

基于 SRTM 的地形因子提取方法研究

张宏鸣¹ 常毅¹ 杨勤科² 张泉² 董良¹ 许伊昆¹

(1. 西北农林科技大学信息工程学院, 陕西杨凌 712100; 2. 西北大学城市与环境学院, 西安 710069)

摘要: 地形是影响土壤侵蚀的重要因子,在侵蚀估算模型中常用坡度和坡长(LS)来衡量,在大区域上常基于数字高程模型(DEM)提取。SRTM 作为大区域尺度上质量高、易获取的高程数据,在全球土壤侵蚀评价中得到广泛应用。但现有地形因子提取算法要求高程和栅格单元的单位(通常为 m)一致,需对 SRTM 进行坐标变换才能使用。针对大区域上 SRTM 坐标转换时间开销大的问题,提出了一种直接基于 SRTM 提取地形因子的算法(LSA-SRTM)。该算法利用地理坐标系下的经纬度信息计算栅格单元长度及单元坡长,结合最陡坡降策略获得坡度及流向,进而提取汇水面积,根据坡度设置坡度截断点,根据汇水面积阈值设置沟道截断点,经正、反遍历后获得累积坡长,采用 CSLE 的分段公式计算 LS 因子。以 Himmelblau-Orlandini 数学曲面、5 个典型样区的 1" SRTM 作为数据源,将 LSA-SRTM、投影坐标系下的 LS 算法(LSA-DEM)与手工测量的结果进行对比。LSA-SRTM 方法与测量值在数学曲面和典型样区,坡长的 R^2 分别为 0.855 2、0.778 8、0.726 9、0.702 4、0.690 9、0.725 5,LS 因子的 R^2 分别为 0.890 7、0.820 9、0.821 3、0.714 2、0.714 5、0.821 2。在运行时间方面,LSA-SRTM 方法具有较高的效率。结果表明,LSA-SRTM 算法计算精度、效率更高,可为大区域地形因子提取的研究提供支撑。

关键词: 地形因子; 坡长; 坡度; SRTM; CSLE; 数字高程模型

中图分类号: S157 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)01-0205-10 OSID: 

Topographic Factor Extraction Method Based on SRTM

ZHANG Hongming¹ CHANG Yi¹ YANG Qinke² ZHANG Quan² DONG Liang¹ XU Yikun¹

(1. College of Information Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China
2. Department of Urbanology and Resource Science, Northwest University, Xi'an 710069, China)

Abstract: Topography is an important factor that affects soil erosion, which is usually measured by slope gradient and slope length (LS) in erosion estimation models, and extracted based on digital elevation model (DEM) on a vast area. SRTM, as currently high-quality and easily accessible elevation data on a vast area, has been applied in global soil erosion evaluation. However, the traditional algorithm for topographic factor extraction requires that the unit of elevation identical with cell size (usually meters), which makes SRTM need perform coordinate transformation before extraction. Aiming at the problem of high cost in performing coordinate transformation on SRTM data in a large area, an algorithm for extracting terrain factors directly was proposed based on SRTM (LSA-SRTM). The longitude and latitude information of the geographic coordinate system was used to directly calculate the cell size and the unit slope length. D8 method was used to acquire slope gradient and flow direction matrix. Then, the slope gradient cutoff was calculated according to the slope gradient result, the catchment area was calculated and the channel network cutoff was set, furtherly, the cumulative slope length was obtained by “forward-reverse traversal”. Finally, the LS factor was calculated according to the slope gradient, cumulative slope length and the segmentation formula of CSLE. Using Himmelblau-Orlandini mathematical surface and 1" SRTM of five typical samples in China as the data source, the LSA-SRTM method, the projected coordinate system DEM-based LS extraction algorithm (LSA-DEM) and manual measurement method were compared. On the mathematical surface and the typical sample area, the R^2 of the slope length of LSA-SRTM method and the measured value were 0.855 2, 0.778 8, 0.726 9, 0.702 4, 0.690 9 and 0.725 5. The R^2 of the LS and the measured value were 0.890 7, 0.820 9, 0.821 3, 0.714 2,

0.714 5 and 0.821 2. In terms of execution time, the LSA – SRTM method had high efficiency. The experiment results showed that the LSA – SRTM had higher accuracy and efficiency, which can provide a support for the study of topographic factor extraction in vast areas.

Key words: topographic factor; slope length; slope gradient; SRTM; CSLE; digital elevation model

0 引言

地形是土壤侵蚀和水土保持措施布设的主要影响因素。在通用土壤流失方程及其修订版 (Universal soil loss equation/ revised universal soil loss equation, USLE/REUSLE)^[1-2]和中国土壤流失方程 (Chinese soil loss equation, CSLE)^[3]中,地形 (LS) 因子是定量计算土壤流失的重要指标。区域尺度上, 通常使用数字高程模型 (Digital elevation model, DEM) 进行地形因子提取^[4]。随着无人机技术、航空摄影测量技术、激光雷达技术的发展,高精度、大范围 DEM 获取逐渐容易^[5], 如何在大区域上使用高精度 DEM 进行地形因子提取成为研究重点。

SRTM (Shuttle radar topography mission) 是美国太空总署和国防部国家测绘局以及德国和意大利航天机构共同合作完成的地球表面遥感测量结果^[6]。该数据凭借在全球尺度上精度高、范围大等优势^[7], 可为大区域甚至全球范围地形因子提取提供数据基础^[8]。SRTM 处于地理坐标系, 而已有的 LS 因子提取方法通常基于投影坐标系, 通过提取坡度、坡长, 获取 LS 因子^[9]。现阶段, 坡度提取算法较多, 如最陡坡降、三阶反距离平方权、三阶不带权差分等, 获取较容易; 坡长由于计算原理复杂, 需要考虑截断等多种复杂因素, 获取较困难^[10]。文献 [11-16] 通过汇水面积法替换或径流线换算的方法代替坡长求得 LS 因子, 但这些方法无法考虑截断问题, 也不能获得坡长。文献 [17-19] 从坡长基本定义出发, 考虑坡长的起点和终点, 获取精确的坡长, 根据坡长和坡度计算 LS 因子。文献 [20-21] 研究了坡度截断和沟道截断对侵蚀坡长提取的影响, 可进一步提高坡长精度。文献 [22-23] 表明, 使用分段坡长法提取到的地形因子准确性及空间分布更加合理。前人对地形因子提取的相关机理作了大量研究, 投影坐标系下地形因子提取方法较为成熟。但在实际应用时, 要求栅格单元以米为单位, 且边长一致, 无法直接对 SRTM 进行计算。通常需对 SRTM 进行坐标转换后方可应用, 计算效率低, 不利于大区域地形因子快速提取。文献 [24] 通过分析地理坐标系特点, 构建地球球体模型, 提出 SRTM 的坡度和坡向算法, 但未对坡长与 LS 提取方法进行研究与应用。

