

# 基于 DEM 的山西黄土高原面积高程积分研究

段宇英<sup>1</sup>, 汤 军<sup>1</sup>, 段宇雄<sup>2</sup>

(1.长江大学 地球科学学院, 武汉 430100; 2.山西华业土地矿产咨询有限公司, 太原 030001)

**摘 要:**面积高程积分(Hypsometric Integral, HI)是刻画流域地貌形态与发育阶段的重要地理指标。为了探究山西省黄土高原重点水土流失区的面积高程积分空间分异特征,以 30 m 分辨率的 SRTM 数据为基本信息源,采用积分曲线法计算研究区的面积高程积分值。研究工作首先分析了 DEM 分辨率与流域稳定面积对 HI 值的影响,然后进一步研究流域内各地貌对象高程积分值的相关性,最后得到研究区面积高程积分空间分布结果。结果表明:小流域面积高程积分受 DEM 分辨率的影响较小,面积高程积分趋于稳定的小流域面积阈值为 0.04 km<sup>2</sup>;研究区 HI 值相关性较强的地貌对象组合为山顶点—山脊线—沟谷网络;区域内面积高程积分值的地域差异性从北到南,表现出大—小—大的空间分布趋势。山西省黄土高原重点水土流失区的 HI 值整体处于 0.35~0.6,区域内流域基本处于发育的壮年期,表现为强烈的水系扩张分支,应加强水土保持工作的力度。

**关键词:**流域发育;面积高程积分;空间分异;山西黄土高原

中图分类号:P931.6

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)05-0081-06

## Area Elevation Integral in Shanxi Section of Loess Plateau Based on DEM

DUAN Yuying<sup>1</sup>, TANG Jun<sup>1</sup>, DUAN Yuxiong<sup>2</sup>

(1.School of Earth Sciences, Yangtze University, Wuhan 430100, China;

2.Shanxi Huaye Land and Mineral Resources Consulting Co., Ltd., Taiyuan 030001, China)

**Abstract:**Area elevation integral (Hypsometric Integral, HI) is an important geographical indicator to describe the landform morphology and development stage of a watershed. In order to explore the spatial differentiation characteristics of the area elevation integral in the key soil and water loss areas of the Loess Plateau in Shanxi, the integral curve method is used to calculate the area elevation integral value by taking the SRTM data of 30 m resolution as the basic information source. Firstly, the influence of DEM resolution and watershed stability area on HI value is analyzed. Then, the correlation of elevation integral values of various geomorphic objects in the watershed is further studied. Finally, the spatial distribution results of elevation integral are obtained. The results show that the small watershed area elevation integral is less affected by the DEM resolution, and the small watershed area threshold where the area elevation integral tends to stabilize is 0.04 km<sup>2</sup>. The combination of geomorphic objects with strong correlation are peak HI, ridge line HI and valley HI. The regional differences in area elevation integral values show a large-small-large spatial distribution trend from north to south. The HI value of the key soil and water loss areas in the Loess Plateau of Shanxi is between 0.35 and 0.6, and the watersheds in the region are basically in the periods of development and maturity, which is manifested as a strong branch of water system expansion. Soil and water conservation should be strengthened in the research area.

**Keywords:** watershed development; hypsometric integral; spatial variation; Loess Plateau in Shanxi

地貌参数能响应构造运动、岩性及气候的变化,面积高程积分值就是常用的地貌参数之一<sup>[1-5]</sup>。面积高程积分值在地貌学中的应用越来越广,比如,可用于评价地质岩性与构造运动<sup>[6]</sup>,冰川活动发育检测<sup>[7-8]</sup>,近年来还被用在火星的探究上<sup>[9]</sup>。面积高程

积分的研究从 19 世纪晚期已经开始<sup>[10]</sup>,起初用于刻画地球的表面形状。Strahler<sup>[11]</sup>最早将面积高程积分曲线用于研究独立小流域,并将流域地貌的发育划分为 3 个阶段:幼年期(大于 0.6),壮年期(大于 0.35 且小于 0.6),老年期(小于 0.35)。早期引用并发展了

面积高程积分的国内学者有艾南山<sup>[12-13]</sup>, 其将高程积分与系统的信息熵结合在一起提出了侵蚀流域系统的信息熵。励强等<sup>[14]</sup>以高程积分为基础提出了流域侵蚀积分, 对流域侵蚀发育阶段进行了特征分析。祝士杰等<sup>[15]</sup>在黄土高原的研究中拓展了高程积分的地质意义, 并将高程积分的地质含义总结为 3 个方面, 流域内物质相对总量的反映、流域发育进程的指示、流域势能及潜在侵蚀的描述。

