

陕北黄土区退耕前（1976—1997）坡面切沟发育特征

陈一先¹, 焦菊英^{1,2*}, 魏艳红¹, 赵珩毓²

(1. 中国科学院水利部水土保持研究所, 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学水土保持研究所, 杨凌 712100)

摘要: 以陕北黄土区坊塌流域内 7 条大切沟及其谷缘上的小切沟为研究对象, 通过 ArcGIS 和 MATLAB 从基于 1976、1997 年 1:10 000 比例尺地形图生成的数字高程模型 (DEM) 上提取沟沿线, 进而获得 1976、1997 年大切沟的面积、周长和大切沟上小切沟沟头前进距离, 并结合当时的土地利用图和植被覆盖图, 定量研究了退耕前陕北黄土区切沟发育的速率, 以及土地利用类型和植被覆盖度对切沟发育的影响。结果显示: 在 1976—1997 年间, 7 条大切沟的面积、周长增长率分别为 11.01%~180.46% 和 8.07%~86.75%, 大切沟上小切沟沟头年均前进速率为 0.26~0.84 m; 由溯源侵蚀导致的小切沟沟头前进是研究区内大切沟上的主要侵蚀方式, 大切沟沟谷拓宽和形成新的小切沟分别是对大切沟的面积和周长增长具有较高贡献率的侵蚀方式; 林草覆盖能控制切沟发育, 集水区内覆盖度大于 65% 的植被能更加有效地控制大切沟内以沟谷拓宽为主的、多过程、多部位的综合切沟侵蚀, 覆盖度大于 45% 的植被能更加有效地控制大切沟上小切沟沟头的溯源侵蚀。研究表明基于 GIS 技术和不同年份的地形图, 可以确定切沟侵蚀的方式及速率, 实现对切沟发育的动态监测。

关键词: 土地利用; 侵蚀; 植被; 切沟; 沟沿线; 退耕还林 (草)

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.17.016

中图分类号: S157.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2017)-17-0120-08

陈一先, 焦菊英, 魏艳红, 赵珩毓. 陕北黄土区退耕前 (1976—1997) 坡面切沟发育特征 [J]. 农业工程学报, 2017, 33(17): 120—127. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.17.016 <http://www.tcsae.org>

Chen Yixian, Jiao Juying, Wei Yanhong, Zhao Hengkang. Characteristics of gully development in Northern Shaanxi Hilly Loess Region before Grain-for-Green Programme (1976-1997) [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(17): 120—127. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.17.016 <http://www.tcsae.org>

0 引言

切沟是小流域中常见的沟蚀形态, 主要发育于沟间地与沟谷地的过渡地带^[1]。切沟的侵蚀过程复杂, 朱显谟^[2]基于沟道的切割规模、纵剖面与所在坡面一致与否、沟床表面特征等指标, 将切沟侵蚀划分为小切沟、中切沟和大切沟三个发育阶段。其中, 大切沟宽、深均在 20 m 以上, 其纵剖面与所在坡面有显著差别, 横剖面呈 U 字形、V 字形或梯形; 小切沟以栅状、放射状或枝状发育于大切沟的谷缘上, 在三个发育阶段中最为常见, 其纵剖面与所在坡面基本一致, 沟宽约 1~5 m、深以 2~3 m 最为常见, 横剖面一般呈 U 字形或 V 字形^[2-4]。切沟侵蚀通过沟头溯源侵蚀, 沟底下切与侧蚀, 沟坡冲淘、崩塌、滑坡、泻溜等作用形式, 不断加剧土壤侵蚀^[5], 使土地变得支离破碎, 造成土地退化^[6], 影响农业生产^[7], 恶化当地及下游的生态环境, 是流域主要的土壤侵蚀方式之一^[8]。黄土高原农地型小流域切沟侵蚀产沙量约占流域总产沙

量的 60%~90%^[9]。然而, 中国对切沟侵蚀的研究起步较晚^[10], 且当时监测技术手段有限, 导致对坡面退耕前切沟侵蚀研究集中于切沟形态的描述和发育阶段的划分^[2-4, 11], 而对切沟发育及其影响因子的定量研究很少, 从而限制了切沟侵蚀方面的研究, 导致对切沟侵蚀规律的认识不足, 成为流域土壤侵蚀预报的瓶颈之一。

近年来, 切沟侵蚀监测方法与技术不断发展, 从传统的卷尺、插钎、地形测针仪等实地测量方法^[12-14], 发展到高精度 GPS、遥感影像、三维激光地形测量、摄影测量等新兴技术^[15-18]。加之近年来 DEM 的广泛应用, 使得研究退耕前的切沟形态特征和发育速率成为可能。学者们通过 GIS 技术, 基于 DEM, 从不同角度、用不同方法提取沟沿线。汤国安等^[19]根据黄土地貌坡面坡度转折特征, 提出基于坡面朝向的沟沿线形态判别提取方法, 该方法提取的沟沿线精度较高, 能较好地反映空间沟沿线分布的真实情况。周毅等^[20]依据黄土坡面形态特征及汇流特点, 提出沟沿线栅格点约束上游汇水面积的正负地形分割方法, 进而得到沟沿线, 该方法人工干预少, 提取的面积精度较高, 在不同地貌类型区均有很好的应用适宜性。晏实江等^[21]依据黄土坡面的坡度转折性质, 引入边缘检测算子, 提取并连接沟沿线候选点, 同时借助数学形态学方法滤除细碎线段, 获得精度较高的沟沿线。沟沿线提取方法的不断改进, 为准确、深入地研究退耕前切沟发育提供了数据基础。同时, 切沟发育受到

收稿日期: 2017-04-16 修订日期: 2017-08-31

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (41371280); 国家重点研发计划项目课题 (2016YFC0501604)

作者简介: 陈一先, 博士生, 主要从事切沟侵蚀监测研究。杨凌 中国科学院水利部水土保持研究所, 712100。Email: cheniyixian14@mailsucas.ac.cn

*通信作者: 焦菊英, 研究员, 博士生导师, 主要从事流域侵蚀产沙、土壤侵蚀与植被关系及水土保持效益评价研究。杨凌 中国科学院水利部水土保持研究所, 712100。Email: jjiao@ms.iswc.ac.cn

