

定西于家山黄土洞穴的分布特征与侵蚀临界研究

郑炜珊, 耿豪鹏, 顾国强, 潘保田

(兰州大学资源环境学院西部环境教育部重点实验室, 兰州 730000)

摘要: 黄土洞穴与滑坡、沟蚀等侵蚀过程联系紧密并加剧了黄土高原的水土流失程度, 但目前黄土洞穴发育的分布特征与侵蚀临界暂未明晰。利用无人机获得了研究区高分辨率影像与数字表面模型, 基于影像标识了黄土洞穴并统计了其土地利用类型与洞穴直径, 利用标识点在数字表面模型上提取了黄土洞穴的坡度、坡向、曲率和汇水面积等地形数据并分析了黄土洞穴的分布特征。结果表明, 黄土洞穴直径大多 <4 m。黄土洞穴在耕地上发育较少, 多发育于牧草地区域流水汇聚的凹形坡, 且在阴坡更为发育。同时, 黄土洞穴坡度正切值范围集中于 $0.4\sim1.0$, 汇水面积一般不超过 3000 m^2 。依托统计的坡度正切值与汇水面积数据绘制了黄土洞穴的侵蚀临界图并对比了黄土洞穴与浅沟、切沟的侵蚀临界。黄土洞穴的侵蚀临界边界分别为 $SA^{0.150}=0.368$ 与 $SA^{0.135}=7.580$, 分布较广且覆盖了浅沟与切沟的侵蚀临界。浅沟、切沟的演化与黄土洞穴的发育有关, 黄土洞穴通过连通与坍塌促进了浅沟、切沟的发育、转换与扩展, 并因此加剧了黄土高原的水土流失。研究量化了黄土洞穴发育的分布特征, 建立了黄土洞穴与浅沟、切沟的联系并深化了对黄土洞穴侵蚀过程的认识。

关键词: 黄土洞穴; 水土流失; 分布特征; 侵蚀临界

中图分类号:P954 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-2242(2020)04-0112-06

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.04.017

The Study of the Distribution Characteristics and Erosion Threshold of Loess Cave at Yujia Mountain in Dingxi

ZHENG Weishan, GENG Haopeng, GU Guoqiang, PAN Baotian

(Key Laboratory of Western China's Environmental Systems (Ministry of Education),
College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000)

Abstract: Loess cave is closely related to other erosion processes, such as landslide and gully erosion, and aggravates the degree of soil and water loss in the loess plateau. However, the distribution characteristics and the erosion threshold of loess cave are not clear yet. This study uses unmanned aerial vehicle (UAV) to acquire the high resolution image and digital surface model (DSM) of the study area. Identifying the loess cave, collecting its land use type and measuring its average length based on image as well as extracting its terrain data such as slope, aspect, curvature and drainage area, we analyze the distribution characteristics of the loess cave. The results show that the average length of loess cave is mostly shorter than 4 m. The loess cave tends to develop in pasture area rather than in arable land and requires certain terrain, mostly develops in the concave slope with water converges. The number of loess caves that develop on shade slope is more than that on sunny slope. Also, the area exists loess cave is usually with the tangent value of slope between 0.4 to 1.0 and the drainage area less than 3000 m^2 . Drawing the erosion threshold of loess cave rely on the statistics data of the tangent value of slope and drainage area and comparing the erosion threshold of loess cave with that of shallow ephemeral gully and gully, the erosion threshold of loess cave can be applied as formulas $SA^{0.150}=0.368$ and $SA^{0.135}=7.580$, which is widely enough to cover the erosion threshold of shallow ephemeral gully and gully. The evolution of shallow ephemeral gully and gully is related to that of loess cave. The development and transformation of the shallow ephemeral gully and gully are promoted by the collapse and connection of the loess cave, thus aggravates the degree of soil and water loss in the loess plateau. This study quantifies the distribution characteristics of the loess cave and establishes the contact among loess cave, shallow ephemeral gully and gully. It deepens the understanding of the process of the loess cave.

Keywords: loess cave; soil and water loss; distribution characteristics; erosion threshold

黄土高原是世界上黄土分布最广、厚度最大、黄土地貌类型最为典型与齐全的黄土覆盖区^[1],地质环境脆弱、地形破碎,大部分地区土壤侵蚀模数超过1 000 t/(km²·a)^[2],是世界上水土流失最为严重的地区之一^[3]。黄土由于其大孔隙、湿陷性、质地疏松等特点,发育了沟蚀、滑坡、黄土洞穴侵蚀等多种侵蚀过程。其中,黄土洞穴是黄土在地下水或地表水侵蚀作用下形成的地下孔洞或出露于地表的空洞,是黄土高原特有的侵蚀过程^[4]。目前针对黄土洞穴的研究多围绕其成因、影响因素、发育模式与空间分布等方面开展。黄土洞穴按成因可划分为地质作用洞穴、生物洞穴与人工洞穴^[5]。地质作用洞穴是目前黄土洞穴研究的主要研究对象,依据流水侵蚀方式可划分为冲穴、陷穴、碟形地与暗穴等^[6],不同类型洞穴伴随着不同的形态特征与发育模式^[7]。黄土洞穴的发育程度受黄土粒径、黄土湿陷系数、降雨与植被等因素的共同影响,在黄土高原上呈现数量由西北向东南逐渐递减的大尺度空间分布规律^[8]。小尺度上,黄土洞穴分布广泛,坡度转折较大、流水易于汇聚、流水优势通道较多的区域均可发育黄土洞穴^[9],而上述区域恰好也是沟蚀、滑坡和泥石流等侵蚀过程频发的区域,这使得黄土洞穴与其他侵蚀过程联系紧密。黄土洞穴与滑坡在空间分布上具有一定相关性^[10],甚至可互相促进^[11]。黄土洞穴与沟蚀过程息息相关,是沟谷溯源侵蚀与加深的重要推动者^[12]。黄土洞穴是黄土高原57%的泥沙与53%的径流运移的通道^[13-14],加剧了黄土高原的水土流失^[11]。

