

基于中尺度的滥泥河流域 1990—2005 年沟道变化研究*

黄勇¹, 齐实², 徐志友³

(1. 北京市永定河管理处, 北京 100165; 2. 北京林业大学, 北京 100083; 3. 宁夏水土保持局, 银川 760000)

摘要: 利用 3S 技术和传统技术研究沟道侵蚀变化已成为国内外研究的热点。研究以 1990 年和 2005 年两期 Landsat/TM 影像及 1:5 万地形图为基础分析数据, 以宁夏回族自治区西吉县滥泥河流域为研究区, 在 GIS、RS 等分析软件的支持下, 基于 DEM 自动提取两期沟道网络, 同时利用 DEM 提取与沟道相关的因子: 坡度、坡向、沟道长度、沟道深度、沟壑密度、纵比降等, 并通过两期 TM 影像提取出沟道宽度。根据研究的需要, 选取沟道长度、沟道宽度、沟壑密度和纵比降作为分析沟道变化的判别指标。最后通过选取的 4 个判别指标, 分析滥泥河流域近 20 a 沟道变化情况。

关键词: 中尺度; DEM; 沟道变化; 判别指标

中图分类号: S157

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2010)02-0080-06

Gully Changes of Lanni River Watershed During 1990–2005 Based on RS at Meso-scale

HUANG Yong¹, QI Shi², XU Zhìyou³

(1. Beijing Yongdinghe River Management Division, Beijing 100072, China; 2. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 3. Ningxia Soil and Water Conservation Bureau, Yinchuan 760000, China)

Abstract: The use of 3S and traditional techniques has become a hot topic worldwide in studying gully erosion changes. In this study, we take Landsat/TM images in 1990 and 2005 and 1:50 000 topographic map as source data, and take Lanni River Watershed in Xiji County in Ningxia Hui Autonomous Region as the study area. The study was supported by GIS, RS and other analysis software, 2 gully networks based on DEM were extracted automatically. In the same time, factors of slope, aspect, gully length, gully depth, ravines density, vertical slope related channel were extracted from DEM, and the gully width was by 2 TM images. According to the research needs, gully length, gully width, gully density and vertical slope were selected as the evaluation indexes to analyze gully changes of Lanni River Watershed during the past 20 years.

Key words: meso-scale; DEM; gully change; evaluation index

利用 3S 技术和传统技术研究沟道侵蚀速率已成为当前国内外研究的热点。进入 20 世纪 80 年代以来, 沟道侵蚀监测引起了世界各国的普遍关注, 并取得了一定的成果。如: 从 2000 年 12 月开始, Antonio Jose Teixeira Guerra, 等^[1] 利用室内实验和野外调查的方法, 对位于巴西 Sao Luis City 的沟道侵蚀进行了监测, 目的是为了探讨土壤特性和土地利用与管理对沟道侵蚀的影响。Valentin Golosov 等^[2] 选择俄罗斯平原中部 Plava River 流域的 Sred-

nerusskaya 丘陵区进行沟槽发展的监测方法研究, 提出了沟槽发展监测的 3 种方法: ①比较不同时间段的地形图, ②比较固定沙桩与沟头的距离, ③基于 GPS 系统的地理学方法。J. B. Ries 和 I. Marzo Iff^[3] 利用 1995–1998 年大比例尺航片选择位于西班牙 Zaragoza 以北 15 km 处的 Ebro 盆地中央作为研究区, 论证 Blimp system 在沟道侵蚀监测中的作用。J. Poesen 等^[4] 在西班牙东南部的 Guadalen-

* 收稿日期: 2009-10-09

基金项目: 国家自然科学基金(30571486, 30671661)

