

# 基于 M-DEM 的黄土人工锄耕坡面水系分维特征研究

张莉<sup>1,2</sup>, 张青峰<sup>1,2,3,4</sup>, 郑子成<sup>3,5</sup>, 王健<sup>1,2,3,4</sup>

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 农业部黄土高原农业资源与环境修复重点开放实验室, 陕西 杨凌 712100; 3. 中科院水利部水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 4. 西北农林科技大学 中国旱区节水农业研究院, 陕西 杨凌 712100; 5. 四川农业大学, 四川 雅安 625000)

**摘要:**该文旨在微观尺度上对地表微地形水系形成过程及其几何分形特征进行研究与分析,为研究坡面流水侵蚀过程及其防治提供科学依据。通过构建 90 mm/h 雨强、15°坡度下不同水蚀阶段(雨前—溅蚀—片蚀—细沟侵蚀)黄土人工锄耕坡面微地形数字高程模型,设置不同集水面积阈值提取微地形水系,并基于格网法计算相应的水系分维值。结果表明:(1)分形理论用于研究微地形水系及其形成过程具有可行性;(2)降雨前、溅蚀、片蚀和细沟侵蚀阶段的最适集水面积阈值分别为 15, 20, 25, 30 cm<sup>2</sup>,对应的最佳分维值分别为 1.067, 1.088, 1.068, 1.079;(3)人工锄耕坡面在各侵蚀阶段均处于侵蚀发育的幼年期。该研究不仅为微观层面研究黄土耕作坡面水系分维提供方法指导,也可为进一步揭示土壤侵蚀机理提供数据支持。

**关键词:**分形; M-DEM; 耕作措施; ArcGIS

中图分类号:S157

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2012)05-0007-05

## M-DEM-based Stream Fractal Dimension of Artificial Backhoe Cultivated Loess Slope

ZHANG Li<sup>1,2</sup>, ZHANG Qing-feng<sup>1,2,3,4</sup>, ZHENG Zi-cheng<sup>3,5</sup>, WANG Jian<sup>1,2,3,4</sup>

(1. College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Key Lab for Agricultural Resources and Environmental Remediation in Loess Plateau of Agriculture Ministry of China, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, CAS&MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China; 4. Institute of Water Saving Agriculture in Arid Areas of China, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 5. Sichuan Agricultural University, Ya'an, Sichuan 625000, China)

**Abstract:** This paper aims to explore a way to illustrate the stream network forming process with its fractal geometry characteristic of micro-topography in the micro scale, and provide the scientific basis for further research about slope surface water erosion process and prevention. In this paper, 4 M-DEMs for artificial backhoe cultivated loess slope with the slope gradient of 15° and the rainfall intensity of 90 mm/h were built during the evolution of soil erosion from before rainfall (BR)→ splash erosion (SpE)→ sheet erosion (ShE)→ rill erosion (RE) based on laboratory experiment. Then stream networks for different catchments thresholds were extracted with the support of ArcGIS 9.3 soft package. Correspondingly, fractal dimensions were calculated based on the grid method. The results showed that: (1) fractal theory could be safely adopted to the study of river network with its forming process of micro-topography; (2) the optimal catchments thresholds of each rainfall stage were 15, 20, 25, 30 cm<sup>2</sup>, and the optimal fractal dimensions were 1.067, 1.088, 1.068 and 1.079, respectively; (3) Artificial backhoe slope erosion was still in the primary stage. In general, a methodology on a micro-topographic stream with its fractal dimension is illustrated, and it should be safe to be adopted for further research for surface micro-topographic.

**Key words:** fractal; micro-topography; tillage measures; ArcGIS

1967 年,美国数学家 Mandelbrot 由研究英国的海岸线长度开始,创立了分形几何学<sup>[1-2]</sup>,形成了研究

分形性质及其应用的科学——分形理论,其本质是一种新的世界观和方法论<sup>[3]</sup>,揭示了介于整体与部分、

收稿日期:2012-04-09

修回日期:2012-05-09

资助项目:陕西省自然科学基金项目(2011JM5007);黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室基金课题(10501-283)

