

## 晋西黄土高原小流域地貌演化特征与水沙过程的动态监测

陈 浩<sup>1</sup>, Y. Tsui<sup>2</sup>, 蔡强国<sup>1</sup>, L. G. Tham<sup>2</sup>, 胡文生<sup>1</sup>, Z. Q. Yue<sup>2</sup>, 梁广林<sup>1</sup>

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 香港大学土木工程系, 香港)

**摘 要:** 长期以来, 我国在黄土高原重点产沙区, 小、中、大流域的水文特征进行了动态监测, 取得了大量的宝贵资料, 这些信息对于有关部门和广大科研人员研究土壤侵蚀规律, 以及为水土保持治理决策与措施配置提供科学依据起到重要作用。但由于以往研究手段的限制, 以地貌特征(包括以土地利用方式)变化的动态检测缺乏系统研究。以地貌形态特征、土地利用方式的变化的动态检测, 对于有关部门更加全面的认识地表剥蚀过程、人类活动的影响, 提供了水沙检测替代不了的作用, 是相关研究的重要内容之一。随着航天遥感、计算机软件技术的不断提高, 将三维动态的地貌、土地利用方式与土壤侵蚀的过程相结合是交叉学科的重要研究方向。根据 5 期晋西王家沟小流域(从 1959~1999)大比例尺航片, 在数字高程模型(DEM)、正射影像图(DOM)制作的基础上, 开展了 40 年来, 以地貌特征并结合小流域水沙变化为目标的动态检测, 为地貌演化、地表剥蚀过程研究提供了基础信息。

**关键词:** 动态监测; 地貌演化; 水沙过程; 王家沟小流域; 晋西黄土高原

**中图分类号:** S157; TP79

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2004)02-0001-03

## Dynamic Monitoring of Changes of Runoff and Sediment Yield Process and Landforms Evolution on Wangjiagou Catchments

CHEN Hao<sup>1</sup>, Y. Tsui<sup>2</sup>, CAI Qiang-guo<sup>1</sup>, L. G. Tham<sup>2</sup>, HU Wen-sheng<sup>1</sup>, Z. Q. Yue<sup>2</sup>, LIANG Guang-lin<sup>1</sup>

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

2. Department of Civil Engineering, Hong Kong University, Hong Kong, China)

**Abstract:** The limitation of previous research method is the lack of systematic study in dynamic monitoring of changes of geomorphic characteristics (including land use patterns). Dynamic monitoring of the changes of geomorphic characteristics and land use patterns plays the role that the water and sediment monitoring cannot be a proxy for it to the even more comprehensive understanding of the surface erosion processes and impact of human activities by the relevant departments, and is also one of the key research topics. With the constant improvement in remote sensing and computer software techniques, the combination of 3D dynamic landforms and land use patterns with soil erosion process serves as an important interdisciplinary research direction. According to five-phase large-scale airphotos of small catchment of Wangjiagou in west Shanxi (from 1959 to 1999), based on the preparation of digital elevation model (DEM) and digital orthophoto map (DOM), the dynamic monitoring targeted at geomorphic characteristics in combination with water-sediment changes has been conducted in the past 40 years so as to provide basic information for geomorphic evolution and ground surface erosion process.

**Key words:** dynamic monitoring; landforms evolution; runoff and sediment yield process; Wangjiagou catchment; Loess Plateau in west Shanxi Province

### 1 引言

黄土地貌从总体上看可划分为沟间地和沟谷地两大系统。在水力与重力侵蚀作用下, 坡面侵蚀沟的形成与发展、沟间地面积不断缩小(沟坡扩展)和坡面形态演化与侵蚀物质的迁移, 是黄土地区侵蚀地貌发育和演化的总趋势。在自然与人类活动影响下, 不论是流域地貌演化, 或是侵蚀产沙过程, 其研究对象均主要以沟间地与沟谷地的地貌形态演化特征、侵蚀与产沙量的动态变化为主要内容。

长期以来, 我国在黄土高原重点产沙区, 小、中、大流域

的水文特征进行了动态监测, 取得了大量的宝贵资料, 这些信息对于有关部门和广大科研人员研究土壤侵蚀规律, 以及为水土保持治理与决策和措施配置提供的重要科学依据。但由于以往研究手段的限制, 以地貌特征(包括以土地利用方式)变化的动态检测缺乏系统研究。以地貌形态特征、土地利用方式的变化的动态检测, 对于有关部门更加全面的认识地表剥蚀过程、人类活动的影响, 提供了水沙检测资料替代不了的作用, 是地表剥蚀过程研究的重要内容之一。随着航天遥感、GIS 地理信息系统分析软件技术的不断提高, 将三维动态的地貌、土地利用方式与土壤侵蚀的过程相结合是交叉

