别与实际 10 m 精度的坡度数据做差。得到的空间分布情况如图 5 所示。

从中可以看到:4 个算法的重构结果,在坡度高频部分(图 5a~5d 中红色部分)和坡度低频的地方(图 5a~5d 中绿色部分)重构的结果与实际计算结果的差值较大(图 5e~5h),重构效果不理想。误差

较大的范围主要集中在陡坡(大于 45°)和缓坡(小于 10°)上。相较于 4 种算法,混合估计法(图 5e~5h 中绿色部分)差值明显小于其它 3 种算法。通过表 1 的 3 组值可以看到,重构结果与实际数据相差最小为零,但相差最大处的坡度结果混合估计算法达到了 18.36°,而双线性插值法则达到了 37.59°。在差值的平均值上混合估计的结果也是最小,因此混合估计法在重构时可以保持的坡度范围要高于其它 3 种方法。

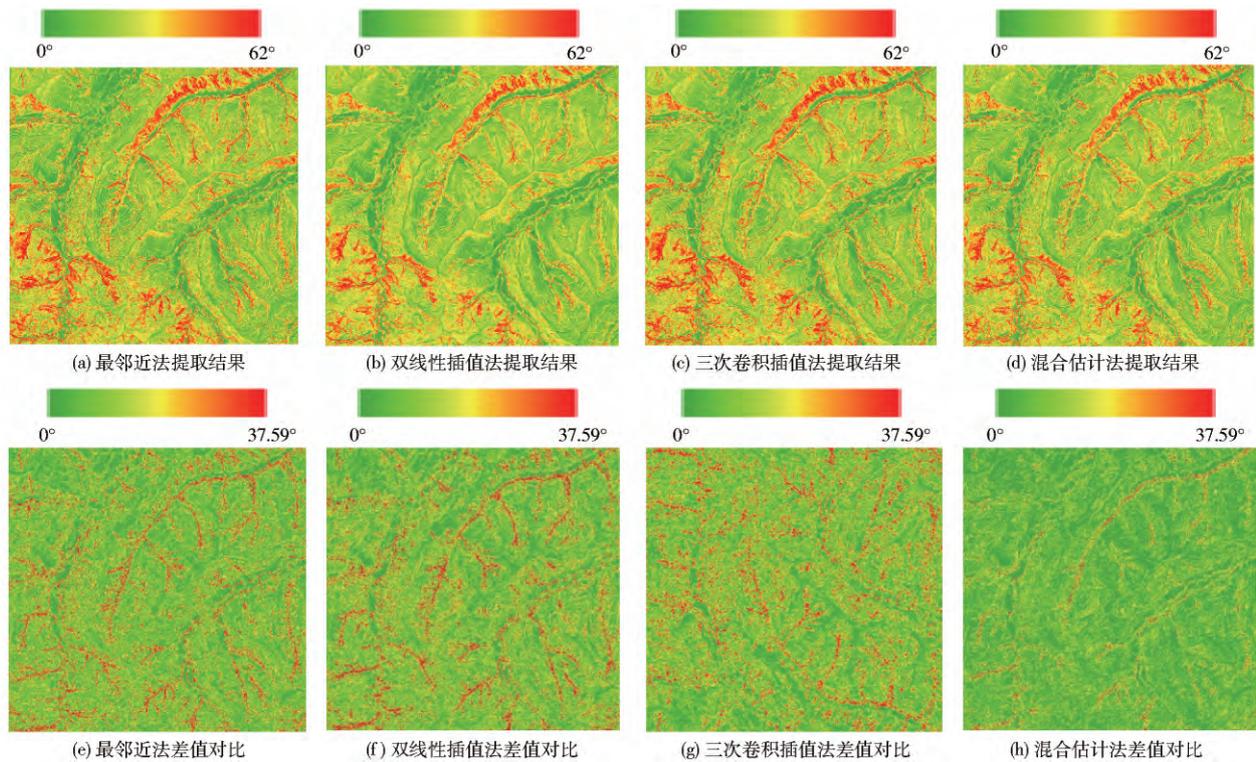


图 5 重构后坡度提取结果分布及差值对比

Fig. 5 Slope distributions after reconstruction and comparisons of slope difference