鉴于黄土洞穴与上述侵蚀过程的紧密联系以及在黄土高原水土流失中的重要作用,开展黄土洞穴的分布特征研究有利于建立并理解黄土洞穴与其他侵蚀过程的联系,但目前对黄土洞穴分布的地形、坡度、坡向和曲率等分布特征的研究较少。侵蚀临界是通过统计侵蚀过程发生位置的坡度正切值(S,正切值)和汇水面积(A, m²),并将其绘制于以坡度正切值为横坐标、汇水面积为纵坐标的侵蚀临界图(A—S图)中,以此来确定侵蚀过程发育的地形条件以及探索不同侵蚀过程之间关系的常用手段^[15]。不同侵蚀过程的坡度与汇水面积的关系存在差异,Dietrich等^[16]定量绘制了蓄满产流(沟道流)与片流等不同侵蚀过程在A—S图上的空间分布。但是,侵蚀临界理论起源并发展自基岩经风化成壤并形成具有完整风化壳覆盖的景观单元^[17],尚未在堆积区得到充分应用。黄土高原作为第四纪风成沉积物的最大堆积区,质地均一,是探讨侵蚀过程发育分布特征的理想场所。目

前,黄土区对侵蚀临界的应用局限于沟蚀过程^[18],在黄土洞穴侵蚀过程的应用较少^[19]。

基于以上因素,统计黄土洞穴发育位置的坡度、坡向、曲率、汇水面积和土地利用类型等分布特征,利用侵蚀临界理论探索黄土洞穴与其他侵蚀过程的联系,可更全面地了解黄土洞穴的发育条件并完善对黄土区侵蚀过程的认识。定西市于家山位于黄土高原西部,气候干旱少雨,依据彭建兵等^[6]绘制的《黄土高原地区黄土洞穴发育密度分区趋势图》,黄土洞穴密度属于中等发育区。区域内黄土洞穴发育显著,洞穴特征明显,形态多呈近圆形或椭圆形,易于在影像上进行识别。同时,研究区内土地利用类型仅为耕地与牧草地,牧草地几乎无人类活动痕迹,也无大范围树丛影响地表高程或造成大面积阴影从而影响对洞穴的识别,适合开展黄土洞穴的分布特征及自然状态下黄土洞穴的侵蚀临界研究。本研究以定西市于家山为靶区,依托无人机航测技术,统计研究区黄土洞穴发育位置的土地利用类型、坡度、坡向、曲率和汇水面积,总结黄土洞穴的分布特征,利用坡度与汇水面积数据绘制黄土洞穴发育的侵蚀临界图,将其与黄土区浅沟、切沟的侵蚀临界进行对比,探讨黄土洞穴在黄土侵蚀过程中的作用及意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于甘肃省定西市临洮县东北方向的于家山(103°52'00"–103°53'30"E, 35°36'00"N–35°37'30"N),依据《黄土高原地区综合治理规划大纲》^[20],属于黄土高原沟壑区。研究区气候为温带大陆性气候,干旱少雨。降水主要集中于7—9月,且多以暴雨的形式出现,占年降水量(434.9 mm)的60%~70%^[21]。研究区梁峁起伏、沟壑纵横^[22]。土壤母质基本为黄土,质地以粉壤和粉砂壤为主^[23]。研究区土地利用类型较为单调,以耕地为主,耕地约占无人机总飞行面积的2/3,其余部分为牧草地。牧草地上无明显种植痕迹,受到人类活动的影响较少。区域内黄土湿陷系数普遍>0.08,黄土洞穴密布^[8],牧草地与耕地上均发育黄土洞穴。

1.2 研究方法

本研究使用大疆 Phantom 4 Pro V2.0 无人机对研究区进行拍摄,共生成研究区4.7 km²的高分辨率(0.12 m)正射影像与数字表面模型(digital surface model, DSM)。在Arc GIS软件中对无人机正射影像中的黄土洞穴进行识别并标记。在影像上量取每一个黄土洞穴的短轴与长轴,求其平均值作为该黄土

