

# 在降雨侵蚀中黄土地面坡度变化的高分辨研究

王 春<sup>1</sup>, 汤国安<sup>1</sup>, 张 婷<sup>1</sup>, 李占斌<sup>2</sup>, 王 雷<sup>3</sup>, 吴良超<sup>3</sup>

(1. 南京师范大学地理信息科学江苏省重点实验室, 江苏 南京 210097; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨陵 712100;  
3. 西北大学城市与资源学系, 陕西 西安 710069)

**摘 要:** 运用近景数字摄影测量方法, 获得在不同人工降雨时段黄土模拟小流域高精度、高分辨率的 DEM 数据, 并以地面坡度及其组合形态的变化为切入点, 通过对比分析和理论验证, 探讨黄土小流域降雨侵蚀过程中地面坡度变化特征, 在更宏观空间尺度和高分辨的时间尺度上, 揭示黄土地貌形成与发育特征。研究结果表明: 1) 在较好地维持黄土的土壤结构与抗蚀特征, 较真实地模拟自然降雨的条件下, 模拟流域地面的变化能很好地反映自然地面的发育进程。2) 在降雨侵蚀过程中, 黄土小流域地面坡度呈现持续性变化规律, 平均坡度在地貌发育幼年期呈加速增长趋势, 到了壮年期增长幅度呈递减性变化; 坡度组合以侵蚀临界角度为轴点呈持续逆转变化, 侵蚀临界坡度单元所占面积基本保持稳定。3) 黄土地面坡度的变化, 一方面受地表物质被侵蚀和迁移程度的影响, 另一方面, 也是沟间地、沟坡地和沟底地空间面积重新分配的结果。

**关键词:** 黄土; 侵蚀; 小流域; 坡度; DEM

**中图分类号:** P283. 1

**文献标识码:** A

中国黄土高原由于其在这个世界上独有的地理景观特征, 以及强烈的土壤侵蚀给该地区自然环境、经济和社会带来了极大危害, 多年来备受国内外地学界, 特别是我国地学工作者的关注, 应用数理统计、相关分析、物理过程模拟、形态特征分析等定量方法, 对其成因与特点进行广泛、深入的研究。包括确定了黄土地貌的成因并对黄土地貌的成因类型进行了科学划分, 提出了以塬、梁、峁为基本地貌单元特征的黄土地貌类型划分系统与空间分异格局, 利用遥感方法对黄土高原资源环境状况及三北防护林状况进行了大规模的调查与系列制图, 利用地学信息图谱的研究方法研究黄土高原基本地貌单元, 以及以水土流失监测及水土保持为目的, 对该地区土壤侵蚀规律及其侵蚀地貌的进行深入研究, 等等, 都取得了可喜的研究成果。但是, 总体来讲, 目前研究的着眼点还是集中在黄土的成因、集中在黄土的微观物质特性、集中在基于黄土的古地

理环境的恢复、集中在黄土的土壤学特征与土壤侵蚀特征。虽然陆中臣等曾对黄土高原沟壑的演化规律进行了相关的探讨<sup>[1, 2]</sup>, 但总体而言对黄土地貌在宏观尺度和时间尺度的空间分异规律的深入研究, 是明显缺乏的。因此, 以高精度的 DEM 为信息源, 利用现代 GIS 技术与地学定量分析模拟技术, 既定性又定量地, 在更宏观空间尺度和高分辨的时间尺度上, 揭示黄土地貌形成与发育的外在条件与内在机理, 科学有效地模拟地表过程的发育与演化模式, 对黄土高原的深入研究具有重要的现实意义。

黄土地貌的发育具有复杂性和演化的长期性, 一个研究者的个人时间与流域地貌演化的时间相比非常短暂, 通常不可能亲自目睹某一地貌演化的全过程。因此, 仅以径流小区或小流域为基础, 采用野外定时监测、遥感监测、摄影测量、以及外业地貌调查等手段时, 客观自然地貌是它们的唯一的信

收稿日期 (Received date): 2005- 02- 03; 改回日期 (Accepted): 2005- 05- 08。

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金资助项目 (40271089), 教育部科研基金重点项目 (01111) [National Nature Science Foundation of China, No. 40271089; China Education Ministry Science and Technique Key Research Project, No. 0111]

