

引用格式:雷雪,周毅,李阳,等.基于DEM的黄土地貌逼近度因子构建及特征分析[J].地球信息科学学报,2020,22(3):431-441. [Lei X, Zhou Y, Li Y, et al. Establishment and feature analysis of loess geomorphology proximity indexes based on DEM[J]. Journal of Geo-information Science, 2020,22(3):431-441.] DOI:10.12082/dqxxkx.2020.190495

基于DEM的黄土地貌逼近度因子构建及特征分析

雷雪,周毅*,李阳,王泽涛

陕西师范大学地理科学与旅游学院,西安 710119

Establishment and Feature Analysis of Loess Geomorphology Proximity Indexes based on DEM

LEI Xue, ZHOU Yi*, LI Yang, WANG Zetao

School of Geography Science and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China

Abstract: The gully source point is the most active part on the shoulder line. The spatial length of streamlines from the gully source point to the upstream watershed boundary line and the downstream gully line is an important identifications for spatial structure of the loess shoulder line, watershed boundary line and gully line. Proximity degree of gully source point to watershed boundary line spatially is a key point for quantifying the geomorphological development process in loess basin. To explore the loess landform areas watershed gully source point to approach watershed boundary line, reveal the loess watershed landscape development process and the method of main erosion processes. In this paper, A core factor of quantifying the three line spatial structural: Proximity Index (PI) was established from horizontal and vertical dimensions, including Horizontal Proximity Index (HPI) and Vertical Proximity Index(VPI). 42 study sites of 16 geomorphic types in the Loess Plateau of northern Shaanxi based on the digital elevation model data with 5 m resolution were selected and the spatial differentiation of their mean values (MHPI, MVPI) in the Loess Plateau of northern Shaanxi was discussed by using of the digital terrain analysis method. Besides, 4 typical watersheds including 5 whole gully levels were selected from 42 sites as the key study areas in Chunhua, Yijun, Ganquan, and Suide which located in loess tableland, loess residual tableland, loess ridge, and loess hill respectively in the north-south sequence. The Mean Proximity Index Variability (MPIV) of key study sites was calculated in the watershed scale. Results show that: ① There is a strong spatial autocorrelation of the Mean Proximity Index(MPI) in the Loess Plateau of northern Shaanxi. MHPI presents a trend of increasing firstly and then decreasing in the north-south sequence, and gradually decreasing in the east-west direction. MHPI reaches the maximum in the valley hilly area along the Yellow River. MHPI decreases firstly and then increases from southwest to northeast, and gradually decreases from northwest to southeast, and reaches the minimum in the Loess tableland area of Weibei region; ② The positive and negative MHPI values in watershed scale are sensitively related to loess tableland and hilly gully regions; ③ MHPI and MVPI of the 4 key sample areas are consistent with other terrain indexes in the

收稿日期:2019-09-05;修回日期:2020-02-02.

基金项目:国家自然科学基金项目(41871288、41930102);中央高校基本科研业务费专项资金资助(GK202003064)。[**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China, No.41871288, 41930102; The Fundamental Research Funds for the Central Universities, No.GK202003064.]

作者简介:雷雪(1993—),女,四川达州人,硕士生,主要从事DEM数字地形分析研究。E-mail: leixue@snnu.edu.cn

*通讯作者:周毅(1984—),男,河南南阳人,副教授,主要从事GIS数字地形分析研究。

E-mail: zhoyuilucky@snnu.edu.cn

north-south sequence. The MHPI of 104 external confluence region has a good correlation with the average slope ($P=0.43$, $a<0.001$), while the MVPI has a strong correlation with the hypsometric integral ($P=0.75$, $a<0.001$). The Mean Proximity Indexes (MPI) comprehensively take into consideration the spatial relationship of the three typical structural control lines in the Loess Plateau and have obvious indication significance for the development degree of the loess landform.

Key words: DEM; Loess Plateau of northern Shaanxi; gully source point; watershed boundary line; proximity index; digital terrain analysis; terrain factor; spatial differentiation

*Corresponding author: ZHOU Yi, E-mail: zhouyilucky@snnu.edu.cn

摘要: 沟谷源点作为沟沿线上最为活跃的部位,其分别到上游分水线、下游沟谷线的流线空间比对关系,是表征三线空间结构的重要突破口。它在空间上向流域分水线逼近的程度,是量化黄土流域地貌系统发育程度的重要切入点。为探究黄土地貌区流域沟谷源点向流域分水线逼近的程度,揭示黄土流域地貌发育进程及该进程所表现的主要侵蚀方式,本文从水平和垂直2个维度,构建量化三线空间结构关系的核心因子——逼近度(PI),其中包括水平逼近度(HPI)和垂直逼近度(VPI),基于5 m分辨率数字高程模型,在陕北黄土高原遴选了包含16种地貌类型的42个样区,利用数字地形分析方法,探讨其平均值(MHPI, MVPI)的空间分异规律。另外,选择其中南北序列分别代表黄土塬、残塬、梁状丘陵沟壑和峁状丘陵沟壑区的淳化、宜君、甘泉和绥德4个地区,完备包含一至五级别沟谷的典型流域为重点实验样区,探讨陕北黄土高原流域尺度平均逼近度变异指数(MPIV)序列性特征。实验结果表明:① 陕北黄土高原平均逼近度(MPI)存在强烈的空间自相关, MHPI在南北序列上先增大后减小,东西方向上逐渐减小,在黄河沿岸峡谷丘陵区 MHPI 达到最大; MVPI 由西南—东北先减小后增加,由西北—东南逐渐减小,在渭北黄土台塬区达到最小;② 在流域尺度上, MPIV 值的正负与黄土塬区、丘陵沟壑区敏感相关;③ 4个重点样区 MHPI、MVPI 与其它地形因子存在南北序列上的一致性。104个外部汇流区平均水平逼近度与平均坡度相关性较好($P=0.43$, $a<0.001$),平均垂直逼近度与面积高程积分强烈相关($P=0.75$, $a<0.001$)。平均逼近度指标综合考量了黄土高原地区最典型的三条具有结构控制意义特征线的空间关系,对黄土地貌的发育程度有明显的指示性意义。

关键词: DEM; 陕北黄土高原; 沟谷源点; 流域分水线; 逼近度; 数字地形分析; 地形因子; 空间分异

1 引言

早在19世纪末20世纪初,戴维斯^[1]提出了地貌侵蚀循环理论,把地貌形态概化为构造、营力和时间的函数,将形态描述性地貌学上升为数量解释性地貌学,科学家对复杂的自然地貌发育研究进入了量化表达阶段。黄土地貌形态特征描述及其空间分布规律是解释地表塑造过程中物质转移、能量转换和揭示黄土地貌内在发育机理的关键^[2]。地形因子,是描述地貌特征数量化表达和研究的基础,也是构建地学系统模型与地表演化预测研究的重要组成部分。特别是近年来随着地理信息技术发展和高精度数据获取途径多样化,使地形因子提取方法更加完善^[3]。然而,由于黄土高原地貌的典型性和复杂性,这就要求现代地貌研究学者在充分考虑传统的、常用的地形因子同时,更要发掘能紧紧抓住黄土地貌基本、典型特征的地形因子来对现有量化因子体系进行有效补充和完善。

