

# 基于DEM的黄土高原面积高程积分研究

祝士杰, 汤国安, 李发源, 熊礼阳

(南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室, 南京 210023)

**摘要:** 面积高程积分 (Hypsometric Integral, HI) 是通过统计流域地表的高程组合信息, 从而揭示流域地貌形态与发育特征的重要指标。本文以 1:10000 比例尺 5 m 分辨率 DEM 数据分析流域面积高程积分计算时的影响因素, 以 SRTM 数字高程模型数据为基本信息源, 研究黄土高原重点水土流失区的面积高程积分空间分异特征。研究工作首先讨论并总结了面积高程积分的地理含义, 明确了 DEM 分辨率以及分析面积对于面积高程积分计算的影响, 并分析各地貌对象面积高程积分的相关性; 然后, 面向黄土高原重点水土流失区, 采用面向多尺度分割的方法, 基于小流域面积高程积分, 实现了黄土高原重点水土流失区地貌分区。研究结果表明, DEM 分辨率对于小流域面积高程积分计算影响较小, 当小流域面积阈值达到 10 km<sup>2</sup> 时, 面积高程积分趋于稳定; 各地貌对象中, 流域面—正地形—沟沿线、山顶点—山脊线—流域边界这两组组内面积高程积分相关性非常强; 基于面积高程积分的地貌分区, 与黄土高原地区水土流失分区图和输沙模数分区图具有相当程度的耦合关系, 并细化了原有分区结果。

**关键词:** 面积高程积分; 空间分异; 地貌分区; 黄土高原

面积高程积分是研究流域水平断面面积与其高程关系的定量指标<sup>[1]</sup>。在 19 世纪晚期, 面积高程积分已经初步应用于对地球表面特征与形状的刻画与理解。它首先将地球作为整体的形式评估地表地形和海底地形。紧接着, 学者认识到高程积分潜在的价值在于评估侵蚀、地壳均衡、构造在地貌发育中所扮演的角色。Strahler<sup>[2]</sup>在他的论著中首先将面积高程积分曲线用于对比独立的小流域, 他将 W. Davies 地貌发育模式定量化, 根据面积高程积分值将地貌发育分为三个阶段: 幼年阶段 (大于 0.6), 壮年阶段 (大于 0.35 且小于 0.6), 老年阶段 (小于 0.35)。自此, 该方法就成为地貌定量分析中的一部分。

在对面积高程积分进行细致的数学特征分析后<sup>[3]</sup>, 20 世纪 80 年代早期, 欧洲陆地的高程分布情况首先得到关注。学者们分析了区域性面积高程积分特征<sup>[4-5]</sup>, 从形态与物质组成上看, 河网密度<sup>[6]</sup>、沉积物和径流<sup>[7-8]</sup>的差异都对面积高程积分计算结果有重要影响。同时, 面积高程积分的尺度效应以及不同尺度下面积高程积分的分布得到了一定的研究<sup>[9-10]</sup>。此外, 众多学者从地质学的角度, 研究了岩性与构造对高程积分的影响<sup>[11-14]</sup>, 以天山为例, 探讨了面积高程积分对再生造山带新构造活动的指示意义以及其北麓流域的地貌发育过程<sup>[15-16]</sup>。在黄土地貌的研究中, 艾南山<sup>[17-18]</sup>在高程积分基础上提出了侵蚀流域系统的信息熵, 将线性非平衡态熵引入了流域系统研究。励强、陆中臣<sup>[19]</sup>等在高程积分基础上发展了侵蚀积分, 从而从侵蚀的角度重新对流域发育阶段进行了特征分析。信忠保<sup>[20]</sup>制作了

收稿日期: 2013-03-12; 修订日期: 2013-05-02

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40930531; 41171320); “资源与环境信息系统国家重点实验室”开放基金项目 (2010KF0002SA) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.40930531; No.41171320; Open Foundation of State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, No.2010KF0002SA]

作者简介: 祝士杰 (1983-), 男, 浙江杭州人, 博士生。主要从事流域地貌, 数字地形分析的研究。

E-mail: zsjdx1025@163.com

通讯作者: 汤国安 (1961-), 男, 浙江宁波人, 教授, 博士生导师。主要从事 GIS 空间分析, 数字地形分析等方向的研究。

E-mail: tangguoan@njnu.edu.cn

高程积分值的空间分异图，得出随着DEM分辨率变化，HI值基本保持稳定(100 m为起点)；而分析窗口逐渐扩大，HI值以幂函数下降。廖义善<sup>[21]</sup>认为面积高程积分能反映流域的地貌现状与侵蚀趋势，且其大小与变化趋势与流域最低点是否达到基岩有关。

基于流域的面积高程积分，具有明确的物理含义与地貌学意义，已有的研究成果显示了其在地学研究所具有的重要作用。然而，作为一种宏观指标，面积高程积分的表现形式只有积分值和积分曲线两种，难以从细节上区分流域之间的差异。黄土高原地貌对象丰富，诸如正负地形、沟沿线、沟谷网络等。以流域内各种地貌对象作为研究的对象，即一个流域内，不仅具有整体的面积高程积分，同时也具有各种地形特征要素的面积高程积分，在相当程度上弥补了面积高程积分表达的单一性问题，从而丰富了面积高程积分的表达体系，为深入分析黄土高原地貌形态空间分异特征提供了一种新思路。

1 研究基础

1.1 研究区与实验数据

**1.1.1 研究区概况** 本研究所涉及的区域是黄土高原水土流失最为剧烈的黄土高原重点水土流失区<sup>[22]</sup>。该区域面积约为160 000 km<sup>2</sup>，高程分布区间为海拔352~2913 m，平均高程约1264 m。区域内地貌类型以黄土地貌为主，中部分布有部分石质山岭、高原平地、盆地，北部邻接风沙—黄土过渡地貌区。区内黄土塬、梁、峁及沟壑等地貌发育十分典型。其中，本文选择位于榆林、绥德、延长、延安、宜君、淳化、西峰、环县的8个典型样区作为重点分析对象(图1)。

**1.1.2 实验数据** 本文采用国家测绘部门标准化生产的典型样区1:10000比例尺5 m分辨率DEM数据，展开重点区域的面积高程积分特征分析；采用美国太空总署和国防部国家测绘局联合测量的全区域3弧秒分辨率SRTM (Shuttle Radar Topography Mission, <http://>