作者简介 (Biography): 王春 (1975- ), 男, 宁夏固原人, 地图学与地理信息系统专业博士研究生, 主要从事地理空间数据不确定性及 DEM 数字地形分析研究。E-mail: wchun2866@sina.com。 [Wang Chun (1975- ), Male, Born in Guyuan, Ningxia, China, Doctor student of Nanjing Normal University, Research fields mainly covering the spatial data uncertainty and digital terrain analysis base on DEM, E-mail: wchun2866@sina.com]

息源，地貌的发育主要依靠自然演化，在时间尺度上，很难满足研究的需要。流域地貌模拟试验虽然和实际地貌发育存在出入，但该方法能抓住主要影响因素，忽略次要因素，在较短的时间内复演某一地貌的发育过程、发育趋势，从而有效弥补时间和空间尺度的不足，备受地学研究者青睐。国外在本世纪中叶就已开始这方面研究，取得了很有应用价值的成果<sup>[3-5]</sup>。相比而言，我国在这方面的研究起步较晚，约开始于上世纪 60 年代，主要利用人工模拟降雨研究雨滴特性、坡面溅蚀、片蚀和细沟侵蚀规律。1990 年代以来，模拟试验得到较快发展。石辉通过室内小流域模拟实验研究流域侵蚀产沙过程、产沙部位及小流域泥沙来源<sup>[6]</sup>；蒋定生等利用建立的小流域正态整体模型，研究了小流域水沙调控规律及不同水保措施下的减水减沙效益<sup>[7]</sup>；雷阿林对模拟降雨条件下坡沟侵蚀链的形成过程、物理能量迁移转化过程等作了深入研究<sup>[8]</sup>；金德生基于地貌演化类比性法则及系统论模型原理建立了流域地貌过程响应模型<sup>[9]</sup>。研究证明，流域地貌模拟试验在其建立过程中只要充分分析、吸收和借鉴前人研究相关成果，并综合考虑主要影响因子特征和现有室内模拟试验条件等多方面因素，尽可能克服了其几何、运动和动力相似性不统一现象，试验结果与实际地貌具有极大的相似性和可用性。

因子分析法是进行地貌形态定量化研究的主要手段。坡度因子是描述坡面空间形态的主要因子，也是水土侵蚀中最为重要地形因子之一，在影响水

土流失的诸地形因素之中，坡度起着决定性和控制性作用，地面坡度的大小，直接制约着地貌形态、地表径流及土壤侵蚀的形成和发展，影响着土壤的演化、植被的立地条件与土地质量。汤国安等研究结果显示，黄土地貌地面坡度及其组合形态能有效反映黄土地貌空间分异规律，一定的坡度组合形态对应着一定的地貌类型、映射着形成该种地貌类型的物质组成、地面侵蚀特征和地貌发育阶段<sup>[10-13]</sup>。直观的假设是，在黄土坡面被侵蚀，逐步发育成沟壑交错的黄土流域地貌的时序中，特定的发育阶段应对应着特定的坡度组合形态。因此，本文以运用近景数字摄影测量方法，获得在不同人工降雨时段黄土模拟小流域高精度、高分辨率的 DEM 数据，并以地面坡度及其组合形态的变化为切入点，通过对比分析和理论验证，探讨黄土小流域降雨侵蚀过程中地面坡度变化特征，在更宏观空间尺度和高分辨的时间尺度上，揭示黄土地貌形成与发育的外在条件与内在机理。

1 试验条件和过程概述

模拟试验是在黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室的模拟降雨侵蚀试验大厅下喷式雨区完成的。试验从 2001- 02 月中旬开始，于 2001- 12 月中旬结束，历时 10 个月。模拟小流域是在对黄土高原典型小流域特征进行宏观统计分析基础上，对其进行抽象和概化，依据过程相似原理设计<sup>[14]</sup>。主要几何形态特征指标见表 1。

表 1 模拟小流域几何形态特征指标 (据崔灵周, 2002)