洞穴的直径。同时,根据影像识别并统计每个黄土洞穴的土地利用类型。

DSM 分辨率与影像一致,分析地貌过程的地形数据最优空间分辨率为 $1\sim 5\text{ m}^{[24]}$, 该分辨率范围保存了原始地形的主要信息,同时可以缩短计算时间。基于以上考虑,将 DSM 在 Arc GIS 中重采样为空间分辨率为 2 m 的 DSM。在 Arc GIS 的空间分析模块中分别利用坡度、坡向、曲率组件计算该 DSM 每个栅格的坡度、坡向与曲率数据。上述 Arc GIS 组件均基于 D8 算法进行计算。在 Arc GIS 的水文分析模块中使用流向组件计算 DSM 中每个栅格的流向,在此基础上利用累积流量组件计算流经每个栅格的流量,将栅格数值乘以栅格面积(4 m^2)即可得到每个栅格的汇水面积。利用标记的黄土洞穴点提取发育在牧草地上的黄土洞穴的汇水面积、坡度、坡向与曲率等地形要素。将坡向以正北方向为 0° ,顺时针方向旋转增加,每隔 45° 为 1 个组别进行划分,共划分为 8 组;曲率分为剖面曲率与平面曲率,分别将其按照数值 $>0, =0, <0$ 进行划分。

对上述统计结果进行分析,总结黄土洞穴的分布特征。利用黄土洞穴的坡度与汇水面积数据绘制黄土洞穴的侵蚀临界图,并将其与黄土区浅沟、切沟的侵蚀临界进行对比,探索黄土洞穴与浅沟、切沟的联系。

2 结果与分析

2.1 洞穴大小与分布特征分析

4.7 km^2 的飞行区内共发现 531 个黄土洞穴,黄土洞穴密度为 $113\text{ 个}/\text{km}^2$ 。根据土地利用类型对黄

表 1 不同土地利用类型黄土洞穴密度

土地利用 类型	面积/ km^2	占总面积 百分比/%	黄土洞穴 数量/个	占总黄土洞穴 数量百分比/%	黄土洞穴密度/ (个 $\cdot \text{km}^{-2}$)
牧草地	1.3	27.7	445	83.8	342
耕地	3.4	72.3	86	16.2	25
总体	4.7	100.0	531	100.0	113

对研究区内所有洞穴的大小进行统计(图 2),洞穴的直径为 $0.6\sim 14.8\text{ m}$,其中洞穴直径在 $2\sim 4\text{ m}$ 的最多,其次为 $<2\text{ m}$ 。直径 $>6\text{ m}$ 的洞穴数量极少,仅占研究区内所有洞穴数量的 4.0% 。

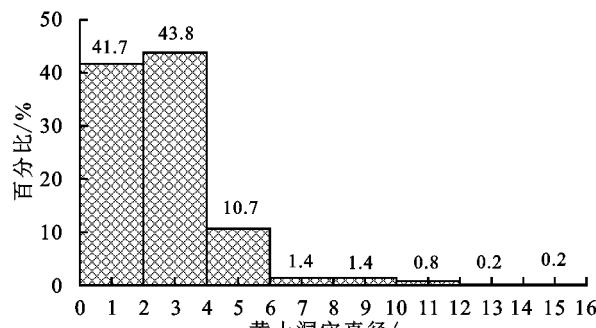


图 2 研究区黄土洞穴直径统计

土洞穴进行划分,白色实心圆表示牧草地黄土洞穴点,黑色实心圆表示耕地区黄土洞穴点(图 1)。耕地面积占研究区总面积的 72.3% ,但仅发育了 86 个黄土洞穴(表 1),黄土洞穴多发育在梯田边缘等地形坡度转折较大的区域。牧草地面积约占总面积的 27.7% 却发育了 83.8% 的黄土洞穴,牧草地的黄土洞穴主要分布在沟谷中。