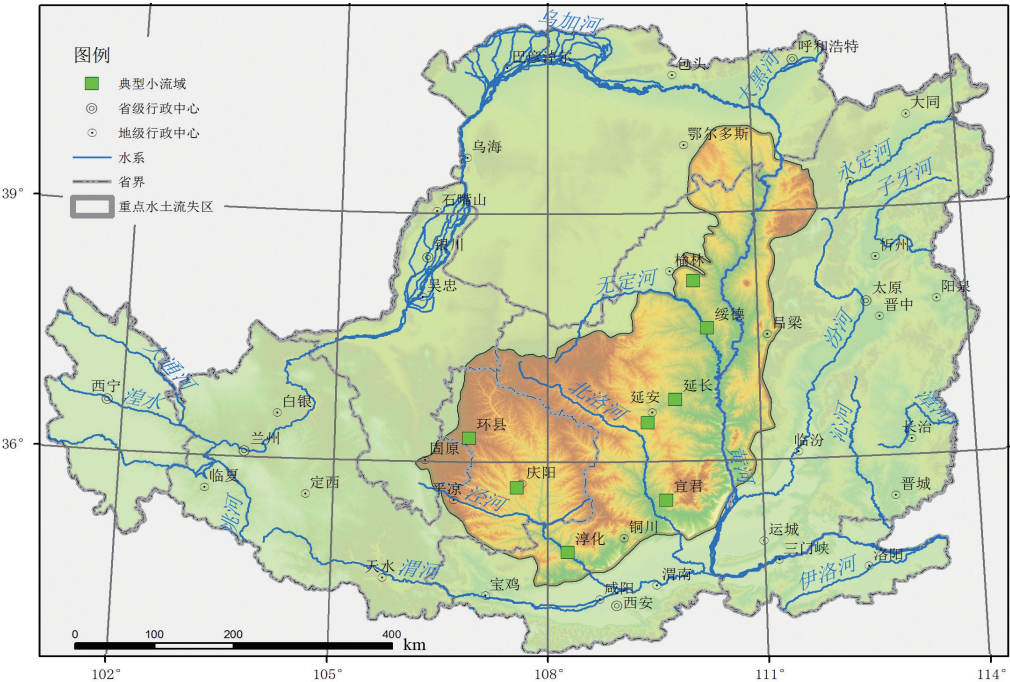


图1 研究区及典型样区分布图

Fig. 1 Distribution of the study area and typical catchments

srtm.csi.cgiar.org/) 数据为基本数据源, 展开全区尺度的分析。

1.2 面积高程积分计算方法

面积高程积分的计算是将流域的高差无限细分, 分别求取大于每一细分单元高程值的流域面积, 并将其均一化后, 作为 $x$ 值, 即

$$x_i = \frac{a_i}{A} \tag{1}$$

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。

高差细分的高程均一化值 (一种相对高程的表达) 作为 $y$ 值, 即

$$y_i = h_i/H \tag{2}$$

式中,  $y_i$ 为第 $i$ 分级相对高差百分比,  $h_i$ 为第 $i$ 分级高程与流域最低点的相对高差,  $H$ 为流域内高差。

将各点展布到直角坐标系中, 形成一条曲线, 即

$$y = f(x) \tag{3}$$

在此基础上求取0~1范围内的定积分值, 即

$$s = \int_0^1 f(x)dx \tag{4}$$

则得到面积高程积分值, 它的值域区间亦是0~1。同时, 在坐标系中绘制的曲线则是面积高程积分曲线。本文利用Matlab编写程序, 通过输入分级数、DEM数据, 实现面积高程积分的计算。

2 面积高程积分的地学含义及指标拓展

2.1 地学含义

面积高程积分的地学含义主要包括物质相对总量的反映、流域发育进程的指示和流域势能的描述等三个方面。

**2.1.1 流域内物质相对总量的反映** 无量纲量一般代表的是一种量与量之间关系的物理量。流域面积高程积分的积分值是在高程归一化和面积归一化后计算得到的, 一种面向宏观分析的无量纲值。从表面看, 是高程组合的一种统计表达。然而, 由于其高程的归一化处理, 在计算中, 实际的绝对高程已转化为基于流域最低点的相对高程统计。多数学者认为, 对一个流域而言, 其侵蚀基准面是在一定的海平面高程限制下, 流域根据其流量、沙量和泥沙组成, 最终将调整到使流域口顶点处, 沟底泥沙处于相对静止或相对平衡状态的流域口顶点高程<sup>[1]</sup>。从这个角度来分析, 流域口即为该区域临时侵蚀基准面; 一般而言, 流域口又是流域内高程的最低点, 于是, 面积高程积分统计的高程信息, 就是相对于流域临时侵蚀基准面的相对高程信息, 从整体上反映了流域内高于侵蚀基准面高程的相对物质总量。

**2.1.2 流域发育进程的指示** 流域的变化呈现一定的模式与规律。流域的发育, 充分体现了在各种内、外营力作用影响下对地表的再塑造的结果。在黄土地貌区域, 黄土地层较为稳定, 松散且厚的黄土覆盖了大部分的地表, 物质相对均一, 而侵蚀动力基本源于地表径流作用。从某种意义上说, 流域的发育过程就是其黄土被侵蚀的过程。随着年复一年的降雨侵蚀, 黄土随着径流从流域的上部被搬运到流域的中下部, 乃至流出整个流域, 这种侵蚀过程主导了现代黄土高原地区流域的基本发育模式。当以最高高程占满整个流域空间的体积认为是1时, 则面积高程积分的积分值就代表了现在还留存的, 高于侵蚀基准面的物质的量, 也就是说现阶段剩余物质的总量。该量就从某种程度上指示了流域发育的进程。



**2.1.3 流域势能及潜在侵蚀的描述** 地表实际上处于一种“亚平衡”状态，即呈现出一种重力平衡状态。一般情况下，没有外界环境的干扰，地表的物质是不会发生输移的。当降雨等外力作用后，原有的平衡状态被打破，物质就随着径流的产生开始移动。而此时，除了地形因子中坡度的影响，物质的高程属性也对其输移的启动具有一定的作用。高程在一定程度上代表了物质的势能，相对高度越高，势能越大，产生输移的可能性就增加。当面积高程积分的积分值较大时，表明流域内相对高程大的区域面积较大，流域的整体势能较强，在物质上具备更容易发生侵蚀的条件。也就是说，其潜在的侵蚀能力较大。从这个角度来看，面积高程积分反映了流域内物质的势能情况，可以表现流域潜在侵蚀的强烈程度。

