

陕北黄土高原水蚀沟谷多维度侵蚀特征量化研究

刘畅¹, 周毅^{1*}, 雷雪²

(1. 陕西师范大学地理科学与旅游学院, 西安 710119; 2. 海图信息中心, 天津 300450)

摘要: 沟谷地是黄土高原地貌形态特征变化最明显的区域, 其发育对整个黄土高原地貌发育具有重要的控制性作用。论文基于5 m分辨率的DEM数据, 在陕北黄土高原遴选包含15种地貌类型的42个样区, 以沟谷密度、水平逼近度与切割深度作为纵向、横向与垂向3个维度的代表因子, 分析了沟谷的多维发育进程、特征、空间分异及影响因素。研究结果显示: 陕北黄土高原南北方向上沟谷发育呈现由溯源侵蚀主导转向横向溯源侵蚀主导、溯源下切侵蚀主导到横向溯源侵蚀主导, 54.8%的样区各维度对整体发育进程的影响程度相近, 且86.4%处于陕北黄土高原中部地区, 即中部地区多维度发育均衡, 南北两端以溯源侵蚀与横向侵蚀为主。结合面积—高程积分分析发现沟谷发育可划分为3个阶段: 发育初期以溯源侵蚀为主, 带动下切侵蚀伴有横向侵蚀; 发育中期以溯源侵蚀为主, 伴有持续性横向侵蚀与较强下切侵蚀; 发育晚期以横向侵蚀为主, 伴有一定程度的溯源侵蚀与轻微下切侵蚀。黄土厚度对沟谷系统垂向下切侵蚀的影响最大($C_v=0.164$), 土地利用类型对沟谷系统横向侵蚀的影响较大($C_v=0.0681$), 林地对于维护各个维度的抗侵蚀能力最强, 生长茂密的草地和灌木林及作物次之, 生长稀疏的牧草和作物较差。

关键词: 数字地形分析; 沟谷发育; 多维度侵蚀特征; 土壤侵蚀; 黄土高原

陕北黄土高原以其独特的地貌形态格局吸引了国内外众多地理学者的关注, 被誉为全球最具有地学研究价值的区域之一。其中, 沟谷是黄土高原物质交换最频繁、形态变化最剧烈的区域, 其发育对整个黄土高原地貌的发育过程具有重要的控制性作用。

黄土高原沟谷地貌在发育过程中存在3个显著特征, 分别是: 溯源侵蚀引起的沟头不断前进、下切侵蚀引起的沟体持续下切和横向侵蚀引起的沟坡逐步展宽^[1-5]。迄今为止, 现有研究从构造^[6-7]、侵蚀^[8-9]、气候^[10-11]等多种视角出发对陕北黄土高原沟谷地貌的发育进程进行了探讨, 阐明了陕北黄土高原沟谷地貌发育进程的态势机制^[12], 分析了陕北黄土高原沟谷地貌的发育特征^[13]、空间分异规律^[14]及发生规律^[15], 这些研究成果进一步明确了陕北黄土

高原沟谷地貌在发育过程中的外在表现, 同时也使其具体发育状态和内在侵蚀机制更加明晰。同时, 经过多年的研究, 诸多学者从不同的角度出发, 提出构建了上百种不同的用于描述各种流域、沟谷特征的量化指标^[16]及地形因子^[17-18], 按照各自的认识对其中一些指标间的关系、类型进行了科学分类^[19-20], 并对其与水土流失等现象之间的关系进行了相关性分析^[21-22], 但是, 已有的关于沟谷系统发育的研究还未系统性地探究各维度发育进程的具体态势及各维度之间的相互影响。因此, 本文在遵循一定科学规律的前提下, 基于地貌类型及其特征, 对陕北黄土高原具有明显沟蚀特征的完整小流域进行空间上的序列采样^[23-24], 全面考虑沟谷的纵向、横向、垂向多维度侵蚀发育特征, 探究各维度发育在沟谷整体发育进程中所起到的影响程度, 以更好地

收稿日期: 2021-06-03; 修订日期: 2021-09-24。

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项目(GK202003064)。[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41871288 and 41930102; The Fundamental Research Funds for the Central Universities, No. GK202003064.]

第一作者简介: 刘畅(1997—), 女, 辽宁阜新人, 硕士生, 主要从事DEM数字地形分析研究。E-mail: 15771969698@163.com

***通信作者简介:** 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: zhouyilucky@snnu.edu.cn

引用格式: 刘畅, 周毅, 雷雪. 陕北黄土高原水蚀沟谷多维度侵蚀特征量化研究[J]. 地理科学进展, 2022, 41(4): 707-717. [Liu Chang, Zhou Yi, Lei Xue. Quantitative analysis of multi-dimensional erosion characteristics of waterworn gullies on the Loess Plateau of Northern Shaanxi. Progress in Geography, 2022, 41(4): 707-717.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2022.04.014

揭示陕北黄土高原沟谷地貌的发育态势及机制。具体方法为: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),选取沟谷密度、水平逼近度与切割深度分别作为溯源侵蚀、横向侵蚀与下切侵蚀的代表性因子,利用GIS空间分析与数字地形分析方法,分析陕北黄土高原水蚀沟谷不同维度的侵蚀发育特征,探讨与其差异性表现相关的影响因素,在此基础上揭示地形地貌发育的特征。

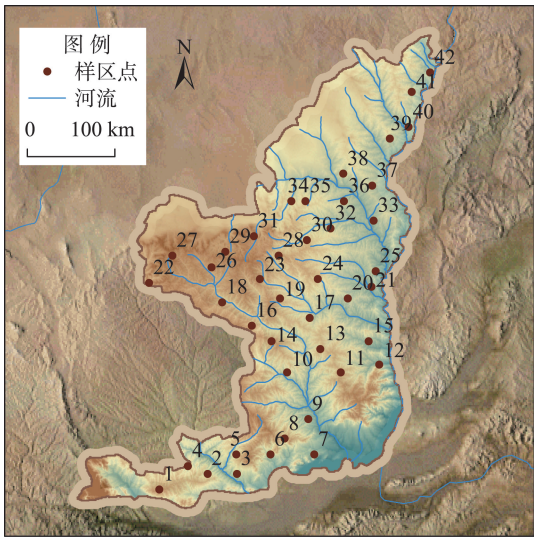
1 研究区域、数据与方法

1.1 研究区概况

本文选取陕北黄土高原具有明显沟蚀特征的15种地貌类型中的42个完整小流域作为实验样区(图1、表1)。实验数据为陕西省测绘局生产的1:10000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,地貌类型数据来源于《中国陆地1:100万数字地貌分类体系研究》^[25]。