Table 1 Geometrical modal parameter of test watershed

投影面积 (m <sup>2</sup> )	流域长度 (m)	流域最大宽度 (m)	流域周长 (m)	流域高差 (m)	流域纵比降 (%)	平均坡度 (°)	沟网级别	沟网分支比
31.49	9.1	5.8	23.3	2.57	28.24	15	2 级	4

试验供试土壤为陕西杨陵附近的黑 土。填土采用以 5 cm 为单位水平分层填土并夯实一次，在填入下一层土时，用分齿耙将上一次填土的夯实面耙松，然后填入新土再夯实，以确保相邻两层接合紧密。填土容重控制为 1.39 g/cm<sup>3</sup>。完成第一次填土后进行了 4 场降雨预备试验。通过预备试验，肯定了第一次填土的有效性，同时对模拟小流域地貌微形态做了雕刻改进，使其形成与黄土高原丘陵区小流域相似的沟网。在此基础上，进行了第二次流域模型填土并开始正式试验。模拟试验和正式试

验的雨强、历时和降雨场次的安排，主要根据黄土性质和黄土高原降雨侵蚀规律确定。

近景摄影测量在正式试验阶段进行，相邻两次拍摄间隔时间为一个星期左右，降雨为 2~ 5 场，共拍摄 9 次。工作程序主要有控制测量（基准点测量、像控点测量）、低空近景摄影测量。控制测量中基准点 3 个，是建立独立坐标系和完成像控点测量的基础，建有专用仪器墩，并在其上安置了强制归心装置，保证整个试验过程中基准点的稳定性。像控点 18 个，模型边缘的水泥护栏上按 2 m 间隔

设置 12 个, 模拟小流域内山脊处设置 6 个, 以保证每个像对不少于 6 个像控点。控制测量采用 2' 级高精度电子经纬仪完成。低空近景摄影测量是在模型周围搭起 10 m×7 m×9 m 的低空摄影架上方, 用钢管搭建临时摄影专用轨道, 采用 SMK-120 立体摄影测量仪正直拍摄, 完成像对处理后, 使用 JX4 全数字摄影测量工作站完成模型的数据采集工作, 构成不规则三角网, 再内插生成 GRID 格式的 DEM 数据。DEM 数据主要技术指标为: 比例尺 1: 20, DEM 格网大小为 10 mm, 高程中误差 ≤2 mm。

## 2 地貌形态发育过程再现

在 ARCGIS 8.3 软件平台上, 基于前期制作的 DEM 数据, 生成模拟小流域不同发育时期地貌形态的空间立体模型。这些影像清晰地再现了模拟小流域在降雨作用下, 由初始的缓坡状态, 发育为地形破碎、沟壑纵横的侵蚀地貌景观渐进的演化过程。根据 W. M. Davis 等人地形发育阶段定量划分理论: 面积高程积分值 > 60% 时为幼年期地形, 60% > 面积高程积分值 > 35% 时为壮年期地形, 面积高程积分值 < 35% 时为晚年期地形。根据该模拟小流域的面积高程积分值 (表 2), 该模拟小流域地形为幼年期地形 (1~ 4 期) 到壮年期地形 (5~ 9 期) 过渡型地形, 侵蚀变化较剧烈。主沟和各级支沟的沟头溯源后退、沟长增加、沟壁横向扩展、河谷变宽、河床下切和沟谷深度增加。主沟和各级支沟发育的空间形态存在较大差别且局部变化非常复

杂和极不规则, 主要表现为沟缘线的空间形态由初期的多小弯曲不规则曲线, 甚至支沟上部尚未形成明显的陡坎状沟沿, 逐渐发育成较为光滑的曲线形态。沟底线基本上呈现出围绕发育相对稳定期 (第 8、9 期) 沟底线的位置左右摆动变化, 由不稳定逐步趋于稳定。

## 3 地面坡度提取及结果分析

以前期完成 GRID 格式 DEM 数据为基础, 在 ARCGIS 8.3 软件平台上提取模拟小流域的坡度信息 (图 1)。这些影像清晰反映了黄土降雨侵蚀中地面坡度空间变化特征。