作者简介:张莉(1985—),女,甘肃会宁人,硕士研究生,研究方向:地图学与地理信息系统。E-mail:zhangli11@yeah.net

通信作者:张青峰(1974—),男,山西孝义人,副教授,硕士生导师,主要从事地图学与地理信息系统、土地资源与空间信息技术方面的研究。E-mail:zhqf@nwsuaf.edu.cn

有序与无序、复杂与简单之间的新形态、新秩序。随后,分形理论在地学相关领域得到了广泛应用<sup>[4-5]</sup>,并推动了分形地貌学的发展。与此同时,各国学者也开展了对流域地貌系统的地貌特征量间的统计分形研究,进一步深化了 Horton 等以物理学方法对水系的形成及演变的研究成果<sup>[6]</sup>,并在对河道线状分形及河道平面形态分形研究基础上,开始对水系的河网分形进行研究,初步探讨了水系分形特征与流域地貌发育过程的关系<sup>[7]</sup>。目前有关水系分形的研究方法主要有两种:一种是基于分形的基本定义,称之为格网法;另外一种是基于 Horton 定理的水系分维估算。其中,基于网格法的水系分维估算得到绝大多数学者的认同<sup>[8]</sup>。整体上看,分形几何理论在地貌学中的研究,主要集中在流域地貌中河流平面形态及水系网的分维值变化规律、基于盒维数与分形布朗模型(FBM)等的自然地貌起伏度与粗糙度的分形描述及地表模拟的分形方法研究,而缺乏对微观尺度地表微地形河网水系及其形成过程的研究与分析。

黄土耕作坡面微地形由于人为管理所造成高低起伏的地形特征,既是坡面侵蚀的直接结果,又是导致坡面侵蚀进一步发展的主要原因,也是一个能够反映坡面侵蚀动力学各要素及其相互作用的综合因素。在黄土高原长期的耕作实践中,形成的传统耕作措施主要包括人工锄耕、人工掏挖、等高耕作等。其中,人工锄耕(AB,artificial backhoe)是指沿地表从坡底逐渐向坡顶锄耕,深度 4~5 cm,并形成凹凸相间的小丘和洼地。耕作形成的垄台和坑洼在空间不具有对称性。这种耕作管理方式往往在地表形成土粒级和土块级的高低起伏,直接影响到产流、汇流和泥沙输移<sup>[9-10]</sup>。在水蚀过程中,作为反映地表起伏变化与侵蚀程度的微地形,会伴随着水蚀的发生与演变,通过自身空间各点相对高程的变化与消长影响着径流的产生、流向、汇流和径流量<sup>[11]</sup>,进而影响侵蚀类型的演变及侵蚀产沙量的大小。由此看来,微地形水系的分形研究对研究坡面流水侵蚀过程及其防治提供科学依据具有重要意义。本文在 GIS 技术支持下,在对黄土 AB 耕作坡面微地形水系分形几何特征研究的基础上,探讨了水系分维的意义及水系分形地貌的关系。

## 1 研究方法

### 1.1 试验设计

试验在黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室土壤侵蚀人工模拟降雨大厅进行,所用降雨设备为侧喷式人工降雨器,降雨均匀度大于 80%,降雨高度为 16 m,可以满足所有雨滴达到终点速度。试

验用土槽规格为 2.0 m×1.0 m×0.5 m,以陕西省杨凌区坡耕地原状表层土(0—20 cm)为实验用土,土壤容重 1.30 g/cm<sup>3</sup>,含水率约为 10%。杨凌区位于黄土高原南缘,东经 108.72°,北纬 34.36°,属温带半湿润大陆性季风气候,年均降雨量约 637.6 mm,土壤为灰棕色瘠土,土体较疏松,有粒状或团块状结构,土壤颗粒以粉沙为主。为了使布设的耕作措施更接近自然状况,试验中聘请长期从事相同耕作措施农业生产的农民进行操作。试验雨强为 90 mm/h,坡度为 15°,设置 3 次重复。

人工降雨试验采用分段降雨,分别对应降雨前阶段(before rainfall, BR)、坡面薄层水流发生并开始产流前的溅蚀阶段(splash erosion, SpE)、坡面出现鱼鳞片状小坑和微小跌水的片蚀阶段(sheet erosion, ShE)、坡面鱼鳞片状或跌水贯通形成细沟的细沟侵蚀阶段(rill erosion, RE)。