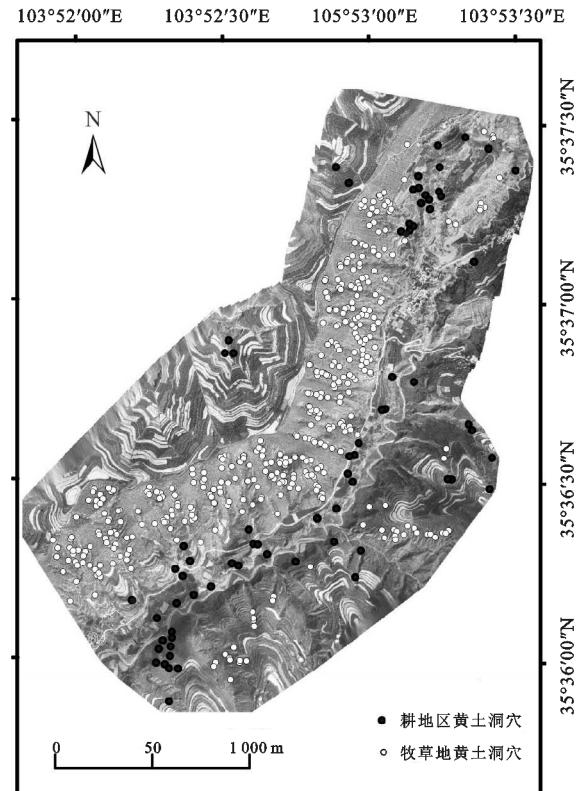


图 1 研究区黄土洞穴分布

对发育在牧草地的黄土洞穴进行坡向与数量统计(表 2),阴坡(包括 $0^\circ\sim 45^\circ, 45^\circ\sim 90^\circ, 270^\circ\sim 315^\circ, 315^\circ\sim 360^\circ$)面积约占牧草地面积的 16.7% ,一共发育了 127 个黄土洞穴,占牧草地黄土洞穴数量的 28.5% 。阴坡黄土洞穴密度为 $635\text{ 个}/\text{km}^2$,其中,坡向在 $270^\circ\sim 360^\circ$ 的牧草地黄土洞穴发育密度最大。阳坡(包括 $90^\circ\sim 135^\circ, 135^\circ\sim 180^\circ, 180^\circ\sim 225^\circ, 225^\circ\sim 270^\circ$)约 1.0 km^2 的面积上发育了 318 个黄土洞穴,阳坡黄土洞穴密度为 $318\text{ 个}/\text{km}^2$ 。阴坡黄土洞穴比阳坡更为发育。

提取牧草地黄土洞穴的平面曲率与剖面曲率,平面曲率影响着流水的流动方向,剖面曲率反映了地形。依据曲率数值 $<0, =0, >0$ 将平面曲率划分为汇聚(<0)、直线($=0$)、发散(>0)3 种类型,将剖面

曲率划分为凸形坡(<0)、直线坡($=0$)、凹形坡(>0)3种类型。平面曲率中,流水汇聚地形发育的黄土洞穴数量最多(图3),达到了黄土洞穴数量的95.3%,流水发散地形发育的黄土洞穴较少,流水直线区基本

不发育黄土洞穴。黄土洞穴主要发育在流水汇聚的区域。剖面曲率统计结果表明,黄土洞穴主要发育在凹形坡区域,凸形坡仅有少量黄土洞穴发育,占黄土洞穴数量的10.9%,直线坡几乎不发育黄土洞穴。

表2 不同坡向的牧草地面积与黄土洞穴数量

坡位	坡向/ ($^{\circ}$)	黄土洞穴 数量/个	面积/ ($\times 10^{-2}$ km 2)	黄土洞穴密度/ (个·km $^{-2}$)	黄土洞穴 总数量/个	总面积/ km 2	黄土洞穴总密度/ (个·km $^{-2}$)
阴坡	0~45	27	2.3	1173			
	45~90	62	18.9	328			
	270~315	24	0.4	6000	127	0.2	635
	315~360	14	0.3	4667			
阳坡	90~135	113	47.1	240			
	135~180	100	33.3	300			
	180~225	80	18.5	432	318	1.0	318
	225~270	25	5.0	500			

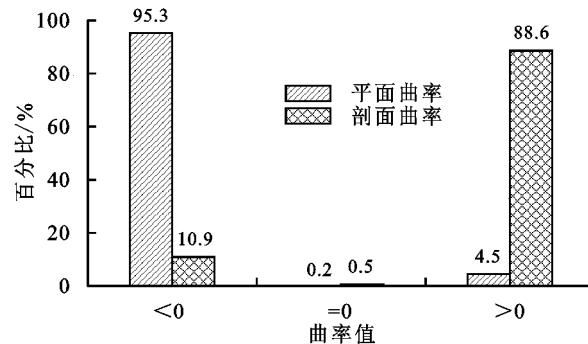


图3 牧草地黄土洞穴曲率频率分布

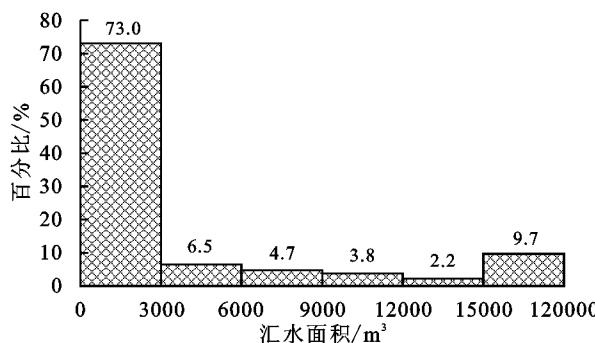


图4 牧草地黄土洞穴发育的汇水面积与坡度正切值的频率分布

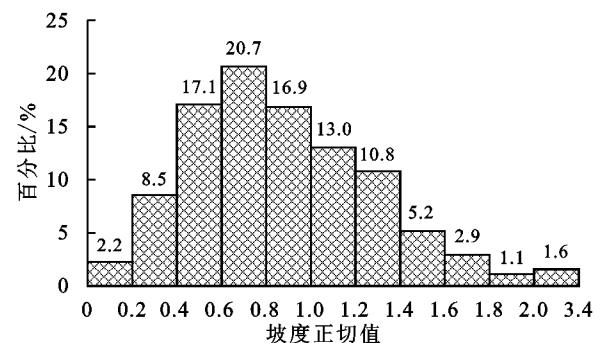
牧草地区域黄土洞穴的侵蚀临界图(A—S图,图5)显示,牧草地黄土洞穴的侵蚀临界整体上呈现聚集分布。黄土洞穴汇水面积上界约为100 000 m 2 ,汇水面积最小值等于地形数据1个栅格的面积(4 m 2)。分别连接图中最左、最右的黄土洞穴点来绘制黄土洞穴侵蚀临界的左边界与右边界(黑色实线),黄土洞穴发育在左、右边界之间。由于牧草区的黄土洞穴基本位于沟谷中,而沟蚀过程侵蚀临界判别式为 $SA^b = a$ ^[25],利用该判别式分别对黄土洞穴的左、右边界进行拟合。黄土洞穴侵蚀临界左边界拟合结果为 $SA^{0.150} = 0.368$,右边界拟合结果为 $SA^{0.135} = 7.580$ 。