### 3.1 平均坡度变异规律

计算其坡度平均值 (图 2) 和相邻两期坡度平均值变化幅度 (图 3, 横坐标 j-i 表示用第 j 期的平均坡度值减去第 i 期的平均坡度值, 如 2-1 表示用第 2 期的平均坡度值减去第 1 期的平均坡度值)。

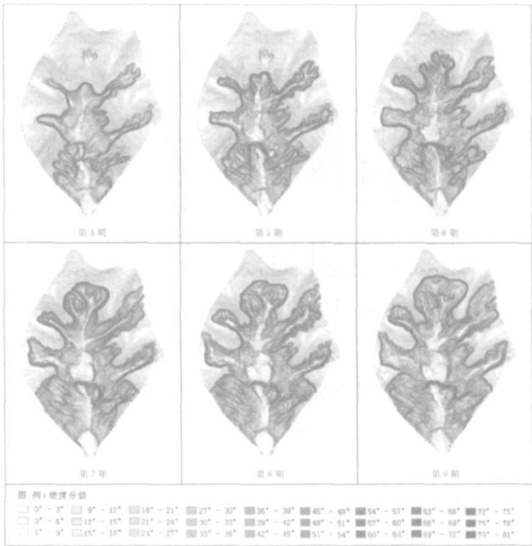
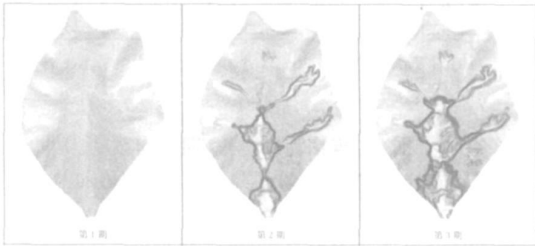


图 1 模拟小流域地面坡度图

Fig. 1 The slope at nine test watersheds

表 2 模拟试验过程中流域高程积分值统计表

Table 3 Altitude integral value of simulate watershed in examinalional process

期数	高程积分值 (%)
1	63.967
2	63.199
3	62.794
4	61.218
5	59.387
6	59.022
7	57.232
8	56.648
9	55.580

从图 2、图 3 可以看出, 模拟流域平均坡度的变化总体趋势为, 地貌发育幼年期 (第 1~5 期), 平均坡度呈加速增长趋势, 到了壮年期 (第 6~9 期), 平均坡度增加趋势呈递减性变化, 到第 9 期甚至出现负增长。在这个总体趋势中, 第 2 期和第 6 期的平均坡度变化出现很大异常, 第 2 期平均坡度值急剧增加, 第 6 期却出现反常的微弱增加。结合表 2 分析可以发现, 平均坡度的变化和降雨侵蚀中雨强、降雨历时, 以及总降雨量存在密切的相关关系。初步研究显示, 这种相关关系是复杂的非线性耦合关系, 有待进一步深入研究。

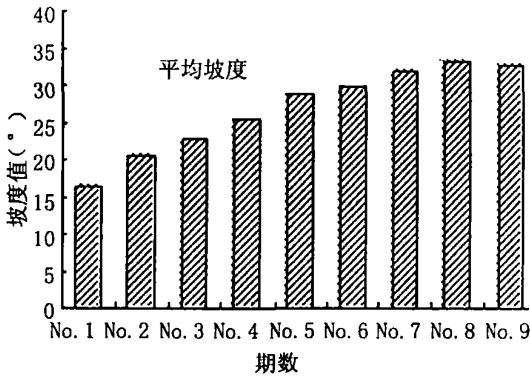


图 2 模拟流域 1~9 期平均坡度

Fig. 2 The mean-slope at nine test watersheds

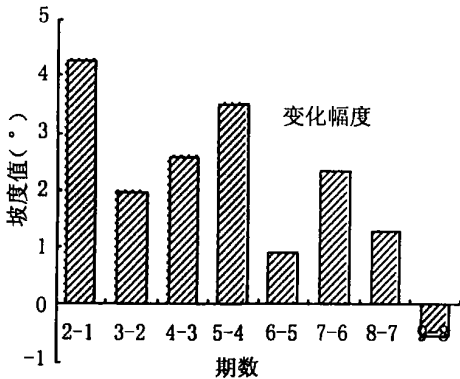


图 3 模拟流域 1~9 期平均坡度变化

Fig. 3 Variation of mean-slope at nine test watersheds

### 3.2 坡度组合形态变异规律

按  $3^\circ$  等间距分级提取各期的坡度组合图 (图 4)。坡度组合指以该模拟试验的模拟小流域为统计区, 以地面坡度为自变量, 其对应的地面面积占样区总面积的百分值为因变量所构建的统计图表或模