### 1.2 原始 M-DEM 的建立

高精度微地形数字高程模型(M-DEM)是一种对地表微地形空间起伏变化的连续表示方法,能细致地反映微地形的起伏变化与破碎状况,已逐渐作为土壤侵蚀研究的重要数据源。本文采用非接触式激光扫描仪<sup>[12]</sup>(垂直误差小于 3 mm)获取微地形高程数据,每个坡面可获得 3 480 个高程点数据,每个点分别代表实际地表 2 cm×2 cm 的范围。首先对高程数据进行统计分析,通过对其进行正态分布特征检验,以进一步在 GS+ 软件中进行半变异拟合模型参数的确定,再在 ArcGIS 中进行空间配准,并选择克里金插值方法进行插值<sup>[9]</sup>,构建高分辨率 M-DEM,如图 1 所示。

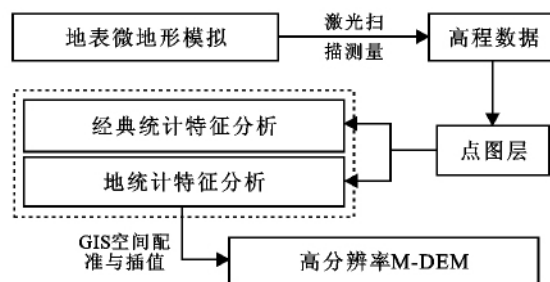


图 1 坡面微地形数字高程模型的建立与表达流程

### 1.3 黄土 AB 坡面河网的提取

利用 DEM 数据提取河网的模型主要有谷点提取模型和基于流向的提取模型两种。其中,基于流向的河网提取模型通过确定每个网格的流向,并计算各栅格单元的上游给水区,选择合适的集水面积阈值来提取河网水系(图 2)。该模型生成的河网水系是连续的,目前应用也最为广泛<sup>[13]</sup>。

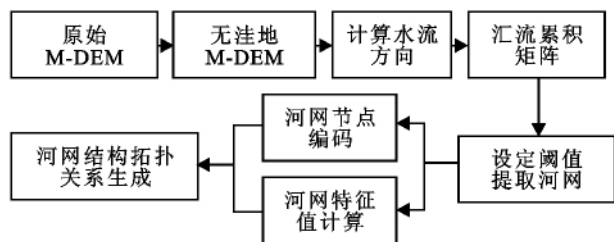


图2 河网提取流程

1.3.1 无洼地 M-DEM 的生成 由于内插的原因及真实地形在格网单元范围内的变化,使得所生成的 M-DEM 表面格网单元内部存在着局部凹陷的区域。采用坡面流模拟方法对这些区域在进行地表水流模拟时,由于低高程栅格的存在,会使水流方向无法确定从而得到不合理的或错误的水流方向,所生成的水系也就不连续。因此,在进行水流方向的计算之前,应首先对原始 M-DEM 数据进行洼地填充,得到无洼地的 M-DEM。

本文利用 D8 单向流法<sup>[14-15]</sup>对洼地进行识别和填充。首先对 M-DEM 栅格间的流向进行判断,假定单个栅格中的水流只从一个方向流出,通过中心栅格与邻域栅格的最大距离权落差来计算栅格高程以判断其水流方向;然后顺序计算洼地所在区域、洼地影响区域、洼地最浅深度和洼地出水口高程得到洼地的高程差;最后选定合适的填充阈值(本文设定填充阈值为 0,即对所有洼地进行填充)进行填充生成无洼地 M-DEM,作为河网水系提取的基础。

1.3.2 水流方向的确定 在  $3 \times 3$  的 M-DEM 网格上,计算中心网格与各相邻网格间的距离权落差(即网格中心点落差除以网格中心点之间的距离),取距离权落差最大的网格为中心网格的流出网格,该方向即为中心网格的流向。

