

黄土高原沟壑丘陵区沟道侵蚀与洞穴侵蚀特征

刘林¹, 李金峰¹, 王小平²

(1. 山西省水土保持科学研究所, 山西 太原 030045; 2. 山西省水土保持生态环境建设重点实验室, 山西 太原 030045)

摘要: [目的] 通过对黄土高原沟壑丘陵区内的沟道侵蚀和洞穴侵蚀进行特征分析, 为该地区开展水土保持工作提供数据支持和决策依据。[方法] 以王家沟流域为研究对象, 通过资料收集、卫星影像识别和现场调查等方法对流域内沟道侵蚀和洞穴侵蚀状况进行分析。[结果] (1) 流域内共分布 718 条沟道和 948 个洞穴。(2) 根据空间位置和地形特点将所有沟道分为冲沟、切沟、干沟、河沟。这 4 类沟道由于受土壤岩性组成、坡度及人为活动等因素影响, 空间分布存在巨大差异。(3) 43% 的洞穴分布在冲沟中, 51% 分布在切沟中, 6% 分布在干沟中。河沟中没有洞穴存在。冲沟和切沟是洞穴形成和发育的主要区域。(4) 洞穴沟道的沟长、面积、切深、产流及产沙量都明显大于非洞穴沟道。[结论] 在黄土高原丘陵沟壑区, 洞穴侵蚀是土壤侵蚀的重要组成部分, 并对沟道的发育和扩展起着至关重要的作用。

关键词: 沟道侵蚀; 洞穴侵蚀; 王家沟流域; 黄土高原沟壑丘陵区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2015)01-0014-06

中图分类号: S157.1

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2015.01.004

Features on Gully Erosion and Tunnel Erosion in Loess Hilly and Gully Region

LIU Lin¹, LI Jinfeng¹, WANG Xiaoping²

(1. Shanxi Institute of Soil and Water Conservation, Taiyuan, Shanxi 030045, China;

2. Shanxi Provincial Key Laboratory of Soil-water Conservation and Ecological Construction, Taiyuan, Shanxi 030045, China)

Abstract: [Objective] In order to give effective data and decision supports for soil and water conservation work, this article analyzed the features of gully and tunnel erosion in the loess hilly and gully region of Northern China; [Methods] The present study was carried out in the Wangjiagou watershed and through historical materials, aerial photo interpretation and field investigations; [Results] (1) A total of 718 gullies and 948 tunnels are indentified in the study watershed. (2) On the basis of their location and topography, all the gullies are classified into four types: headwater gully, hillside gully, valley side gully and ephemeral river gully. Intricately affected by lithological composition, slope, human activities, etc, the four types gullies have significant variables in the spatial distribution. (3) Tunnels are associated with 43% of headwater gullies, 51% of hillside gullies, 6% of valley side gullies and none of ephemeral river gullies. The headwater gullies and hillside gullies are the main area for development of tunnels. (4) The results show that statistically significant differences exist in gully length, area, cutting depth, runoff yield, and sediment yield of tunneled gullies are significantly greater than those of untunneled gullies; [Conclusion] The study suggest that soil erosion is dominated by tunnel erosion, and gullies development is intricately affected by tunnel erosion in this area.

Keywords: gully erosion; tunnel erosion; Wangjiagou watershed; loess hilly and gully region

中国黄土高原北部是世界上土壤侵蚀最为严重的地区之一, 年均侵蚀量达到了 1.50×10^4 t/km² 以上^[1]。严重的土壤流失不仅使该地区土地性质恶化, 耕地面积不断减少, 而且大量黄土的淤积造成了水库库容不断减小, 河道堵塞, 河床升高等恶性效应, 使周

边上百万人口的性命和财产处于被洪水淹没的危险中^[2-4]。开展黄土高原土壤侵蚀机理的研究对解决该地区土壤侵蚀问题具有积极意义。近些年, 关于土壤侵蚀过程及土壤侵蚀影响因子的研究已经取得了一定进展, 但研究区多集中于室内外坡面试验研究^[5-7]。