3 讨论

黄土洞穴主要分布在牧草地的沟谷中,在耕地区

2.2 黄土洞穴侵蚀临界图分析

发育在牧草地的黄土洞穴其汇水面积与坡度正切值频率分布直方图(图4)表明,黄土洞穴发育所需的汇水面积由4 m 2 跨越至120 000 m 2 ,跨越范围广。其中,大多数黄土洞穴发育所需汇水面积 $<3 000$ m 2 ,随着汇水面积增加,黄土洞穴发育数量逐渐减少,汇水面积 $>12 000$ m 2 时黄土洞穴的数量几乎可忽略不计。黄土洞穴分布位置的坡度正切值大致呈正态分布,黄土洞穴主要发育于坡度正切值介于0.4~1.0的区域,尤其是0.6~0.8区间。



分布较少,意味着人类活动造成的土地利用类型变化是短尺度上影响黄土洞穴发育的重要因素。人类在耕作过程中,一方面会对规模不大的黄土洞穴进行填洼而使黄土洞穴短暂消失;另一方面耕作行为会导致土壤容重增加,土体板结紧实,通气透水性能较差^[26],流水入渗受到抑制进而抑制黄土洞穴的发育。而区域内牧草地的沟谷受到人类活动的干扰较少,黄土洞穴发育未受到抑制。同时,牧草根系死亡后留下的孔洞会为地表径流提供优势流,促进黄土洞穴的发育^[8]。因此不同土地利用类型上黄土洞穴发育程度存在差异。而相同土地利用类型不同坡向之间,阴坡水分含量更高^[27],黄土洞穴更易发育。人类活动通过改变土地利用类型来影响土壤的理化性质,进而影

响黄土洞穴的分布与发育程度,而土壤水分含量是影响同一土地利用类型区域黄土洞穴分布与发育程度的关键因素。

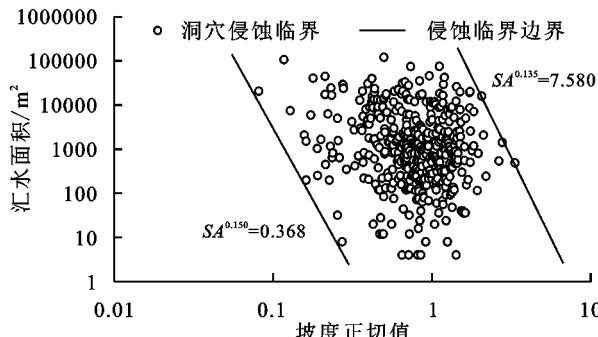


图 5 牧草地黄土洞穴侵蚀临界图

黄土洞穴主要发育在汇聚地形与凹形坡,说明坡面形态也通过影响水分分布来影响黄土洞穴的发育位置。汇聚地形径流汇集,流水的侵蚀和搬运能力加强,细粒物质更易被运移并流失,导致黄土内部结构遭到破坏,形成空洞并逐渐发育为黄土洞穴^[28]。凹形坡前陡后缓,当流水到达凹形坡时,较陡的坡度增加了流速,流水的动能与侵蚀能力也随之加强^[29]。流水侵蚀凹形坡底部黄土使其形成负地形,进而逐渐发展为黄土洞穴。汇聚型曲率与凹形坡相结合,使得区域内既具有能够搬运黄土的流水,又具有足够的侵蚀能力为黄土洞穴的发育提供动力。10.9%的黄土洞穴发育在凸形坡,可能与凸形坡存在更多裂隙或动物洞穴有关^[19],它们可为黄土洞穴发育提供优势流通道。因此,平面曲率通过调控流水的流路、剖面曲率通过改变流水的动能与侵蚀能力来限制黄土洞穴的发育位置。

将研究区黄土洞穴的侵蚀临界与李斌兵等^[30]利用野外 GPS 测量结合卫星影像进行验证而获得的黄土区浅沟与切沟的侵蚀临界进行对比(图 6)。对比结果显示,黄土洞穴的侵蚀临界具有较广的分布范围,且包含了浅沟与切沟的侵蚀临界,这意味着浅沟和切沟的演化过程与黄土洞穴的发育有关。黄土洞穴的发育增强了地下潜流的流动,促使土壤被不断冲刷并造成细粒物质的运移,导致土壤孔隙逐渐增加,进而造成表层土壤崩塌,加快浅沟的发生过程^[31]。而浅沟是片流侵蚀与切沟侵蚀的过渡区^[32],因此,黄土洞穴通过促进浅沟的发育来推动黄土区坡面过程向沟蚀过程的转换。浅沟作为坡面过程的最后阶段,切沟作为沟蚀过程的初始阶段^[33],坡面过程向沟蚀过程转换的实质是浅沟演化为切沟,发育在浅沟且其出水口与切沟沟头相连的黄土洞穴一旦坍塌便会导致浅沟向切沟的转换^[12]。本研究黄土洞穴集中发育在坡度正切值为 0.6~0.8 的区域,恰好为浅沟与切沟坡度正切值的分界^[30,34],证明了黄土洞穴推动了

