

基于直方图匹配的东北漫川漫岗区 粗分辨率坡度转换研究

赵婷¹, 毋冰龙², 郑粉莉^{1,2}, 赵录友²

(1.西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100;

2.中国科学院 教育部 水土保持与生态环境研究中心, 陕西 杨凌 712100)

摘要: [目的] 为了克服目前可免费下载的 30 m 分辨率 DEM 在提取东北漫川漫岗地貌区耕地坡度时存在的坡度变缓问题, 获取精确坡度数据, 为东北漫川漫岗地貌类型区土壤侵蚀定量评价提供重要数据支持。[方法] 基于无人机航测影像生成 5 cm 分辨率 DEM 并对其重采样获得 1.5 和 12.5 m 分辨率的 DEM, 结合免费下载的 30 m 分辨率 DEM, 确定研究区 DEM 提取坡度的最佳分辨率; 基于直方图匹配算法, 分坡度段拟合了 30 m 与最佳分辨率 DEM 之间的坡度转换模型。[结果] ① 5 组 DEM 分辨率提取的坡度信息表明, 1 和 5 m 与 5 cm 分辨率 DEM 提取的坡度分布频率具有较强的相似性, 且 5 m 分辨率 DEM 与 1:10 000 比例尺地形图的分辨率相对应。据此确定 5 m 分辨率为构建坡度转换模型的最佳分辨率。② 基于直方图匹配算法分坡度段构建了 30 与 5 m 分辨率 DEM 提取坡度的一元一次线性模型和一元二次非线性模型; 且当地面坡度小于 7° 时宜选取线性坡度转换模型, 而当地面坡度大于 7° 时宜选取非线性坡度转换模型。③ 经线性和非线性坡度转换模型优化后, 30 m 坡度分布频率与 5 m 分辨率的坡度分布频率基本相似, 且协方差、相关系数均大幅度提高。这说明 30 m 分辨率 DEM 提取的坡度信息经模型转换后能够真实反映地面起伏特征, 且非线性坡度转换模型优化效果更佳。[结论] 5 m 分辨率为研究区 DEM 提取坡度的最佳分辨率。构建的低—高分辨率的坡度转换模型中, 非线性坡度转换模型较线性坡度转换模型的优化效果更好。

关键词: 东北漫川漫岗区; 不同分辨率 DEM; 直方图匹配法; 坡度转换模型

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2024)06-0149-10

中图分类号: S157.1, P231

文献参数: 赵婷, 毋冰龙, 郑粉莉, 等. 基于直方图匹配的东北漫川漫岗区粗分辨率坡度转换研究[J]. 水土保持通报, 2024, 44(6): 149-158. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.06.016; Zhao Ting, Wu Binglong, Zheng Fenli, et al. Conversion of low-resolution slope gradient based on histogram matching in rolling hilly area of Northeast China [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(6): 149-158.

Conversion of Low-resolution Slope Gradient Based on Histogram Matching at Rolling Hilly Area of Northeast China

Zhao Ting¹, Wu Binglong², Zheng Fenli^{1,2}, Zhao Luyou²

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A & F University,

Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. The Research Center of Soil and Water Conservation and

Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Education, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] Slope gradient data was accurately obtained to address the limitation of slope gradient underestimation using the freely downloaded 30 m resolution digital elevation model (DEM) for farmland in Northeast China, in order to provide important data support for quantitatively evaluating soil erosion in the rolling hilly regions. [Methods] A 5 cm resolution DEM was generated from drone survey images and

收稿日期: 2024-06-01

修回日期: 2024-09-02

资助项目: 国家自然科学基金面上项目“典型黑土区地表径流、壤中流和土壤管道流驱动的浅沟侵蚀过程机制”(42177326); 中国科学院 A 类战略性先导科技专项子课题“典型黑土区风力—水力—冻融驱动的复合侵蚀过程与阻控关键技术”(XDA28010201)

第一作者: 赵婷(1998—), 女(汉族), 山西省大同市人, 硕士研究生, 研究方向为侵蚀影响评价。Email: Zhaoting@nwfau.edu.cn.

通信作者: 郑粉莉(1960—), 女(汉族), 陕西省西安市人, 教授, 博士, 主要从事土壤侵蚀过程、预报和侵蚀环境效应评价方面的研究。Email: flzh@ms.iswc.ac.cn.

resampled to obtain 1, 5, and 12.5 m DEM resolutions. Combined with the 30 m DEM resolution, the optimal DEM resolution for slope gradient extraction in the study area was identified. Additionally, the histogram matching method was used to establish a slope gradient conversion model between the 30 m DEM resolution and the optimal DEM resolution for each slope gradient category. [Results] ① The slope gradient distributions derived from the five DEM resolutions indicated that the 1 m and 5 m DEM resolutions exhibited a strong similarity to the slope gradient distribution of the 5 cm DEM. Given that the 5 m DEM resolution corresponds to a 1 : 10,000 scale topographic map, the 5 m DEM resolution was optimal for constructing the slope gradient conversion model. ② Using the histogram matching method, a univariate linear model and a univariate quadratic non-linear model were developed for slope gradient conversion between the 30 m and 5 m DEM resolutions across different slope gradient segments. The linear conversion model was suitable for slopes less than 7° , while the non-linear model was more appropriate for slopes greater than 7° . ③ After applying both linear and non-linear conversion models, the frequency distribution of slope gradients extracted from the 30 m DEM resolution closely matched that of the 5 m DEM resolution, significantly improving covariance and correlation coefficients. This reflected that the slope gradients after conversion from the 30 m DEM resolution can accurately represent ground undulation; additionally, the optimization results from the non-linear conversion model were superior to those from the linear conversion model. [Conclusion] The 5 m DEM resolution is the optimal resolution for extracting slope data in the study area. The developed conversion model for low-to-high resolution slope gradients showed that the non-linear slope conversion model has a better optimization effect than the linear slope conversion model.