一系列影响因子的作用，包括地形地貌、土壤性质、气候、土地利用和植被覆盖等^[22-23]。其中，土地利用通过影响切沟集水区的产流特征来影响切沟发育^[23]，不同土地利用类型对径流的拦蓄作用不同^[24]，不合理的土地利用会导致土壤渗透性降低和径流流速增大，从而增加地表产流和增大径流剪切力，加速沟蚀进程^[23,25]。植被对控制切沟发育的作用可归纳为：一方面，地表植被和枯枝落叶通过拦截降雨，减轻溅蚀^[26]，同时，降低径流速度，减小其剪切力^[27]；另一方面，根系通过改良土壤，增加入渗，减少径流，同时，根系固结土体，增强土壤抗蚀性^[28]。因此，土地利用和植被覆盖被看作评价切沟侵蚀的关键因子，其作用甚至被认为比气候对切沟发育的影响更为重要^[29]。为此，本文通过收集早期的地形图、土地利用图和植被覆盖（NDVI）图等资料，基于 GIS 技术提取切沟 1976 和 1997 年的沟沿线，估算切沟发育速率，分析土地利用类型和植被覆盖度对切沟发育的影响，以期为研究区的切沟防治及退耕还林（草）工程的生态效益评价提供依据。

1 研究区概况

研究区位于陕西省安塞县坊塌流域，地理位置为

109°14'42"~109°16'59"E、36°46'21"~36°49'30"N，流域面积 8.67 km²，平均海拔 1 210.9 m。属于暖温带半湿润气候向半干旱气候的过渡地区，年平均气温 8.8 ℃。根据安塞县气象站的观测数据，1976—1997 年年平均降雨量为 520.54 mm，其中年降雨量最大值为 668.9 mm（1983 年），最小值为 275 mm（1997 年）；1978、1983、1990 和 1996 年降雨量均超过 600 mm；6—9 月降雨量占全年的 70%以上，以暴雨为主。植被属于暖温带落叶阔叶林区向草原区过渡的森林草原植被^[30]。土壤类型主要为黄土母质上发育的黄绵土，颗粒组成以粉粒为主，土质疏松，极易被分散和搬运^[31]。流域呈现出沟谷密集、地面起伏率大和土壤侵蚀剧烈的典型梁峁状黄土丘陵地貌特征。土壤侵蚀以水力侵蚀为主，其次是重力侵蚀。梁峁坡以片蚀、细沟侵蚀和浅沟侵蚀为主，沟坡以切沟侵蚀、冲沟侵蚀、悬沟侵蚀和滑坡、崩塌等重力侵蚀为主^[32]。

本研究利用样带法在坊塌流域内随机设置一贯穿整个流域的样带，从样带上选取 7 条大切沟（图 1），以大切沟及其谷缘上的小切沟作为研究对象。大切沟的基本信息见表 1，其中，沟谷区为沟沿线所围成的闭合区域，集水区为沟沿线以上至分水岭间的区域^[1]。

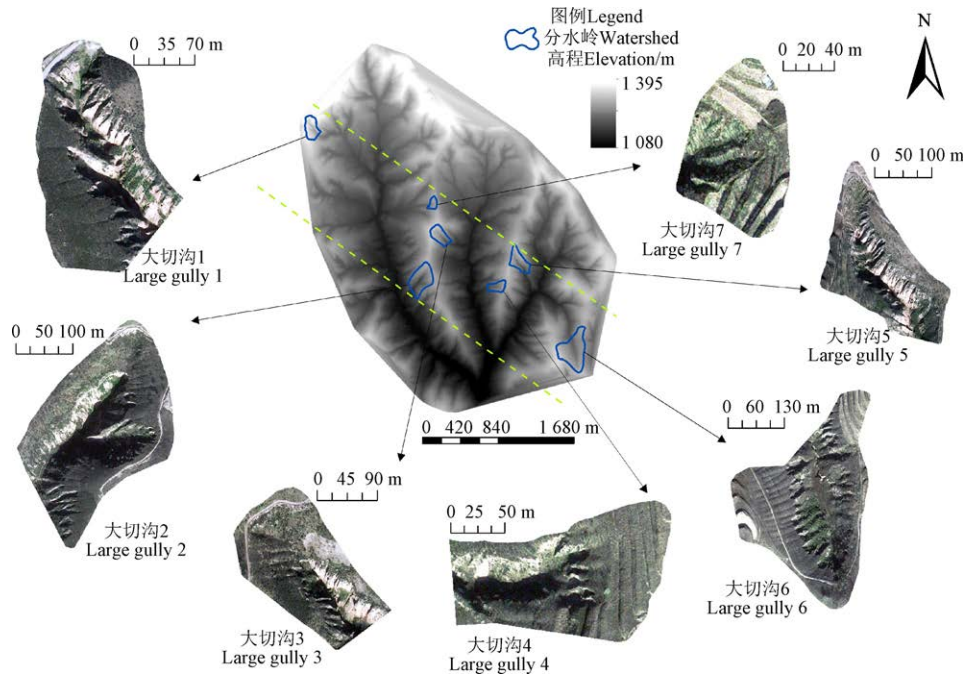


图 1 大切沟在研究区内分布图
Fig.1 Distribution of large gullies in study area

表 1 大切沟基本信息

Table 1 Basic information of large gullies

大切沟编号 Serial number of large gully	沟谷区与集水区总面积 Total area of valley and upslope catchment/m ²	集水区面积 Upslope catchment area/m ²	集水区占总面积之比 Ratio of upslope catchment area to total area/%	集水区平均坡度 Mean slope gradient of upslope catchment/(°)	集水区平均坡长 Mean slope length of upslope catchment/m
1	31 281.68	21 022.61	67.20	32.32	43.66
2	62 164.76	46 773.79	75.24	30.54	76.10
3	30 060.03	25 368.75	84.39	34.27	62.28
4	18 427.85	14 595.52	79.20	24.28	50.94
5	36 086.51	26 492.92	73.42	28.00	54.31
6	91 852.46	63 703.39	69.35	21.99	75.66
7	8 279.53	6 818.63	82.36	22.46	52.34