**2.2 指标拓展**

流域面积高程积分的表达形式主要有积分曲线和积分值两种，相对较为单一。而流域是一个复杂系统。对于某一个流域而言，它是其下一级子流域的集合，亦是其上一级流域的子集。在黄土小流域内，同时具有多种地貌对象，从典型性角度分析，主要有山顶点、山脊线、沟沿线、沟谷线、流域边界线、主沟谷线、正地形和负地形等。在流域内部组成上，各种地貌对象集合起来有机形成一个整体，即为流域，在一定程度上可以认为地貌对象与流域是一种整体与部分的关系。从整体上，面积高程积分反映了流域的发育阶段，是流域物质相对量的表达，也是一种总体势能的体现；而在部分上，各个地貌对象从各个角度来揭示不同地貌部位的高程组合特征，从而以一种总一分的形式来表达流域的发育特征。本文以小流域内的多种地貌对象为分析对象，分别构建相应的面积高程积分值，通过相关性实验，遴选出典型的地貌对象，从而形成系列化的流域面积高程积分指标体系，拓展面积高程积分的分析方法。

**3 面积高程积分计算的影响因素**

基于DEM的面积高程积分计算中，其影响因素包括DEM分辨率和地域稳定面积等方面。

**3.1 DEM分辨率对HI的影响**

不同分辨率的DEM代表了其对地表描述的综合程度。本文以高精度的5 m分辨率DEM为初始数据，利用ArcToolBox中的ReSample工具，以10 m作为等间距采样间隔，重采样8个样区的小流域，依次得到15~195 m的19幅DEM数据，探求面积高程积分在不同分辨率内的尺度依赖性(图2)。每个小流域的面积高程积分值基本稳定，随分辨率的变化均较小。属于黄土塬区的西峰样区和淳化样区，总体积分值较高；其余处于黄土丘陵沟壑区的5个小流域，面积高程积分值差异不大，基本在0.5上下浮动。对比不同分辨率积分值的标准差(表1)，延长和淳化样区略大，约大于百分之一；而西峰样区为千分之一。虽然随着分辨率的扩大，各小流域的积分值都有几个微小波动，但从统计上都呈现出一种较为稳定的态势。从而可

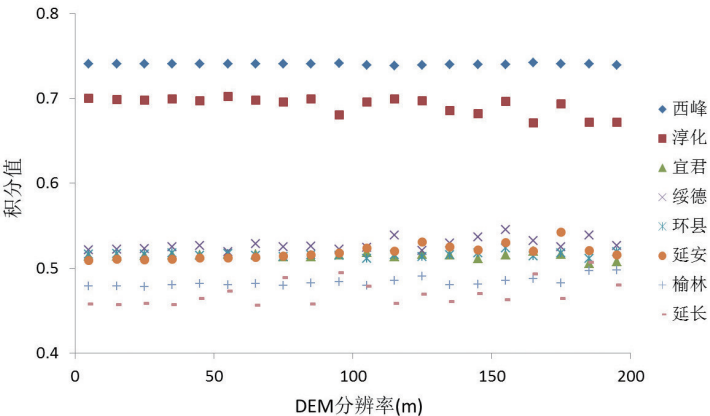


图2 各样区不同DEM分辨率高程面积积分对比

Fig. 2 Scatter diagram of DEM resolution and HI

以得到,随着分辨率的扩大,小流域面积高程积分值基本稳定,采用3弧秒(约90 m)分辨率的SRTM数据展开全区域的面积高程积分计算的精度可以得到保证。

3.2 地域稳定面积对HI的影响

面积高程积分作为一种统计型分析指标,需要一定的样本给予基本支撑;在本文中,这种样本数量对应的就是分析区域的面积,一般而言,面积越大,DEM栅格数量越多,则样本越多。在区域尺度的分析中,以完整流域作为分析对象计算积分值。具体做法是:将小流域以一定阈值分割成若干子流域(图3),利用Strahler分级,按沟谷网络级别,赋予子流域相应等级;按等级提取完整子流域,计算面积高程积分值。

分别计算各级别子流域的面积高程积分值,并与其面积值制作散点图(图4)。图中可以看到,子流域面积较小时,积分值值域分布非常宽,峁区积分值约在0.4~0.6之间;梁区积分值约在0.45~0.6之间;塬区积分值约在0.65~1之间。塬区的积分值分布区间最大,意味着塬区子流域面积高程积分值不确定性最大。随着子流域面积的增大,其积分值呈现一种收敛的态势。从各级别子流域积分值的分布来看,本研究中的一级子流域积分值最为松散;随着子流域级别上升,在一定程度上也代表了分析面积的扩大,积分值逐渐收拢。