Keywords: rolling hilly region in Northeast China; different DEM-resolutions; histogram matching method; slope gradient conversion model

东北黑土区是中国重要的粮食生产基地,粮食年产量占全国的 22.3%,是国家粮食的“压舱石”。然而,黑土出现了严重的土壤侵蚀问题,黑土层以年均 1~5 mm 的厚度流失,导致黑土变薄变瘦和土地生产力下降,每年因侵蚀导致的减产约 1.00×10^7 t,严重威胁国家粮食安全〔东北黑土地白皮书(2020)〕。而在众多影响黑土区坡耕地土壤侵蚀因素中,坡度是重要影响因子之一^[1]。已有研究表明,在东北漫川漫岗区,当地面坡度大于 2° 时,坡面土壤侵蚀量急剧增加^[2]。东北黑土区的地貌类型主要为低山丘陵和漫川漫岗,而大部分耕地主要分布在漫川漫岗地貌类型区^[3]。尽管长缓坡为东北漫川漫岗区典型地形,但坡度对坡耕地土壤侵蚀的影响明显大于坡长^[4]。因此,精准获取地面坡度数据对于土壤侵蚀定量评价有重要的作用。然而,由于东北漫川漫岗区坡度大多分布在 $1^\circ \sim 5^\circ$ ^[2],而现有可免费下载 30 m 分辨率 DEM (digital elevation model) 在提取地面坡度时,存在明显的坡度变缓效应^[5],从而出现坡面土壤侵蚀速率低估的现象。

已有研究表明,DEM 分辨率下降导致坡度衰减和坡长扩张的效应明显,从而使低分辨率 DEM 数据提取的地形参数信息严重失真,无法真实反映地形地

貌特征^[6];而高分辨率 DEM 数据可提取真实的地形信息,反映真实的地貌形态^[7-8],但存在大范围的高精度数据难以获取^[9]、数据冗余以及计算量激增的问题^[10]。另外,在小范围内可以使用无人机航测技术获得高分辨率的影像并通过数据处理获得高分辨率的 DEM,但将其扩展到大范围时就会使成本大幅度上升,且费时费力。因此,选择适合分辨率的 DEM 既可真实的反映地面坡度特征又可省时省力,是急需解决的技术问题。据此,许多学者基于不同分辨率 DEM 进行降尺度坡度转换研究,涉及的研究方法主要有转换图谱法、分形维数法和直方图匹配法。转换图谱法在坡度面积比重方面模拟效果较好^[11],但无法表达基于空间位置的坡度转换关系。分形维数法或分形维数结合半方差函数在不同分辨率坡度转换方面也有较高精度^[12-13],但因研究数据均是基于同一个数据源转化而得的不同像元尺度的数据,因此不可避免地导致某些坡度特征值的丢失,进而产生误差的传递效应。直方图匹配算法可以有效地确定相似的 DEM 数据^[14-15],既具有较高的转换精度,可以较好地实现图像匹配,也在一定程度上能够表达坡度的转换关系^[16]。虽然直方图匹配法可能无法精确捕捉到地形的细微变化,从而导致某些局部区域的坡度信息

失真,但其能够在不同分辨率的 DEM 数据间建立较好的匹配关系,使得从低分辨率数据中提取的坡度信息能够尽量接近高分辨率数据的特性,可以实现不同分辨率 DEM 数据的融合和统一。目前用于坡度转换的 DEM 分辨率已达到 5 m,但其精度仍不能满足地形较平缓地区土壤侵蚀定量评价和水土保持措施精准布设的要求。

基于以上分析,本研究选取位于东北典型漫川漫岗区的克山县东胜村和新安村为两个研究样区,利用无人机航测获取的 5 cm 高分辨率 DEM 和免费下载的 30 m 分辨率 DEM 数据,基于坡度分布频率确定研究区坡度提取的最佳分辨率 DEM,并应用直方图匹配法,建立研究区低分辨率与最佳分辨率 DEM 之间的坡度转换模型,降低获取高分辨率坡度数据的成本,为地面坡度信息的精确获取提供方法支持,同时为东北黑土区土壤侵蚀定量评价提供数据支撑。

1 数据来源与研究方法

1.1 研究区概况

本研究所选的两个研究样区分别为黑龙江省齐齐哈尔市克山县东胜村(125°51′14″—125°51′34″E, 48°4′21″—48°4′35″N)和新安村(126°1′11″—126°1′39″E,

48°6′43″—48°6′27″N)两个行政村(图 1),二者均位于东北典型黑土区,其地貌类型属于漫川漫岗地貌类型区,坡度为 1°~8°的坡耕地面积占总耕地面积的 90% 以上。其中,东胜村研究样区海拔高度为 261~303 m,地势西南低和东北高,坡度介于 1°~8°。研究区内有浅沟分布,呈西北—东南走向;新安村研究样区海拔高度为 276.17~297.98 m,地势南低北高,坡度为 1°~8°,浅沟呈东西走向分布。据此,本研究选取的两个研究样地在漫川漫岗地貌类型区和典型黑土区方面均具有代表性,且基于此条件下构建的坡度转换模型可适用于典型黑土区;故而基于此条件下构建的坡度转换模型适用于典型黑土区,据此构建的坡度转换模型可为土壤侵蚀定量评价和坡面侵蚀阻控措施精准布置提供重要数据支持。

1.2 数据来源与预处理

本研究所采用的数据包括黑龙江省克山县 30 m 分辨率 DEM(<http://www.gscloud.cn>)以及东胜村和新安村研究样区的无人机航测数据生成的不同分辨率 DEM。东胜村和新安村无人机航拍影像于 2023 年 4 月作物播种前完成,由无人机大疆精灵 4 RTK 拍摄获得,其航拍参数为航高 50 m,航速 5 m/s,影像重叠度 85% 和空间分辨率 5 cm。

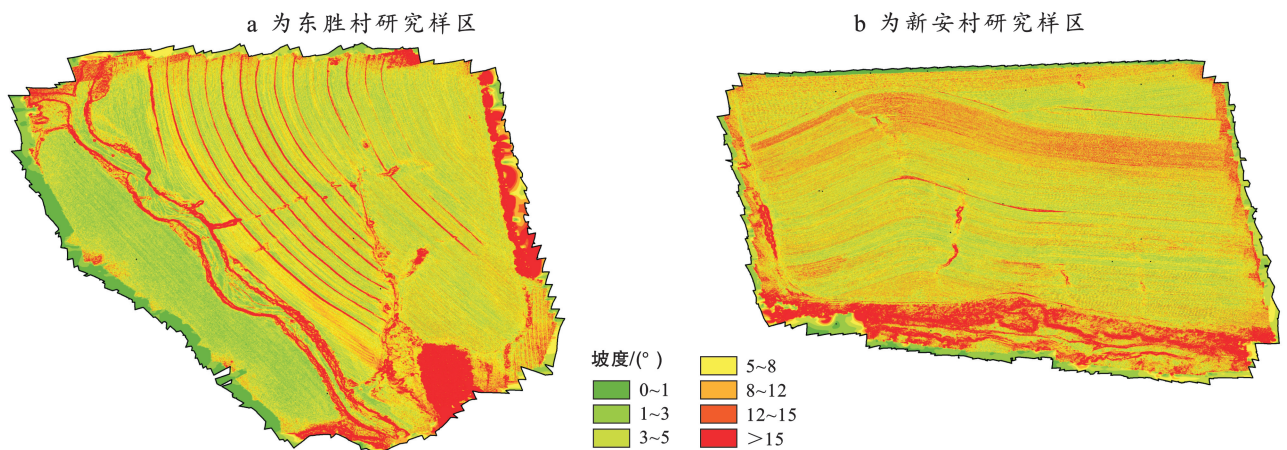


图 1 研究样区坡度分布

Fig.1 Distribution of slope gradient at study area

基于无人机影像处理软件对无人机航拍影像进行处理后生成研究区 5 cm 分辨率的 DEM。按照国家标准和技术规范,对 5 cm 分辨率的 DEM 重采样,获得 1.5 和 12.5 m 分辨率的 DEM,并获取两个研究样区不同分辨率的坡度特征数据。