1.2 数据来源与处理

在前人研究基础上,结合因子的地学意义遴选



注:样区点详情见表1。

图1 陕北黄土高原研究区位及样区点位

Fig.1 Location of the study area and sample sites on the Loess Plateau of Northern Shaanxi

表1 42个样区位置及地貌类型特征

Tab.1 Location of the 42 sample sites and geomorphological characteristics

样区编号	纬度/(°N)	经度/(°E)	地貌类型	样区编号	纬度/(°N)	经度/(°E)	地貌类型
1	34.73	107.41	黄土覆盖的中起伏陡中山	22	36.73	108.28	中海拔侵蚀堆积高浅谷黄土狭斜梁
2	34.98	107.78	倾斜的中海拔侵蚀堆积黄土塬	23	36.94	107.34	平坦的中海拔侵蚀堆积黄土塬
3	34.54	108.16	中海拔侵蚀堆积高深谷黄土狭斜梁	24	36.98	108.78	黄土覆盖的中起伏缓中山
4	34.9	108.03	黄土覆盖的小起伏缓中山	25	36.98	109.53	中海拔侵蚀堆积高浅谷黄土崩
5	35.10	108.41	中海拔侵蚀堆积高深谷黄土狭斜梁	26	36.90	110.22	中海拔侵蚀堆积黄土梁塬
6	35.10	108.84	黄土覆盖的中起伏缓中山	27	37.06	110.28	中海拔侵蚀堆积高浅谷黄土崩
7	34.90	108.41	倾斜的中海拔侵蚀堆积黄土塬	28	37.23	109.03	中海拔侵蚀堆积高浅谷黄土崩
8	35.10	109.41	黄土覆盖的小起伏平缓中山	29	37.27	108.34	中海拔河谷平原
9	35.29	111.09	侵蚀剥蚀小起伏缓低山	30	37.23	107.66	中海拔侵蚀堆积黄土梁塬
10	35.27	109.03	黄土覆盖的小起伏缓中山	31	37.44	108.72	中海拔侵蚀堆积高浅谷黄土狭斜梁
11	35.48	109.34	倾斜的中海拔侵蚀堆积黄土塬	32	37.40	109.41	中海拔侵蚀堆积高浅谷黄土崩
12	35.98	109.09	黄土覆盖的小起伏缓中山	33	37.52	109.72	中海拔侵蚀堆积高深谷黄土崩梁
13	35.98	109.78	黄土覆盖的中起伏缓中山	34	37.60	110.28	中海拔侵蚀堆积高浅谷黄土崩
14	36.06	110.28	侵蚀剥蚀中起伏陡中山	35	37.81	109.91	中海拔侵蚀堆积高深谷黄土崩
15	36.31	110.16	中海拔侵蚀堆积黄土残塬	36	37.81	109.41	中海拔侵蚀堆积高深谷黄土崩梁
16	36.23	109.53	黄土覆盖的中起伏平缓中山	37	37.81	109.22	中海拔侵蚀堆积高深谷黄土崩
17	36.31	108.91	黄土覆盖的中起伏缓中山	38	37.98	110.28	中海拔侵蚀堆积高深谷黄土崩
18	36.48	108.66	黄土覆盖的中起伏陡中山	39	38.10	109.91	中海拔侵蚀堆积高浅谷黄土崩梁
19	36.56	109.41	中海拔侵蚀堆积高浅谷黄土崩梁	40	38.48	110.53	中海拔侵蚀堆积高浅谷黄土崩梁
20	36.77	109.91	中海拔侵蚀堆积低浅谷黄土崩梁	41	38.60	110.78	中海拔侵蚀堆积高浅谷黄土狭斜梁
21	36.77	109.03	中海拔侵蚀堆积高浅谷黄土崩梁	42	38.98	110.84	中海拔侵蚀堆积高浅谷黄土狭斜梁

出科学、具有代表性且切合于本文研究目标的3个指标:①沟谷密度,反映区域内水平方向上沟头前进即沟谷纵向延伸程度的发育特征;②水平逼近度,反映区域内水平方向上沟谷三线(沟谷线、沟沿线、流域分水线)逼近程度即横向拓展程度的发育特征;③切割深度,反映区域内垂直方向上沟谷下切发育程度的发育特征。将上述3个指标分别作为陕北黄土高原水蚀沟谷纵向、横向与垂向的代表因子(表2)。

汇流阈值的数值设置是沟谷密集程度与沟谷级别的决定性因素,如何确定合理阈值决定了研究的准确性和可靠性^[26]。本文选用 Strahler 提出的河网分级平均分支比,在平均分支比数值趋于稳定的情况下获取最佳阈值,并使用该阈值进行网络的提取^[27]。随后,结合 DOM 数据与影像数据对获取的基础网络进行目视解译,手动剔除小于 50 m 的沟谷和伪沟谷后得到研究使用的初始沟谷网络。最后,利用目视解译得到的沟沿线数据对初始沟谷网络进行约束得到最终沟谷网络(图 2),计算得到沟谷密度。同时,提取沟沿线与沟谷网络交点得到沟谷源点^[28]。利用 ArcGIS 水文分析模块提取流域分水线,构建上游水流长度栅格图层,模式化求算样区上游水流长度;随后利用得到的上游水流长度图层获取得到沟谷源点处的上游水流长度数据;最后依据水平逼近度公式计算得到沟谷的水平逼近度数值^[29]。本文将沟谷区域确定为地表切割深度的计算范围,对其进行邻域分析得到切割深度。

在指标选取基础之上,本文以地貌学、形态学、水文学原理为理论基础,结合数字地形分析、空间统计分析和数据分析等多种分析方法,利用空间内插、数学建模等手段,从沟谷的多维视角出发,探索陕北黄土高原水蚀沟谷发育的空间差异性。

