

# 基于 DEM 的黄土坡面流水侵蚀潜能因子初步研究

刘仁杰<sup>1</sup>, 朱红春<sup>1,2</sup>, 汤国安<sup>1</sup>, 谢轶群<sup>1</sup>, 曾瑞安<sup>1</sup>

(1. 南京师范大学地理科学学院, 江苏南京 210046; 2. 山东科技大学测绘科学与工程学院, 山东青岛 266590)

**摘要:** 坡面径流对地表的侵蚀, 本质上是由于流水重力势能累积作用的结果。从坡面流水的能量累积角度, 提出了一种反映原始坡面侵蚀动力的流水侵蚀潜能因子的基本概念及其计算原理; 设计了基于高精度数字高程模型 (DEM) 的流水侵蚀潜能因子的计算方法, 完成了多期模拟小流域的流水侵蚀潜能因子的计算, 并基于该因子获取了相应的侵蚀动力点结果; 分析了侵蚀动力点的空间分布特征, 并以此为依据, 初步讨论了地形的演化规律。结果表明, 运用坡面流水侵蚀潜能因子进行坡面侵蚀强度及其演化规律的研究, 具有重要的理论意义和实际的应用价值。

**关键词:** 坡面侵蚀; 流水潜能因子; 数字高程模型; 流域地貌

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2012)05-0161-05

中图分类号: TP343

## A Study of Potential Factor for Water Erosion on Loess Hillslope Based on DEMs

LIU Ren-jie<sup>1</sup>, ZHU Hong-chun<sup>1,2</sup>, TANG Guo-an<sup>1</sup>, XIE Yi-qun<sup>1</sup>, ZENG Rui-an<sup>1</sup>

(1. School of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing, Jiangsu 210046, China;

2. Geomatics College, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266510, China)

**Abstract:** The earth's surface erosion by runoff is essentially a result from gravitational potential energy of running water. Started with energy accumulation of slope running water, basic concepts and computational principles of the potential factor for running water erosion reflecting erosive power of original slope were presented. Algorithm of the computation for the potential factor was designed based on the high precision DEM, computation of the potential factor was completed for a simulated multiphase watershed, and the result corresponding to erodent power points was acquired based on the potential factor. The spatial distribution characteristics of erosive power points were analyzed and then, some preliminary discussions on the evolution of topography were made. Results showed that the research on slope erosion degree and its evolution in use of the potential factor is of theoretical significance and practical value.

**Keywords:** hillslope erosion; potential factor for running water; digital elevation model; watershed geomorphology

在侵蚀地貌的发育与演化过程中, 侵蚀差异性不同地貌形成的主要因素, 而坡面流水则是坡面主要的侵蚀动力, 尤其是在我国的黄土高原地区, 坡面流水产生的侵蚀作用, 形成了特有的黄土坡面景观和沟谷地貌<sup>[1-2]</sup>。

近年来, 数字高程模型 (DEM) 及其空间分析方法在坡面侵蚀研究中得到了广泛的应用<sup>[3-10]</sup>, 然而, 这些模型中的坡度坡长 (LS) 因子虽然能动态地反映土壤侵蚀过程, 但该因子的计算仅是简单的因子 (坡度与坡长) 相乘, 缺乏对侵蚀过程, 尤其是坡面流水侵

蚀过程的水文动力学机制的分析与考虑。

研究发现, 坡面流水侵蚀过程中流水重力产生的能量累积与耗散, 是导致侵蚀程度差异和不同坡面表面形态形成的主要原因。基于此考虑, 我们尝试设计一种基于坡面流水能量累积考虑的侵蚀动力因子, 通过分析坡面流水过程中能量的变化过程, 试图揭示和推演坡面土壤侵蚀发生的内因机理。本文以坡面流水侵蚀为研究对象, 围绕流水侵蚀潜能因子的计算与分析开展研究, 并通过根据侵蚀潜能因子提取的侵蚀动力点对土壤侵蚀过程进行了分析。

