

# 水土流失分析的地形因子尺度效应

## ——以安徽大别山区为例

孙雯杰<sup>1,2</sup>, 杨 昕<sup>1</sup>

(1. 南京师范大学 地理科学学院, 江苏 南京 210000; 2. 安徽师范大学 地理与旅游学院, 安徽 芜湖 241000)

[关键词] 尺度效应; DEM; 水土流失; 地形因子; 安徽大别山区

[摘 要] 不同尺度下提取水土流失地形因子 DEM 数据及分析其效应存在较大差异。基于安徽大别山境内霍山县 ALOS/PALSAR DEM 数据, 通过双线性内插法生成多尺度 DEM 数据, 选取地形起伏度、地表粗糙度、地表切割深度、高程变异系数作为区域水土流失地形因子, 定量探讨 DEM 分辨率对水土流失地形因子的影响。结果表明: ①随 DEM 空间尺度的增大, 4 项地形因子的均值呈下降趋势(对高程变异系数影响较小), 整体频率占比偏向较低值, 大尺度 DEM 对地表形态模拟已经严重“失真”; ②DEM 分辨率对地形因子影响从大到小的顺序为地形起伏度>地表切割深度>高程变异系数>地表粗糙度; ③经相关性分析发现, 地形起伏度和地表切割深度符合线性函数递减模型, 地表切割深度和高程变异系数符合三次函数递减模型。

[中图分类号] S157 [文献标识码] A [文章编号] 1000-0941(2023)07-0050-06

DOI:10.14123/j.cnki.swcc.2023.0150

近年来, 随着人口剧增和经济快速发展, 水土流失问题已引起世界各国和社会各界的广泛关注。据《2020 年中国水土保持公报》<sup>[1]</sup> 显示, 全国共有水土流失面积 269.27 万 km<sup>2</sup>, 占全国总面积的 28.05%。经统计, 我国现有严重水土流失县 646 个, 其中 76% 的贫困县和 74% 的贫困人口生活在水土流失区<sup>[2]</sup>。水土流失与贫困之间相互影响、互为因果, 经济贫困区往往也遭受严重的水土流失。安徽大别山区是我国典型的集山区、贫困区、水土流失严重区于一体的地区, 处于全国重点关注水土流失区域的长江经济带, 严重的水土流失制约着当地生态环境及经济社会发展<sup>[3]</sup>。

水土流失是地形、气候、植被、土壤、人为等因素综合影响的结果, 其中地形是影响水土流失和地表径流的重要因素<sup>[4]</sup>。随着信息技术发展, DEM 已成为地理信息系统和遥感技术中最为重要的空间信息资料。同时, 利用 DEM 提取地形因子被广泛视为一种快捷有效的方法<sup>[5]</sup>。然而, DEM 具有强烈的尺度效应特征, 分辨率大小决定了 DEM 自身所包含的信息量以及 DEM 对地形描述的精度, 不同尺度 DEM 提取的地形因子将会影响提取结果的精确性。

为此, 越来越多的学者围绕水土流失地形因子和尺度效应问题开展研究。对于水土流失地形因子问题, 前人根据空间尺度大小不同将其分成三种研究尺度, 即坡面(<5 km<sup>2</sup>)、小流域(5~30 km<sup>2</sup>)和区域(>30 km<sup>2</sup>)。目前国内外对于水土流失评价和趋势预测研究提出了不同土壤侵蚀模型, 如美国的通用土壤流失方程 USLE<sup>[6]</sup>及其修正版 RUSLE<sup>[7]</sup>、荷兰土壤侵蚀预报模型 LISEM<sup>[8]</sup>、中国土壤流失方程 CSLE<sup>[9]</sup>等。以上

模型皆基于坡面、小流域尺度<sup>[10]</sup>, 而对区域尺度下的土壤流失模型现还未形成一套完善的指标体系。对地形因子尺度效应的研究, 具体可以分为两个方面: 一是针对 DEM 尺度对地形表达的精度影响, 汤国安等<sup>[11-12]</sup>从分辨率角度, 建立了 DEM 分辨率与 DEM 地形描述误差间的线性关系; 二是针对 DEM 尺度对地形分析、地学模型的影响, 赵斯琦等<sup>[13-15]</sup>研究了 DEM 尺度与研究区地形因子间的回归关系, 并探究出研究区内尺度效应的相应特征及规律。然而, 虽然有不少学者对区域水土流失地形因子的尺度效应进行研究<sup>[14, 16-20]</sup>, 但大多是聚焦于黄土高原地区, 而安徽大别山区同样作为水土流失高发区之一, 却鲜有人进行研究。