1.3 研究方法

(1) 标准化:又称为离差标准化,使结果值映射到[0, 1]之间。消除指标之间的量纲影响,以解决数据指标之间的可比性。

$$x' = \frac{x - \min(x)}{\max(x) - \min(x)} \tag{1}$$

式中: x 为序列值 $x_1, x_2, \cdots, x_n; x' \in [0, 1]$ 且无量纲。

(2) 离散系数:又称变异系数,是衡量资料中各观测值离散程度的一个统计量。离散系数大,说明数据的离散程度也大;离散系数小,说明数据的离散程度也小。

$$Cv = \frac{\delta}{\mu} \tag{2}$$

式中: Cv 为离散值, δ 为标准差, μ 为平均值。

(3) 影响程度:反映各指标对于整体发育进程所起到的各自影响程度。

$$L_x = \frac{x'}{HPI + G_i + D_i} \tag{3}$$

式中: L_x 为影响程度; HPI 为水平逼近度, G_i 为切割深度, D_i 为沟谷密度。

2 结果与分析

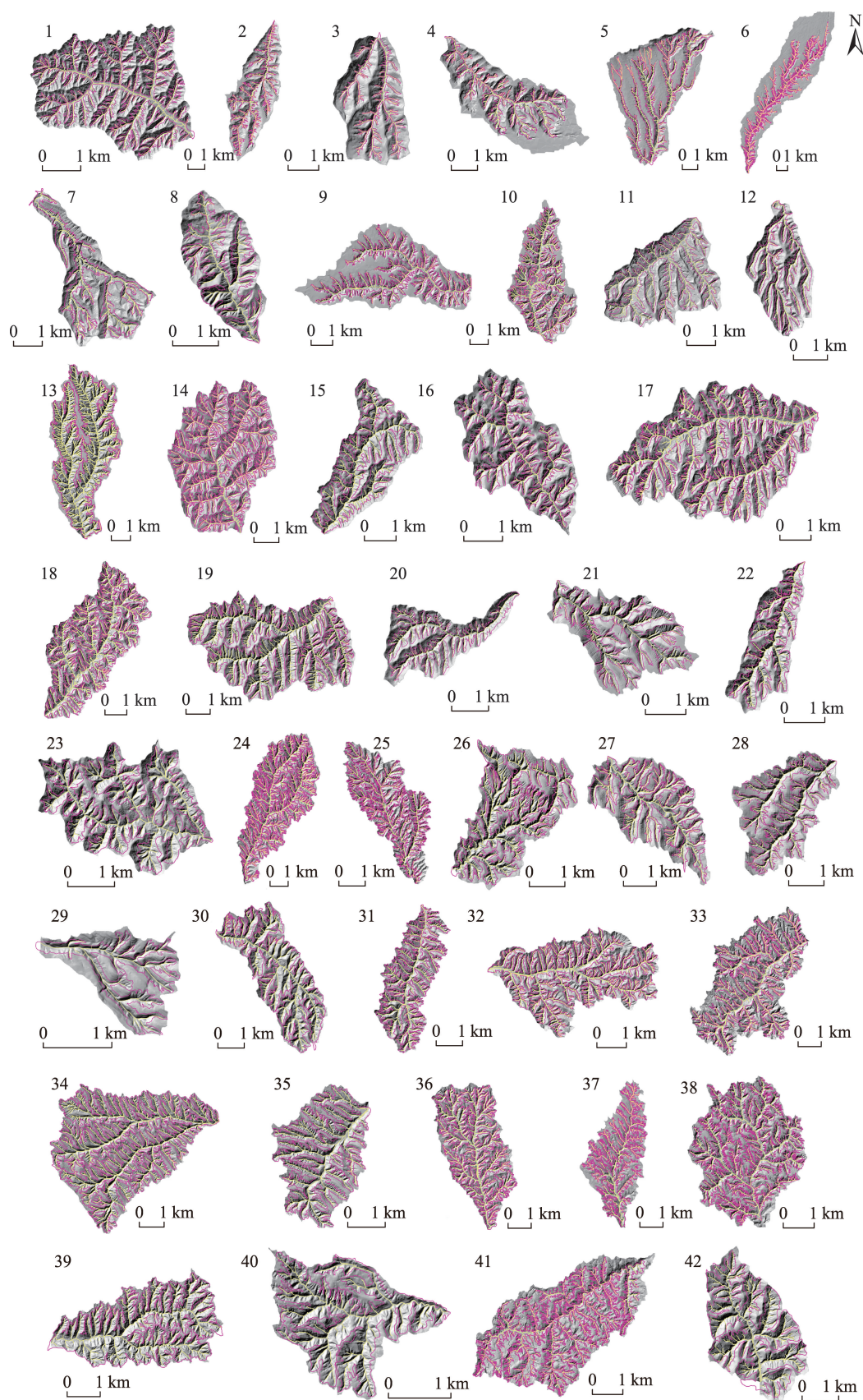
2.1 多维度侵蚀发育空间特征及态势机制

对 42 个样区的指标值进行归一化处理,利用 ArcGIS 空间分析软件中地统计模块对得到的标准化数据进行分析。结合地统计分析结果来看(图 3),3 组数据均符合空间正态分布特征。沟谷密度和水平逼近度空间特征相似,均为东西方向(XZ 面)上先减小后增加、南北方向上(YZ 面)逐渐增加;切割深度为东西方向(XZ 面)上先减小后增加、南北方向(YZ 面)上先增大后减小。沟谷密度、水平逼近度和切割深度在三维空间内所呈现出的显著方向性说

表2 多维度代表因子指标系统

Tab.2 Multi-dimensional representative factor indicator system

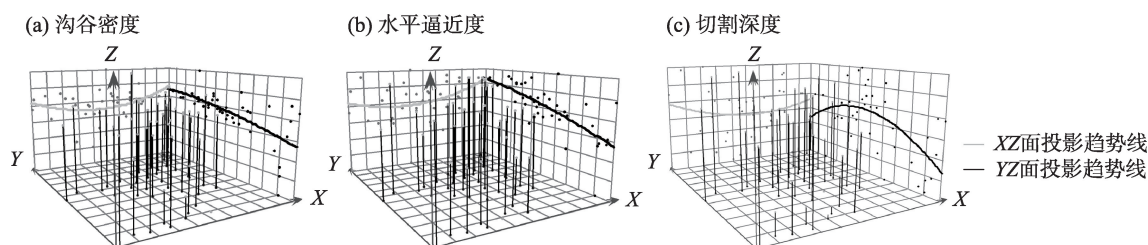
指标名称	指标定义	计算公式	地理意义
沟谷密度 (km/km ²)	沟谷总长度与流域面积之比	$D = \frac{\sum L}{A}$, 式中: D 为沟谷密度, $\sum L$ 为流域内沟谷总长度, A 为流域面积	反映沟头前进及沟谷侵蚀发育程度的重要指标。指标值越大,说明沟头前进程度越大,即沟谷生长延伸程度越大,发育程度越高
水平逼近度 (m/m)	沟谷长度与上游水流长度和沟谷长度之和之比	$HPI = \frac{L_1}{L_2}$, 式中: L_1 为沟谷长度, L_2 为上游水流长度与沟谷长度之和	表示沟谷源点在水平方向上向流域分水线逼近的程度,直观反映了沟谷系统横向发育程度。指标值越大,横向发展程度越高,沟谷横向侵蚀程度越高
切割深度 (m)	在地面某点的一定邻域范围内,平均高程与最小高程的差值	$G_i = H_{mean} - H_{min}$, 式中: G_i 为地表切割深度, H_{mean} 、 H_{min} 分别为一个固定分析窗口内的平均高程、最小高程	直观反映了沟谷下切发育程度和地表被侵蚀切割的程度。指标值越大,地表侵蚀切割越剧烈,沟谷下切发育程度越高