1.3 研究方法

1.3.1 直方图匹配法 直方图匹配又称直方图规范化,是指使一幅图像的直方图变成规定形状直方图

而对图像进行变换的增强方法^[17]。本研究使用直方图匹配法对坡度栅格数据进行处理,将低分辨率与高分辨率数据的直方图相匹配,使得低分辨率与高分辨率数据具有相似的地形统计特征和地图学特征,从而实现从低分辨率坡度向高分辨率坡度的转换^[18](图 2)。

1.3.2 模型优化效果评价指标 本研究选取协方差(Cov)^[19],相关系数(r)、均方根误差(RMSE)和图像

逼真度(image fidelity)^[19]对坡度转换模型的优化效果进行评价。

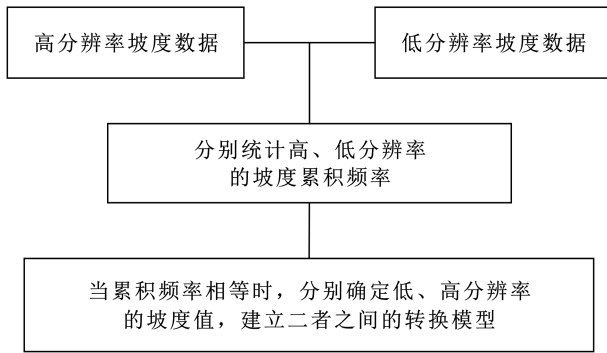


图 2 利用直方图匹配法处理栅格数据的流程图

Fig.2 Flow chart of pre-processing raster data with histogram matching

2 结果与分析

2.1 不同 DEM 分辨率提取的地面坡度特征

根据《黑土区水土流失综合防治技术标准》，当耕地坡度大于 0.25° 时，即发生土壤侵蚀。据此，考虑到研究区 0.25° 以下分布面积较少并结合其坡度分布特征，本研究按照 $(0^\circ, 1^\circ]$, $(1^\circ, 3^\circ]$, $(3^\circ, 5^\circ]$, $(5^\circ, 8^\circ]$, $(8^\circ, 12^\circ]$, $(12^\circ, 15^\circ]$, $(15^\circ, 90^\circ]$ 进行坡度等级划分；并

基于东胜村研究样区 30, 12.5, 5, 1 m 和 5 cm 分辨率 DEM，剔除样区东南部防风林分布区域，提取不同 DEM 分辨率下的坡度值并统计各级坡度分布频率并对比 1, 5, 12.5 和 30 m 与 5 cm 分辨率坡度分布频率误差(表 1—2)。

表 1, 2 表明，随 DEM 分辨率降低，各坡度分级对应分布频率的差异也更加明显。1 和 5 m 分辨率 DEM 提取的各级坡度分布频率与 5 cm 分辨率 DEM 提取的各级坡度分布频率具有相似分布特征，而 12.5 m 和 30 m 分辨率 DEM 的坡度分布频率则与 5 cm 分辨率 DEM 之间存在较大的差异。5 cm, 1 m 和 5 m 分辨率 DEM 提取的坡度主要分布在 12° 以下，12.5 m 和 30 m 分辨率 DEM 提取的坡度主要分布在 8° 以下，而大于 15° 的坡度几乎没有分布。此结果表明，12.5 和 30 m 分辨率 DEM 提取的坡度存在明显的变缓效应；而 1 和 5 m 分辨率 DEM 提取的坡度能够反映地面坡度的真实情况。表 1 和表 2 表明，对于上述 7 个坡度分级，1, 5, 12.5 和 30 m 与 5 cm 分辨率的坡度分布频率绝对误差分别在 1.7%~10.9%，2.9%~13.0%，0.8%~18.8% 和 0.5%~18.7% 之间，1 和 5 m 分辨率与 5 cm 分辨率各级坡度分布频率绝对误差相对较小，而 12.5 和 30 m 与 5 cm 分辨率坡度分布频率绝对误差较大。

表 1 1 和 5 m 分辨率与 5 cm 分辨率各级坡度分布频率和绝对误差

Table 1 Frequencies of slope gradient distribution and absolute error among 1, 5 m and 5 cm resolutions

坡度范围/ $(^\circ)$	5 cm 分辨率 坡度分布频率/%	1 m 分辨率坡度分布频率/%		5 m 分辨率坡度分布频率/%	
		坡度分布频率	绝对误差	坡度分布频率	绝对误差
(0, 1]	6.89	17.74	10.85	17.44	10.55
(1, 3]	22.98	18.85	-4.13	10.73	-12.25
(3, 5]	21.20	30.47	9.27	34.17	12.97
(5, 8]	20.93	16.75	-4.18	28.66	7.73
(8, 12]	12.94	7.13	-5.81	4.65	-8.29
(12, 15]	3.98	2.25	-1.73	1.06	-2.92
(15, 90]	11.09	6.81	-4.28	3.30	-7.79

表 2 12.5 和 30 m 分辨率与 5 cm 分辨率坡度分布频率和绝对误差

Table 2 Frequencies of slope gradient distribution and absolute error among 12.5, 30 m and 5 cm resolutions

坡度范围/ $(^\circ)$	5 cm 分辨率 坡度分布频率/%	12.5 m 分辨率坡度分布频率/%		30 m 分辨率坡度分布频率/%	
		坡度分布频率	绝对误差	坡度分布频率	绝对误差
(0, 1]	6.89	8.47	1.58	7.38	0.49
(1, 3]	22.98	4.18	-18.8	19.46	-3.52
(3, 5]	21.20	23.32	2.12	32.21	11.01
(5, 8]	20.93	33.55	12.62	39.6	18.67
(8, 12]	12.94	25.74	12.8	1.34	-11.60
(12, 15]	3.98	4.73	0.75	0.00	-3.98
(15, 90]	11.09	0.00	-11.09	0.00	-11.09

2.2 不同分辨率 DEM 提取坡度的属性分析

两个研究样区不同分辨率 DEM 提取的坡度最大值、最小值、平均值和标准差表明(表 3),5 cm 分辨率 DEM 提取的坡度范围最大,其变化于 $0^{\circ} \sim 89.44^{\circ}$ 之间。随 DEM 分辨率的下降,坡度范围呈现不同程度的衰减,其中,坡度最小值除 30 m 分辨率 DEM 为 0.34° 外,其余分辨率 DEM 提取的坡度最小值均为 0° ;坡度最大值在不同分辨率 DEM 之间存在较大的变化,且随着 DEM 分辨率下降而呈现不同程度的下降趋势。5 cm 到 12.5 m 分辨率 DEM 提取的坡度平均值呈下降趋势,但 30 m 分辨率 DEM 提取的坡度平均值反而有所增加。另外,表 3 还表明,坡度的标准差随着 DEM 分辨率的下降而减小。