2 材料与方法

2.1 数据源及预处理

本研究所用的数据源包括来自陕西省测绘地理信息局的 1976、1997 年 1:1 万比例尺地形图, 来自黄土高原科学数据共享平台的 1980 年 30 m 分辨率和 2000 年 1:10 万比例尺土地利用图, 来自中科院水利部水土保持所的 1978—2000 年分辨率为 30 m 的多年平均植被覆盖图。其中, 1980、2000 年土地利用图分别根据 Landsat4-5MSS 和 Landsat4-5TM、Landsat7ETM 遥感影像, 通过室内监督分类解译, 结合野外实地调查编制而成; 植被覆盖数据基于 Landsat1-3 MSS (1978—1983 年) 和 Landsat4-5 TM (1984—2000 年) 遥感影像计算得到, 选用 1978—2000 年间每年 8 月 20 日前后的影像代表研究区当年度植被覆盖最大的时期^[33], 对影像进行辐射校正、几何精校正、大气校正等预处理后, 计算归一化植被指数 (NDVI), 进而得到 1978—2000 年多年平均植被覆盖 (NDVI) 图。虽然 1999 年开始全面退耕还林 (草) 导致坊塌流域土地利用和植被覆盖逐渐发生变化, 但 2000 年处于退耕早期, 可认为当时流域内的土地利用和植被覆盖与退耕前相比尚未发生明显变化, 且因为退耕前的基础数据缺乏, 能收集到的与本研究起止年份 (1976 年 1997 年) 最接近的数据就是 1980、2000 年的土地利用图和 1978—2000 年多年平均植被覆盖图, 因此, 本文通过 1980、2000 年的土地利用图和 1978—2000 年多年平均植被覆盖图来反映研究区研究期间的土地利用和植被覆盖特征。

利用 ArcGIS 10.2 软件对所有图层数据进行 WGS 1984 坐标系转换和横轴墨卡托投影; 之后在 ArcGIS 10.2 中对地形图进行几何变换, 再对等高线进行数字化和赋高程值, 并在完成后检查和纠正可能存在的漏线、串线、断点、未赋值、赋错值等情况, 以确保数字化的精度; 然后由数字化的等高线生成不规则三角网 (TIN), 再由 TIN 生成空间分辨率为 5 m×5 m 的 DEM; 最后, 对 DEM 进行填洼处理, 得到无洼地的 DEM, 用于提取切沟沟沿线。

2.2 切沟参数提取

考虑到生成的 DEM 空间分辨率为 5 m×5 m, 难以用于准确提取小切沟的沟沿线, 所以本文以大切沟为单位提取沟沿线, 研究其面积和周长变化。同时, 因为小切沟发育于大切沟的谷缘上, 其沟沿线是大切沟沟沿线的一部分。虽然大切沟沟沿线上呈现的小切沟可能存在误差, 但其为基于相同规格的基础数据, 并由同一技术人员在相同工作环境中利用相同的技术提取得到, 因此可认为其具有近似的系统误差, 所以本文在研究大切沟面积和周长变化的基础上, 还研究了大切沟上小切沟沟头前进的相对距离。

2.2.1 大切沟沟沿线提取

参考晏实江等^[21]的 DEM 边缘检测沟沿线提取方法, 利用 ArcGIS 10.2 和 MATLAB R2010a 软件对沟沿线进行提取。首先, 调用 MATLAB 软件中的高斯-拉普拉斯 (laplacian of gaussian, LOG) 算子对填洼后的 DEM 进行边缘检测 (设定阈值为 0.001)^[21], 提取突变边缘; 然后,

在 ArcGIS 软件中基于地形图结合目视解译识别出突变边缘中属于沟沿线的部分, 并对其进行连接和数字化, 初步得到切沟的沟沿线。为进一步提高沟沿线的精度, 对于少量存在的边缘检测未能提取出沟沿线、提取结果较破碎或存在偏移的部位, 参考当年度地形图上等高线的走势进行手动勾绘和校正, 得到完善后的沟沿线。在 ArcGIS 中根据沟沿线划分出大切沟的沟谷区和集水区两类面状图层^[1,34-35], 分别用于计算大切沟的面积、周长和从土地利用图层上裁剪出各集水区范围内的土地利用情况。

2.2.2 大切沟面积和周长变化及小切沟沟头前进距离计算

利用 ArcGIS 10.2, 分别计算 1976 和 1997 年各大切沟沟谷区的面积和周长, 进而得到各大切沟的面积变化和周长变化。根据大切沟沟沿线上蜿蜒的形态、规模和分布, 结合朱显谟^[2]对小切沟的定义, 判别出其中属于小切沟的部分。然后在 ArcGIS 10.2 中将 2 期大切沟沟谷区图层进行叠加, 根据 2 期图层上小切沟的位置和轮廓相似程度, 判别不同时期的 2 条小切沟是否为同一切沟, 然后利用 Measure 工具测量两期沟谷区图层上同一小切沟的沟头顶点间距离作为小切沟沟头前进距离。

2.2.3 土地利用类型和植被覆盖度获取

在 ArcGIS 10.2 软件中, 利用大切沟集水区图层对土地利用图层进行裁剪, 获得大切沟集水区的土地利用类型, 分别计算各集水区内各土地利用类型的面积比例。考虑到土地利用图中只划分出林地、草地和耕地 3 种土地利用类型, 为进一步获得土地利用的具体信息, 于 2014 年 7 月对大切沟集水区研究期间的土地利用情况进行了实地走访。

借助 ENVI 5.3 软件, 基于归一化植被指数 (NDVI), 计算大切沟集水区内每个像元的植被覆盖度, 公式为^[36]

$$f_c = \frac{NDVI - NDVI_{soil}}{NDVI_{veg} - NDVI_{soil}}$$

式中 f_c 为植被覆盖度, %; NDVI 为每个像元的 NDVI 值; $NDVI_{soil}$ 为裸土的 NDVI 值, 即无植被像元的 NDVI 值; $NDVI_{veg}$ 为植被的 NDVI 值, 即纯植被像元的 NDVI 值。

为了消除 NDVI 数据噪声所固有的误差, 取 5% 分位数对应的 NDVI 值为 $NDVI_{soil}$, 95% 分位数对应的 NDVI 值为 $NDVI_{veg}$ ^[34]。计算出各集水区的植被覆盖度后, 参考 Li 等^[37]对植被覆盖度分级的方法, 利用 ArcGIS 将其按 $\leq 10\%$ 、 $\leq 15\%$ 、 $\leq 20\%$ 、 $\leq 25\%$ 、 $\leq 30\%$ 、 $\leq 35\%$ 、 $\leq 40\%$ 、 $\leq 45\%$ 、 $\leq 50\%$ 、 $\leq 55\%$ 、 $\leq 60\%$ 、 $\leq 65\%$ 、 $\leq 70\%$ 、 $\leq 75\%$ 、 $\leq 80\%$ 、 $\leq 85\%$ 划分为 16 个等级, 统计各等级的像元数量, 并结合像元的空间分辨率 (30 m×30 m), 计算各等级植被覆盖的面积, 进而得到其占大切沟集水区面积的比例。

2.3 数据分析

利用 SPSS 18.0 软件进行数据统计分析。用单因素方差分析 (One-Way ANOVA) 比较不同大切沟上小切沟沟头前进距离的差异。各等级植被覆盖占大切沟集水区面