注:图中左上角数字为样区编号,详情见表1;图中粉色为沟沿线,黄色为最终沟谷网络。

图2 研究样区沟谷网络

Fig.2 Gully networks of the study area



注: X轴为东西方向, Y轴为南北方向。

图3 沟谷密度、水平逼近度和切割深度在正交方向上趋势图

Fig.3 Gully density, lateral expansion degree and downcutting depth orthogonal trend graph

明用于分析的3组数据内部均存在一定的趋势特征。为探明这种趋势特征,对数据进行多项式拟合以进一步分析。

图4显示,陕北黄土高原由南至北沟谷密度与水平逼近度呈波浪式上升趋势,表明陕北黄土高原南北方向整体上溯源侵蚀和侧蚀程度加剧,发育程度渐高;切割深度呈先上升后下降趋势,表明陕北黄土高原南北方向上下切侵蚀先加剧后减弱,发育程度渐高;结合陕北黄土高原地貌类型可以发现,各维度代表因子的高值区均处于黄土高原塬状丘陵沟壑区与梁状丘陵沟壑区,低值区均处于台塬、残塬、梁塬区。

为分析陕北黄土高原南北方向上各维度因子的影响程度,本文对归一化后的指标值进行影响程度计算,根据结果发现54.8%的样区各维度影响程度相近,且86.4%处于陕北黄土高原中部地区,而南北两端沟谷密度与水平逼近度占比较大,即中部地区多维度发育较为均衡,南北两端以溯源侵蚀与横向侵蚀为主。整体来看,在陕北黄土高原南北方向上多维度发育呈现由溯源侵蚀主导转向横向溯源侵蚀主导到溯源下切侵蚀主导再到溯源横向侵蚀主导。黄土塬区、残塬区多为溯源侵蚀主导与溯源下切主导,黄土梁状丘陵沟壑区、梁状丘陵沟壑区多为溯源下切侵蚀主导和溯源横向侵蚀主导,这与其所处发育阶段及黄土构造存在一定关系:塬区多处于发育初期且其沟谷的黄土层厚、水量大,故沟床的溯源侵蚀剧烈并伴有明显下切侵蚀,进而带动横向侵蚀;而丘陵沟壑区多处于发育中晚期,其黄土层薄、下伏岩性大多较坚硬、抗冲性好,且水量相对较小,在中期由溯源侵蚀带动的强烈的下切侵蚀在侵蚀达到一定程度后,其下切侵蚀速度随之减弱。

在特定条件下,地貌发育在空间分布上往往呈

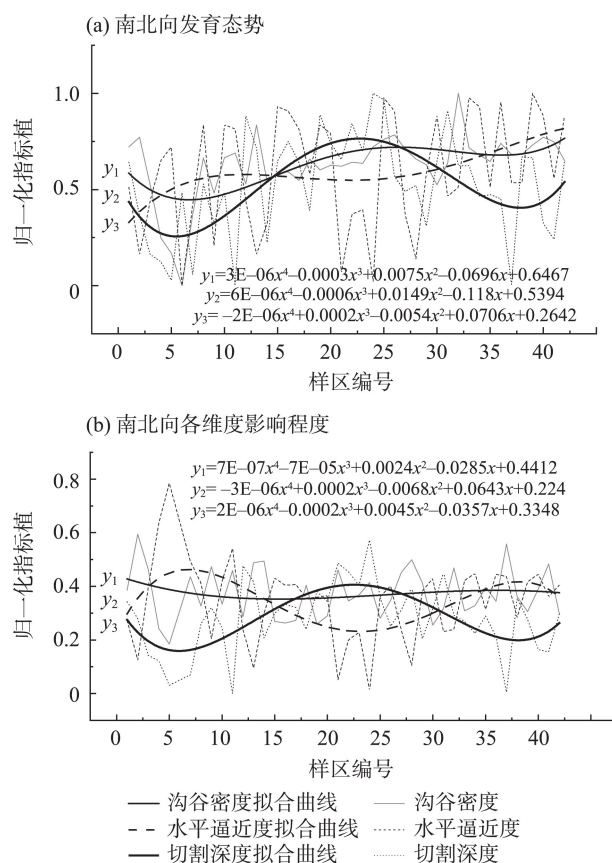


图4 陕北黄土高原沟谷系统南北向多维发育态势及各维度影响程度

Fig.4 Multi-dimensional development trend and contribution of gullies on the Loess Plateau in Northern Shaanxi in the south-north direction

现出由“新”至“老”的连续过渡,通过比较不同发育年龄及不同发育阶段的相似地貌体,可以推测地貌的长期演化过程^[23]。陕北黄土高原所出现的黄土沟谷侵蚀由南向北方向呈现从微弱到中度、再到剧烈的空间分布格局,在一定程度上也可视为该地区的沟谷系统侵蚀地貌发育进程的时间序列再现,与以往研究类似^[24]。图5为南北序列上选取的5个样

区某沟道的横向剖面模型,可以发现剖面图由“V”型谷向“U”型谷转变的趋势较为明显。

为进一步探究沟谷发育过程中各维度之间的关系,以面积—高程积分为参考依据^[30],计算南北序列42个样区的面积—高程积分值,并按照数值由高到低,即发育程度渐高的序列进行重排序。由图6可以发现:随着发育程度的渐高,各维度代表因子的变化趋势均呈现出先增大后平稳再减小的趋势,且各个维度的变化趋势整体上近似,大致可以划分为3个阶段:发育初期以溯源侵蚀为主带动下切侵蚀伴有横向侵蚀,发育中期以溯源侵蚀为主伴有持续性横向侵蚀与较强下切侵蚀,发育晚期以横向侵蚀为主伴有一定程度的溯源侵蚀与轻微下切侵蚀。

