

半干旱黄土丘陵沟壑区沟道侵蚀特征研究

刘林¹, 王小平^{1,2}, 孙瑞卿³

(1. 山西省水土保持科学研究所, 太原 030045; 2. 山西省水土保持生态环境建设重点实验室, 太原 030045; 3. 山西省农业科学院农产品质量安全与检测研究所, 太原 030031)

摘要: 利用遥感、地理信息技术和数理统计方法, 选择山西省吕梁市王家沟流域为典型区域, 系统分析了半干旱黄土丘陵沟壑区沟道侵蚀特征。研究结果表明: 在王家沟流域内共有沟道 718 条, 其中冲沟 109 条, 切沟 286 条, 干沟 302 条及河沟 21 条。这 4 类沟道的发育特征和空间分布特征存在巨大差异; 沟道侵蚀是王家沟流域内土壤侵蚀的主要形式, 沟道侵蚀面积占总侵蚀面积的 56.19%; 流域内不同坡度范围内土壤侵蚀强度与沟道类型存在紧密联系。同时, 人为因素也对黄土丘陵沟壑区的沟道侵蚀具有重要的影响。

关键词: 沟道侵蚀; 黄土高原丘陵区; GIS; 王家沟

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2015)01-0038-06

Analysis on the Feature of Gully Erosion in Semiarid Loess Plateau

LIU Lin¹, WANG Xiaoping^{1,2}, SUN Ruiqing³

(1. Shanxi Institute of Soil and Water Conservation, Taiyuan 030045, China; 2. Shanxi Provincial

Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Ecological Construction, Taiyuan 030045, China; 3. Quality and Safety of Agricultural Products and Testing Institute, Shanxi Academy of Agricultural Sciences, Taiyuan 030031, China)

Abstract: Base on remote sensing techniques supported by GIS and other statistical methods, the feature of gully erosion in semiarid Loess Plateau was analyzed. The results showed that a total of 718 gullies were indentified in the Wangjiagou watershed, including 109 headwater gullies, 286 hillside gullies, 302 valleyside gullies and 21 ephemeral gullies. The four types of gullies have significant variables in the development characteristics and spatial distribution. Gully erosion is the major type of soil erosion in the Wangjiagou watershed, Which accounts for 56.19% of total area of soil erosion. There is a closed relationship between gully types and soil erosion intensity. Meanwhile, human factors have the significant impact on gully erosion in loess hilly area.

Keywords: gully erosion; hilly Loess Plateau area; GIS; Wangjiagou

水土流失继续对半干旱黄土丘陵沟壑区的生态环境和人民生产生活构成严重制约和威胁。由于该地区独特的地貌形态、较强的降雨侵蚀力和高强度的农业和人类活动, 使得黄土丘陵沟壑区成为各国学者研究土壤侵蚀的重要领域^[1-5]。目前关于黄土高原土壤侵蚀的研究主要集中在室内外坡面试验研究, 例如下垫面性质、气候因素、人为干扰等因子对土壤流失的影响^[6-11]。但这些坡面侵蚀研究成果很难应用于流域侵蚀研究, 特别是对于黄土高原丘陵沟壑区, 学者们对于该地区土壤侵蚀强度的空间分异规律与原因、土壤侵蚀的治理方向与措施等问题都未取得共识, 而这些又是黄土丘陵沟壑区土壤侵蚀治理迫切需要解决的问题。众所周知, 黄土高原水土流失的泥沙主要来自于丘陵沟壑区的沟道系统, 沟道产沙量约占

黄土高原总侵蚀量的 80%。因此, 对沟道系统的发育规律及分布特征的研究越来越受到重视^[12-15]。位于晋西北的吕梁山区是典型的半干旱黄土丘陵沟壑区, 本文将“3S”技术与近十年实地调查研究相结合, 从小流域沟道侵蚀研究入手, 探讨半干旱黄土丘陵沟壑区沟道系统的侵蚀规律和特征。