沟沿线逐步逼近流域分水线,是现代黄土坡面侵蚀发育最为典型的特征之一^[4]。位于沟沿线上的

沟谷源点作为能量转换和物质转移最活跃的部位,向流域分水线逼近的程度最为突出。从研究对象上看,前人对于沟谷源点的研究主要集中在包含沟谷源点的沟头界定与识别^[5],顾及地貌结构的沟头提取^[6],沟头地形特征分析^[7-8],沟头后退平均速率模型建立^[9]以及沟沿线提取^[10-11]、分类^[12]。这些研究大多以包含沟谷源点的沟头面和沟沿线为最小研究单元,而对于细部的、活跃的沟谷源点研究相对薄弱。从研究方法上看,则主要集中在包含沟谷源点的特征点簇空间结构模型构建^[13-14],沟沿线至流域分水线逼近距离方法探索^[15-16],而并未涉及沟谷源点直接逼近于流域分水线的程度研究。

在黄土高原地区野外调查及诸多学者的研究中表明,黄土沟谷系统发育有3个较为明显的进程:① 溯源侵蚀使得沟道沟谷源点位置在外部表象上逐渐后退,从指标上反映为沟谷长度和沟壑密度增大^[17-18];② 在溯源侵蚀形成纹沟、细沟后,流水对黄土沟底的侵蚀造成沟底持续向基岩下切,具体表现为沟道宽深比变化^[19-20];③ 当沟谷下切到红粘土甚至坚硬基岩时,下切开始减缓,整个沟体开始向外

扩张,表现为沟沿线逐步逼近流域分水线^[4,21]。这3个进程在黄土高原整个发育阶段可同时表现,在不同阶段,3个进程表现出各自的主导力量,而这种不同阶段主导力量的量化因子尚未健全。

本文基于高分辨率数字高程模型(DEM)和与之匹配的数字正射影像(DOM),利用GIS空间分析技术与数字地形分析方法,探究了沟谷线、沟沿线、流域分水线空间结构关系,设计了科学量化三线逼近程度的因子和模式化求算方法。通过研究该因子在陕北黄土高原典型地貌区垂直和水平2个维度上的分布特征及逼近度变异,来探讨逼近度因子的空间分异规律和揭示地貌发育的主导因子。

2 实验区概况与数据源

本文选取陕北黄土高原(34°47'N—39°33'N, 106°37'E—111°15'E)具有明显沟蚀特征的16种地貌类型中42个完整小流域作为实验样区(图1)。为探究逼近度因子在陕北黄土高原不同地貌类型下的变异特征,特选取42个样区中南北序列上分别代表黄土塬、残塬、梁状丘陵沟壑和峁状丘陵沟壑区的淳化、宜君、甘泉、绥德的4个5级小流域为重点样区(图1、表1)。实验数据为2009年陕西省测绘局生产的1:10 000比例尺5 m分辨率DEM以及与DEM同时期拍摄并严格配准的1 m分辨率DOM数据。

3 逼近度因子构建及分析

3.1 特征点、线提取

明确汇流网络与沟谷网络的概念是正确提取特征线的前提。从定义、地学意义、空间分布的角度,沟谷线与汇流线、沟谷源点与汇流源点都存在明显不同。沟谷源点是沟谷上游起点(图2),由沟谷上游三维形态结构确定。汇流源点的确定并不完全依赖于地表形态结构,它与径流过程有较大的

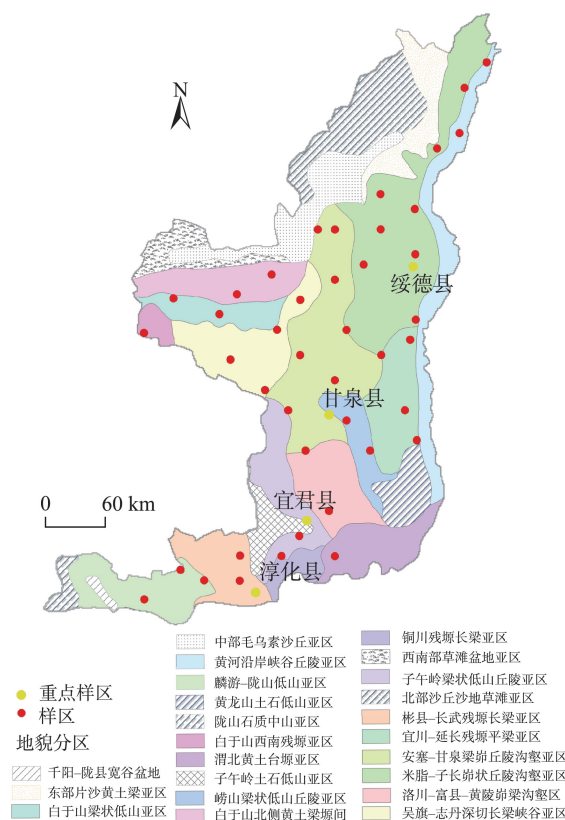


图1 陕北黄土高原42个实验样区示意

Fig. 1 Location of 42 study areas in the Loess Plateau of northern Shaanxi

关系,可能拓展到沟谷源点以上未被侵蚀的宽浅洼地,甚至分水线。

沟谷源点是汇流线与沟沿线的交点,沟沿线以下的主汇流线为沟谷线^[22],基于42个样区DEM,利用ArcGIS软件,进行水文与形态学分析,提取地形结构控制线;汇流阈值的大小决定着沟谷密集程度和沟谷级别^[23],本研究使用Strahler河网分级平均分支比趋于稳定的方法确定最佳阈值提取沟谷^[24],根据水土保持综合治理规划,结合DOM目视解译,手动剔除小于200 m的沟谷和伪沟谷,得到初始沟谷网络(图3(a));借鉴同一坡面上下游栅格坡度对比算法提取沟沿线^[25](图3(b));利用沟谷线和沟沿线路层,区分继承性沟谷^[26-27]和现代黄土侵蚀的沟

表1 重点样区基础信息

Tab. 1 Key sample areas basic information

县城	地貌类型	纬度/°	面积/km ²	平均坡度/°	相对高差/m
淳化	黄土塬	34.88	37.90	14.33	545
宜君	黄土残塬	35.13	19.37	19.49	335
甘泉	黄土梁状丘陵沟壑区	36.21	19.34	26.15	282
绥德	黄土峁状丘陵沟壑区	37.58	12.35	29.27	320