收稿日期: 2011-11-04

修回日期: 2012-03-31

资助项目: 国家自然科学基金重点项目“基于 DEM 的黄土高原地貌形态空间格局研究” (40930531); 国家自然科学基金项目“基于 DEM 的黄土沟谷特征点簇研究” (41001294); 资源与环境信息系统国家重点实验室开放基金 (2010KF0002SA)

作者简介: 刘仁杰 (1991—), 男 (汉族), 江苏省南京市人, 研究方向为 GIS 空间分析。E-mail: james56me@163.com。

通信作者: 朱红春 (1977—), 男 (汉族), 山东省泰安市人, 副教授, 研究方向为 DEM 数字地形分析, GIS 与遥感系统开发与应用。E-mail: sdney\_xa@163.com。

# 1 坡面流水侵蚀潜能因子的基本概念

## 1.1 坡面流水侵蚀潜能因子的概念分析

假设在一个坡面上,降雨均匀分布且完全转化为径流,而径流受重力的作用,由高势能点流向低势能点,且假定在水流动的过程中没有阻力的作用,同时不考虑径流下渗导致的水量损失,那么流水的重力势能在流水沿坡面下降的过程中会完全转化为流水的动能。然而,水流在坡面传递能量的过程中,由于地形的起伏,流水经过地形拐点时动能会有损耗。水流从高处流下时,根据动量守恒,沿接触面的法线方向的速度会完全消耗,这部分动能会完全转化为侵蚀坡面的能量,从而带走部分泥沙,而沿接触面的切线方向的速度会维持原样,这部分动能会得以保留而继续传递;在能量的传递过程中,在下游位置会因水具有的能量较低而发生泥沙沉积。由此,可以得到 2 个能量转化的结果,分别为传递的能量以及消耗的能量,其中,代表消耗能量的可以描述为坡面的流水潜能矩阵,反映了流水侵蚀坡面的能力大小。基于以上

分析,本文给出坡面流水侵蚀潜能因子的基本定义为:在既定的坡面空间区域内,流水的重力势能经过传递转化,产生对地表作用及其变化过程的数字模拟。潜能计算的大值处,即侵蚀能量强的点,称为流水侵蚀动力点,该点不是几何意义上的点,而是从统计的角度反映了坡面侵蚀能力的强弱,是对地形发育与演化起到较关键作用的点,是能量矩阵中数值较大的点。

## 1.2 坡面流水侵蚀潜能因子的计算原理

以既定坡面地区的地形数据矩阵为基础,通过栅格追踪累积的方式进行流水侵蚀潜能因子的计算。计算基本原理为:设原中心栅格(以下称为  $P_1$ )为目标栅格,其出水量为  $C$ ,原有能量为  $E_1$ ,万有引力常数为  $g$ ,中心栅格与坡降最陡处栅格的高程差为  $H$ ,根据能量守恒,理想情况下  $P_1$  的重力势能完全转化为动能进行传递,则其传递的能量  $E_{p_1}$  表示为:

$$E_{p_1} = HCg + E_1 \quad (1)$$

而当坡降最陡处的栅格接收中心栅格传过来的能量时,可能出现图 1 所示的 2 种情况:

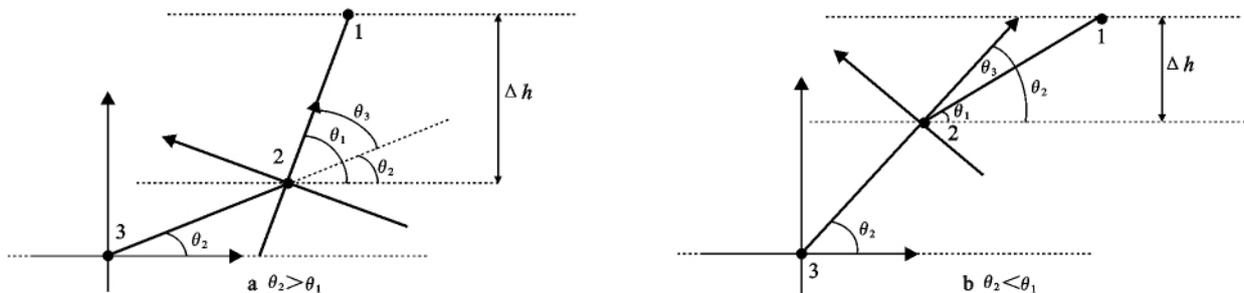


图 1 栅格能量的分解示意图

第 1 种是以坡降最大的栅格(以下称为  $P_2$ )为中心栅格时,坡降最大的栅格(设其为  $P_3$ )的坡度小于  $P_3$  处的坡度时(图 1a);第 2 种是坡降最大的栅格(设其为  $P_3$ )的坡度大于  $P_2$  处的坡度时(图 1b),此时设  $P_2$  处坡度为  $\theta_1$ , $P_3$  处坡度为  $\theta_2$ , $P_2$  与  $P_3$  处的坡度差为  $\theta_3$ ,则  $P_2$  与  $P_3$  处的坡度差表示为:

$$\theta_3 = |\theta_1 - \theta_2| \quad (2)$$

将点 1 传来的水流速度在  $P_2$  处沿  $P_1$  至  $P_2$  的平面做正交分解,设点 2 处水流的速度为  $V$ ,则水流速度法线方向的速度为  $V_n$ :

$$V_n = V \sin(|\theta_1 - \theta_2|) \quad (3)$$

切线方向的速度为  $V_t$ :

$$V_t = V \cos(|\theta_1 - \theta_2|) \quad (4)$$

根据动量守恒公式,法线方向的速度损失掉,这部分损失的能量转化为侵蚀地面的能量,而切线方向的速度得以保留使得水流继续传递剩余的能量,此时

设水流质量为  $m$ ,得到损失的能量  $E_{c_2}$ :

$$E_{c_2} = \frac{1}{2} m [V \sin(|\theta_1 - \theta_2|)]^2 \quad (5)$$

继续传递的能量  $E_{p_2}$ :

$$E_{p_2} = \frac{1}{2} m [V \cos(|\theta_1 - \theta_2|)]^2 \quad (6)$$

又由于水流消耗的能量与传递的能量即为动能的法线与切线方向上的分量,而动能在理想情况下由重力势能转化而来,可根据式(1)求得  $P_2$  处速度  $v$ :

$$v = \sqrt{\frac{2E_{p_1}}{m}} \quad (7)$$

将式(7)代入式(5),(6),得到式(8)与式(9):

$$\text{损失的能量 } E_{c_2}: E_{c_2} = E_{p_1} \sin^2(\theta_1 - \theta_2) \quad (8)$$

$$\text{传递的能量 } E_{p_2}: E_{p_2} = E_{p_1} \cos^2(\theta_1 - \theta_2) \quad (9)$$

运用式(8),(9)对每个栅格都进行相同的计算处理后,得到每个栅格点传递的能量与消耗的能量;通

过设置合适的能量阈值,可以得到侵蚀潜能较大的栅格点,即侵蚀动力点。

## 2 材料与方 法

### 2.1 实验样区与实验数据

本研究采用实测的人工降雨模拟侵蚀发育小流域的 DEM 数据作为实验数据,模拟小流域面积为  $6\text{ m} \times 9\text{ m}$ ,呈叶片状。试验从 2001 年 2 月中旬开始,于 2001 年 12 月中旬结束,历时 10 个月。模拟小流域利用近景摄影测量方法进行地形测量,处理后得到

9 个不同时期的高分辨率 DEM 数据,数据的水平栅格分辨率为  $10\text{ mm}$ ,高程中误差  $\leq 2\text{ mm}$ 。

### 2.2 提取方法

依据坡面流水侵蚀潜能因子的计算原理,基于栅格形式的 DEM 数据计算流水侵蚀潜能因子的提取流程为:设每个 DEM 栅格格网持有一份水,根据 D8 算法求得 DEM 数据的流水方向矩阵 direction,再求得 DEM 的坡度数据 slope,使用  $3 \times 3$  的窗口进行扫描,应用式(8),式(9)进行坡面流水侵蚀潜能的计算。具体的提取算法流程如图 2 所示。

