

基于RS和GIS的黄土丘陵沟壑区浅沟侵蚀地形特征研究

秦伟^{1,2}, 朱清科^{2*}, 赵磊磊², 邝高明²

(1. 中国水利水电科学研究院泥沙研究所, 北京 100044;

2. 北京林业大学水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室, 北京 100083)

摘要: 为了解黄土高原浅沟侵蚀地形特征, 基于 Qucickbird 高分辨率遥感影像和数字高程模型, 提取了坡面浅沟及其地形参数, 并对浅沟侵蚀的地形特征参数和分布规律进行了统计分析, 结果表明: 黄土丘陵沟壑区, 坡面坡度、长度、坡向以及上坡长度是影响坡面浅沟数量的主要地形要素, 而浅沟侵蚀地形特征主要由坡面坡度、坡面长度、上坡长度和汇流面积共同决定; 坡面长度与浅沟平均长度呈显著线性关系, 坡面坡度与浅沟频度、浅沟坡度与其上坡长度间则均满足二次曲线; 发生浅沟侵蚀的上限与下限临界坡度分别介于 $26^{\circ}\sim 27^{\circ}$ 和 $15^{\circ}\sim 20^{\circ}$, 临界坡长介于 50~80 m; 由浅沟坡度的正弦值与汇流面积确定出浅沟分布的临界曲线; 阳向坡面的平均浅沟长度小于阴向坡面。基于 RS 和 GIS 技术能有效确定浅沟侵蚀地形特征, 为黄土区坡面水土流失治理提供了技术支撑。

关键词: 遥感, 地理信息系统, 地形, 浅沟侵蚀, 黄土丘陵沟壑区

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2010.06.011

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2010)-06-0058-07

秦伟, 朱清科, 赵磊磊, 等. 基于 RS 和 GIS 的黄土丘陵沟壑区浅沟侵蚀地形特征研究[J]. 农业工程学报, 2010, 26(6): 58—64.

Qin Wei, Zhu Qingke, Zhao Leilei, et al. Topographic characteristics of ephemeral gully erosion in loess hilly and gully region based on RS and GIS[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(6): 58—64. (in Chinese with English abstract)

0 引言

在国内, 浅沟被认为是由暴雨径流冲刷, 而在坡耕地槽形部位形成的侵蚀沟槽, 横断面因再侵蚀和再耕作呈弧形扩展, 无明显沟缘、多呈瓦背状排列^[1]。国外侵蚀分类中, 浅沟被称作临时性切沟 (ephemeral gully) 或特大细沟 (lateral rill), 其宽度和深度介于细沟与切沟之间, 可能随继续耕作和持续侵蚀而发展为切沟, 虽不妨碍一般耕作, 甚至会因耕种而消失, 却常在相同位置年复一年地重现^[2]。总之, 浅沟是坡面内的常见地貌类型, 通常在自然侵蚀和人为耕作共同作用下, 由细沟 (主细沟) 进一步侵蚀演变形成、并可能在耕作和侵蚀作用下发展为切沟的中间侵蚀地貌状态, 所对应的浅沟侵蚀属细沟侵蚀向切沟侵蚀演化的过渡侵蚀类型。与其他侵蚀类型相比, 浅沟侵蚀在地貌形态上并不突出, 但侵蚀量却在坡面或流域范围的总侵蚀、产沙中占重要比重。研究表明, 美国东南部和欧洲中部的浅沟侵蚀平均占坡面总侵蚀量的40%以上^[3], 地中海西北部的浅沟侵蚀量占当地总产沙量的比例甚至超过80%^[4]; 在中国黄土高原, 浅沟侵

蚀是十分常见和重要的侵蚀类型, 侵蚀量通常占坡面总侵蚀量的26.6%~59.2%^[5]。

浅沟侵蚀不仅是坡面主要侵蚀产沙源^[6], 且降低农业产出、导致土地退化^[7], 得到国内外广泛关注。已有报道分别对浅沟分布特征及其与上坡汇水面积、坡度等地形因子的关系^[8]、浅沟发育及其演变过程^[5]、浅沟水流动力机制^[9]、浅沟侵蚀发生的临界地形条件^[10]、浅沟侵蚀的产沙特征及其预报^[11]等问题进行了研究。然而, 浅沟侵蚀在坡面普遍存在, 形成的浅沟分布广泛, 要准确掌握一定区域浅沟侵蚀的地形特征, 势必要进行大面积野外调查, 工作量大、效率低。因此, 已有研究多采用径流小区观测或人工降雨模拟的方式获取浅沟侵蚀分析数据, 样本数量相对有限, 对研究结论在实际应用中的可靠性造成较大影响。同时, 小区观测和室内模拟在尺度上均与实际坡面存在较大差距, 小尺度条件下获得的结论是否能符合大尺度条件, 也有待进一步证实。本文针对黄土丘陵沟壑区, 以高分辨率遥感影像和大比例尺数字高程模型为数据源, 基于RS和GIS技术快速提取大量浅沟及其地形参数, 据此分析浅沟侵蚀地形特征, 以期探索浅沟侵蚀研究的新方法, 为高效开展黄土区坡面水土流失治理提供技术参考。