收稿日期: 2014-05-05

修回日期: 2014-05-27

资助项目: 山西省自然科学基金项目“黄土高原丘陵沟壑区沟道和洞穴侵蚀机理与防治措施技术研究”(2013011036-1)

第一作者: 刘林(1986—), 男(汉族), 山西省大同市人, 硕士, 助理工程师, 主要从事土壤侵蚀机理及其防治技术方面的研究工作。E-mail: xoa414@163.com。

作为黄土高原结构系统中重要组成部分——沟道,由于种类繁多、地形复杂、难于调查等条件的制约,国内学者对其土壤侵蚀过程和特征研究较少。国外学者^[8-11]普遍认为沟道侵蚀是土地退化、土壤流失和沉积的重要过程,对当地地理和水文环境具有重要的影响。并且沟道侵蚀被认为与洞穴侵蚀之间存在紧密联系^[12-14],但目前世界范围内对于两者之间的相互关系尚无深入研究。鉴于此,本研究以 GIS 技术、遥感解译技术、现场实地调查为手段,以连续 11 a 观测数据为基础,对黄土丘陵沟壑区王家沟流域的沟道侵蚀和洞穴侵蚀特征进行分析,并讨论两者之间的相互关系,旨在为黄土丘陵沟壑区水土保持工作提供准确的数据支持和理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

选定山西省吕梁市王家沟流域作为研究区。选择该流域主要有 3 方面的原因:(1) 该流域是典型的黄土丘陵沟壑区,非常具有代表性;(2) 该流域从 1955 年起就被山西省水土保持科学研究所选为试验流域,几十年期间收集了非常丰富的基础数据。例如土壤性质、土地利用情况、产流产沙量等,对本次研究具有重要的价值;(3) 2002—2013 年对该流域内约为 0.203 km² 内的洞穴侵蚀进行了长期的实地调查研究。

王家沟流域(37°32′—37°34′N,111°08′—111°11′E)面积为 9.1 km²,是黄河一级河流三川河的一条支沟。该流域属于半干旱大陆性气候,降雨集中在 6—9 月,年均降雨量为 500 mm,汛期降雨量占年均降雨量的 70% 以上。流域内高程范围为 946~1 287 m。地貌类型为典型的黄土丘陵沟壑地貌,地形破碎,沟壑纵横。土壤类型以马兰黄土、离石黄土为主,土质疏松,抗蚀抗冲性差,土壤侵蚀剧烈,水土流失严重。土地利用以耕地、休闲地、荒草地、果园、林地和灌木地等为主^[15-16]。

1.2 研究方法

以过去 11 a 的历史数据为基础,并结合卫星影像和实地调查等方法进行信息收集和提取,最终利用 ArcGIS, Erdas, SPSS 等软件进行数据处理和分析。

选用的数据源包括:1989, 2002, 2009 及 2011 年 4 期 World View 卫星影像,分辨率为 0.5 m。在 1:10 000 比例尺下对流域内沟道分布和土地利用现状进行识别。实地调查包括 2002—2013 年对流域内沟道的不定期勘测。通过实地调查对卫星影像解译的沟道分布情况和土地利用情况进行校正,并记录各个洞穴位置。

本研究实地调查工作主要包括:(1) 洞穴特征调查。主要调查王家沟流域内洞穴的数量、空间分布位置、洞穴入口的直径和深度、洞穴的走向及延伸长度等。(2) 沟道特征调查。主要调查王家沟流域内各类沟道的数量、长度、最大宽度、面积、沟道中洞穴数量及空间分布位置等。(3) 洞穴侵蚀对沟道发育的影响。主要调查王家沟流域内洞穴沟道与非洞穴沟道的长度、深度、坡度、流域面积等。