积比例、大切沟面积增长率、大切沟上小切沟沟头前进距离之间的关系采用 Pearson 相关分析进行分析, 差异显著性水平为 $\alpha=0.05$ 。

3 结果与分析

3.1 切沟发育特征

1976 和 1997 年研究区内 7 条大切沟的面积增长和周

长增长见表 2。其中 2、4、7 号大切沟的面积增长率相对较大, 分别为 50.70%、119.72%、180.46%; 3、6 号大切沟相对较小, 分别为 38.07%和 11.01%。2、3、7 号大切沟的周长增长率相对较大, 分别为 58.99%、46.32%、86.75%; 1、6 号大切沟相对较小, 分别为 18.69%和 8.07%。1、4、5 号大切沟的面积增长率大于 3 号大切沟, 但周长增长率小于 3 号大切沟。

表 2 1976—1997 年大切沟的面积和周长变化
Table 2 Changes of area and perimeter of large gullies from 1976 to 1997

大切沟编号 Serial number of large gully	面积 Area/m ²		面积增长率 Area growth rate/%	周长 Perimeter/m		周长增长率 Perimeter growth rate/%
	1976	1997		1976	1997	
1	7 219.67	10 259.07	42.10	934.98	1 109.74	18.69
2	10 213.15	15 390.97	50.70	1 285.22	2 043.42	58.99
3	3 397.84	4 691.28	38.07	526.53	770.42	46.32
4	1 744.16	3 832.34	119.72	394.88	537.22	36.05
5	6 826.51	9 593.59	40.53	963.60	1 286.37	33.50
6	25 356.89	28 149.06	11.01	1 836.83	1 985.11	8.07
7	628.22	1 761.91	180.46	180.59	337.24	86.75

将 1976 和 1997 年 2 期大切沟沟谷区图层进行叠加 (图 2), 可以看出 1976—1997 年期间, 7 号大切沟同时存在沟谷拓宽、小切沟沟头溯源侵蚀和形成新的小切沟 3 种侵蚀方式, 1、4 号大切沟则以沟谷拓宽和小切沟溯源侵蚀为主, 2、5、6 号大切沟以小切沟的溯源侵蚀为主, 其中 5 号大切沟也存在微弱的沟谷拓宽。3 号大切沟以形

成新的小切沟为主, 因此其周长增长率大于 1、4、5 号大切沟, 而其面积增长率小于 1、4、5 号大切沟, 是因为 1、4、5 号大切沟均发生沟谷拓宽。综上所述, 小切沟沟头溯源侵蚀是研究区内大切沟上的主要侵蚀方式, 而大切沟沟谷拓宽和形成新的小切沟则分别是对大切沟的面积和周长增长具有较高贡献率的侵蚀方式。

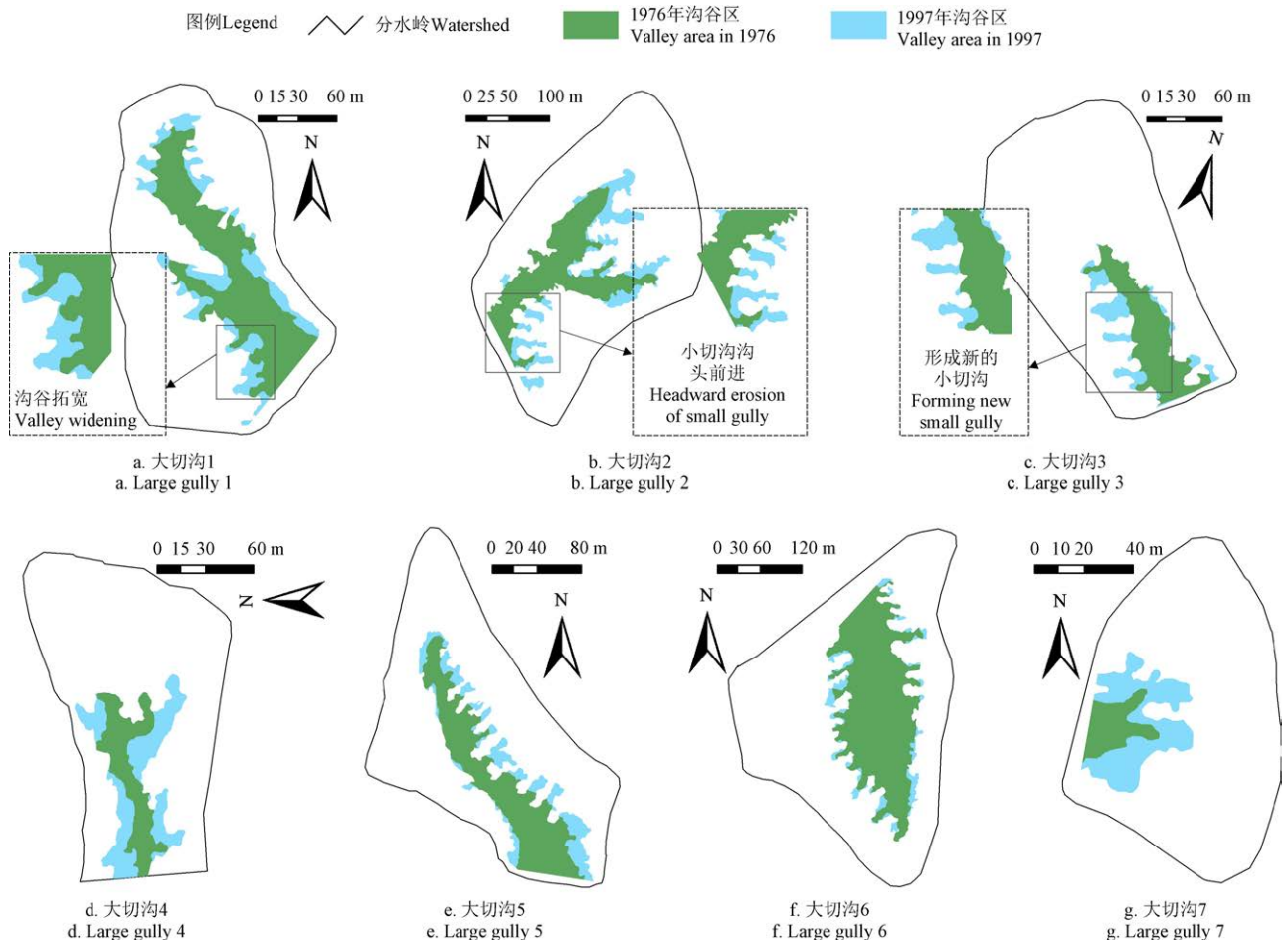


图 2 1976—1997 年大切沟沟谷区变化
Fig.2 Valley area change of large gullies from 1976 to 1997