收稿日期: 2004-02-10

基金项目: 香港特区政府研究资助局支持项目(HKU 7017/01E); 国家基金委和黄河水利委员会重点基金项目(50239080); 地理所知识创新工程领域前沿项目(CX10G-A 00-05-02)

作者简介: 陈浩(1954-), 男, 西南农业大学客座教授, 主要从事土壤侵蚀的研究, 出版专(编)著三部, 发表论文 90 多篇。

学科的重要研究方向,地貌形态特征演化的监测也同传统的江河水文泥沙监测一样,已成为获取相关信息的重要手段。

本文根据晋西王家沟小流域 5 期航空相片,委托西安煤炭航测有限工程公司、山西省测绘局地理信息院制作正射影像图(DOM)和高程数字化模型(DEM),在此基础上,利用 GIS 地理信息系统分析软件,提取了相同地点 5 期地貌演化特征的监测信息,为有关方面的研究提供了基础数据。

2 研究区概况

选定位于黄土丘陵沟壑区的晋西离石县王家沟为研究区。王家沟为三川河支流北川河的一条支沟,流域面积 9.1 km<sup>2</sup>,年均降雨量 506.5 mm,沟谷地面积占 44%,沟间地面积占 56%。其地貌特征、土地利用状况、及人类活动的影响,在晋西黄土丘陵沟壑区有广泛的代表性。自 20 世纪 50 年代以来,一直是黄委会、山西省水土保持研究所的重点实验小流域,积累了丰富的资料。

本文在 GPS、RS、GIS 技术的支持下,采用航片、地形图资料分析相结合的研究方法。地貌特征信息由大比例尺航片、地形图上提取。采用 1959 年、1967 年、1981 年、1988 年、1999 年拍摄的五期航片作为地貌现代演化的基础数据。上述航测比例尺分别为 1:50 000、1:13 000、1:16 000、1:16 000 和 1:35 000。委托西安煤炭航测有限工程公司、陕西省测绘局地理信息院制作正射影像图(DOM)和高程数字化模型(DEM),数字化高程网格按 2 m×2 m 采集,控制点坐标包括航测控制点和实地 GPS 测量点,不足部分由国家测绘局 60 年代测绘出版 1:10 000 比例尺地形图上按地物不变点采集,成图比例尺分别为 1:10 000、1:4 000 和 1:5 000,制作精度达到国家技术规范的要求。王家沟流域地形图(1:5 000)由山西水土保持研究所测绘。航片、地形图在航测时段上基本保持一致。

3 地貌特征信息的监测

3.1 监测目的与意义

70 年代以来,Carson 等人以 Davis 的陆地隆起与剥蚀相继发生的系统,作为坡面形态研究的参照系,依据侵蚀力学的观点和物理学定理,研究与应用过程—响应模型阐述了地貌形态的演化规律<sup>[1]</sup>。近十几年来,随着计算机和航空遥感、地理信息系统软件技术(GIS)的发展,有关地貌特征、土地覆被变化对流域系统土壤侵蚀与产沙的研究广泛开展起来,Montgomery 等人利用高程数字化模型(DEM)分析了沟道网沟头源区的地貌演化特征及坡面、沟道、谷坡转换带的坡度临界,O'callaghan 等人开展了流域地貌三维数值模拟及地貌形态之间关系,以及与水文过程相关联的小流域二维模型研究。Rinado 等人 and Dodriguez 等人分别根据最小能耗原理和自组织临界概念开展了流域地貌演化动力学研

究<sup>[2~5]</sup>。

坡(沟间地)沟(沟谷地)侵蚀关系研究是我国黄土高原特有的问题,源于小流域泥沙来源研究,由于涉及水土保持措施配置,早在 50 年代就已引起了广泛关注,并展开了长期的治坡与治沟、工程与生物措施的讨论<sup>[6,7]</sup>。近年来,随着研究的进展,人们更加注重坡、沟侵蚀机理的研究<sup>[8~11]</sup>。但是,以往的研究多限于水沙关系的探讨。由于水沙资料来自典型流域观测横剖面,受客观条件的限制,所选定的野外观测断面不可能涵盖所有的地貌类型及坡沟空间各种不同的组合方式,径流观测场还受到边界条件的影响。模拟实验也仅限于微地貌的演化过程,存在模型与原型相似性的问题。目前,有关原型尺度的小流域坡、沟地貌侵蚀演化关系和地貌演化特征与水土流失关系的定量研究甚少。开展本项研究对于揭示坡、沟在地貌演化中的作用,以及地貌演化与土壤侵蚀的过程响应关系,进而确定沟道流域切割程度的空间差异、泥沙来源、应重点治理的地貌部位的研究提供有关数据信息,具有重要理论和实际意义。