1.3.3 汇流累积矩阵的生成 汇流累积量矩阵用以表示坡面微地形每点的水流累积量。假定 M-DEM 每个栅格单元有一个单位的水量,按照自然水流从高

处流向低处的规律,根据水流方向数字矩阵计算各点所流过的水量数值,便可得到汇流累积矩阵。

1.3.4 河网水系的生成 M-DEM 中某一栅格点能否形成水系取决于其上游集水区规模能否达到所设定的最小水网集流阈值。本文在借鉴前人研究的基础上分别从  $15 \text{ cm}^2$  开始每隔  $5 \sim 40 \text{ cm}^2$ ,共选取 6 个集水面积阈值对不同水蚀阶段坡面进行河网水系的提取,得到河网水系的潜在位置,以观察最适河系提取的集水面积阈值<sup>[16]</sup>。

#### 1.4 不同集水阈值下水系分维值的计算

采用格网法的盒分维值  $D$  来刻画微地形河网水系的复杂、无规则的本质特征。通过在 ArcGIS 中分别以  $0.125 \sim 12 \text{ cm}$  为栅格单元的边长(步长) $r$ 对原始河流栅格网络(步长  $2 \text{ cm}$ )进行尺度转换,依次求得相应步长下河网水系所占用的栅格数量  $N(r)$ ,绘制  $\ln r$  和  $\ln N(r)$  双对数坐标曲线并拟合其斜率,斜率的绝对值即盒分维值  $D$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 M-DEM 的获取

采用单样本 K-S(柯尔莫哥洛夫—斯摩洛夫)法在  $\alpha=0.05$  显著水平上对高程数据进行正态分布特征值分析和检验,结果表明,不同水蚀阶段 AB 坡面微地形相对高程值均符合正态分布特征<sup>[12]</sup>,故可采用地统计学方法分析其相对高程空间变异性<sup>[17]</sup>。

在 GS+地学统计软件中,通过半变异函数拟合曲线模型<sup>[18]</sup>来描述微地形相对高程的空间变异函数关系。同时,对所选定的半方差模型参数进行 Kriging 交叉检验(表 1)。结果表明,半方差函数拟合曲线模型判定系数分别为  $0.918, 0.950, 0.678, 0.948$ , Kriging 交叉验证的相关系数为  $0.797, 0.842, 0.805, 0.781$ ,说明所选定的拟合曲线模型能很好地反映微地形真实特征,其插值结果见图 3。

表1 不同侵蚀阶段 AB 坡面半变异函数拟合参数与交叉检验

侵蚀阶段	判定系数 $R^2$	基底效应 $[C/(C_0+C)]/\%$	块金值 ( $C_0$ )	基台值 ( $C_0+C$ )	变程/ m	拟合曲线 模型	相关系数 $r$
BR	0.918	85.80	0.0000790	0.0005550	5.172	Gaussian	0.797
SpE	0.950	96.10	0.0000500	0.0012910	6.270	Gaussian	0.842
ShE	0.678	91.50	0.0000560	0.0006570	6.944	Gaussian	0.805
RE	0.948	85.60	0.0000580	0.0004030	4.070	Gaussian	0.781

### 2.2 微地形河网水系提取与分析

利用 D8 算法将不同降雨阶段不同集水阈值下所提取的河网分别进行汇流累积量计算,并与实测径流量相对比,发现降雨前阶段、溅蚀阶段、片蚀阶段、细沟侵蚀阶段的最适集水面积阈值分别为  $15 \text{ cm}^2$ 、 $20$

$\text{cm}^2$ 、 $25 \text{ cm}^2$  和  $30 \text{ cm}^2$ ,所对应的河网如图 4 所示。此外,集水面积阈值越小,所提取的水系网越密集,分级也越多;相反,集水面积阈值越大,所提取的水系网越稀疏,分级也越粗糙。