2 结果与分析

2.1 沟道分类和发育特征

在 1:10 000 的比例尺下,对卫星影像中长度大于 10 m 的沟道进行识别,结果发现在王家沟流域内符合条件的沟道共有 718 条。根据这些沟道的地形特征、形成条件以及空间分布格局,可将所有沟道分为冲沟、切沟、干沟和河沟 4 类。分析结果表明,王家沟流域内共有冲沟 109 条,切沟 286 条,干沟 302 条以及河沟 21 条。4 类沟道中,冲沟通常位于流域上游,横断面一般呈 V 字形,谷坡受水力、重力侵蚀严重;切沟是 4 类沟道中规模相对最小的一类沟,多分布于流域的中下游,横剖面呈 V 字形,且沟谷特征完整;干沟是该流域内分布最多的一类沟道,通常是承袭古代沟道发育的,多分布于大型河沟两侧陡峭谷坡处,剖面以 U 形居多,水力与重力侵蚀活动不如冲沟、切沟活跃,坡麓处多有侵蚀活动的堆积物;河沟是流域的“脊柱”,也是承袭古代沟道发育的,沟头位置多位于两条或两条以上冲沟结合处,经过长时间缓慢的地貌侵蚀发育而成,横剖面多呈 U 形,两侧谷坡已较稳定。

从每类沟道中,随机选择 21 条进行沟道特征研究。由表 1 可以看出,河沟的长度、深度、切深都是 4 类沟道中最大的,其平均值分别为 1 078.9, 189.3 和 74.8 m。相反切沟是最小的,该数据直接反映出沟道发育时间长短。切沟的沟底比降最大,为 69.6%;冲沟的平均坡度最大,为 42.3°。在可以统计的 3 类沟道中,干沟具有最大的平均沟道面积(1 628 m²)。

为了更好地研究该流域内沟道发育特点,对 4 种不同类型沟道的地形因子进行相关性分析(表 2)。从表 2 中可以看出,冲沟、切沟和干沟的平均沟头坡度分别与其沟道面积呈负相关关系。结合表 1 发现切沟具有最大的沟头坡度(38.2°),沟道面积却最小,只有 926 m²;而干沟的沟头坡度最小,为 15.6°,面积却比切沟要大得多,为 1 628 m²。该结果与蒙哥马利等^[17-18]的研究结论非常一致。通过实地调查发现,出现这一现象的原因可能是沟头坡度大,造成沟道初期水力侵蚀严重,使沟谷两侧坡面陡峭,随着时间推移,

由于黄土层的不稳定性,在重力侵蚀作用下大量侵蚀物质就会堆积到沟道底部,造成沟道断面狭窄,面积减少。这一结果也有助于解释在 4 类沟道的结合处往往存在断面狭小的沟道现象。另外值得注意的是,冲沟、切沟的沟长与沟深分别呈现正相关关系,在 $p < 0.01$ 水平下,相关系数 R 分别为 0.82 和 0.91,而

干沟($p < 0.01, R = 0.074$)和河沟($p < 0.01, R = 0.03$)则无此相关性。实地调查发现干沟通常在整個沟谷坡上发育,所以它的长度主要由谷坡长度决定,受坡度($R = -0.08$)、沟底比降($R = -0.21$)等地形因子影响较小。河沟则是因为整个沟道发育缓慢,而且有较多沉积物淤积,使得相关性不明显。

表 1 王家沟沟道地形、地貌特征

沟道地形因子	冲沟			切沟			干沟			河沟		
	平均值	标准方差	取样数	平均值	标准方差	取样数	平均值	标准方差	取样数	平均值	标准方差	取样数
L	110.2	60.5	21	29.6	11.2	21	163.4	97.2	21	1 078.9	886.3	21
W	52.5	49.7	21	10.2	2.7	21	69.2	67.9	21	189.3	83.6	21
D	26.3	17.5	21	13.6	4.9	21	23.6	12.8	21	74.8	45.3	21
G	37.4	11.2	21	69.6	30.2	21	20.2	16.3	21	8.3	4.7	21
S_h	32.9	31.1	21	38.2	30.9	21	15.6	12.3	21	2.2	1.3	21
S	42.3	27.9	21	39.8	33.5	21	12.7	11.2	21	3.7	1.2	21
A	1 406	1 893	21	926	1 383	21	1 628	2 912	21	—	—	—