根据叠加分析的结果, 1976—1997年1~7号大切沟内因溯源侵蚀而发生沟头前进的小切沟数量分别为28、24、14、12、27、29和4条, 沟头前进平均速率分别为 0.35 ± 0.20 、 0.68 ± 0.66 、 0.39 ± 0.44 、 0.56 ± 0.77 、 0.36 ± 0.27 、 0.26 ± 0.22 和 0.84 ± 0.16 m/a。如表3所示, 2、4、7号大切沟上小切沟的沟头前进距离明显大于其他4条大切沟 ($P<0.05$)。

表3 1976—1997年大切沟上小切沟沟头前进距离

Table 3 Head forward distance of small gullies on large gullies from 1976 to 1997

大切沟编号 Serial number of large gully	小切沟沟头前进距离 Head forward distance of small gully/m
1	7.45±4.29b
2	14.65±14.26a
3	8.30±9.41b
4	12.11±16.46a
5	7.83±5.74b
6	5.62±4.80b
7	18.08±3.41a

注: 不同字母表示小切沟沟头前进距离有显著差异 ($P<0.05$)。
Note: Different lowercase letters indicate significant differences among head forward distance of small gullies ($P<0.05$).

3.2 土地利用变化对切沟发育的影响

选定的7条大切沟1976和1997年集水区各土地利用类型面积比例如表4所示。

表4 1976和1997年集水区土地利用类型变化

Table 4 Land use changes in upslope catchment area from 1976 to 1997

大切沟编号 Serial number of large gully	年份 Year	耕地比例 Proportion of farmland/%	草地比例 Proportion of grassland/%	林地比例 Proportion of forestland/%
1	1976	34.62	65.38	0
	1997	71.04	28.96	0
2	1976	56.67	0	43.33
	1997	0.34	27.98	71.68
3	1976	100.00	0	0
	1997	92.44	2.38	5.18
4	1976	100.00	0.00	0
	1997	44.35	55.65	0
5	1976	77.14	22.86	0
	1997	60.35	39.65	0
6	1976	45.33	54.67	0
	1997	61.84	38.16	0
7	1976	100.00	0	0
	1997	0.12	0	99.88

在1976年至1997年间, 1、6号大切沟集区内草地面积比例减少, 2~5号大切沟集水区草地面积比例呈现出不同程度的增加, 但其中2~4号在1976年时均没有草地, 7号大切沟集水区则在研究期间一直没有草地。林地方面, 7号大切沟集水区的林地面积比例增加最多, 2号次之, 3号最少, 其他大切沟的集水区在研究期间均无林木覆盖。1、5、6号大切沟的集水区在研究期间始终具有一定比例的草地, 相应地, 其面积增长率低于2、4、7号大切沟。虽然3号大切沟集水区的林草地面积增加比例很小, 但通过实地走访得知, 研究期间该集水区的耕地类型主要为梯田, 可有效减少坡面径流产生^[38], 从而减轻径流对沟头的冲刷, 所以3号大切沟上小切沟沟头前进距离小于2、4、7号大切沟, 但高于1、5、6号大

切沟, 是因为梯田仅分布在梁岭顶部, 对整个坡面上径流的拦蓄作用有限。然而, 3号大切沟的面积增长率稍低于1、5号大切沟, 是因为研究期间1、5号大切沟均发生了沟谷拓宽。

根据实地走访得知, 退耕还林(草)工程正式实施以前, 研究区的耕地已开始逐渐撂荒, 待其自然演替, 当时还未全面栽种刺槐、柠条、沙棘等水土保持乔灌木树种, 导致所选大切沟的集区内林地普遍较少, 这期间草本植物便为影响切沟发育的主要植被类型。同时, 可以看出, 梯田也能控制切沟发育, 但其作用大小视梯田规模及其在坡面的分布位置而定。

3.3 植被覆盖对切沟发育的影响

将各等级植被覆盖占大切沟集水区的面积比例与大切沟面积增长率和大切沟上小切沟沟头前进平均距离分别进行相关分析, 结果见表5。大切沟面积增长率和大切沟上小切沟沟头前进平均距离分别在植被覆盖度 $\leq 65\%$ 和 $\leq 45\%$ 的区间内, 均与植被覆盖面积比例不存在显著的相关关系 ($P>0.05$), 而当植被覆盖度分别处于 $\leq 70\%$ 和 $\leq 50\%$ 的区间时, 则均开始呈现显著负相关 ($P<0.05$), 且此后随着植被覆盖度的不断增大, 大切沟面积增长率和大切沟上小切沟沟头前进平均距离始终与植被覆盖的面积比例保持显著的负相关 ($P<0.05$)。说明集水区内覆盖度大于65%和45%的植被分别能更加有效地控制大切沟的面积增长和大切沟上小切沟的沟头前进。结合上文大切沟面积增长主要由于其沟谷拓宽引起, 此外大切沟上小切沟的沟头溯源侵蚀和沟谷扩张也有具一定的贡献, 而大切沟上小切沟的沟头前进则主要由溯源侵蚀引起, 可进一步得出集水区内覆盖度大于65%的植被能更加有效地控制大切沟内以沟谷拓宽为主的、多过程、多部位的综合切沟侵蚀; 而覆盖度大于45%的植被能更加有效地控制大切沟上小切沟沟头的溯源侵蚀。因为涉及的侵蚀过程和部位更多, 所以能更加有效地控制大切沟内综合切沟侵蚀的植被覆盖度也更大。

表5 大切沟面积增长率和小切沟沟头平均前进距离与集水区植被覆盖度的相关系数 ($n=7$)

Table 5 Correlation coefficient between area growth rate of large gully, mean forward distance of small gully head and vegetation coverage in upslope catchment area ($n=7$)

植被覆盖度 Vegetation coverage/%	大切沟面积增长率 Area growth rate of large gully/%	小切沟沟头前进平均距离 Mean forward distance of small gully head/m	植被覆盖度 Vegetation coverage/%	面积增长率 Area growth rate of large gully/%	小切沟沟头前进平均距离 Mean forward distance of small gully head/m
≤ 10	-0.253	-0.263	≤ 50	-0.59	-0.802*
≤ 15	-0.269	-0.283	≤ 55	-0.66	-0.861*
≤ 20	-0.264	-0.276	≤ 60	-0.672	-0.871*
≤ 25	-0.328	-0.366	≤ 65	-0.72	-0.858*
≤ 30	-0.483	-0.578	≤ 70	-0.775*	-0.864*
≤ 35	-0.501	-0.637	≤ 75	-0.847*	-0.829*
≤ 40	-0.56	-0.712	≤ 80	-0.873*	-0.815*
≤ 45	-0.544	-0.744	≤ 85	-0.889*	-0.776*

Note: *, $P<0.05$.