1 研究区概况

研究区位于陕北吴起县吴旗镇 ($108^{\circ}11'12''\text{E}\sim 108^{\circ}14'30''\text{E}$, $36^{\circ}55'21''\text{N}\sim 36^{\circ}48'56''\text{N}$), 包括合沟、湫沟、柴沟、坑沟、刘沟、榆树沟、庄口沟、程大沟、羊路沟、崖窑沟、宋半沟、老牛沟、红崖沟、杨圪山沟、土河院沟等 14 个小流域。海拔 1 245~1 585 m, 面积

收稿日期: 2009-07-07 修订日期: 2010-06-10

基金项目: “十一五”国家科技支撑项目 (2006BAD03A03); 国家自然科学基金创新研究群体基金项目 (50721006); 水利部公益性行业科研专项 (200901047); 中国水利水电科学研究院科研专项 (泥集 1008)

作者简介: 秦伟 (1982—), 男, 陕西人, 博士, 工程师, 主要研究方向: 水土保持及林业生态工程。北京 中国水利水电科学研究院泥沙研究所, 100044。Email: qinwei_office@sina.com

*通信作者: 朱清科 (1956—), 男, 宁夏人, 博士, 教授, 主要研究方向: 水土保持和林业生态工程。北京 北京林业大学水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室, 100083。Email: xiangmb@bjfu.edu.cn

53.37 km², 属黄土梁状丘陵沟壑区。区内年均气温 7.8℃, 无霜期 96~146 d, 年均降水量 478.3 mm, 64% 以上集中在 7—9 月, 年际波动较大, 年均陆地蒸发量 400~450 mm, 为暖温带大陆性干旱季风气候。土壤类型为黄绵土, 质地轻壤。

该区于 1999 年开展退耕还林、封山禁牧, 区内坡耕地几乎全部退耕。一部分退耕后栽植小叶杨 (*Populus simonii*)、河北杨 (*Populus hopeiensis*)、山杏 (*Prunus sibirica*)、杜梨 (*Pyrus betulaefolia*)、沙棘 (*Hippophae rhamnoides*)、柠条 (*Caragana microphylla*)、紫花苜蓿 (*Medicago sativa*) 等人工植被, 其余部分通过封育保持植被自然恢复。其中, 合沟小流域 4.3 km², 全部封育, 加上其它随机分布在区内不同坡向和坡位的退耕封育地块, 共约 27.33 km², 占全区总面积的 51.2%。退耕封育坡面未受到人工林草种植和整地的破坏, 均为天然草本覆盖, 以铁杆蒿 (*Artemisa vestita*) 和芨蒿 (*Artemisia giraldii*) 为建群种, 原来耕作中形成的浅沟保存完整。同时, 浅沟低凹地形内水分条件通常优于原状坡面, 使浅沟内的草本覆盖度高于相邻原状坡面。通过实地测算, 区内退耕封育原状坡面的草本覆盖度为 40%~50%, 而浅沟内的草本覆盖度为 50%~60%。正因如此, 在高分辨率遥感影像中, 浅沟与原状坡面存在明显色差, 清晰可见。除此以外, 分布在不同地貌部位的浅沟为研究浅沟侵蚀地形特征提供了良好条件。

2 研究方法

2.1 数据选择和处理

选用 2007 年 6 月 30 日 15:54:53 拍摄的研究区 Quickbird 遥感影像。在 ERDAS9.1 中, 将 0.61 m 分辨率全色波段数据和 2.4 m 分辨率多光谱数据 (0.45~0.90 μm) 按主成分分析法融合, 并以三次卷积法重采样, 再进行正射校正和边界锐化处理, 最后按研究区范围进行掩模裁切, 形成 0.61 m 分辨率真彩图像, 用于确定浅沟位置和数量 (见图 1)。在 ArcGIS9.2 中, 利用 1:10 000 地形图生成 5 m 分辨率数字高程模型, 用于提取和确定浅沟地形参数 (见图 2)。所有图层均采用横轴莫卡托 (transverse mercator) 投影和 WGS-84 坐标。

2.2 浅沟采集及其地形参数提取

2.2.1 浅沟采集

在 ArcGIS9.2 中, 利用空间分析工具的水文模块, 基于 DEM 提取分水线、山脊线和沟谷线, 并将山脊线和沟谷线沿流向反向延长与分水线相交, 形成独立坡面单元。将独立坡面单元线状图层与遥感影像叠加, 在每个独立坡面单元内目视确定浅沟位置和数量。鉴于道路、农田和人工植被对坡面产流影响显著, 并可能破坏或消除原有坡面浅沟, 故选取土地利用类型为封育后的天然草地、且在封育前因耕作或侵蚀形成明显浅沟的独立坡面单元为数据采集区 (见图 3)。土地利用类型结合实地调查和遥感判读确定。在数据采集区内, 根据野外调查经验和影像内容目视勾绘浅沟。勾绘时, 将影像放大至可识别单个像元。由于浅沟发育在坡面上部, 沿坡面向下,