基于此, 本文提出一种基于 SRTM 的 LS 因子提

取算法 (LSA – SRTM)。通过模拟地球球体模型, 构建换算关系及解算方法, 直接在地理坐标系下提取 SRTM 栅格单元边长、获取坡度与流向、提取坡长, 进而提取 LS 因子。

1 研究数据和方法

1.1 实验数据

为了验证算法的精度, 需使用不同地貌类型的高程数据进行评估^[16]。但实际地形的微观特征过多, 数据本身存在一定的随机噪声^[25], 文献 [26] 尝试构建数学理论曲面代替实际地形, 并在曲面上考虑实际地形可能存在的基本地貌类型。由于数学曲面噪声、误差等影响较小, 文献 [16, 27] 基于数学曲面进行了流向算法分析以及改进方法研究。Himmelblau – Orlandini 数学曲面是文献 [28] 利用 Himmelblau 函数, 通过仿射变换后生成的离散曲面, 是一种复杂数学曲面, 兼具凹凸面、发散汇集等特征, 曲面上同时有山顶、鞍部、谷底等地形特征, 与实际地形条件吻合, 且通过其生成模型, 可计算理论真值, 方便进行误差、精度检验, 同时可以避免投影转换的误差, 减少误差的累积效应。

Himmelblau – Orlandini 曲面的原始函数为

$$Z(X,Y)=(X^2+Y-4)^2+(Y^2+X-7)^2$$
$$(-5\leq X\leq 5;-5\leq Y\leq 5)$$

(1)

为了方便该曲面进行 DEM 离散表达, 使用

$$x=50X+250$$

(2)

$$y=50Y+250$$

(3)

$$z=-0.75Z+450$$

(4)

式中 x —— x 轴坐标值, 取 0 ~ 500 m

y —— y 轴坐标值, 取 0 ~ 500 m

z —— (x,y) 的高程

对曲面进行仿射变换^[28], 生成 0 ~ 500 m 尺度的 SRTM 如图 1 所示。

1" (分辨率约 30 m) SRTM (来源: <https://e4ftl01.cr.usgs.gov/>) 为 HGT 格式, 采用 WGS 1984 坐标系。整套数据覆盖 60°N ~ 56°S, 总面积超过 $1.19\times 10^8\text{ km}^2$, 单个数据文件覆盖 $1^\circ(\text{经度})\times 1^\circ(\text{纬度})$ 的地区。目前, 基于该数据的地形因子结果分析已有大量研究。文献 [29] 的研究表明, DEM 网格扩张会降低 LS 的提取精度, 1" SRTM 的 LS 因子计算精度高于 3" SRTM。文献 [30] 的研究表明, 在

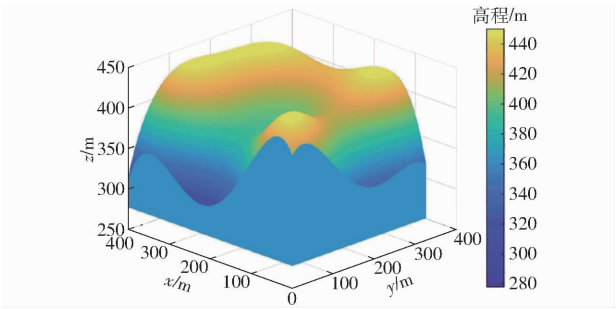


图 1 数学曲面
Fig.1 Mathematical surface

特定的海拔范围,1" SRTM 提取的地形因子甚至优于 10 m 分辨率的 DEM。文献[31]的研究表明 1" SRTM 稍差于 25 m 的 Hc-DEM(水文地貌关系正确的 DEM),但比相同分辨率的 ASTER GDEM(先进星载热发射和反射辐射仪全球数字高程模型)地形表达能力更好。文献[32]对 1" SRTM 的侵蚀表达能力作了分析,认为研究样区较大、缺少连续的高精度 DEM 时,1" SRTM 可以代替使用。因此,目前全球尺度的土壤侵蚀多基于此数据进行^[8]。

选取全国土壤侵蚀强烈、侵蚀地貌发育的 5 个典型样区为实验区(图 2)。包括:东北漫岗丘陵区(黑龙江省齐齐哈尔市拜泉县),代表波状起伏的缓坡丘陵;黄土丘陵区(陕西省延安市安塞县),代表半表深厚黄土覆盖、强烈水蚀作用的陡坡丘陵;西南紫色土丘陵区(四川省绵阳市盐亭县)与南方红壤

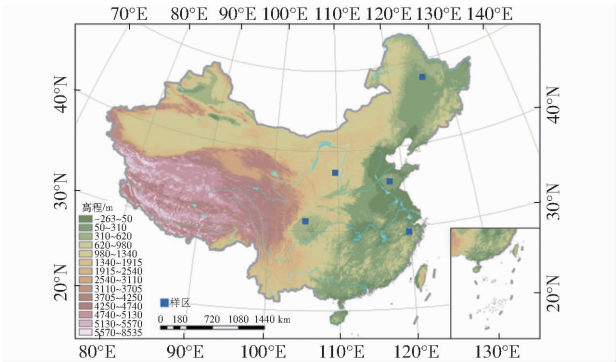


图 2 样区分布图
Fig.2 Location of samples

丘陵区(浙江省金华市东阳县),代表亚热带湿润多雨环境下的丘陵;北方土石山区(山东省临沂市蒙阴县),代表暖温带半湿润、半干旱环境下的山地地形景观^[33]。各个样区尺寸均为 1°×1°,样区高程数据如图 3 所示。

1.2 实验方法

LSA-SRTM 的核心过程主要分为 5 个步骤,算法流程如图 4 所示:利用经纬度信息计算栅格的单元边长及单元坡长;利用 Deterministic 8(D8)算法计算流向和坡度;依据坡度和截断因子设置坡度截断点,根据汇水面积和指定的阈值设置沟道截断点;参考截断位置,计算累积坡长;根据 CSLE,利用坡度和累积坡长计算 LS 因子。输入的 SRTM 数据是 ASCII 数据,在计算前对输入数据的合法性进行判断。