表 1 坡度差值结果

Tab. 1 Slope difference result (°)

参数	最邻近法	双线性插值法	三次卷积插值法	混合估计法
平均值	2.41	2.83	2.66	1.67
最大值	24.46	37.59	32.24	18.36
最小值	0	0	0	0

2.3 RMSE 结果

均方根计算结果:稀疏混合估计法为 2.106°,最邻近法为 3.359°,三次卷积插值法为 3.841°,双线性插值法为 4.232°。结果表明稀疏混合估计方法的误差最小。针对其误差分布,本文对坡度进行频率(图 6a)及累积频率曲线(图 6b)统计。

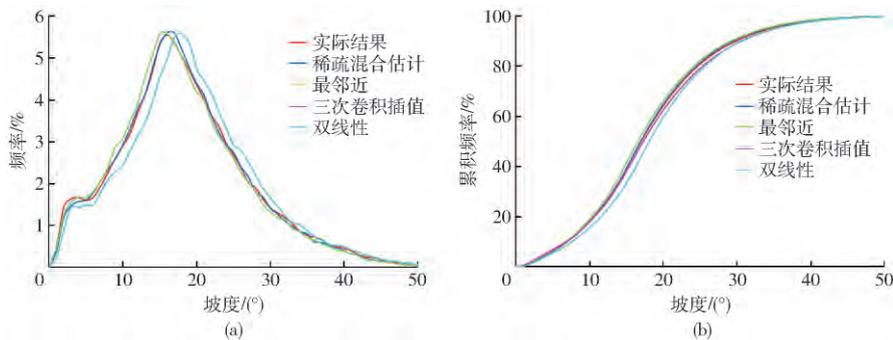


图 6 坡度分布的频率及累积频率曲线

Fig. 6 Frequency curves and cumulative frequency curves of slope distribution

可以看到: 无论频率曲线还是累积频率曲线, 混合估计法的坡度曲线与实际数据曲线基本重合, 而其它算法重构的结果与实际数据相差比较大, 这也说明混合估计法在降尺度变化时, 对坡度的重构效果更好。重构效果从高到底依次是混合估计法、最邻近法、三次卷积插值法和双线性插值法。

为了对比 4 种算法结果与实际数据差别的具体分布位置, 本文将 4 种算法重构结果分别与实际数据做差, 计算坡度差值频率(图 7a)及累积频率(图 7b)分布。可以看到: 与实际计算数据相比较, 在重构中相符的数据中, 混合估计法重构结果与实际数据相符度更高, 能达到 9.2% 左右(0° 处), 而其它 3 种算法只有不到 4%; 在重构结果出现偏差的坡度中, 混合估计法偏差结果 96.8% 的为 5° 以下,

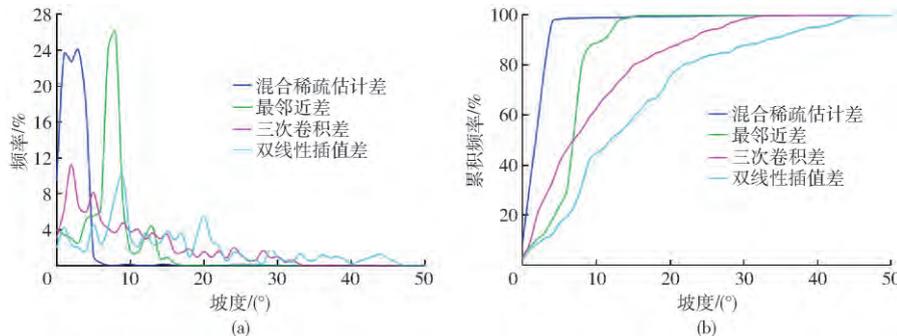


图 7 坡度差值分布的频率及累积频率曲线

Fig. 7 Frequency curves and cumulative frequency curves of slope difference distribution