表 3 不同 DEM 分辨率提取的坡度属性统计
Table 3 Statistics of slope gradient attributes at different resolution DEMs

DEM 分辨率	坡度			标准差
	最小值/ $(^{\circ})$	最大值/ $(^{\circ})$	平均值/ $(^{\circ})$	
5 cm	0	89.44	7.75	10.64
1 m	0	75.02	5.66	8.40
5 m	0	39.05	4.81	4.76
12.5 m	0	10.30	3.88	2.25
30 m	0.34	8.30	4.26	2.06

2.3 不同分辨率 DEM 之间坡度转换模型的构建及模型验证

2.3.1 坡度转换模型构建 综上所述,1 和 5 m 分辨率 DEM 提取的坡度分布频率特征与 5 cm 分辨率 DEM 提取的坡度分布频率特征基本类似,能够真实反映地面坡度分布,且 5 m 分辨率 DEM 与 1:10 000 比例尺地形图的分辨率相对应,因此本研究确定 5 m 分辨率 DEM 为研究区坡度提取的最佳分辨率。这里基于 5 和 30 m 分辨率 DEM 提取的坡度分布累积频率(图 3)并结合直方图匹配法,以 0.1° 的坡度为步长分别统计研究样区 30 和 5 m 分辨率 DEM 提取的坡度累积频率曲线,构建当累计频率相等时 30 和 5 m 两种不同分辨率 DEM 对应坡度值的转换关系(图 4)。

利用分段拟合技术,对克山县东胜村研究样区 30 m 与 5 m 分辨率 DEM 提取的坡度—累积频率曲线进行拟合(图 4),结果表明,不同坡度分级范围内的坡度—累积频率曲线变化特征不同,且拟合曲线存在明显的拐点,即当坡度小于 7° 时,其主要呈线性分布特征,当坡度大于 7° 时,其呈非线性分布特征。据此,根据坡度—累积频率曲线分布特征,将坡度划分

为 $\leq 2^{\circ}$, $(2^{\circ}, 4^{\circ}]$, $(4^{\circ}, 6^{\circ}]$, $(6^{\circ}, 7^{\circ}]$ 和 $> 7^{\circ}$ 5 个坡度段,在不同坡度段范围建立 30 m 与 5 m 分辨率之间的坡度转换模型(表 4)。结果表明,当地面坡度小于 7° 时,拟合的 30 m 与 5 m 分辨率的一元一次线性坡度转换模型和二元一次非线性坡度转换模型的 R^2 介于 $0.98 \sim 0.99$ 之间,SSE(误差平方和)在 $0.01 \sim 0.39$ 之间,说明构建的两种坡度转换模型拟合效果均良好。而当地面坡度大于 7° 时,线性坡度转换模型的 R^2 值为 0.97,但 SSE 显著增大,其值达到 95.21;而拟合的非线性坡度转换模型 R^2 值为 0.99,SSE 为 0.25。此结果表明,当地面坡度大于 7° 时,非线性转换模型的模拟效果较好,这与 30 和 5 m 分辨率 DEM 提取的坡度—累积频率曲线分布特征一致。

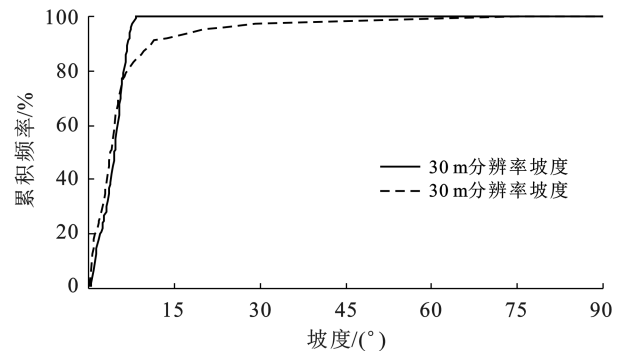


图 3 5 m 和 30 m 分辨率的坡度—累积频率直方图
Fig.3 Histogram of slope gradient cumulative frequency between 5 m and 30 m resolutions

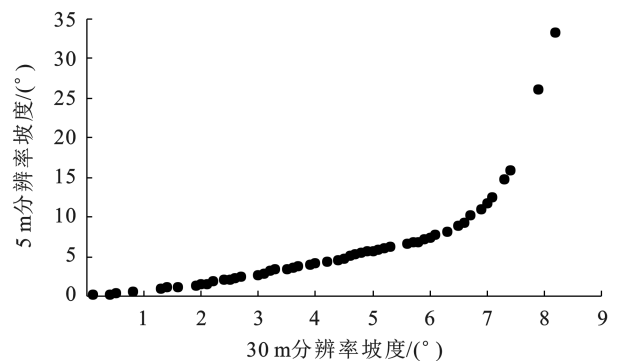


图 4 30 m 与 5 m 分辨率的坡度拟合曲线
Fig.4 Fitting curve of slope gradient between 30 m and 5 m resolutions

将东胜村研究样区 30 m 分辨率 DEM 提取的坡度分别通过两种分段模型转换后,得到线性和非线性坡度模型转换后的坡度—累积频率(图 5)。结果表明,经模型转换后的坡度累积分布频率与 5 m 分辨率 DEM 提取的坡度分布情况相近,说明拟合的两种坡度转换模型具有较好的模拟效果。

表 4 东胜村样区 30 m 与 5 m 分辨率之间的坡度转换模型

Table 4 Slope gradient conversion models between 30 m and 5 m resolutions at sampling site of Dongsheng Village

30 m 分辨率的 坡度取值范围/(°)	模型表达式	R^2	SSE
$x \leq 2$	$y = 0.58x - 0.028$	0.98	0.01
	$y = 0.06x^2 + 0.42x + 0.04$	0.98	0.01
$2 < x \leq 4$	$y = 1.09x - 1.04$	0.98	0.08
	$y = -0.04x^2 + 1.35x - 1.43$	0.98	0.08
$4 < x \leq 6$	$y = 1.52x - 2.11$	0.98	0.25
	$y = 0.39x^2 - 2.48x + 6.99$	0.99	0.06
$6 < x \leq 7$	$y = 5.64x - 27.95$	0.98	0.39
	$y = 1.17x^2 - 9.60x + 21.75$	0.98	0.32
$x > 7$	$y = 48.41x - 334.65$	0.97	95.21
	$y = 23.27x^2 - 313.18x + 1\ 064.46$	1.00	0.25