3.2 监测内容与方法

流域下垫面的侵蚀地貌特征是长期以来自然因素与人类活动共同作用的结果,以地貌演化特征为监测对象,与坡地、沟道水文监测有所不同,地貌演化的检测除主要依靠航空相片、地形图提取有关信息外,还要根据航测比例尺的分辨率确定研究的对象与内容,例如,对于坡面上细沟、浅沟的监测目前主要在实地观测;大于 1:10 000 的航测比例尺较好反应切沟以上级别沟谷的三维动态变化,而小于 1:10 000~1:50 000 航测比例尺更侧重于冲沟以上级别沟谷宏观三维地貌特征和动态研究。

要进行流域沟谷三维地貌动态变化,就要首先确定沟缘线。黄土丘陵沟壑区的小流域坡沟分界以蒋德麒等人的定义划分<sup>[12]</sup>,以沟边线为界,其上为坡面,其下为沟谷。根据此定义,切沟、悬沟位于沟坡上,量计的下限沟谷长度为 270 m 的冲沟,上限沟谷长度为 1 300 m 的干沟。根据正射影像图(DOM)和高程数字化模型(DEM)目视解译,结合地形图等等高线的变化及地类分界线确定沟梁与沟谷分界边线(沟缘线)。

3.3 地貌演化特征值的信息采集

与某次暴雨洪水侵蚀产沙过程相比,宏观地貌演化过程一般时间尺度较长。所以,其特征值的提取,要取决研究的目的。例如,若研究的对象是地质时期以来地貌演化特征,就可根据某期航片和地形图进行提取。也就是说,流域坡沟地貌形态的空间分异是长期以来地表剥蚀的过程响应。

坡、沟地貌特征经矢量化转换利用 GIS 分析软件在计算机上提取,其 1967 年王家沟流域主要地貌特征见表 1,2。王家沟一级冲沟坡沟地貌在平面上的特征见图 1,图 1 中的 A<sub>p</sub>、A<sub>g</sub> 分别代表沟间地面积河沟谷地面积。

表 1 一级沟道小流域主要地貌特征

名称		开裂度/%	沟谷密度 /(km · km <sup>-2</sup> )	沟谷长度/m	汇水面积			比降(100%)		
					沟间地/km <sup>2</sup>	沟谷地/km <sup>2</sup>	全流域/km <sup>2</sup>	坡面	沟坡	沟床
王家沟	最小	9.88	0.43	270.0	0.019	0.008	0.041	0.227	0.56	0.107
	平均	39.71	5.08	537.2	0.084	0.047	0.132	0.422	0.851	0.213
	最大	70.59	8.88	1300.0	0.551	0.178	0.649	1.079	1.736	0.328

注:沟床的坡度是指分水岭沟头至沟口的水道坡度。

若研究对象是现代地形变化,这些地形变化包括近几十年来,二维平面(沟缘线、沟头前进、沟坡扩展等)、三维空间(沟头下切深度、淤积坝拦沙造成的侵蚀基准面抬升)变化,

地貌演化特征值信息则要以几期航片的 DEM 并结合 DOM 为提取对象。王家沟各级沟道流域汇水面积及水系平面特征见图 2。

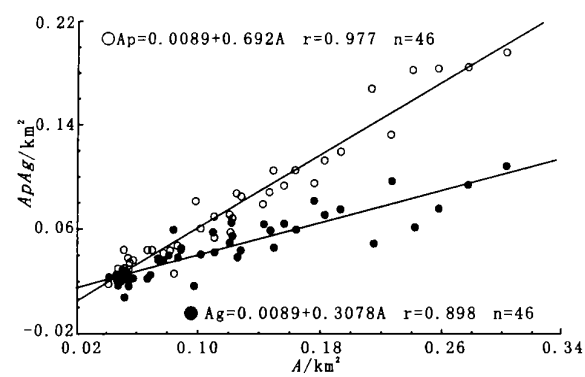


图 1 王家沟冲沟小流域坡、沟侵蚀地貌特征



图 2 王家沟各级沟道流域与水系

表 3 王家沟流域 27 年来沟谷演化 (沟谷扩展) 量			
年代	1959	1967	1986
沟谷面积/km <sup>2</sup>	4 002	4 023	4 038
演化量/km <sup>2</sup>		0 021	0 015
年输沙模数/(t·km <sup>-2</sup> )	9661 08	7394 58	6468 8
年径流深/mm	21. 58	18 69	15 34