延伸至沟沿线与较大切沟相连, 因此所有浅沟均由上部沟头开始勾绘, 沿沟身至出现较大切沟终止 (见图 4)。

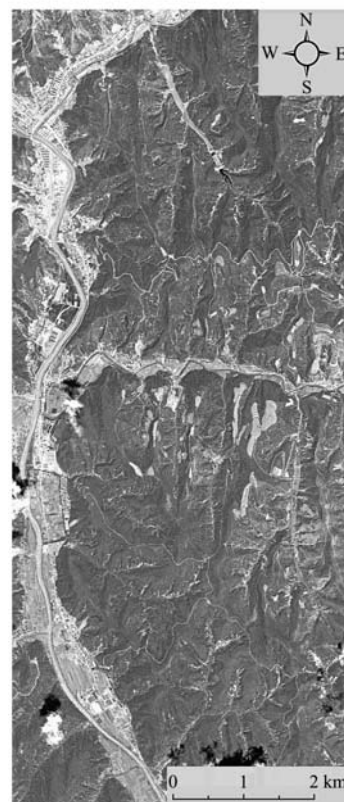


图 1 研究区 0.61 m 分辨率真彩色 Quickbird 遥感影像
Fig.1 Quickbird remote sensing image of 0.61 m resolution in study area

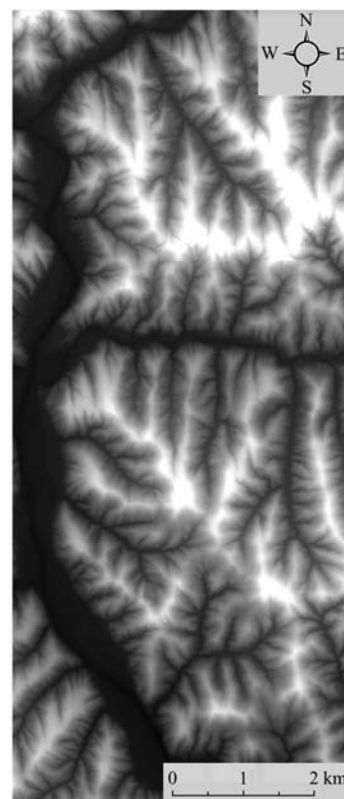


图 2 研究区 5 m 分辨率数字高程模型 (DEM)
Fig.2 DEM of 5 m resolution in study area

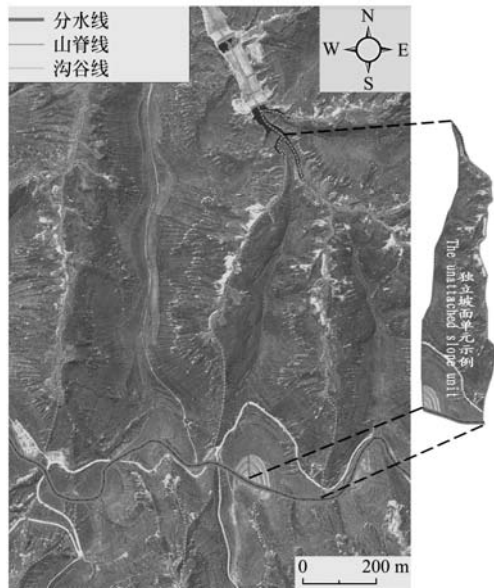


图3 利用分水线、山脊线和沟谷线划分的独立坡面单元
Fig.3 Unattached slope units divided by watershed line, ridge line and valley

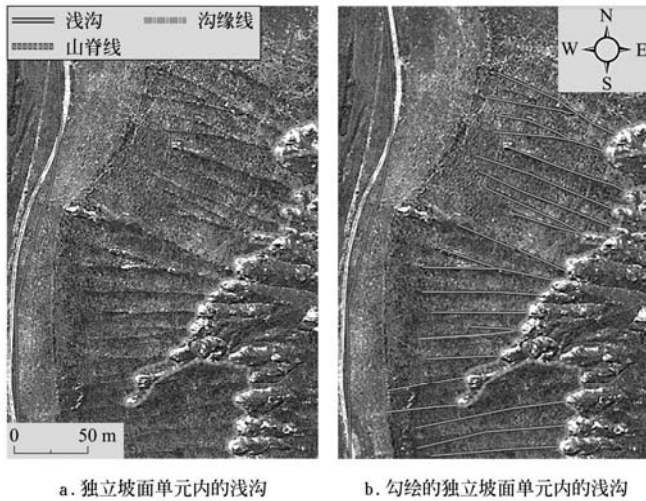


图4 独立坡面单元内的浅沟勾绘示意图
Fig.4 Schematic of ephemeral gullies in unattached slope unit

2.2.2 地形参数提取

勾绘获取浅沟图层后,在 ArcGIS9.2 中,采用下述方法确定其地形参数:

1) 上坡汇流面积:采用空间分析的水文模块,基于 DEM 提取累积汇流量,再乘栅格代表的实际面积(25 m²),得到栅格上坡汇流面积。将汇流面积图层与浅沟图层叠加,运用查询功能,点击浅沟沟头像元获得相应浅沟的上坡汇流面积。勾绘浅沟的独立坡面单元内为封育形成的天然草地,不会显著影响汇流方向,故获取的汇流面积可近似反映浅沟上坡汇流面积。

2) 坡面坡向:采用 3D 分析的表面分析,提取坡向,并划分为阴坡(337.5°~360°和 0°~67.5°)、半阴坡(67.5°~112.5°和 292.5°~337.5°)、阳坡(157.5°~247.5°)和半阳坡(112.5°~157.5°和 247.5°~292.5°),依次记为 1、2、3、4,以便分析。坡面单元的坡向按其