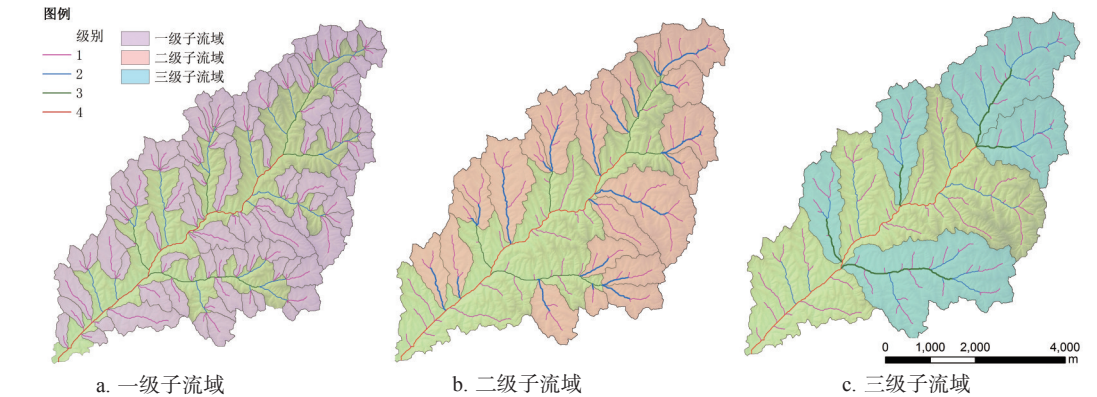


图3 不同等级子流域示意图  
Fig. 3 Sub-catchments of different grades

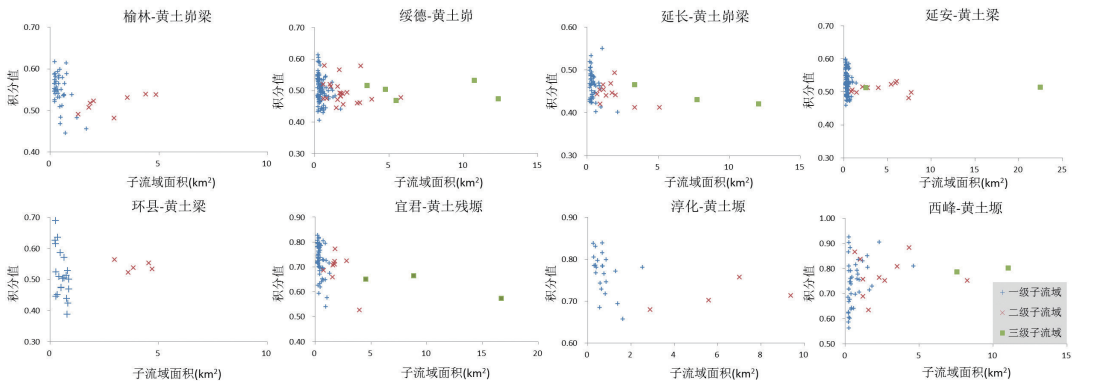


图4 各级别子流域积分值与面积的散点分布图  
Fig. 4 Scatter diagram of sub-catchment HI and area

综合以上实验结果, 本文设定  $10\text{ km}^2$  作为黄土地貌小流域面积高程积分的稳定阈值, 即: 一般情况下, 在同一地貌类型区小于  $10\text{ km}^2$  的小流域面积高程积分值差异较大, 在全区域的空间分异分析中, 不参与计算。

4 面积高程积分空间分异与分区

4.1 面积高程积分空间分异

本文首先以  $10\text{ km}^2$  为阈值, 基于 SRTM 数据, 利用 ArcGIS 10 中的水文分析模块提取研究区内的小流域。这一级别的小流域主要可应用于水质监测和流域生态系统恢复 (据美国国家环境保护署)。划分出的流域有两种, 分别是完整流域和域间流域<sup>[23]</sup>。而域间流域不是真正意义上的完整流域, 因而, 本文主要选择完整流域展开分析。通过前期的数据处理, 共有 4520 个完整流域参与计算分析, 得到了小流域面积高程积分空间分异图 (图 5)。

从面积高程积分与流域发育阶段的关系来看, 绝大部分小流域的面积高程积分处于 0.35 和 0.6 之间, 表明黄土高原大多数区域处于地貌发育的壮年期; 研究区的西南部, 以董志塬为核心的区域存在大片的积分值大于 0.6 的区域, 处于地貌发育的幼年期, 该区域基本属于黄土塬区范围, 积分值普遍较大。全区仅有少量小流域的积分值小于 0.35, 相对集中于研究区的东部和西部边界。其中, 东部区域毗邻吕梁山, 西部区域靠近六盘山, 从地表物质组成上来看, 其黄土覆盖的相对较薄。虽然在研究区北部, 亦存在零星的处于流域发育老年期的流域, 但总体上看, 黄土高原地区的小流域仍然处于流域地貌发育的中期阶段。在该阶段, 地面起伏变化大, 并有大量可被侵蚀的物质, 水土流失治理工作仍十分艰巨。

从总体上看, 研究区中部黄土丘陵沟壑区的面积高程积分值要大于边缘部分。其中,

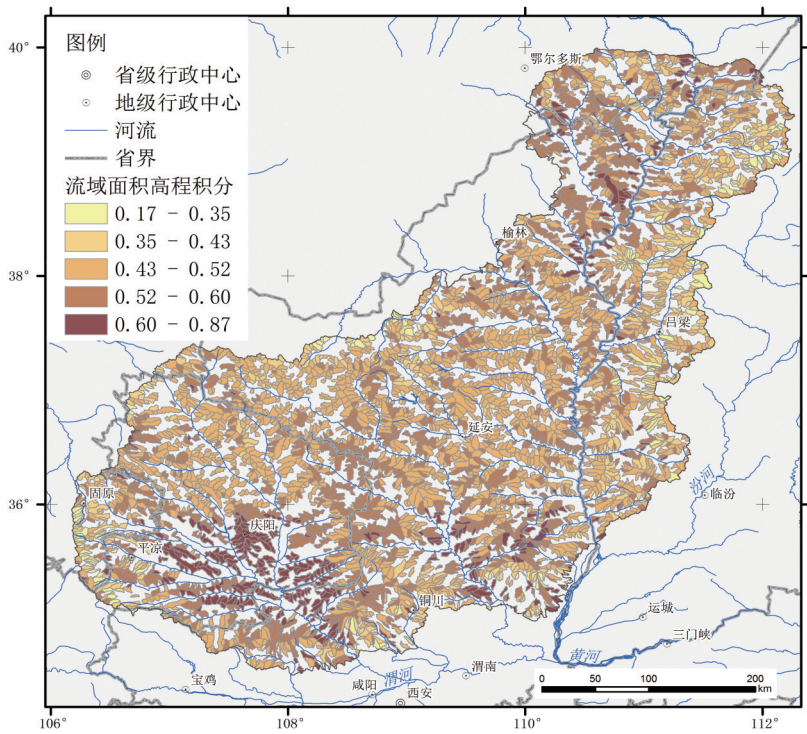


图5 黄土高原重点水土流失区流域面积高程积分空间分异图  
Fig. 5 The spatial variation of catchment HI in the study area



积分值的峰值主要集中在研究区的西南部、中南部的黄土塬区及残塬区,堆积了大量黄土;此外,研究区中北部的黄土斜梁区积分值亦较大。从壮年期的小流域分布来看,积分值的地域差异性从北到南,存在大一小一大的分布趋势。从地貌类型看,北部区域属于黄土梁区,中部以黄土峁区居多,再往南则是以黄土梁占主导的地貌形态。

4.2 流域内不同地貌对象面积高程积分相关性分析

流域面积高程积分从整体上反映了黄土高原流域地貌发育阶段,而由流域内各种点、线、面地形特征要素所构成的地貌对象面积高程积分,从多个方面补充了流域的特征。不同地貌对象由于在空间上存在拓扑的关联性,其面积高程积分也必然存在一定的相关性。本文首先选择位于各典型地貌类型区的8个小流域,分析其中的面积高程积分相关性特征(表2),从而遴选出面积高程积分相关性较低的地貌对象,展开空间分异研究。