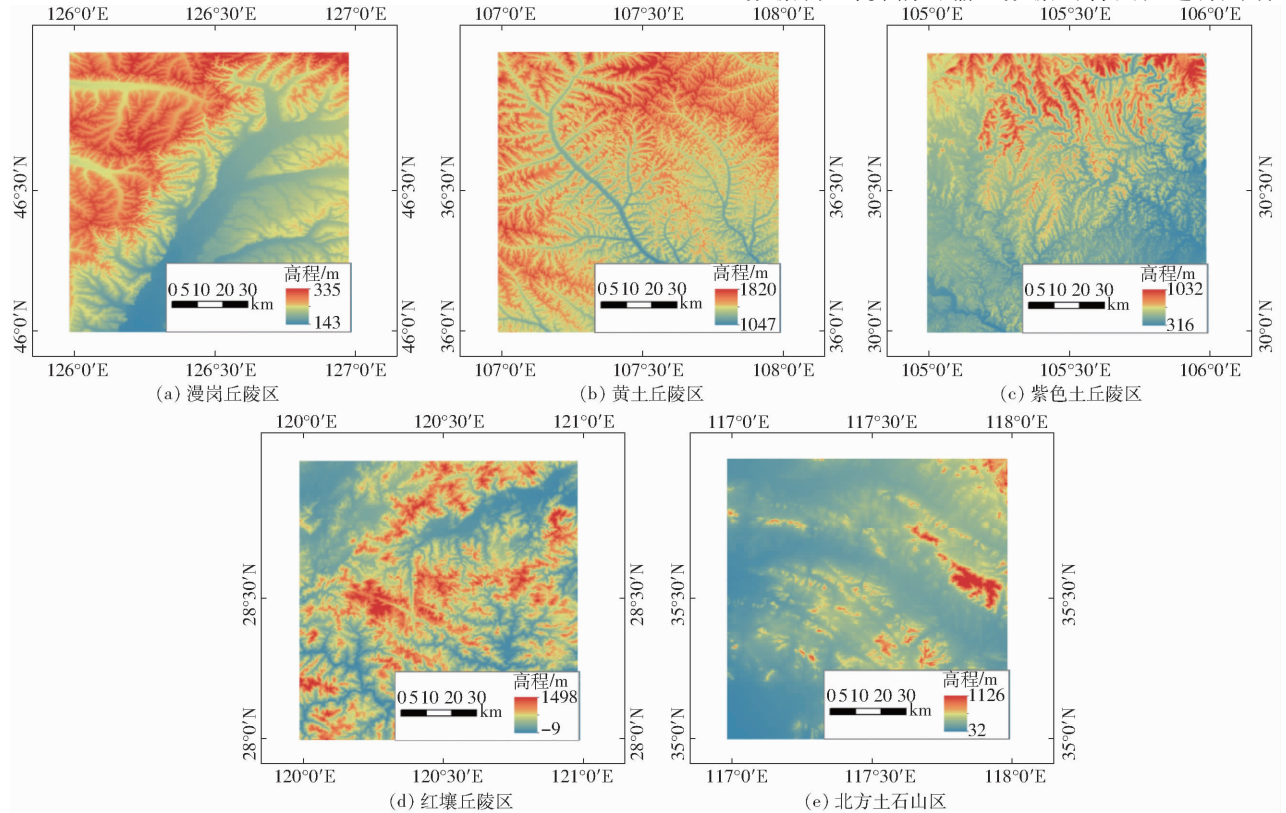


图 3 典型样区数字高程模型
Fig.3 DEM samples

m ——坡长指数
 k ——汇入坐标点 (x,y) 的栅格数

本研究考虑截断对坡长的影响,坡度截断通过判断坡度变化率和中断因子的关系来确定,当坡度变化率大于中断因子时,该点标记为截断点^[21]。沟道截断通过设置阈值的方法确定,当汇水面积大于阈值时,标记该点为截断点^[20]。本文将汇水面积阈值设置为 10^5 m^2 。

累积坡长的计算方法是以起点栅格为基础,沿周围 8 个不同方向的最大坡降方向累加坡长。对于 SRTM 数据,无法确定某条流路方向的最大坡长,因此,需对栅格点正向、反向遍历,从栅格数据起点逐点计算来完成累计坡长计算^[19]。

1.2.4 地形因子提取

在 CSLE 中,坡长和坡度共同决定了侵蚀地形因子的计算^[29]。为避免只考虑均匀坡长带来的误差^[36],使用分段坡长因子公式来计算坡长因子。LS 因子的计算公式为

$$S = \begin{cases} 10.8\sin\theta + 0.03 & (\theta < 5^\circ) \\ 16.8\sin\theta - 0.05 & (5^\circ \leq \theta < 10^\circ) \\ 21.91\sin\theta - 0.96 & (\theta \geq 10^\circ) \end{cases} \quad (9)$$
$$L = \begin{cases} \frac{\lambda_{\text{out}}^{m+1} - \lambda_{\text{in}}^{m+1}}{22.13^m (\lambda_{\text{out}} - \lambda_{\text{in}})} & (\lambda_{\text{out}} - \lambda_{\text{in}} > 0) \\ \left(\frac{\lambda_{\text{out}}}{22.13}\right)^m & (\lambda_{\text{out}} - \lambda_{\text{in}} \leq 0) \end{cases} \quad (10)$$

其中

$$m = \begin{cases} 0.2 & (\theta \leq 0.5^\circ) \\ 0.3 & (0.5 < \theta < 1.5^\circ) \\ 0.4 & (1.5 \leq \theta < 3^\circ) \\ 0.5 & (\theta \geq 3^\circ) \end{cases}$$

式中 θ ——坡度 S ——坡度因子
 λ_{in} ——入口坡长, m
 λ_{out} ——出口坡长, m
 L ——坡长因子

1.2.5 实验对比方法

(1)精度对比

在格网 DEM 上,完整获取各个位置的地形因子真值非常困难,精度对比需对检验样区选定样点测量完成。参照文献[37],在实验样区中选取较为规整的坡面样点,样本空间设置为 150,需避免将样点设在明确的分水线和沟谷中^[38]。根据 DEM 绘制(等间距小于 cellsize)等高线,在高程变化平缓的区域减小等高线间距,采用 ArcGIS 10.2 的量尺工具,量算采样栅格中心点沿与等高线垂直方向到明确分水线或山顶(水流起始点)的投影距离作为该栅格的实测坡长,取多次测量的均值作为最终结果,结果保留小数点后两位,不考虑人为误差时,有效测量精

度为 0.1 m。基于实测坡长计算得到的 LS 因子为实测 LS 因子。以投影坐标系下的 LS 算法^[19](简称为 LSA-DEM)作为参照方法,将两种方法的计算结果与实测结果进行对比。

确定计算精度时,使用回归分析方法以及决定系数 R^2 ,衡量计算结果与测量结果的相关性;使用标准差(SD)以及绝对差(AD)确定计算误差。

(2)效率对比

在 64 位 Dell Precision 工作站(系统:Windows 10;RAM:64 GB;CPU: Intel Xeon Gold 5115;主频:2.4 GHz)对两种方法的运算时间进行统计。样本大小分别为:500 m × 500 m, $1^\circ \times 1^\circ$ 、 $2^\circ \times 2^\circ$ 、 $5^\circ \times 5^\circ$ 、 $14^\circ \times 14^\circ$ 。为避免不可控因素对运算时间测量的干扰,对每一测试样本均进行 5 次运算,取其运算时间的平均值作为实际执行时间。