内部多数单元格的坡向类别计。

3) 坡面坡度:由 DEM 直接提取的坡度是中心栅格与周围 8 个栅格间的最大坡降,属局部坡度,非坡面坡度。同时,在黄土丘陵沟壑区,坡面沟沿线上下坡度差异明显,而浅沟分布在沟沿线以上,主要受沟沿线以上坡段,即沟间地的地形特征影响。因此,以沟间地坡度为坡面坡度进行分析。采用 3D 分析的剖面线,基于 DEM 在采集浅沟的坡面单元内以分水线为起点、沟沿线为终点,沿顺坡方向创建带高程信息的直线,生成对应剖面图;根据剖面图所含直线长度和两端高程差计算坡面坡度。每个坡面单元依其大小,均匀间隔创建 5~10 条直线,取平均值为坡面坡度。

4) 浅沟坡度:采用 3D 分析的剖面线,基于 DEM 以浅沟两端为起点和终点创建带高程信息的直线,生成对应剖面图;根据图所含直线长度和两端高程差计算浅沟坡度。

5) 浅沟长度:采用属性计算获取浅沟投影长度,再除以对应浅沟坡度的余弦,获得浅沟长度。

6) 坡面长度和上坡坡长:在采集浅沟的坡面单元内,采用测距功能分别量算分水线与沟沿线间、浅沟沟头与分水线间,垂直等高线方向的距离,再除以所在坡面的坡度余弦,则得到坡面实际长度和浅沟上坡坡长。每个坡面单元依其大小,均匀间隔创建 5~10 条直线,结果取平均值。

7) 坡面单元面积和浅沟频度:将独立坡面单元线状图层转为面状图层,采用属性计算获得各单元面积;对采集到浅沟的坡面单元,根据浅沟条数和单元面积获得浅沟频度。

在浅沟图层属性表中,添加坡面单元编号、浅沟长度、坡面坡度、坡面长度、坡面坡向、上坡坡长、上坡汇流面积等字段及测算结果,建立浅沟地形特征数据库,并导出为 Excle 文件。在 SPSS13.0 中,采用 Pearson 积差相关系数进行相关分析,采用回归分析进行关系拟合和统计检验。

3 结果与分析

最终将研究区划分为 178 个独立坡面单元。其中,满足数据采集条件、并获得有效数据的独立坡面单元 51 个,总面积 15.65 km²,存在浅沟 938 条,总长 84.14 km。浅沟最多的坡面单元有 53 条,最少 4 条,平均 15 条,

表 1 浅沟要素统计值							
Table 1 Statistics of ephemeral gully elements							
	L_g/m	$S_g/(^\circ)$	L_c/m	A_g/m^2	$S_s/(^\circ)$	N_g	F_g/km^2
样本数	938	938	938	938	51	51	51
平均值	89.7	28.5	65.3	645.5	25.2	15	68
中值	74.5	24.8	58.9	550.0	25.5	17	45
最大值	236.5	41.2	137.2	2250.0	41.5	53	118
最小值	21.2	10.6	19.8	175.0	9.5	4	20
极差	215.3	30.6	117.4	2075.0	32.0	49	98
标准差	36.6	5.5	32.8	480.5	7.7	12	36

注: L_g —浅沟长度, S_g —浅沟坡度, L_c —浅沟上坡长度, A_g —浅沟汇流面积, S_s —坡面坡度, N_g —坡面浅沟条数, F_g —坡面浅沟频度。下同。

65.8%和 86.4%的样本坡面单元内存在 10~20 条和 5~25 条浅沟；浅沟频度最高 118 条/km²，最低 20 条/km²，平均 68 条/km²，30~90 条/km²的坡面单元最多，占 72.6%。浅沟及地形参数统计结果见表 1。

3.1 浅沟地形影响因素

对浅沟及其地形特征参数进行相关分析，鉴于大样本相关系数显著性检验的临界值偏小，故采用固定标准

值判断相关系数的显著程度（见表 2）。结果表明，坡面坡度、长度和坡向与坡面浅沟条数和频度间具有显著的相关性，是影响坡面浅沟数量的主要地形因素。同时，浅沟长度与所在坡面的长度、上坡长度及汇流面积间、浅沟坡度与所在坡面的坡度及其上坡长度间均存在显著相关性，可认为坡面长度和坡度，上坡长度和汇流面积共同决定了浅沟发育的地形特征。

表 2 浅沟及其地形特征参数相关系数（R）

Table 2 Correlation coefficients matrix of parameters of ephemeral gully and its topographic characteristics

	N_g	F_g	L_e	S_g	L_s	A_s	S_s	L_c	A_g
N_g	1								
F_g	0.69*	1							
L_e	-0.35	-0.6*	1						
S_g	-0.28	-0.24	0.1	1					
L_s	0.65*	0.58*	0.74**	-0.1	1				
A_s	0.64*	0.69*	0.26	0.14	-0.39	1			
S_s	0.67*	0.75**	0.44	0.69*	-0.33	0.35	1		
L_c	-0.41	-0.46	-0.66*	0.64*	0.6*	-0.4	0.51*	1	
A_g	-0.36	-0.3	0.58*	-0.42	0.54*	0.39	-0.35	-0.39	1