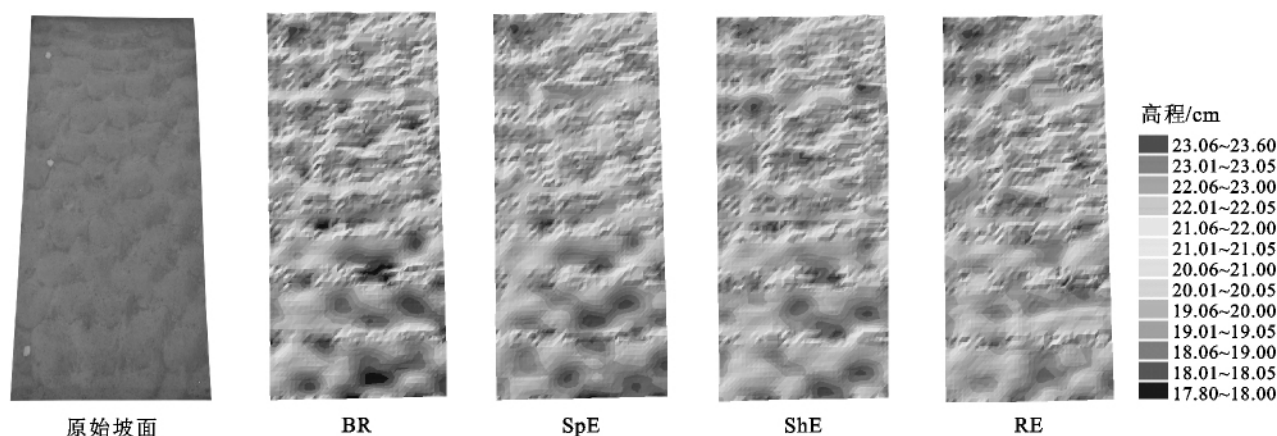


图 3 不同水蚀阶段 AB 坡面 M-DEM

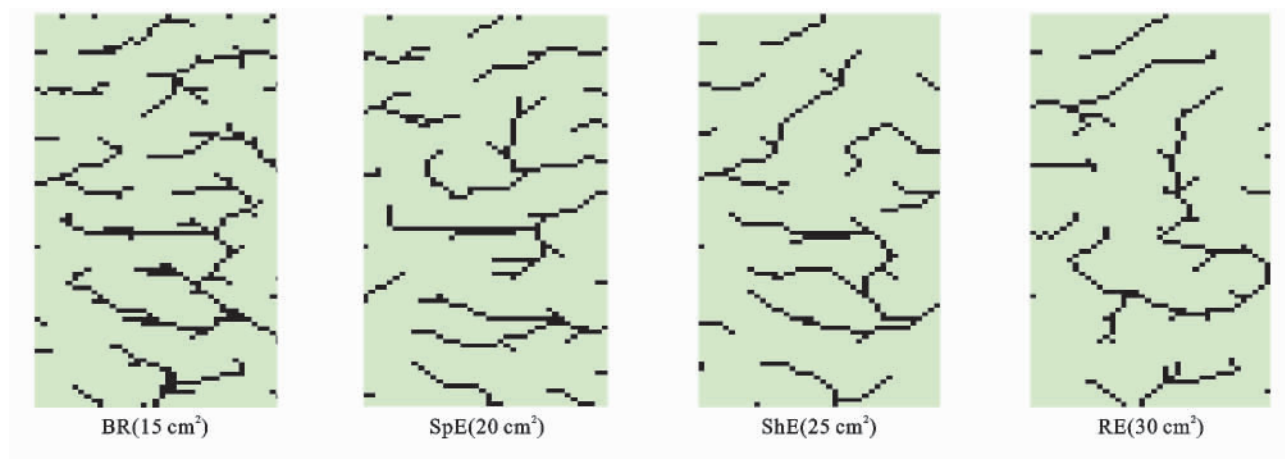


图 4 各侵蚀阶段在最适集水面积阈值所对应的河网

### 2.3 不同侵蚀阶段的水系分维

不同侵蚀阶段各集水面积阈值下的水系分维值  $D$  见表 2。由表 2 可以看出,集水面积阈值越小,分维值  $D$  越大,即地表水系越复杂、河网越密集、河道弯曲程度越大<sup>[16]</sup>;另一方面, $D$  值越接近于 1,说明两组数据  $\ln r$  和  $\ln N(r)$  的线性关系越好, $r$  的取值越合理,所对应的水系越能真正反映河流水系的实际特征。由表 2 可知:(1) 在设定的集水面积阈值范围内,黄土 AB 坡面微地形河网水系分维值的变化并不大,值在 $[1.051, 1.121]$ ,且判定系数  $R^2 \geq 0.954$ ,均表现出良好的拟合性,说明格网边长在  $0.125 \sim 12$