2 结果与讨论

2.1 数学曲面提取结果分析

数学曲面上,LSA-SRTM 计算结果见图 8a ~ 8c,坡度最大值为 84.97° ,最小值为 0.1° ,平均值为 50.91° (表 1)。坡度高值均分布在 4 个局部高点外侧陡坡区域,局部高点内侧坡度变化不明显(图 8a)。仅在坡度截断作用下,坡长最大值为 407.65 m,最小值为 0.48 m,坡长均值 64.96 m。坡长从局部高点向坡度变化最陡的方向累加,在汇集坡面可累计至流域边界,能反映地表起伏状态(图 8b)。LSA-DEM 提取结果见图 8d ~ 8f,两种方法的纹理特征无明显差异,3 种地形指标的均值与标准差十分接近。

两种方法与测量值对比如表 2 所示。由表 2 可见,两种方法的结果与测量值均呈现较强的相关性。LSA-SRTM 与测量坡长的 R^2 为 0.855 2,与测量 LS 因子的 R^2 为 0.890 7,由此可见,计算结果与测量结果有较高的相关性,可以较好地表达真实地形。计算结果与实测坡长的 SD 与 AD 分别为 26.34、18.98 m,与实测 LS 因子的 SD 与 AD 分别为 6.41、3.94。

计算结果与实测结果有较高的一致性,误差范围较小,从回归分析的结果来看,两种方法具有高度相似的误差来源。误差的主要原因在于单流向 D8 方法应用的局限性,D8 方法的流向只能选择周围 8 个栅格中的一个,这使得发散坡面上易出现栅格缺失上游水流入情况^[39],影响坡长的累积结果。

2.2 典型样区提取结果分析

典型样区上 3 种地形指标统计结果如表 3 ~ 5 所示。

从表 3 可看出,漫岗丘陵区坡度最为平缓,平均

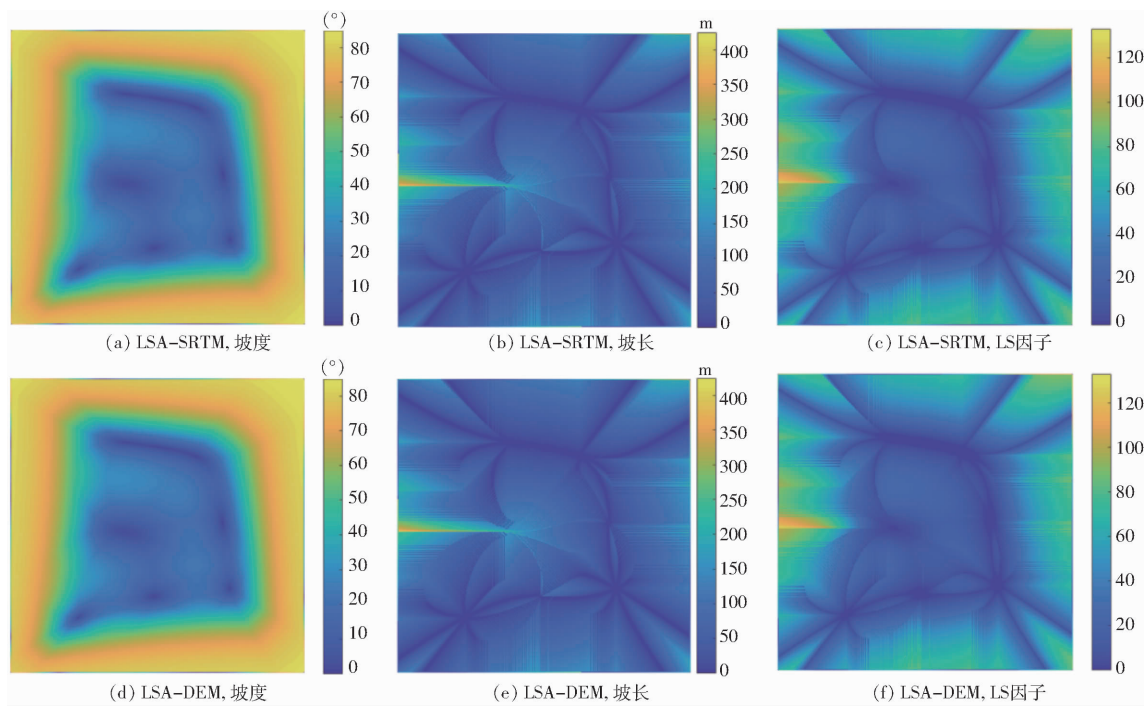


图 8 数学曲面上地形因子提取结果

Fig. 8 Topographic factors extraction results in mathematical surface

表 1 数学曲面上 LSA - SRTM 和 LSA - DEM 结果

Tab.1 Results of LSA - SRTM and LSA - DEM in mathematical surface					
项目	方法	最小值	最大值	平均值	标准差
坡度/(°)	LSA - SRTM	0.10	84.97	50.91	25.09
	LSA - DEM	0.10	84.97	50.89	25.09
坡长/m	LSA - SRTM	0.48	407.65	64.96	49.01
	LSA - DEM	0.48	407.68	64.98	49.03
LS 因子	LSA - SRTM	0.01	133.12	36.90	24.82
	LSA - DEM	0.01	133.63	37.20	24.83

坡度和坡度标准差均最小,坡度基本在 6° 以下;其次为北方土石山区,平均坡度较小,小于 5° 的面积占 23%;整体地形由缓到陡依次为紫色土丘陵区、黄土丘陵区 and 红壤丘陵区;平均坡度和标准差最大的是红壤丘陵区。

从表 4 可知,平均坡长最大的是漫岗丘陵区,其次为紫色土丘陵区、红壤丘陵区、北方土石山区,黄土丘陵区的平均坡长最小,与其支离破碎的地形相适应,5 个样区的坡长大多在 200 m 以内。

表 2 数学曲面上 LSA - SRTM 和 LSA - DEM 结果对比

Tab.2 Differences between LSA - SRTM and LSA - DEM results in mathematical surface					
项目	方法	SD	AD	R ²	回归方程
坡长/m	LSA - SRTM	26.34	18.98	0.855 2	$y = 0.844\ 9x + 26.089\ 6$
	LSA - DEM	26.88	19.25	0.855 3	$y = 0.844\ 8x + 26.702\ 5$
LS 因子	LSA - SRTM	6.41	3.94	0.890 7	$y = 0.803\ 8x + 4.430\ 6$
	LSA - DEM	6.64	3.95	0.890 6	$y = 0.803\ 8x + 4.453\ 5$