作者简介: 黄勇(1979-), 广西桂林人, 工程师, 主要从事水利工程管理。E-mail: huangy79@163.com

通信作者: 齐实(1964-), 陕西西安人, 副教授, 硕士生导师, 主要从事森林水文和流域规划研究。E-mail: qishi@bjfu.edu.cn

tin 流域和 Guadix 流域, 采用航片和实地测量相结合的方法研究不同时间尺度的沟道退化率。长期以来我国在土壤侵蚀宏观监测的研究以坡面侵蚀监测为主, 对于沟道侵蚀监测研究相对薄弱。王飞等^[5]在对黄土高原相关研究结果分析的基础上, 对沟槽侵蚀进行了初步确定, 同时对与沟槽侵蚀关系密切的泥沙输移比进行了分析, 并总结出沟槽侵蚀与泥沙输移比监测和估算的沟道特征监测法、坡面产沙- 出口站泥沙比较法、稀土元素示踪法、坝库泥沙还原法和经验公式拟合法等方法。李勇等^[6]以位于黄土高原区的羊圈沟水库集水区研究对象, 运用沉积库容量和¹³⁷Cs 技术在坡面和斑块尺度上监测由于沟道侵蚀造成的泥沙沉积量和产沙源, 研究发现耕作坡面和沟坡时最易侵蚀的区域, 结合黄土高原区其他地区获得的资料显示: 沟道水蚀占黄土高原全部泥沙量的 70%, 农业土地的全部泥沙产量的 60% 由沟蚀造成。沟道侵蚀监测研究对揭示黄土丘陵土壤侵蚀规律和提高流域产沙模拟精度等有重要意义, 尤其可以促进对侵蚀定量研究中的重要参数泥沙输移比的确定。本研究以 1990 年、2005 年两期 Landsat/TM 影像及 1: 5 万地形图为基础分析数据, 结合传统同比例尺地形图采集信息方法, 在 GIS、RS 分析软件的支持下, 以宁夏回族自治区西吉县滥泥河流域为研究区, 从 1990- 2005 年的沟道侵蚀变化着手, 揭示滥泥河流域沟道发育规律, 并初步分析其主要成因, 为深入认识黄土丘陵沟壑区小流域的沟谷地貌演化过程, 揭示在沟谷侵蚀过程中的各种影响因素, 以及指导该区水土保持的防治、治理效益评价和水土流失预测预报提供依据和参考。

1 研究区概况

滥泥河流域位于宁夏回族自治区西吉县西南部黄土丘陵沟壑区, 属葫芦河系西侧的一大支流, 位于东经 105°24′ - 105°47′, 北纬 35°41′ - 36°59′, 源于马建乡同化村, 由西北向东南流经苏堡、三合、兴平、平峰、西滩、王民、公易等乡, 在将台以南注入葫芦河, 流域面积 698.59 km²。流域地处黄土高原腹地、宁夏南部山区, 属大陆性季风气候边缘, 为中温带半湿润、半干旱过渡地带, 年平均气温 5~ 6.5℃, 多年平均降雨量 441.6 mm, 年径流量为 1 930 万 m³, 地下水储量为 2 332 万 m³/a。流域内海拔 1 760~ 2 220 m, 冲沟密度 1.23 km/km², 沟谷宽 25~ 350 m, 深 6~ 65 m, 多呈 V 型和 U 型。滥泥河流域地质条件具有其特殊性, 流域内土壤为侵蚀黑垆土、浅黑垆土, 土层厚但肥力相对较差, 且沟底均为

滥泥, 沟岸扩张比较严重。流域内植被稀疏, 水土流失严重, 因此, 西吉县将其作为该县退耕还林实施重点区域。

2 研究内容与方法

本研究以 GIS、RS、地形地貌学、空间统计分析等为基础, 使用数字地形分析的原理和方法, 应用栅格数据的窗口分析、对比分析、数理统计、空间分析等方法, 并利用空间内插、层面比较等手段, 通过理论分析与调查验证相结合的分析研究方法, 从 Horton 水系定律出发, 在 GIS 技术的支持下, 进行基于 Landsat/TM 影像和 1: 5 万 DEM 的宁夏回族自治区西吉县滥泥河沟道特征信息提取及沟道变化规律的研究。