注: x 是 30 m DEM 提取的坡度, y 是 5 m DEM 提取的坡度, R^2 为决定性系数, SSE 为误差平方和。

进一步分析经模型转换前后东胜村研究样区的坡度空间分布(图 6), 发现转换前 5 和 30 m 分辨率坡度空间分布差异较大(图 6a 和图 6b), 且转换前 5 和 30 m 分辨率坡度空间分布均表现出西南部坡度较小, 但在其他区域 5 m 分辨率坡度大多明显高于 30 m 分辨率。这是因为浅沟的存在导致 5 m 分辨率能够刻画浅沟坡面与浅沟沟槽之间的坡度以及部分

垄丘与垄沟之间的坡度, 而 30 m 分辨率存在的坡度变缓效应导致其不能刻画这两个特殊部位的地面坡度。经模型转换后东胜村研究样区西北部 and 东南部的坡度值较转换前明显增加(图 6c—6d), 其与 5 m 分辨率坡度空间分布特征相似。对比线性和非线性坡度转换模型优化后的坡度空间分布, 发现两者的坡度空间分布特征基本一致, 仅在研究样区东南部经线性坡度转换模型优化后的地面坡度值大于非线性坡度转换模型优化后的坡度值; 且经非线性坡度转换模型优化后的坡度空间分布基本上与 5 m 分辨率坡度空间分布相似。

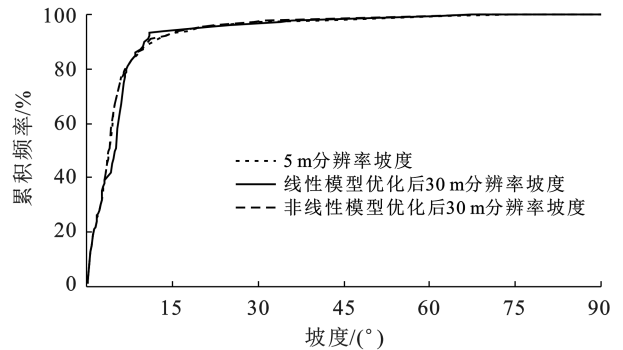


图 5 经模型转换后 30 m 与 5 m 分辨率的坡度累积频率对比
Fig.5 Comparison of slope gradient cumulative frequency between 30 and 5 m resolutions after model conversion

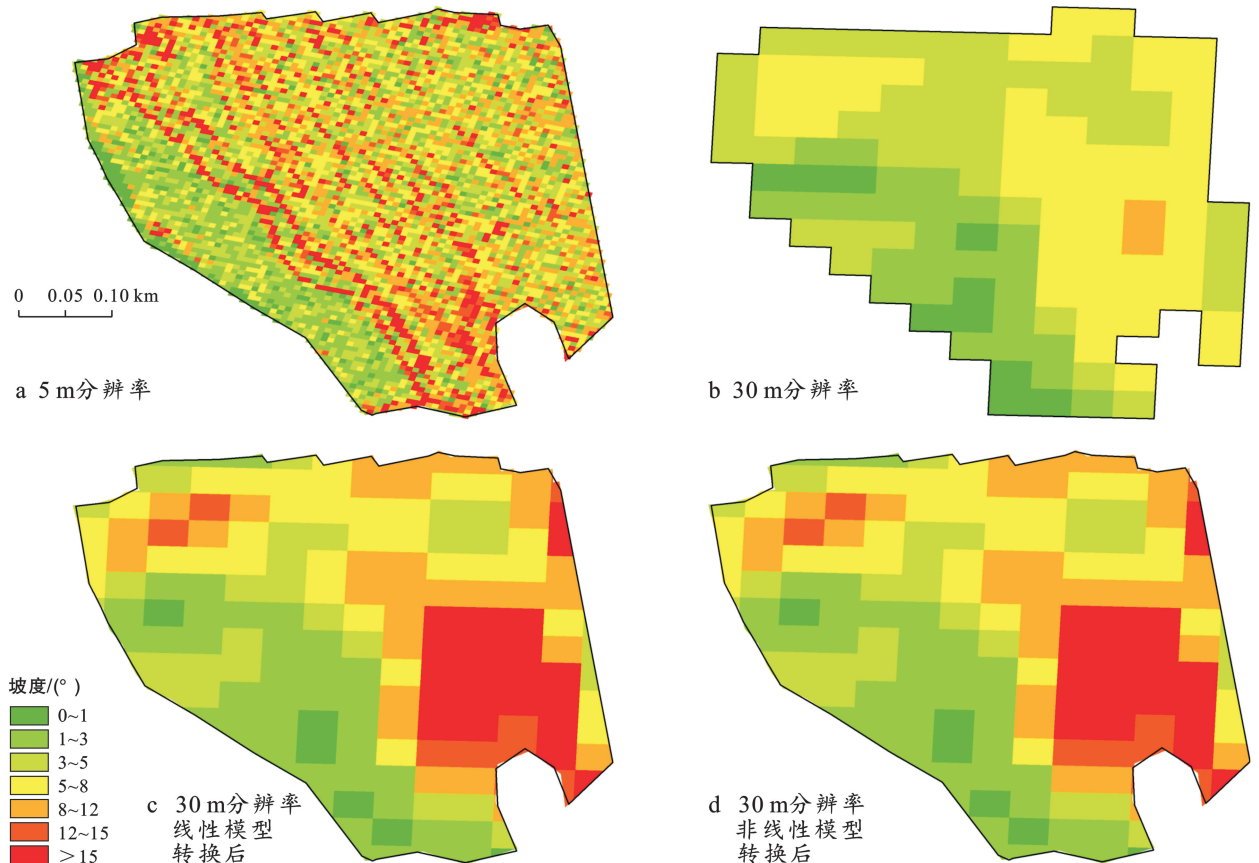


图 6 经模型转换前后 30 m 与 5 m 分辨率的坡度空间分布对比

Fig.6 Comparison of slope gradient distribution between 30 m and 5 m resolutions before and after model conversions

2.3.2 坡度转换模型验证

(1) 坡度分布频率对比。为了进一步分析坡度转换模型的优化效果,利用克山县新安村研究样区的无人机航测获取的 DEM 数据,对 30 与 5 m 分辨率 DEM 的坡度转换模型进行验证(表 5—6)。结果表明,新安村 30 m 分辨率 DEM 提取的坡度平均值和最大值与 5 m 分辨率的差异很小,其值分别为 3.45° 和 3.75°;而其他坡度统计特征参数(最小值、最大值和标准差)均存在较大差异。而通过线性和非线性两种坡度转换模型优化后,获得的坡度最小值、最大值、平均值和标准差均与 5 m 分辨率 DEM 提取的坡度值相近,说明坡度转换后的地面坡度更能够真实反映地表坡度特征。