由于 27 年来年降雨量逐渐减小, 水土保持治理程度不断增加, 王家沟流域沟谷演化量、径流深、输沙模数呈递减的趋势(表 3)。

根据 27 年来 3 个时段, 沟谷切割演化量( $Y/\text{km}^2$ )、年均输沙模数( $S \cdot \text{t}/\text{km}^2$ )、年均径流深( $H/\text{mm}$ )变化的过程响

参考文献:

[1] M A, 柯克拜, M J. 坡面形态与形成过程[M]. 窦葆璋译. 北京: 科学出版社, 1984

[2] D R Montgomery, A F Georgiou. Channel network source representation using digital elevation models[J]. Water Resources Research, 1993, 29(12): 3925- 3934

[3] J O'callaghan, D M Mark. The extraction of drainage networks from digital elevation data[J]. Comput Vision Graphics Image Process, 1984, 28: 323- 344

[4] A Rinaldo, I Rodriguez-Iturbe, R Rigon, et al. Minimum energy and fractal structures of drainage networks[J]. Water Resource Res, 1992, 28: 2183- 2195

[5] Ignacio Rodriguez-Iturbe, Marco Marni. Self-organize river basin landscapes: fractal and multifractal characteristics[J]. Water Resource Res, 1994, 30(12): 3531- 3539

[6] 蒋德麒, 等. 黄河中游小流域泥沙来源初步分析[J]. 地理学报, 1966, (1): 20- 35

[7] 曾伯庆. 晋西黄土丘陵沟壑区水土流失规律与治理效益[J]. 人民黄河, 1980, (2): 35- 40

[8] 焦菊英, 等. 小流域沟间与沟谷地径流与泥沙来量的探讨[J]. 水土保持学报, 1992, (2): 36- 42

[9] 陈浩, 等. 流域坡面与沟道的侵蚀产沙研究[M]. 北京: 气象出版社, 1992

[10] 蔡强国, 等. 黄土高原小流域侵蚀产沙过程与模拟[M]. 北京: 科学出版社, 1998

[11] 雷阿林, 唐克丽. 坡沟系统土壤侵蚀回顾与展望[J]. 水土保持通报, 1997, 17(3): 37- 43

[12] A N Strahler. Quantitative geomorphology of drainage basins and channel network[A]. Chow, V T (ed). Hand Book of Applied Hydrology[M]. New York: McGraw-Hill Inc, 1964

名称		汇水面积			比降(100%)	
		开裂度/%	沟间地 /km <sup>2</sup>	沟谷地 /km <sup>2</sup>	全流域 /km <sup>2</sup>	坡面 沟坡
王家沟	最小	38 23	0 162	0 156	0 317	0 414 0 409
	平均	46 12	0 447	0 355	0 802	0 415 0 627
	最大	58 35	0 909	0 645	1 554	0 516 0 86

根据目前所采集的王家沟 1959~ 1986 年 3 期航片数字化结果分析, 27 年来王家沟沟谷面积增加占流域面积的 7%, 达 0 637 km<sup>2</sup>, 平均每年增加 0 020 93 km<sup>2</sup>。王家沟整个流域的沟谷面积从 1959 年的 46% 增至 1986 年的 53%。

应模型:

$$Y= 51. 84S^{-0. 015}H^{-0. 0079} \quad r= 0. 999$$

4 结 论

与水文监测一样, 随着航空遥感、GIS 技术的发展与应用, 地貌演化特征的监测已成为环境质量监测的重要内容。本文根据 5 期晋西王家沟小流域(从 1959~ 1999 年)较大比尺航片, 在高程数字化模型(DEM)、正射影像图(DOM)制作的基础上, 辅助地形图资料, 开展了 40 年来, 以地貌特征、土地利用方式、并结合小流域水沙变化为目标的动态检测, 为进一步研究地貌演化、地表剥蚀过程提供了基础信息。