2.1 尺度的界定

尺度本质上是自然界所固有的特征或规律, 而为人们所感知, 因而尺度又可分为测量尺度和本征尺度^[7], 测量尺度是用来测量过程和格局的, 是人类的一种感知尺度, 随感知能力的发展而不断发展。本征尺度是自然现象固有而独立于人类控制之外的。测量尺度相当于研究手段, 隶属方法范畴, 而本征尺度则是研究的对象。尺度研究的根本目的在于通过适宜的测量尺度来揭示和把握本征尺度中的规律性。根据研究范围的空间大小, 尺度可分为:

① 小尺度域, 1~ 10⁶ m² 的空间范围。

④ 中尺度域, 10⁶~ 10¹⁰ m² 的空间范围。

④ 大尺度域, 10¹⁰~ 10¹² m² 的空间范围。

¼ 特大尺度域, 大于 10¹² m² 的空间范围。

2.2 基于 DEM 数据的滥泥河流域沟道网络提取

通过 Gravelius、R. E. Horton、A. N. Strahler、M. A. Melton 和 H. A. 尔尚尼春等人^[8]的探索和研究, 形成了较为完善的沟道分级原则: 在一个理想的树枝状的水系中, 包括了所有间歇性的及永久性的水道在内, 只要它们具有十分明显的稳定性的谷地, 都可以根据序列的命名原则, 将其大小进行分级。凡是属于顶端末梢, 不再分枝的, 而且具有明显的槽床者, 称之为第一级水道; 凡是由两个以上 (即 2 个、3 个、4 个……) 的第 1 级水道汇合后形成的新河槽, 称之为第 2 级水道; 凡是由两个以上的第 2 级水道所汇合而成的新河槽, 算是第 3 级水道; 这样, 直到把全部河槽划分完毕为止。

研究在对滥泥河流域沟道进行分级时, 根据 A. N. Strahler 在 R. E. Horton 的研究基础上提出的河流的等级划分方法^[8], 运用 DEM 提取水系特征信息过程中 DEM 数据的修正处理原理 (洼地与平

坦地区的识别、洼地的填平及平坦地区的抬升等)、DEM 流向计算原理及沟道网络提取算法等^[9-20], 选择最实用的算法生成滥泥河流域沟道网络系统。

2.3 判别指标提取

沟壑是黄土高原的基本地貌形态之一^[21], 由于沟蚀是该地区最重要的侵蚀方式, 因此对沟壑特征及其变化规律的研究一直是黄土高原研究的重要内容。在黄土地区, 由于受到地质地貌、黄土物化性质、降雨强度、地表植被状况和人类活动等因素的影响, 沟谷的变化是十分复杂的, 特别是以暴雨径流为主要动力作用下, 使得沟谷不断加深、拓宽, 沟头不断前进。因此, 要研究沟道的变化, 选取适宜的判别指标是十分必要的。

研究以西吉县 1: 5 万地形图和 1990 年、2005 年两期 Landsat/ TM 影像为基础数据, 分别对滥泥河流域的坡度、坡向、沟道深度、沟道宽度、沟道长度、沟壑密度、沟道纵比降等因子进行了提取。其中, 坡度、坡向、沟道深度通过 1: 5 万地形图制作的 DEM 提取, 沟道宽度通过 1990 年、2005 年两期 Landsat/ TM 影像, 沟道长度、沟壑密度、沟道纵比降通过 DEM 和 TM 二者结合提取。上述因子都是重要的地貌形态特征的重要指标, 但不同的研究目的选取的指标应该有所变化。沟壑密度作为反映地貌形态因子与侵蚀关系的指标之一, 它从宏观上反映了地形表面在水平方向上受到沟谷侵蚀的状况, 也