山西省近年来频繁发生山体滑坡事件, 且多发生在山西西部的黄土高原, 即山西境内水土流失最为严重的地区<sup>[16]</sup>。对该地区小流域地貌发育阶段的了解有助于研究滑坡、泥石流等自然灾害。基于此, 本文以美国太空总署和国防部国家测绘局联合测量的 30 m 分辨率的 SRTM 数据为基本信息源, 展开研究区面积高程积分的研究, 探讨山西西部黄土高原小流域地貌的发育状况。

## 1 研究区域与方法

### 1.1 样区选择

本研究所涉及的区域位于山西西部的黄土高原, 是山西省水土流失最为剧烈的地区。所选区域面积约为 51 329 km<sup>2</sup>, 高程分布区间为 377~2 799 m, 平均海拔约 1 250 m。研究区域属于典型的黄土沟壑地貌, 主要山脉为中部的吕梁山。本文选取近年来山西西部多次发生地质灾害的 8 个典型样区, 偏关、保德、兴县、临县、石楼、大宁、吉县、乡宁, 所选区域均临近黄河流域。

### 1.2 研究方法

目前面积高程积分计算的方法主要有 3 种: 积分曲线法<sup>[17-18]</sup>、体积比例法<sup>[19]</sup>、起伏比法<sup>[20]</sup>。本文选取积分曲线法结合 CalHypso 计算样区小流域的面积高程积分值。积分曲线法是将流域高程无限细分, 分别求得大于每一单元高程值的流域面积, 并将其均一化, 作为  $x$  值, 即

$$x_i = a_i / A \quad (1)$$

式中:  $x_i$  为大于第  $i$  分级高程的面积百分比;  $a_i$  为大于第  $i$  分级高程的面积;  $A$  为流域总面积。每一细分单元的高程均一化值作为  $y$  值, 即

$$y_i = h_i / H \quad (2)$$

式中:  $y_i$  为第  $i$  分级相对高程百分比;  $h_i$  为第  $i$  分级高程与流域最低点的相对高差;  $H$  为流域总高差。在直角坐标系中绘制一系列连续的点, 对散点进行多项式曲线拟合, 即

$$y = f(x) \quad (3)$$

选取拟合系数最高的多项式, 求 0~1 范围内的定积分值, 即

$$S = \int_0^1 f(x) dx \quad (4)$$

该值即为流域的面积高程积分值。基于该原理, 已有学者开发出了计算 HI 值的软件, 本文选择 Arc-GIS 插件 CalHypso, 以流域为单元计算小流域的面积高程积分值。

## 2 结果与分析

### 2.1 DEM 分辨率对 HI 的影响

地统计分析的工作中需要大量的样本作为基本支撑, 在本节中, 对应的样本条件就是选取不同分辨率的 DEM, 分辨率越高, 则样本量越大。不同分辨率的 DEM 也代表了其对地表描述的综合程度。本节主要分析不同分辨率尺度下 HI 的变化态势, 探究 HI 值对分辨率的尺度依赖性, 进一步确定适合研究区的 DEM 分辨率。

试验以 30 m 分辨率的 SRTM 数据为基础, 以 10 m 作为采样间隔, 重采样 8 个样区的 DEM, 得到 30~190 m 的 17 幅 DEM 数据, 分析 HI 对 DEM 分辨率的依赖性(图 1)。各样区不同分辨率下 HI 值基本保持稳定, 其中兴县的高程积分值出现上下 0.1 的浮动, 在本文中与所选流域的面积大小变化有关。对比各分辨率尺度下 HI 的标准差(表 1), 兴县的标准差为 0.046, 偏关、吉县、乡宁约等于百分之一, 保德、临县、石楼、大宁为千分之一。随 DEM 分辨率的逐渐增大, 各样区 HI 值出现了小幅度的上下波动, 但误差总体符合统计学的要求。在不同分辨率的尺度下, 流域的高程积分值呈稳定态势, 所以 90 m 分辨率的 DEM 可用于计算山西省黄土高原小流域的面积高程积分值。

