

基于无人机航摄的坡形对浅沟发育的影响

王海于¹, 庞国伟^{1,2,3}, 王春梅^{1,2,3}, 王雷^{1,2,3}, 龙永清^{1,2,3}

(1.西北大学城市与环境学院,西安 710127;2.西北大学陕西省地表系统与环境承载力重点实验室,西安 710127;3.旱区生态水文与灾害防治国家林业和草原局重点实验室,西安 710127)

摘要:为探究坡形对浅沟发育的影响,以陕西省靖边县狼儿子沟无人机航摄影像为基础数据,通过目视解译得到浅沟(指瓦背状地形底部)225条,统计了浅沟条数、浅沟长度、沟头到分水岭的距离及浅沟密度等指标。利用浅沟地形分水线上的高程点进行插值得到原始坡面数字高程模型(digital elevation model, DEM),以此DEM提取地形曲率以表征坡形,进而分析坡形与浅沟指标的关系。结果表明:(1)以浅沟地形分水线上的高程点插值后的DEM对浅沟进行了综合,能较好地表达浅沟发育之前原始坡面的地形特征。(2)从单一坡形来看,横向凹形坡的浅沟密度最大,纵向凹形坡的浅沟沟头到分水岭的平均距离最大;纵向凸形坡的浅沟条数以及浅沟平均长度均最大;从组合坡形来看,双凸形坡和凸凹形坡上的浅沟平均长度与沟头到分水岭的平均距离均大于双凸形坡和凹凸形坡。双凹形坡的浅沟长度与双凸形坡和凸凹形坡的浅沟长度具有显著性差异($p < 0.05$);凹凸形坡的浅沟长度与双凸形坡和凸凹形坡的浅沟长度具有显著性差异($p < 0.05$)。凸凹形坡的浅沟沟头到分水岭的距离与凸凹形坡的浅沟沟头到分水岭的距离具有显著性差异($p < 0.1$)。(3)不同形态坡面浅沟发育的地形曲率分布特征具有明显差异。

关键词:浅沟;坡形;无人机;黄土高原

中图分类号:S157;V27

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2022)04-0085-07

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.04.011

Effects of Slope Shapes on Ephemeral Gully Development Based on UAV

WANG Haiyu¹, PANG Guowei^{1,2,3}, WANG Chunmei^{1,2,3}, WANG Lei^{1,2,3}, LONG Yongqing^{1,2,3}

(1.School of Urban and Environment, Northwestern University, Xi'an 710127; 2.Key Laboratory of Surface Systems and Environmental Carrying Capacity, Northwestern University, Xi'an 710127;

3.Key Laboratory of Ecological Hydrology and Disaster Prevention and Treatment in Dry Region, Xi'an 710127)

Abstract: In order to explore the influence of slope shape on the development of ephemeral gully, 225 ephemeral gullies were obtained by visual interpretation based on the photography of unmanned aerial vehicle in the Langerzigou in Jingbian County, Shaanxi Province. The number and length of ephemeral gullies, the distance from the gully head to the watershed and the gully density were calculated. The original slope DEM was obtained by interpolating the elevation points on the ephemeral gully watershed, and the DEM was used to extract the terrain curvature to describe the hillslope shape, and then analyze the relationship between the slope shape and the ephemeral gully index. The results showed that: (1) The DEM after the elevation point interpolation on the ephemeral gully watershed was used to synthesize the ephemeral gully, which could well describe the original slope topographic features before the development of ephemeral gully. (2) From the point of view of single slope shape, the gully density of the transverse concave slope was the highest, and the number of ephemeral gullies, the average distance from the gully head to the watershed of the longitudinal concave slope were the largest. The average length of the ephemeral gully and the number of the longitudinal convex slope were the largest. From the point of view of the combined slope shape, the average length of the ephemeral gully and the average distance from the gully head to the watershed on the biconvex slope and the concave slope were larger than those on the biconvex slope and the concave-convex slope. The ephemeral gully length of double concave slope was significantly different from that of double convex slope and convex-concave slope ($p < 0.05$). The ephemeral gully length of concave-convex slope was significantly different

收稿日期:2021-11-23

资助项目:国家自然科学基金项目(41601290,41977062)

第一作者:王海于(1993—),男,甘肃陇南人,在读硕士研究生,主要从事区域土壤侵蚀评价研究。E-mail:hywang@163.com

通信作者:庞国伟(1982—),男,山西天镇人,副教授,硕士生导师,主要从事区域土壤侵蚀评价研究。E-mail: gwpan@nwu.edu.cn

from that of double convex slope and convex concave slope ($p < 0.05$). There was a significant difference in the distance from the gully head to the watershed between the concave-convex slope and the convex-concave slope ($p < 0.1$). (3) The terrain curvature distribution characteristics of ephemeral gully development on different slope are obviously different.