注: L 为沟道长度(m); W 为沟道宽度(m); D 为沟道深度(m); G 为沟道纵比降(%); S_h 为沟头坡度(°); S 为沟道平均坡度(°); A 为沟道面积(m²)。下同。

表 2 不同沟道各地形因子的皮尔逊相关系数

项目	L	W	D	G	S_h	S	A
冲沟	L	1	0.75***	0.82***	-0.61***	-0.65***	-0.41*
	W		1	-0.25	-0.13	0.46**	-0.55**
	D			1	-0.07	-0.27	-0.11
	G				1	0.09	0.39*
	S_h					1	0.32*
	S						1
	A						
切沟	L	1	0.77***	0.91***	-0.41	-0.25	-0.63**
	W		1	-0.53	-0.29	0.09	-0.37
	D			1	-0.63**	-0.13	-0.49**
	G				1	0.57	0.39*
	S_h					1	0.15
	S						1
	A						
干沟	L	1	0.61***	0.074	-0.21	-0.23	-0.08
	W		1	0.03	-0.14	-0.34**	-0.47***
	D			1	-0.07	-0.17	-0.08
	G				1	0.063	0.28
	S_h					1	0.32*
	S						1
	A						
河沟	L	1	0.48***	0.03	-0.26	-0.24	-0.35
	W		1	-0.18	-0.52	-0.38	-0.49
	D			1	-0.34	-0.57**	-0.48
	G				1	0.09	0.17
	S_h					1	0.65***
	S						1
	A						

注:*指在 0.1 水平上相关性不显著;**指在 0.05 水平上相关性较显著;***指在 0.01 水平上相关性非常显著。

2.2 沟道空间分布特征

通过统计 4 类沟道在不同土地利用状况下的分布情况(表 3)可以发现冲沟、切沟发育特征相似,主要

分布在草地、旱地、经济林和裸地这 4 种土地类型上;干沟在 6 类土地上分布相对均匀;河沟则主要在旱地上发育。

表 3 不同土地利用类型上沟道分布情况

沟道类型	沟道占各土地利用类型比例/%					
	旱地	草地	乔木林	经济林	裸地	灌木林地
冲沟	25	36	3	15	15	6
切沟	27	29	12	6	24	2
干沟	20	22	16	18	11	13
河沟	63	10	4	7	7	9

4 类沟道在不同类型土地上分布的差异性主要是由于各类土地的土壤岩性和所处谷坡坡度造成的。王家沟流域内的土壤岩性主要是由三趾马红土、离石黄土、马兰黄土及次生黄土组合而成。冲沟和切沟沟头位置多分布于坡度大于 30°处。该处土壤岩性组合多为疏松的马兰黄土、离石黄土及较厚的三趾马红土层。当进入雨季连续降雨时,由于该处坡度陡,径流急,马兰黄土和离石黄土极易被水流冲刷,形成初级沟,并且大量的有机物质会被黄土携带走,使该处土地较贫瘠,不利于林木生长。该区土地利用类型主要以旱地、草地为主,更有利于初级沟壑继续发育成为冲沟、切沟;干沟通常分布的坡度为 15°~25°,多见于河沟两侧的谷坡处。该处土壤岩性组合方式在流域内最为多见,其特点是上层覆盖一定厚度的次生黄土,而马兰黄土、离石黄土和三趾马红土在次生黄土层以下依次垂直均匀分布。在雨季,表面径流经冲沟、切沟土壤缓冲,到达该处位置时水流侵蚀能力减弱,通常只会带走部分表面的次生黄土和马兰黄土,因此土壤中仍保留一定量的有机物质,适合植物生长,因此林地、草地广泛分布;河沟是流域内面积最大的沟道,发育时间长,坡度最小(通常小于 10°)。这类沟道内的土壤岩性组合特点为表层的马兰黄土较薄,中下层的离石黄土和三趾马红土非常厚,通常超过了几十米。该处土层一般处于相对稳定的状态,在雨季受水力侵蚀较轻,且不断有其他坡度的冲积物淤积,比较适合于各类草木生长和发育。但由于近些年来人类活动的干扰加剧,很多河沟土地被改造,例如修路、建厂、开垦等,使林草地面积减少,从而造成该沟道内土地利用以旱地为主的现象。