对比 8 个样区的 HI 值, 发现位于山西北部的偏关、保德、临县, 以及南部的石楼、乡宁的高程积分值均在 0.5 以上, 整体偏高, 而位于中部的兴县、大宁、吉县的高程积分值较小, 为 0.4~0.45。根据 Strahler 对小流域地貌发育的分级, 可知 8 个样区的流域地貌均处于壮年发育期, 但山西中部黄土高原地区的流域地貌正由壮年期向老年期过渡。由面积高程积分计算方法体积比例法的原理<sup>[21]</sup>可得, 由壮年期向老年期过度的期间, 地表起伏变化程度较大, 意味着流域会侵蚀更多的地表物质, 因此会有山体滑坡等地质灾害发生的隐患, 应在相应地区加强水土流失治理工作的力度。

### 2.2 流域面积对 HI 的影响

在提取流域的实际工作中, 发现同一样区在不同分辨率下提取的流域面积并不固定, 总体表现为分辨率越大, 流域越破碎, 相应地面积高程积分值也会变化。本节在区域尺度下, 将样区小流域分割成若干子流域, 根据 Strahler 流域分级法, 将流域分为 3 个级别(图 2), 通

过计算各级别子流域的面积高程积分值(图 3),分析高程积分值对流域稳定面积的尺度依赖性,进一步确定研究区小流域面积高程积分的面积稳定阈值。

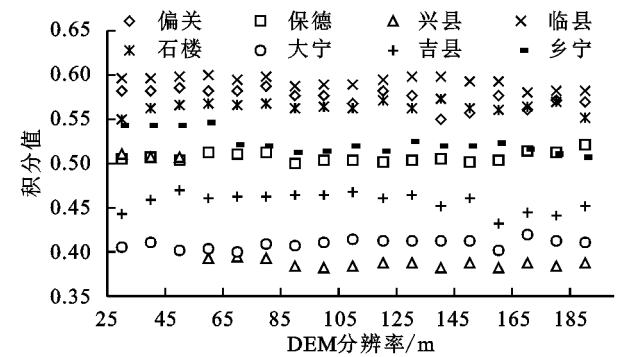


图 1 各样区不同 DEM 分辨率 HI 对比

表 1 各样区 HI 数学特征统计

样区	平均值	最大值	最小值	标准差
偏关	0.574	0.587	0.550	0.010
保德	0.507	0.522	0.500	0.006
兴县	0.408	0.510	0.382	0.046
临县	0.592	0.600	0.581	0.006
石楼	0.564	0.573	0.550	0.006
大宁	0.409	0.420	0.400	0.005
吉县	0.456	0.470	0.432	0.010
乡宁	0.523	0.547	0.507	0.012

图 2 中一级子流域的数量远大于二级、三级子流域,且流域面积均小于二级、三级子流域面积,二级、三级子流域提取效果相差不大。其中乡宁县的子流域面积以及高程积分值分布较为松散,说明乡宁县的子流域面积较为不稳定,一级子流域的分布变化较为频繁,而这一现象正有可能是剧烈的水土流失以及流域侵蚀造成的,因此也增加了山体滑坡等地质灾害发生的几率。各样区一级子流域的高程积分值域分布范围较广,随着子流域面积的增大也即流域级别的上升,其积分值逐渐收敛,值域范围明显缩小。

综合上述试验结果,小于 0.04 km<sup>2</sup> 的小流域面积高程积分值分布范围广,差异较大。本文将 0.04 km<sup>2</sup> 作为研究区小流域面积高程积分的面积稳定阈值,在 HI 的空间分异分析中,面积小于 0.04 km<sup>2</sup> 的小流域将不参与计算。

2.3 流域内不同地貌对象 HI 的相关性分析

黄土高原区域内存在大量典型的地貌对象,如黄土峁梁、黄土崮、黄土梁、黄土残塬、黄土塬<sup>[22]</sup>等,每一种地貌对象对应的高程积分值均有所差异。由于不同地貌对象在空间上存在拓扑关联性,则其面积高程积分值必然存在一定的相关性<sup>[23]</sup>。地貌对象的面积高程积分特征有效补充了流域的面积高程积分特征,相关性的强弱程度有助于分析全区域地貌对象的空间分异特征。