Keywords: ephemeral gully; slope; UAV; the Loess Plateau

坡地是最基本的地貌单元^[1], 坡地形态是侵蚀地貌发育和坡地过程的结果, 反映坡地发育的演化程度, 同时又对土壤侵蚀过程具有重要影响。浅沟是土壤侵蚀的一种重要表现形式, 指坡面上能被普通耕作工具横跨但不能被其完全消除的侵蚀沟^[2], 是介于细沟和切沟之间的一种过渡形态。野外调查^[3]表明, 浅沟侵蚀量占梁坡侵蚀产沙量的 35%~46% 以上。在坡面的同一位置, 浅沟的形态随着坡面径流的产生而再次显露。沿着水流方向, 坡面上浅沟的存在导致切沟沟头前进, 破坏原有的完整坡面, 使得沟谷不断扩大, 加速土壤侵蚀发展。

影响浅沟发育的地形因素主要有坡度、坡长和坡形^[4]。坡形是坡度和坡长的综合反映, 决定地表水流运动的方向和状态, 不同的径流方向因侵蚀能力不同而形成不同的侵蚀形态^[5]。不同形态坡面上发育的浅沟侵蚀量、浅沟形态以及浅沟密度等都具有一定的差异。有研究^[6]表明, 凸凹形坡与凹形坡上的浅沟侵蚀量均高于直形坡。在直形坡、凸形坡和凹形坡上发育的浅沟分别呈平行状、辐散状和辐聚状^[7]。不同坡形坡面上浅沟的分布密度由小到大依次为凹形坡、直形坡、凸形坡, 变化范围为 10~60 km/km², 多集中于 15~40 km/km²^[8]。

坡形分为横向和纵向 2 个方面^[9]。在纵向上, 包括直形坡、凸形坡、凹形坡、凸凹形坡和台阶形坡等 5 类坡形^[10]; 在横向上, 有凸形坡、凹形坡、直形坡和内聚直坡等^[7]。已有报道^[11-13]对坡形划分以及不同坡形坡面的侵蚀规律^[14-17]等问题进行研究, 主要以人工野外调查为主, 且多集中于单一坡形(平面形态或剖面形态), 关于组合坡形对浅沟发育的研究报道较少。自然界坡形多种多样^[10], 多为平面和剖面的组合形态。因此需要在对坡形及其组合定量划分的基础上, 研究坡形的平面形态、剖面形态及组合形态对浅沟发育的影响。

DEM 是地表形态的数字化表达, 蕴含丰富的地形地貌信息, 在地质应用分析中具有重要的作用^[18]。传统 DEM 分辨率较低, 即使是基于 1:10 000 地形图生产的 DEM(对应 5~10 m 分辨率), 也不能有效表达坡面浅沟的特征^[19]。近年来, 随着计算机技术以及通信技术的迅速发展, 无人机测绘技术在国土监察、生态环境监测以及地理测绘工作中得到了广泛应用。对外业航摄相片进行内业处理后, 便可得到研究区域厘米级分辨率的数字表面模型(digital surface

model, DSM), 可以有效表达坡面浅沟的相关特征。

为研究不同形态坡面条件对浅沟发育的影响, 本文以 ArcGIS 10.5 为技术平台, 以无人机航摄影像为基础数据, 通过提取研究区内浅沟的特征信息, 并对不同形态坡面进行量化表达, 进而探讨不同形态坡面对浅沟的影响机制, 对于土壤侵蚀防控以及坡地改造具有指导意义。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省榆林市靖边县狼儿子沟流域(37°12'13"—37°12'53"N, 108°44'24"—108°44'59"E), 面积为 0.71 km²。地貌形态以黄土梁峁为主, 海拔在 1 458.5~1 743.9 m, 为半干旱温带大陆性季风气候。该区年均气温 7.8 °C, 最冷月为 1 月, 平均气温为 -8.5 °C, 最热月为 7 月, 平均气温为 22.2 °C, 平均温差 30.2 °C, 极端最高气温为 35.9 °C, 极端最低气温为 -28.5 °C。年降水量为 395.4 mm, 其中以 8 月最多, 占年降水量的 31.01%。由于流域内的坡耕地全部采取退耕封育, 未受到人工栽植林草和整地的破坏, 因此由耕作形成的浅沟得以保存完整, 便于浅沟提取。

1.2 数据与研究方法

1.2.1 数据来源 2020 年 8 月采用大疆精灵 4RTK 版无人机对狼儿子沟流域进行低空摄影测量, 利用 Pix4d mapper 软件进行内业处理, 得到研究区 0.05 m 分辨率数字正射影像(digital orthophoto map, DOM)及 DSM。

1.2.2 研究方法

(1) 浅沟解译及指标选取。在浅沟发育的部位, 等高线的形状往往表现为“上凸”, 因此将等高线从“上凸”过渡到平滑的部位作为浅沟的沟头。浅沟的位置为从沟头沿沟身向下至宽度 > 50 cm 的第 1 个跌水终止^[2](图 1)。为保证浅沟的准确性, 将 DOM 影像放大至像元, 通过目视解译的方法得到研究区的浅沟数据。分别以浅沟长度、浅沟沟头到分水岭的距离和浅沟密度作为浅沟形态指标。

(2) 原始坡面 DEM 构建及坡形划分。坡面上的浅沟是侵蚀的结果^[20], 浅沟的出现已对原始地形造成破坏。若要探讨坡形对浅沟侵蚀的影响, 需对浅沟发育之前的原始坡面进行表达, 即构建原始坡面的 DEM。浅沟所在集水区的分水线侵蚀较弱, 基本保

留了原始坡面的高程信息(图 2)。因此,可基于分水线上的高程点进行内插,以构建原始坡面的 DEM。不规则三角网(triangle irregular network, TIN)通过由不规则分布的点生成的连续三角面来逼近地形表面,然后内插生成 DEM,是我国测绘部门生产 DEM 数据的标准方法^[21]。本文首先在研究区 0.05 m 分辨率 DSM 上提取浅沟所在集水分水线上的高程点,然后利用 TIN 方法构建分辨率为 10 m 的 DEM 以表达原始坡面(图 3)。