注： L_s —坡面长度， A_s —坡面坡向；*表示 $0.7 > |R| \geq 0.5$ ，**表示 $1 > |R| \geq 0.7$ 。

3.2 浅沟侵蚀的坡长特征

浅沟沟头的溯源侵蚀微弱，通常保持稳定，故其上坡坡长可近似作为浅沟侵蚀的临界坡长^[1]。统计结果显示，79.4%的上坡长度介于 50~80 m，表明该区发生浅沟侵蚀的临界坡长约 50~80 m。

各地形因素中，坡面坡长与浅沟长度关系最显著，可用于进行基于地形参数的浅沟长度预测。考虑到同一坡面内各条浅沟的长度存在差异，采用坡面长度（ L_s ）与对应坡面内的浅沟平均长度（ L_g ）进行回归分析，得到二者关系式

$$L_g=0.47L_s+35.4 \quad (R^2=0.61)$$

结果表明，在发生浅沟侵蚀的坡面内，浅沟长度与坡面长度呈极显著的线性正相关关系（ $P<0.01$ ），坡面越长，浅沟越长，浅沟侵蚀强度越大。

3.3 浅沟侵蚀的坡度特征

由相关性分析可知，坡面坡度对浅沟条数、浅沟频度和浅沟坡度均有显著影响。临界坡度是坡度对侵蚀影响的特殊表现。对浅沟侵蚀而言，临界坡度应包括 2 个方面：一方面，坡面侵蚀强度随坡度增大而增加，当坡度超过一定界限时，又随坡度增大而减少^[12]，这个坡度界限可认为是对应侵蚀类型的上限临界坡度，即通常所说的临界坡度；另一方面，在黄土区的坡面上，不同强度范围的侵蚀通常表现为不同侵蚀类型，大致随侵蚀强度的增加依次表现为细沟侵蚀、浅沟侵蚀和切沟侵蚀等。在其他因素一定的条件下，侵蚀强度随坡度增大而增加，当坡度增大到一定界限时，主要侵蚀类型显著变化^[1]，这个坡度界限可认为是一种侵蚀类型的下限临界坡度，即一种侵蚀类型在坡面侵蚀中成为主要类型，并明显表现出自有特征的临界坡度。

由不同坡度等级的浅沟数量统计结果（见表 3）可知，

样本坡面单元中，坡度小于 15°的坡面单元 4 个，存在浅沟 32 条，仅占浅沟总条数的 3.38%；坡度小于 20°的坡面单元 7 个，存在浅沟 95 条，仅占浅沟总条数的 10.12%。由此可认为，浅沟存在，即浅沟侵蚀成为坡面主要侵蚀类型的下限临界坡度在 15°~20°之间。这与通过野外调查获得的统计结果 18.2°^[1]及根据室内放水冲刷试验获得的分析结果 18°左右^[13]接近，说明通过 RS 和 GIS 技术获取坡面坡度和浅沟数量，从而分析获得的浅沟侵蚀下限临界坡度具有可靠性。

表 3 不同坡度等级的浅沟数量统计值

Table 3 Statistics of ephemeral gully number on different grade of slopes

坡度/(°)	浅沟条数	占浅沟总条数比例/%	坡面单元数	占样本坡面单元总数比例/%	平均浅沟频度/km ²
<10	4	0.35	1	1.96	20
>10~15	28	3.03	3	5.88	28
>15~20	63	6.74	3	5.88	57
>20~25	318	33.88	14	27.45	99
>25~30	387	41.31	19	37.26	104
>30~35	86	9.16	6	11.77	77
>35~40	39	4.15	3	5.88	36
>40	13	1.38	2	3.92	30

坡面坡度对浅沟频度有显著影响，可用于进行基于地形参数的浅沟频度预测。考虑到坡面水流的侵蚀能力与坡面坡度的正弦值存在理论意义上的线性关系^[14]，故将坡面坡度正弦值（ $\sin(S_g)$ ）与对应坡面的浅沟频度（ F_g ）进行回归分析：

$$F_g=-815.33\sin^2(S_g)+731.12\sin(S_g)-71.79 \quad (R^2=0.58)$$

结果表明，坡面坡度正弦值与坡面浅沟频度间呈极显著的二次曲线关系（ $P<0.01$ ）。由此关系可确定浅沟侵

蚀的上限临界坡度，即当坡度为 26.9°时，坡面浅沟频度达到最大值，说明浅沟侵蚀的上限临界坡度为 27°左右。这与张科利等^[1]利用野外调查数据建立的坡度与浅沟临界坡长、临界汇水面积、分布间距的统计关系所推算的结果 26°，龚家国等^[13]通过放水冲刷试验获得的分析结果 26°左右以及靳长兴^[12]基于坡面径流能量理论公式的推导结果 24°~29°均十分接近，说明基于 RS 和 GIS 技术的浅沟侵蚀上限临界坡度研究结果具有可靠性。