1 材料与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于山西省西北地区的吕梁市王家沟小流域(37°32′—37°34′N, 111°08′—111°11′E), 面积为 9.1 km², 属于典型的半干旱黄土丘陵沟壑区。流域内年平均气温为 8.3℃, 无霜期 160~180 d。年均降水量 495.1 mm, 其中 6—9 月降雨量约占全年降水

量的 72%。年蒸发量为 1 578 mm,空气相对湿度 66.8%,属于中温带半干旱气候。

该流域的土壤是在黄土母质基础发育而成,分为上下两层,上层为马兰黄土,厚度为 20~30 m,下层为离石黄土,厚度可达 100 m。沟坡处有次生黄土覆盖,在沟坡下部及沟掌有三趾马红土出露,厚度 30~50 m。流域内所见最古老岩层为灰白色的奥陶系灰岩,仅在上游靠近分水岭的沟底少量出露。流域内土壤具有垂直节理,土质疏松,加之地面坡度大,植被少,在暴雨季节极易发生土壤侵蚀。

1.2 数据来源与处理软件

数据采用 2009 年及 2011 年两期 WorldView 卫星影像数据,时相分别为 10 月和 11 月,影像数据的分辨率为 0.5 m,辅助数据包括由山西省水土保持科学研究所绘制的 1:10 000 地形图和 1:5 000 土地利用现状图。基础资料数据包括 2002—2013 年期间山西省水土保持科学研究所对该流域定期调查的实测数据。

主要采用的处理软件包括:遥感图像处理软件 ERDAS IMAGINE 2013;地理信息处理软件 ArcGIS 10.0;数理统计分析软件 SPSS 18.0。

1.3 研究方法

1.3.1 沟道信息提取与识别 基于 ERDAS IMAGINE 平台,分别对 2009 年和 2011 年两期 World View 卫星图像进行红、绿、蓝三色波段合成,生成标准假彩色影像,以 1:10 000 地形图为准,进行地物配准,实现对卫星影像的几何纠正,并利用 ArcGIS 的 Spatial Analyst 工具对研究区进行掩膜提取。在 1:10 000 的比例尺下,结合野外实地调查结果,我们对卫星影像中长度大于 10 m 的沟道进行判读和识别,从而完成对王家沟流域内沟道信息的提取。

1.3.2 土地利用现状分类 以山西省水土保持科学研究所绘制的土地利用现状图(1:5 000)为参考,利用 ERDAS IMAGINE 对卫星影像数据进行人工目视解译,将研究区的土地覆盖类型分为旱地、裸地、村庄、采矿用地、果园、灌木林地、农业用地、其他林地、其他草地、道路用地共 10 种,并通过野外实地调查对解译结果进行验证和校准。

1.3.3 植被覆盖度 本次研究采用像元二分模型^[16-18]对项目区内的植被覆盖度进行计算:

$$FC = (NDVI - NDVI_{soil}) / (NDVI_{veg} - NDVI_{soil})$$

式中:FC——像元植被覆盖度;NDVI_{soil}——无植被覆盖像元的 NDVI 值;NDVI_{veg}——完全被植被覆盖的像元的 NDVI 值。

1.3.4 土壤侵蚀强度分级 对王家沟流域 1:10 000 地形图进行矢量化,在 ArcGIS 10.0 平台上建立数字高程模型(DEM),并提取研究区坡度。参考水利部颁

布的土壤侵蚀分类分级标准,利用 ArcGIS 空间分析功能对提取的植被信息、土地利用信息、坡度信息进行叠加分析,建立研究区水土流失强度分级制图。

2 结果与分析

2.1 沟道分类与发育特征

通过对王家沟流域卫星影像的解译识别,在研究区内共发现符合条件的沟道 718 条。根据沟道所处的地形环境、形成条件及空间分布格局,可将这些沟道分为切沟、冲沟、干沟和河沟 4 类,如图 1 所示。