4 讨 论

本研究通过比较由 2 期地形图提取的沟沿线, 估算陕北黄土区 1976—1997 年切沟发育的速率, 其中大切沟面积年增长率为 0.51~8.39%, 均值 3.21%; 大切沟上小切沟的沟头前进年平均速率为 0.26~0.84 m, 均值 0.49 m。李镇等^[34,37]基于 QuickBird 影像估算出晋西北黄土区 2003—2010 年切沟年均面积增长率为 0.07~1.35%, 均值 0.47%; 沟头前进年平均速率为 0.36~0.44 m, 均值 0.40 m。本文结果明显大于上述研究结果, 最主要的原因可能是黄土高原地区自 1999 年实行全面退耕还林(草)以来, 植被覆盖度显著增加, 有效地控制了切沟发育。本文得出能更有效地控制大切沟内综合切沟侵蚀的植被覆盖度需大于 65%, 而刘斌等^[39]发现, 在黄土高原地区, 植被覆盖度大于 60%时, 其消减土壤侵蚀的作用明显; 李镇等^[34]得出晋西北黄土地区集水区植被覆盖度大于 60%时, 其抑制切沟发育的效果更加突出。是因为上述 2 位学者的研究中林地面积比例占优, 而本研究区内草地面积比例占优, 但草地的拦泥蓄水作用不及同等覆盖度下的林地^[40]。这也解释了为什么 7 号大切沟在研究期间初期可能因小流域治理(安塞县 1979 年 7 月 5 日开始全县推行小流域治理, 进行飞播造林种草约 7 000 hm²)^[41]而进行了“退耕还林”的前提下, 集水区林草地面积比例从 1976 年时均为 0, 增加至 1997 年林地面积比例高达 99.88%, 但其切沟侵蚀仍最为剧烈。是因为林木生长前、中期未能达到一定的覆盖度, 不能较有效地发挥径流拦蓄作用^[39]。本研究表明黄土高原地区坡面土地利用、植被覆盖度影响切沟发育的速率, 林、草覆盖均能控制切沟发育, 且集水区覆盖度大于 65%和 45%的植被分别能更加有效地遏制大切沟和其谷缘上小切沟的发育, 这为实施退耕还林(草)等措施防治切沟侵蚀提供理论依据。

退耕前, 由于技术手段有限、基础数据缺乏, 导致对切沟发育的研究很少, 当时的研究主要集中于对切沟形态的描述和发育阶段的划分^[2-4,11]。本文利用地形图定量研究了陕北黄土区退耕还林(草)以前 1976—1997 年间的切沟发育速率和发育方式, 明确了退耕前切沟侵蚀特征, 对于补充退耕前切沟侵蚀定量研究的空白具有重要意义。同时, 随着目前切沟侵蚀监测技术的不断进步, 越来越多的研究人员已开始定量获得退耕后黄土高原地区切沟侵蚀的状况^[10,15,17-21,34,39], 但没有详细的退耕前切沟侵蚀数据来与之进行比较, 因而无法深入评价退耕还林(草)工程对切沟防治的生态效益。而本文对于退耕前切沟侵蚀速率与侵蚀方式的确定, 能为退耕还林(草)工程对切沟防治的生态效益评价提供重要参考。

在今后的研究中, 可以根据分辨率更高的 DEM、遥感影像, 结合实地测量, 监测退耕还林(草)前、后不同时空尺度上的切沟发育速率, 揭示不同地区切沟的动态发育过程。同时, 根据本文的分析结果, 由溯源侵蚀导致的小切沟沟头前进是研究区内大切沟上的主要侵蚀方式, 且不同大切沟间小切沟沟头前进距离差异明显, 这

可能与局部地形特征有关, 如坡长、坡度、集水区面积的不同, 导致产流特征及径流能量不同^[35,42], 从而引起切沟发育差异。因此, 有必要深入分析这些地形因子对切沟发育速率的影响。此外, 降雨是黄土区切沟发育的主要驱动力^[22], 土壤是切沟侵蚀的受体, 土壤性质影响切沟侵蚀发生的临界剪切力^[43]。本研究 7 条大切沟之间的距离都在 3.6 km 以内, 降雨、土壤性质等因素的空间差异较小, 因而没有考虑其对切沟发育的影响。但在未来的研究仍有必要根据黄土高原不同地区的降雨、土壤性质, 结合地形、土地利用和植被覆盖等因子, 探明不同地区的切沟发育特征及其主要影响因子。

5 结 论

利用 GIS 技术和 1976、1997 年 1:1 万比例尺的地形图对陕北黄土区 7 条大切沟及其谷缘上的小切沟的发育速率进行了分析, 结果表明:

1) 1976—1997 年, 7 条大切沟的面积、周长增长率分别为 11.01%~180.46%和 8.07%~86.75%, 大切沟间小切沟沟头前进年平均速率为 0.26~0.84 m。由溯源侵蚀导致的小切沟沟头前进是研究区内大切沟上的主要侵蚀方式, 大切沟沟谷拓宽和形成新的小切沟分别是对大切沟的面积和周长增长具有较高贡献率的侵蚀方式。

2) 黄土高原地区林草覆盖能控制切沟发育, 集水区覆盖度大于 65%的植被能更加有效地控制大切沟内以沟谷拓宽为主的、多过程、多部位的综合切沟侵蚀; 而覆盖度大于 45%的植被能更加有效地控制大切沟上小切沟沟头的溯源侵蚀。

3) 通过对比基于 GIS 技术从退耕前不同年份地形图上提取的沟沿线, 可以确定切沟侵蚀的方式及速率, 结合当时的土地利用图和植被覆盖图, 可实现对退耕前切沟发育的动态监测及研究土地利用和植被覆盖对切沟发育的影响。

[参 考 文 献]

- [1] 伍永秋, 刘宝元. 切沟、切沟侵蚀与预报[J]. 应用基础与工程科学学报, 2000, 8(2): 134—142.
Wu Yongqiu, Liu Baoyuan. Gully, gully erosion and prediction[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2000, 8(2): 134—142. (in Chinese with English abstract)
- [2] 朱显谟. 黄土区土壤侵蚀的分类[J]. 土壤学报, 1956, 4(2): 99—115.
Zhu Xianmo. Classification on the soil erosion in the Loess Plateau[J]. Acta Pedologica Sinica, 1956, 4(2): 99—115. (in Chinese with English abstract)
- [3] 刘元保, 朱显谟, 周佩华, 等. 黄土高原坡面沟蚀的类型及其发生发展规律[J]. 中国科学院西北水土保持研究所集刊, 1988(1): 9—18.
Liu Yuanbao, Zhu Xianmo, Zhou Peihua, et al. The laws of hillslope channel erosion occurrence and development on Loess Plateau[J]. Memoir of NISWC, Academia Sinica, 1988(1): 9—18. (in Chinese with English abstract)
- [4] 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, 22(3): 201—222.
Luo Laixing. A tentative classification of landforms in the Loess Plateau[J]. Acta Geographica Sinica, 1956, 22(3): 201—222. (in Chinese with English abstract)
- [5] 景可. 黄土高原沟谷侵蚀研究[J]. 地理科学, 1986, 6(4): 340—347.