根据地貌对象面积高程积分相关性分析(表3), $R^2$ 大于0.8的地貌对象组合有流域面—正地形、流域面—沟沿线、山顶点—流域边界、山脊线—流域边界、山顶点—山脊线、沟沿线—正地形。同时,主沟谷线和沟谷网络的 $R^2$ 约为0.77。这些地貌对象面积高程积分的相关性都较强。此外, $R^2$ 大于0.5的组合有流域面—负地形、流域—沟谷网络、沟谷网络—沟沿线、沟谷网络—负地形。其他的组合相关性系数均小于0.5,呈现较弱的相关性。总结一系列地貌对象的面积高程积分相关性分析,可以得出两组面积高程积分相关性较强的地貌对象,即:流域面—正地形—沟沿线、山顶点—山脊线—流域边界。基于这种相关性分析,本文从中遴选出几种典型的地貌对象,包括流域面、流域边界、沟谷网络和主沟谷线,展开全区域的空间分异研究。

4.3 分区结果与分析

根据选取的地貌对象,分别计算研究区内完整小流域4种地貌对象的面积高程积分,同时,计算流域—沟谷网络、沟谷网络—主沟谷、流域边界—流域、流域—主沟谷面积高程积分之间的差值,得到8个流域面积高程积分因子指标。由于域间流域的特殊性,并未纳入面向一级小流域的空间分异分析,导致在研究区域内出现空洞,即呈河网状分布的无

表2 典型样区地貌对象面积高程积分序列

Tab. 2 HI of different landform features

样区	地貌类型	流域面	流域边界	山顶点	山脊线	正地形	沟沿线	负地形	沟谷网络	主沟谷线
榆林	黄土崩梁	0.50	0.74	0.63	0.62	0.57	0.49	0.40	0.22	0.19
绥德	黄土崩	0.52	0.69	0.59	0.58	0.58	0.53	0.46	0.34	0.30
延长	黄土崩梁	0.46	0.68	0.57	0.56	0.51	0.45	0.40	0.25	0.20
延安	黄土梁	0.51	0.74	0.64	0.61	0.57	0.49	0.43	0.30	0.24
宜君	黄土残塬	0.51	0.57	-	-	0.62	0.51	0.39	0.30	0.26
淳化	黄土塬	0.70	0.76	-	-	0.76	0.62	0.50	0.39	0.34
西峰	黄土塬	0.74	0.79	-	-	0.87	0.73	0.51	0.35	0.28
环县	黄土梁	0.52	0.72	0.63	0.61	0.55	0.52	0.48	0.29	0.17

表3 各地貌对象的面积高程积分R<sup>2</sup>值

Tab. 3 R<sup>2</sup> of each landform feature HI

	流域面	流域边界	山顶点	山脊线	正地形	沟沿线	负地形	沟谷网络	主沟谷线
流域面	1.00	0.34	0.37	0.44	0.95	0.95	0.67	0.60	0.44
流域边界	0.34	1.00	0.93	0.82	0.23	0.31	0.47	0.06	0.02
山顶点	0.37	0.93	1.00	0.90	0.40	0.16	0.05	0.00	0.06
山脊线	0.44	0.82	0.90	1.00	0.44	0.26	0.06	0.01	0.10
正地形	0.95	0.23	0.40	0.44	1.00	0.95	0.49	0.49	0.41
沟沿线	0.95	0.31	0.16	0.26	0.95	1.00	0.67	0.53	0.35
负地形	0.67	0.47	0.05	0.06	0.49	0.67	1.00	0.63	0.25
沟谷网络	0.60	0.06	0.00	0.01	0.49	0.53	0.63	1.00	0.77
主沟谷线	0.44	0.02	0.06	0.10	0.41	0.35	0.25	0.77	1.00

数据区。本文考虑采用空间插值的方法,依据周围小流域的属性值来插补研究区内的数据空洞,以分析覆盖全区的面积高程积分空间格局。

本文获得的小流域数据是矢量面,首先需要将其转换成样本数据。具体的做法是:将各完整小流域通过中心点的求取,转换成矢量点数据;从中随机挑选 10%,即 452 个样点作为内插模型的验证数据,对余下的 4068 个样点进行克里格内插。本文利用 ArcGIS 的地统计分析模块 (Geostatistic analysis) 展开黄土高原重点水土流失区的各要素面积高程积分内插实验,以获得全区域无缝的面积高程积分空间分布格局。具体步骤如下: 1) 样点数据统计特征探索。对数据进行统计分析,考察数据的分布情况,使各项指标数据呈正态分布; 2) 选择合适的内插参数及模型进行克里格内插,其中,本文采用了 simple kriging 插值方法; 3) 用交叉验证法检验所选拟合模型的合理性以及预测的精度。其中,误差评价指标主要包括: 平均误差 (Mean Error, ME), 标准平均值 (Mean Standardized Error, MSE), 平均标准误差 (Average Standardized Error, ASE), 均方根误差 (Root-Mean-Square Error, RMSE) 以及标准均方根 (Root-Mean-Square Standardized Error, RMSSE) (表 4)。

在 ArcGIS 的 Spatial Analyst 模块支持下,基于内插曲面,生成了等值线数据,得到 8 种典型地貌对象面积高程积分图 (图 6)。其中每一要素都从不同侧面反映了流域地貌形态特征。

基于各地貌对象面积高程积分空间分异数据,利用 eCognition 8.7 软件,采用面向多尺度分割 (multiresolution segmentation) 的方法,设置各因子权重 (image layer weight) 为 1,尺度参数 (Scale parameter) 为 10,形状 (Shape) 为 0.01,紧凑度 (Compactness) 为 0.5。将黄土高原重点水土流失区分成 10 个区域 (图 7),对比李吉均 (2006) 编制的 1:100 万地貌类型图,得出了各分区内地貌类型的分布情况 (表 5)。

结合区划内主要地貌类型与地理范围,本文制定了分区的命名 (表 6)。

在 10 个地貌分区中,环县—靖边黄土斜坡区与固原—定边黄土斜坡区、庆阳—长武黄土塬区与淳化—洛川黄土塬区较为接近,其主要分布地貌类型与次要分布地貌类型一致。它们差异主要体现在: 固原—定边黄土斜坡区包含了六盘山一部,最大高程明显较大; 淳化—洛川黄土塬区接近关中平原,最小高程明显较小。佳县—河曲黄土崂梁区与临县—五寨黄土崂梁区的主要地貌类型一致;而次要地貌类型中,临县—五寨黄土崂梁区在东部位置包含了部分山地。从总体上看,十个分区在地貌类型与地形高程信息方面,各具差异,在一定程度上表明了黄土高原重点水土流失区的地貌格局特征。