浅沟向切沟的演化并因此加强了切沟的溯源侵蚀,促进了切沟的发展。切沟的加深同样是切沟发展的途径,而黄土洞穴也可促进切沟的加深^[35]。黄土洞穴也广泛存在于切沟沟头与中上游的沟床上^[36],底部相互贯通,上部有土体相连^[37],相连的土体发生坍塌会分别导致切沟沟头和中上游沟床的加深并加快切沟的下切侵蚀^[38]。而黄土洞穴汇水面积上界大概为 100 000 m²,该汇水面积可能对应着切沟的中下游区域。该区域地势较为平缓,径流携带的泥沙在此沉积,抑制了黄土洞穴的发育^[36]。黄土洞穴为切沟的溯源侵蚀与下切侵蚀提供了条件,推动着切沟中上游部分的发育。黄土洞穴的发育、连通与坍塌过程联系着浅沟与切沟的孵化、转换与拓展过程,加剧了黄土高原的水土流失。

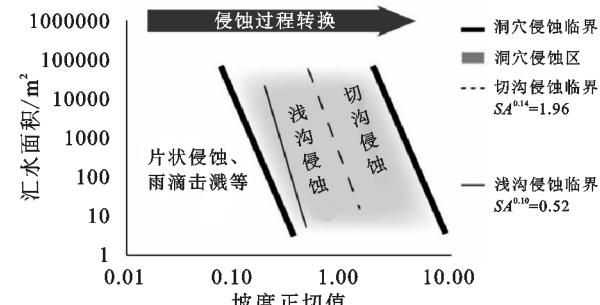


图 6 黄土坡一沟体系侵蚀过程转换与演化

综上所述,黄土洞穴具有一定的分布特征,其中,土地利用类型与地形因素通过影响土壤理化性质与水分运移来影响黄土洞穴的发育,使黄土洞穴集中发育在牧草区上有流水汇聚的凹形坡,且阴坡黄土洞穴较阳坡而言更为发育。黄土洞穴侵蚀临界分布范围较广,其左、右边界判别式分别为 $SA^{0.150} = 0.368$ 与 $SA^{0.135} = 7.580$,包含了浅沟与切沟的侵蚀临界。浅沟与切沟的发育与黄土洞穴息息相关,黄土洞穴的扩展与坍塌是浅沟、切沟中上游区域发育与加深的重要形式,并因此加剧了黄土高原的水土流失。黄土丘陵沟壑区黄土洞穴可贡献流域内 23.5% 的产沙量^[39],而黄土丘陵沟壑区与黄土高原沟壑区切沟侵蚀的产沙量分别超过了流域产沙量的 50% 与 80%^[33],鉴于黄土洞穴与切沟的紧密联系,黄土高原沟壑区黄土洞穴对流域贡献的产沙量应超过 23.5%,甚至可能接近 40%。

上述结果一致表明,黄土洞穴对黄土高原的水土流失具有不可忽视的作用,黄土洞穴的定量研究是更全面了解黄土区侵蚀过程并控制水土流失的关键。而本文仅对黄土洞穴的分布特征以及其与浅沟、切沟的关系进行初步量化,对黄土洞穴发育条件以及其对区域侵蚀量的贡献程度的定量研究仍存在不足。目前学界虽已意识到黄土洞穴对区域水土流失的重要作用,但黄土区的侵蚀预测模型仍仅考虑地表的侵蚀过程^[40],缺少黄土洞穴的参与。侵蚀预测模型中黄

土洞穴模块的设计与构建依托于黄土洞穴的定量研究,首先应研究的便是量化黄土洞穴的发育条件。黄土洞穴发育除受地形因素与土地利用类型的影响外,还受气候、土性、生物等多种因素影响。生物的扰动增加了黄土洞穴研究的复杂程度,目前关于动物行为以及植物对黄土洞穴发育的响应机制研究仍较为匮乏。后续研究需加大对黄土洞穴进行定量研究的力度,以便更全面地认识黄土洞穴侵蚀过程并提高侵蚀预测模型的准确程度。

4 结论

(1)研究区内黄土洞穴的发育密度为113个/ km^2 。黄土洞穴直径大多 $<4\text{ m}$ 。土地利用类型与地形因素通过调控水分运移与土壤理化性质来影响黄土洞穴的分布特征,使黄土洞穴多发育在牧草区流水汇聚的凹形坡上,汇水面积一般 $<3\,000\text{ m}^2$,坡度正切值集中于0.4~1.0,并且阴坡的黄土洞穴比阳坡更为发育。