表 3 典型样区 LSA - SRTM 与 LSA - DEM 坡度

Tab.3 Slope gradient results of LSA - SRTM and LSA - DEM in typical samples (°)					
典型样区	方法	最小值	最大值	平均值	标准差
漫岗丘陵	LSA - SRTM	0.10	31.93	2.48	1.91
	LSA - DEM	0.10	26.57	2.41	1.98
黄土丘陵	LSA - SRTM	0.10	75.29	19.05	9.47
	LSA - DEM	0.10	74.88	19.34	10.41
紫色土丘陵	LSA - SRTM	0.10	71.57	13.19	7.91
	LSA - DEM	0.10	69.90	13.41	8.58
红壤丘陵	LSA - SRTM	0.10	82.17	21.28	12.41
	LSA - DEM	0.10	82.60	21.27	12.80
北方土石山	LSA - SRTM	0.10	74.52	5.96	6.67
	LSA - DEM	0.10	77.10	5.96	6.92

表 4 典型样区 LSA - SRTM 与 LSA - DEM 的坡长

Tab.4 Slope length results of LSA - SRTM and LSA - DEM in typical samples m					
典型样区	方法	最小值	最大值	平均值	标准差
漫岗丘陵	LSA - SRTM	0	1 397.68	100.27	103.89
	LSA - DEM	0	1 385.22	95.26	90.76
黄土丘陵	LSA - SRTM	0	844.41	56.21	66.98
	LSA - DEM	0	722.23	59.81	73.87
紫色土丘陵	LSA - SRTM	0	1 214.01	98.40	99.77
	LSA - DEM	0	1 111.02	93.08	93.53
红壤丘陵	LSA - SRTM	0	1 158.88	74.32	81.42
	LSA - DEM	0	999.74	72.25	80.35
北方土石山	LSA - SRTM	0	985.23	92.41	84.25
	LSA - DEM	0	952.02	87.91	79.21

表 5 典型样区 LSA-SRTM 与 LSA-DEM 的 LS 因素

Tab. 5 LS factor results between LSA-SRTM and LSA-DEM in typical samples					
典型样区	方法	最小值	最大值	平均值	标准差
漫岗丘陵	LSA-SRTM	0	46.99	0.85	1.12
	LSA-DEM	0	36.64	0.98	1.31
黄土丘陵	LSA-SRTM	0	125.25	15.68	11.97
	LSA-DEM	0	117.09	14.73	11.46
紫色土丘陵	LSA-SRTM	0	117.09	11.13	10.51
	LSA-DEM	0	167.31	10.32	9.74
红壤丘陵	LSA-SRTM	0	177.28	18.78	16.07
	LSA-DEM	0	169.07	18.59	15.96
北方土石山	LSA-SRTM	0	116.56	3.86	6.99
	LSA-DEM	0	117.16	3.99	6.96

从表 5 可知,LS 因子由漫岗丘陵区、北方土石山区、紫色土丘陵区、黄土丘陵区 and 南方红壤丘陵区依次增加。漫岗丘陵区 LS 因子在 0.5 以下的面积约 75%;黄土丘陵区 LS 因子主要分布在 5 以上,其中大于 20 的部分占 35% 左右;西南紫色土丘陵区 LS 因子在 0.5 以下的部分约占 5%,大于 20 的部分占 18% 左右;南方红壤丘陵区 LS 因子在 0.5 以下的面积占 19%,大于 20 的部分占 23% 左右;北方土石山区 LS 因子主要分布在 0.5~20 之间,0.5 以下占 11% 左右。该结果与文献[31]的研究结果基本一致。

由于篇幅原因,本文给出黄土丘陵区的结果示意图(图 9)。从宏观角度观测,两种算法得到的 3

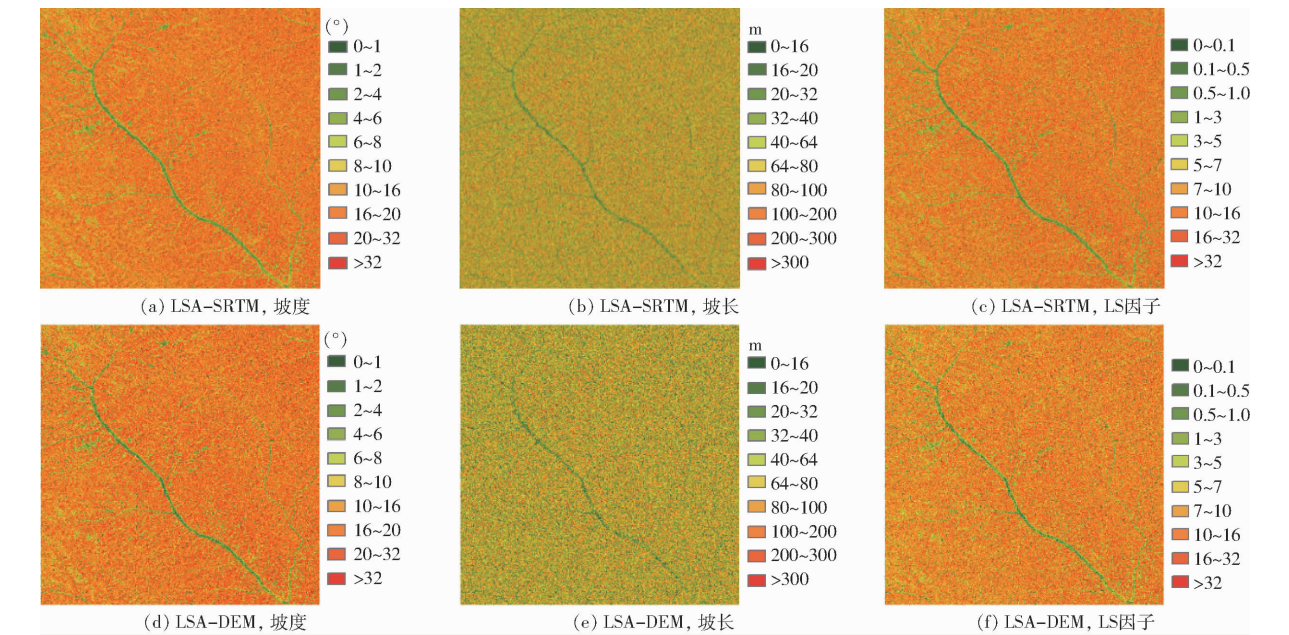


图 9 黄土丘陵区地形因子提取结果

Fig. 9 Extraction results of topographic factors in loess hilly

种地形指标的空间格局和纹理分布十分接近。

典型样区上两种方法与测量值的对比结果见表 6。由表 6 可见,5 个样区上 LSA-SRTM 与坡长测量值的 R^2 分别为:0.778 8、0.726 9、0.702 4、0.690 9、0.725 5;对应的 SD 分别为:46.12、57.38、43.66、44.63、39.41 m;AD 分别为:32.16、38.20、31.19、26.69、19.75 m。与 LS 因子测量值的 R^2 分别为:0.820 9、0.821 3、0.714 2、0.714 5、0.821 2;对应的 SD 分别为:7.97、8.83、8.54、7.69、6.52;AD 分别为:5.14、7.63、6.13、4.79、3.56。两种方法与测量值的相关性接近,从计算误差上看,LSA-DEM 的 SD 与 AD 指标均高于 LSA-SRTM。主要原因是投影转换导致高程在转换前后发生改变、栅格点位偏移,对后续计算引起连锁反应。相较于数学曲面的结果,典型样区上,坡长与 LS 的精