本研究以安徽大别山区内的霍山县为研究对象, 提取不同尺度下霍山县的区域水土流失地形因子, 以探讨在安徽大别山区内使用不同分辨率 DEM 对水土流失地形因子产生的尺度效应。通过量化水土流失地形因子与 DEM 分辨率之间的关系, 剖析各因子受 DEM 的影响程度, 以期降低 DEM 尺度效应对土壤侵蚀预测产生的负面影响, 为区域土壤侵蚀模型的建立提供必要的参考依据。

### 1 研究区概况

霍山县位于大别山腹地、淮河支流淠河上游, 隶属六安市, 地处皖、鄂交界处, 地理位置为东经 115°52′~116°32′、北纬 31°03′~31°33′, 总面积 2 044 km<sup>2</sup>, 平均海拔 885 m(见图 1)。地势由东南向西北倾斜, 构成丘陵岗地、低山、中山三种类型, 地形起伏差异大。水系

发达,径流资源丰富,为安徽省暴雨中心区之一,水土流失严重,以水力侵蚀为主。根据安徽省水利厅《2020 安徽省水土保持监测公报》<sup>[21]</sup>,2020 年霍山县水土流失总面积共 545.48 km<sup>2</sup>,占县域总面积的 26.69%,其中轻度水土流失面积 541.71 km<sup>2</sup>,中度水土流失面积 2.00 km<sup>2</sup>,强烈水土流失面积 1.08 km<sup>2</sup>,极强烈水土流失面积 0.45 km<sup>2</sup>,剧烈水土流失面积 0.24 km<sup>2</sup>。作为安徽大别山境内严重水土流失区之一,选取霍山县作为研究对象具有一定典型性。

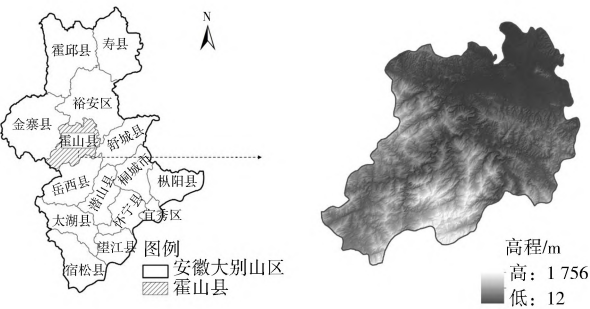


图 1 研究区位置及 DEM

2 研究方法与数据处理

2.1 数据来源

本研究采用双线性内插法,将输出栅格数据集的像元中心位置定位到输入栅格后,通过周围邻近的 4 个像元中心距离及其值计算加权平均值求得像元中心位置数据。使用的 12.5 m 分辨率地形数据来源于 ASF DAAC (<https://search.asf.alaska.edu>) 提供的 ALOS/PALSAR 数据。在 ArcGIS 10.2 中对下载好的栅格影像进行拼接、裁剪、投影等预处理,最终得到 12.5 m×12.5 m 研究区 DEM 数据,之后重采样生成多尺度 DEM,重采样后数据由原始数据所决定,并不会更改输入像元的值。不同分辨率 DEM 数据参数见表 1。

表 1 不同分辨率 DEM 高程参数统计

分辨率	最小值	最大值	平均值	标准差
12.5	12	1 756	399.614	288.345
15.0	13	1 756	399.620	288.324
25.0	15	1 755	399.708	288.278
30.0	16	1 753	399.618	288.282
50.0	25	1 751	399.698	288.282
75.0	21	1 747	399.713	288.272
100.0	30	1 754	399.755	288.334
125.0	39	1 746	399.677	288.267
150.0	25	1 740	399.718	288.271
250.0	42	1 725	399.726	288.393
375.0	45	1 743	399.706	288.468