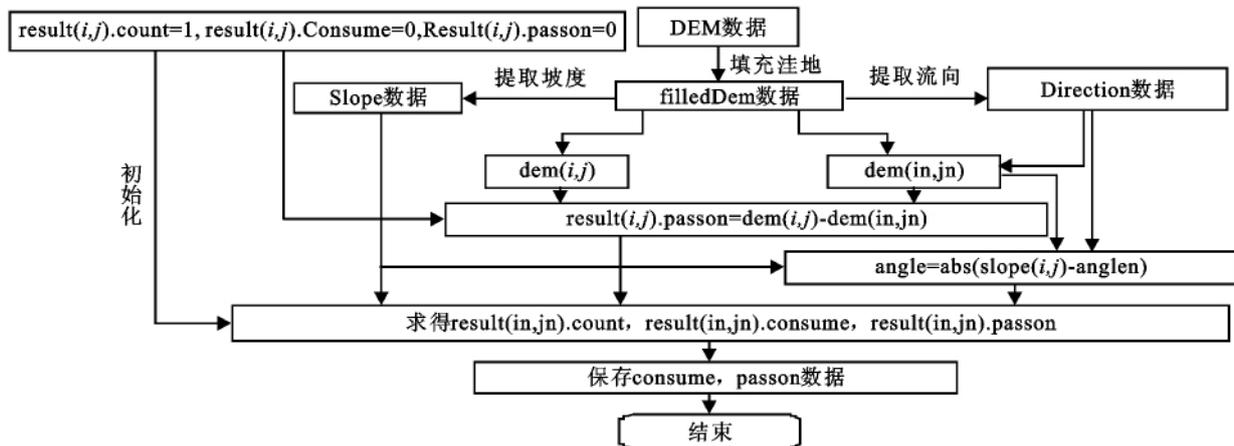


图 2 基于 DEM 的流水侵蚀潜能提取算法示意图

图 2 中,consume 表示流水侵蚀的能量矩阵,passon 表示流水传递的能量矩阵。算法执行的关键步骤描述如下:

(1) 对 dem 数据填充洼地,形成数据图层 filled-Dem,并将其重新命名为 dem,然后提取坡度数据 slope 和流水方向矩阵 direction,初始化结构体 result (MAX,MAX),包含 count,passon,consume。

(2) 对结果数据层结构体 result 初始化:每个栅格 count=1,passon=0,consume=0。

(3) 对每个栅格  $dem(i,j)$  依据 direction 流水方向矩阵访问最陡坡降栅格  $dem(in,jn)$ ,求得高差  $dem(i,j) - dem(in,jn)$ ,令  $result(i,j).passon = (dem(i,j) - dem(in,jn)) * result(i,j).count + result(i,j).passon$ 。

(4) 求得  $dem(in,jn)$  的最陡坡降栅格角度  $anglen$ ,并令  $angle = abs(slope(i,j) - anglen)$ 。

(5)  $result(in,jn).count = result(in,jn) + result(i,j)$ 。

$result(in,jn).consume = result(i,j).passon * pow(\sin(\text{angle}), 2)$ 。

$result(in,jn).passon = result(in,jn).passon + result(i,j).passon * pow(\sin(\text{angle}), 2)$ 。

(6) 对每个栅格分析后,记录结果数据中的 consume 及保存 passon。

## 3 结果与分析

### 3.1 实验小流域流水侵蚀潜能因子的计算

应用 2.2 提出的算法模型,得到了 9 期模拟小流域 DEM 的水流侵蚀潜能因子计算结果,其中第 1,2 时期的结果如图 3 所示。其中,图中 consume 矩阵代表流水侵蚀的能量矩阵,图例颜色越浅表示侵蚀能量越大;图 4 为侵蚀动力点提取结果(能量阈值为 3 000),并将其定位在 DEM 数据上,图中颜色越浅代表高程越低,而有侵蚀动力点分布的部位即代表发生侵蚀的概率较大,坡面侵蚀将在这里开始或进一步加强。对图 4 提取的侵蚀动力点结果进行对比,可以定性地预测出该实验小流域侵蚀的未来发展,即坡面侵蚀向流域边界逐步蔓延;同时侵蚀动力点的位置向上游移动,数量急剧增加,表示侵蚀强度加大,范围变广。