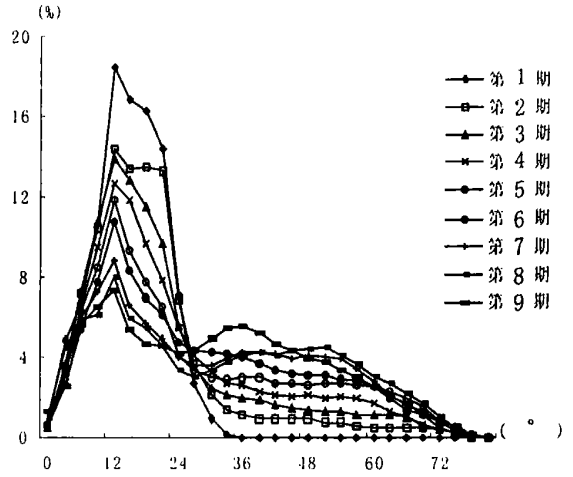


图 4 模拟流域 1~9 期坡度组合

Fig. 4 Slope spectrum from nine test watersheds

型。可以清楚看出, 模拟小流域地面坡度组合以  $27^\circ$  为轴点呈持续的逆转变化的规律。究其原因, 主要是由于该模拟小流域为幼年期地形到壮年期地形过渡型地形, 地貌发育中主要以面蚀、沟头溯源侵蚀为主, 中间伴随少量重力侵蚀 (沟坡地部位) 和堆积 (沟道中)。发育初期主要是整个坡面的薄层水流侵蚀, 中间较低部位被随机下切, 小坡度区域所占比例不规则迅速下降, 变化较紊乱, 大坡度区域所占比例整体增大; 发育活跃期, 沟头溯源侵蚀加快, 沟沿线迅速后退, 沟间地范围减少, 沟道迅速下切。小坡度区域所占比例逐步较均匀下降, 大坡度区域所占比例缓慢增大, 逐渐出现峰值; 发育稳定期, 流域侵蚀仍以沟头溯源侵蚀为主, 但沟沿线后退速度逐渐减缓, 沟坡地部位出现重力侵蚀, 沟道被缓慢下切, 且出现局部堆积。小坡度区域所占比例下降缓慢, 大坡度区域所占比例迅速增大, 峰值明显且开始向小坡度方向偏移。

分析各期的地面坡度空间分布图发现, 坡度在  $27^\circ$  左右 ( $27^\circ \pm 3^\circ$ ) 的坡面单元基本沿沟缘线和坡脚线分布, 并且  $> 27^\circ$  的坡面单元基本均分布在沟坡地部位。靳长兴等研究显示, 在以面蚀为主的黄土地貌发育过程中, 侵蚀临界坡度大概在  $20^\circ \sim 30^\circ$  左右<sup>[19]</sup>。由此可以初步判定, 模拟流域地面坡度组合基本以坡面侵蚀临界坡度为轴点做逆转变化的。但这究竟是巧合, 还是规律所在, 还有待于更多的试验数据或实际观测资料的进一步检验。可以肯定的一点是, 模拟流域地面坡度组合的这种变异特征, 正是黄土土壤性质及其降雨侵蚀特征的反映。