由表 1 可知:①随着 DEM 空间分辨率降低,高程

最小值整体升高,高程最大值整体降低,导致最大高程差减小,这表明 DEM 派生尺度的增大使得地表形态逐渐平滑,地貌细节被省略;②DEM 高程平均值和标准差变化很小,说明地貌整体形态未发生较大变化;③表中能够观察到 150.0 m 与 50.0 m 分辨率 DEM 最小值一致,75.0 m、150.0 m 的最小值分别低于 50.0 m、125.0 m 的最小值,100.0 m、375.0 m 的最大值分别高于 75.0 m、250.0 m 的最大值,因此在 DEM 高程整体变化为上升或下降时,也可能出现个别派生 DEM 高程值与整体趋势相反的情况。

2.2 水土流失地形因子选取

地形因子是指描述地表形态、能在 DEM 表面直接计算的参数或指标,水土流失地形因子是对水土流失形成明显影响且能在 DEM 表面直接或者间接提取的、可应用于水土流失定量评价的地形指标<sup>[4]</sup>。地形因子作为描述地形的参数,被分为宏观地形因子和微观地形因子,其中:宏观地形因子包括地形起伏度、地表粗糙度、地表切割深度、高程变异系数等;微观地形因子包括坡度、坡向、坡长、剖面曲率、平面曲率等<sup>[22]</sup>。目前土壤侵蚀预报模型大多选用坡度、坡长作为水土流失评价的地形指标,且以坡度作为土壤侵蚀评价的最佳地形指标。但是在区域性宏观尺度上,坡度作为微观地形指标仅有数学意义而没有地貌形态的意义。因此,结合前人对区域尺度水土流失地形因子选取的研究<sup>[18-19,23]</sup>,利用宏观地形因子代替坡度表达地表形态,本研究选择地形起伏度、地形粗糙度、地表切割深度、高程变异系数作为区域尺度水土流失地形因子指标。

地形起伏是导致水土流失的最直接因素<sup>[24]</sup>,而地形起伏度作为宏观地形因子,能够直观体现区域尺度地形起伏特征。地形起伏度是指在某一确定范围内最高点与最低点高程之差<sup>[25]</sup>。为保证各 DEM 尺度下分析窗口大小统一,12.5 m DEM 选择窗口 60×60,15.0 m DEM 选择窗口 50×50,25.0 m DEM 选择窗口 30×30,30.0 m DEM 选择窗口 25×25,50.0 m DEM 选择窗口 15×15,75.0 m DEM 选择窗口 10×10,100.0 m DEM 选择窗口 7×7,125.0 m DEM 选择窗口 6×6,150.0 m DEM 选择窗口 5×5,250.0 m DEM 选择窗口 3×3,375.0 m DEM 选择窗口 2×2。利用 ArcGIS 邻域分析中的焦点统计工具,统计类型选择 Range,能够计算不同分辨率不同分析窗口下的地形起伏度。

地表粗糙度能够反映地表起伏变化及侵蚀程度,在区域性水土保持和环境监测上有着重要作用<sup>[13]</sup>。地表粗糙度被定义为地表单元的曲面面积与其水平投影面积之比,计算地表粗糙度的公式为

$$R = 1/\cos S \tag{1}$$

式中:  $R$  为地表粗糙度;  $S$  为坡度(需进行弧度制-角度制转换), 单位( $^{\circ}$ )。

地表切割深度是研究土壤侵蚀和地表侵蚀发育状况的重要宏观地形指标, 它能够直观、定量地反映地表侵蚀切割情况。地表切割深度指在一定区域范围内的平均高程与该区域的最低高程之差。计算地表切割深度  $D_i$  的公式为

$$D_i = Z_{\text{mean}} - Z_{\text{min}} \quad (2)$$

式中:  $Z_{\text{mean}}$  为一定范围内平均高程, 单位 m;  $Z_{\text{min}}$  为一定范围内最小高程, 单位 m。

高程变异系数能够反映区域范围内各单元格网顶点高程的相对变化情况, 由单元格网顶点标准差与平均高程的比值来表示。在一定区域范围内, 高程变异系数越高, 地表高程变化与地形起伏频率变化越大, 土

壤破碎程度越高, 土壤侵蚀越严重, 故高程变异系数可以作为反映区域地形变化频率指标。计算高程变异系数  $V$  的公式为

$$V = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (z_k - z)^2 / z} \quad (3)$$

式中:  $n$  为单元格网顶点数目, 单位个;  $z_k$  为第  $k$  个格网高程值, 单位 m;  $z$  为平均高程, 单位 m。

### 3 结果与分析

表 2 为不同分辨率 DEM 水土流失地形因子参数统计。由表 2 可知, 随着 DEM 分辨率降低, 地形起伏度、地表粗糙度、地表切割深度、高程变异系数等因子呈现不同变化情况。