表 5 模型转换前后的坡度特征

Table 5 Slope gradient features before and after model conversion

统计参数	5 m 分辨率的坡度	30 m 分辨率的坡度		
		模型转换前	线性模型转换后	非线性模型转换后
最小值/(°)	0.00	0.34	0.17	0.19
最大值/(°)	71.64	7.45	56.22	63.22
平均值/(°)	3.45	3.75	3.87	3.61
标准差	3.61	1.54	3.61	3.44

对于克山县新安村研究样区,30 m 分辨率 DEM 提取的各级坡度 $\leq 1^\circ$, $(1^\circ, 3^\circ]$, $(3^\circ, 5^\circ]$, $(5^\circ, 8^\circ]$, $(8^\circ, 12^\circ]$, $(12^\circ, 15^\circ]$ 和 $>15^\circ$ 分布频率分别为 2.81%, 31.87%, 44.98%, 20.34%, 0%, 0% 和 0%(图 6);而 5 m 分辨率 DEM 提取的各级坡度分布频率则分别为 7.09%, 45.45%, 35.25%, 6.75%, 2.28%, 1.08% 和 2.11%, 此结果表明 30 和 5 m 分辨率 DEM 提取的坡度分布频率存在较大差异。但经线性坡度转换模型优化后,30 m 分辨率 DEM 提取的各级坡度分布频率分别为 7.46%, 45.77%, 15.28%, 25.47%, 3.16%, 0.73% 和 2.13%, 经非线性坡度转换模型优化后对应的各级坡度分布频率分别为 7.46%, 45.77%, 29.43%, 11.32%, 2.43%, 0.73% 和 2.87%, 说明经模型优化后的各级坡度分布频率与 5 m 分辨率 DEM 提取的各级坡度分布频率基本相同,克服了 30 m 分辨率 DEM 无法准确反映地面起伏的局限性,并还原了真实的地面坡度特征。

从图 7 还可以看出,在不同坡度分级范围内经线性和非线性坡度转换模型优化后的各级坡度分布频率仍存在一定差异。在 $\leq 3^\circ$ 和 $>8^\circ$ 坡度范围内,线性模型和非线性模型优化后的坡度分布频率基本一致。但在 $(3^\circ, 5^\circ]$ 坡度范围内,非线性坡度转换模型优化后

的分布频率明显大于线性坡度转换模型优化后的结果;而在 $(5^\circ, 8^\circ]$ 坡度范围内,线性坡度转换模型优化后的分布频率明显大于非线性坡度转换模型优化后的结果。总体上非线性坡度转换模型优化的结果好于线性坡度转换模型优化后的结果。

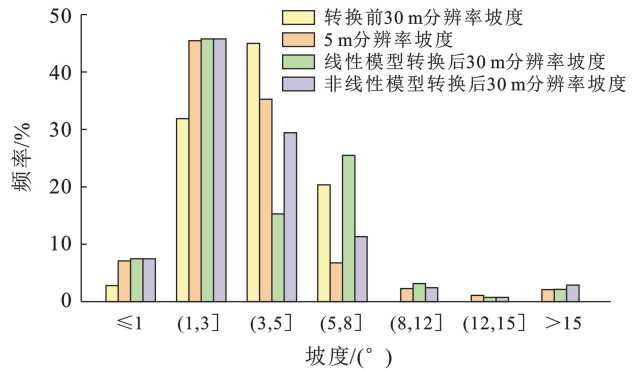


图 7 基于模型转换前后的 30 m 和 5 m 分辨率的坡度频率对比
Fig.7 Comparison of slope gradient frequency between 30 m and 5 m resolution before and after the model conversions

(2) 模型优化效果评价。这里基于经模型优化前后 30 与 5m 分辨率的坡度数据,采用协方差、相关系数、均方根误差和图像逼真度对坡度转换模型的优化效果进行评价(表 6)。结果表明,模型优化前 30 与 5 m 分辨率坡度之间的协方差、相关系数、均方根误差和图像逼真度分别为 0.3, 0.13, 4.08 和 0.69;而经线性和非线性坡度转换模型优化后,其协方差、相关系数、均方根误差和图像逼真度均较模型优化前有所增加。其中,协方差分别达到 0.55 和 0.63, 相关系数分别为 0.25 和 0.28, 图像逼真度分别为 0.75 和 0.86。

表 6 坡度转换模型优化前后与 5 m 分辨率坡度之间的相关分析
Table 6 Correlation analysis on slope gradient before and after two model conversion with 5 m resolution

30 m 分辨率坡度	评价指标			
	协方差	相关系数	均方根误差	图像逼真度
模型优化前	0.30	0.13	4.08	0.69
线性模型优化后	0.55	0.25	5.33	0.75
非线性模型优化后	0.63	0.28	5.19	0.86

以上结果说明,经模型优化后坡度的平均误差和图像误差均大幅度减小,即经线性和非线性坡度转换模型优化后的地面坡度特征得到了很好反映。均方根误差分别增加为 5.33 和 5.19, 这表明优化后的坡度在特定空间位置上还存在着精度缺陷。从表 6 还可以看出,与坡度分布频率相似,非线性坡度转换模型优化效果较线性模型更能反映地面坡度的真实情况。

3 讨论

本研究通过 1, 5, 12.5, 30 m 与 5 cm 分辨率坡度特征的对比分析发现,随着 DEM 分辨率的降低,地面坡度的标准差也随之降低。这与师动等^[20]、杨颖楠等^[21]的研究结果一致。但 30 m 分辨率 DEM 提取的坡度平均值增大,这是因为随着 DEM 分辨率的粗化,所提取的坡度平均值有所升高^[22]。Chen Xue 等^[23]分析了三种不同分辨率 DEM 对地形的刻画能力,结果也表明随着 DEM 分辨率的降低,累积频率曲线峰值向低坡度区域移动,即表现出不同程度的坡度降低特征。本研究发现,30 m 和 5 cm 分辨率 DEM 提取的各级坡度分布频率、最大值、最小值、平均值和标准差均存在较大差异,这表明在东北漫川漫岗区采用目前可免费下载的 30 m 分辨率 DEM 提取的地面坡度不能准确地反映地面起伏情况。本研究通过对比不同分辨率 DEM 提取的坡度特征,发现 5 m 与 5 cm 分辨率 DEM 提取的坡度分布特征相似,且 5 m 分辨率 DEM 与 1:10 000 比例尺地形图的分辨率相对应,据此本研究将 5 m 作为最佳 DEM 分辨率,构建了 30 与 5 m 分辨率 DEM 之间的坡度转换模型。张永红等^[24]研究表明,5 m 分辨率 DEM 的地表粗糙度显著大于 30 m 的地表粗糙度,这说明 5 m 分辨率 DEM 在很大程度上能够准确刻画地面起伏。汤国安等^[25]研究了栅格分辨率及地形粗糙度对 DEM 所提取的地面平均坡度精度的影响,认为 5 m 分辨率 DEM 是描述研究区地形起伏的最佳分辨率,且以往的研究也表明^[26],1:10 000 比例尺地形图可以满足土壤侵蚀预测的高精度要求。