对比《黄土高原地区水土流失分区图》<sup>[22]</sup>,本分区结果在一定程度上细化了黄土丘陵沟壑第一副区,将其主要分成佳县—河曲黄土崂梁区和临县—五寨黄土崂梁区。从地貌类型角度看,佳县—河曲黄土崂梁区、临县—五寨黄土崂梁区和子长—绥德黄土崂区在一定程度上反映了第一副区内的地貌格局特征。而庆阳—长武黄土塬区和淳化—洛川黄土塬区的集合对应了黄土高原沟壑区。黄土丘陵林区的分布主要对应了华池—富县黄土覆盖中山

表 4 空间预测精度评价参数表  
Tab. 4 The precision parameters of spatial interpolation

流域面积 高程积分	平均误差 (ME)	标准平均值 (MSE)	平均标准误差 (ASE)	均方根误差 (RMSE)	标准均方根 (RMSSE)
全流域	0.0010	0.0184	0.0601	0.0521	0.8796
流域边界线	-0.0003	-0.0215	0.0705	0.0591	0.7909
沟谷网络	0.0005	0.0209	0.0598	0.0547	0.9075
主沟谷	0.0004	0.0160	0.0569	0.0550	0.9492
全流域—沟谷网络	-0.0002	-0.0098	0.0468	0.0403	0.8569
沟谷网络—主沟谷	0.0004	0.0225	0.0382	0.0332	0.8743
流域边界—全流域	-0.0002	-0.0123	0.0364	0.0316	0.8632
全流域—主沟谷	0.0003	0.0061	0.0610	0.0553	0.9027



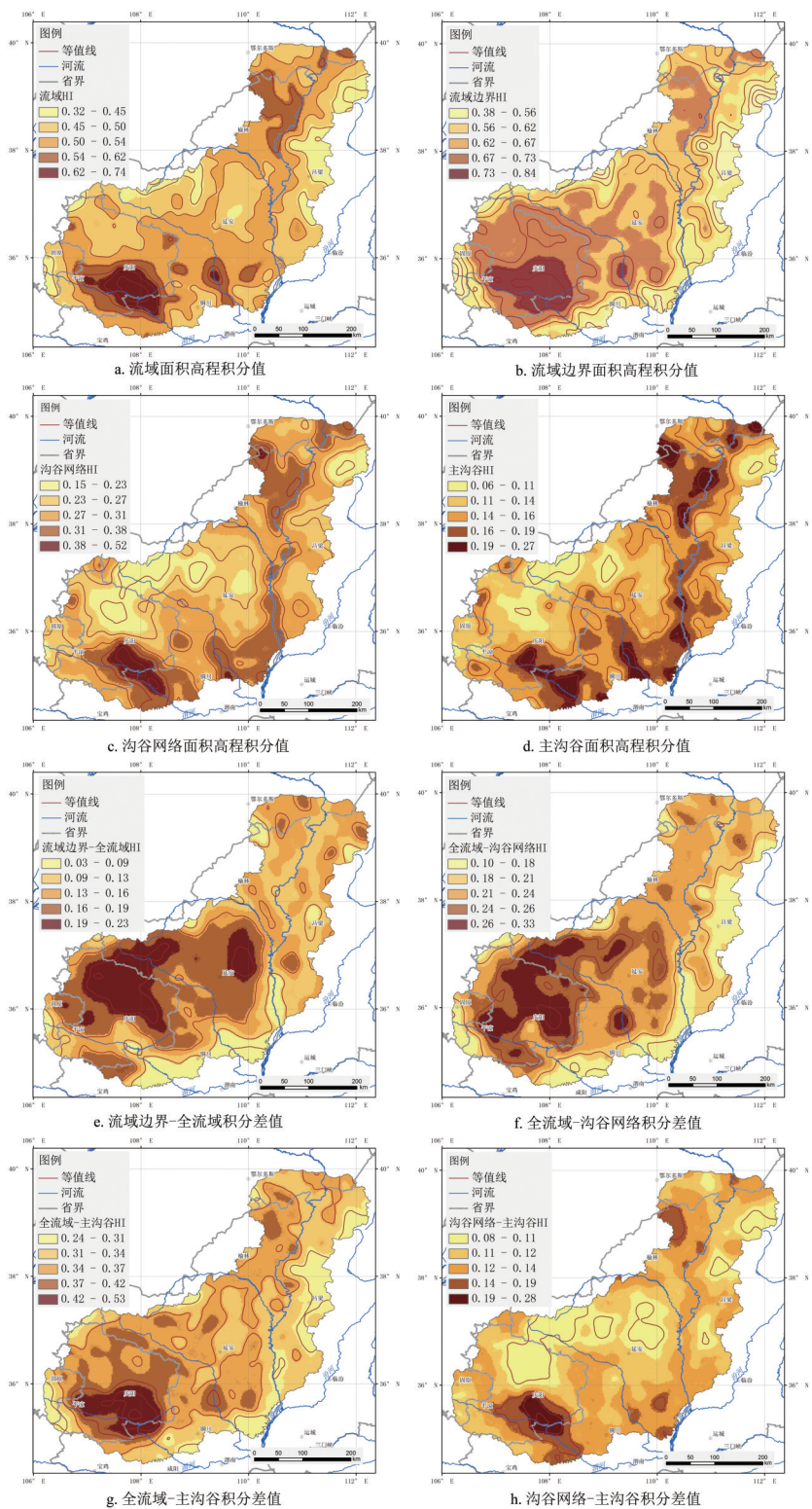


图6 流域面积高程积分各要素空间分异

Fig. 6 The spatial variation of each landform feature HI

区和安塞—延长黄土崩梁区，以及吉县—吴堡黄土残塬区南部部分区域。黄土丘陵沟壑第五副区则大致表示为环县—靖边黄土斜梁区及固原—定边黄土斜梁区的北部。在这里，黄土丘陵沟壑第二副区分布较为复杂，包括了吉县—吴堡黄土残塬区、安塞—延长黄土崩梁区、环县—靖边黄土斜梁区和固原—定边黄土斜梁区的部分区域。总体而言，本分区在一定程度上符合了原水土流失分区的基本结构，同时，又依据面积高程积分的指标，对其有一定的细化。