1) 随着 DEM 分辨率降低, 地形起伏度变幅、平均

表 2 不同分辨率 DEM 水土流失地形因子参数统计

DEM 分辨率/m	地形起伏度/m			地表粗糙度			地表切割深度/m			高程变异系数		
	变幅	平均值	标准差	变幅	平均值	标准差	变幅	平均值	标准差	变幅	平均值	标准差
12.5	0~692	180.529	99.838	1~4.327	1.067	7.285	0~415.378	82.498	52.606	0~0.498	0.119	6.194
15.0	0~689	179.739	99.544	1~3.833	1.065	7.056	0~413.427	82.160	52.424	0~0.498	0.119	6.187
25.0	0~684	177.533	98.616	1~2.821	1.061	6.547	0~408.999	81.244	51.838	0~0.497	0.119	6.174
30.0	0~684	176.645	98.207	1~2.589	1.060	6.344	0~406.928	80.862	51.582	0~0.498	0.119	6.178
50.0	0~674	172.107	96.253	1~2.008	1.052	5.540	0~396.098	78.980	50.376	0~0.498	0.119	6.161
75.0	0~654	166.163	93.76	1~1.628	1.043	4.812	0~380.210	76.543	48.868	0~0.497	0.118	6.175
100.0	0~615	151.586	86.387	1~1.541	1.037	4.250	0~340.245	70.381	44.828	0~0.489	0.114	5.996
125.0	0~630	153.816	88.478	1~1.406	1.032	3.787	0~352.333	71.439	45.725	0~0.501	0.118	6.175
150.0	0~614	147.627	85.756	1~1.386	1.028	3.410	0~340.680	68.836	44.156	0~0.492	0.117	6.194
250.0	0~557	122.093	74.820	1~1.268	1.019	2.411	0~298.889	57.954	38.186	0~0.500	0.113	6.260
375.0	0~442	90.599	60.950	1~1.174	1.013	1.717	0~219.750	44.039	31.140	0~0.524	0.103	6.457

值、标准差皆逐渐减小, 且都在 DEM 分辨率为 375.0 m 时达到最低值。根据中国陆地 1:100 万数字地貌制图规范<sup>[26]</sup>, 可以根据地形起伏度将地表形态划分为平原(<30 m)、丘陵(30~200 m)、小起伏山地(>200~≤500 m)、中起伏山地(>500~≤1 000 m)、大起伏山地(>1 000~≤2 500 m)和极大起伏山地(>2 500 m)。可以发现, 随着 DEM 分辨率从 12.5 m 降至 375.0 m, 地形起伏度平均值从 180.529 m 降至最低值 90.599 m, 平均降幅为 49.8%, 且其一直处于丘陵范围内。标准差的降低表明地形起伏度在均值附近的聚集程度提高, 数据越来越集中。DEM 分辨率降低, 使得 DEM 对地球表面概括程度提高, 地表形态更加平滑, 对地表真实起伏状态的反映能力减弱, 地形起伏度也随之降低。

2) 随着 DEM 分辨率降低, 地表粗糙度的三项变量同样处于不断下降状态。平均值由 1.067 降至 1.013, 降幅为 5.1%, 低于地形起伏度降幅(49.8%), 这说明 DEM 分辨率对地表粗糙度的影响小于地形起伏度。其中, 当 DEM 分辨率为 375.0 m 时, 变幅为 1~

1.174。地表粗糙度接近 1, 说明该区域内地表接近平地, 即表明此分辨率下对地表形态模拟已经失真。

3) 随着 DEM 分辨率降低, 地表切割深度最大值从 415.378 m 降至 219.750 m; 标准差降低; 平均值从 82.498 m 减少至 44.039 m, 降幅为 46.6%。说明 DEM 对地表切割深度的影响程度略小于地形起伏度, 但大于地表粗糙度。