3 结论

(1) 通过各算法重构结果的空间分布和结果统计分析可以发现, 针对梯田地区坡度超分辨率重构, 结果准确程度从高到底依次是稀疏混合估计法、最邻近法、三次卷积插值法和双线性插值法。在重构时, 陡坡(大于 45°)和缓坡(小于 10°)的重构效果较差, 而两者之间的坡度重构结果较理想。在不同分辨率情况下, 高分辨率重构效果差别已不大, 但稀疏混合估计法在高频部分的重构误差要小于其它 3

而这个比例, 对于最邻近偏差达到 11° , 三次卷积法达到 28° 左右, 双线性插值法达到 44° 。由此可以看出混合估计法的结果更好。因此, 对于高频坡度较多的 DEM 数据, 稀疏混合估计方法进行降尺度变化, 对坡度提取结果的影响较小。

从上述可以看出, 在中低分辨率的重构上, 混合估计法相对于最近邻法、双线性插值法和三次卷积插值法的效果比较好, 在 20 m 往上的高分辨率(10 m)上进行更高分辨率的重构时, 重构后的空间分布结果与重构前的空间分布结果平均误差分别为: 混合估计为 1.67° , 最近邻差为 2.41° , 三次卷积差为 2.66° , 双线性插值差为 2.83° , 可以看到这个差别与实际结果的差别已不显著。在与实际数据计算结果的差值方面, 混合估计法相对于其它 3 种方法更加接近实际计算结果。

种方法; 对中分辨率进行重构的效果, 稀疏混合估计法重构的结果在低频部分要优于其它 3 种方法。

(2) 基于稀疏混合估计法的 DEM 降尺度变化, 其结果对坡度的提取影响最小。坡度提取结果在空间分布上均丢失了低频和高频部分, 4 种方法均无法恢复实际结果; 混合估计法对于低分辨率数据的低频部分和高分辨率数据的高频部分的重构, 表现较好。在整体数据的误差上, 稀疏混合估计法所产生的误差最小。因此稀疏混合估计法可作为研究坡度尺度变化的方法。

参 考 文 献

- 杨勤科, 郭明航, 李智广, 等. 全国土壤侵蚀地形因子提取与初步分析 [J/OL]. 中国水土保持, 2013(10): 17-21. <http://www.swcczz.cn/newinfo.aspx?id=4210&pid=225>. DOI: 10.14123/j.cnki.swcc.2013.10.008.
YANG Qinke, GUO Minghang, LI Zhiguang, et al. Extraction and analysis of China soil erosion topographic factor [J/OL]. Soil and Water Conservation of China, 2013(10): 17-21. (in Chinese)
- 杨勤科, 贾大伟, 李锐, 等. 基于 DEM 的坡度研究——现状与展望 [J]. 水土保持通报, 2007, 27(1): 146-150.
YANG Qinke, JIA Dawei, LI Rui, et al. Researches on DEM derived slope: a review and prospective [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2007, 27(1): 146-150. (in Chinese)
- 张宏鸣, 杨勤科, 李锐, 等. 基于 GIS 和多流向算法的流域坡度与坡长估算 [J/OL]. 农业工程学报, 2012, 28(10): 159-164. http://www.tcsae.org/nygxcb/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20121025&journal_id=nygxcb. DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.10.025.
ZHANG Hongming, YANG Qinke, LI Rui, et al. Estimation methods of slope gradient and slope length in watershed based on GIS