### 3.3 不同地貌部位坡度变异规律

以近景摄影所得的影像和 DEM 数据为基础, 提取模拟小流域沟间地、沟坡地和沟底地范围。在此基础上, 获取沟间地、沟坡地和沟底地的投影面积信息和地面坡度信息。研究发现, 黄土在降雨侵蚀过程中, 虽然沟间地与沟坡地面积持续减少, 沟底地面积基本保持稳定 (图 5)。但是对于沟间地、沟坡地和沟底地, 无论是平均坡度, 还是坡度组合形态, 都保持大体稳定状态 (图 6)。沟间地和沟底地坡度组合具有明显的负偏态, 基本以缓坡面单元为主。反之, 沟坡地坡度组合略显正偏态, 坡面单元主要以陡坡为主。如果以沟间地、沟坡地和沟底地它们面积, 所占流域总面积的面积百分比为权重, 则整流域的平均坡度、坡度组合, 均是沟间地、沟坡地和沟底地的平均坡度, 以及坡度组合的加权值之和。地面坡度的这种变异特征表明, 在降雨侵蚀过程中, 黄土地面坡度的变化, 一方面是地

表物质被侵蚀和迁移的结果; 另一方面, 也是沟间地、沟坡地和沟底地空间面积, 以及地表可侵蚀物在沟间地、沟坡地和沟底地重新分配的结果, 但这种分配并不改变它们自身宏观地貌特征。



图 5 模拟流域不同地貌部位投影面积比

Fig. 5 Horizontal area percent of the different part from nine test watersheds

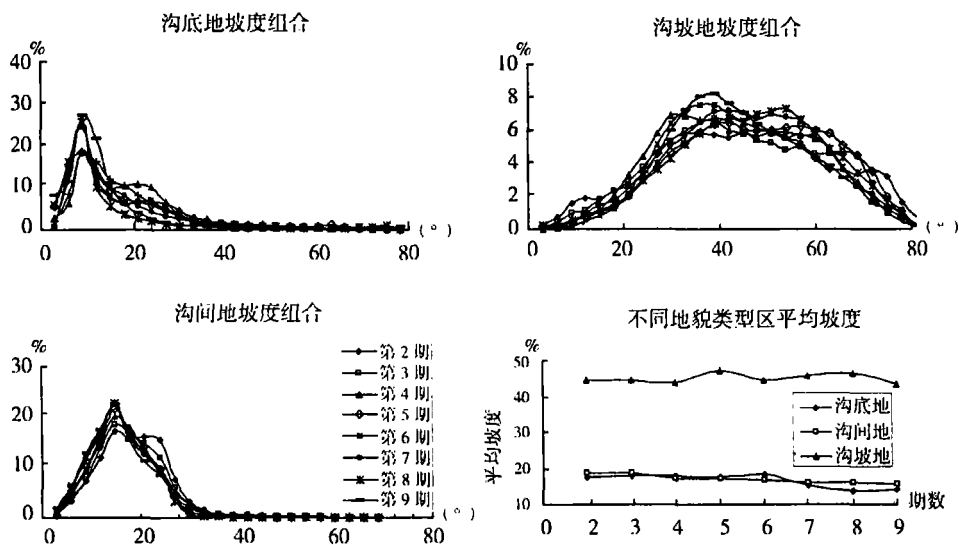


图 6 模拟流域不同地貌部位地面坡度组合和平均坡度

Fig. 6 Comparison of slope frequency and mean slope about the different part of nine watersheds

## 4 结论与讨论

1. 在较好地维持黄土的土壤结构与抗蚀特征, 较真实地模拟自然降雨的条件下, 模拟流域地面的变化能很好地反映自然地面的发育进程。数字摄影测量和 GIS 技术结合, 可以快速、准确的获取土壤侵蚀形态肢体、局部, 甚至细部的空间动态变化特征数据, 提供研究所需的较为全面的信息源, 并

可以以三维模型再现小流域模型发育不同过程的空间形态, 同时可以进行多种相关的空间分析和计算, 从而进一步拓展和完善了土壤侵蚀模拟实验的观测和分析手段。这种方法也可以延伸应用于野外的实地相关研究工作中。

2. 在降雨侵蚀过程中, 黄土小流域平均坡度在地貌发育幼年期呈加速增长趋势, 到了壮年期增长幅度呈递减性变化。坡度组合以侵蚀临界角度为轴点呈持续逆转变化的, 在发育初期和中期, 以侵蚀

临界坡度为中心,小坡度地区面积逐渐减少,大坡度地区面积缓慢增大;到了发育稳定期,小坡度地区面积逐渐趋于稳定,大坡度面积出现波状起伏且向侵蚀临界坡度靠拢趋势。侵蚀临界坡度单元所占面积基本保持稳定。