胡云华等^[27]研究表明,通过直方图匹配法可以很好地还原地形粗糙程度。因此,本研究通过直方图匹配法分坡度段建立了 30 与 5 m 分辨率之间的坡度转换模型,结果表明当地面坡度在 7°以下时,线性与非线性坡度转换模型拟合效果差异较小,然而当地面坡度大于 7°时,非线性坡度转换模型的拟合效果明显优于线性坡度转换模型。发生此现象的原因是 30 与 5 m 分辨率之间坡度—累积频率曲线在 7°存在“突变点”(图 3),当地面坡度小于 7°时二者呈线性关系,而当地面坡度大于 7°时二者呈非线性关系。本研究还表明两种坡度转换模型的优化效果良好,协方差、相关系数和图像逼真度分别提高了 83.3%, 92.3% 和 8.7% 以上,且非线性坡度转换模型较线性模型的优化效果更好。但均方根误差升高了 30.6% 以上,表明在某些特定位置上还存在着精度缺陷^[28]。

本研究建立了 30 与 5 m 分辨率之间的坡度转换

模型,完成了由低分辨率向高分辨率坡度的转换,实现了对地面坡度的真实表达,削弱了因中、低 DEM 分辨率导致的黑土区长缓坡地形的坡度变缓效应,很大程度上还原了原有地表的起伏与粗糙程度。同时,通过构建低分辨率与高分辨率之间的坡度转换模型,有效地降低了获取无人机高分辨率影像的高额成本,提供了更为精确的坡度数据,为东北漫川漫岗区土壤侵蚀定量评价提供了数据支持。

另外,Wang Chunmei 等^[16]研究表明在较大的起伏山区,与 5 m 分辨率相比,30 m 分辨率的坡度坡长因子(*LS*)通常被高估了 20% 以上,而在低起伏地区被低估了 15% 以上。本研究仅建立了地形起伏变化较小的东北漫川漫岗区低分辨率 DEM 与高分辨率 DEM 之间的坡度转换模型,而地形起伏变化较大的东北低山丘陵区低—高分辨率 DEM 之间的坡度转换模型还有待于进一步研究。

4 结论

(1) 本研究通过分析对比东胜村研究样区不同分辨率 DEM(5 cm, 1, 5, 12.5 和 30 m)提取的坡度信息,发现 1 和 5 m 分辨率坡度分布频率与 5 cm 分辨率坡度分布频率具有较强的相似性,且 5 m 分辨率与 1:10 000 比例尺地形图的分辨率相对应,据此确定了研究区 DEM 提取坡度的最佳分辨率为 5 m。

(2) 基于直方图匹配法分坡度段建立了研究区 30 与 5 m 分辨率之间的线性和非线性的坡度转换模型,发现当地面坡度小于 7°时,线性和非线性坡度转换模型的 R^2 均大于 0.97,误差平方和(SSE)均小于 1,说明线性和非线性坡度转换模型优化效果均良好;而当地面坡度大于 7°时,线性和非线性模型的 SSE 分别为 95.21 和 0.25,说明非线性坡度转换模型较线性坡度转换模型的优化效果更佳。

(3) 线性和非线性坡度转换模型的验证结果表明,经模型优化后的坡度分布频率与 5 m 分辨率的坡度分布频率基本相似,均能够真实反映地面坡度特征。模型优化后的 30 与 5 m 分辨率坡度之间的协方差、相关系数和图像逼真度分别提高了 83.3%, 92.3% 和 8.7% 以上,且非线性坡度转换模型较线性坡度转换模型的优化效果更好。

参考文献 (References)

- [1] Lu Shaojuan, Liu Baoyuan, Hu Yaxian, et al. Soil erosion topographic factor (*LS*): Accuracy calculated from different data sources [J]. *Catena*, 2020, 187: 104334.
- [2] 杨维鸽, 郑粉莉, 王占礼, 等. 地形对黑土区典型坡面侵蚀—沉积空间分布特征的影响 [J]. *土壤学报*, 2016, 53