发育初期是在降雨后随着物质的迁移产生沟口,初生的沟谷形态特征不稳定进而沟道快速形成,水流集中到新生沟槽中,冲刷侵蚀能量增大,在冲蚀下伏土体的同时进行侧蚀,沟谷系统的溯源侵蚀、横向侵蚀与下切侵蚀在这一阶段迅速发展;发育中期是沟谷发展的稳定阶段,占沟谷发育期的大部分,具体表现为沟谷系统的继续深切与展宽,溯源侵蚀、横向侵蚀与下切侵蚀都处于较平稳的状态,因而沟底和沟壁形态比较稳定;发育晚期沟谷系统整体发育进程明显减弱,这一阶段沿沟床的侵蚀和沉积都比较微弱,最终将形成稳定的和缓宽敞的沟谷。陕北黄土高原大部分样区(88.10%)处于发育中期,北部及西北部边缘区域部分样区(7.14%)处于发育初期,南部边缘区域部分样区(4.76%)处于发育晚期。

2.2 影响因素分析

陕北黄土高原经过长久的侵蚀堆积形成了如今的黄土地貌,黄土厚度、多年平均降雨量和人类活动等内外力因素都可能是造成黄土高原水土流失的重要影响因素,因此本文选定黄土厚度、多年均降雨量及土地利用类型作为沟谷多维度侵蚀特征的影响因素进行分析,探究其对沟谷多维度侵蚀

发育是否存在以及存在何种程度的影响。

2.2.1 不同黄土厚度下三维发育差异性分析

黄土高原黄土层平均厚度为200 m,最厚处可达400 m,为土壤侵蚀提供了充分的物质供给。不同厚度的黄土其形成时间、黄土粒度和物质结构均不相同,对侵蚀结果造成影响也不同。本文对42个样区的黄土厚度按照25 m为阈值进行分段统计,结果如表3所示。

沟谷密度、水平逼近度及切割深度的最大值均

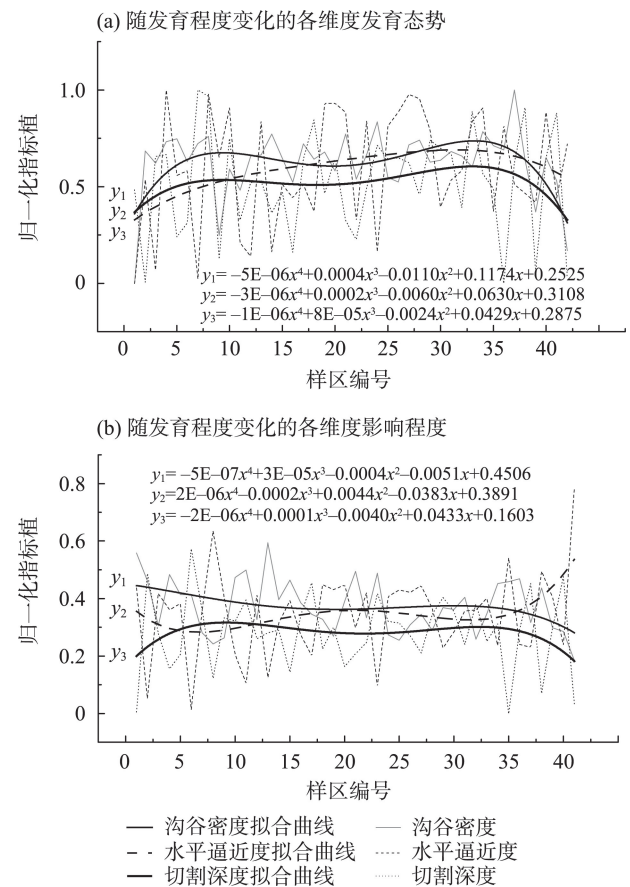


图6 陕北黄土高原沟谷系统随发育程度(面积—高程积分)变化的多维发育态势及各维度影响程度

Fig.6 Multi-dimensional development trend and contribution change of gullies on the Loess Plateau of Northern Shaanxi

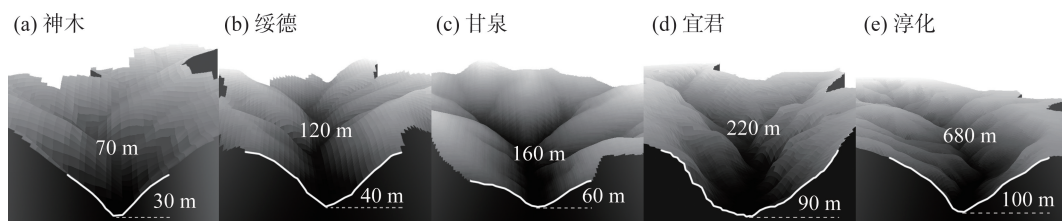


图5 陕北黄土高原北南向典型样区横向剖面图

Fig.5 Profiles of typical sample sites from north-south on the Loess Plateau of Northern Shaanxi

表3 不同黄土厚度下三维度代表因子对比

Tab.3 Comparison of three-dimensional representative factors under different loess thickness

因子	黄土厚度/m								离散系数
	25~50	50~75	75~100	100~125	125~150	150~175	175~200	>200	
沟谷密度/(km/km ²)	0.18	0.18	0.47	0.59	0.75	1.00	0	0.43	0.055
水平逼近度/(m/m)	0.67	0.53	0.66	0.49	0.70	1.00	0.78	0	0.105
切割深度/m	0.04	0.25	0.40	0.31	0.49	1.00	0	0.50	0.164

出现在黄土厚度 150~175 m 的样区,说明在黄土厚度处于 150~175 m 的区域,沟谷各维度发育情况相近且发育较成熟。而在黄土厚度为 175~200 m 的实验样区,沟谷密度与切割深度出现最小值,明显低于水平逼近度。计算各维度代表因子的离散系数可以发现,切割深度的离散系数最大,这表明陕北黄土高原黄土厚度的差异对切割深度即下切侵蚀的影响最大,而沟谷密度的影响相对来说最小。在陕北黄土高原地区沟谷的发育并非随着黄土厚度的增大而加剧,这可能与长久的黄土堆积所造成的黄土岩性及构造的改变有关。