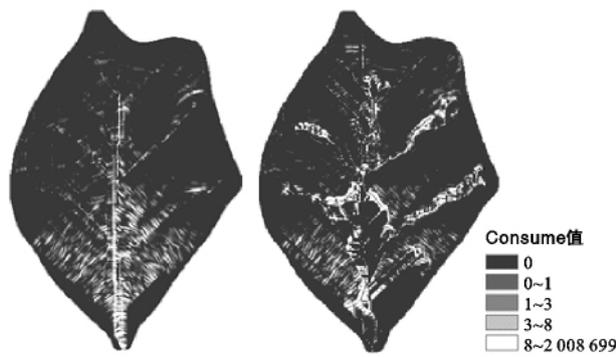


图3 第1期,第2期数据的 Consume 矩阵

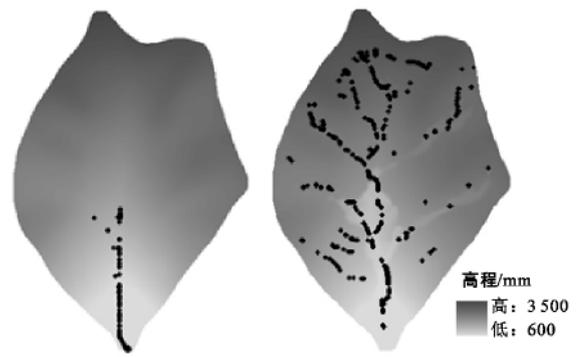


图4 第1期,第2期数据与侵蚀动力点

### 3.2 结果分析

3.2.1 流水侵蚀潜能因子计算结果的分析 以实验小流域第2期 DEM 数据为例,对该流域的坡度进行分级。分级采用水土保持中常用的坡度分级标准,坡度等级与侵蚀的对应关系大致为:3°以下为坡面无侵蚀区;3°~8°坡面有细沟、浅沟出现,流水侵蚀开始发生;8°~15°坡面流水侵蚀较弱;当坡度超过15°时,流水侵蚀渐趋加剧;坡度至25°,坡面的侵蚀方式开始发生转变,25°以上的坡面重力侵蚀开始明显出现;35°是坡面松散堆积物临界休止角,滑坡、泻溜等重力侵蚀出现;45°以上水力作用大为降低,重力侵蚀成为主要的侵蚀营力。

对流水侵蚀能量提取的结果按照0,0~5,5~10,10~50,50~100,>100的级数进行分级,统计结果如表1所示。

表1 第2期 DEM 坡度及流水侵蚀潜能因子的分级结果统计

| 坡度分级    | 坡度分级栅格数 | Consume 分级 | Consume 分级栅格数 |
|---------|---------|------------|---------------|
| 0°~3°   | 2 124   | 0          | 285 255       |
| 3°~8°   | 26 539  | 0          | 285 255       |
| 8°~15°  | 92 616  | 0~5        | 29 821        |
| 15°~25° | 145 236 | 5~10       | 5 061         |
| 25°~35° | 36 416  | 10~50      | 7 535         |
| 35°~45° | 11 520  | 50~100     | 2 713         |
| 45°~90° | 23 304  | >100       | 7 460         |

从表1中可以看出,坡度与消耗能量的正相关系数不大,原因在于坡度不是坡面土壤侵蚀的决定性因素。在不同类型的地形区域,虽然有着同样的平均坡度值,但产生的侵蚀作用却是不一样的。单一直形坡的地形由于流水的重力侵蚀作用,导致目标点下切发育成谷;而坡度变化剧烈的地形则可能会由于目标点处流水的重力侵蚀作用不明显,沉积作用大于侵蚀作用或是大抵相当,致使地形发育较为缓慢。所以仅根据坡度很难细致地分析出存在的地形侵蚀动力,但是