就是说反映地表在水平方向上被沟谷切割的破碎程度; 沟道宽度反映了沟道发展过程中向两岸扩张程度, 能较为直观的表现出沟道的变化情况; 沟道长度是反映沟头前进的重要指标; 纵比降反映了沟道在垂直方向上的侵蚀程度, 同样也直观、定量化地反映出沟道下切侵蚀程度。把 4 者结合起来, 可以宏观地反映一地区的沟蚀程度, 进而表现不同时期沟道变化情况。本研究的目的是为了揭示滥泥河流域 1990-2005 年沟道的变化规律, 因此, 本研究选取沟道长度、沟道宽度、沟壑密度和纵比降 4 个因子作为分析滥泥河流域 1990-2005 年沟道变化的判别指标。

2.4 滥泥河流域 1990-2005 年沟道侵蚀变化研究

通过选取的判别指标, 研究 1990-2005 年滥泥河流域沟道在气候变化与人类活动等交互影响下的侵蚀变化。

3 结果与分析

3.1 沟道长度的变化

滥泥河流域沟网系统发育成熟, 按照 Strahler 的水系分级标准, 均将滥泥河流域 1990 年和 2005 年两个时期沟道划分为 6 级: 1990 年流域中共有沟道 1 548 条, 总长度 1 144 772. 64 m, 流域平均沟道长度 739. 52 m; 2005 年流域中有沟道 2 091 条, 总长度 1 340 492. 01 m, 流域平均沟道长度 641. 08 m, 详见表 1。

表 1 滥泥河流域各级沟道长度统计表

沟道级别	沟道数目/条		沟道总长度/m		平均长度比		沟道长度增加百分比/%
	1990年	2005年	1990年	2005年	1990年	2005年	
1	1222	1657	602269.19	724669.90	2.1	2.0	20.32
2	253	345	260700.25	295882.22	2.8	3.0	13.50
3	56	70	161711.08	179230.58	1.9	2.2	10.83
4	13	15	71063.37	85924.57	1.3	1.6	20.91
5	3	3	21314.38	27088.99	3.9	3.1	27.09
6	1	1	27714.38	27695.75	-	-	-0.07
全流域	1548	2091	1144772.64	1340492.01	-	-	17.10

从整体上看, 1990-2005 年滥泥河流域沟道网络系统变化较明显, 沟道长度增加, 沟头在前进, 沟道数量增加, 且部分沟道向高一级的沟道发展。通过提取的两个时期的沟道网络分析, 滥泥河流域 1990-2005 年沟道数量增加了 453 条, 其中第 1 级增加了 435 条, 第 2 级增加了 92 条, 第 3 级增加了 14 条, 第 4 级增加了 2 条, 第 5、6 级数目不变。分析所提取的沟道网络发现, 在第 2、3、4 级增加的沟道均是由低一级的沟道发展而成, 即原有的第 1 级沟道有 92 条发展成第 2 级沟道、14 条第 2 级沟道发展成第 3 级沟道、2 条第 3 级沟道发展成第 4 级沟道。

通过表 1 可以明显看出, 1990-2005 年, 滥泥河流域沟道总长度增长率为 17.10%, 各级沟道都有不同程度的延长, 延长最大的是第 5 级沟道, 总长度增长率达到 27.09%; 延长最小的第 3 级沟道也达到了 10.83%; 而第 6 级沟道长度反而缩短了 0.07% (即缩短了 18.63 m), 但根据现场调查发现, 第六级沟道发展极其不明显, 造成长度变短是由于在矢量化西吉 1: 5 万地形图和运用 DEM 数据提取沟道时产生误差造成的。因此, 可以认为第 6 级沟道 1990-2005 年基本无变化。