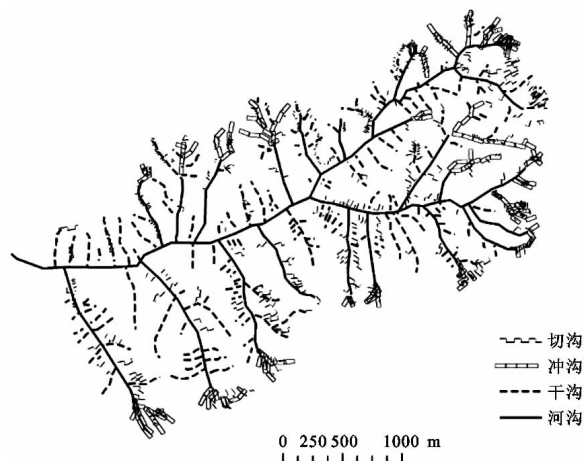


图 1 王家沟流域沟道空间分布

经统计,王家沟流域内共有冲沟 109 条,切沟 286 条,干沟 302 条及河沟 21 条。河沟是整个流域沟道的“骨架”,多位于流域的中下游;干沟是流域内分布最广泛的沟道类型,多分布于大型河沟两侧陡峭的谷坡处;冲沟空间特征明显,多见于流域上游,大多为干沟或河沟的支沟;切沟是 4 类沟道中规模最小的一类沟道,与其他 3 类沟道相伴而生,沟道发育活跃,是现代侵蚀地貌发育过程的产物。

为了研究 4 类沟道的发育特征,分别从每类沟道中随机选择 21 条沟道进行沟道特征研究,结果如表 1 所示,河沟的规模是 4 类沟道中最大的,其长度、宽度、深度明显大于其他 3 类沟道;切沟的沟道纵比降最大,为 69.6%;冲沟的平均坡度最大,为 42.3°;在可统计面积的 3 类沟道中,干沟具有最大的平均沟道面积 1 628 m²。

对 4 类沟道的地形、地貌因子进行皮尔逊相关性分析(表 2)。结果显示,冲沟、切沟的沟长与沟深分别呈现正相关性,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。该发现有助于解释流域内 4 类沟道纵降比和剖面形状出现“两类化”的现象:王家沟流域内,冲沟与切沟的沟道纵降比均大于 30%,干沟和河沟则低于 21%;冲沟与切沟的剖面形状多呈 V 字形,而干沟和河沟则接近于 U

字形。另外,结合表 1 和表 2 可以看出,冲沟、切沟和干沟的平均沟头坡度与其沟道面积呈现负相关性。切沟的沟头坡度 38.2°,沟道面积 926 m²,干沟沟头坡度最小,为 15.6°,沟道面积却比切沟大的多,为 1 628 m²。这一特征与“坡度大小与沟道面积成正比”的说法^[19]有很大出入。实地调查发现,该发育特点主要是由于黄土高原丘陵沟壑区土壤特性造成的。

该处土壤母质结构疏松,离石黄土和马兰黄土含水率低,粘性差,当暴雨来临时,切沟与冲沟由于沟头坡度大,初期会产生大量的地表径流,对沟道冲刷集中且强烈,致使沟道下切面狭窄,随着时间发展,两侧谷坡黄土层越来越不稳定,在重力侵蚀作用下大量侵蚀物质会堆积到沟道底部,造成河道淤积,面积减少。这一发现与朱同新等人的研究结果较一致^[20]。

表 1 王家沟沟道地形、地貌特征

沟道地形因子	切沟			冲沟			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	29.6	11.2	21	110.2	60.5	21	163.4	97.2	21	1078.9	886.3	21
W	10.2	2.7	21	52.5	49.7	21	69.2	67.9	21	189.3	83.6	21
D	13.6	4.9	21	26.3	17.5	21	23.6	12.8	21	74.8	45.3	21
G	69.6	30.2	21	37.4	11.2	21	20.2	16.3	21	8.3	4.7	21
Sh	38.2	30.9	21	32.9	31.1	21	15.6	12.3	21	2.2	1.3	21
S	39.8	33.5	21	42.3	27.9	21	12.7	11.2	21	3.7	1.2	21
A	926	1383	21	1406	1893	21	1628	2912	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(%),Sh 为沟头坡度(°),S 为沟道平均坡度(°),A 为沟道面积(m²)