(2)黄土洞穴的侵蚀临界分布较广且覆盖了浅沟与切沟的侵蚀临界,其左、右边界分别满足 $SA^{0.150}=0.368$ 与 $SA^{0.135}=7.580$ 。黄土洞穴的发育与浅沟、切沟的演化息息相关,黄土洞穴通过其自身的连通与坍塌来促进浅沟、切沟中上游区域的发育、转换与拓展,推动了黄土高原的水土流失。对黄土洞穴进行更全面的定量研究是更准确认识黄土高原侵蚀过程并控制水土流失的重要途径。

参考文献:

- [1] Wang T M, Wu J G, Kou X J, et al. Ecologically asynchronous agricultural practice erodes sustainability of the Loess Plateau of China[J]. Ecological Applications, 2010, 20(4):1126-1135.
- [2] Cai Q G. Soil erosion and management on the Loess Plateau[J]. Journal of Geographical Sciences, 2001, 11(1):53-72.
- [3] 李相儒,金钊,张信宝,等.黄土高原近60年生态治理分析及未来发展建议[J].地球环境学报,2015,6(4):248-254.
- [4] 齐威.黄土陷穴的自动提取与分析研究[D].南京:南京信息工程大学,2017.
- [5] 彭建兵,李喜安,孙萍,等.黄土洞穴的环境灾害效应[J].地球与环境,2005,33(4):1-7.
- [6] 彭建兵,李喜安,范文,等.黄土高原地区黄土洞穴的分类及发育规律[J].地学前缘,2007,14(6):234-244.
- [7] 李喜安,彭建兵,陈志新,等.湿陷性黄土地区土壤洞穴侵蚀研究[J].水土保持研究,2003,10(2):28-32.
- [8] 彭建兵,李庆春,陈志新,等.黄土洞穴灾害[M].北京:科学出版社,2008.
- [9] 丁建强.甘肃黄土陷穴的形成因素及分布规律研究[J].甘肃科技纵横,2009,38(1):150-151.
- [10] Verachtert E, Van D E M, Poesen J, et al. Spatial interaction between collapsed pipes and landslides in hilly regions with loess-derived soils [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2013, 38(8):826-835.
- [11] 李治财,刘高.滑坡体上黄土洞穴的发育特征及其成因机制[J].中国水土保持,2014(4):60-63,69.
- [12] Zhu T X. Gully and tunnel erosion in the hilly Loess Plateau region, China[J]. Geomorphology, 2012, 153/154:144-155.
- [13] Zhu T X. Deep-seated, complex tunnel systems: A hydrological study in a semi-arid catchment, Loess Plateau, China [J]. Geomorphology, 1997, 20(3):255-267.
- [14] Zhu T X, Cai Q G, Zeng B Q. Runoff generation on a semi-arid agricultural catchment: field and experimental studies[J]. Journal of Hydrology, 1997, 196(1/4):99-118.
- [15] Torri D, Poesen J. A review of topographic threshold conditions for gully head development in different environments[J]. Earth-Science Reviews, 2014, 130:73-85.
- [16] Dietrich W E, Wilson C J, Montgomery D R, et al. Erosion thresholds and land surface morphology[J]. Geology, 1992, 20(8):675-679.
- [17] Dietrich W E. Hollows, colluvium, and landslides in soil-mantled landscapes[J]. Hillslope Processes, 1986, 1986:361-388.
- [18] Wu Y Q, Cheng H. Monitoring of gully erosion on the Loess Plateau of China using a global positioning system[J]. Catena, 2005, 63(2/3):154-166.
- [19] Verachtert E, Eeckhaut M V D, Poesen J, et al. Factors controlling the spatial distribution of soil piping erosion on loess-derived soils: A case study from central Belgium[J]. Geomorphology, 2010, 118(3):339-348.
- [20] 国家发展改革委.2010—2030年黄土高原地区综合治理规划大纲[Z].2010.
- [21] 何杰,阳坤.中国区域高时空分辨率地面气象要素驱动数据集[Z].寒区旱区科学数据中心,2011.
- [22] 何宝林.陇中半干旱黄土丘陵区分区系统治理与农业可持续发展研究[J].安徽农业科学,2009,37(17):8113-8115,8118.
- [23] 邵臻,张富,陈瑾,等.陇中黄土丘陵沟壑区不同土地利用下土壤水分变化分析[J].干旱区资源与环境,2017,31(12):129-135.
- [24] Heimsath A M, Dietrich W E, Nishiizumi K, et al. Cosmogenic nuclides, topography, and the spatial variation of soil depth[J]. Geomorphology, 1999, 27(1/2):151-172.
- [25] 胡刚,伍永秋.发生沟蚀(切沟)的地貌临界研究综述[J].山地学报,2005,23(5):565-570.
- [26] 李庆云,余新晓,信忠保,等.黄土高原典型流域不同土地利用类型土壤物理性质分析[J].水土保持研究,2010,17(6):110-114,118.