地表曲率是局部地形曲面在各个截面方向上的形状、凹凸变化的反映,常见的有剖面曲率和平面曲率^[22]。剖面曲率和平面曲率分别在纵向和横向上刻画地面的形态,剖面曲率影响地表物质运动的加速与减速状态;

平面曲率表达地表物质运动的汇聚和发散模式。

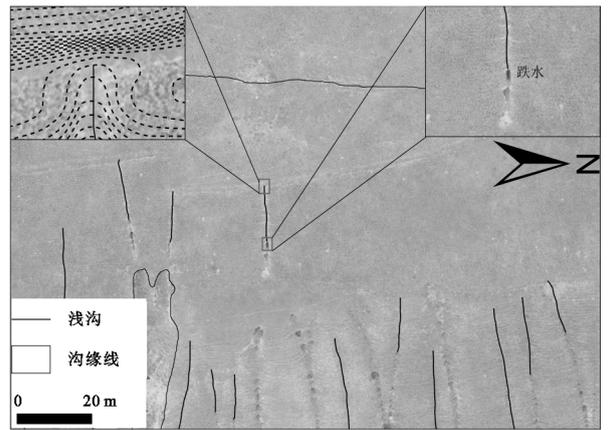


图 1 影像上解译的浅沟示意

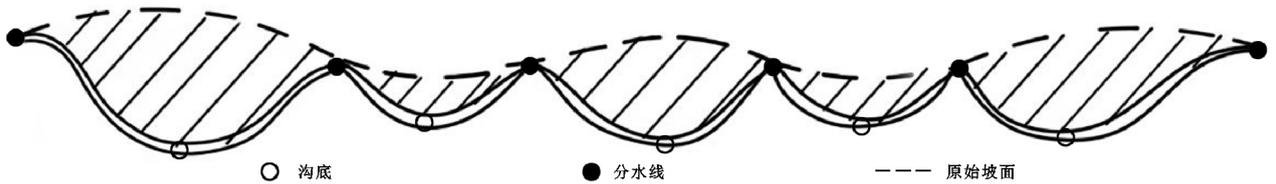


图 2 浅沟断面示意

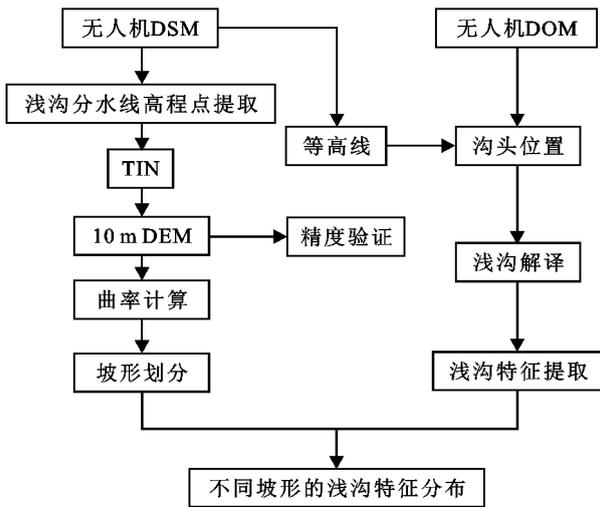


图 3 技术路线

Zevenbergen 等^[23]根据前人的研究提出一种表达地表曲面更为合理的拟合方程(公式 1)。

$$Z = Ax^2y^2 + Bx^2y + Cxy^2 + Dx^2 + Ey^2 + Fxy + Gx + Hy + I \quad (1)$$

式中:A~I 由拉格朗日多项式进行求解。通过公式(1)可求得剖面曲率(公式 2)和平面曲率(公式 3)地表参数。

$$\text{剖面曲率} = -\frac{2(DG^2 + EH^2 + FGH)}{G^2 + H^2} \quad (2)$$

$$\text{平面曲率} = \frac{2(DG^2 + EH^2 - FGH)}{G^2 + H^2} \quad (3)$$

基于构建的原始坡面 DEM,利用公式(2)和公式(3)分别计算剖面曲率与平面曲率。当剖面曲率>0 和平面曲率<0 分别表示曲面在纵向和横向上表现为凹形坡,而剖面曲率<0 和平面曲率>0 则分别表示曲面在纵向和横向上表现为凸形坡。由于自然界的坡形较为复杂,难以找到单一的坡形。陈渭南^[13]通过对黄土丘陵区坡面的野外观察,并根据不同横纵剖面的组合,将三维坡形划分出 9 种不同的类型。本文以研究区原始坡面 DEM 数据为基础,通过地形曲率对坡形进行量化,将坡面的平面形态与剖面形态进行组合,得到 4 类三维坡形(图 4)。

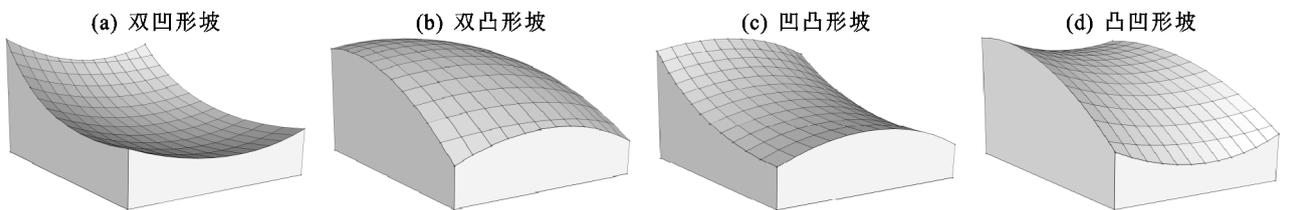


图 4 不同坡面三维形态

(3)坡形与浅沟指标关系分析。将曲率值赋给每条浅沟并求均值,对剖面曲率来说,若均值>0,则认为该浅沟为纵向凹形坡上发育出来的浅沟;若均值<0,则认为该浅沟为纵向凸形坡上发育出来的浅沟;对平面