cm 的取值范围内所对应的 M-DEM 均能很好地反映黄土 AB 坡面微地形的分形特征;(2) 综合考虑不同降雨侵蚀阶段所对应的集水面积阈值下  $D$  值和  $R^2$  值,BR— $15 \text{ cm}^2$ 、SpE— $20 \text{ cm}^2$ 、ShE— $25 \text{ cm}^2$ 、RE— $30 \text{ cm}^2$  的  $D$  值趋近于 1 且  $R^2$  值  $\geq 0.96$ ,相应的水系分维拟合程度较高,这也从分维值的角度印证了上文提出的各侵蚀阶段下河网最佳集水面积阈值的合理性;(3) 结合各侵蚀阶段坡面微地形水系分布,可初步选定 BR—1.067, SpE—1.088、ShE—1.068、RE—1.079 为本试验的坡面微地形水系在各个降雨阶段的最佳分维值。

表 2 不同水蚀阶段各集水阈值下的水系分维

集水面积 阈值/ $\text{cm}^2$	BR		SpE		ShE		RE	
	分维值 $D$	判定系数 $R^2$	分维值 $D$	判定系数 $R^2$	分维值 $D$	判定系数 $R^2$	分维值 $D$	判定系数 $R^2$
15	1.067	0.960	1.091	0.971	1.078	0.974	1.067	0.963
20	1.057	0.954	1.088	0.965	1.077	0.971	1.057	0.961
25	1.068	0.955	1.092	0.963	1.068	0.969	1.079	0.967
30	1.076	0.959	1.107	0.961	1.061	0.968	1.079	0.969
35	1.077	0.960	1.109	0.964	1.058	0.966	1.091	0.972
40	1.072	0.959	1.121	0.961	1.051	0.964	1.121	0.977

### 2.4 微地貌侵蚀发育阶段的划分

水系分维  $D$  值的大小可以反映水系所处流域地

貌的侵蚀发育程度。据此,李后强<sup>[19]</sup>、何隆华<sup>[14]</sup>等人提出了有关流域地貌侵蚀发育阶段的划分方法,即  $D$

$\leq 1.6$ 、 $1.6 < D \leq 1.89$ 、 $1.89 < D \leq 2.0$  时,流域地貌分别处于侵蚀发育阶段的幼年期、壮年期和老年期。按照此划分标准,黄土 AB 坡面在各侵蚀阶段均处于侵蚀发育的幼年期,水系还未充分发育,尚有较强的侵蚀发育趋势,这与张建兴等<sup>[20]</sup>人的结论相符。

为进一步说明微地形河网水系的复杂与密集状况,本文选取了地表粗糙度、地形起伏度、地形指数、河网密度等 4 个地形因子进行了研究(表 3)。结果表明,随着降雨和侵蚀类型的发展与演变,黄土 AB 坡面地表粗糙度与地形起伏度均呈现出下降的趋势,说明降雨对微地形具有一定的削减效应;地形指数呈现升高的趋势,表明降雨径流对地表土壤颗粒迁移的影响越大,坡度越趋缓;河网密度整体上变化不大,这也进一步说明了微地形水系尚未完全发育。

表 3 不同侵蚀阶段的典型地形因子

地形因子	降雨前 阶段 BR	溅蚀阶段 SpE	片蚀阶段 ShE	细沟侵蚀 阶段 RE
地表粗糙度	1.0240	1.0212	1.0208	1.0173
地形起伏度	0.0128	0.0107	0.0104	0.0106
地形指数	0.6830	0.8497	0.9363	0.9460
河网密度	48.4066	48.1821	48.3533	48.4844

### 3 结论与讨论

本文采用分段降雨的方法,通过计算各个不同侵蚀阶段的分维值,实现对黄土 AB 坡面河网分维特征的试验研究。从研究结果可知,D8 算法可成功应用于黄土 AB 坡面微地形河网的提取中,该方法可对有关微地形河网水系的研究提供参考和借鉴。在河网提取过程中,集水面积阈值对河网提取的密集和分级均有重要的影响,集水面积阈值的设定是其关键。