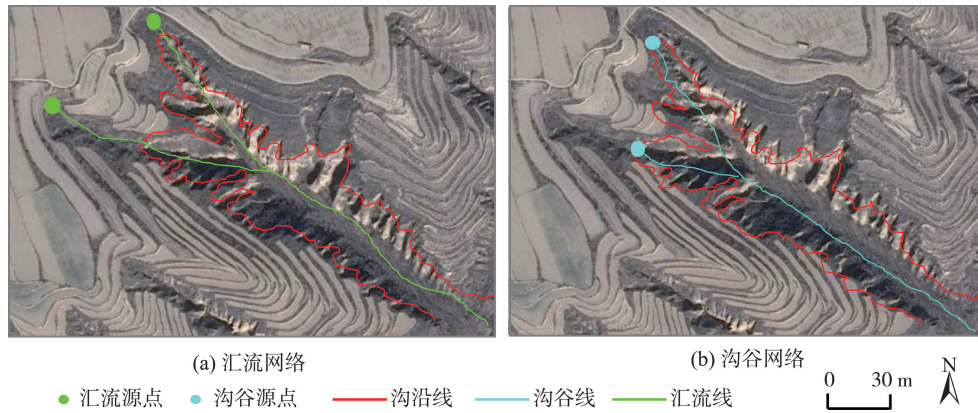


图2 汇流网络与沟谷网络特征点、线空间分布

Fig. 2 Convergence network and gully network feature points and lines spatial distribution

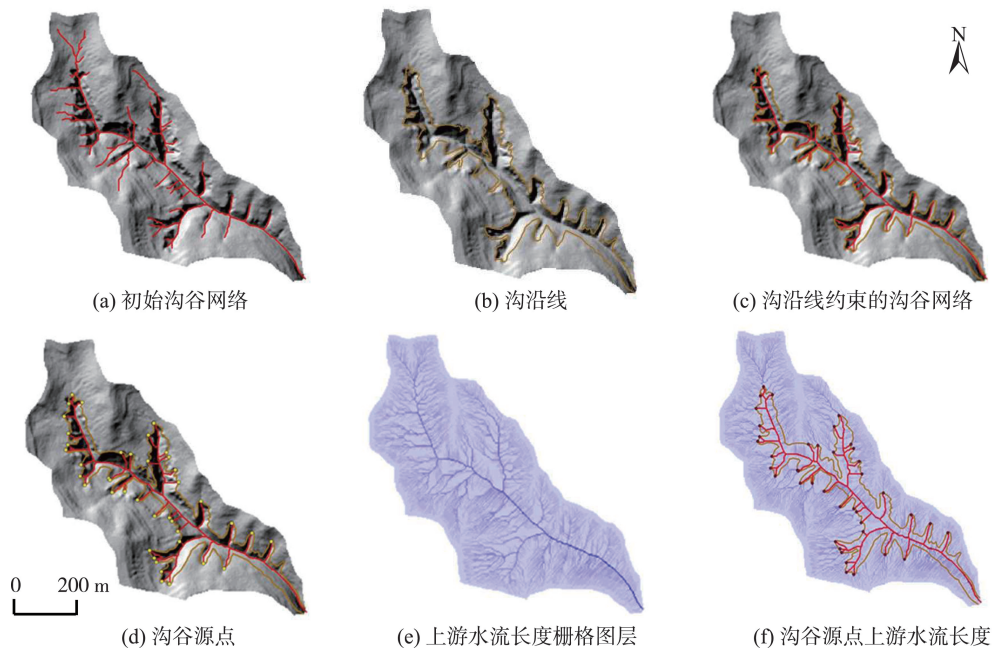


图3 黄陵南台子小流域水文分析特征点、线结果

Fig. 3 Extraction results of feature points and lines by hydrologic analysis of Nantaizi watershed in Huangling county

蚀性沟谷得到沟沿线约束的沟谷网络(图3(c)),沟沿线与沟谷网络交点即为沟谷源点^[28](图3(d));模式化求算样区上游水流长度,得到整个流域上游水流长度栅格图层(图3(e));结合上游水流长度图层,抓取沟谷源点处上游水流长度(图3(f));结合沟谷线长度和沟谷源点上游水流长度求算水平逼近度;提取沟谷源点高程值,结合原始DEM高程数据,计算垂直逼近度。

3.2 逼近度因子构建

逼近度(Proximity Index, PI)因子能较好地反映流域的发育状况。水平逼近度(Horizontal Prox-

imity Index, HPI)表示沟谷源点在水平方向上向流域分水线逼近的程度(图4),垂直逼近度(Vertical Proximity Index, VPI)表示沟谷源点在垂直方向上向流域分水线逼近的程度,其求算公式为:

$$HPI = \frac{L_1}{L_2} \quad (1)$$

$$VPI = \frac{H_1}{H_2} \quad (2)$$

式中:水平逼近度中 L_1 为沟谷长度(图4(b)); L_2 为上游水流长度与沟谷长度之和。垂直逼近度图(4(b))中 H_1 为沟底到沟谷源点的高程, H_2 为沟底到分水线的最大高程差。

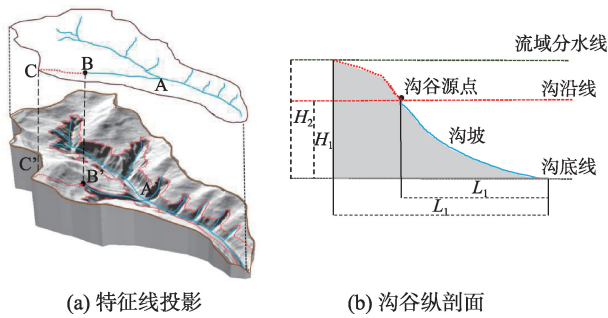


图4 水平与垂直方向逼近度指标构建原理
Fig. 4 Schematic map of horizontal and vertical proximity indexes

逼近度变异指数 (Proximity Index Variability, PIV) 用于衡量沟谷水平和垂直方向上的逼近程度谁占主导地位, 公式如下:

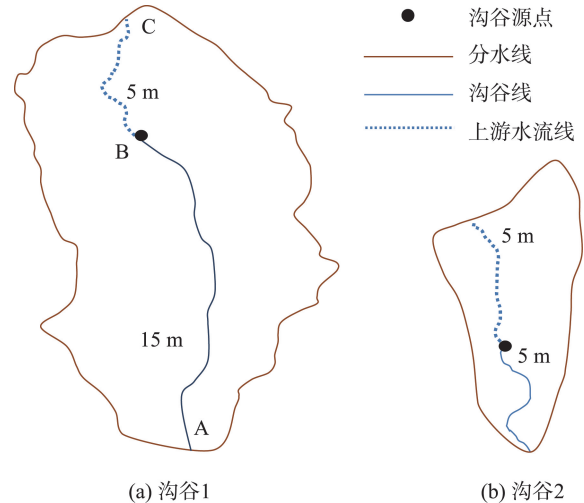
$$PIV = HPI - VPI (-1 \leq PIV \leq 1) \quad (3)$$