从能量累积的角度可以很好地得出对应的侵蚀动力。此外,还可以发现侵蚀动力大的位置往往在坡度陡变处,而不一定是在坡度大的地形部位,侵蚀能量大的点大部分分布在靠近沟头的位置,这也可以很好地解释为什么在沟头区域的侵蚀发生剧烈、演化最快。

3.2.2 侵蚀动力点提取结果的分析 不同时期地形数据的高程差体现了侵蚀发生的地形部位,反映了侵蚀发生的空间演化过程,高程差大表示该位置发生了较剧烈的侵蚀,高程差小表示该位置发生侵蚀的程度较小。图5a为第1期减去第2期的高程差数据,图例的浅色调表示较大的高程差,这些地形部位是较为剧烈的侵蚀发生区,再叠加提取的侵蚀动力点结果。图5b所示是对第2,3期数据采用相同方法处理的结果。

经过对比,可以看出侵蚀动力点基本定位在侵蚀较强的位置,其空间分布大致呈现与侵蚀程度正相关,即侵蚀越强烈的地方分布越密集。因此,快速准确地提取出当前的流水侵蚀潜能侵蚀动力点,可以预见未来地形坡面的侵蚀演化方向。

对9期模拟小流域的水流侵蚀潜能计算结果分别设置阈值为1 000和3 000提取侵蚀动力点,将侵蚀动力点的数目进行统计,结果如图6所示。经过分析得出,第1期数据提取的侵蚀动力点分布较少,这是因为在地形发育的初期,地势较平缓,土壤侵蚀尚不明显;第2期数据提取的侵蚀动力点结果反映地形初步发育,沟谷初步形成,流水的侵蚀能力明显增强,这个时期地形发育得到加速;第3,4时期,地形进一步发育,下蚀作用减弱,流水的侵蚀作用主要是旁蚀,将沟谷拓宽;第5时期,由于沟谷被拓宽,产生了新的沟头,由于沟头的溯源侵蚀,沟谷伸长,在这个阶段,沟谷网络更加密集,地形发育再次加速;第6,7,8时期,重复新的沟谷出现和拓宽过程;第9期,地形发育渐渐进入成熟期,在这个阶段,地形发育速度放缓,沟谷网络比较密集,主要沟谷渐渐被拓宽形成河谷,

流水对上游土壤的侵蚀在下游发生堆积,地形变化趋于平缓。

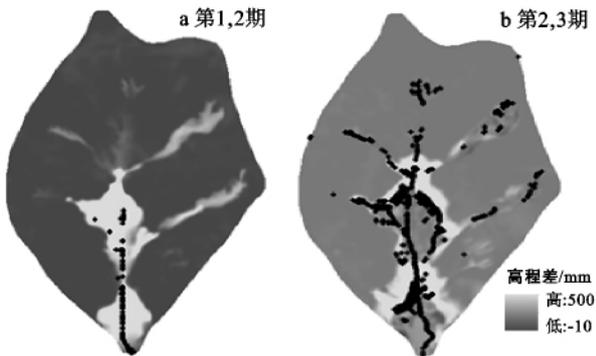


图 5 第 1,2 期和第 2,3 期高程差与侵蚀动力点

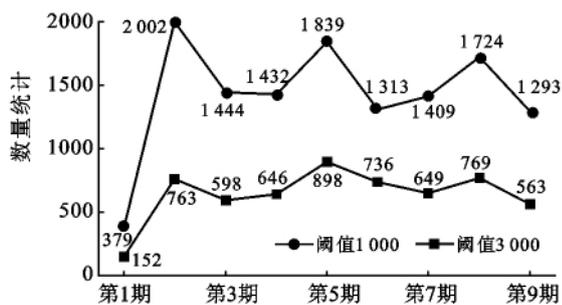


图 6 不同时期提取的侵蚀动力点数量统计

基于以上分析,可以发现坡面侵蚀的演进呈现明显的规律性:地形发育初期,局部侵蚀基准点首先发育,不断的溯源侵蚀后退,使沟谷延长,沟头发育;侵蚀使沟谷进一步发展,下游地区下蚀减弱,旁蚀作用加强,沟谷被拓宽,上游地区新的沟头点不断形成,导致沟谷网络密度加大。由于上游不断侵蚀,地形更加破碎;下游不断堆积,主要沟谷发育成河谷,地形趋于平缓,最终使地形发育呈现稳定态势。