坡面自然地形存在局部起伏，同一坡面内各处坡度与坡面坡度不尽相同，甚至存在较大差异，是影响浅沟侵蚀的重要地形因素。对浅沟坡度 (S_g) 与浅沟的上坡坡长 (L_c) 进行回归分析：

$$L_c=0.13S_g^2-6.68S_g+140.27 \quad (R^2=0.41)$$

结果表明，浅沟坡度与浅沟上坡坡长呈显著的二次曲线关系 ($P<0.05$)。这是由于，发生浅沟侵蚀需具有一定冲刷能量的水流作用，而具有一定冲刷能量的水流则需由坡面薄层片流经一定坡长的汇集后形成，从而表现为浅沟侵蚀的临界坡长。同时，一定流量的坡面水流在不同坡降的坡面上通过相同距离后，将形成不同的冲刷能量，相同范围内，坡度越大形成的冲刷能量越大，达到产生浅沟侵蚀能量要求的距离越短；超过一定范围后，则相反。浅沟坡度与浅沟临界坡长间的统计方程正好反映出坡度与坡长共同影响浅沟侵蚀发生、发展的耦合关系。由此关系可确定，浅沟坡度为 25.7°时，临界坡长达到最小值 54.5 m，结合由 $\sin(S_g)-F_g$ 关系式得到的最大坡面浅沟频度对应的坡面坡度 26.9°，可将浅沟侵蚀的上限临界坡度确定为 26~27°。此时，所对应的临界坡长最小值 54.5 m 也介于通过浅沟上坡坡长频率统计获得的临界坡长范围 50~80 m 间，可认为该区浅沟侵蚀的临界坡长为 50~80 m。

3.4 浅沟侵蚀的汇流面积特征

汇水面积决定了相同坡降的坡面内，流动相同距离后汇集的径流总量。不同径流总量具有的不同冲刷能力直接影响浅沟侵蚀强度。因此，在相关性分析中 (表 2)，汇流面积与浅沟长度、浅沟坡度及其临界坡长间均存在显著关系。但是，本研究中用于分析的汇流面积是浅沟沟头所在单元格的 DEM 汇流累积量，而 DEM 与遥感影像间的配准误差、DEM 的栅格分辨率及派生 DEM 的地形图比例尺都会对该结果造成较大影响。虽然采用 1 : 10 000 地形图生成的 5 m 分辨率的 DEM 在精度上能满足有关长度和坡度的量算要求，却不能完全准确地获取每条浅沟的汇流面积，与其真实值存在较大误差。因此，汇流面积与其他浅沟特征值的相关系数较低，不宜直接进行回归分析。

汇流面积对浅沟侵蚀的影响，直观表现为不同的沟头位置。因此，许多研究通常利用汇流面积和坡度共同确定浅沟侵蚀的发生区域^[15]。将浅沟坡度的正弦值 ($\sin(S_g)$) 与对应浅沟的汇流面积 (A_g) 落在二维坐标中，获得点集分布区下限的切线，即浅沟侵蚀发生区临界线 (图5)，及其关系式：

$$\sin(S_g)=0.076A_g^{-0.303}$$

该界线右上为样本散点分布区域，即可能发生浅沟侵蚀的区域；界线左下无样本点分布，即不易发生浅沟侵蚀的区域。关系式中，-0.303称为相对面积指数，与区域的降水、土壤、土地利用、植被有关。本研究的相对面积指数与在绥德通过实测数据获得的结果 (0.3)^[15]十分接近，2个研究区同属黄土高原丘陵沟壑区，降水、土壤、土地利用、植被等条件均十分近似，说明基于RS和GIS技术确定的浅沟侵蚀发生区域结果具有可靠性。

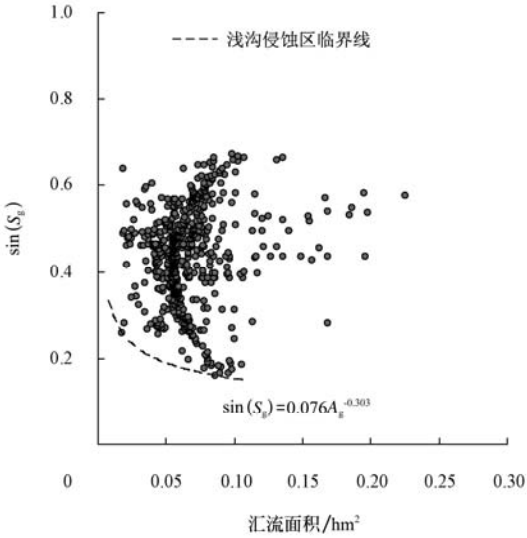


图5 汇流面积与浅沟坡度的临界关系

Fig.5 Critical relationship between runoff contributing area of ephemeral gully and its slope degrees

3.5 浅沟侵蚀的坡向特征

不同坡向的浅沟数量统计结果 (表 4) 表明，阴坡和半阴坡的浅沟频度小于阳坡和半阳坡。这是因为阳坡和半阳坡本身在研究区占有较大比例，2 项面积和占研究区总面积的 54.9%；其次，阴坡和半阴坡水分条件较好，故大部分坡面已开展人工造林，退耕前形成的浅沟被破坏或消除而无法识别。以上原因使得采集到浅沟数据的坡面中有 62.7%属阳坡和半阳坡。总体上，不同坡向间的浅沟频度差异与研究区固有的地形特征及不同坡向的样本数据量有密切关系。与浅沟频度相反，不同坡向的平均浅沟长度表现为半阴坡>阴坡>半阳坡>阳坡。浅沟长度受坡面长度、坡面坡度影响，在黄土丘陵沟壑区，阳坡和半阳坡的水养条件较阴坡和半阴坡差、植被生长难，侵蚀更为严重，从而使地形更破碎，坡面通常比阴坡和半阴坡更陡短，成为不同坡向间浅沟长度差异的主要原因。