3. 地面坡度的变化,一方面受地表物质被侵蚀和迁移程度的影响,另一方面,也是沟间地、沟坡地和沟底地空间面积重新分配的结果。本次研究所采用的数据为实验室模拟试验数据,试验结果能否充分代表实际黄土地貌在降雨侵蚀规律,有待于进一步实践检验。有一点可以肯定,该模拟实验在其建立过程中充分分析、吸收和借鉴了前人研究相关成果,并综合考虑了流域侵蚀产沙过程、主要影响因子特征和现有室内模拟试验条件等多方面因素,尽可能克服了其几何、运动和动力相似性不统一现象,试验结果与实际地貌发育具有极大的相似性和可用性。

## 参考文献 (References):

- [1] Lu Zhongchen, Jia Shaofeng, Huang kexin, *et al.* Drainage Landform System [M]. Dalian: Dalian Press, 1991. 32~ 41. [陆中臣, 贾绍凤, 黄克新, 等. 流域地貌系统 [M]. 大连: 大连出版社, 1991. 32~ 41]
- [2] Liu Dongsheng, Sun Jinin, Wu Wenxiang. Past, present and future of the Chinese Loess Research. *Quaternary Sciences*. 2001, 21, 3, 185~ 207. [刘东生, 孙继敏, 吴文祥, 中国黄土研究的历史、现状和未来 [J]. 第四纪研究, 2001, 21 (3): 185 ~ 207]
- [3] Schumm S A. The Role of Creep and Rainwash on the Retreat of Badland Slope [J]. *Amer. Jour. Sci.* 1956, 254: 693~ 706
- [4] Smart, S. The random model in fluvial geomorphology M. Morisawaed Publication [J]. In: Geomorphology, State Univ. of New York Binghamton. 1973.
- [5] Veneziano. D. and J. D Niemann. Self-similarity and multifractality of topography surface at basin and subbasin scale [J]. *J. Geophys. Res.* 1999, 104, 12: 797~ 812
- [6] Shi Hui, Tian Junliang, Liu puling. Study on relationship of slope-gully erosion in a small watershed by simulation experiment [J]. *Journal of soil Erosion and Water Conservation*. 1997, 3. (1): 30 ~ 42. [石辉, 田均良, 刘普灵, 小流域坡沟侵蚀关系的模拟试验研究 [J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1997, 3 (1), 30 ~ 42]
- [7] Jiang Dingsheng, Zhou Qing, Fan Xingke, *et al.* Simulated experiment on Normal Integral Model of water regulating and sediment controlling for small watershed [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1994, 8, (2): 25~ 30. [蒋定生, 周清, 范兴科等, 小流域水沙调控正态整体模型模拟试验 [J], 水土保持学报, 1994, 8 (2), 25~ 30]
- [8] Lei Alin. An experimental study on soil erosion chain of ridge hill-gully slope system [D]. Yang ling: State Key Laboratory of Soil Erosion and Dry Land Farming on Loess Plateau Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science and Ministry of Water Resources, 1996. [雷阿林, 坡沟系统土壤侵蚀链模拟试验研究 [D]. 学位论文. 杨陵: 中国科学院水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 1996]
- [9] Jin Desheng, Chen Hao, Guo Qingwu. An experimental study on influence of material component to non-linear relation between sediment yield and drainage network development [J]. *Acta Geographica Sinica*. 2000, 55, (4): 339~ 448. [金德生, 陈浩, 郭庆伍. 流域物质与水系及产沙间非线性关系实验研究 [J], 地理学报, 2000, 55 (4), 339~ 448]
- [10] Tanfg Guoan, Zhao Mudan, LI Tianwen, *et al.* Modeling slope uncertainty derived from DEMs in Loess Plateau [J]. *Acta Geographica Sinica*. 2003, 58, (6): 824~ 830. [汤国安, 赵牡丹, 李天文, 等. DEM 提取黄土高原地面坡度的不确定性 [J]. 地理学报, 2003, 58 (6): 824~ 830]
- [11] Zhao Mudan, Tanfg Guoan, Chen Zhnejiang, *et al.* Slope classification systems and their aspectrum in hill and gully area of the Loess Plateau. *Bulletin of Soil and Water Conservation*. 2002, 22, (4): 33~ 36 [赵牡丹, 汤国安, 陈正江, 等. 黄土丘陵沟壑区不同坡度分级系统及地面坡谱对比 [J]. 水土保持通报, 2002, 22 (4), 33~ 36]
- [12] Carter. J. The effect of data precision on the calculation of slope and aspect using gridded DEMs [J]. *Cartographica*, 1992, 29, (1): 22~ 34
- [13] Zhang Yong. A research on slope spectrum of the Loess Plateau [D]. Master's Dissertation. Northwest University, Xi'an. 2003, 43~ 74. [张勇, 黄土高原地面坡谱研究 [D]. 学位论文. 西安: 西北大学, 2003. 43~ 74]
- [14] Cui lingzhou. The coupling relationship between the sediment yield from rainfall erosion and the topographic feature of the Watershed [D]. Doctoral Dissertation. Northwest Science and Technology university of Agriculture and Forestry, Yang ling, 2002, 29~ 45. [崔灵周, 流域降雨侵蚀产沙与地貌形态特征耦合关系研究 [D]. 学位论文. 杨凌: 西北农林科技大学, 2002. 29~ 45]
- [15] Hu shixiong, Jin Changxing. Theoretical analysis and experimental study on the critical slope of erosion [J]. *Acta Geographica Sinica*. 1997, 54, (4): 347~ 356. [胡世雄, 靳长兴, 坡面土壤侵蚀临界坡度问题的理论与实验研究 [J]. 地理学报, 1999, 54 (4), 347~ 356]