### 3.2.3 基于流水侵蚀潜能的地形侵蚀过程的分析

对整个地区来说,有侵蚀动力点分布即表示该位置发生侵蚀的可能性较大,而点的密度则反映了侵蚀类型和潜在强度:侵蚀动力点较密集的部位,地形的演化会沿点的方向发生整体侵蚀;侵蚀动力点分布较分散的部位,可能会形成下蚀;没有点分布的部位,表示能量消耗较小,在高程相对较低且流水能量传递较小的地区,可能发生泥沙的沉降与堆积,造成河床上升。

由于 consume 图层中的能量消耗表示侵蚀动力,而 passon 图层中的能量传递可以间接反映堆积动力(能量传递较少且高程相对较低的地方堆积动力大,能量传递较大的地方堆积动力小),据此,可以设定适当的函数关系  $f(\text{con}, \text{ele}, \text{pas})$  来分析预测地形的发育趋势(con 代表 consume 图层中的能量消耗,ele 代表

高程信息,pas 代表 passon 图层中的能量传递)。由于本次实验缺少更为丰富的多时态数据进行拟合与验证,如何定量地确定上述三者之间的函数关系有待进一步的实验研究。

## 4 结论

本文参照能量力学的分析思路,提出了坡面流水侵蚀潜能因子的概念与计算方法,基于多期模拟小流域的高精度 DEM 数据,提取了坡面流水侵蚀潜能因子和侵蚀动力点。通过分析,发现流水侵蚀潜能因子的结果与对应地形的坡度因子没有明显正相关关系;通过多期模拟小流域的实验,发现侵蚀动力点的数目呈现的分布规律反映了地形演变的动态过程,同时发现大部分侵蚀动力点分布在沟头部位,从能量角度解释了在沟头侵蚀地形发育最快的原理。

本研究基于能量动力学原理对坡面流水侵蚀过程进行了初步探讨,相关研究还需进一步深入开展,如获取并运用实验区基岩数据与更为细致的时态空间数据,通过多次实验拟合,找出能量消耗和传递矩阵、高程矩阵与土壤侵蚀之间的数学关系,以期在动态模拟地形演化上有所进展。

### [参 考 文 献]

- [1] 杨勤科,李锐,曹明明. 区域土壤侵蚀定量研究的国内外进展[J]. 地球科学进展,2006,21(9):31-38.
- [2] 胡良军,李锐,杨勤科. 基于 GIS 的区域水土流失评价研究[J]. 土壤学报,2001,38(2):167-175.
- [3] 阎国年,钱亚东,陈钟明. 基于栅格数字高程模型提取特征地貌技术研究[J]. 地理学报,1998,53(6):52-61.
- [4] 汤国安,李发源,刘学军. 数字高程模型教程[M]. 北京:科学出版社,2010:145-158.
- [5] 崔晨. 基于 DEM 的土壤侵蚀模型中地形因子的研究:以陕北黄土高原为例[D]. 西安:西北大学,2010:6-12.
- [6] 刘和平,王秀颖,刘宝元. 短坡条件下侵蚀产沙与坡长的关系[J]. 水土保持学报,2011,25(2):2-5.
- [7] 江忠善,王志强,刘志. 黄土丘陵区小流域土壤侵蚀空间变化定量研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报,1996,2(1):1-9.
- [8] 刘俊娥,王占礼,高素娟. 黄土坡面片蚀过程试验研究[J]. 水土保持学报,2011,25(3):36-38.
- [9] Chandramohan T, Durbude G D. Estimation of soil erosion potential using universal soil loss equation[J]. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 2002, 30(4): 182-189.
- [10] 杨涛,陈界仁,姚文艺,等. 基于 DEM 的黄土丘陵区动力学流域水沙数学模型应用研究[J]. 水动力学研究与进展,2007,22(5):584-589.