式中: 当 $-1 \leq PIV < 0$ 时, 垂直逼近度为主导, 说明沟谷侵蚀以下切为主, 沟谷发育属于早期; 当 $0 < PIV \leq 1$ 时, 水平逼近度为主导, 说明沟谷侵蚀以沟头溯源侵蚀和沟沿线拓展的侧蚀为主, 沟谷发育已到达老年阶段; 当 PIV 越趋近于 -1 或 1 时, 表示沟谷逼近度变异显著, 沟谷发育越处于早年期早期或晚年期晚期; 当 PIV 趋近于 0 时, 表明各种侵蚀方式综合作用于沟谷, 沟谷发育处于壮年时期。

由于黄土沟道系统的复杂性, 沟谷线、沟沿线、分水线间的逼近因子构建不能简单的概化为线与线之间的距离, 而忽略了三线所具有的空间立体组合特征。已有研究中所涉及到的逼近距离 (Proximity Distance, PD) 表示沟谷源点到分水线的上游流线长度, 缺乏对流域整体性评价, 并未准确反映流域的发育程度, 而逼近度则直观的反映了一条完整沟谷的沟谷线向分水线逼近的程度和沟谷的发育程度, 以水平逼近距离和水平逼近度为例 (图5), 对于发育程度不同的沟谷1和沟谷2逼近距离均为 5 m , 然而, 沟谷1的逼近度为 0.75 , 明显大于沟谷2的逼近度 0.5 , 这也正好印证了沟谷1的发育程度更高。

3.3 流域尺度逼近度因子分析

DEM数据在模型本身及其地学分析中的尺度研究一直以来都是相关应用领域的研究热点^[29]。其中数据生产过程中采样尺度, DEM模型建立过程中的分辨率尺度以及应用过程中面向地理区域的范围尺度均是学者关注的重点^[15]。地理区域范围尺度研究主要有2种方法: ① 几何中心外扩法;



注: 沟谷1: $PD=5\text{ m}$, $PI=0.75$; 沟谷2: $PD=5\text{ m}$, $PI=0.5$ 。

图5 逼近度与逼近距离对比
Fig. 5 Comparison map of proximity index and proximity distance

② 面向地理对象的方法。考虑几何中心外扩法中心点选取的不稳定性, 实际自然边界与几何范围边界吻合性小以及该方法容易忽视自然地形表面真实特征的不足。对于逼近度这一细部、微观的地形特征因子, 本研究重点关注其在流域尺度上的稳定性。

3.3.1 流域结构模式识别

要实现基于DEM的流域分析, 需要对流域地形结构进行界定。本研究采用Shreve定义的流域结构模式 (图6)^[30]。沟谷网络中每一段沟谷都有一个汇水区域, 这些区域由流域分水线来控制, 外部沟谷段对应一个外部汇流区, 内部沟谷段对应2个内部汇水区, 分布在内部沟谷段两侧^[31]。其中, 外部汇流区是沟头溯源侵蚀还未到达流域分水线的区域, 是沟头部位主要的集水区, 它位于流域分水线一定距离的下坡部位, 而这段距离是动态变化的^[32]。

3.3.2 沟谷与分水线级别确定

逼近度是沟谷源点与分水线的逼近程度, 不同

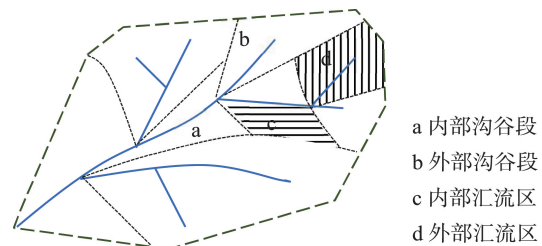


图6 流域结构模式^[31]

Fig. 6 Watershed structure model map^[31]

级别沟谷的沟谷源点逼近于不同级别分水线。因此,确定实验样区沟谷源点和与之对应级别的分水线及外部汇流区是衡量逼近度因子的关键。以宜君为例(图7),第一级子流域可作为第二级子流域的外部汇流区来计算逼近度,而不能用于第三、四或五级子流域逼近度的计算。因为,第一级子流域沟谷源点直接逼近于第二级子流域的分水线,而非第三、四、五级子流域分水线。又如,第二级子流域可作为第三和第四级子流域的外部汇流区参与计算,但不能作为第五级子流域的外部汇流区。因为第二级子流域直接逼近于第三和第四级分水线,而没有逼近第五级分水线。因此,在计算逼近度时要注意遴选与流域分水线级别所对应的外部汇流区。

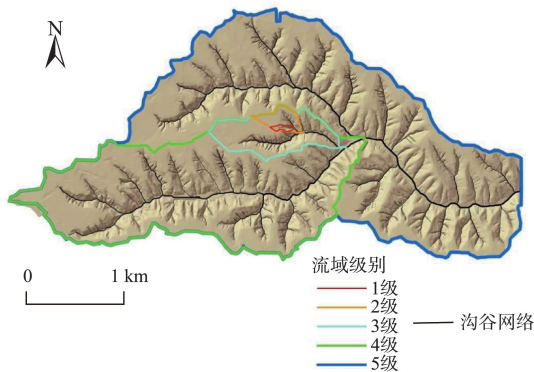


图7 宜君流域级别分级

Fig. 7 Watershed classification map of Yijun

3.3.3 外部汇流区及级别确定

综合3.3.1、3.3.2,考虑黄土塬区第2级子流域主要以切沟、冲沟为主,随机发育性高且黄土沟谷具有直线型拓展特征,这使得沟道间距存在较大的差异^[15]。为保证各样区数据的稳定性和可比性,本研究选择第3级外部汇流区作为衡量各样区逼近度指标的子流域,在进行河网分级的4个样区中,遴选淳化、宜君、甘泉、绥德外部汇流区,各31、27、21、25个,共计104个(图8)。

4 结果分析与讨论

4.1 陕北黄土高原平均逼近度空间分异特征

由数据探索分析结果,对42个样区的MHPI和MVPI进行泛克里金插值(图9),交叉验证MHPI均方根为0.04,标准平均值为0.06,标准均方根为0.88,平均标准误差为0.05;MVPI均方根为0.10,标准平均值为0.08,标准均方根为1.04,平均标准误差