2.3 洞穴的空间分布及发育特征

通过卫星影像识别和现场调查,在王家沟流域内共发现了 948 个洞穴口,其中 672 个洞穴分布在冲沟、切沟和干沟这 3 类沟道中,占总洞穴数的 71%。冲沟中共有洞穴 291 个,占总数的 43%;切沟中共有洞穴 343 个,占总数的 51%;干沟共有洞穴 2 个,占总数的 6%;在河沟中没有发现洞穴口的存在。结果表明,冲沟、切沟是洞穴形成和发育的主要环境。这两类沟道最主要的地形和地貌特征是具有较大坡度。

为了更好地研究洞穴、沟道和坡度的相互关系,利用 ArcGIS 对洞穴和沟道在不同坡度上的分布情况进行了叠合分析(图 1)。结果显示王家沟流域内洞穴在不同坡度上呈现“两头小,中间大”的正态分布现象,其中在 20°~50°的坡度上,洞穴分布数量最大,占到了总数量的 76.8%;而坡度低于 20°或大于 50°时所占比例分别为 11.5%和 11.7%;从总体趋势看,不同坡度上洞穴数量与冲沟、切沟数量呈现正相关性,而与干沟、河沟相关性不明显。洞穴在冲沟、切沟上的广泛分布绝不是偶然现象,对这两类沟道上的洞穴进行剖面开挖,发现冲沟、切沟的地形、土壤岩性组成、土壤理化性质以及土地利用等因子与洞穴形成和发育条件具有密切关系。首先,这两类沟道都位于高坡度地形上,在暴雨季节容易造成强烈的水力侵蚀,强烈的水流在经过某些重力侵蚀的土层断裂处时,会形成小“瀑布”现象,不断冲击断裂处正下方松散的堆积物,随着时间推移就会形成初期洞穴。冲沟、切沟的土壤岩性组合特征是马兰黄土、离石黄土和三趾马红土垂直均匀分布,暴雨在造成部分马兰黄土和离石黄土流失的同时,更会对剩余土壤的理化性质进行破坏。根据野外实测得知,离石黄土和马兰黄土的黏性剪切强度通常为 90~140 和 40~50 kPa,三趾马红土一般都超过 140 kPa。但在水力侵蚀作用后,离石黄土和马兰黄土的黏性剪切强度会下降到 10~20 kPa,三趾马红土则低于 30 kPa。土壤黏性剪切强度、渗透性、容积密度等理化性质的下降会促进初级洞穴进一步发育和延伸。另外,在王家沟流域内的所有土地类型中,位于冲沟、切沟内的旱地和裸地最容易形成洞穴,这两处的土地在雨季往往会产生大量的地面径流。并且所处坡度大,梯田、坡耕地、道路等人为改造程度低,有利于洞穴的形成和发育。