曲率来说,若均值>0,则认为该浅沟为横向凸形坡上发育出来的浅沟;若均值<0,则认为该浅沟为横向凹形坡上发育出来的浅沟。此外,通过统计不同组合坡形上剖面曲率与平面曲率的频率分布范围,从而确定

不同组合坡面形状上浅沟发育的地形曲率范围。

(4) 插值结果评价方法。为评估利用 TIN 方法以浅沟分水线上的高程点构建的 DEM 是否可以反映浅沟发育之前原始坡面的地形特征, 分别提取研究区 DSM 和插值后的 DEM 表面浅沟所在集水区分水线上的高程点, 以研究区 DSM 为表面提取的高程为真实值, 以插值后 DEM 提取的高程为预测值, 以均方根误差 (RMSE) (公式 4) 为评价标准, 对插值结果进行精度评价。该指标可反映插值后 DEM 的整体质量水平, RMSE 的值越小, 插值精度越高。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{DSM_i} - y_{DEM_i})^2} \quad (4)$$

式中: y_{DSM_i} 为研究区 DSM 的第 i 个点高程; y_{DEM_i} 为插值后 DEM 的第 i 个点高程。

为进一步评价插值结果的精度, 分别提取等高距为 10 m 的研究区 DSM 的等高线和插值后 DEM 的等高线, 引入等高线回放法来比较研究区 DSM 的等高线与插值后 DEM 等高线的差异。

(5) 统计分析。方差分析可用于检验数据之间差异性的大小, 从而确定坡形对于浅沟的发育影响作用是否显著。因此借助 SPSS 25.0 软件中的单因素方差分析功能, 探究不同组合坡形之间的浅沟长度以及不同坡形组合之间的浅沟沟头到分水岭的距离是否具有显著差异。

2 结果与分析

2.1 插值结果精度评价

均方根误差 (RMSE) 可反映 DEM 的整体质量水平, 将插值后 DEM 和研究区 DSM 上的高程进行对比, RMSE 为 1.13 m, 依据 1:1 万 DEM 精度标准^[24], 本文构建的原始坡面 DEM 达到一级标准。等高线回放法可以定性评价插值后 DEM 的总体精度和研究区 DSM 的吻合情况 (图 5)。不难看出, 研究区插值后 DEM 和 DSM 的等高线除浅沟以外区域吻合程度较高, 同时对浅沟进行了制图综合, 说明以浅沟地形分水线的高程点对浅沟发育之前的原始坡面进行插值的结果可以很好地表达浅沟发育之前的原始坡面。

2.2 原始坡面坡形划分

基于原始坡面 DEM 计算剖面曲率和平面曲率, 进而划分出研究区坡面的单一形态 (横向与纵向) 和组合形态 (图 6)。研究区流域分水岭两侧和沟底的坡形在纵向和横向上主要以凸形坡和凹形坡为主, 沿坡面向下, 凸形坡与凹形坡交错分布。经统计, 研究区不同坡形的面积为纵向凸形坡 (0.22 km²) > 横向凸形坡 (0.18 km²) > 横向凹形坡 (0.11 km²) > 纵向凹形坡 (0.07 km²)。

研究区双凸形坡主要分布在靠近流域分水岭的位置; 双凹形坡主要分布在沟底, 在坡面中下部位也有分布; 凹凸形坡主要分布在流域分水岭两侧, 位于双凸形

坡下方; 与双凹形坡类似, 凸凹形坡主要分布在坡面下部以及沟底。经统计, 研究区不同组合坡形的面积为双凸形坡 (0.13 km²) > 凹凸形坡 (0.07 km²) > 凸凹形坡 (0.05 km²) > 双凹形坡 (0.04 km²)。

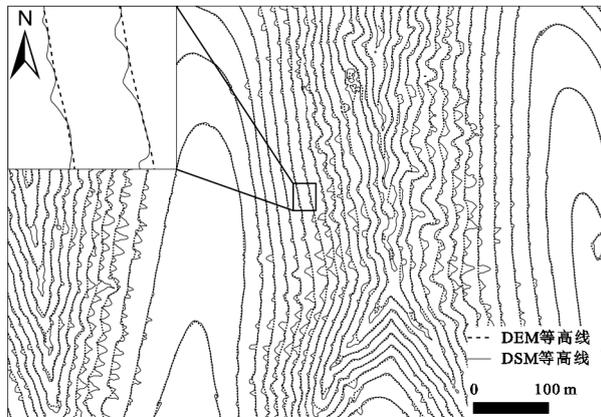


图 5 研究区 DSM 与插值后 DEM 等高线对比

2.3 浅沟的地形特征值分析

通过目视解译得到 3 个坡面共计 225 条浅沟, 分别对单一坡形和组合坡形的浅沟长度、浅沟沟头到分水岭的距离以及沟壑密度进行统计, 不同形态坡面上发育的浅沟特征具有明显差异。