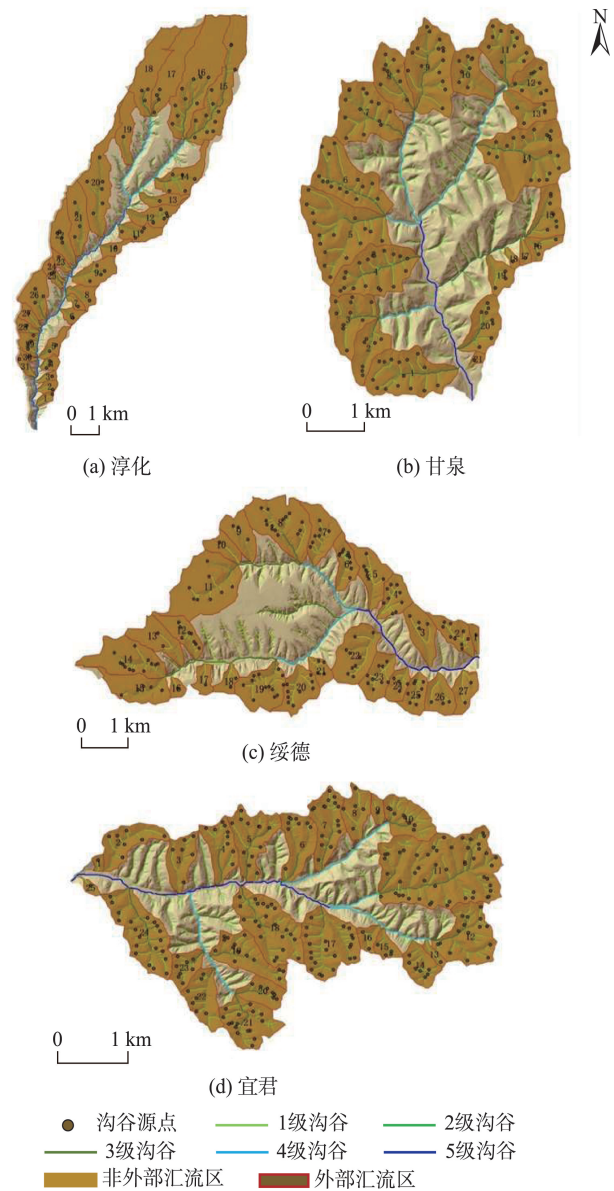


图8 4个重点样区流域尺度上逼近度因子外部汇流区分布
Fig. 8 Proximity index of external confluence region on watershed scale of four key study areas

为0.10。符合以下最优化模型标准:均方根最接近于平均标准误差,标准平均值接近于0,标准均方根最接近于1。考虑到陕北黄土高原存在沙地、草滩和基岩出露,根据图1的地貌分区将这些区域作为非研究区。

就全局态势而言,陕北黄土高原MHPI由南向北先增加后减小,从西向东逐渐增大。渭北黄土台塬亚区(图1、图9)属于沟谷发育的早期,沟谷深度相对较浅,沟沿线与塬边线存在重叠,沟谷源点上游汇流长度较短,低级别沟谷广泛发育,故MHPI最大;其次,在黄河沿岸峡谷丘陵亚区MHPI也较大,

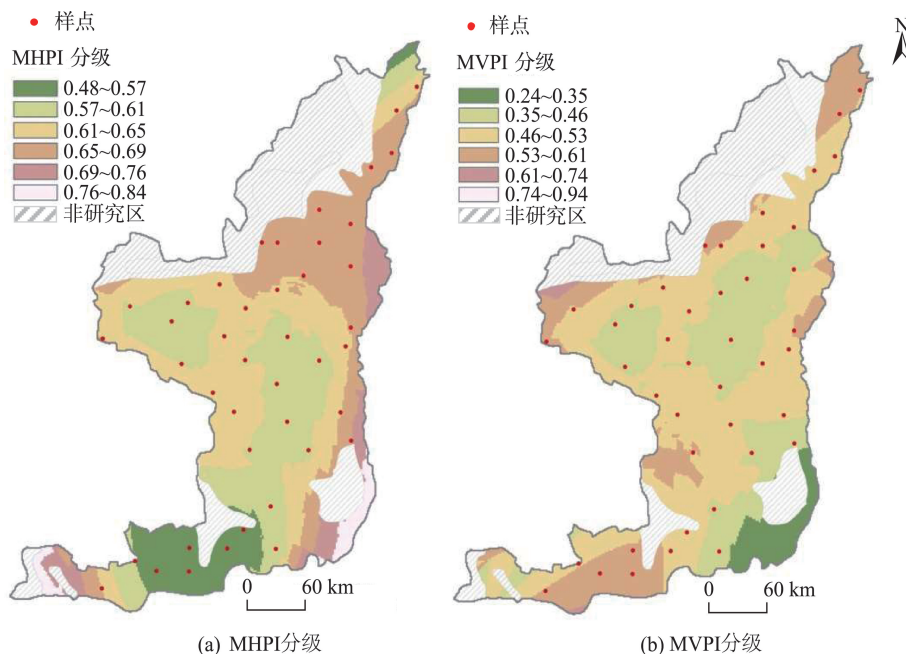


图9 陕北黄土高原MHPI、MVPI空间分异

Fig. 9 Spatial differentiation of *MHPI* and *MVPI* in the Loess Plateau of northern Shaanxi

这是由于黄河对沿岸的冲刷,携带泥沙,使得峡谷丘陵区沟谷广泛发育,沟谷线整体较长。彬县—长武残塬长梁亚区 *MHPI* 最小,以淳化为例,可以解释为在黄土塬区、残塬区沟谷源点以上的汇流区域广泛发育,使得沟谷源点上游汇流长度较大,相对而言沟谷长度较小,故 *MHPI* 较小。*MVPI* 在全局态势上由西南至东北先减小后增加,由西北向东南逐渐减小。其中在陕北黄土高原东南部的黄河沿岸峡谷丘陵区南部和渭北黄土台塬亚区达到最小(图1,图9),这与黄河沿岸峡谷丘陵区多为基岩出露,侵蚀缓慢,沟沿线约束的沟谷源点高程较低有关,台塬区则是由于整体高差较低。在黄土残塬区 *MVPI* 较大,可解释为残塬区相较台塬区而言发育程度更高,沟谷存在一定的深度,沟沿线也开始广泛发育,在部分区域与塬边线重叠,使得 *MVPI* 偏大。整体而言,陕北黄土高原南部和北部 *MHPI* 与 *MVPI* 存在相反的趋势;在中部区域有相同的趋势,特别是安塞,甘泉一带,这与该地区梁、峁状丘陵沟壑区共同发育存在一定的耦合性。

4.2 流域尺度逼近度特征分析

4.2.1 流域尺度 *MHPI*、*MVPI*

黄土高原南北序列4个样区各外部汇水区逼近度结果如图10所示,在黄土塬区和黄土残塬区 *MVPI* 大于 *MHPI* 的概率为81%,这主要是因为黄土

塬区和残塬区沟谷发育以下切为主,溯源侵蚀和侧向拓展相对较缓,沟沿线和塬边线存在一定的重叠,沟沿线约束的沟谷源点处于高程相对较高的部位,进而求算的 *MVPI* 比 *MHPI* 大。黄土梁状丘陵沟壑区和黄土峁状丘陵沟壑区 *MHPI* 大于 *MVPI* 的概率为98%,黄土梁、峁地区,沟谷发育已经相对成熟,沟谷底部已到红粘土甚至基岩部位,下切减缓,以沟谷源点后退的溯源侵蚀和以沟沿线拓展的旁向侵蚀成为沟谷侵蚀的主要方式。水平和垂直逼近度从三维空间角度客观表现了沟谷发育进程中不同阶段侵蚀的主导力量,较好的反映了不同黄土地貌类型沟谷发育的特征。