4) 随着 DEM 分辨率降低, 高程变异系数整体变化不大。12.5 m 至 150.0 m DEM 分辨率内, 仅在 100.0 m、150.0 m 处发生了小幅度波动, 其变幅和平均值均稳定在小范围区间内。随着分辨率的继续降低, 变幅由 0~0.492 升至 0~0.524, 标准差由 6.194 升至 6.457, 这表明区域高程差异升高, 各邻近单位像元的高程值越来越离散, 与平均值集中度下降。但平均值却呈微下降趋势, 这是由于 DEM 分辨率的下降导致模拟地表更加平滑, 虽然各单元标志值离散度升高, 但是整体高程值在降低, 进而导致平均值下降。高程变异系数平均值降幅 13.4%, 大于地表粗糙度, 小于地形起伏度及地表切割深度。



根据定量分析结果进行方程拟合,利用 SPSS 得出拟合方程及决定系数,所得结果见图 2。以平均值作为主要研究指标,由图 2 可知,DEM 分辨率对四项水土流失地形因子均产生显著影响。地形起伏度和地

表切割深度拟合为线性函数,地表切割深度和高程变异系数拟合为三次函数,水土流失地形因子与 DEM 分辨率均呈现负相关关系,即 DEM 尺度越大,地形因子均值越低。

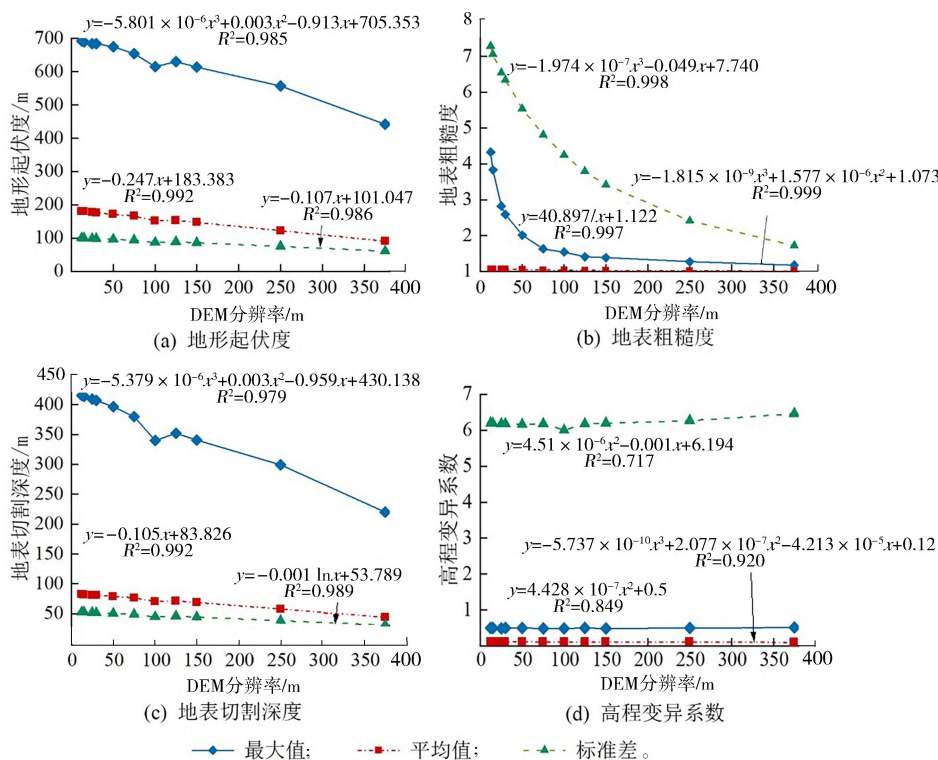


图 2 水土流失地形因子的 DEM 尺度效应

对多尺度 DEM 所提取的水土流失地形因子进行频率统计,所得结果见图 3。

由图 3(a)可知,随着 DEM 分辨率下降,地形起伏度逐渐向低值移动;375.0 m 分辨率 DEM 频率波动起伏较大,相对而言 12.5 m 分辨率 DEM 频率波动更加平滑;12.5~150.0 m 分辨率 DEM 地形起伏度频率折线趋势大体相同,250.0 m 和 375.0 m 则出现较大变化,且在 60.944 m 地形起伏度时,250.0 m 和 375.0 m 分辨率 DEM 频率明显高于其他分辨率 DEM。

由图 3(b)可知,随着 DEM 分辨率降低,地表粗糙度频率折线波动幅度逐渐减小,这表明 DEM 尺度对地表拟合具有平滑的作用;375.0 m 分辨率 DEM 在地表粗糙度 1~1.022 处的频率陡然升高,这也印证了前文 DEM 尺度增大,地表粗糙度不断接近 1 这一观点。综合表明,随着分辨率的降低,地表粗糙度占比逐渐偏向较低值,较大值占比降低,频率波动范围减少。