表 4 不同坡向的浅沟数量统计值

Table 4 Statistics of ephemeral gully number on different slope aspects

	面积 /km ²	占研究区总面积比例/%	坡面单元个数	占样本坡面单元总数比例/%	平均浅沟长度/m	平均浅沟频度/km ²
阴坡	10.69	20.03	8	15.7	104.5	46
半阴坡	13.38	25.07	11	21.6	120.7	62
阳坡	12.96	24.28	15	29.4	84.6	84
半阳坡	16.34	30.62	17	33.3	98.3	101

4 讨论

浅沟侵蚀属黄土区坡面主要侵蚀类型之一, 侵蚀量在坡面总侵蚀量中占相当比重, 是黄土高原水土流失治理的重点。本文基于RS和GIS技术快速、准确获得浅沟分布及其地形参数, 并通过统计分析确定浅沟侵蚀地形特征, 将为黄土区坡面水土流失治理提供了有力技术支撑。根据有关结论, 黄土丘陵沟壑区浅沟侵蚀防治的重点区域应为 15° 以上、 25° 以下的坡面; 针对浅沟侵蚀的临界坡长, 可按 $50\sim 80\text{ m}$ 为间距, 布设植被或工程措施以缩短坡长, 在最小的工程投入下有效防控浅沟侵蚀; 在不同坡向的坡面开展水土保持, 须考虑不同地形特征对应的沟侵蚀特征差异。

土壤侵蚀强度预报是水土流失防治中的基础, 也是水土保持领域的研究热点和技术难点。利用本文所建立的坡面长度—浅沟平均长度、坡面坡度—浅沟频度关系式可预测不同地形特征坡面内的浅沟数量和浅沟总长。同时, 浅沟长度与浅沟体积间存在显著关系, 可进而预测体积, 且具有较高精度^[16]。因此, 若进一步建立研究区浅沟长度与体积的关系, 将实现基于坡面地形特征的浅沟侵蚀强度预测。

5 结论

1) 黄土丘陵沟壑区, 坡面坡度、长度、坡向以及上坡长度是影响坡面浅沟数量的主要地形要素, 而浅沟长度和浅沟坡度等浅沟侵蚀发展的地形特征主要由坡面坡度、坡面长度、上坡长度和汇流面积共同决定。

2) 在分水线、沟谷线和沟沿线构成的坡面单元内, 坡面长度与浅沟平均长度呈显著线性关系, 坡面越长、浅沟越长; 坡面坡度与浅沟频度、浅沟坡度与其临界坡长均满足二次曲线关系, 随坡面坡度增加, 浅沟频度先增后减, 以 26.9° 为界; 随浅沟坡度增加, 浅沟临界坡长先减后增, 以 54.5 m 为下限。

3) 根据坡面坡度与浅沟频度、浅沟坡度与浅沟上坡坡长的统计关系, 以及浅沟上坡坡长与不同坡度等级下浅沟数量的分布特征可确定, 黄土丘陵沟壑区坡面浅沟侵蚀上限临界坡度为 27° 左右, 浅沟侵蚀成为坡面主要侵蚀类型的下限临界坡度介于 $15\sim 20^{\circ}$ 之间; 浅沟侵蚀的临界坡长介于 $50\sim 80\text{ m}$ 之间。

4) 根据浅沟坡度与浅沟上坡汇流面积建立了研究区浅沟侵蚀发生区临界线。据此, 可确定浅沟侵蚀的潜在发生位置, 为防治浅沟侵蚀提供依据。

5) 黄土丘陵沟壑区, 阳坡和半阳坡更为陡短的地形特点致使阳向坡面的平均浅沟长度通常小于阴向坡面。

[参 考 文 献]

- [1] 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.
Zhang Keli, Tang Keli, Wang Binke, et al. A study on characteristic value of shallow gully erosion genesis on slope