度都有所下降,主要与实验数据的分辨率下降有关。

2.3 效率分析

LSA-SRTM 与 LSA-DEM 的运行时间如表 7 所示。在 500 m×500 m(数学曲面)的样本上,由于两种方法计算的栅格数一样,且不需要投影转换时,LSA-DEM 与 LSA-SRTM 的运行时间持平。在 1"SRTM 上,LSA-DEM 的运算时间更长,主要与投影变换的时间开销,以及变换引起的输入计算的栅格数增多有关。LSA-SRTM 可以有效节省坐标转换时间,计算效率更高。

3 结束语

针对传统 LS 方法计算 SRTM 需投影转换、效率低的问题,本文提出了一种基于 SRTM 的地形因子

表 6 典型样区上 LSA - SRTM 和 LSA - DEM 结果对比

Tab.6 Differences between LSA - SRTM and LSA - DEM results in typical samples

典型样区	项目	方法	SD	AD	R^2	回归方程
漫岗丘陵	坡长/m	LSA - SRTM	46. 12	32. 16	0. 778 8	$y = 0. 660\ 5x + 37. 422$
		LSA - DEM	54. 69	40. 78	0. 760 2	$y = 0. 659\ 5x + 44. 093\ 5$
	LS 因子	LSA - SRTM	7. 97	5. 14	0. 820 9	$y = 0. 731\ 0x + 10. 809\ 4$
		LSA - DEM	8. 00	5. 42	0. 815 0	$y = 0. 711\ 3x + 9. 500\ 2$
黄土丘陵	坡长/m	LSA - SRTM	57. 38	38. 20	0. 726 9	$y = 0. 667\ 4x + 31. 450\ 1$
		LSA - DEM	63. 59	47. 76	0. 668 6	$y = 0. 666\ 1x + 43. 503\ 8$
	LS 因子	LSA - SRTM	8. 83	7. 63	0. 821 3	$y = 0. 779\ 1x + 7. 133\ 6$
		LSA - DEM	9. 19	6. 18	0. 819 7	$y = 0. 750\ 0x + 6. 302\ 4$
紫色土丘陵	坡长/m	LSA - SRTM	43. 66	31. 19	0. 702 4	$y = 0. 807\ 6x + 20. 693\ 6$
		LSA - DEM	50. 22	35. 88	0. 687 8	$y = 0. 798\ 3x + 28. 868\ 8$
	LS 因子	LSA - SRTM	8. 54	6. 13	0. 714 2	$y = 0. 672\ 6x + 10. 019\ 9$
		LSA - DEM	8. 86	6. 57	0. 711 3	$y = 0. 672\ 7x + 9. 531\ 9$
红壤丘陵	坡长/m	LSA - SRTM	44. 63	26. 69	0. 690 9	$y = 0. 741\ 8x + 19. 763\ 7$
		LSA - DEM	48. 78	28. 86	0. 690 5	$y = 0. 752\ 5x + 24. 839\ 4$
	LS 因子	LSA - SRTM	7. 69	4. 79	0. 714 5	$y = 0. 794\ 0x + 6. 302\ 7$
		LSA - DEM	8. 27	5. 51	0. 710 9	$y = 0. 770\ 9x + 5. 223\ 3$
北方土石山	坡长/m	LSA - SRTM	39. 41	19. 75	0. 725 5	$y = 0. 660\ 6x + 25. 412\ 3$
		LSA - DEM	38. 70	19. 12	0. 720 7	$y = 0. 666\ 4x + 21. 262\ 9$
	LS 因子	LSA - SRTM	6. 52	3. 56	0. 821 2	$y = 0. 704\ 3x + 8. 581\ 3$
		LSA - DEM	6. 53	4. 37	0. 820 8	$y = 0. 719\ 9x + 7. 678\ 7$

表 7 LSA - SRTM 与 LSA - DEM 运行时间

Tab.7 Running time of LSA - SRTM and LSA - DEM

样区尺寸	方法	栅格数	运行时间/s		
			坐标转换	LS 计算	总时间
500 m × 500 m	LSA - DEM	500 × 500	0	0. 936	0. 936
	LSA - SRTM	500 × 500	0	0. 945	0. 945
1° × 1°	LSA - DEM	3 499 × 4 122	6. 235	37. 299	43. 534
	LSA - SRTM	3 601 × 3 601	0	34. 875	34. 875
2° × 2°	LSA - DEM	7 730 × 8 839	27. 667	190. 331	217. 998
	LSA - SRTM	7 201 × 7 201	0	170. 601	170. 601
5° × 5°	LSA - DEM	17 665 × 20 462	252. 432	1 640. 221	1 892. 653
	LSA - SRTM	18 001 × 18 001	0	1 409. 947	1 409. 947
14° × 14°	LSA - DEM	51 664 × 62 538	917. 662	5 961. 761	6 879. 423
	LSA - SRTM	50 401 × 50 401	0	5 712. 980	5 712. 980

提取算法 (LSA - SRTM)。并对该算法的精度和效率与投影坐标系下的 LS 提取算法 (LSA - DEM) 进行对比分析。通过实验验证得出,在 5 个典型样区上,LSA - SRTM 的 LS 结果与实测 LS 的 R^2 分别为: 0. 820 9、0. 821 3、0. 714 2、0. 714 5、0. 821 2,精度高于 LS - ADEM;SD 分别为:7. 97、8. 83、8. 54、7. 69、6. 52,误差小于 LSA - DEM。同时,LSA - SRTM 保持计算前后栅格的规模、节省投影转换的时间开销,当栅格尺寸为 50 401 × 50 401 时,计算时间比 LSA - DEM 少约 1 166. 443 s,提高了地形因子提取效率。本文方法在保证计算精度的同时,提高了地形因子提取效率,可为大区域上地形因子研究提供支撑。

参 考 文 献

[1] WISCHMEIER W H, SMITH D D. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning[M]. Washington, DC: Agriculture Handbook, 1978.