4.2.2 逼近度变异

逼近度变异分析(图11),黄土塬区平均逼近度变异为-0.18,黄土残塬区为-0.04,黄土塬区这种以下切为主的发育形式更为突出。黄土梁状丘陵沟壑区平均逼近度变异为0.12,峁状丘陵沟壑区为0.20,峁状丘陵沟壑区溯源侵蚀和沟沿线拓展更加活跃,发育更加成熟。从陕北黄土高原南北序列上看, *MPIV* (Mean Proximity Index Variability) 的正负与黄土塬区、丘陵沟壑区敏感相关,黄土塬区、残塬区、梁区和峁区外部汇流区 *MHPI* 逐渐增大, *MVPI* 逐渐减小, *MPIV* 逐渐增大,即从南至北的沟谷发育由以垂直逼近占主导的下切逐渐演化为由以水平逼近为主的沟头后退和沟沿线拓展,发育阶段也有

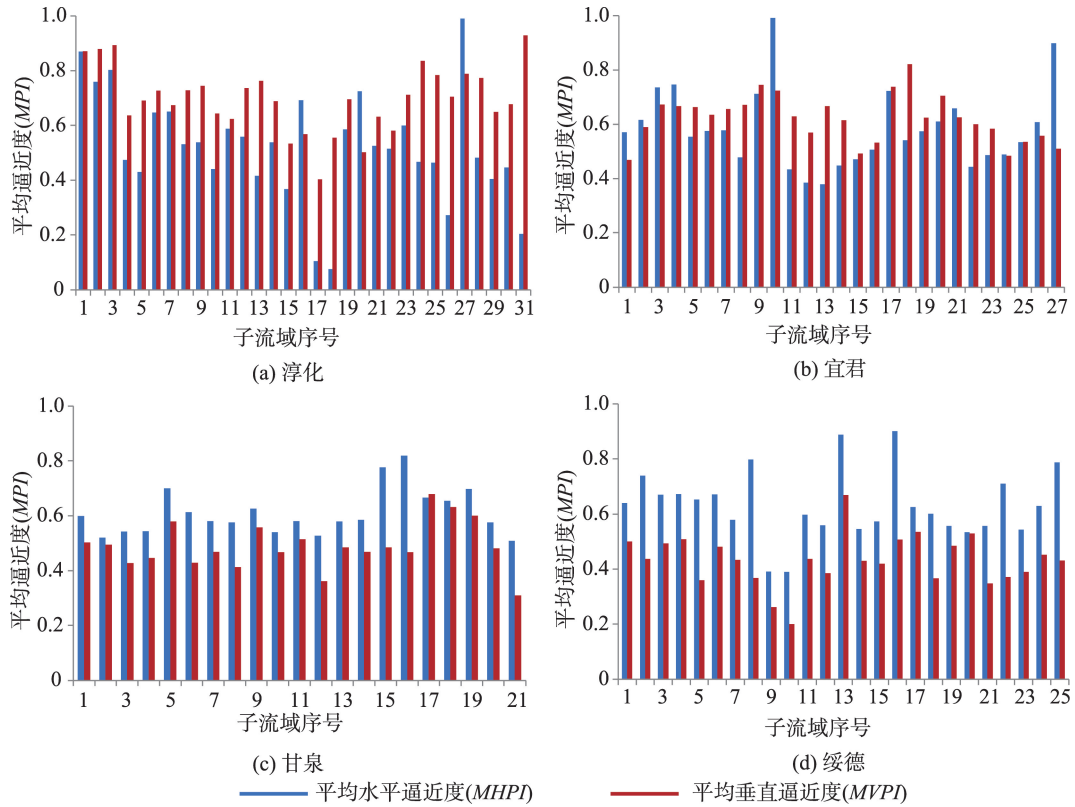


图10 陕北黄土高原4个重点样区外部汇流区MHPI和MVPI对比

Fig. 10 Comparison of MHPI and MVPI in the external confluence of the four key sample areas on the Loess Plateau of northern shaanxi

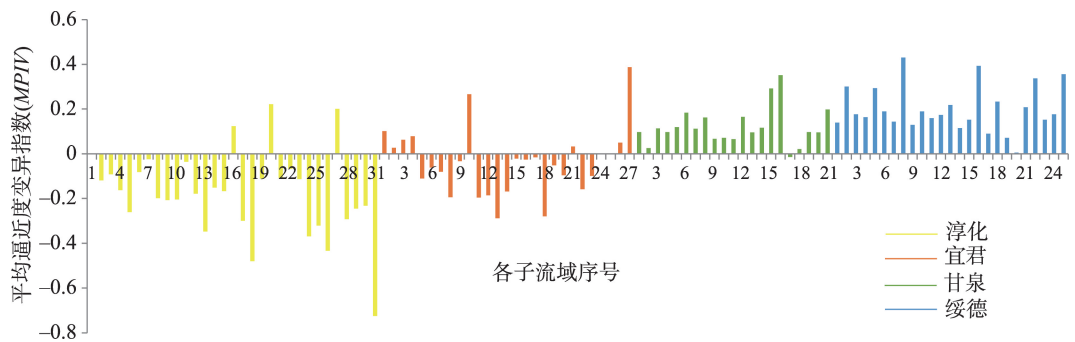


图11 陕北黄土高原4个重点研究样区外部汇流区平均逼近度变异

Fig. 11 Mean proximity index variability map of external confluence areas in four key study areas of the Loess Plateau of northern shaanxi

青年、壮年、逐渐过渡到老年期。

4.3 相关性分析

为从微观和宏观上探究陕北黄土高原南北序列上逼近度指标与地形指标、地貌发育指标之间的关系,考虑到各因子尺度稳定性,基于104个外部汇水区,对平均水平逼近度(MHPI)与平均坡度(AS)、平均垂直逼近度(MVPI)与面积高程积分(HI)进行相关性分析;对南北序列4个样区,选择平均坡度(AS)、面积(A)、沟壑密度(GD)、蚕食度(ND)^[12]和

面积高程积分(HI)与MHPI和MVPI进行南北序列一致性分析(表2)。就104个外部汇水区而言,MHPI与AS在 $\alpha < 0.001$ 的置信水平下,相关性为 $P = 0.43$,属中等相关;MVPI与HI在 $\alpha < 0.001$ 的置信水平下,相关性为 $P = 0.75$,属强相关。就南北序列4个样区而言,MHPI与MVPI变化趋势不一致,它们此消彼长,反映了黄土地貌不同发育阶段的不同主导侵蚀方式;MHPI与AS、GD、ND存在一致性。AS越大,沟谷源点上游汇水区的径流强度和径流量就越大,从而促进沟谷后退,使得沟谷在水平方向上的