- Jing Ke. A study on gully erosion on the Loess Plateau[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 1986, 6(4): 340—347. (in Chinese with English abstract)
- [6] Eitel B, Eberle J, Kuhn R. Holocene environmental change in the Otjiwarongo thombush savanna (Northern Namibia), evidence from soils and sediments[J]. *Catena*, 2002, 47(1): 43—62.
- [7] 于章涛, 伍永秋. 黑土地切沟侵蚀的成因与危害[J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2003, 39(5): 701—705.
Yu Zhangtao, Wu Yongqiu. Causes and damages of gully erosion in black land[J]. *Journal of Beijing Normal University: Natural Science*, 2003, 39(5): 701—705. (in Chinese with English abstract)
- [8] Poesen J, Hooke J M. Erosion, flooding and channel management in Mediterranean environments of southern Europe[J]. *Progress in Physical Geography*, 1997, 21(2): 157—199.
- [9] Li Y, Poesen J, Yang J C, 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(1/2): 107—115.
- [10] 李镇. 黄土高原切沟发育监测方法与侵蚀模型研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2015.
Li Zhen. Study on Monitoring and Modelling Gully Erosion on the Loess Plateau[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2015. (in Chinese with English abstract)
- [11] 陈永宗. 黄河中游黄土丘陵区的沟谷类型[J]. 地理科学, 1984, 4(4): 321—327.
Chen Yongzong. The classification of gully in Hilly Loess Region in the middle reaches of the Yellow River[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 1984, 4(4): 321—327. (in Chinese with English abstract)
- [12] Capra A, Scicolone B. SW—Soil and Water: Ephemeral gully erosion in a wheat-cultivated area in sicily (Italy)[J]. *Biosystems Engineering*, 2002, 83(1): 119—126.
- [13] Couper P, Stott T, Maddock I. Insights into river bank erosion processes derived from analysis of negative erosion-pin recordings: observations from three recent UK studies[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2002, 27: 59—79.
- [14] Casali J, López J J, Giráldez J V. Ephemeral gully erosion in southern Navarra (Spain)[J]. *Catena*, 1999, 36(1): 65—84.
- [15] 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.
- [16] Vrieling A, Rodrigues S C, Bartholomeus H, et al. Automatic identification of erosion gullies with ASTER imagery in the Brazilian Cerrados[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2007, 28(12): 2723—2738.
- [17] Li Z, Zhang Y, Zhu Q, et al. A gully erosion assessment model for the Chinese Loess Plateau based on changes in gully length and area[J]. *Catena*, 2017, 148: 195—203.
- [18] Liu K, Ding H, Tang G, et al. Detection of catchment-scale gully-affected areas using unmanned aerial vehicle (UAV) on the Chinese Loess Plateau[J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2016, 5(12): 238.
- [19] Tang G A, Xiao C C, Jia D X, et al. DEM based investigation of loess shoulder-line[C]//*Geoinformatics. International Society for Optics and Photonics*, 2007: 67532E—67532E.
- [20] 周毅, 汤国安, 王春, 等. 基于高分辨率 DEM 的黄土地貌正负地形自动分割技术研究[J]. 地理科学, 2010, 30(2): 261—265.
Zhou Yi, Tang Guoan, Wang Chun, et al. Automatic segmentation of loess positive and negative terrains based on high resolution grid DEMs[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2010, 30(2): 261—265. (in Chinese with English abstract)
- [21] 晏实江, 汤国安, 李发源, 等. 利用 DEM 边缘检测进行黄土地貌沟沿线自动提取[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2011, 36(3): 363—367.
Yan Shijiang, Tang Guoan, Li Fayuan, et al. An edge detection based method for extraction of loess shoulder-line from grid DEM[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(3): 363—367. (in Chinese with English abstract)
- [22] Valentin C, Poesen J, Li Y. Gully erosion: Impacts, factors and control[J]. *Catena*, 2005, 63(2): 132—153.
- [23] Chaplot V, Giboire G, Marchand P, et al. Dynamic modelling for linear erosion initiation and development under climate and land-use changes in northern Laos[J]. *Catena*, 2005, 63(2/3): 318—328.
- [24] Galang M A, Markewitz D, Morris L A, et al. Land use change and gully erosion in the Piedmont region of South Carolina[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 62(3): 122—129.
- [25] Lal R. Soil erosion impact on agronomic productivity and environment quality[J]. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 1998, 17(4): 319—464.
- [26] Torri D, Poesen J. A review of topographic threshold conditions for gully head development in different environments[J]. *Earth Science Reviews*, 2014, 130(2): 73—85.
- [27] Collison A J C. The cycle of instability: Stress release and fissure flow as controls on gully head retreat[J]. *Hydrological Processes*, 2001, 15(1): 3—12.
- [28] De Baets S, Torri D, Poesen J, et al. Modelling increased soil cohesion due to roots with EUROSEM[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2008, 33(13): 1948—1963.
- [29] Poesen J, Nachtergale J, Verstraeten G, et al. Gully erosion and environmental change: Importance and research needs[J]. *Catena*, 2003, 50(2/3/4): 91—133.
- [30] 周萍, 刘国彬, 侯喜禄. 黄土丘陵区不同土地利用方式土壤团粒结构分形特征[J]. 中国水土保持科学, 2008, 6(2): 75—82.
Zhou Ping, Liu Guobin, Hou Xilu. Fractal features of soil aggregate structure under different land use in the Hilly-gully region of Loess Plateau[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2008, 6(2): 75—82. (in Chinese with English abstract)
- [31] 姚文艺, 陈界仁, 秦奋. 黄河多沙粗沙区分布式土壤流失模型研究[J]. 水土保持学报, 2008, 22(4): 21—26.
Yao Wenyi, Chen Jieren, Qin Fen. Study on the distributed forecast model of soil loss in sandy areas of Yellow River[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 22(4): 21—26. (in Chinese with English abstract)
- [32] 郑粉莉, 高学田. 黄土坡面土壤侵蚀过程与模拟[M]. 西安: 陕西人民出版社, 2000.
- [33] 钟莉娜, 赵文武. 基于 NDVI 的黄土高原植被覆盖变化特征分析[J]. 中国水土保持科学, 2013, 11(5): 57—62.
Zhong Lina, Zhao Wenwu. Detecting the dynamic changes of vegetation coverage in the Loess Plateau of China using NDVI data[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2013, 11(5): 57—62. (in Chinese with English abstract)
- [34] 李镇, 张岩, 姚文俊, 等. 基于 QuickBird 影像估算晋西黄土区切沟发育速率[J]. 农业工程学报, 2012, 28(22): 141—148.
Li Zhen, Zhang Yan, Yao Wenjun, et al. Estimating gully development rates in Hilly Loess Region of Western Shanxi province based on QuickBird images[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2012, 28(22): 141—148. (in Chinese with English abstract)
- [35] 张岩, 杨松, 李镇, 等. 陕北黄土区水平条带整地措施对切沟发育的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(7): 125—130.
Zhang Yan, Yang Song, Li Zhen, et al. Effect of narrow terrace on gully erosion in Northern Shaanxi Loess area[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2015, 31(7): 125—130. (in Chinese with English abstract)
- [36] Qi J, Marssett R C, Moran M S, et al. Spatial and temporal dynamics of vegetation in the San Pedro River basin area[J]. *Agriculture and Forest Meteorology*, 2000, 105(1/2/3): 55—68.
- [37] Li Z, Zhang Y, Zhu Q K, et al. Assessment of bank gully development and vegetation coverage on the Chinese Loess Plateau[J]. *Geomorphology*, 2015, 228: 462—469.
- [38] 姚云峰, 王礼先. 水平梯田减蚀作用分析[J]. 中国水土保持, 1992, 3(2): 40—41.