2.3.1 单一坡形浅沟的地形特征值统计 从单一坡形来看, 纵向凸形坡上的浅沟条数共计 183 条, 浅沟长度平均值为 29.87 m, 浅沟沟头到分水岭的平均距离为 56.41 m, 浅沟密度为 25.27 km/km²。纵向凹形坡上的浅沟条数共计 42 条, 浅沟长度平均值为 19.88 m, 浅沟沟头到分水岭的平均距离为 61.40 m, 浅沟密度为 12.41 km/km²。横向凸形坡上的浅沟条数共计 114 条, 浅沟长度平均值为 28.56 m, 浅沟沟头到分水岭的平均距离为 60.04 m, 浅沟密度为 17.69 km/km²。横向凹形坡上的浅沟条数共计 111 条, 浅沟长度平均值为 27.44 m, 浅沟沟头到分水岭的平均距离为 54.57 m, 浅沟密度为 30.61 km/km² (表 1)。

2.3.2 组合坡形浅沟的地形特征值统计 从不同组合坡形来看, 不同组合坡形影响浅沟的发育, 且浅沟的各指标值具有差异。双凹形坡上发育的浅沟共计 25 条, 浅沟长度平均值为 20.00 m, 浅沟沟头到分水岭的平均距离为 55.95 m, 浅沟密度为 14.45 km/km²。双凸形坡上发育的浅沟共计 97 条, 浅沟长度平均值为 30.11 m, 浅沟沟头到分水岭的平均距离为 58.40 m, 浅沟密度为 19.55 km/km²。凹凸形坡上发育的浅沟共计 18 条, 浅沟长度平均值为 19.70 m, 浅沟沟头到分水岭的平均距离为 60.41 m, 浅沟密度为 10.73 km/km²。凸凹形坡上发育的浅沟共计 86 条, 浅沟长度平均值为 29.60 m, 浅沟沟头到分水岭的平均距离为 54.17 m, 浅沟密度为 39.52 km/km²。借助 SPSS 25.0 软件中的单因素方差分析功能, 分别对不同组合坡形之间的浅沟长度以及不同坡形组合之间的浅沟沟头到分水岭的距离进行差异性分析 (表 2)。

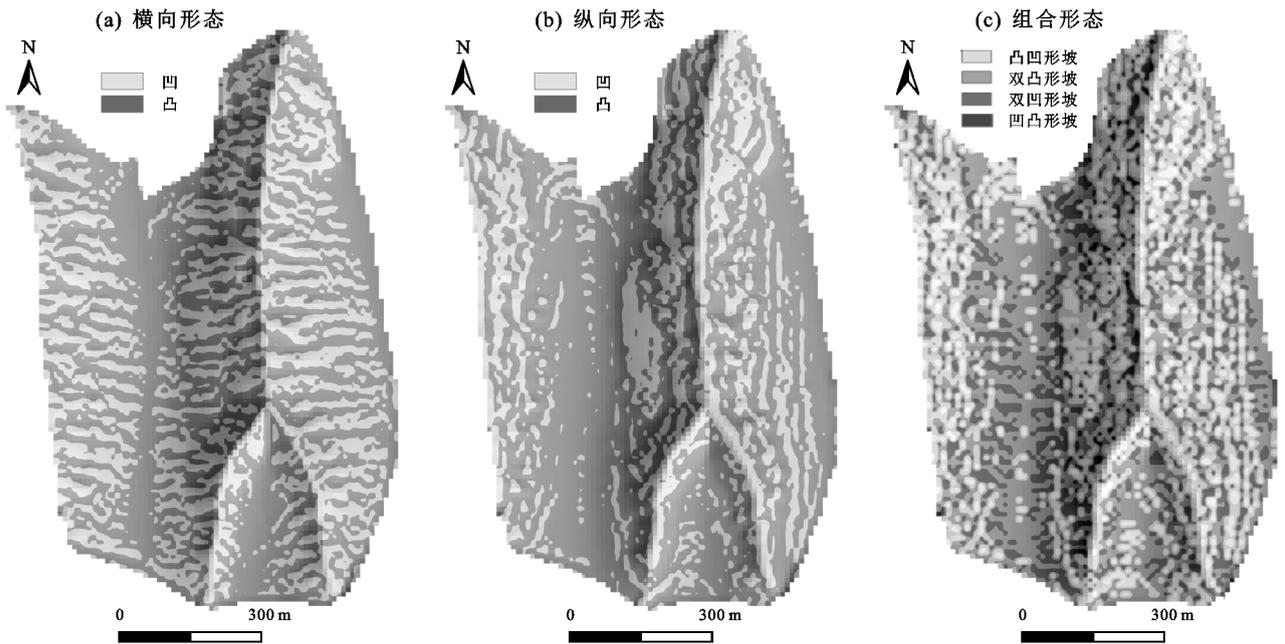


图 6 研究区的横向形态、纵向形态与组合形态

表 1 不同单一坡形浅沟指标统计特征

单一坡形	浅沟长度 平均值/m	沟头到分水岭的 距离平均值/m	浅沟密度/ ($\text{km} \cdot \text{km}^{-2}$)	浅沟 条数/条
纵向凸形坡	29.87	56.41	25.27	183
纵向凹形坡	19.88	61.40	12.41	42
横向凸形坡	28.56	60.04	17.69	114
横向凹形坡	27.44	54.57	30.61	111

表 2 不同坡形组合下浅沟指标统计特征

组合坡形	浅沟长度 平均值/m	沟头到分水岭的 距离平均值/m	浅沟密度/ ($\text{km} \cdot \text{km}^{-2}$)	浅沟 条数/条
双凹形坡	20.00a	55.95	14.45	25
双凸形坡	30.11b**	58.40	19.55	97
凹凸形坡	19.70a	60.41a	10.73	18
凸凹形坡	29.60b**	54.17b**	39.52	86