表2 陕北黄土高原4个重点样区地貌发育指标值

Tab. 2 Geomorphologic development index values in for key study areas of the Loess Plateau of northern shaanxi

县城	平均水平逼近度	平均垂直逼近度	沟谷密度/(km/km ²)	蚕食度	面积高程积分	平均坡度/ ^o	面积/km ²
淳化	0.55	0.60	2.76	0.21	0.65	14.33	37.90
宜君	0.57	0.54	4.64	0.43	0.59	19.49	19.37
甘泉	0.63	0.52	7.26	0.73	0.50	26.15	19.34
绥德	0.65	0.46	10.46	0.80	0.45	29.27	12.35

逼近度增加。 GD 和 ND 均为水平面上描述沟谷侵蚀发育的指标, GD 表示单位面积上的沟谷长度^[33],沟谷长度越长,越逼近于流域分水线, $MHPI$ 增大。 ND 表示正负地形面积之比,是沟沿线向外拓展程度的量化性指标,其值越大表示负地形占比越大,沟谷发育越成熟。沟谷源点作为沟沿线上最活跃的部位,以沟沿线为突破口的 ND 和以沟谷源点为突破口的 $MHPI$ 必然存在良好的一致性。 $MVPI$ 与 A 、 HI 存在一致性。 HI 是通过计算流域水平断面面积与高程组合信息,从而反映流域地貌形态和发育程度的指标^[34],其值越大。沟谷发育越年轻。 $MVPI$ 表示沟谷在垂直方向上逼近于流域分水线,其值越大,表示流域侵蚀方式以下切为主,而流域发育早期正是下切为主要侵蚀方式,故 HI 与 $MVPI$ 存在显著一致性,前人研究表明,不同流域 HI 不受流域面积的影响^[35]。 A 和 $MVPI$,一个处于水平维度,一个处于垂直维度,两者之间的关系还有待进一步验证。

5 结论

本文利用高精度DEM数据,借助数字地形分析和形态学分析方法,遴选陕北黄土高原42个完整小流域为实验样区,其中南北序列的4个典型小流域为重点样区,从水平和垂直2个维度研究了逼近度指标在陕北黄土高原的空间分异规律,探讨了平均水平逼近度、平均垂直逼近度与其他传统地形指标和地貌发育指标之间的关系,主要结论如下:

(1)本研究以沟谷源点为突破口,建立了逼近度指标,包括水平逼近度、垂直逼近度和逼近度变异指数。相较于已有的逼近距离指标,该指标在模式化衡量沟谷线、沟沿线和流域分水线三线之间水平和垂直两个维度的空间逼近程度上具有较好的整体性和稳定性。

(2)逼近度指标在陕北黄土高原存在一定的空间分异规律, $MHPI$ 由南向北先增加后减小,从西向东逐渐增大; $MVPI$ 在全局趋势上由西南至东北先

减小后增加,由西北向东南逐渐减小;整体而言,陕北黄土高原南部和北部 $MHPI$ 与 $MVPI$ 存在相反的分异趋势,在中部区域有相同的分异趋势。

(3)黄土沟谷源点在水平和垂直方向上的结构性,在地貌发育不同阶段表现出不同的特征。在黄土塬、残塬区各子流域 $MHPI < MVPI$ 的概率为81%,其中黄土塬区 $MPIV$ 更加显著为-0.18;在黄土梁状丘陵沟壑区和黄土崩状丘陵沟壑区 $MHPI > MVPI$ 的概率为98%,黄土崩状丘陵沟壑区 $MPIV$ 更加显著为0.20;逼近度变异指数定量反映了随着沟谷不断发育,沟谷侵蚀的主导方式,其正负与黄土地貌类型密切相关。

(4)陕北黄土高原南北序列上4个样区平均坡度、沟壑密度、蚕食度与平均水平逼近度之间存在变化上的一致性。面积高程积分与平均垂直逼近度存在一致性。104个外部汇流区平均水平逼近度与平均坡度存在一定的相关性($P=0.43, a < 0.001$),平均垂直逼近度与面积高程积分存在强烈的相关性($P=0.75, a < 0.001$)。平均逼近度指标和其他地形地貌指标一样可以很好的表达陕北黄土高原沟谷的演化过程和分布规律。

(5)论文从水平和垂直两个维度构建了逼近度指标,在此基础上得到逼近度变异指标,这是对黄土高原地貌发育指标体系的补充和完善。同时,探讨这些指标的地貌学含义和在陕北黄土高原的空间分异规律,对揭示黄土小流域发育特征具有指示作用,也为进一步研究黄土高原土壤侵蚀和制定水土保持措施提供一定的借鉴。

参考文献(References):

- [1] Davis W M. The geographical cycle[J]. The Geographical Journal, 1899,14(5):481-501.
- [2] 汤国安,那嘉明,程维明.我国区域地貌数字地形分析研究进展[J].测绘学报,2017,46(10):1570-1591. [Tang G A, Na J M, Cheng W M. Progress of digital terrain analysis on regional geomorphology in China[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017,46(10):1570-1591.]