图 2 各样区不同级别子流域

本节选择 8 个较为典型的黄土高原地貌对象,分别为流域面、流域边界、山顶点、正地形、负地形、山脊线、沟沿线以及沟谷网络,计算各样区内地貌对象的面积高程积分值(表 2)。其中除沟谷网络外,其余 7 个地貌对象的高程积分值均偏大,为 0.5~0.7,沟谷网络的积分值在 0.3 附近。其中正地形与沟谷网络的积分值形成明显的对比,正地形最大积分值为 0.72,沟谷网络最小积分值为 0.20,明显的反差有力地说明了流域对地貌的侵蚀作用不可忽视,尤其在黄土高原区域,土质较为疏松,更易形成流域侵蚀,引发不同程度的地质灾害。

根据地貌对象面积高程积分的相关性分析(表 3),表现出较强相关性的地貌对象组合有山顶点—山脊线, R<sup>2</sup> 为 0.97;山顶点—沟谷网络, R<sup>2</sup> 为 0.75;负地形—沟沿线, R<sup>2</sup> 为 0.71;山脊线—沟谷网络, R<sup>2</sup> 为 0.85。较弱相关性的有流域面—山顶点, R<sup>2</sup> 为 0.48;山顶点—负地形, R<sup>2</sup> 为 0.54;负地形—山脊线, R<sup>2</sup> 为 0.61;山脊线—沟沿线, R<sup>2</sup> 为 0.44。其余的都小于 0.4,没有呈现明显的相关性,相关性较低的地貌对象有助于分析研究区面积高程积分值的空间分布格局。

2.4 面积高程积分空间分异

山西省黄土高原重点水土流失区位于山西省西部,本节选择的样区从山西省西北部偏关县到西南部乡宁县,共 20 个县级行政区,做山西省黄土高原重点水土流失区面积高程积分的空间分异研究。以 90 m 分辨率的 SRTM 数据为基础,利用 ArcGIS 中的水文分析模块提取一级子流域,根据阈值 0.04 km<sup>2</sup> 剔除不合理流域后,共得 105 条小流域,以流域为单元计算各个流域的高程积分值,绘制 HI 空间分布图(图 4)。