表 2 四类沟道地形因子的皮尔逊相关系数

沟道	<i>L</i>	<i>W</i>	<i>D</i>	<i>G</i>	<i>Sh</i>	<i>S</i>	<i>A</i>	
切沟	<i>L</i>	1	0.77***	0.91***	−0.41	−0.25	−0.63**	0.88***
	<i>W</i>		1	−0.53	−0.29	0.09	−0.37	0.64***
	<i>D</i>			1	−0.63**	−0.13	−0.49**	−0.58
	<i>G</i>				1	0.57	0.39*	0.16
	<i>Sh</i>					1	0.15	−0.91***
	<i>S</i>						1	−0.32
	<i>A</i>							1
冲沟	<i>L</i>	1	0.75***	0.82***	−0.61***	−0.65***	−0.41*	0.93***
	<i>W</i>		1	−0.25	−0.13	0.46**	−0.55**	0.76
	<i>D</i>			1	−0.07	−0.27	−0.11	−0.33
	<i>G</i>				1	0.09	0.39*	0.03
	<i>Sh</i>					1	0.32*	−0.89***
	<i>S</i>						1	−0.44***
	<i>A</i>							1
干沟	<i>L</i>	1	0.61***	0.074	−0.21	−0.23	−0.08	0.78***
	<i>W</i>		1	0.03	−0.14	−0.34**	−0.47***	0.81***
	<i>D</i>			1	−0.07	−0.17	−0.08	−0.46
	<i>G</i>				1	0.063	0.28	0.11
	<i>Sh</i>					1	0.32*	−0.79***
	<i>S</i>						1	−0.29
	<i>A</i>							1
河沟	<i>L</i>	1	0.48***	0.03	−0.26	−0.24	−0.35	—
	<i>W</i>		1	−0.18	−0.52	−0.38	−0.49	—
	<i>D</i>			1	−0.34	−0.57**	−0.48	—
	<i>G</i>				1	0.09	0.17	—
	<i>Sh</i>					1	0.65***	—
	<i>S</i>						1	—
	<i>A</i>							1

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(%),Sh 为沟头坡度(°),S 为沟道平均坡度(°),A 为沟道面积(m²)

(* $p<0.1$, ** $p<0.05$, *** $p<0.01$)。

2.2 沟道侵蚀现状分析

图 2 是王家沟流域土壤侵蚀强度分布图,利用 ArcGIS 软件进行土壤侵蚀面积统计,结果显示王家沟流域内土壤侵蚀面积(轻度以上土壤侵蚀面积) 4.89 km²,占流域总面积 53.74%。其中轻度土壤侵蚀面积为 2.35 km²,占侵蚀面积 48.06%;中度侵蚀面积为 1.44 km²,占侵蚀面积 29.45%;强度侵蚀面积为 0.87 km²,占侵蚀面积 17.79%;极强度侵蚀面积为 0.23 km²,占侵蚀面积 4.7%。流域平均土壤侵蚀模数为 3 043 t/(km² · a)。

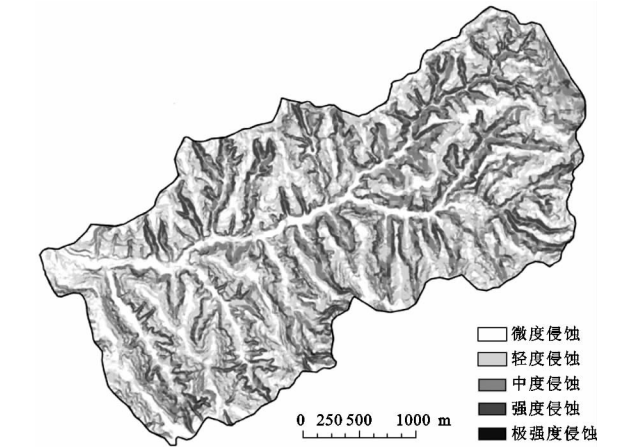


图 2 王家沟流域土壤侵蚀强度分布

通过图 1 和图 2 可以直观发现流域内各类沟道分布与土壤侵蚀强度之间存在紧密联系。对二者进行空间叠加统计(表 3)。可以看出在王家沟流域内沟道侵蚀是土壤侵蚀的主要形式,沟道侵蚀面积占总侵蚀面积的 56.19%,干沟侵蚀面积比例最大,为 17.28%;沟道侵蚀主要以中度侵蚀和强度侵蚀为主,二者侵蚀面积分别占流域内同类侵蚀强度面积的 40.61%和 64.37%。