水系的分维数反映了河网水系分布的复杂程度或水系的发育程度。从相关系数的计算结果可以看出,黄土 AB 坡面微地形河网结构的形态特征具有明显的分形特征,其分维可作为表征微地形河网特征的定量指标,而采用传统的格网法用于计算黄土 AB 坡面微地形的分维值是可行的。此外,能否采用基于 Horton 定律的分维计算方法来进行其他耕作坡面水系的提取,以及水系发育程度的判断,有待进一步研究探讨。

黄土 AB 坡面微地形在实验各侵蚀阶段的分维值  $D \leq 1.6$  且  $[1.051, 1.121]$ ,均处于侵蚀发育的幼年期,水系尚未充分发育。是否可按照分维值为  $1.05 \sim 1.07$ 、 $1.08 \sim 1.12$ 、 $1.12 \sim 1.60$  进一步将微地形划分为侵蚀发育的幼年前期、幼年中期和幼年后期,还需进一步深入探索和研究。

#### 参考文献:

- [1] Mandelbrot B B. How long is the coast of Britain? Statistical self-similarity and fractional dimension[J]. Science, 1967, 156(3775): 636-638.
- [2] Mandelbrot B B. The Fractal Geometry of Nature[M]. San Francisco: Freeman, 1982.
- [3] 王桥, 毋海. 地图信息的分形描述与自动综合研究[M]. 武汉: 测绘科技大学出版社, 1998.
- [4] 吕爱锋, 陈嘻, 王纲胜. 基于 DEM 的流域水水分维估算方法探讨[J]. 干旱区地理, 2002, 25(4): 315-320.
- [5] 菊春燕, 刘志辉, 周绪, 等. 干旱、半干旱地区水系空间分布的分形特征及其流域环境的初步探讨[J]. 水土保持研究, 2006, 13(3): 174-176.
- [6] Rosso R, Bacchi B, La Barbera P. Fractal relation of main stream length to catchment area in river networks[J]. Water Resources Research, 1991, 27(3): 381-387.
- [7] 张捷, 包浩生. 分形理论及其在地貌学中的应用: 分形地貌学研究综述及展望[J]. 地理研究, 1994, 13(3): 104-112.
- [8] 江滔, 王伟, 刘洪斌. 基于 DEM 的重庆市长江流域水水分维估算[J]. 中国农学通报, 2010, 26(15): 365-368.
- [9] 宋向阳, 吴发启. 几种插值方法在微 DEM 构建中的应用[J]. 水土保持研究, 2010, 17(5): 45-50.
- [10] 孟庆香, 刘国彬, 杨勤科. 基于 GIS 的黄土高原气象要素空间插值方法[J]. 水土保持研究, 2010, 17(1): 10-14.
- [11] 薛海, 孔纯胜, 熊秋晓, 等. 坡面沟蚀及其分形特性试验研究[J]. 人民黄河, 2008, 30(12): 90-92.
- [12] 赵龙山, 张青峰, 梁心蓝, 等. 基于 GIS 的坡耕地数字高程模型的建立与应用[J]. 农业工程学报, 2010, 26(11): 317-322.
- [13] 叶爱中, 夏军, 王纲胜, 等. 基于数字高程模型的河网提取及子流域生成[J]. 水利学报, 2005, 36(5): 1-9.
- [14] 何隆华, 赵宏. 水系的分形维数及其含义[J]. 地理科学, 1996, 16(2): 124-128.
- [15] 曾超, 赵景峰, 李旭娇. GIS 支持下岷江上游水文特征空间分析[J]. 水土保持研究, 2011, 18(3): 5-9.
- [16] 丰满, 张征, 朱凌, 等. 基于 DEM 的滇池流域水系提取及分维值探讨[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(12): 11-14.
- [17] Playan E, Faci J M, Serreta A. Modeling microtopography in basin irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, 1996, 122(6): 339-346.
- [18] 李鹏, 李占斌, 郑良勇. 黄土坡面水蚀动力与侵蚀产沙临界关系试验研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2010, 18(3): 435-441.
- [19] 李后强, 艾南山. 分形地貌学及地貌发育的分形模型[J]. 自然杂志, 1991, 15(7): 516-519.
- [20] 张建兴, 马孝义, 赵文举, 等. 黄土高原重点流域河网分形特征研究[J]. 泥沙研究, 2008(5): 9-14.