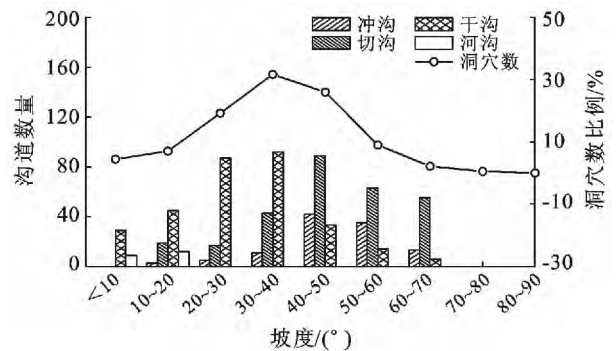


图 1 王家沟流域洞穴和沟道在不同坡度数量分布

2.4 洞穴侵蚀对沟道发育的影响

为了研究洞穴侵蚀对沟道发育的影响,将包含 1 个或 1 个以上洞穴的沟道定义为洞穴沟。通过卫星

影像识别和实地调查,在王家沟流域内共发现洞穴沟道 221 条。从洞穴沟道和非洞穴沟道中各随机选取 100 条进行对比分析(图 2)。采用 t 检验法对两者的地形因子进行差异性对比(表 4)。结果显示,洞穴沟道的地形因子与非洞穴沟道差异显著。洞穴沟道的沟长、切深及面积都明显大于非洞穴沟道,表明洞穴沟道中的土壤侵蚀要比非洞穴沟道大的多。朱同新等^[19]研究发现,王家沟流域内洞穴沟道比非洞穴沟道的产沙量多出近 57%,产流量比非洞穴沟道多 49%。通过实地调查发现洞穴沟比非洞穴沟道土壤侵蚀强烈的原因主要包括:(1) 洞穴系统极其不稳定,当大量的地面径流进入洞穴对其进行冲刷时,洞穴内部、隧道顶部的土层会不断坍塌,从而使洞穴内大量土壤

被水流冲刷而走;(2) 在雨季,由于洞穴沟道的坡度较大,引起大量的地表径流,水流会不断冲击土层断裂处下方的堆积物造成新洞穴系统的产生,或进入已有的洞穴内部扩大隧道长度和体积,从而造成流域产沙量增大。另外,从图 2 中可以看出,洞穴的存在改变了沟道发育的适宜坡度和临界坡度。通过统计发现非洞穴沟道发育的最佳坡度为 $18^{\circ}\sim 23^{\circ}$,而洞穴沟则提高到 $32^{\circ}\sim 37^{\circ}$;非洞穴沟道存在的临界坡度为最小值 3° 和最大值 82° ,而洞穴沟道存在的临界坡度为最小值 8° 和最大值 67° 。该结果与福克纳等^[20-21]对西班牙东南地区沟道研究结果很相似(陡坡不易形成洞穴,洞穴系统会使其存在的沟道临界坡度的最大值下降 $1^{\circ}\sim 15^{\circ}$)。