同时, 还可以看出, 滥泥河流域中, 不同级别沟

道在不同时期平均长度的增加是一个正的几何级数,其变化范围在 1.3~ 3.9 之间,这一基本特征,反映了黄土高原丘陵沟壑区沟道网络系统中各级沟道的共同特点。

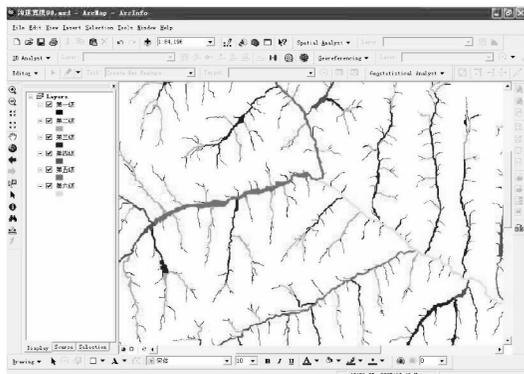
综上所述,滥泥河流域沟道网络是不断发展、逐年变化的,1990- 2005 年全流域沟道总长增加了 195 719.37 m,增长率达到 17.10%,平均每年增加 12 232.46 m,全流域每条沟道平均每年延长 7.90 m。同时,随着新增沟道的产生,部分低级沟道向高一 级沟道发展。

3.2 沟道宽度的变化

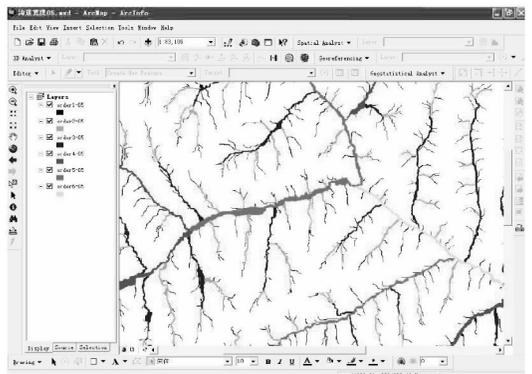
任一沟道在其发展过程中必有向沟岸不断扩张的过程,使得沟道由窄逐渐变宽,滥泥河流域沟道也有其变化的特点。由于本研究选取的研究区域滥泥河流域面积过大(达到 698.59 km²),各级沟道数目有 2 091 条,且没有 20 世纪 90 年代的沟道宽度数据,因此,本研究对于研究区内沟道宽度的提取采用

1990 年和 2005 年两期 TM 影像作为基础数据来确定,通过改变影像的不同波段组合,应用 ArcGIS9.0 绘图、拓扑等编辑分别提取两期影像中的沟道,最终得到滥泥河流域 1990 年和 2005 年的沟道宽度数据,提取数据详见表 2。

从表 2 可以看出,1990- 2005 年整体上滥泥河流域沟道宽度变化整体上看不太明显,全流域沟道宽度变化率达到 8.42%,但沟道网络系统中各级沟道宽度的变化各有差异。从增加宽度来看,变化最大的是第 5 级沟道,平均增宽了 11.46 m;宽度增加最小的是第 1 级沟道,1990- 2005 年平均仅增宽了 1.50 m。从增加率来看,变化最大的是第 4 级沟道,增加率为 11.57%;变化最小的第 6 级沟道变化率仅为 5.53%。但根据表 2 可以看到,沟道平均每年增加的宽度很小,全流域平均只有 0.41 m,增加最大的是第 5 级沟道,增加了 0.72 m;而增加最小的第一级沟道每年只增加了 0.09 m。



1990年



2005年

图 1 滥泥河流域沟道宽度图

表 2 滥泥河流域各级沟道宽度统计表

沟道级别	沟道宽度/ m		增加宽度/ m		增加率/ %	
	1990 年	2005 年	1990- 2005 年	年平均	1990- 2005 年	年平均
1	25.03	26.53	1.50	0.09	5.99	0.37
2	47.5	50.76	3.26	0.20	6.86	0.43
3	73.15	78.44	5.29	0.33	7.23	0.45
4	94.31	105.22	10.91	0.68	11.57	0.72
5	104.79	116.25	11.46	0.72	10.94	0.68
6	117.58	124.08	6.50	0.41	5.53	0.35
全流域	77.06	83.55	6.49	0.41	8.42	0.53

根据得到的滥泥河流域 1990- 2005 年沟道宽度的变化数据可以看出,除了第 5,6 级沟道以平均每年接近 1 m 的速度向沟岸扩张外,其余各级沟道向两岸扩张速度减慢,这说明沟道得到了有效的控制,基本处于稳定阶段,向沟岸剧烈扩张的发展阶段已经过去。