2.2.2 不同平均降雨量下三维发育差异性分析

降雨(地表径流)是影响黄土高原沟谷发育的重要外营力之一,降雨对沟谷系统侵蚀的影响主要体现在降雨强度、降雨量等方面。黄土高原沟谷系统的发育是一个漫长的过程,故本文选取 1980—2018 年的平均降雨量对陕北黄土高原多维度代表因子进行统计分析。

表4为不同多年平均降雨量的多维度代表因子的对比结果,可以发现,3个代表因子的离散系数数值趋势与不同黄土厚度的数值趋势相近似,其中切割深度的离散系数相对来说较大,即多年均降雨量对下切侵蚀的影响较其他维度而言要大一些,而对于纵向溯源侵蚀的影响较小,这与沟头的发展主要是由于崩塌、潜蚀、溶蚀所致的溯源侵蚀有关。

由表4还可以发现,在多年平均降雨量 375~400 mm 区段沟谷密度、平均逼近度与切割深度均出现最大值,表明沟谷各维度发育情况相近且发育

较成熟。整体来看,随着多年均降雨量的增加,多维度代表因子的数值均呈现出递减态势。

2.2.3 不同土地利用类型下三维发育差异性分析

土地利用类型是自然条件和人类社会活动综合作用的复杂综合体,不同的土地利用方式对沟谷的发育进程造成的影响也不同。通过对比国家青藏高原科学数据中心生产的 1985、1990、1995、2000、2005、2010 及 2015 年共 7 期土地利用遥感监测数据,本文发现本研究所包含的 42 个样区的土地利用情况不存在较大变化,故以各样区所涵盖的主要土地利用类型为基础对研究样区的沟谷密度、水平逼近度和切割深度进行分类统计。42 个研究样区包含旱地、有林地、灌木林、疏林地、高覆盖度草地、中覆盖度草地、低覆盖度草地、滩地、农村居民点共计 9 种土地利用类型。

由图 7 和表 5 可以发现,研究区的土地利用类型以旱地和中覆盖草地为主,灌木林和疏林地为辅,3 个代表因子的离散系数相较于黄土厚度与多年均降雨量而言较小,即土地利用类型对于 3 个维度的影响与多年平均降雨量离散系数相同。土地利用类型为低覆盖度草地的样区沟谷密度、水平逼近度以及切割深度数值均为高值,说明在低覆盖度草地区域沟谷溯源侵蚀横向侵蚀以及下切侵蚀的发育程度均较高,沟谷各维度发育程度相近。这类草地由于水分匮乏草被稀疏导致表层黄土干燥,在降雨和地表径流的作用下黄土表面会发生水土流失,使得沟头不断后退,沟谷源点也逐渐逼近于流域分水线。土地利用类型为有林地的

表4 不同多年平均降雨量下的多维度代表因子对比

Tab.4 Comparison of three-dimensional representative factors under different annual average rainfalls

因子	年平均降雨量/mm										离散系数
	375~400	400~425	425~450	450~475	475~500	500~525	525~550	550~575	575~600	>600	
沟谷密度/(km/km ²)	1.00	0.62	0.78	0.55	0.48	0.61	0.44	0.24	0.19	0	0.065
水平逼近度/(m/m)	1.00	0.84	0.42	0.24	0.63	0.23	0.61	0.89	0.25	0	0.095
切割深度/m	1.00	0.49	0.65	0.91	0.91	0.60	0.90	0	0.17	0.26	0.103

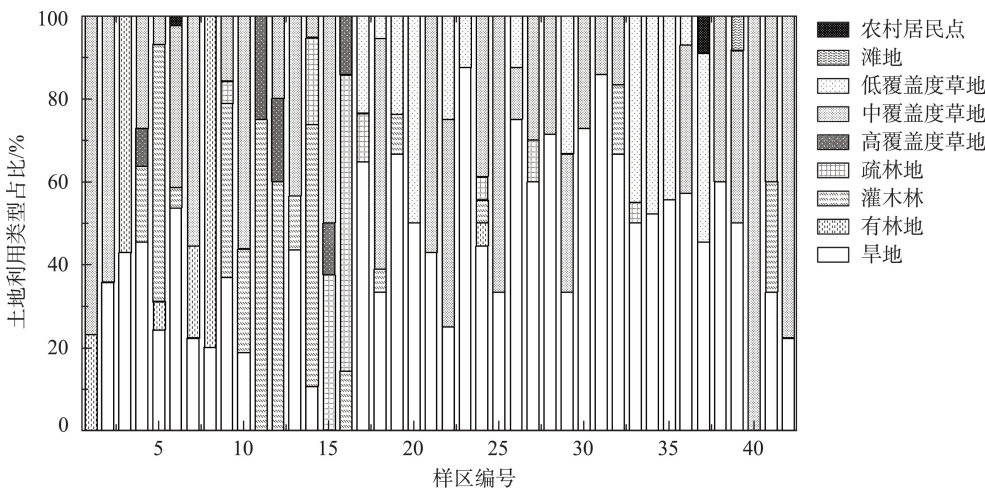


图7 研究样区土地利用类型占比
Fig.7 The proportion of land use types in the study area

表5 不同土地类型下的多维度代表因子对比
Tab.5 Comparison of three-dimensional representative factors under different land types

因子	土地类型							离散系数
	旱地	有林地	灌木林	疏林地	高覆盖度草地	中覆盖度草地	低覆盖度草地	
沟谷密度/(km/km ²)	0.80	0	0.69	0.76	0.34	0.80	1.00	0.0473
水平逼近度/(m/m)	0.38	0	0.15	0.38	1.00	0.26	0.90	0.0681
切割深度/m	0.70	0	0.56	0.99	0.57	0.76	1.00	0.0479

样区沟谷密度、水平逼近度以及切割深度数值均为最低值,说明在有林地区域沟谷的各维度发育程度均较低,林地在拦截降雨保护地表以及调节地表径流等方面的能力在较大程度上优于草地和旱地,能够极大增加土壤下渗所需耗费的时间,并且在提高土壤渗透性的同时提高土壤的抗蚀性能与抗冲性能。