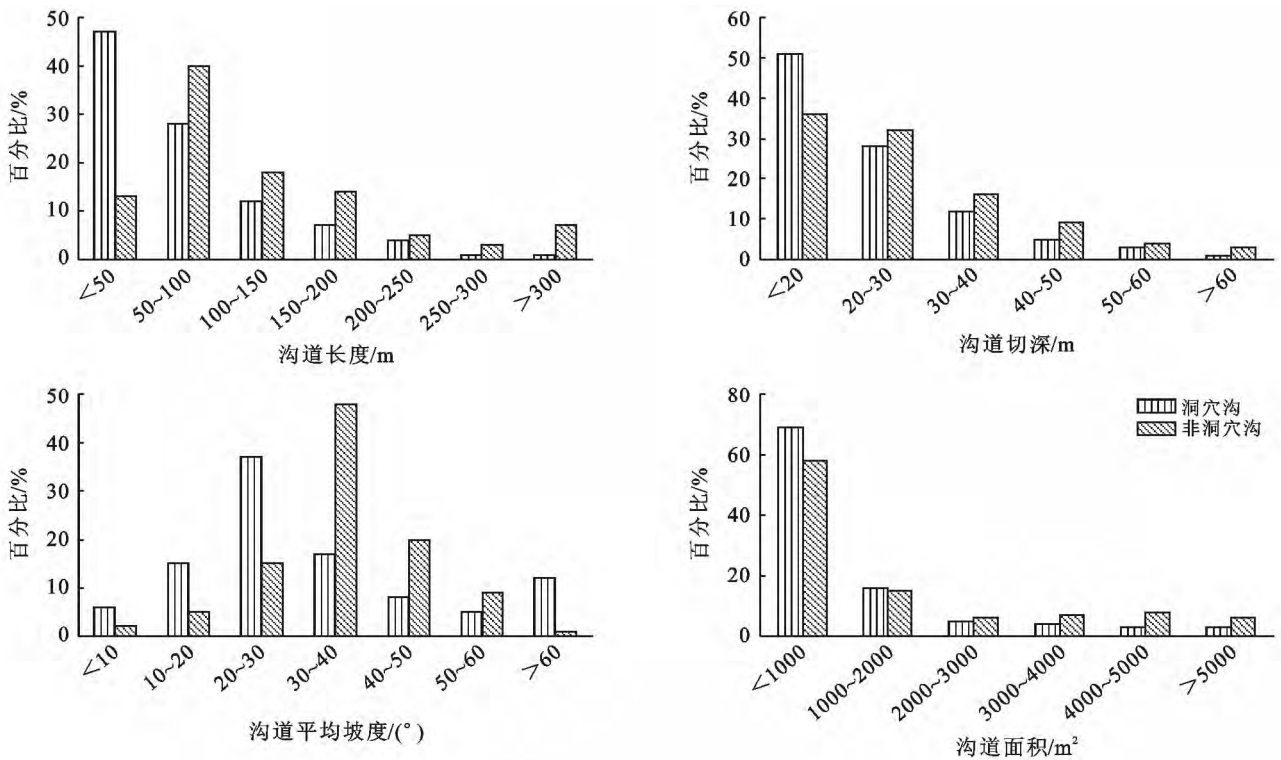


图 2 非洞穴沟道与洞穴沟道发育特征对比

表 4 非洞穴沟道与洞穴沟道特征地形因子 t 检验结果

地形因子	项目	非洞穴沟	洞穴沟道
L^{**}/m	平均值	73.6	124.3
	标准方差	61.3	100.8
	样本数	100	100
D^{**}/m	平均值	18.4	26.7
	标准方差	22.5	19.1
	样本数	100	100
$S/^{\circ}$	平均值	16.8	24.7
	标准方差	11.3	17.9
	样本数	100	100
A^{**}/m^2	平均值	1 170.5	1 920.3
	标准方差	2 395.7	1 793.6
	样本数	100	100

3 结论

(1) 王家沟流域内的沟道可以分为冲沟、切沟、干沟和河沟 4 类。其中干沟分布数量最多,河沟的长度、宽度、切深及面积最大,冲沟的平均坡度最大,而切沟的沟底比降最大。通过对 4 类沟道地形因子进行相关性分析,发现冲沟、切沟、干沟这 3 类沟道面积与沟头平均坡度呈负相关性,即沟头坡度越大,沟道面积越小;冲沟、切沟的沟长与沟深分别呈正相关性,而干沟和河沟分别受谷坡长度和泥沙淤积等因素影响,沟长与沟深没有明显相关性。

(2) 在王家沟流域内,土壤岩性主要由马兰黄

土、离石黄土、三趾马红土及次生黄土组成,4类土壤在不同坡度上组合方式的差异性很大程度上决定了所属区域的沟道存在类型和土地利用类型的空间分布,从而呈现出不同土地利用状况下,各类沟道分布情况迥然不同的现象。值得注意的是,河沟所属的区域受人为因素干扰较大,其发育具有特殊性。

(3)王家沟流域内洞穴主要分布在冲沟和切沟中,河沟中没有发现洞穴口。洞穴在不同坡度上呈现“两头小,中间大”的正态分布现象,其中 $20^{\circ}\sim 50^{\circ}$ 的坡度上洞穴数量占到流域内总洞穴数量的76.8%;流域内洞穴的形成和发育不仅与地形因子有关,还与土壤岩性组成、土壤理化性质及土地利用类型等因素有密切关系。

(4)通过对洞穴沟道和非洞穴沟道进行数学分析,发现洞穴沟道的沟长、切深及面积均远大于非洞穴沟道,并且洞穴沟流域的产流量比非洞穴沟流域多出近49%,产沙量多出近57%,这表明洞穴侵蚀是沟道侵蚀的主要组成部分,对于沟道的发育和扩展起到至关重要的作用。另外,由于洞穴的存在改变了沟道发育的适宜坡度和临界坡度。

[参 考 文 献]