3.3 沟壑密度的变化

沟壑密度是描述地面切割破碎程度的一个术

语^[21]。沟壑密度越大,地面越破碎。破碎的地面地表物质稳定性降低,另一方面易形成地表径流。沟壑密度越大,地面径流和土壤冲刷越快,沟蚀发展越快。

本研究提取了 1990 年和 2005 年两期沟道网络数据,得到两期的沟道长度:1990 年总长度为 1 144 772.64 m,2005 年总长度为 1 340 492.01 m,得出滥泥河流域沟壑密度:1990 年为 1.64 km/km²,2005 年为 1.92 km/km²。1990- 2005 年滥泥

河流域沟道总长度增加了 195.8 km, 沟道数目增加了 453 条, 正是这些新增沟道的出现及各级沟道的发展, 必然使滥泥河流域沟壑密度增大, 变化率为 17.07%。沟壑密度变大, 说明滥泥河流域地面越来越破碎, 并使地面更加起伏不平、且产生大量的斜坡。这样一方面造成滥泥河流域内地表物质稳定性降低, 另一方面易形成地表径流。沟壑密度变大, 同时使流域内地面径流和土壤冲刷加快, 这样沟蚀发展就越快, 潜在的水土流失危害加重。

3.4 纵比降的变化

纵比降反映了沟道在垂直方向上的侵蚀程度, 同样也直观、量化地反映出沟道下切侵蚀程度。从表 3 中可以看出, 滥泥河流域主沟道纵比降在 1990 - 2005 年时间里从 0.641 8% 减少到 0.635 4%, 变化量较小, 只减少了 0.006 4%, 这说明从总体上整个流域沟道下切作用基本停止, 并产生一定的泥沙淤积, 导致主沟道纵比降变小。但从各级沟道来看还是有一定的变化: 第 1, 2, 3 和 6 级沟道纵比降增加, 其中增加最多的是第 1 级沟道, 增加量达到 0.948 6%, 增加最少的第 6 级沟道仅增加了 0.000 1%; 而第 4, 5 级沟道则纵比降减少了。第 1 级沟道之所以变化量最大是由于第 1 级沟道一般从分水岭附近开始发展, 而从 DEM 提取的滥泥河流域坡度图可以看出, 第 1 级沟道所处的位置坡度一般都比较大, 这样就易于形成地表径流, 一旦面蚀未被控制, 由面蚀所产生的细沟或因地表径流的进一步汇流集中, 同时在有利地形条件的促进下, 这些细沟将向长、深、宽继续发展, 地表径流不断汇流集中, 侵蚀能量增强, 造成下切侵蚀剧烈, 使沟道不断加深, 这样就使得沟道纵比降不断加大。

表 3 滥泥河流域各级沟道纵比降统计表

沟道级别	沟道纵比降 / %		变化量 / %
	1990	2005	
1	7.5464	8.4950	0.9486
2	4.1216	4.5430	0.4213
3	2.1418	2.5743	0.4325
4	0.9910	0.8920	-0.0990
5	0.4699	0.4092	-0.0607
6	0.1443	0.1444	0.0001
主沟道	0.6418	0.6354	-0.0064

同时在表 3 中发现, 第 4, 5 级沟道的纵比降反而变小了, 而从表 2 可以知道第 4, 5 级沟道也是宽度变化最大的两级沟道。结合实地调查发现, 第 4, 5 级沟道由于向沟岸扩张较为剧烈, 沟道宽度不断扩大, 造成大量的泥沙流入沟道中。由于泥沙颗粒极不规则, 且大小各不相同, 在水流作用下其运动

方式也必然产生差异。当径流的流速超过临界流速^[23]后, 水流将泥沙冲起, 使大量泥沙随水流前进; 水流中的泥沙越来越多, 水流所具有的输沙能力减少, 直到水流达到了泥沙含量饱和后, 径流速度就会变小, 当径流速度达到了沉降作用的速率时, 泥沙就会沉积下来。正是由于大量的泥沙沉积, 使得第 4, 5 级沟道的纵比降比 1990 年变小了。