综合数据结果可以发现,林地对于维护3个维度的抗侵蚀能力最强,生长茂密的草地和灌木林及作物等次之,生长稀疏的牧草和作物较差。

3 结论与讨论

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,遴选陕北黄土高原地区42个完整小流域为实验样区,以沟谷密度、水平逼近度、切割深度3个因子为代表研究了陕北黄土高原黄河流域沟谷系统在溯源侵蚀、横向侵蚀和下切侵蚀多个维度上的侵蚀发育态势及相关关系,探讨了多维度代表因子在陕北黄土高原的空间分异规律,分析了形成这种态势的可能影响因素,主要结论如下:

(1) 陕北黄土高原中部地区多维度发育程度均衡,南北两端以溯源侵蚀与横向侵蚀为主。随着发育程度的逐渐升高,沟谷系统发育可以划分为3个阶段:发育初期以溯源侵蚀为主,带动下切侵蚀伴有横向侵蚀;发育中期以溯源侵蚀为主,伴有持续性横向侵蚀与较强下切侵蚀,各维度发育均衡;发育晚期以横向侵蚀为主,伴有一定程度的溯源侵蚀与轻微下切侵蚀。陕北黄土高原地区大部分处于发育中期,北部及西北部边缘区域部分样区处于发育初期,南部边缘区域部分样区处于发育晚期。整体来看,陕北黄土高原地区由北向南发育程度逐渐升高。

(2) 陕北黄土高原黄土厚度对沟谷系统下切侵蚀的影响最大($C_v=0.164$),对溯源侵蚀的影响最小($C_v=0.055$);土地利用类型对于溯源侵蚀与下切侵蚀的影响相近,林地对于维护各个维度的抗侵蚀能力最强,生长茂密的草地和灌木林及作物等次之,生长稀疏的牧草和作物较差。

(3) 从纵向、横向、垂向多个维度探讨了陕北黄土高原水蚀沟谷的发育态势特征,对黄土高原沟谷地貌发育的多维关系研究进行了补充,对揭示黄土小流域发育特征也具有一定的指示作用。同时,探

讨影响其发育的可能性因素,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] 甘枝茂. 黄土高原地貌与土壤侵蚀研究 [M]. 西安: 陕西人民出版社, 1990: 51-64. [Gan Zhimao. The Loess Plateau landform and soil erosion research. Xi'an, China: Shaanxi People's Publishing House, 1990: 51-64.]
- [2] 何雨, 贾铁飞, 李容全. 黄土丘陵区沟谷发育及其稳定性评价 [J]. 干旱区地理, 1999, 22(2): 64-70. [He Yu, Jia Tiefei, Li Rongquan. Development of gullies and evaluation on their stability in the loess hill region. Arid Land Geography, 1999, 22(2): 64-70.]
- [3] Vanmaercke M, Poesen J, van Mele B, et al. How fast do gully headcuts retreat? [J]. Earth-Science Reviews, 2016, 154: 336-355.
- [4] 桑广书, 陈雄, 陈小宁, 等. 黄土丘陵地貌形成模式与地貌演变 [J]. 干旱区地理, 2007, 30(3): 375-380. [Sang Guangshu, Chen Xiong, Chen Xiaoning, et al. Formation model and geomorphic evolution of loess hilly landforms. Arid Land Geography, 2007, 30(3): 375-380.]
- [5] 严宝文, 王涛, 马耀光. 黄土高原水蚀沟谷发育阶段研究 [J]. 人民黄河, 2004, 26(6): 16-18. [Yan Baowen, Wang Tao, Ma Yaoguang. Study on the development stages of water erosion gullies in the Loess Plateau. People's Yellow River, 2004, 26(6): 16-18.]
- [6] Strahler A N. Equilibrium theory of erosional slopes approached by frequency distribution analysis: Part I [J]. American Journal of Science, 1950, 248(10): 673-696.
- [7] 刘希林. 全球视野下崩岗侵蚀地貌及其研究进展 [J]. 地理科学进展, 2018, 37(3): 342-351. [Liu Xilin. Benggang erosion landform and research progress in a global perspective. Progress in Geography, 2018, 37(3): 342-351.]
- [8] A. И. 斯皮里东诺夫, 祁延年. 关于沟谷侵蚀的研究 [J]. 地理科学进展, 1955(3): 161-164. [Spiridonov A И, Qi Yannian. Research on gully erosion. Progress in Geography, 1955(3): 161-164.]
- [9] 郑粉莉, 徐锡蒙, 覃超. 沟蚀过程研究进展 [J]. 农业机械学报, 2016, 47(8): 48-59, 116. [Zheng Fenli, Xu Ximeng, Qin Chao. A review of gully erosion process research. Transactions of the CSAM, 2016, 47(8): 48-59, 116.]
- [10] 刘宪锋, 任志远, 张翀, 等. 1959—2008年黄土高原地区年内降水集中度和集中中期时空变化特征 [J]. 地理科学进展, 2012, 31(9): 1157-1163. [Liu Xianfeng, Ren Zhiyuan, Zhang Chong, et al. Inhomogeneity characteristics of intra-annual precipitation on the Loess Plateau during 1959-2008. Progress in Geography, 2012, 31(9): 1157-1163.]
- [11] 丁婧祎, 赵文武, 王军, 等. 降水和植被变化对径流影响的尺度效应: 以陕北黄土丘陵沟壑区为例 [J]. 地理科学进展, 2015, 34(8): 1039-1051. [Ding Jingyi, Zhao Wenwu, Wang Jun, et al. Scale effect of the impact on runoff of variations in precipitation/vegetation: Taking northern Shaanxi loess hilly-gully region as an example. Progress in Geography, 2015, 34(8): 1039-1051.]
- [12] Li Z, Zhang Y, Zhu Q K, et al. A gully erosion assessment model for the Chinese Loess Plateau based on changes in gully length and area [J]. Catena, 2017, 148 (2): 195-203.
- [13] 全迟鸣, 周成虎, 程维明, 等. 基于DEM的黄土塬形态特征分析及发育阶段划分 [J]. 地理科学进展, 2014, 33 (1): 42-49. [Tong Chiming, Zhou Chenghu, Cheng Weiming, et al. Morphological characteristics and developmental stages of loess tablelands based on DEM. Progress in Geography, 2014, 33(1): 42-49.]
- [14] 吴良超. 基于DEM的黄土高原沟壑特征及其空间分异规律研究 [D]. 西安: 西北大学, 2005. [Wu Liangchao. A research on gully characteristics and their spatial variance based on DEM in the Loess Plateau. Xi'an, China: Northwest University, 2005.]
- [15] 刘元保, 朱显谟, 周佩华, 等. 黄土高原坡面沟蚀的类型及其发生发展规律 [J]. 中国科学院西北水土保持研究所集刊, 1988(1): 9-18. [Liu Yuanbao, Zhu Xianmo, Zhou Peihua, et al. The laws of hillslope channel erosion occurrence and development on Loess Plateau. Memoir of Northwestern Institute of Soil and Water Conservation Academia Sinica, 1988(1): 9-18.]
- [16] 张磊, 汤国安, 李发源, 等. 黄土地貌沟沿线研究综述 [J]. 地理与地理信息科学, 2012, 28(6): 44-48. [Zhang Lei, Tang Guo'an, Li Fayuan, et al. A review on research of loess shoulder-line. Geography and Geo-Information Science, 2012, 28(6): 44-48.]
- [17] 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, 2001, 15(1): 122-125. [Yan Baowen, Li Jing, Bao Zhongmo. Index system for evaluating gulley's down-erosion tendency in loess area. Journal of Soil and Water Conservation, 2001, 15(1): 122-125.]
- [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] Zhou Y, Yang C Q, Li F, et al. Spatial distribution and influencing factors of Surface Nibble Degree Index in the