[2] RENARD K G, FOSTER G R, WEESIES G A,et al. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)[M]. Washington, DC: Agriculture Handbook,1997.

[3] LIU B Y, NEARING M A, SHI P J,et al. Slope length effects on soil loss for steep slopes[J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(5): 1759 - 1763.

[4] 汤国安. 我国数字高程模型与数字地形分析研究进展[J]. 地理学报, 2014, 69(9): 1305 - 1325.

- TANG Guoan. Progress of DEM and digital terrain analysis in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(9): 1305 – 1325. (in Chinese)
- [5] 李振洪, 李鹏, 丁咚, 等. 全球高分辨率数字高程模型研究进展与展望[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2018, 43(12): 1927 – 1942.
- LI Zhenhong, LI Peng, DING Dong, et al. Research progress of global high resolution digital elevation models[J]. *Journal of Wuhan University (Information Science Edition)*, 2018, 43(12): 1927 – 1942. (in Chinese)
- [6] 汪凌. 美国航天飞机雷达地形测绘使命简介[J]. *测绘通报*, 2000(12): 38 – 40.
- WANG Ling. A brief introduction to US shuttle radar topography mission[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2000(12): 38 – 40. (in Chinese)
- [7] RODRÍGUEZ E, MORRIS C S, BELZ J E. A global assessment of the SRTM performance[J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2006, 72(3): 249 – 260.
- [8] BORRELLI P, ROBINSON D A, FLEISCHER L R, et al. An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion[J]. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 1 – 13.
- [9] 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]. *中国水土保持*, 2013(10): 17 – 21.
- YANG Qinke, GUO Minghang, LI Zhiguang, et al. Extraction and preliminary analysis of topographic factors of soil erosion in China[J]. *China Soil and Water Conservation*, 2013(10): 17 – 21. (in Chinese)
- [10] 张宏鸣, 杨勤科, 李锐. 流域分布式侵蚀学坡长的估算方法研究[J]. *水利学报*, 2012, 43(4): 437 – 444.
- ZHANG Hongming, YANG Qinke, LI Rui. Research on the estimation of slope length in distributed watershed erosion[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2012, 43(4): 437 – 444. (in Chinese)
- [11] MOORE I D, WILSON J P. Length-slope factors for the Revised Universal Soil Loss Equation: simplified method of estimation [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1992, 47(5): 423 – 428.
- [12] YANG X H. Digital mapping of RUSLE slope length and steepness factor across New South Wales, Australia[J]. *Soil Research*, 2015, 53(2): 216 – 225.
- [13] BIRCHER P, LINIGER H P, PRASUHN V. Comparing different multiple flow algorithms to calculate RUSLE factors of slope length (L) and slope steepness (S) in Switzerland[J]. *Geomorphology*, 2019, 346: 106850.
- [14] KRISHNA P R A, LALITHA R, SHANMUGASUNDARAM K, et al. Assessment of topographical factor (LS-factor) estimation procedures in a gently sloping terrain[J]. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 2019, 47(6): 1031 – 1039.
- [15] RHEINWALT A, GOSWAMI B, BOOKHAGEN B. A network-based flow accumulation algorithm for point clouds: facet-flow networks (FFNs)[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2019, 124(7): 2013 – 2033.
- [16] WU P, LIU J, HAN X, et al. Nondispersive drainage direction simulation based on flexible triangular facets[J]. *Water Resources Research*, 2020, 56(4): 1 – 17.
- [17] REMORTEL R D V, MAICHLE R W, HICKEY R J. Computing the LS factor for the revised universal soil loss equation through array-based slope processing of digital elevation data using a C++ executable[J]. *Computers & Geosciences*, 2004, 30(9 – 10): 1043 – 1053.
- [18] 符素华, 刘宝元, 周贵云, 等. 坡长坡度因子计算工具[J]. *中国水土保持科学*, 2015, 13(5): 105 – 110.
- FU Suhua, LIU Baoyuan, ZHOU Guiyun, et al. Calculation tool of topographic factor[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2015, 13(5): 105 – 110. (in Chinese)
- [19] ZHANG H, YANG Q, LI R, et al. Extension of a GIS procedure for calculating the RUSLE equation LS factor[J]. *Computers & Geosciences*, 2013, 52: 177 – 188.
- [20] 张宏鸣, 杨勤科, 王猛, 等. 沟道截断对分布式土壤侵蚀学坡长提取的影响[J]. *水利学报*, 2017, 48(5): 568 – 575.
- ZHANG Hongming, YANG Qinke, WANG Meng, et al. Effect of channel networks cutoff on extraction of distributed erosion slope length[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2017, 48(5): 568 – 575. (in Chinese)
- [21] 张宏鸣, 王猛, 杨勤科, 等. 坡度截断对分布式土壤侵蚀学坡长提取的影响[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2018, 43(11): 1753 – 1760.
- ZHANG Hongming, WANG Meng, YANG Qinke, et al. Effect of slope cutoff in extraction of distributed soil erosion slope length[J]. *Journal of Wuhan University (Information Science Edition)*, 2018, 43(11): 1753 – 1760. (in Chinese)
- [22] FU Suhua, WU Zhiping, LIU Baoyuan, et al. Comparison of the effects of the different methods for computing the slope length factor at a watershed scale[J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2013, 1(2): 64 – 71.
- [23] 梁晓珍, 符素华, 丁琳. 地形因子计算方法对土壤侵蚀评价的影响[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(6): 21 – 26.
- LIANG Xiaozhen, FU Suhua, DING Lin. The influence of terrain factors' calculation methods on soil erosion evaluation[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(6): 21 – 26. (in Chinese)
- [24] ZHANG Q, YANG Q, WANG C. SRTM error distribution and its associations with landscapes across China [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2016, 82(2): 135 – 148.
- [25] HIRT C. Artefact detection in global digital elevation models (DEMs): the maximum slope approach and its application for complete screening of the SRTM v4.1 and MERIT DEMs[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 207(1): 27 – 41.
- [26] LIU J, CHEN X, LIN H, et al. A simple geomorphic-based analytical model for predicting the spatial distribution of soil thickness in headwater hillslopes and catchments[J]. *Water Resources Research*, 2013, 49(11): 7733 – 7746.
- [27] SHIN S, PAIK K. An improved method for single flow direction calculation in grid digital elevation models[J]. *Hydrological Processes*, 2017, 31(8): 1650 – 1661.
- [28] ORLANDINI S, MORETTI G, GAVIOLI A. Analytical basis for determining slope lines in grid digital elevation models[J]. *Water Resources Research*, 2014, 50(1): 526 – 539.
- [29] LU S, LIU B, HU Y, et al. Soil erosion topographic factor (LS): accuracy calculated from different data sources[J]. *Elsevier B. V.*, 2019, 187: 104334.
- [30] 王宁, 刘万青, 姚志宏, 等. 多源 DEM 数据地形因子表达准确性分析[J]. *测绘通报*, 2018(9): 39 – 44.
- WANG Ning, LIU Wanqing, YAO Zhihong, et al. Analysis of the expression accuracy about topographical factors in multi-sources DEM data[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2018(9): 39 – 44. (in Chinese)
- [31] 杨勤科, 郭兰勤, 王春梅. 基于 ASTRE 和 SRTM 高程数据的坡度和坡长提取与分析[J]. *水土保持通报*, 2012, 32

(6): 142 – 146.