4 结论

研究通过选取沟道长度、沟道宽度、沟壑密度和沟道纵比降 4 个因子作为研究滥泥河流域 1990 - 2005 年沟道变化的判别指标, 经研究分析发现:

(1) 滥泥河流域沟道网络是不断发展、逐年变化的, 1990 - 2005 年全流域沟道总长增加了 195 719.36 m, 增长率达到 17.10%, 平均每年增加 12 232.46 m, 全流域每条沟道平均每年延长 7.9 m; 同时随着新增沟道的产生, 部分低级沟道向高级沟道发展。

(2) 全流域沟道宽度变化率达到 8.42%。其中, 除了第 4, 5 级沟道以平均每年接近 1 m 的速度向沟岸扩张外, 其余各级沟道向两岸扩张速度减慢, 这说明沟道得到了有效的控制, 基本处于稳定阶段, 向沟岸剧烈扩张的发展阶段已经过去。

(3) 沟壑密度有一定的变化, 从 1.64 km/km² 变为 1.92 km/km², 变化率为 17.07%。

(4) 主沟道纵比降在 1990 - 2005 年从 0.641 8% 减少到 0.635 4%, 变化量较小, 只减少了 0.006 4%。这说明从总体上整个流域沟道下切作用基本停止, 并产生一定的泥沙淤积, 导致主沟道纵比降变小; 但从各级沟道来看还是有一定的变化: 第一级沟道是纵比降增加最大的一级, 而第四、五级沟道纵比降减小。

通过这些研究表明, 滥泥河流域 1990 - 2005 年沟道总体来说是稳定发展的, 特别是第 6 级沟道, 沟顶接近分水岭, 沟底纵坡接近或相当接近临界侵蚀曲线, 沟岸大致接近于自然倾角, 沟顶已停止溯源侵蚀, 沟底不再下切, 沟岸扩张极小, 在沟底冲积土上开始生长草类和灌木, 甚至有些地段已被当地农民开垦为耕地。目前滥泥河流域沟道正趋于稳定发展, 同时伴随着一系列的治理措施的开展, 使流域内水土流失得到一定的控制, 减少了泥沙入河, 流域内生态环境开始向良性转化。

参考文献:

[1] Guerra Antonio Jose Texeira, Mendonca Jane K S, Rego Marcelo, et al. Gully Erosion Monitoring in Sao