依据《黄土高原地区输沙模数分区图》<sup>[22]</sup>，佳县—河曲黄土崩梁区和临县—五寨黄土崩梁区的共同边界较为贴近于输沙模数 20 000 t/km<sup>2</sup>·a 的分区界；而其南部与子长—绥德黄土崩区、吉县—吴堡黄土残塬区的边界亦

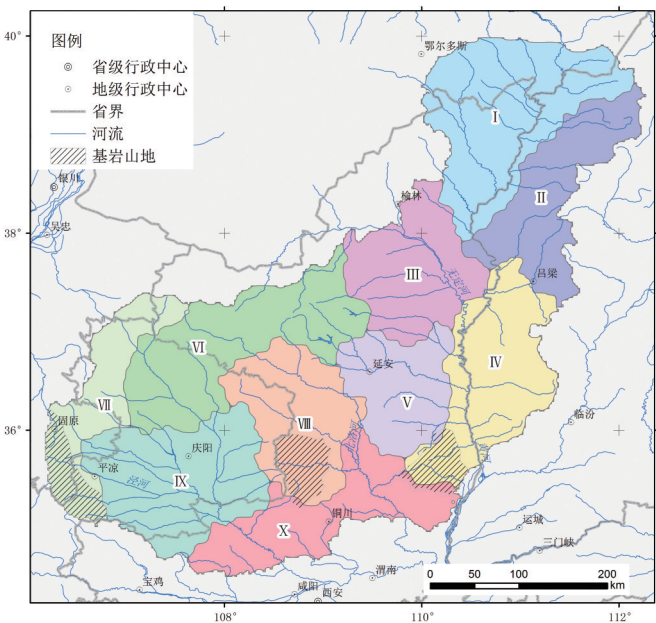


图 7 基于流域面积高程积分的黄土高原重点水土流失区分区图  
Fig. 7 Spatial division based on HI in loess area

表 5 基于面积高程积分的地貌分区特征表

Tab. 5 Characteristics of spatial division based on HI						
分区 编号	最大高程 (m)	最小高程 (m)	平均高程 (m)	主要分布 地貌类型	次要分布 地貌类型	其他情况
I	1904	697	1180.3	黄土崩梁	黄土斜梁	东部分布中山,西部分布沙地
II	2791	657	1380.1	黄土崩梁	黄土覆盖及喀斯特 中山(吕梁山)	分布有较多河谷平原与河流阶地
III	1482	632	1110.4	黄土崩	黄土崩梁	北部分布有部分沙丘
IV	2037	377	1090.5	黄土塬	侵蚀剥蚀及黄土覆 盖中山(黄龙山)	东部分布有喀斯特地貌,北部部分 分布黄土崩
V	1619	679	1146.7	黄土崩梁	黄土覆盖中山 (黄龙山)	东部分布有部分黄土塬、残塬
VI	1895	1073	1448.9	黄土斜梁	黄土崩梁	北部分布有部分沙丘,志丹县北部 分布有部分中山
VII	2913	1246	1724.5	黄土斜梁	黄土崩梁	西南部分布有中山,为六盘山一部, 东北部分布有部分黄土塬
VIII	1835	861	1359.6	中山(子 午岭)	黄土斜梁	北部分布有部分黄土崩梁
IX	1839	829	1287.3	黄土塬	黄土斜梁	东北部与南部分布有部分中山
X	1834	352	1027.3	黄土塬	黄土斜梁	中部分布中山,为子午岭一部

表 6 基于面积高程积分的地貌分区命名

Tab. 6 Nomenclature of each spatial division

分区编号	分区命名	分区编号	分区命名
I	佳县—河曲黄土崩梁区	VI	环县—靖边黄土斜梁区
II	临县—五寨黄土崩梁区	VII	固原—定边黄土斜梁区
III	子长—绥德黄土崩区	VII	华池—富县黄土覆盖中山区
IV	吉县—吴堡黄土残塬区	IX	庆阳—长武黄土塬区
V	安塞—延长黄土崩梁区	X	淳化—洛川黄土塬区

较为符合 15 000~20 000 t/km<sup>2</sup>.a 的界线。华池—富县黄土覆盖中山区的北部与环县—靖边黄土斜梁区的边界较接近于 10 000~15 000 t/km<sup>2</sup>.a 的边界。而庆阳—长武黄土塬区则完整包含了南部塬区 10 000~20 000 t/km<sup>2</sup>.a 的区域。总体上,这两种分区具有一定的耦合关系。

## 5 结论

(1) 面积高程积分是一种具有明确物理含义与深刻地貌学意义的宏观地形指标,对于指示流域地貌的发育阶段具有重要作用。研究表明,黄土高原重点水土流失区总体上处于流域地貌发育阶段的壮年期。基于面积高程积分的地貌区域划分结果,与水土流失分区和输沙模数分区具有较好的耦合关系,对于认识黄土高原空间分异格局具有重要意义。

(2) DEM 分辨率对面积高程积分影响较小,其积分值普遍较为稳定。随着小流域的面积逐渐增大,面积高程积分值体现出一种收敛的态势。在黄土高原,一般 10 km<sup>2</sup> 阈值的小流域面积高程积分达到基本稳定。本文提出以地貌对象作为面积高程积分的分析对象,发现流域面—正地形—沟沿线、山顶点—山脊线—流域边界这两组组内面积高程积分值具有较强的相关性。流域边界、沟谷网络和主沟谷线等三类地貌对象的面积高程积分,可对完整流域面积高程积分分析的理论与方法进行有效补充。

(3) 流域地貌的发育受到多种要素的综合影响,以面积高程积分为主要指标所进行的黄土地貌分区,只从一个侧面来反映黄土高原地貌形态的空间分异,但为从整体上研究黄土地貌的空间格局及发育特征提供了重要理论与方法支撑。