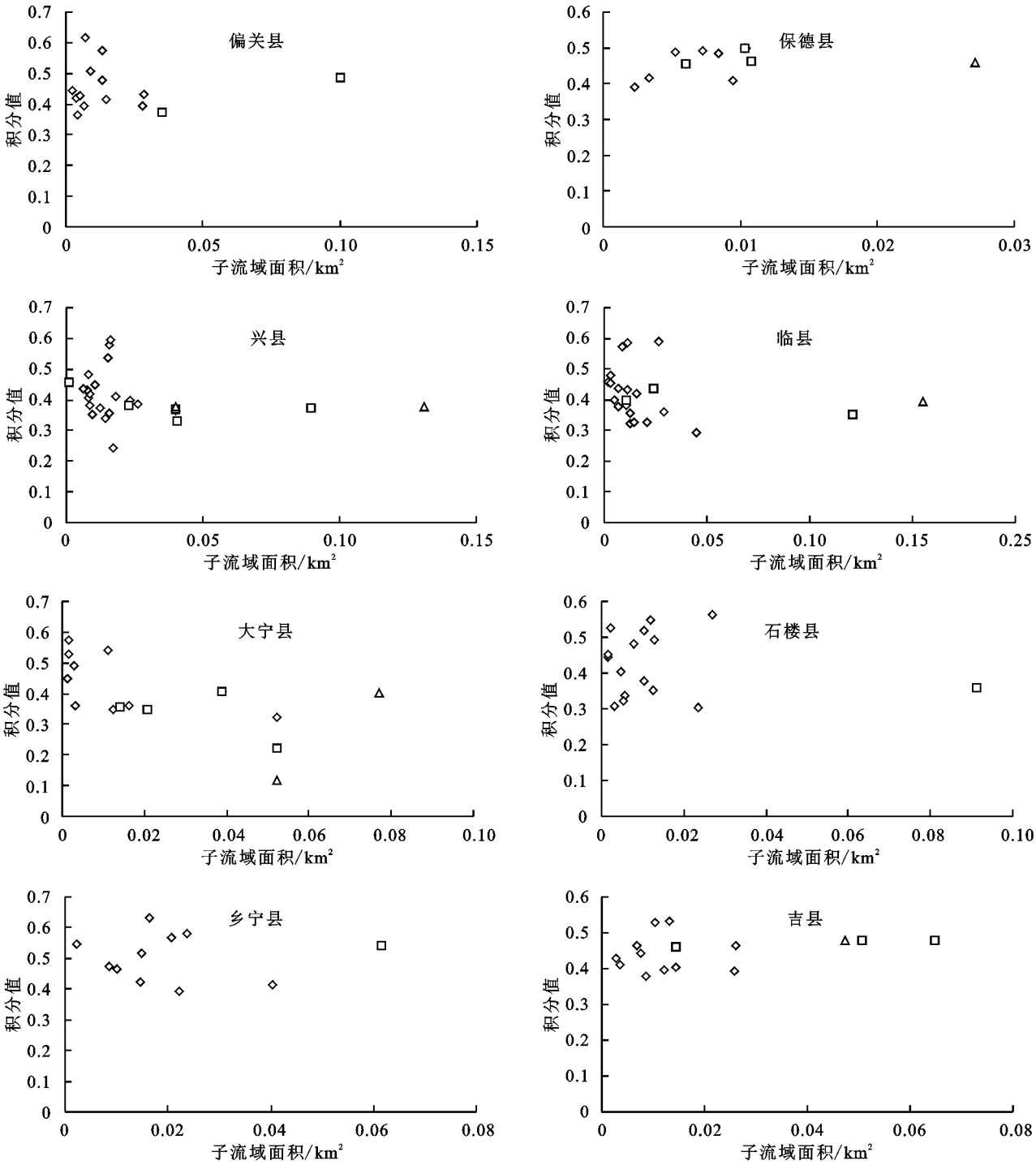


图 3 各级别子流域积分值与面积的散点分布

表 2 各样区各地貌对象面积高程积分统计

样区	流域面	流域边界	山顶点	正地形	负地形	山脊线	沟沿线	沟谷网络
偏关	0.53	0.69	0.63	0.72	0.55	0.62	0.51	0.40
保德	0.50	0.66	—	0.60	0.53	—	0.52	0.28
兴县	0.38	0.60	0.56	0.62	0.54	0.55	0.48	0.35
临县	0.51	0.57	0.57	0.61	0.48	0.56	0.55	0.30
石楼	0.53	0.67	0.58	0.58	0.49	0.55	0.60	0.27
大宁	0.41	0.62	0.49	0.68	0.46	0.48	0.62	0.20
吉县	0.46	0.65	—	0.69	0.44	—	0.58	0.31
乡宁	0.51	0.63	—	0.62	0.47	—	0.60	0.34



表 3 各地貌对象面积高程积分相关性统计

地貌对象	流域面	流域边界	山顶点	正地形	负地形	山脊线	沟沿线	沟谷网络
流域面	1.00	0.21	0.48	0.03	0.00	0.38	0.02	0.07
流域边界	0.21	1.00	0.26	0.09	0.07	0.19	0.00	0.05
山顶点	0.48	0.26	1.00	0.01	0.54	0.97	0.33	0.75
正地形	0.03	0.09	0.01	1.00	0.00	0.05	0.00	0.06
负地形	0.00	0.07	0.54	0.00	1.00	0.61	0.71	0.29
山脊线	0.38	0.19	0.97	0.05	0.61	1.00	0.44	0.85
沟沿线	0.02	0.00	0.33	0.00	0.71	0.44	1.00	0.41
沟谷网络	0.07	0.05	0.75	0.06	0.29	0.85	0.41	1.00

山西省黄土高原重点水土流失区积分值的地域差异性从北到南,呈现由大变小再变大的空间分布趋势,其中 HI 峰值出现在北部。北部与南部的高程积分值基本处于 0.45~0.63,中部的积分值为 0.12~0.38,从面积高程积分与流域发育阶段的关系看,黄土高原区的北部和南部处于流域地貌发育的壮年期,中部部分地区处于流域发育的老年期。