- farmland in the Loess plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1991, 5(2): 8—13. (in Chinese with English abstract)
- [2] Foster G R. Modeling ephemeral gully erosion for conservation planning [J]. International Journal of Sediment Re-search, 2005, 20(3): 157—175.
- [3] Casalí J, López J J, Giráldez J V. A process-based model for channel degradation: application to ephemeral gully erosion[J]. Catena, 2003, 50(2/3/4): 435—447.
- [4] Nachtergaele J, Poesen J, Steegen A, et al. The value of a physically based model versus an empirical approach in the prediction of ephemeral gully erosion for loess-derived soils[J]. Geomorphology, 2001, 40(3/4): 237—252.
- [5] 郑粉莉, 武敏, 张玉斌, 等. 黄土陡坡裸露坡耕地浅沟发育过程研究[J]. 地理科学, 2006, 26(4): 438—442.
Zheng Fenli, Wu Min, Zhang Yubin, et al. Ephemeral gully development process at loess steep hillslope[J]. Scientia Geographica Sinica, 2006, 26(4): 438—442. (in Chinese with English abstract)
- [6] Poesen J, Nachtergaele J, Verstraeten G, et al. Gully erosion and environmental change: importance and research needs[J]. Catena, 2003, 50(2): 91—133.
- [7] Foster G R. Modeling ephemeral gully erosion for conservation planning [J]. International Journal of Sediment Research, 2005, 20(3): 157—175.
- [8] 程宏, 王升堂, 伍永秋, 等. 坑状浅沟侵蚀研究[J]. 水土保持学报, 2006, 20(2): 39—41, 58.
Cheng Hong, Wang Shengtang, Wu Yongqiu, et al. Study on Hole-Ephemeral gullies erosion [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20(2): 39—41, 58. (in Chinese with English abstract)
- [9] 雷廷武, Nearing M A. 侵蚀细沟水力学特性及细沟侵蚀与形态特征的试验研究[J]. 水利学报, 2000, (11): 49—54.
Lei Tingwu, Nearing M A. Flume experiments for determining rill hydraulic characteristic erosion and rill patterns[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000, (11): 49—54. (in Chinese with English abstract)
- [10] Vandekerckhove L, Poesen J, Oostwoud Wijdenes D, et al. Thresholds for gully initiation and sedimentation in Mediterranean Europe[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2000, (25): 1201—1220.
- [11] Liu S, Bliss N, Sundquist E, et al. Modeling carbon dynamics in vegetation and soil under the impact of soil erosion and deposition[J]. Global Biogeochem Cycles, 2003, 17(2): 1074—1078.
- [12] 靳长兴. 论坡面侵蚀的临界坡度[J]. 地理学报, 1995, 50(3): 234—239.
Jin Changxing. A theoretical study on critical erosion slope gradient[J]. Acta Geographica Sinica, 1995, 50(3): 234—239. (in Chinese with English abstract)
- [13] 龚家国, 王文龙, 郭军权. 黄土丘陵沟壑区浅沟水流水动力学参数实验研究[J]. 中国水土保持科学, 2008, 6(1): 93—100.
Gong Jiaguo, Wang Wenlong, Guo Junquan. Ephemeral gully erosion experiment on hydrodynamics parameter of concentrated flow in hilly area of Loess Plateau[J]. Science

- of Soil and Water Conservation, 2008, 6(1): 93—100. (in Chinese with English abstract)
- [14] 曹文洪. 土壤侵蚀的坡度界限研究[J]. 水土保持通报, 1993, 13(4): 1—5.
- Cao Wenhong. Slope thresholds of soil erosion[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1993, 13(4): 1—5. (in Chinese with English abstract)
- [15] Hong Cheng, Yongqiu Wu, Xueyong Zou, et al. Study of ephemeral gully erosion in a small upland catchment on the Inner-Mongolian Plateau[J]. Soil and Tillage Research, 2006, 90(1/2): 184—193.
- [16] Capra A, Mazzara L M, Scicolone B. Application of the EGEM model to predict ephemeral gully erosion in Sicily, Italy[J]. Catena, 2005, 59(2): 133—146.

Topographic characteristics of ephemeral gully erosion in loess hilly and gully region based on RS and GIS

Qin Wei^{1,2}, Zhu Qingke^{2*}, Zhao Leilei², Kuang Gaoming²

(1. Department of Sedimentation, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China;

2. Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Combating, Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: A series of ephemeral gullies and their topographic parameters were extracted from high resolution remote sensing image Quickbird and Digital Elevation Model (DEM), and analyzed by statistical methods in order to realize the topographic characteristics of ephemeral gully erosion on hill slope in the Loess Plateau. The results showed that the number of ephemeral gully within hill slope was mainly influenced by slope steepness, slope length, aspects and upslope length. The topographic characteristics of ephemeral gully erosion depended on slope steepness, slope length, upslope length and upslope drainage area. The average length of ephemeral gullies within hill slope was linearly correlated with slope length significantly. There was a quadratic curve relation between slope steepness and frequency of ephemeral gully, slope steepness of ephemeral gully and its upslope length. The upper limit of critical slope steepness of ephemeral gully erosion was between 26° and 27°, and the lower limit was between 15° and 20°. In addition, the critical slope length ranged from 50 to 80 m. The critical curve of ephemeral gully distribution was determined based on the sine value of slope steepness of ephemeral gully and upslope drainage area of ephemeral gully. The average length of ephemeral gullies within sunny slope was less than that within shady slope. This study provides an effectual technological support for water and soil conservation on hill slop in loess area.

Key words: remote sensing, geographical information systems, topography, ephemeral gully erosion, loess hilly and gully region

秦 伟, 等. 基于RS和GIS的黄土丘陵沟壑区浅沟侵蚀地形特征研究(图1、2、3、4)

Qin Wei, et al. Topographic characteristics of ephemeral gully erosion in loess hilly and gully region based on RS and GIS (Figure 1, 2, 3, 4)



图1 研究区0.61 m分辨率真彩色Quickbird遥感影像

Fig.1 Quickbird remote sensing image of 0.61 m resolution in study area



图2 研究区5 m分辨率数字高程模型(DEM)

Fig.2 DEM of 5 m resolution in study area



图3 利用分水线、山脊线和沟谷线划分的独立坡面单元

Fig.3 Unattached slope units divided by watershed line, ridge line and valley



图4 独立坡面单元内的浅沟勾绘示意图

Fig.4 Schematic of ephemeral gullies in unattached slope unit