# The Study with High Precision and High Resolution of Spatial Variation of Slope at Small Loess Watershed with the Erosion of Rainfall

WANG Chun<sup>1</sup>, TANG Guoan<sup>1</sup>, ZHANG Ting<sup>1</sup>, LI Zhanbin<sup>2</sup>, WANG Lei<sup>3</sup>, WU Liangchao<sup>3</sup>

(1. Jiangsu Provincial Key Laboratory of Geoinformatics, Nanjing Normal University, Nanjing, Jiangsu 210097, China;

2. Institute of Soil and water Conservation, Chinese Academy of Science and Ministry of Water

Resource, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Department of Urban and Resource Science,

Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710069, China)

**Abstract:** As a key process of surface erosion, the formation of a drainage basin is the results of long-time reciprocity of different factors affecting the surface erosion. It has been a significant task to depict precisely the processes and features of physiognomy development at regional scale. This research probes into the temporal-spatial process of drainage development of Loess Plateau on the basis of a carefully designed experiment. In the experiment, the development of a simulated loess watershed is tested under the condition of manual rainfall. The typical drainage features of Loess Plateau are abstracted and generalized in the process. Through 25 times stimulating rainfall of different intensity and epochs, the drainage has turn from the infinitive smooth shallow watershed into a rough and fragmented terrain. A close-range photogrammetry survey is employed in this experiment, per which a series of high precision and resolution DEM of the drainage is established, which could be applied in investigating the dynamic development features of the drainage. In addition, the mean slope and slope composition of the whole and part of drainage basin are extracted and analyzed. Furthermore, the loess physiognomy form and its development features are discovered in a more macro spatial scale and higher precise temporal scale.

1) The stimulation result can effectively reflect the truth if those experimental conditions, i. e. loess soil structure, stimulated rainfall, is adjusted in accord with the true situation; 2) The slope of loess drainage varies all through the rainfall erosion process. Regarding the drainage basin at primitive experiment stage to be the infancy period of relief development, an accelerated increasing of the mean slope is presented. While in the adulthood, the increasing range is descending. The durative variances of slope combinations turn suddenly different at the erosion critical angle with the corresponding areas of erosion critical slope basically stable. 3) The variances of slope in Loess areas are influenced by the degree of erosion and deposition of loess soil. On the other hand, the composition of different terrain type area contributes a lot to the variation of slope spectrum as well.

**Key words:** Loess; erosion; drainage; slope; DEM