- [3] 马永明,张利华,张康,等.基于SWAT模型和多源DEM数据的流域水系提取精度分析[J].地球信息科学学报,2019,21(10):1527-1537. [Ma Y M, Zhang L H, Zhang K, et al. Accuracy analysis of watershed system extraction based on the SWAT model and multi-source DEM data [J]. Journal of Geo-information Science, 2019,21(10): 1527-1537.]
- [4] 承继成,江美球.流域地貌数学模型[M].北京:科学出版社,1986. [Cheng J C, Jiang M Q. Mathematical model of watershed geomorphology[M]. Beijing: Science Press, 1986.]
- [5] Zhu H C, Tang G A, Qian K J, et al. Extraction and analysis of gully head of loess plateau in China based on digital elevation model[J]. Chinese Geographical Science, 2014,24(3):328-338.
- [6] 江岭,汤国安,赵明伟,等.顾及地貌结构特征的黄土沟头提取分析[J].地理研究,2013,32(11):2153-2162. [Jiang L, Tang G A, Zhao M W, et al. Extraction and analysis of loess gully heads considering geomorphological structures [J]. Geographical Research, 2013,32(11):2153-2162.]
- [7] David R, William E. Source areas, drainage, and channel initiation[J]. Water Resources Research, 1989,25(8):1907-1918.
- [8] James P, Alan D, Spencer H. Channel head location with respect to geomorphologic thresholds derived from a digital elevation model: A case study in northern Thailand[J]. Forest Ecology and Management, 2006,224:147-156.
- [9] Vanmaercke M, Poesen J, Mele B V, et al. How fast do gully headcuts retreat?[J]. Earth-Science Reviews, 2016,154: 336-355.
- [10] 李敏,杨昕,陈盼盼,等.面向点云数据的黄土丘陵沟壑区沟沿线自动提取方法[J].地球信息科学学报,2016,18(7): 869-876. [Li M, Yang X, Chen P P, et al. Method of automatic shoulder line extraction in the Loess hilly area based on point cloud data[J]. Journal of Geo-information Science, 2016,18(7):869-876.]
- [11] Song X D, Tang G A, Li F Y, et al. Extraction of loess shoulder-line based on the parallel GVF snake model in the loess hilly area of China[J]. Computers & Geosciences, 2013,52:11-20.
- [12] 肖晨超,汤国安.黄土地貌沟沿线类型划分[J].干旱区地理,2007,30(5):646-653. [Xiao C C, Tang G A. Classification of valley shoulder line in Loess relief[J]. Arid Land Geography, 2007,30(5):646-653.]
- [13] 朱红春,李永胜,汤国安.面向沟谷特征点簇的空间结构模型与应用[J].地球信息科学学报,2014,16(5):707-711. [Zhu H C, Li Y S, Tang G A. The spatial structural model established for gully feature points cluster and its application[J]. Journal of Geo-information Science, 2014,16 (5):707-711.]
- [14] 朱红春,汤国安,李永胜.黄土沟谷特征点簇及其空间结构模型研究[J].地理科学,2015,35(9):1170-1175. [Zhu H C, Tang G A, Li Y S. The loess gully feature points cluster and its spatial structure model[J]. Scientia Geographica Sinica, 2015,35(9):1170-1175.]
- [15] 周毅.基于DEM的黄土高原正负地形及空间分异研究[D].南京:南京师范大学,2011. [Zhou Y. DEM based research on positive-negative terrains and their spatial variation on Loess Plateau[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2011.]
- [16] 周毅.基于DEM的黄土正负地形研究[D].南京:南京师范大学,2008. [Zhou Y. Investigation of loess positive and negative terrain based on DEMs[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2008.]
- [17] Zhu T X. Gully and tunnel erosion in the hilly Loess Plateau region, China[J]. Geomorphology, 2012,153:144-155.
- [18] Zhou Y, Lei X, Yang F, et al. Characteristics and influencing factors of proximity distance index on the northern Shaanxi Loess Plateau in China[J]. Journal of Mountain Science, 2019,16(12):2844-2855.
- [19] 严宝文,李靖,包忠谟.黄土沟谷下蚀趋势评价的指标体系研究[J].水土保持学报,2011,15(1):122-125. [Yan B W, Li J, Bao Z M. Index System for Evaluating Gully's Down-erosion Trendency in Loess Area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011,15(1):122-125.]
- [20] Hessel R, Asch T A. Modelling gully erosion for a small catchment on the Chinese Loess Plateau[J]. Catena, 2003, 54:131-146.
- [21] Kirkby M J, Bracken L J. Gully processes and gully dynamics[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2009, 34:1841-1851.
- [22] 闫国年,钱亚东,陈钟明.黄土丘陵沟壑区沟谷网络自动制图技术研究[J].测绘学报,1998,27(2):131-137. [Lv G N, Qian Y D, Chen Z M. Study of automated mapping of channel network in hilly loess region[J]. Acta geodetica et cartographica sinica, 1998,27(2):131-137.]
- [23] 李照会,郭良,刘荣华,等.基于DEM数字河网提取时集水面积阈值与河源密度关系的研究[J].地球信息科学学报,2018,20(9):1244-1251. [Li Z H, Guo L, Liu R H, et al. The relationship between the threshold of catchment area for extraction of digital river network from DEM and the river source density[J]. Journal of Geo-information Science, 2018,20(9):1244-1251.]
- [24] 雷雪,罗明良,周毅,等.基于DEM的典型地貌区河流形态特征分析[J].水文,2018,38(4):48-54. [Lei X, Luo M L,

- Zhou Y, et al. Research on river morphology characteristics in typical geomorphologic areas based on DEM[J]. *Journal of China Hydrology*, 2018,38(4):48-54.]
- [25] 周毅,汤国安,王春,等.基于高分辨率DEM的黄土地貌正负地形自动分割技术研究[J].*地理科学*,2010,30(2):261-266. [Zhou Y, Tang G A, Wang C, et al. Automatic segmentation of loess positive and negative terrains based on high resolution grid DEMs[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2010,30(2):261-266.]
- [26] Xiong L Y, Tang G A, Li F Y, et al. Modeling the evolution of loess-covered landforms in the Loess Plateau of China using a DEM of underground bedrock surface[J]. *Geomorphology*, 2014,209:18-26.
- [27] 熊礼阳,汤国安,袁宝印,等.基于DEM的黄土高原(重点流失区)地貌演化的继承性研究[J].*中国科学:地球科学*, 2014,44(2):313-321. [Xiong L Y, Tang G A, Yuan B Y, et al. Geomorphological inheritance for loess landform evolution in a severe soil erosion region of Loess Plateau of China based on digital elevation models[J]. *Science China: Earth Science*, 2014,44(2):313-321.]
- [28] 杨锋,周毅,陈旻.沟沿线约束的黄土水蚀性沟谷提取[J].*山地学报*,2016,34(4):504-510. [Yang F, Zhou Y, Chen M. Loess shoulder-line constrained method for water-worn gullies extraction on Loess Plateau[J]. *Mountain Research*, 2016,34(4):504-510.]
- [29] 秦承志,呼雪梅.栅格数字地形分析中的尺度问题研究方法[J].*地理研究*, 2014,33(2):270-283. [Qin C Z, Hu X M. Review on scale-related researches in grid-based digital terrain analysis[J]. *Geographical Research*, 2014,33(2):270-283.]
- [30] Shreve R L. Infinite topologically random channel networks [J]. *The Journal of Geology*, 1967,75(2):178-186.
- [31] 周启鸣,刘学军.数字地形分析[M].北京:科学出版社, 2006. [Zhou Q M, Liu X J. *Digital terrain analysis*[M]. Science Press: Beijing, 2006.]
- [32] Horton R. Erosional development of streams and their drainage basin; Hydrophysical Approach to Quantitative Morphology[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1945,56:275-370.
- [33] 景可.黄土高原沟谷侵蚀研究[J].*地理科学*,1986,6(4):340-347. [Jing K. A Study on gully reosion on the loess plateau[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 1986,6(4):340-347.]
- [34] 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. [Zhu S J, Tang G A, Li F Y, et al. Spatial variation of hypsometric integral in the Loess Plateau based on DEM[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2013,68(7):921-932.]
- [35] 李宗盟,高红山,潘保田,等.贺兰山水系流域数值地貌特征及其构造指示意义[J].*干旱区地理*,2012,35(3):422-429. [Li Z M, Gao H S, Pan B T, et al. Geomorphic indices of the river and drainage in Helan Mountain and its indication to tectonics[J]. *Arid Land Geography*, 2012,35(3):422-429.]