- and multiple flow direction algorithm [J/OL]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(10): 159–164. (in Chinese)
- 4 刘红艳, 杨勤科, 王春梅, 等. 坡度随水平分辨率变化及其空间格局研究 [J/OL]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2012, 37(1): 105–109. <http://ch.whu.edu.cn/CN/Y2012/V37/I1/105>. DOI: 10.13203/j.whugis2012.01.024.
LIU Hongyan, YANG Qinke, WANG Chunmei, et al. Changes of DEM-derived slope with horizontal resolution and their spatial distribution [J/OL]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2012, 37(1): 105–109. (in Chinese)
 - 5 FU S, CAO L, LIU B, et al. Effects of DEM grid size on predicting soil loss from small watersheds in China [J/OL]. Environmental Earth Sciences, 2015, 73(5): 2141–2151. <http://dx.doi.org/10.1007/s12665-014-3564-3>. DOI: 10.1007/s12665-014-3564-3.
 - 6 王春梅. 坡度尺度效应与转换及其对土壤侵蚀评价影响研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2012.
WANG Chunmei. Slope scaling effect, transformation and its influence to soil erosion assessment [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2012. (in Chinese)
 - 7 郭兰勤, 杨勤科, 胡洁, 等. 基于分形的中低分辨率坡度降尺度变换方法研究 [J/OL]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2011, 39(12): 173–180. http://www.cnxbz.net/xbnkjdxzr/ch/reader/create_pdf.aspx?file_no=20111229&flag=1&year_id=2011&quarter_id=12. DOI: 0.13207/j.cnki.jnwafu.2011.12.007.
GUO Lanqin, YANG Qinke, HU Jie, et al. Research on method of re-scaling coarser resolution slope based on fractal analysis approach [J/OL]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2011, 39(12): 173–180. (in Chinese)
 - 8 刘红艳, 杨勤科, 牛亮, 等. 坡度与水平分辨率关系的初步研究 [J]. 水土保持研究, 2010, 17(4): 34–37.
LIU Hongyan, YANG Qinke, NIU Liang, et al. Relationships between DEM-derived slope and horizontal resolution [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2010, 17(4): 34–37. (in Chinese)
 - 9 于浩, 杨勤科, 张晓萍, 等. 基于小波多尺度分析的 DEM 数据综合及尺度转换 [J]. 地理与地理信息科学, 2009, 25(4): 12–16.
YU Hao, YANG Qinke, ZHANG Xiaoping, et al. A study of DEM generalization based on wavelet analysis and its scale transformation [J]. Geography and Geo-Information Science, 2009, 25(4): 12–16. (in Chinese)
 - 10 白天路, 杨勤科, 王洪明, 等. 考虑坡度变换的中低分辨率地形湿度指数提取 [J]. 水土保持通报, 2009, 29(6): 131–135.
BAI Tianlu, YANG Qinke, WANG Hongming, et al. Extraction of the topographic wetness index based on slope transformation of coarser resolution slope [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2009, 29(6): 131–135. (in Chinese)