由图 3(c)可知,各分辨率 DEM 地表切割深度在 0~20 m 处均存在频率峰值,而 100.0 m 及以上分辨率 DEM 会在 20~200 m 处出现另一峰值,在图中呈现双驼峰形态。250.0 m 和 375.0 m DEM 频率折线波动幅度较大,其他尺度 DEM 则较平滑。随着 DEM 分辨率

降低,地表切割深度频率峰值逐渐向较低值倾斜,这表明随着分辨率降低,地表切割深度较低值占比升高,较高值占比降低。

由图 3(d)可知,各尺度 DEM 高程变异系数整体在 0 处频率值最高,之后呈现类似正态分布形态,且在 0.074 处达到频率顶峰,频率折线趋势也大体相同,不过随着 DEM 分辨率降低,高程变异系数频率波动逐渐变大。这说明 DEM 分辨率对高程变异系数整体变化趋势影响不大,但会导致其折线波动范围增大。

综合来看,随着 DEM 分辨率降低,4 项水土流失地形因子均增加较低值占比,降低较高值占比,整体变化折线向低值偏移,这是由于 DEM 尺度的增大使得地表细节被夷平,较高值被综合,故整体向坐标左侧移动;同时关于频率折线波动范围的变化,随着分辨率降低,地形起伏度、地表切割深度、高程变异系数变化范围增加,地表粗糙度变化范围减少。根据地形因子定义来看,地形起伏度、地表切割深度、高程变异系数均涉及某一确定范围内点的相对变化,由于 DEM 尺度增加,地表细节信息被概括,计算得出的地形因子值向区域平均值集中,而造成频率值的“两极化”,最终导致折线波动剧烈;而地表粗糙度是表示单元面积与其