注:不同字母表示不同坡形间有显著性差异; ** 表示在 0.05 水平上具有显著差异; * 表示在 0.1 水平上具有显著差异。

由表 2 可知,在显著性为 0.05 水平,双凹形坡的浅沟长度与双凸形坡和凸凹形坡的浅沟长度具有显著差异,凹凸形坡的浅沟长度与双凸形坡和凸凹形坡的浅沟长度具有显著差异。双凸形坡与凸凹形坡上浅沟的平均长度分别为 30.11, 29.60 m, 双凹形坡与凹凸形坡上的浅沟平均长度分别为 20.00, 19.70 m; 其他组合坡形的浅沟长度差异不显著($p > 0.05$)。在显著性为 0.1 水平,凹凸形坡的浅沟沟头到分水岭的距离与凸凹形坡的浅沟沟头到分水岭的平均距离为 60.41 m, 凸凹形坡浅沟沟头到分水岭的平均距离为 54.17 m; 其他组合坡形的浅沟沟头到分水岭的距离无显著差异($p > 0.05$)。

2.3.3 不同坡形坡面浅沟发育的曲率分布特征 通过统计每条浅沟上的平面曲率与剖面曲率,得到研究区内各类组合坡形上浅沟发育的地形曲率频率分布图(图 7)。不同组合坡形上浅沟发育的地形曲率频率分布

具有差异。对于双凹形坡来说(图 7a),剖面曲率主要分布于 0.05~0.30, 占比为 88.00%, 平面曲率主要分布于 -0.45~-0.05, 占比为 80.00%。对于双凸形坡来说(图 7b),剖面曲率主要分布于在 -2.00~0, 占比为 98.00%, 平面曲率在各个区间所占比例基本相当,其中平面曲率在 0~2.50 的占比为 68.00%。对于凹凸形坡来说(图 7c),剖面曲率和平面曲率均主要分布于 0~0.30, 所占比例分别为 82.00% 和 83.00%。对于凸凹形坡来说(图 7d),剖面曲率和平面曲率均主要分布于 -0.50~0, 所占比例分别为 74.00% 和 92.00%。

3 讨论

3.1 遥感影像提取浅沟的精度问题探讨

近年来,高分辨率影像在沟道侵蚀的调查应用越来越广泛。张岩等^[25]以陕西省吴起县合沟小流域分辨率为 0.61 m 的 QuickBird 影像为基础数据,通过目视解译与野外实测的方法,对比分析了研究区内 60 条浅沟的实测长度和解译长度的差异。结果表明,解译浅沟的平均长度与实测浅沟的平均长度的差值为 2.36 m。原因在于在影像上解译浅沟时,由于分辨率的影响,未能准确识别影像上浅沟发育位置的地形变化(如陷穴),导致解译的浅沟长度的平均值比野外实测的长。仲原等^[26]以亚米级 Google Earth 影像为数据源目视解译浅沟,并结合 GNSRTK 野外实测表明,基于亚米级影像目视解译的浅沟调查方法与野外实测方法得到的浅沟长度无显著差异($p > 0.05$),单条浅沟长度的相对误差在 0.07%~11.66%, 占总数量约 58% 的浅沟长度的相对误差在 5% 以下。本文的数据源是分辨率为 0.05 m 的无人机航摄影像,与高分辨率的 QuickBird 和亚米级的 Google Earth 影像相比,分辨率更高,更能准确表达浅