- (3):572-581.
- Yang Weige, Zheng Fenli, Wang Zhanli, et al. Effects of topography on spatial distribution of soil erosion and deposition on hillslope in the typical of black soil region [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016,53(3):572-581.
- [3] 张晓平, 梁爱珍, 申艳, 等. 东北黑土水土流失特点[J]. *地理科学*, 2006,26(6):687-692.
- Zhang Xiaoping, Liang Aizhen, Shen Yan, et al. Erosion characteristics of black soils in Northeast China [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2006,26(6):687-692.
- [4] An Juan, Zheng Fenli, Wang Bin. Using ^{137}Cs technique to investigate the spatial distribution of erosion and deposition regimes for a small catchment in the black soil region, Northeast China [J]. *Catena*, 2014,123:243-251.
- [5] 蔡清华, 杨勤科. SRTM 与地形图生成 DEM 的地形表达能力对比[J]. *水土保持通报*, 2009,29(3):183-187.
- Cai Qinghua, Yang Qinke. Comparison of terrain representation of SRTM and topographic derived DEMs [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2009,29(3):183-187.
- [6] 土祥, 王春梅, 庞国伟, 等. 黄土丘陵沟壑区坡度尺度效应空间分异分析[J]. *山地学报*, 2018,36(6):964-972.
- Tu Xiang, Wang Chunmei, Pang Guowei, et al. On the spatial differentiation of scale effect of slopes in loess hill and gully region, China [J]. *Mountain Research*, 2018,36(6):964-972.
- [7] Grohmann C H. Effects of spatial resolution on slope and aspect derivation for regional-scale analysis [J]. *Computers & Geosciences*, 2015,77:111-117.
- [8] 罗为东, 甘淑, 袁希平, 等. 基于 UAV 高分辨率 DEM 的复杂微地貌形态特征分析:以恐龙谷南缘山区为例[J]. *中国水土保持科学*, 2022,20(5):109-117.
- Luo Weidong, Gan Shu, Yuan Xiping, et al. Morphological characterization of complex micro-landscapes based on UAV high-resolution DEM: Take the mountainous area on the southern rim of Dinosaur Valley as an example [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2022,20(5):109-117.
- [9] Altunel A O, Okolie C J, Kurtipek A. Capturing the level of progress in vertical accuracy achieved by ASTER GDEM since the beginning: Turkish and Nigerian examples [J]. *Geocarto International*, 2022,37(26):12073-12095.
- [10] Munoth P, Goyal R. Effects of DEM source, spatial resolution and drainage area threshold values on hydrological modeling [J]. *Water Resources Management*, 2019,33(9):3303-3319.
- [11] 汤国安, 杨勤科, 张勇, 等. 不同比例尺 DEM 提取地面坡度的精度研究:以在黄土丘陵沟壑区的试验为例[J]. *水土保持通报*, 2001,21(1):53-56.
- Tang Guoan, Yang Qinke, Zhang Yong, et al. Research on accuracy of slope derived from DEMs of different map scales [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2001,21(1):53-56.
- [12] 刘飞, 范建容, 崔兆岩, 等. 基于 DEM 分形特征的坡度尺度变换模型[J]. *山地学报*, 2019,37(1):129-136.
- Liu Fei, Fan Jianrong, Cui Zhaoyan, et al. A model of re-scaling slope based on DEM fractal feature [J]. *Mountain Research*, 2019,37(1):129-136.
- [13] Zhang Xiaoyang, Drake N A, Wainwright J, et al. Comparison of slope estimates from low resolution DEMs: Scaling issues and a fractal method for their solution [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1999,24(9):763-779.
- [14] Yang Qinke, Jupp D, Li Rui, et al. Re-scaling lower resolution slope by histogram matching [M]// *Lecture Notes in Geoinformation and Cartography*. Berlin & Heidelberg, Germany: Springer, 2008.
- [15] Jou F D, Fan K C, Chang Yanglang. Efficient matching of large-size histograms [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2004,25(3):277-286.
- [16] Wang Chunmei, Shan Linxin, Liu Xin, et al. Impacts of horizontal resolution and downscaling on the USLE *LS* factor for different terrains [J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2020,8(4):363-372.
- [17] 汤国安, 张友顺, 刘咏梅. 遥感数字图像处理 [M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- Tang Guoan, Zhang Youshun, Liu Yongmei. *Remote sensing digital image processing* [M]. Beijing: China Science Press, 2004.
- [18] 张莽, 张艳梅, 蒙印. 基于直方图匹配的多源遥感影像匀色研究[J]. *地理空间信息*, 2020,18(12):54-57.
- Zhang Qiao, Zhang Yanmei, Meng Yin. Research on color uniforming for multi-source remote sensing images based on histogram matching method [J]. *Geospatial Information*, 2020,18(12):54-57.
- [19] 王琦, 杨勤科, 任宗萍. 中尺度流域 NDVI 尺度转换研究[J]. *水土保持通报*, 2010,30(3):96-99.
- Wang Qi, Yang Qinke, Ren Zongping. Scaling of ETM-NDVI for medium watershed area [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2010,30(3):96-99.
- [20] 师动, 朱奇峰, 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.
- [21] 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 differences of Yongshou County based on different resolutions of DEM [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2018, 25(6):131-136.
- [22] 陈楠. DEM 分辨率与平均坡度的关系分析[J]. *地球信息科学学报*, 2014, 16(4):524-530.
- Chen Nan. Relationship between DEM resolution and average slope derived from DEM [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2014, 16(4):524-530.
- [23] Chen Xue, Chen Guokun, Feng Junxin, et al. Slope scaling effect and slope-conversion-atlas for typical water erosion regions in China [J]. *Sustainability*, 2023, 15(4):3789.
- [24] 张永红, 黄付强, 程华, 等. 两种分辨率 DEM 在不同空间尺度下的差异: 以黄土高原丘陵区为例[J]. *西部林业科学*, 2020, 49(4):54-59, 67.
- Zhang Yonghong, Huang Fuqiang, Cheng Hua, et al. Difference of the two kinds of resolution DEM at different spatial scales: A case of hilly region in Loess Plateau [J]. *Journal of West China Forestry Science*, 2020, 49(4):54-59, 67.
- [25] 汤国安, 赵牡丹, 李天文, 等. DEM 提取黄土高原地面坡度的不确定性[J]. *地理学报*, 2003, 58(6):824-830.
- Tang Guoan, Zhao Mudan, Li Tianwen, et al. Modeling slope uncertainty derived from DEMs in Loess Plateau [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(6):824-830.
- [26] Wang Shuyuan, Zhu Xiaoli, Zhang Wenbo, et al. Effect of different topographic data sources on soil loss estimation for a mountainous watershed in Northern China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(20):1382.
- [27] 胡云华, 贺秀斌, 毕景芝. 直方图匹配算法进行坡度变换的精度评价[J]. *水土保持研究*, 2013, 20(6):97-101.
- Hu Yunhua, He Xiubin, Bi Jingzhi. Assessment on the accuracy of the histogram matching algorithm for slope correction [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2013, 20(6):97-101.
- [28] 李发源, 汤国安, 贾旖旎, 等. 坡谱信息熵尺度效应及空间分异[J]. *地球信息科学*, 2007, 9(4):13-18.
- Li Fayuan, Tang Guoan, Jia Yini, et al. Scale effect and spatial distribution of slope spectrum's information entropy [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2007, 9(4):13-18.

(上接第 148 页)

- [24] 武磊, 高祖桥, 谢旭红, 等. 甘肃省黄河流域土壤侵蚀及其驱动机制[J]. *水土保持通报*, 2024, 44(3):221-230.
- Wu Lei, Gao Zuqiao, Xie Xuhong, et al. Soil erosion and its driving mechanism in tributary basins of Yellow River in Gansu Province [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2024, 44(3):221-230.
- [25] 石学瑾, 张彪, 郭家龙, 等. 黄土高原典型小流域土壤侵蚀时空演变[J]. *地理学报*, 2024, 79(7):1787-1803.
- Shi Xuejin, Zhang Biao, Guo Jialong, et al. Spatial-temporal evolution of soil erosion in a typical watershed of the Loess Plateau [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2024, 79(7):1787-1803.
- [26] 张慧雯, 赵燕, 陈怡平. 近 40 年来黄土高原植被变化趋势及其生态效应[J]. *地球科学与环境学报*, 2023, 45(4):881-894.
- Zhang Huiwen, Zhao Yan, Chen Yiping. Vegetation trends and ecological effects on the Loess Plateau, China in the last forty years [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2023, 45(4):881-894.
- [27] 王榕华, 信忠保, 梁潇瑜. 植被和梯田对黄土高原小流域泥沙连通性的影响[J]. *生态学报*, 2023, 43(9):3756-3765.
- Wang Ronghua, Xin Zhongbao, Liang Xiaoyu. Effects of terrace and vegetation on sediment connectivity in a small watershed on the Loess Plateau [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(9):3756-3765.
- [28] 段菊卿, 柏跃勤, 王英顺. 黄土高原小流域侵蚀模数的确定方法[J]. *中国水土保持*, 2009(8):32-34.
- Duan Juqing, Bai Yueqin, Wang Yingshun. Determination methods of erosion modulus in small watersheds of Loess Plateau [J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2009(8):32-34.