 - 11 刘新华, 杨勤科, 汤国安. 中国地形起伏度的提取及在水土流失定量评价中的应用 [J]. 水土保持通报, 2001, 21(1): 57–59, 62.
LIU Xinhua, YANG Qinke, TANG Guoan. Extraction and application of relief of China based on DEM and GIS method [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2001, 21(1): 57–59, 62. (in Chinese)
 - 12 赵牡丹. 一个新的区域水土流失综合地形因子——“侵蚀势能”的提出及提取方法研究 [C]//中国地理学会 2006 年学术年会论文摘要集, 2006: 8.
 - 13 江冲亚, 方红亮, 魏珊珊. 地表粗糙度参数化研究综述 [J/OL]. 地球科学进展, 2012, 27(3): 292–303. <http://www.adearth.ac.cn/CN/Y2012/V27/I3/292>. DOI: 10.11867/j.issn.1001-8166.2012.03.0292.
JIANG Chongya, FANG Hongliang, WEI Shanshan. Review of land surface roughness parameterization study [J/OL]. Advances in Earth Science, 2012, 27(3): 292–303. (in Chinese)
 - 14 刘新华, 张晓萍, 杨勤科, 等. 不同尺度下影响水土流失地形因子指标的分析与选取 [J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2004, 32(6): 107–111.
LIU Xinhua, ZHANG Xiaoping, YANG Qinke, et al. Analysis and selection of topographical indices influencing soil loss on different scales [J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2004, 32(6): 107–111. (in Chinese)
 - 15 李丽, 郭双双, 梅树立, 等. 基于单元最邻近匹配的蝗虫切片图像修复方法 [J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(8): 15–19. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150803&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.08.003.
LI Li, GUO Shuangshuang, MEI Shuli, et al. Image restoration of locust slices based on nearest unit matching [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(8): 15–19. (in Chinese)
 - 16 李震, 洪添胜, 吴伟斌, 等. 双线性插值算法在荔枝树光合模拟中叶片图像旋转中的应用 [J]. 农业工程学报, 2006, 22(11): 179–182.
LI Zhen, HONG Tiansheng, WU Weibin, et al. Application of bilinear interpolation algorithm in litchi leaf image rotation for photosynthetic simulation [J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(11): 179–182. (in Chinese)
 - 17 崔岸, 刘业峰, 袁智, 等. 摄像机参数的三线性插值误差补偿标定方法 [J]. 农业机械学报, 2008, 39(10): 187–190.
CUI An, LIU Yefeng, YUAN Zhi, et al. Camera calibration method of tri-linear interpolation error compensation [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(10): 187–190. (in Chinese)
 - 18 丑述仁. 坡度变换的影响因素研究 [D]. 西安: 西北大学, 2013.
CHOU Shuren. Study on influence factors of slope scaling [D]. Xi'an: Northwest University, 2013. (in Chinese)
 - 19 王春, 汤国安, 李发源, 等. 基于 DEM 提取坡谱信息的不确定性 [J]. 地球信息科学, 2008, 10(4): 539–544.
WANG Chun, TANG Guoan, LI Fayuan, et al. The uncertainty of slope spectrum derived from grid digital elevation model [J]. Geo-Information Science, 2008, 10(4): 539–544. (in Chinese)