沟的相关特征,提取的浅沟及其相关统计指标与实地差异较小。此外,Gündoğān 等^[27]的研究表明,基于

无人机的高分辨率 DEM,甚至还可以较为准确地预测浅沟侵蚀和土壤损失。

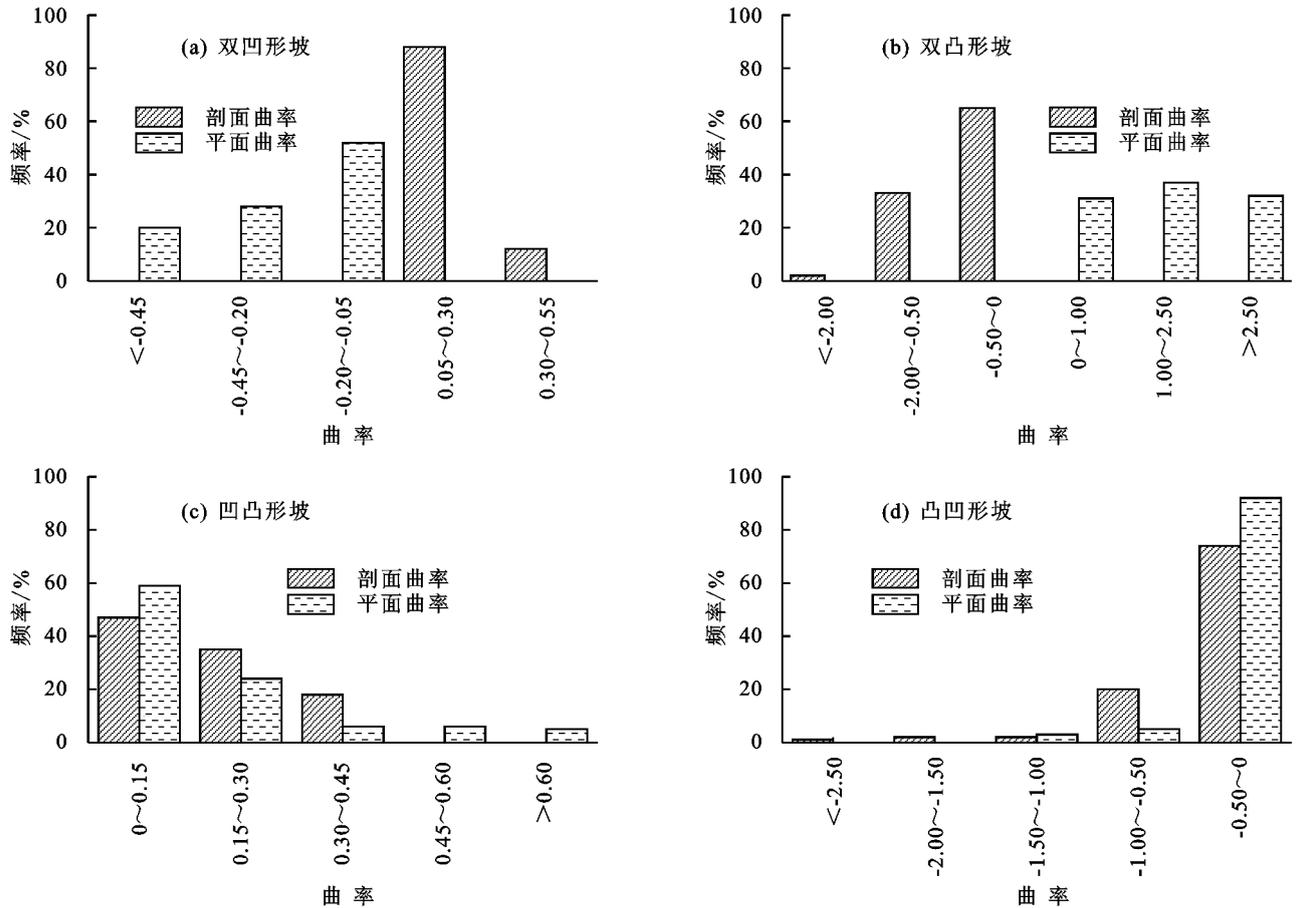


图 7 不同组合坡形浅沟发育的地形曲率频率分布

3.2 坡形对侵蚀及浅沟发育的影响

在单一坡形中,坡面的横剖面形态与纵剖面形态都对浅沟侵蚀有重要的影响,在组合坡形中,与双凹形坡和凹凸形坡相比,双凸形坡与凸凹形坡的侵蚀程度更为强烈,这与已有研究^[6,19,28]结论一致。同时本文的研究结果还表明,不同形态坡面特别是其组合形态对浅沟发育的贡献具有差异性,主要原因在于坡形在很大程度上决定着坡面径流的汇集过程和方式^[29]。对于纵向凸形坡,其上部地形较为平缓,但下部坡度陡增,导致水流动能增大,冲刷能力增强,使得土壤侵蚀较为严重。纵向凹形坡虽然上部地形较陡,坡面上方来水动能较大,但由于坡面下部地形减缓,坡面上方来水受地形影响动能减小,挟沙能力降低,使得土壤侵蚀减弱,甚至发生沉积。而横向凸形坡和横向凹形坡,主要影响地表径流的汇聚和发散。

Moore 等^[30]基于坡形对土壤侵蚀的影响机理,提出了理想条件下三维地形的侵蚀—沉积速率模型,该模型揭示了三维地形中坡面的形态、坡度以及坡长对土壤侵蚀—沉积过程的影响。根据该模型的计算结果表明,受坡形影响,研究区浅沟发生部位的侵蚀速率较大,促进浅沟的发育(图 8)。

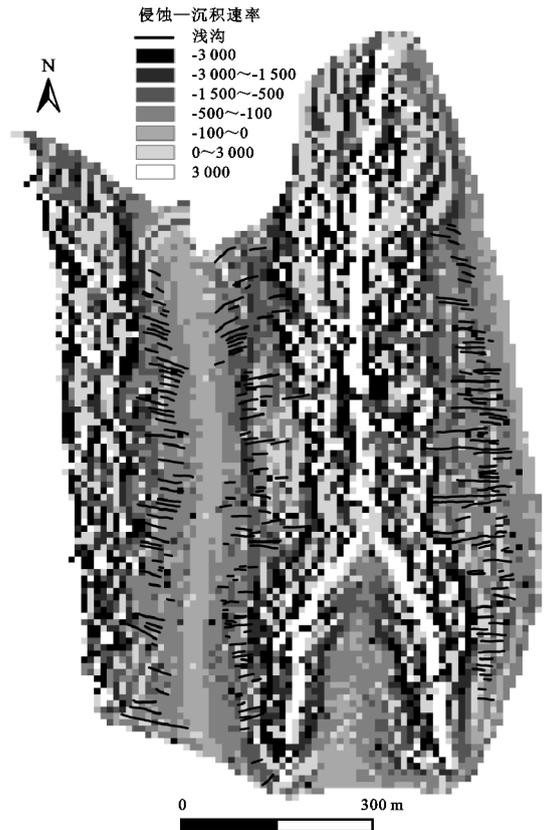


图 8 侵蚀—沉积速率分布

4 结论

(1)以浅沟分水线的高程对浅沟发育之前的原始坡面进行插值的结果可以很好地综合浅沟地形的特征,并能较好地刻画浅沟发育之前的原始坡面。

(2)从单一坡形来看,横向凹形坡的浅沟密度最大,纵向凹形坡的浅沟沟头到分水岭的距离最大;纵向凸形坡的浅沟条数以及浅沟平均长度均最大。从组合坡形分布来看,双凸形坡上的浅沟长度平均值最大,浅沟条数最多;凹凸形坡上浅沟沟头到分水岭的距离最大;凸凹形坡上的浅沟密度最大。此外,在各类组合坡形中,纵向为凸形坡的组合坡形对浅沟发育的影响较高。