投影面积之比,高分辨率 DEM 会对地表形态进行更加细致的拟合,低分辨率则会造成“失真”,折线也变得

更加光滑,且整体向 1 偏移。

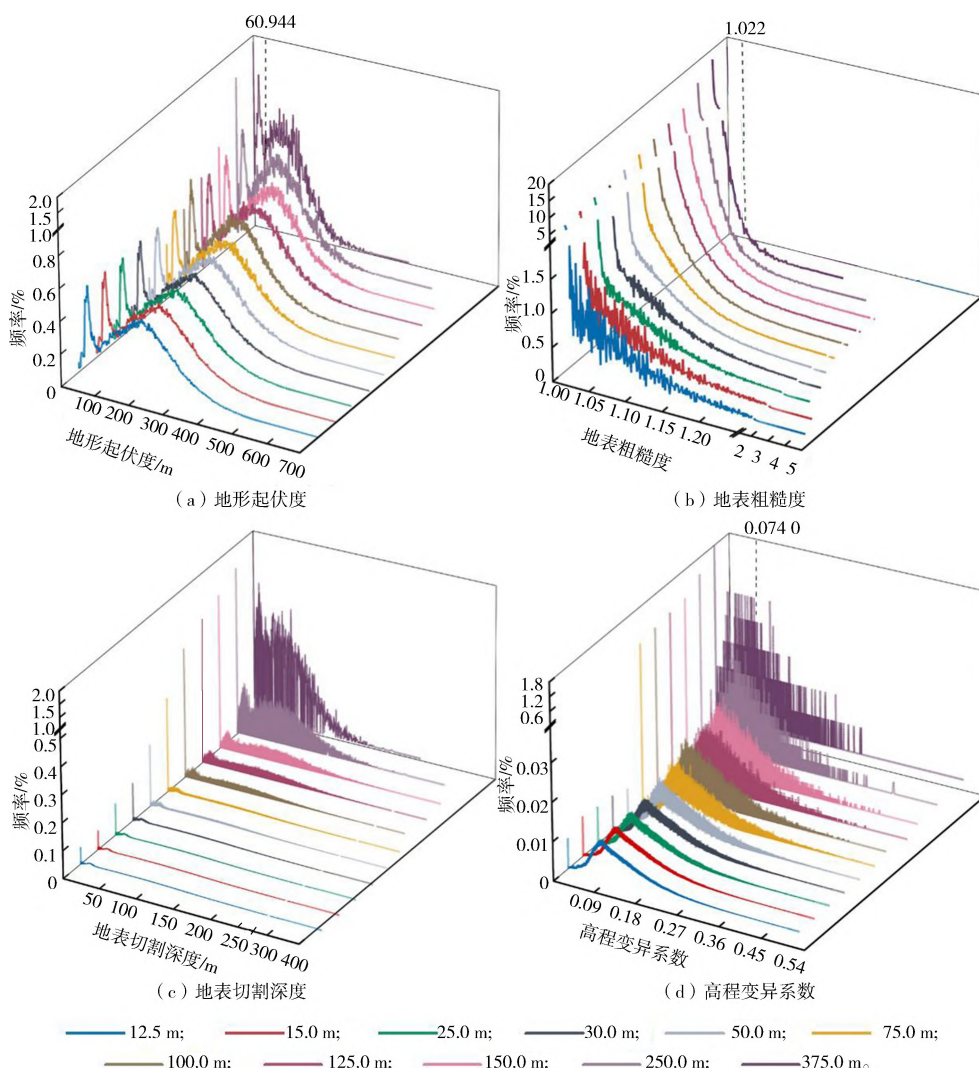


图 3 水土流失地形因子的频率统计

## 4 结论与讨论

### 4.1 结 论

本研究以安徽省霍山县作为研究对象,选取地形起伏度、地表粗糙度、地表切割深度、高程变异系数 4 项区域水土流失地形因子作为研究指标,围绕安徽大别山区水土流失地形因子尺度效应展开探讨,这是对安徽大别山区水土流失研究体系的有力补充,同时也能为区域土壤侵蚀模型建立提供必要的参考依据。研究的主要内容和结论如下:

1) 利用多尺度 DEM 作为试验依据,利用变幅、平均值、标准差 3 项指标对区域水土流失地形因子进行探究,随着 DEM 分辨率降低,地形起伏度变幅、平均值、标准差皆在逐渐减小,且始终处于丘陵范围内;地

表粗糙度、地表切割深度的 3 项指标同样在减小,其中地表粗糙度平均值逐渐接近 1,对地表的模拟已经严重失真;高程变异系数则变化不大,DEM 尺度对其影响程度较小。

2) 综合比较 DEM 尺度对 4 项水土流失地形因子平均值的影响,能够得出研究区内 DEM 分辨率对地形因子的影响大小为地形起伏度(49.8%)>地表切割深度(46.6%)>高程变异系数(13.4%)>地表粗糙度(5.1%)。

3) 得到了 4 项水土流失地形因子与 DEM 分辨率的拟合模型。以地形因子平均值为研究对象,地形起伏度和地表切割深度符合线性函数递减模型,地表切割深度和高程变异系数符合三次函数递减模型。

4) 随着 DEM 分辨率降低,地形起伏度较低值占比增加,较高值占比减少,频率波动范围增大;地表粗

糙度整体占比逐渐偏向 1, 较高值占比降低, 频率波动范围降低; 地表切割深度占比逐渐向较低值倾斜, 频率波动范围增大; DEM 分辨率对高程变异系数变化趋势影响不大, 频率波动范围增大。

#### 4.2 讨论

本研究着眼于县级尺度, 探究区域水土流失地形因子尺度效应, 为各县域水土流失环境治理提供一定参考。在计算地形因子过程中, 分析窗口的大小会对计算结果产生较大影响, 本研究通过确定统一的分析窗口大小, 一定程度上降低了误差, 提高了结果的精确度。当然, 本研究仍有许多方面需要进一步完善:

1) 本研究选取霍山县代表典型安徽大别山区作为研究对象, 所构建的拟合模型仅适用于霍山县。在今后的研究中, 可以选择多个县域进行综合分析, 得出各县域内的水土流失地形因子的尺度效应公式, 再根据各县域的拟合模型构建出适合整个安徽大别山区的统一模型。