YANG Qinke, GUO Lanqin, WANG Chunmei. Extracting and analyzing slope and slope length based on ASTER GDEM and SRTM elevation datasets[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012, 32(6): 142 – 146. (in Chinese)

[32] 温伯清, 杨勤科, 朱梦阳, 等. 一弧秒分辨率 DEM 对侵蚀地形表达能力的分析[J]. 测绘科学, 2019, 44(7): 156 – 163,170.

WEN Boqing, YANG Qinke, ZHU Mengyang, et al. Analysis of the expression ability to loess erosion terrain using 1"SRTM [J]. Science of Surveying and Mapping, 2019, 44(7): 156 – 163,170. (in Chinese)

[33] 郭明航, 杨勤科, 王春梅. 中国主要水蚀典型区侵蚀地形特征分析[J]. 农业工程学报, 2013, 29(13): 81 – 89.

GUO Minghang, YANG Qinke, WANG Chunmei. Analysis on erosional terrain characteristics of typical samples in main water erosion region of China[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(13):81 – 89. (in Chinese)

[34] O'CALLAGHAN J F, MARK D M. The extraction of drainage networks from digital elevation data[J]. Computer Vision Graphics & Image Processing, 1984, 27(3): 323 – 344.

[35] 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]. 计算机工程, 2010, 36(9): 246 – 248.

ZHANG Hongming, YANG Qinke, LIU Qingrui, et al. Research on the estimation of slope length in distributed watershed erosion[J]. Computer Engineering, 2010, 36(9): 246 – 248. (in Chinese)

[36] LIU B, XIE Y, LI Z, et al. The assessment of soil loss by water erosion in China[J]. International Soil and Water Conservation Research, 2020, 8(4): 430 – 439.

[37] 曹龙熹, 符素华. 基于 DEM 的坡长计算方法比较分析[J]. 水土保持通报, 2007, 27(5): 58 – 62.

CAO Longxi, FU Suhua. A comparison of methods for computing slope length based on DEM[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2007, 27(5): 58 – 62. (in Chinese)

[38] ZHU S, TANG G, XIONG L, et al. Uncertainty of slope length derived from digital elevation models of the Loess Plateau, China[J]. Journal of Mountain Science, 2014, 11(5): 1169 – 1181.

[39] 刘学军, 晋蓓, 胡加佩, 等. 格网 DEM 上径流长度计算误差的定量分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2012, 37(7): 757 – 761,779.

LIU Xuejun, JIN Bei, HU Jiawei, et al. Quantitative analysis of error in extracting flow length from grid-based digital elevation model[J]. Journal of Wuhan University (Information Science Edition), 2012, 37(7): 757 – 761,779. (in Chinese)

(上接第 197 页)

[8] 张淼, 吴炳方, 于名召, 等. 未种植耕地动态变化遥感识别:以阿根廷为例[J]. 遥感学报, 2015,19(4): 550 – 559.

ZHANG Miao, WU Bingfang, YU Mingzhao, et al. Remote sensing identification of dynamic change of unplanted cultivated land: a case study of Argentina[J]. Journal of Remote Sensing, 2015,19(4): 550 – 559. (in Chinese)

[9] ABDELAAL H S A, THILMANY D. Grains production prospects and long run food security in Egypt[J]. Sustainability, 2019, 11(16): 4457.

[10] LIANG X, JIN X, YANG X, et al. Exploring cultivated land evolution in mountainous areas of Southwest China, an empirical study of developments since the 1980s[J]. Land Degradation & Development, 2021,32(2): 546 – 558.

[11] HUA W. Spatial characteristics and driving forces of cultivated land changes by coupling spatial autocorrelation model and spatial-temporal big data[J]. KSII Transactions on Internet and Information Systems, 2021,15(2):767 – 785.

[12] PEPE G, MANDARINO A, RASO E, et al. Investigation on farmland abandonment of terraced slopes using multitemporal data sources comparison and its implication on hydro-geomorphological processes[J]. Water, 2019,11(8): 1552.

[13] 刘蒙罢, 张安录, 文高辉. 长江中下游粮食主产区耕地利用生态效率时空格局与演变趋势[J]. 中国土地科学, 2021, 35(2): 50 – 60.

LIU Mengba, ZHANG Anlu, WEN Gaohui. Spatio-temporal pattern and evolution trend of cultivated land use ecological efficiency in main grain producing areas in the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. China Land Science, 2021, 35(2): 50 – 60. (in Chinese)

[14] YANG Z, YANG H, WANG H. Evaluating urban sustainability under different development pathways: a case study of the Beijing – Tianjin – Hebei region[J]. Sustainable Cities and Society, 2020,61: 102226.

[15] LU L, GUO H, CORBANE C, et al. Urban sprawl in provincial capital cities in China: evidence from multi-temporal urban land products using Landsat data[J]. Science Bulletin, 2019,64(14): 955 – 957.

[16] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器:原理与展望[J]. 地理学报, 2017,72(1): 116 – 134.

WANG Jinfeng, XU Chengdong. Geographical detector: principle and prospect[J]. Acta Geographica Sinica, 2017,72(1): 116 – 134. (in Chinese)

[17] WANG C, ZHAN J, ZHANG F, et al. Analysis of urban carbon balance based on land use dynamics in the Beijing – Tianjin – Hebei region, China[J]. Journal of Cleaner Production, 2021,281: 125138.

[18] SONG M, WANG S. Effects of outward migration of factory for the Beijing – Tianjin – Hebei city circle[J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2018,31(6): 513 – 522.

[19] YUAN X, SHAO Y, WEI X, et al. Study on the potential of cultivated land quality improvement based on a geological detector [J]. Geological Journal, 2018,53(Special Issue): 387 – 397.

[20] LI C, WU K, WU J. Urban land use change and its socio-economic driving forces in China: a case study in Beijing, Tianjin and Hebei region[J]. Environment, Development and Sustainability, 2018,20(3): 1405 – 1419.