- Lu s City- Maranhao State- Brazil [M]. 17th WCSS, Thailand, 2002.
- [2] Valentin Golosov and Andrey Panin. Methods of Monitoring of Bottom Gullies Development, the Centre of the Russian Plain. Gully erosion under global change [M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 2004: 21-28.
- [3] Ries J B, Marzolf I. Monitoring of gully erosion in the Central Ebro Basin by large-scale aerial photography taken from a remotely controlled blimp [J]. CATENA, 2003, 50: 309-328.
- [4] Poesen J, Vandekerckhove L. Assessment of Gully Headcut Retreat Rates in Semi-arid Environment over Different Timescales. Gully erosion under global change [M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 2004: 29-56.
- [5] 王飞, 李锐, 杨勤科. 土壤侵蚀研究的尺度转换[J]. 水土保持研究, 2003, 10(2): 9-12.
- [6] Y Li, Poesen J B Fu. Evaluating Gully Erosion Using ^{137}Cs and $^{210}\text{Pb}/^{137}\text{Cs}$ Ratio in a Reservoir Catchment. Gully erosion under global change [M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 2004: 57-70.
- [7] 吕一河, 傅伯杰. 生态学中的尺度及尺度转换方法[J]. 生态学报, 2001, 21(12): 2096-2105.
- [8] 承继成, 江美球. 流域地貌数学模型[M]. 北京: 科学出版社, 1986.
- [9] 汤国安, 杨昕. ArcGIS 地理信息系统空间分析试验教程[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [10] 党安荣, 贾海峰, 易善桢, 等. ArcGIS 8 Desktop 地理信息系统应用指南[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [11] Tribe. Automated recognition of valley lines and drainage networks from grid digital elevation model: a review and a new method [J]. Journal of Hydrology, 1992, 18(6): 747-761.
- [12] 党安荣, 贾海峰, 陈晓峰等. ERDAS IMAGINE 遥感图像处理方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [13] 郝振纯, 李丽. 基于 DEM 的数字水系生成[J]. 水文, 2002, 22(4): 8-10.
- [14] 陈永良, 刘大有, 虞强源. 从 DEM 中自动提取自然水系[J]. 中国图像图形学报, 2002, (7): 91-96.
- [15] 汤国安, 陈楠, 刘咏梅, 等. 黄土丘陵沟壑区 1: 1 万及 1: 5 万比例尺 DEM 地形信息容量对比[J]. 水土保持通报, 2001, 21(2): 34-36.
- [16] Gregory E. Tucker, Filippo Catani. Statistical analysis of drainage density from digital terrain data [J]. Geomorphology, 36(2001): 187-202.
- [17] 朱庆, 赵杰. 基于规则格网 DEM 的地形特征提取算[J]. 法测绘学报, 2004, 33(1): 77-82.
- [18] 孔凡哲, 芮孝芳. 处理 DEM 中封闭洼地和平坦区域的一种新方法[J]. 水科学进展, 2003, 14(3): 290-294.
- [19] Wood E F, Sivapalan M, Beven K J, et al. Effects of spatial variability and scale with implication to hydrologic modeling [J]. Journal of Hydrology, 1988, 102: 29-47.
- [20] 游智敏, 伍永秋. 利用 GPS 进行切沟侵蚀监测研究[J]. 水土保持学报, 2004, 10: 91-94.
- [21] 齐实, 罗永红, 徐小涛. 宁夏南部黄土丘陵区水土保持与农业可持续发展[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2003.
- [22] 张洪江. 土壤侵蚀原理[M]. 北京: 中国林业出版社, 2000.
- [23] 王礼先. 流域管理学[M]. 北京: 中国林业出版社, 1999.

(上接第 79 页)

- [9] Pefect E, M choughlin N B, Kayb D, et al. An improved fractal equation for the soil water retention curve[J]. Water Resource Research, 1996, 32: 281-287.
- [10] 王玉杰, 王云琦, 齐实, 等. 重庆缙云山典型林地土壤分形特征对水分入渗影响[J]. 北京林业大学学报, 2006, 28(2): 72-76.
- [11] 杨海龙, 朱金兆, 毕利东. 三峡库区森林流域生态系统土壤渗透性能的研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(3): 54-57.
- [12] 吕刚, 吴祥云. 土壤入渗特性影响因素研究综述[J]. 中国农学通报, 2008, 24(7): 494-498.
- [13] 赵勇钢, 赵世伟, 曹丽花, 等. 半干旱典型草原区退耕地土壤结构特征及其对入渗的影响[J]. 农业工程学报, 2008, 24(6): 5-9.
- [14] 张晓明. 黄土高原典型流域土地利用/ 森林植被演变的水文生态响应与尺度转换研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2008: 187-194.
- [15] 张万儒, 许本彤. 森林土壤定位研究方法[M]. 北京: 中国林业出版社, 1986: 30-36.
- [16] 蒙宽宏, 姚余君, 柴亚凡. 环境因子对土壤水分渗透特性的影响[J]. 防护林科技, 2006, 5(3): 25-17.
- [17] 胡方荣, 侯宇光. 水文学原理[M]. 北京: 水利电力出版社, 1986: 69-73.
- [18] 彭文英, 张科利, 陈瑶, 等. 黄土坡耕地退耕还林后土壤性质变化研究[J]. 自然资源学报, 2005, 20(2): 272-278.
- [19] 巩杰, 陈利顶, 傅伯杰, 等. 黄土丘陵区小流域土地利用和植被恢复对土壤质量的影响[J]. 应用生态学报, 2004, 15(12): 2292-2296.