2) 可以获取不同时间研究区的 DEM, 对安徽大别山区地表形态的演变轨迹进行剖析, 以验证模型的空间适用性, 且能够预测未来变化趋势。

3) 本研究仅选取了 4 项区域水土流失地形因子进行研究, 可以在未来选取更多其他的地形因子进行对比, 构建出更完善的区域水土流失地形因子体系。

#### 【参考文献】

- [1] 中华人民共和国水利部. 2020 年中国水土保持公报[R]. 北京: 中华人民共和国水利部, 2021: 1-38.
- [2] 鄂竟平. 中国水土流失与生态安全综合科学考察总结报告[J]. 中国水土保持, 2008(12): 3-7.
- [3] 史志刚. 皖西大别山区水土流失特征及其综合防治研究[J]. 水土保持研究, 2012, 19(5): 39-42.
- [4] 杨勤科, 赵牡丹, 刘咏梅, 等. DEM 与区域土壤侵蚀地形因子研究[J]. 地理信息世界, 2009, 7(1): 25-31, 45.
- [5] MOORE I D, GRAYSON R B, LADSON A R. Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological, and biological applications[J]. Hydrological Processes, 1991, 5(1): 3-30.
- [6] 彭双云, 杨昆, 洪亮, 等. 基于 USLE 模型的滇池流域土壤侵蚀时空演变分析[J]. 农业工程学报, 2018, 34(10): 138-146, 305.
- [7] 胡刚, 宋慧, 石星军, 等. 基于 RUSLE 的卧虎山水库流域土壤侵蚀特征分析[J]. 地理科学, 2018, 38(4): 610-617.
- [8] 杨勤科, 李锐. LISEM: 一个基于 GIS 的流域土壤流失预报模型[J]. 水土保持通报, 1998, 18(3): 82-89.
- [9] 陈锐银, 严冬春, 王安邦, 等. 基于 GIS/CSLE 的四川省水土流失重点防治区土壤侵蚀研究[J]. 水土保持学报, 2020, 34(1): 17-26.
- [10] 焦超卫, 赵牡丹, 曹颖. 区域水土流失地形因子的研究与展望[J]. 人民黄河, 2006, 28(4): 58-60.
- [11] 汤国安, 龚健雅, 陈正江, 等. 数字高程模型地形描述精度量化模拟研究[J]. 测绘学报, 2001, 30(4): 361-365.
- [12] 王光霞, 朱长青, 史文中, 等. 数字高程模型地形描述精度的研究[J]. 测绘学报, 2004, 33(2): 168-173.
- [13] 赵斯琦. 基于多尺度 DEM 的喀斯特地区土壤侵蚀地形因子研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2018: 21-38.
- [14] 代灵燕. 黄土高原严重水土流失区多尺度 DEM 地形因子分析[D]. 西安: 陕西师范大学, 2012: 28-49.
- [15] 王婷婷, 杨昕, 叶娟娟, 等. 不同尺度 DEM 的河流裂点提取及其效应分析[J]. 地球信息科学学报, 2014, 16(6): 882-889.
- [16] 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.
- [17] 林璐. 基于小波分析的多尺度 DEM 表达及地形分析效应研究[D]. 西安: 西北大学, 2008: 35-81.
- [18] 焦超卫. 基于 DEM 的 1: 50 000 区域尺度水土流失地形因子研究: 以黄土高原部分样区的实验为例[D]. 西安: 西北大学, 2006: 24-61.
- [19] 崔晨. 基于 DEM 的土壤侵蚀模型中地形因子的研究[D]. 西安: 西北大学, 2010: 53-64.
- [20] 李德辉. 基于不同分辨率 DEM 的地形因子提取的分析研究[J]. 测绘技术装备, 2021, 23(1): 1-5, 17.
- [21] 安徽省水利厅. 2020 安徽省水土保持公报[R]. 合肥: 安徽省水利厅, 2021: 39.
- [22] 汤国安, 杨昕. ArcGIS 地理信息系统空间分析实验教程[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 297-302.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 涂汉明, 刘振东. 中国地势起伏度最佳统计单元的求证[J]. 湖北大学学报(自然科学版), 1990, 12(3): 266-271.
- [26] 周成虎, 程维明, 钱金凯, 等. 中国陆地 1: 100 万数字地貌分类体系研究[J]. 地球信息科学学报, 2009, 11(6): 707-724.

收稿日期: 2022-08-24

第一作者: 孙雯杰(2002—), 女, 安徽淮南人, 硕士研究生, 研究方向为 DEM 与数字地形分析。

通信作者: 杨昕(1976—), 女, 陕西西安人, 教授, 博士, 主要从事地形分析研究工作。

E-mail: xxinyang@njnu.edu.cn

(责任编辑 杨傲秋)