4 类沟道的土壤侵蚀强度也存在明显差异,河沟以微度侵蚀和轻度侵蚀为主,土壤流失较少;干沟则主要集中在轻度侵蚀和中度侵蚀;而沟道面积相对较小的冲沟和切沟则土壤流失非常严重,中度以上的侵蚀面积占其沟道总侵蚀面积比例分别为 96.95%,83.23%。

实地调查可知,河沟已经属于沟道发育的“老年”阶段,整个沟底宽平,由黄土、红土混合钙结核及砾石组成,老的水流冲积物形成的沟道凸岸已成为阶地或被改造为农地,沟道稳定,植被覆盖度较高,干沟属于沟道发育的“成熟”阶段,沟底宽窄,由上游冲刷下来的侵蚀物质组成,两侧坡麓部分也堆积了很多重力活动(滑坡、泻溜、崩塌等)的堆积物,当上游径流冲刷这些堆积物时,就会产生大量的泥沙,但由于多数的干沟坡度较低,植被覆盖较好,可以起到减流固沙的作用,使径流中携带的泥沙沉积,大大降低土壤流失量。切沟

和冲沟基本属于现代侵蚀沟,是沟道发育的“青年”阶段,这两类沟道往往分布在坡度高、植被覆盖差的梁峁坡上,或在干沟、河沟的沟坡上,V 字形断面使沟道两侧边坡不断被流水消蚀,积压在沟底的堆积物在雨季会被洪水携带走,造成强烈的土壤侵蚀。据王福堂^[21-22]统计发现:像切沟、冲沟这样的“V”型沟是王家沟流域内土壤侵蚀强度最大的地类,其面积仅占流域面积的 4.34%,产沙量却占到流域产沙量的近 20%。

表 3 王家沟流域土壤侵蚀沟道类型的面积比重

沟道 种类	土壤侵蚀强度					比例/%
	微度 侵蚀	轻度 侵蚀	中度 侵蚀	强度 侵蚀	极强度 侵蚀	
切沟	0.11	16.66	42.41	35.87	4.95	13.88
冲沟	0.09	2.96	56.68	33.56	6.71	8.99
干沟	9.16	38.34	36.03	16.24	0.23	17.28
河沟	52.58	33.07	11.56	1.31	0.48	16.04
比例/%	—	34.26	40.61	64.37	31.91	—

注:表中划线的数字表示侵蚀面积占该类沟道总侵蚀面积的百分比,最后一列为该类沟道总侵蚀面积占流域土壤侵蚀总面积的百分比,最后一行为该侵蚀强度下四类沟道的侵蚀面积占流域该侵蚀强度总面积的百分比。

2.3 沟道侵蚀的坡度分异特征

图 3 是王家沟流域的 DEM 图,利用 GIS 进行坡度提取(图 4)并将其与沟道分布图、土壤侵蚀强度图分别进行空间叠加分析,求得王家沟流域内不同坡度的沟道分布情况和土壤侵蚀面积。

从图 5 中可以看出,在王家沟流域内坡度与沟道分布和土壤侵蚀强度之间存在紧密联系。在坡度低于 30°的区域内主要的沟道类型为干沟和冲沟,土壤侵蚀强度以轻度侵蚀和中度侵蚀为主;另外,强度土壤侵蚀面积的比例在各坡度内的分布与同坡度冲沟、切沟数量分布非常相似,都呈现先增后减的变化趋势,并在坡度为 40°~50°处达到最大值;而对于极强度的土壤侵蚀从图中可以看到坡度越大,其所占比例越大。