- [1] Chen Yongzong, Luk S H. Sediment sources and recent changes in the sediment load of Yellow River, China[J]. Land Conservation for Future Generations, 1989, 341(6120):313-323.
- [2] 苏志珠,朱东红,马义娟.晋西沿黄地区水土流失危害及防治对策研究[J].水土保持通报,2003,23(4):28-31.
- [3] Pimentel D. Soil erosion: a food and environmental threat[J]. Environment, Development and Sustainability, 2006,8(1):119-137.
- [4] Ma Jianwen, Xue Yong, Ma Chongfeng, et al. A data fusion approach for soil erosion monitoring in the Upper Yangtze River Basin of China based on universal soil loss equation(USLE)model[J]. International Journal of Remote Sensing, 2003,24(23):4777-4789.
- [5] 杨明义,刘普灵,李立青. ^{137}Cs 示踪农耕地侵蚀速率模型精确度的比较[J].核农学报,2004,18(5):385-389.
- [6] Li Yong, Poesen J, Yang Jianchang, et al. Evaluating gully erosion using ^{137}Cs and $^{210}\text{Pb}/^{137}\text{Cs}$ ratio in a reservoir catchment[J]. Soil and Tillage Research, 2003,69(1):107-115.
- [7] Wu Yongqiu, Cheng Hong. Monitoring of gully erosion on the Loess Plateau of China using a global positioning system[J]. Catena, 2005,63(2):154-166.
- [8] Valentin C, Poesen J, Li Yong. Gully erosion: impacts, factors and control[J]. Catena, 2005,63(2):132-153.
- [9] Poesen J W, Vandaele K, Van Wesemael B. Contribution of gully erosion to sediment production on cultivated lands and rangelands[J]. IAHS Publications-Series of Proceedings and Reports: Intern Assoc Hydrological Sciences, 2003,50(2):91-133.
- [10] Piest R F, Wyatt G M, Bradford J M. Soil erosion and sediment transport from gullies[J]. Journal of the Hydraulics Division, 1975,101(1):65-80.
- [11] Liu Honghu, Zhang Tianyu, Liu Baoyuan, et al. Effects of gully erosion and gully filling on soil depth and crop production in the black soil region, Northeast China[J]. Environmental Earth Sciences, 2013,68(6):1723-1732.
- [12] Zhu Tongxing. Spatial variation and interaction of runoff generation and erosion within a semi-arid, complex terrain catchment: A hierarchical approach[J]. Journal of Soils and Sediments, 2013,13(10):1770-1783.
- [13] Boucher S C, Powell J M. Gullying and tunnel erosion in Victoria[J]. Australian Geographical Studies, 1994, 32(1):17-26.
- [14] Nadal-Romero E, Verachtert E, Maes R, et al. Quantitative assessment of the piping erosion susceptibility of loess-derived soil horizons using the pinhole test[J]. Geomorphology, 2011,135(1):66-79.
- [15] 陈浩,方海燕,蔡强国,等.黄土丘陵沟壑区沟谷侵蚀演化的坡向差异[J].资源科学,2006,28(5):176-184.
- [16] 陈洪经.黄土高原小流域动态监测信息系统研究[M].北京:测绘出版社,1992.
- [17] Montgomery D R, Dietrich W E. Channel initiation and the problem of landscape scale[J]. Science, 1992,255(5046):826-830.
- [18] Montgomery D R, Foufoula G E. Channel network source representation using digital elevation models[J]. Water Resources Research, 1993,29(12):3925-3934.
- [19] Zhu Tongxing, Luk S H, Cai Qiangguo. Tunnel erosion and sediment production in the hilly loess region, North China[J]. Journal of Hydrology, 2002,257(1):78-90.
- [20] Faulkner H, Alexander R, Wilson B R. Changes to the dispersive characteristics of soils along an evolutionary slope sequence in the Vera badlands, Southeast Spain: implications for site stabilisation[J]. Catena, 2003,50(2):243-254.
- [21] Faulkner H. Gully erosion associated with the expansion of unterraced almond cultivation in the coastal Sierra de Lujar, S. Spain[J]. Land Degradation & Development, 1995,6(3):179-200.