(下转第 138 页)

- Mongolia [J]. *Progress in Geography*, 2005, 24(3): 44–49. (in Chinese)
- 17 张毅, 谢圣. 湖北省土地利用格局影响因素研究 [J]. *华中师范大学学报: 自然科学版*, 2015, 49(5): 792–796.
ZHANG Yi, XIE Sheng. Study on influence factors of land use patterns in Hubei province [J]. *Journal of Central China Normal University: Natural Sciences*, 2015, 49(5): 792–796. (in Chinese)
- 18 王跃奎, 张乐天, 陈润, 等. 小理河流域土壤流失环境因子研究 [J]. *人民黄河*, 2010, 32(12): 163–164.
WANG Yuekui, ZHANG Letian, CHEN Run, et al. A study on soil erosion environmental factors in Xiaolihe watershed [J]. *Yellow River*, 2010, 32(12): 163–164. (in Chinese)
- 19 王远飞, 何洪林. *空间数据分析方法* [M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- 20 宁秀红, 郭龙, 张海涛. 基于空间自回归和地理加权回归模型的不同尺度下土地利用程度研究 [J]. *华中农业大学学报*, 2013, 32(4): 48–54.
NING Xiuhong, GUO Long, ZHANG Haitao. Comprehensive degree of land-use at different scales based on spatial autocorrelation regression and geographically weighted regression models [J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2013, 32(4): 48–54. (in Chinese)
- 21 ANSELIN L. *SpaceStat tutorial* [M]. Morgantown, West Virginia: Regional Research Institute, West Virginia University, 1992.
- 22 GETIS A, ORD J K. Local spatial autocorrelation statistics: distributional issues and an application [J]. *Geographical Analysis*, 1995, 27(4): 286–306.
- 23 孟斌, 王劲峰, 张文忠, 等. 基于空间分析方法的区域差异研究 [J]. *地理科学*, 2005, 25(4): 393–400.
MENG Bin, WANG Jinfeng, ZHANG Wenzhong, et al. Evaluation of regional disparity in China based on spatial analysis [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2005, 25(4): 393–400. (in Chinese)
- 24 ANSELIN L, SYABRI I, KHO Y. GeoDa: an introduction to spatial data analysis [J]. *Geographical Analysis*, 2006, 38(1): 5–22.
- 25 ANSELIN L. Local indicators of spatial association—LISA [J]. *Geographical Analysis*, 1995, 27(2): 93–115.

~~~~~

(上接第 118 页)

- 20 张宏鸣, 杨勤科, 李锐, 等. 流域分布式侵蚀学坡长的估算方法研究 [J/OL]. *水利学报*, 2012, 43(4): 437–444. [http://jhe.ches.org.cn/jhe/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=201204009&flag=1](http://jhe.ches.org.cn/jhe/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=201204009&flag=1). DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2012.04.010.  
ZHANG Hongming, YANG Qinke, LI Rui, et al. Research on the estimation of slope length in distributed watershed erosion [J/OL]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2012, 43(4): 437–444. (in Chinese)
- 21 张宏鸣, 杨勤科, 刘晴蕊, 等. 基于 GIS 的区域坡度坡长因子提取算法 [J/OL]. *计算机工程*, 2010, 36(9): 246–248. [http://www.tcsae.org/nygxcb/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20121025&journal\\_id=nygxcb](http://www.tcsae.org/nygxcb/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20121025&journal_id=nygxcb). DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.10.025.  
ZHANG Hongming, YANG Qinke, LIU Qingrui, et al. Regional slope length and slope steepness factor extraction algorithm based on GIS [J/OL]. *Computer Engineering*, 2010, 36(9): 246–248. (in Chinese)
- 22 杨勤科, 郭伟玲, 张宏鸣, 等. 基于 DEM 的流域坡度坡长因子计算方法研究初报 [J/OL]. *水土保持通报*, 2010, 30(2): 203–206. [http://stbctb.alljournal.com.cn/ch/reader/create\\_pdf.aspx?file\\_no=20100243&flag=1&journal\\_id=stbctb&year\\_id=2010](http://stbctb.alljournal.com.cn/ch/reader/create_pdf.aspx?file_no=20100243&flag=1&journal_id=stbctb&year_id=2010). DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2010.02.035.  
YANG Qinke, GUO Weiling, ZHANG Hongming, et al. Method of extracting LS factor at watershed scale based on DEM [J/OL]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2010, 30(2): 203–206. (in Chinese)
- 23 WANG C, YANG Q, GUO W, et al. Influence of resolution on slope in areas with different topographic characteristics [J/OL]. *Computers & Geosciences*, 2012, 41: 156–168. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098300411003633>. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2011.10.028>.
- 24 ZHANG H, YANG Q, LI R, et al. Extension of a GIS procedure for calculating the RUSLE equation LS factor [J/OL]. *Computers & Geosciences*, 2013, 52: 177–188. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098300412003378>. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2012.09.027>.
- 25 MALLAT S, YU G. Super-resolution with sparse mixing estimators [J/OL]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2010, 19(11): 2889–2900. <http://ieeexplore.ieee.org/document/5460916/>. DOI: 10.1109/TIP.2010.2049927.
- 26 WANG C, YANG Q, JIA D, et al. Modeling change of topographic spatial structures with DEM resolution using semi-variogram analysis and filter bank [J/OL]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2016, 5(7): 107. <http://www.mdpi.com/2220-9964/5/7/107>. DOI: 10.3390/ijgi5070107.
- 27 唐克丽. *中国水土保持* [M]. 北京: 科学出版社, 2004.