为了分析图 5 中不同坡度内土壤侵蚀强度与各类型沟道分布的相互关系,对其进行相关性分析,可以看出,当坡度小于 20°时,轻度土壤侵蚀和中度土壤侵蚀面积比例与干沟和河沟的分布数量呈极显著正相关关系。当坡度处于 20°~50°之间时,中度土壤侵蚀面积比与干沟分布存在正相关性,但二者的显著性随着坡度增加逐渐降低;当坡度大于 40°时,强度土壤侵蚀和极强度土壤侵蚀面积比与冲沟和切沟分布数量存在显著正相关性,并且与干沟数呈负相关关系。其中在 40°~50°的区域,冲沟和切沟分布最多,与强度和极强度土壤侵蚀面积比的相关系数 R 均超过了 0.9,这表明该处土壤流失源主要来自于冲沟和

切沟。而当坡度大于 70°时,由于坡度太陡,各类初级沟道会受重力作用发生坍塌、崩塌、滑坡等,已经不宜于沟道的成型发育,土壤侵蚀也由沟道侵蚀向重力侵蚀转移。另外值得关注的是,10°以下区域河沟数量与轻度侵蚀面积比的相关系数($R=0.639$)远小于10°~20°内两者的相关系数($R=0.976$)。这主要是

由于10°以下区域主要集中在9条主干河沟内(见图3),这几条沟道沟底较宽且稳定,受人为活动(修路、建厂、开垦等)影响强烈,土地开发程度较大,另外,近几年外出务工人员较多,很多农地、耕地荒废,致使该区域内植被覆盖度下降,沟内大面积土壤侵蚀强度正由轻度侵蚀向中度侵蚀转变。

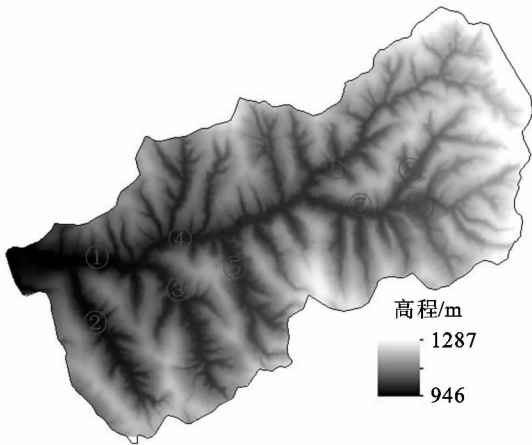


图 3 王家沟流域 DEM 图

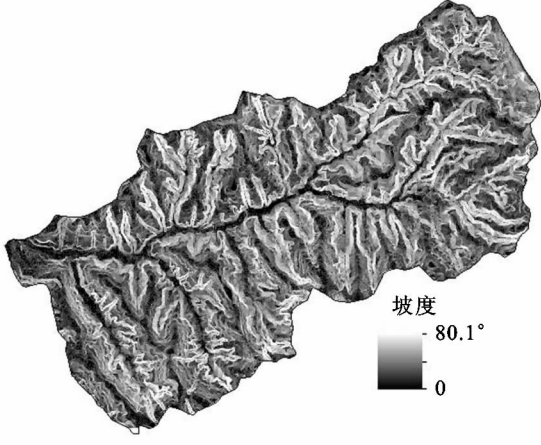


图 4 王家沟流域坡度分布

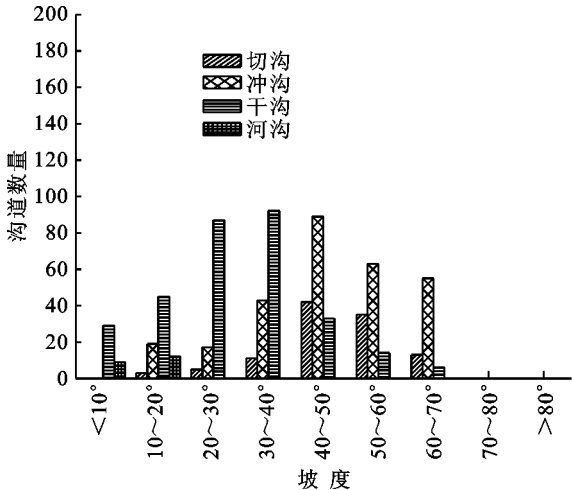
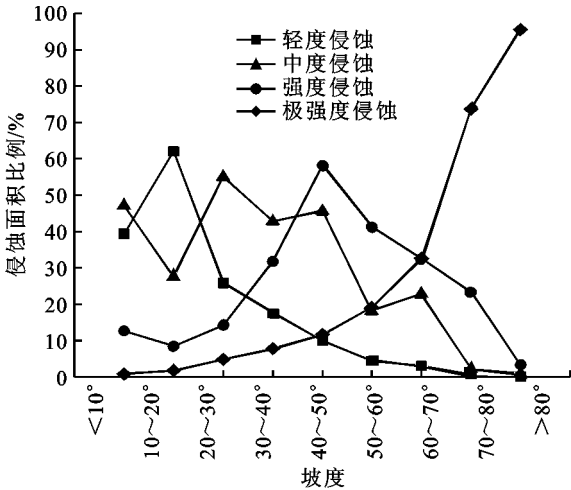