## 参考文献 (References)

- [1] Zhou Chenghu. A dictionary of Geomorphology. Beijing: China Water & Power Press, 2006. [周成虎. 地貌学辞典. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.]
- [2] Strahler A N. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. Geological Society of America Bulletin, 1952, 63: 1117-1142.
- [3] Harlin J M. Statistical moments of the hypsometric curve and its density function. Mathematical Geology, 1978, 10(1): 59-71.
- [4] Harrison C G A, Brass G W, Saltzman E et al. Sea level variations, global sedimentation rates and the hypsographic curve. Earth and Planetary Science Letters, 1981, 54: 1-16.
- [5] Harrison C G A, Miskell K J, Brass G W et al. Continental hypsography. Tectonics, 1983, 2: 357-377.
- [6] Willgoose G, Hancock G. Revisiting the hypsometric curve as an indicator of form and process in transport limited catchments. Earth Surface Processes and Landforms, 1998, 23: 611-623.
- [7] Masek J G, Isacks B L, Gubbels T L et al. Erosion and tectonics at the margins of continental plateaus. Journal of Geophysical Research, 1994, 99: 13941-13956.
- [8] Montgomery D R, Balco G. Climate, tectonics, and the morphology of the Andes. Geology, 2001, 29: 579-582.
- [9] Walcott Rachel C, Summerfield M A. Scale dependence of hypsometric integrals: An analysis of southeast African basins. Geomorphology, 2008, 96: 174-186.
- [10] Chen Yanjie, Zheng Guangyou, Song Guocheng. Influence of area and space dependence for hypsometric integral and its geological implications. Journal of Geographical Science (Taiwan, China), 2005, 39: 53-69. [陈彦杰, 郑光佑, 宋国城. 面积尺度与空间分布对流域面积高度积分及其地质意义的影响. 地理学报 (中国台湾), 2005, 39: 53-69.]
- [11] 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. Geomorphology, 1992, 5: 77-114.
- [12] Hurtrez J E, Sol C, Lucazeau F. Effect of drainage area on hypsometry from an analysis of small-scale drainage basins in the Siwalik Hills (central Nepal). Earth Surface Processes and Landforms, 1999, 24: 799-808.
- [13] Azor A, Keller E A, Yeats R S. Geomorphic indicators of active fold growth: South Mountain-Oak Ridge anticline, Ventura basin, southern California. Geological Society of America Bulletin, 2002, 114: 745-753.
- [14] Chen Y C, Sung Q, Cheng K. Along-strike variations of morphotectonic features in the western foothills of Taiwan: Tectonic implications based on stream-gradient and hypsometric analysis. Geomorphology, 2003, 56: 109-137.
- [15] Zhao Hongzhuang, Li Youli, Yang Jingchun et al. Geomorphology characteristic and tectonic response of the northern



- Tianshan represented by hypsometric integral. *Journal of Mountain Science*, 2009, 27(3): 285-292. [赵洪壮, 李有利, 杨景春 等. 天山北麓流域面积高度积分特征及其构造意义. *山地学报*, 2009, 27(3): 285-292.]
- [16] Zhao Hongzhuang, Li Youli, Yang Jingchun et al. Influence of area and space dependence for hypsometric integral and its geological implications. *Geographical Research*, 2010, 29(2): 271-282. [赵洪壮, 李有利, 杨景春 等. 面积高度积分的面积依赖与空间分布特征. *地理研究*, 2010, 29(2): 271-282.]
- [17] Ai Nanshan. Comentropy in erosional drainage system. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1987, 1(2): 1-8. [艾南山. 侵蚀流域系统的信息熵. *水土保持学报*, 1987, 1(2): 1-8.]
- [18] Ai Nanshan, Yue Tianxiang. Second discussion of the comentropy of drainage-system. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1988, 2(4): 1-9. [艾南山, 岳天祥. 再论流域系统的信息熵. *水土保持学报*, 1988, 2(4): 1-9.]
- [19] Li Qiang, Lu Zhongchen, Yuan Baoyin. Quantitative study of the stage of geomorphological evolution. *Acta Geographica Sinica*, 1990, 45(1): 110-120. [励强, 陆中臣, 袁宝印. 地貌发育阶段的定量研究. *地理学报*, 1990, 45(1): 110-120.]
- [20] Xin Zhongbao, Xu Jiongxin, Ma Yuanxu. Hypsometric integral analysis and its sediment yield implications in Loess Plateau, China. *Journal of Mountain Science*, 2008, 26(3): 356-363. [信忠保, 许炯心, 马元旭. 黄土高原面积高程分析及其侵蚀地貌学意义. *山地学报*, 2008, 26(3): 356-363.]
- [21] Liao Yishan, Cai Qiangguo, Qin Fen et al. Study on topographic evolution and the eroding trend in hilly loess areas, north China. *Journal of Mountain Science*, 2008, 26(3): 347-355. [廖义善, 蔡强国, 秦奋 等. 基于DEM黄土丘陵沟壑区不同尺度流域地貌现状及侵蚀产沙趋势. *山地学报*, 2008, 26(3): 347-355.]
- [22] Bureau of Upper and Middle Yellow River. *Atlas of Soil and Water Conservation in the Yellow River Basin*. Beijing: Earthquake Press, 2012. [黄河上中游管理局. *黄河流域水土保持图集*. 北京: 地震出版社, 2012.]
- [23] Lu Zhongcheng, Jia Shaofeng, Huang Kexin et al. *Watershed Landform System*. Dalian: Dalian Press, 1991. [陆中臣, 贾绍凤, 黄克新 等. *流域地貌系统*. 大连: 大连出版社, 1991.]

## Spatial variation of hypsometric integral in the Loess Plateau based on DEM

ZHU Shijie, TANG Guo'an, LI Fayuan, XIONG Liyang

(Key Laboratory of Virtual Geographic Environment, Ministry of Education, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** Hypsometric integral is a terrain analysis factor with apparent physical and geomorphologic meanings which could reflect the landform erosion stage and evolution process. As a macroscopic parameter and method in terrain analysis, the applications of hypsometric integral could reveal the quantitative characteristic of landform evolution in catchment scale. In this paper, 5 m resolution DEMs and 3 arc-second resolution SRTM DEMs are used respectively to identify the impact factors of HI and its spatial variation in the Loess Plateau. Firstly, the geomorphologic meaning is discussed and summarized. The effect of DEM resolution and the analysis area in HI calculating is probed. With different DEM resolutions, the HI values derived could keep almost the same. When the area of catchment reaches 10 km<sup>2</sup>, the HI tends to be stable, which is regarded as a critical area for extracting HI in this study. Then, the geomorphic feature HI is proposed and the correlation of each kind of HI is calculated. There exist two feature groups in which the correlation coefficient is rather large. They are respectively catchment HI, positive terrain HI, shoulder line HI and peak HI, ridge line HI, and catchment boundary HI. Finally, the landform division based on HI is created through multiresolution segmentation in loess area. The coupling relationships exist in this division and water & soil loss map, sediment transport value map. The division in this paper refines the original map to a certain extent.

**Key words:** hypsometric integral; spatial variation; landform division; Loess Plateau