- severe gully erosion region of China's Loess Plateau [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2021, 31(11): 1575-1597.
- [20] 张丽萍, 马志正. 流域地貌演化的不同阶段沟壑密度与切割深度关系研究 [J]. *地理研究*, 1998, 17(3): 273-278. [Zhang Liping, Ma Zhizheng. The research on the relation between gully density and cutting depth in different drainage landform evolution periods. *Geographical Research*, 1998, 17(3): 273-278.]
- [21] 赵文武, 傅伯杰, 陈利顶. 陕北黄土丘陵沟壑区地形因子与水土流失的相关性分析 [J]. *水土保持学报*, 2003, 17(3): 66-69. [Zhao Wenwu, Fu Bojie, Chen Liding. Correlations between topographical factors and soil and water loss in hilly and gully area of Loess Plateau in Northern Shaanxi. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, 17(3): 66-69.]
- [22] 王恒松, 熊康宁, 张芳美. 地形因子对喀斯特地貌坡面水土流失影响的机理研究 [J]. *水土保持通报*, 2015, 35(4): 1-7. [Wang Hengsong, Xiong Kangning, Zhang Fangmei. Mechanism study on effects of terrain erosion of Karst slope. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2015, 35(4): 1-7.]
- [23] Schumm S A, Lichty R W. Time, space, and causality in geomorphology [J]. *American Journal of Science*, 1965, 263(2): 110-119.
- [24] 黄晓力, 丁沛, 那嘉明, 等. 地貌发育演化研究的空代时理论与方法 [J]. *地理学报*, 2017, 72(1): 94-104. [Huang Xiaoli, Ding Hu, Na Jiaming, et al. Theories and methods of space-for-time substitution in geomorphology. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 94-104.]
- [25] 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. [Zhou Chenghu, Cheng Weiming, Qian Jinkai, et al. Research on the classification system of digital land geomorphology of 1:1000000 in China. *Journal of Geo-information Science*, 2009, 11(6): 707-724.]
- [26] 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 Zhaohui, Guo Liang, Liu Ronghua, et al. The relationship between the threshold of catchment area for extraction of digital river network from DEM and the river source density. *Journal of Geo-information Science*, 2018, 20(9): 1244-1251.]
- [27] 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 Xue, Luo Mingliang, Zhou Yi, et al. Research on river morphology characteristics in typical geomorphologic areas based on DEM. *Journal of China Hydrology*, 2018, 38(4): 48-54.]
- [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 Feng, Zhou Yi, Chen Min. Loess shoulder-line constrained method for waterworn gullies extraction on Loess Plateau. *Mountain Research*, 2016, 34(4): 504-510.]
- [29] 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 Xue, Zhou Yi, Li Yang, et al. Establishment and feature analysis of loess geomorphology proximity indexes based on DEM. *Journal of Geo-information Science*, 2020, 22(3): 431-441.]
- [30] 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 Shijie, Tang Guo'an, Li Fayuan, et al. Spatial variation of hypsometric integral in the Loess Plateau based on DEM. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(7): 921-932.]

Quantitative analysis of multi-dimensional erosion characteristics of waterworn gullies on the Loess Plateau of Northern Shaanxi

LIU Chang¹, ZHOU Yi^{1*}, LEI Xue²

(1. School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China;

2. Chart Information Center, Tianjin 300450, China)

Abstract: Gullies are the areas with the most obvious changes in the morphological characteristics on the Loess Plateau, and their development has an important control effect on the development of the entire Loess Plateau region. Based on the digital elevation model (DEM) data at a resolution of 5 m, this study investigated 42 sites covering 15 geomorphological types on the Loess Plateau of Northern Shaanxi. Representative factors (gully density, lateral expansion degree, and downcutting depth) of the three spatial dimensions were used to analyze the multi-dimensional development process, characteristics, spatial differentiation, and influencing factors of the gullies. The results show that the development of gullies in the north-south direction of the Loess Plateau in Northern Shaanxi has shifted from traceable erosion dominated to lateral-tracing erosion, tracing-downcutting erosion, and lateral-tracing erosion. Of the sample sites, 54.8% have similar effects on the overall development process in each dimension, and 86.4% of these are in the central area of the Loess Plateau in Northern Shaanxi, that is, the central area has a balanced multi-dimensional development, and the north and south ends are dominated by traceable erosion and lateral erosion. Combined with the hypsometric index, we found that the gully development can be divided into three stages. In the early stage of development, traceable erosion is the main driving force, leading to downcutting erosion accompanied by lateral erosion, and in the middle stage of development, traceable erosion is dominant, accompanied by continuous lateral erosion and strong downcutting erosion. Later stage of development is dominated by lateral erosion, accompanied by a certain degree of tracing erosion and slight downcutting erosion. Loess thickness has the greatest influence on the vertical erosion of the gully system ($C_v=0.164$), and land use type has the greatest influence on the lateral erosion of the gully system ($C_v=0.0681$). Forestland maintains the strongest anti-erosion ability for each dimension, followed by dense grass and shrubs and crops, and sparse grass and crops are the poorest.

Keywords: digital terrain analysis; gully development; multi-dimensional erosion characteristics; soil erosion; Loess Plateau