图 5 王家沟流域不同坡度沟道与土壤侵蚀面积分布



3 结论

(1) 王家沟流域内的沟道可以分为4类:切沟、冲沟、干沟、河沟。其中干沟分布数量最多;河沟规模最大;冲沟的平均坡度最大;切沟则是4类沟道中最为活跃、发育时间最短的沟道,具有最大的沟底比降。通过对4类沟道地形因子进行相关性分析,发现冲沟、切沟、干沟这三类沟头平均坡度与沟道面积呈负相关性,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) 沟道侵蚀是王家沟流域内土壤侵蚀的主要形式,沟道侵蚀面积占总侵蚀面积的56.19%。4类沟道中河沟是土壤侵蚀强度最低的沟道,以微度和轻度侵蚀为主。冲沟和切沟则是土壤侵蚀最为严重的

沟道,其“V”字形断面会造成大量土壤流失,两者中度以上的土壤侵蚀面积占其沟道总侵蚀面积的比例分别为96.95%,83.23%。

(3) 王家沟流域不同坡度范围内土壤侵蚀强度与沟道的类型和空间分布存在紧密联系。当坡度小于10°时,轻度和中度土壤侵蚀面积与河沟、干沟的分布数量呈极显著的正相关性;当坡度大于40°时,强度和极强度土壤侵蚀面积与冲沟和切沟分布数量存在正相关性,并在40°~50°区间内相关系数达到最大。

(4) 当坡度大于70°后流域内土壤侵蚀方式由沟道侵蚀转向重力侵蚀。流域内10°以下区域部分主干河沟的土壤侵蚀强度正由轻度向中度转变,主要原因是近些年土地开发程度加剧,大量务农人员外出,致使农、耕地大量荒废,植被覆盖度下降,从而易造成水土流失。

参考文献:

- [1] 陈晓安,蔡强国,张利超,等. 黄土丘陵沟壑区不同雨强下坡长对坡面土壤侵蚀的影响[J]. 土壤通报,2011,42(6):721-725.
- [2] 孙文义,郭胜利. 黄土丘陵沟壑区小流域土壤有机碳空间分布及其影响因素[J]. 生态学报,2011,31(6):1604-1616.
- [3] 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.
- [4] 魏霞,李占斌,李勋贵. 黄土高原坡沟系统土壤侵蚀研究进展[J]. 中国水土保持科学,2012,10(1):108-113.
- [5] Liu Y, Fu B, Lü Y, et al. Hydrological responses and soil erosion potential of abandoned cropland in the Loess Plateau, China[J]. Geomorphology, 2012, 138(1): 404-414.
- [6] 孔亚平,张科利,唐克丽. 坡长对侵蚀产沙过程影响的模拟研究[J]. 水土保持学报,2001,15(2):17-24.
- [7] Chirino E, Bonet A, Bellot J, Sánchez J R. Effects of 30-year-old Aleppo pine plantations on runoff, soil erosion, and plant diversity in a semi-arid landscape in south eastern Spain[J]. Catena, 2006, 65(1): 19-29.
- [8] 张丽萍,倪含斌,吴希媛. 黄土高原水蚀风蚀交错区不同下垫面土壤水蚀特征试验研究[J]. 水土保持研究, 2005, 12(5): 126-127.
- [9] 田凤霞,王占礼,牛振华,等. 黄土坡面土壤侵蚀过程试验研究[J]. 干旱地区农业研究,2005,18(6):141-146.
- [10] 伍飞舟,杨卓,牛健植,等. 黄土高原丘陵沟壑区土地利用与水土保持措施的变化特征[J]. 水土保持研究, 2010, 17(2): 11-19.
- [11] 卫伟,陈利顶,傅伯杰,等. 半干旱黄土丘陵沟壑区降水特征值和下跌面因子影响下的水土流失规律[J]. 生态学报,2006,26(11):3847-3853.
- [12] 黄秉维,郑度,赵名茶,等. 现代自然地理[M]. 北京:科学出版社,1999.
- [13] 邓成龙,袁宝. 印末次间冰期以来黄河中游黄土高原沟谷侵蚀:堆积过程初探[J]. 地理学报,2001,56(1):92-98.
- [14] 王光谦,李铁键,贺莉,等. 黄土丘陵沟壑区沟道的水沙运动模拟[J]. 泥沙研究,2008(3):19-25.
- [15] 刘万青,张超超,王旭红,等. 高线图形概括在黄土高原沟谷侵蚀量估算中的应用[J]. 水土保持通报,2011,31(1):128-131.
- [16] 穆少杰,李建龙,陈奕兆,等. 2001—2010 年内蒙古植被覆盖度时空变化特征[J]. 地理学报,2012,67(9):1255-1268.
- [17] 庞吉林,张克斌,乔娜,等. 基于 RS 的盐池县近 10 年植被覆盖度动态变化研究[J]. 水土保持研究,2012,19(4):112-115.
- [18] 王天巍,史志华,李朝霞,等. 基于多源数据的三峡库区乐天溪流域林地植被覆盖动态监测[J]. 应用生态学报,2008,18(11):2533-2539.
- [19] Montgomery D R, Foufoula-Georgiou E. Channel network source representation using digital elevation models[J]. Water Resources Research, 1993, 29(12): 3925-3934.
- [20] Zhu T X. 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.
- [21] 王福堂,蔡强国, Luk S. 晋西黄土高原土壤侵蚀管理与地理信息系统应用研究[M]. 北京:科学出版社,1992.
- [22] 王福堂,王贵平. 王家沟流域水土保持综合治理动态监测与效益评价[J]. 山西水土保持科技,1995(3):2-8.

(上接第 37 页)

- [8] Hutson J L, Cass A. A retentivity function for use in soil water simulation models[J]. Journal of Soil Science, 1987, 38(1): 105-113.
- [9] 陈利顶,傅伯杰. 农田生态系统管理与非点源污染控制[J]. 环境科学,2000,21(3):98-100.
- [10] 张福珠,熊先哲,戴同顺,等. 应用¹⁵N 研究土壤—植物系统中氮素淋失动态[J]. 环境科学,1984,5(1):21-24.
- [11] Chen X M, Shen Q R, Pan G X, et al. Characteristics of nitrate horizontal transport in a paddy field of the Tai Lake region, China[J]. Chemosphere, 2003, 50(6): 703-706.
- [12] 陈效民,邓建才,张佳宝,等. 黄淮海平原主要土类中硝态氮水平运移规律[J]. 环境科学,2002,23(5):96-99.
- [13] 邓建才,陈效民,柯用春,等. 土壤水分对土壤中硝态氮水平运移的影响[J]. 中国环境科学,2004,24(3):280-284.
- [14] 高雪松,邓良基,张世熔. 不同利用方式与坡位土壤物理性质及养分特征分析[J]. 水土保持学报,2005,19(2):53-56.
- [15] Gregorich E G, Anderson D W. Effects of cultivation and erosion on soils of four toposequences in Canadian prairies[J]. Geoderma, 1985, 36(3/4): 343-354.
- [16] 杜臻杰,陈效民,方堃,等. 典型红壤旱地硝态氮水平运移规律的研究[J]. 土壤通报,2009,40(6):1349-1352.