(3)不同坡形组合浅沟发育所对应的平面曲率和剖面曲率分布特征明显不同,双凸形坡和凸凹形坡的地形曲率取值范围较其他2种组合坡形更大。

参考文献:

- [1] Stoffel M, Marston R A. Treatise on geomorphology[M]. San Diego: Academic Press, 2013.
- [2] 刘宝元,杨扬,陆绍娟.几个常用土壤侵蚀术语辨析及其生产实践意义[J].中国水土保持科学, 2018, 16(1): 9-16.
- [3] 徐锡蒙,郑粉莉,武敏.雨强和坡度对黄土陡坡地浅沟形态特征影响的定量研究[J].农业工程学报, 2017, 33(11): 124-132.
- [4] 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.
- [5] 张宗祜.黄土高原土壤侵蚀基本规律[J].第四纪研究, 1993, 13(1): 34-40.
- [6] 唐克丽,郑世清,席道勤,等.杏子河流域坡耕地的水土流失及其防治[J].水土保持通报, 1983, 3(5): 43-48.
- [7] 杨丽娜,范昊明,郭成久,等.不同坡形坡面侵蚀规律试验研究[J].水土保持研究, 2007, 14(4): 237-239, 243.
- [8] 张科利.浅沟发育对土壤侵蚀作用的研究[J].中国水土保持, 1991(4): 19-21, 65.
- [9] Peter A S, Larisa S S, Andrew V M. Fundamental quantitative methods of land surface analysis[J]. Geoderma, 2002, 107(1): 1-32.
- [10] 曹银真.黄土地区梁峁坡的坡地特征与土壤侵蚀[J].地理研究, 1983, 2(3): 19-29.
- [11] Qin C Z, Zhu A X, Shi X, et al. Quantification of spatial gradation of slope positions [J]. Geomorphology, 2009, 110(3): 152-161.
- [12] Lucain D, Thomas B. Automated classification of landform elements using object-based image analysis[J]. Geomorphology, 2006, 81(3/4): 330-344.
- [13] 陈渭南.黄土丘陵坡面三维形态初论[J].陕西师范大学学报(自然科学版), 1990, 1(1): 69-73.
- [14] 邢伟民,王德潼,徐浩林,等.坡形和 PAM 对黄土坡地水土养分迁移特征的影响[J].水土保持学报, 2020, 34(6): 135-142.
- [15] 冯大光,范昊明,王铁良.不同坡形坡度径流量产生规律的试验研究[J].沈阳农业大学学报, 2017, 48(3): 373-378.
- [16] 王颢霖,焦菊英,唐柄哲,等.陕北子洲“7·26”暴雨后坡耕地细沟侵蚀及其影响因素分析[J].农业工程学报, 2019, 35(11): 122-130.
- [17] 季翔,黄炎和,林金石,等.基于 DEM 的坡形与水土流失的关系:以西溪小流域为研究区[J].中国农业大学学报, 2019, 24(2): 161-171.
- [18] 汤国安,李发源,刘学军.数字高程模型教程[M].北京:科学出版社, 2010.
- [19] 王雷.黄土高原小流域侵蚀沟道空间频谱分析[D].陕西杨凌:中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2013.
- [20] 张科利,唐克丽,王斌科.黄土高原坡面浅沟侵蚀特征值的研究[J].水土保持学报, 1991, 5(2): 8-13.
- [21] 国家测绘局测绘标准化研究所. CH/T 1015.2—2007 基础地理信息数字产品 1: 10 000, 1: 50 000 生产技术规程第 2 部分: 数字高程模型(DEM)[S].北京:中国标准出版社, 2007.
- [22] 周启鸣,刘学军.数字地形分析[M].北京:科学出版社, 2006.
- [23] Zevenbergen L W, Thorne C R. Quantitative analysis of land surface topography[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1987, 12(3): 47-56.
- [24] 国家测绘局测绘标准化研究所.基础地理信息数字产品 1: 10 000, 1: 50 000 数字高程模型: CH/T 1008—2001[S].北京:中国标准出版社, 2001.
- [25] 张岩,范聪慧,龚颖华,等.基于 QuickBird 影像的黄土丘陵区坡面浅沟侵蚀速率研究[J].农业机械学报, 2017, 48(8): 239-244.
- [26] 仲原,王春梅,庞国伟,等.黄土高原浅沟空间分异特征研究[J].生态学报, 2022, 42(5): 1-13.
- [27] Gündoğan R, Alma V, Dindaroğlu T, et al. Monitoring and estimation of soil losses from ephemeral gully erosion in mediterranean region using low altitude unmanned aerial vehicles [J]. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2017, XLII-4/W6: 59-61.
- [28] 罗来兴.划分晋西、陕北、陇东黄土区域沟间地与沟谷的地貌类型[J].地理学报, 1956, 23(3): 201-222.
- [29] 范昊明,王铁良,周丽丽,等.不同坡形坡面径流流速时空分异特征研究[J].水土保持学报, 2007, 21(6): 35-38.
- [30] Moore I D, Burch G J. Modelling erosion and deposition: Topographic effects[J]. Transactions of the ASAE, 1986, 29(6): 1624-1630.