8 个样区的高程积分值空间分布情况为,偏关县共提取 12 条流域,其 HI 值均处于 0.45~0.63,所以偏关县整体处于流域发育的壮年期,其县域境内北部与南部的高程积分值偏大,中部偏小;保德县共提取到 9 条流域,流域基本都为东西走向,HI 值处于 0.38~0.52,虽然积分值均大于 0.35,但积分峰值偏小,说明保德县流域发育正由壮年期向老年期转变;兴县提取的流域最多,共 20 条一级子流域,其中 17 条流域的积分值处于 0.38~0.45,东南部的 3 条流域 HI 值约等于 0.56,这说明兴县境内 85%的流域已经处于发育的老年期,流域侵蚀地貌程度较为严重;临县提取到 19 条流域,县域内西部的流域均呈南北走向,东部的流域均为东西走向,其中位于北部与南部的 3 条流域积分值在 0.55 以上,中部 6 条流域的 HI 值均小于 0.35,剩余 10 条流域的积分值处于 0.35~0.45,说明山西省黄土高原区由北向南在临县内首次出现了处于发育老年期的流域,可从侧面说明流域侵蚀对临县的水土流失贡献率较大;柳林县提取了 14 条流域,除北部的 3 条流域外,积分值均大于 0.45,相比于北部临县的低积分值,黄土高原流域的积分值在柳林出现了回转,积分值开始升高;南部大宁县共提取流域 7 条,其中 1 条流域在一、二、三级流域的提取当中,其范围均未改变,且纵跨大宁县,占大宁县总流域面积的 53%,说明大宁县境内的流域面积较为稳定,流域发育较为缓慢;吉县一级子流域共有 11 条,积分值均在 0.5 左右,积分值大小分布均匀,表明吉县境内子流域发育程度相当,且处于壮年期;位于最南部的乡宁县共提取流域 10 条,基本都为南北走向,积分值均大于 0.45,西北部的积分值偏小,东南部偏大,说明西北部的流域侵

蚀地貌程度较大,2019 年 3 月 15 日乡宁县发生的重大山体滑坡就位于西北部的枣岭乡。造成山体滑坡的原因复杂多样,介于黄土高原地质地貌的特殊性,流域侵蚀是造成山体滑坡等地质灾害的一项潜在因素,侵蚀程度越大,发生地质灾害的几率越大。

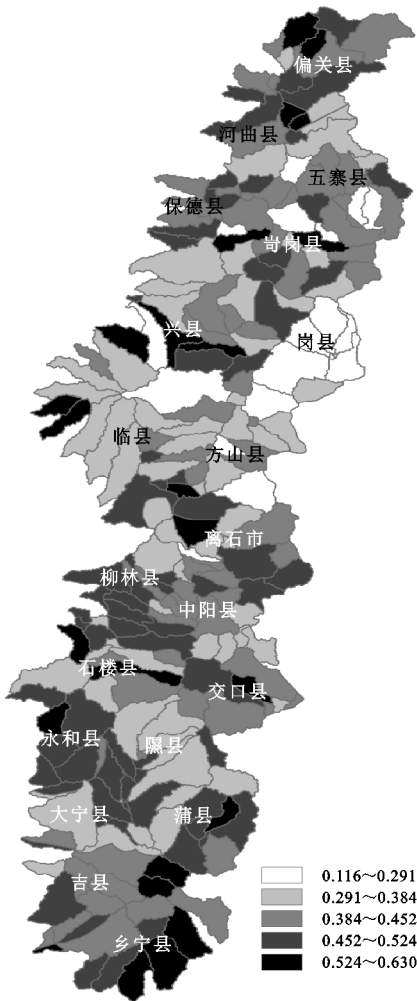


图 4 山西西部黄土高原区面积高程积分空间分布

3 结论

(1) 面积高程积分是一项具有深刻地貌学意义的宏观指标,对于判断小流域地貌的发育阶段具有重要的地理学作用。本文研究表明,山西省西部黄土高原重点水土流失区的面积高程积分值整体处于

0.35~0.63,即区域内小流域基本处于发育的壮年期,有部分流域处于发育的老年期。研究区内面积高程积分值从北到南,呈现大—小—大的空间分布趋势,黄土高原中部的流域发育较为成熟。面积高程积分的空间分异与水土流失空间分区具有较好的耦合关系,因此,高程积分值对于深入认识水土流失的空间分异格局具有重要的地理学意义。

(2) DEM 分辨率对面积高程积分影响较小,30~190 m 分辨率下计算的积分值较为稳定。随着子流域面积的增大,积分值逐渐收敛。黄土高原部分地貌对象的积分值表现出一定的相关性,相关性较强的地貌对象组合有山顶点—山脊线、山顶点—沟谷网络、负地形—沟沿线、山脊线—沟谷网络,相关性较弱的地貌对象组合有流域面—山顶点、山顶点—负地形、流域边界—沟沿线等。地貌对象 HI 值的相关性强弱程度对于黄土地貌的空间分区研究具有一定的参考意义。