- [3] 王济,蔡雄飞,雷丽,等.不同裸岩率下我国西南喀斯特山区土壤侵蚀的室内模拟[J].中国岩溶,2010,29(1):1-5.
- [4] Poesen J, Ingelmo-Sanchez F, Mucher H. The hydrological response of soil surface to rainfall as affected by cover and position of rock fragments in the top layer[J]. Earth Surface Processes Landforms, 1990, 15: 653-671.
- [5] 刘正堂,戴全厚,倪九派,等.喀斯特地区裸坡面土壤侵蚀的人工模拟降雨试验研究[J].水土保持学报,2013,27(5):12-16.
- [6] 吴冰,朱元骏,邵明安.降雨强度对含砾石土壤产沙及入渗的影响[J].水土保持学报,2011,25(6):87-91.
- [7] 毛天旭,朱元骏,邵明安,等.模拟降雨条件下含砾石土壤的坡面产流和入渗特征[J].土壤通报,2011,42(5):1214-1218.
- [8] Gong T X, Zhu Y J, Shao M A. Effect of embedded-rock fragments on slope soil erosion during rainfall events under simulated laboratory conditions[J]. Journal of Hydrology, 2018, 563: 811-817.
- [9] 党宏宇,陈洪松,邵明安.喀斯特地区不同层次土石混合介质对土壤水分入渗过程的影响[J].农业工程学报,2012,28(8):38-43.
- [10] 方胜,彭韬,王世杰,等.喀斯特坡地土壤稳渗率空间分布变化特征研究[J].地球与环境,2014,42(1):1-10.
- [11] 王明刚,李森,金昌宁.粤北石漠化地区坡地入渗产流规律试验研究[J].水土保持研究,2011,18(6):57-61.
- [12] 张治伟,朱章雄,王燕,等.岩溶坡地不同利用类型土壤入渗性能及其影响因素[J].农业工程学报,2010,26(6):71-76.
- [13] 徐勤学,李春茂,陈洪松,等.喀斯特峰丛坡地灌木林地与梯田旱地土壤水分入渗特征[J].农业工程学报,2018,34(8):124-131.
- [14] 李春茂,徐勤学,吴攀,等.不同土地利用方式峰丛坡地土壤入渗特征及其模拟[J].水土保持研究,2019,26(1):47-52,60.
- [15] 曾江敏,何丙辉,李天阳,等.喀斯特槽谷区不同林草恢复模式下土壤入渗特征[J].水土保持学报,2019,33(4):58-64.
- [16] 谢云,林小鹃,刘英娜,等.槽式摆喷头下喷式人工模拟降雨机的雨强及其空间分布率定[J].水土保持通报,2008,28(4):1-6.
- [17] 任青青,严友进,甘艺贤,等.短历时强降雨对典型喀斯特坡耕地侵蚀产沙的影响[J].水土保持学报,2019,33(6):105-112.
- [18] 张志才,陈喜,程勤波,等.喀斯特山体表层岩溶带水文地质特征分析:以陈旗小流域为例[J].地球与环境,2011,39(1):19-25.
- [19] Kostiakov A N. On the dynamics of the coefficient of water percolation in soils and on the necessity of studying it from a dynamic point of view for purposes of amelioration[J]. Soil Science, 1932, 97(1): 17-21.
- [20] 方正三.黄河中游黄土高原梯田的调查研究[M].北京:科学出版社,1958:53-59.

(上接第117页)

- [27] 周萍,刘国彬,侯喜禄,等.黄土丘陵区侵蚀环境不同坡面及坡位土壤理化特征研究[J].水土保持学报,2008,22(1):7-12.
- [28] 赵跃中,杨柳悦,穆兴民,等.黄土中渗流水潜蚀特征研究[J].灌溉排水学报,2015,34(10):37-39.
- [29] 朱显谟.黄土高原水蚀的主要类型及其有关因素[J].水土保持通报,1981,1(3):1-9.
- [30] 李斌兵,郑粉莉,张鹏.黄土高原丘陵沟壑区小流域浅沟和切沟侵蚀区的界定[J].水土保持通报,2008,28(5):16-20.
- [31] Wilson G V, Cullum R F, Romkens M J M. Ephemeral gully erosion by preferential flow through a discontinuous soil-pipe[J]. Catena, 2008, 73(1): 98-106.
- [32] 郑粉莉,高学田.坡面土壤侵蚀过程研究进展[J].地理科学,2003,23(2):103-108.
- [33] 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.
- [34] 许建民.黄土高原浅沟发育主要影响因素及其防治措施研究[J].水土保持学报,2008,22(4):41-43.
- [35] Bocco G. Gully erosion: Processes and models[J]. Progress in Physical Geography, 1991, 15(4): 392-406.
- [36] 金珊,贾玉华,郭成久,等.陕北黄土区切沟内陷穴发育特征研究[J].土壤通报,2017,48(4):948-954.
- [37] Bernatek-Jakiel A, Poesen J. Subsurface erosion by soil piping: significance and research needs[J]. Earth-Science Reviews, 2018, 185: 1107-1128.
- [38] Soufi M. 澳大利亚一个林地环境下的切沟发展过程和侵蚀趋势研究[J].中国水土保持,2002(7):26-27.
- [39] 王小平,贾志军,朱同新.黄土丘陵沟壑区洞穴侵蚀过程及其规律研究[J].中国水土保持,2005(6):23-24.
- [40] 张岩,刘宪春,李智广,等.利用侵蚀模型普查黄土高原土壤侵蚀状况[J].农业工程学报,2012,28(10):165-171.