- Yao Yunfeng, Wang Lixian. Analysis of effects of bench terraced field on reducing soil erosion[J]. *Soil and Water Conservation*, 1992, 3(2): 40—41. (in Chinese with English abstract)
- [39] 刘斌, 罗全华, 常文哲, 等. 不同林草植被覆盖度的水土保持效益及适宜植被覆盖度[J]. *中国水土保持科学*, 2008, 6(6): 68—73.
Liu Bin, Luo Quanhua, Chang Wenzhe, et al. Relationship between percentage of vegetation cover and soil erosion[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2008, 6(6): 68—73. (in Chinese with English abstract)
- [40] 焦菊英, 王万中, 李靖. 黄土高原林草水土保持有效盖度分析[J]. *植物生态学报*, 2000, 24(5): 608—612.
Jiao Juying, Wang Wanzhong, Li Jing. Effective cover rate of woodland and grassland for soil and water conservation[J]. *Acta Phytoecologica Sinica*, 2000, 24(5): 608—612. (in Chinese with English abstract)
- [41] 陕西省情网, 安塞县志. http://www.sxsdq.cn/sqzlk/xbsxz/sxdyl/yas_16203/asxz/.
- [42] 陈永宗, 景可, 蔡强国. 黄土高原现代侵蚀与治理[M]. 北京: 科学出版社, 1988.
- [43] Smerdon E T, Beasley R P. Critical tractive forces in cohesive soils[J]. *Agricultural Engineering*, 1961, 42(1): 26—29.

Characteristics of gully development in Northern Shaanxi Hilly Loess Region before Grain-for-Green Programme (1976-1997)

Chen Yixian¹, Jiao Juying^{1,2*}, Wei Yanhong¹, Zhao Hengkang²

(1. *Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China;*

2. *Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)*

Abstract: Gully erosion is a serious environmental problem and the primary source of sediment loss on the Loess Plateau. However, due to the limited technologies and approaches for monitoring gully, most of the early studies focused on the qualitative description of gully morphology and the division of gully development stages, confining the advancement of quantitative research for gully erosion and leading to insufficient knowledge about gully erosion. The objective of this study was to quantitatively estimate the gully development rates as well as assess the effect of land use and vegetation coverage in upslope drainage area on gully development over 1976-1997 period, after which the Grain-for-Green Programme had been completely implemented since 1999. The study area was in Fangta watershed in Ansai County (109°19'E, 36°52'N), which is located in the northern Shaanxi hilly loess region. Seven large gullies, as well as the small gullies which occurred along the large gullies, were selected along a transect placed randomly and throughout Fangta watershed. ArcGIS and MATLAB software were used to obtain boundary lines of the selected large gullies based on the DEM (digital elevation model) derived from topographic maps at the scale of 1:10000 in 1976 and 1997. By applying LOG (Laplacian of Gaussian) edge detection approach in MATLAB, the gully boundary lines were initially extracted; furthermore, in order to improve the accuracy of the boundary lines, visual interpretation based on the morphology reflected by contour line was conducted in ArcGIS. According to the gully boundary lines, the area and perimeter of large gully and the head retreat distance of small gullies within each large gully in 1976 and 1997 were calculated, respectively. Details about land use and vegetation coverage were extracted from the historical maps of land use and vegetation cover, respectively. The results showed that the rates of area and perimeter development of the 7 large gullies from 1976 to 1997 ranged from 11.01% to 180.46% and from 8.07% to 86.75%, respectively, and the mean head retreat distance of the small gullies within a large gully varied from 0.26 to 0.84 m/a. Head retreat of small gully caused by headward erosion was the dominant erosion form presented within a large gully in study area. In addition, valley widening and forming new small gullies forming could significantly contribute to the area and perimeter development of a large gully, respectively. Forest and grass coverage were both helpful to control gully development, especially when vegetation coverage exceeded 65% in upslope drainage area, which was more effective for controlling multiple erosion processes that simultaneously took place in a large gully, in which valley widening was mainly involved, as well as headward erosion and sidewall expansion of small gully. However, vegetation coverage exceeding 45% in upslope drainage area could only control the headward erosion of small gully effectively. Terrace could also control gully development and its efficiency depended on scale and position of terrace on the slope. This study indicates that the forms and rates of gully erosion can be determined based on GIS technology and topographic map, accomplishing the monitoring of gully dynamic development before implementing the Grain-for-Green Programme.

Keywords: land use; erosion; vegetation; gully; gully boundary line; Grain-for-Green Programme