(3) 水土流失的形成原因复杂多样,流域侵蚀对于水土流失是一项潜在的,且影响力较大的因素,所以探究流域的发育程度及其对地貌的侵蚀程度对研究水土流失等地质灾害有着重要的作用。面积高程积分以及以高程积分为基础发展的侵蚀积分、流域信息熵是判别流域发育及其对地貌侵蚀程度的一系列地形指标。本文只是从面积高程积分一个侧面分析了山西黄土高原重点水土流失区的小流域地貌发育程度,但黄土高原的地形错综复杂,地貌对象种类繁多,应采用多个指标来描述黄土高原区流域发育状况及其对地质灾害事件发生的影响程度。

#### 参考文献:

- [1] 胡胜.黄土高原滑坡空间格局及其对地貌演化的影响[D].西安:西北大学,2019.
- [2] Chen Y C, Sung Q, Cheng K Y. Along-strike variations of morphotectonic features in the Western Foothills of Taiwan: tectonic implications based on stream-gradient and hypsometric analysis[J]. *Geomorphology*, 2003,56(1):109-137.
- [3] Hamdouni R E, Irigaray C, Fernández, et al. Assessment of relative active tectonics, southwest border of the Sierra Nevada(southern Spain)[J]. *Geomorphology*, 2008,96(1/2):150-173.
- [4] 李玉辉,丁智强,吴晓月.基于 Strahler 面积—高程分析的云南石林县域喀斯特地貌演化的量化研究[J].*地理学报*,2018,73(5):973-985.
- [5] 章桂芳,陈凯伦,张浩然,等.基于 DEM 的丹霞地貌演化阶段划分[J].*中山大学学报:自然科学版*,2018,57(2):12-21.
- [6] Lifton N A, Chase C G. Tectonic, climatic and lithologic influences on landscape fractal dimension and hypsometry, implications for landscape evolution in the San Gabriel Mountains, California [J]. *Geomorphology*, 1992,5(1/2):77-114.
- [7] 张敬春,李川川,张梅,等.格尔木河流域面积—高程积分值的地貌学分析[J].*山地学报*,2011,29(3):257-268.
- [8] Simon H. Brocklehurst, Kelin X. Whipple. Hypsometry of glaciated landscapes[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*,2004,29(7):907-926.
- [9] Ansan V, Mangold N. New observations of WarregoValles, Mars:Evidence for precipitation and surface runoff[J]. *Planetary and Space Science*, 2006,54(3):219-242.
- [10] Harlin J M. Statistical moments of the hypsometric curve and its density function[J]. *Mathematical Geology*, 1978,10(1):59-72.
- [11] Strahler A H. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography [J]. *GSA Bulletin*, 1952, 63(11):1117-1142.
- [12] 艾南山.侵蚀流域系统的信息熵[J].*水土保持学报*, 1987,1(2):3-10.
- [13] 艾南山,岳天祥.再论流域系统的信息熵[J].*水土保持学报*,1988,2(4):3-11.
- [14] 励强,陆中臣,袁宝印.地貌发育阶段的定量研究[J]. *ActaGeographica Sinica*,1990,57(1):110-120.
- [15] 祝士杰,汤国安,李发源,等.基于 DEM 的黄土高原面积高程积分研究[J].*地理学报*,2013,68(7):921-932.
- [16] 吕萌.山西省黄土崩塌地质灾害的现状 & 水敏感性分析[D].太原:太原理工大学,2016.
- [17] 彭建,杨明德,梁虹.基于 GIS 的路南巴江喀斯特流域地貌演化定量研究[J].*中国岩溶*,2002,21(2):89-94.
- [18] Luo W. Hypsometric analysis with a geographic information system[J]. *Computers & Geosciences*,1998,24(8):815-821.
- [19] Meerkerk A L, Wesemael B V, Bellin N. Application of connectivity theory to model the impact of terrace failure on runoff in semi-arid catchments[J]. *Hydrological Processes*,2009,23(19):2792-2803.
- [20] 王林,何仲太,马保起.岱海流域地貌演化及其对断裂活动性的指示意义[J].*第四纪研究*,2008,28(2):310-318.
- [21] 李发源.黄土高原地面坡谱及空间分异研究[D].成都:中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所,2007.
- [22] 汤国安,李发源,熊礼阳.黄土高原数字地形分析研究进展[J].*地理与地理信息科学*,2017,33(4):1-7.
- [23] 熊礼阳.基于 DEM 的黄土地貌继承性研究[D].南京:南京师范大学,2015.