

# 陕西省延安市燕沟流域水系分形与地貌侵蚀发育研究

张艳如<sup>1,3</sup>, 李国庆<sup>1,2</sup>, 刘冠<sup>2,4</sup>, 鲁奇<sup>2,4</sup>, 杜盛<sup>1,2</sup>

(1.中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100;

2.西北农林科技大学 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;

3.中国科学院大学, 北京 100049; 4.西北农林科技大学 林学院, 陕西 杨凌 712100)

**摘 要:**为验证分形维数法与传统地貌法判断地貌侵蚀发育阶段是否一致,基于 DEM 数据提取陕西省延安市燕沟流域水系结构图,利用网格法计算燕沟流域水系分形维数,利用高程面积曲线法刻画了该流域的地貌侵蚀发育阶段。结果显示:燕沟流域水系长度为 61.6 km,水系密度为 1.29 km/km<sup>2</sup>,水系数量为 109 条,燕沟流域水系的分形维数为 0.98,高程曲线下面积为 0.497。由此可以得出,燕沟流域地貌处于侵蚀发育的壮年期,需要加强该地区水土流失治理;分形维数阈值判断方法忽略了面蚀在地貌侵蚀过程中的作用,它将低估该地区地貌发育程度,因此利用水系分维值推断地貌侵蚀发育阶段的阈值需要更改。

**关键词:**分形维数; 侵蚀; 面积高程积分值; 燕沟流域; 水系

**中图分类号:**P331.3; P931.6; S157.1

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2022)02-0007-04

## Fractal Characteristics of Water System and Geomorphic Erosion Development of Yangou Basin in Yan'an City of Shaanxi Province

ZHANG Yanru<sup>1,3</sup>, LI Guoqing<sup>1,2</sup>, LIU Guan<sup>2,4</sup>, LU Qi<sup>2,4</sup>, DU Sheng<sup>1,2</sup>

(1.Institute of Soil and Water Conservation, CAS&MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest

A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3.University of Chinese Academy of Sciences,

Beijing 100049, China; 4.College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** In order to verify whether the fractal dimension method is consistent with the traditional geomorphic method in judging the development stage of geomorphic erosion, we extracted the water system structure map of Yangou Basin in Yan'an City, Shaanxi Province based on digital elevation model. The fractal dimension value of the water system was calculated by grid method, and the development stage of geomorphic erosion in the basin was described by hypsometric integral curve method. The results show that the length of water system is 61.6 km, the density of water system is 1.29 km/km<sup>2</sup>, the number of water system is 109, the fractal dimension value of the basin is 0.98, and the area under the hypsometric integral curve is 0.497. The geomorphy of the Yangou Basin is in the prime stage of erosion development. It is necessary to strengthen the control of soil and water loss in this basin. The method of fractal dimension threshold in determining the erosion stage ignores the role of surface erosion in the process of geomorphic erosion, and it will underestimate the degree of geomorphic erosion development in this area. Therefore, the threshold value of fractal dimension should be modified when it is used to infer the development of geomorphic erosion.

**Keywords:** fractal dimension; erosion; hypsometric integral value; Yangou Basin; water system

水系是水文地质环境的重要研究参数,对土壤侵蚀、水文过程及地貌发育等有重要的影响。1967 年

Mandelbrot<sup>[1]</sup>在研究英国海岸线长度时,首次将分形分维理论应用到水文学中。之后水系的分形分维受

收稿日期:2021-01-24

修回日期:2021-04-15

资助项目:国家重点研发计划(2017YFC0504601);国家自然科学基金(31971488)

第一作者:张艳如(1990—),女,吉林双辽人,博士研究生,研究方向为流域生态学。E-mail:Yanruzhang0119@163.com

通信作者:李国庆(1983—),男,江苏连云港人,副研究员,博导,主要从事植被恢复与 GIS 模拟研究。E-mail:liguoqing@nwsuaf.edu.cn

到大量学者的重视,并在世界各地得到广泛的应用<sup>[2-6]</sup>,为定量描述地貌形态特征提供了新的方向。

研究流域的水系分形,不仅能刻画流域水系的一般结构特征,还可以预测地貌侵蚀发育趋势<sup>[7]</sup>。何隆华等<sup>[8]</sup>根据专家经验的方法建立了判别地貌侵蚀发育的分维数阈值,将流域地貌侵蚀发育划分成 3 个阶段(幼年期、壮年期、老年期),该阈值划分标准受到广泛的应用。但该标准从提出开始就很少与传统地貌学判断方法(如高程面积积分法)<sup>[9]</sup>进行比较。

为验证何隆华等<sup>[8]</sup>分形阈值方法与传统地貌方法判断地貌侵蚀发育阶段相一致性,本研究以陕西省延安市燕沟流域为例,利用 DEM 数据提取水系数据,利用计盒维数<sup>[4]</sup>刻画分形特征,采用何隆华等<sup>[8]</sup>建立的分形维数阈值及传统方法判定流域地貌侵蚀的发育阶段,并探讨两者差异的原因,为科学合理地利用分形方法研究流域侵蚀发育提供案例参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

燕沟流域位于 109°26′—109°35′E, 36°26′—36°34′N, 沟口距延安市 3 km, 属延河二级支流, 呈东南—西北流向, 流域总面积约为 47 km<sup>2</sup>。海拔 962~1 402 m。流域处于暖温带半湿润气候向半干旱气候过渡。多年平均(1997—2007 年)气温为 9.8℃, 多年平均(1951—2006 年)降雨为 532.3 mm<sup>[10]</sup>。土壤主要为黄绵土, 约占 90%, 土质疏松, 抗侵蚀能力差。

### 1.2 数据来源

本文数字高程数据来源于地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn/>), 空间分辨率为 30 m×30 m 的 ASTER GDEM 数据。ASTER 数据覆盖范围为 83°N—83°S, 其垂直精度 20 m, 水平精度 30 m。

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 水系提取和水系分维数计算

(1) 利用燕沟流域的边界去裁切 DEM 数据, 获取燕沟流域的 DEM 数据。按照 ArcGIS 水文模块提取水系的要求, 首先对 DEM 进行填洼, 再次进行流向、流量计算。

(2) 水系的确定需要最佳流量阈值。最佳阈值的确定方法有很多种, 比如水系密度与集水面积阈值关系曲线法<sup>[11]</sup>、平均坡降与集水面积阈值关系曲线法<sup>[12]</sup>、遥感影像法<sup>[13]</sup>、试错法<sup>[14]</sup>等。这里采用水系密度与集水面积阈值关系曲线法<sup>[11]</sup>实现, 步骤如下: 设置一系列集水面积梯度(阈值), 为 50, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1 000 个栅格(每个栅格大小为 30 m×30 m), 分别提取对应的水系结构

并计算水系密度。利用前 3 个阈值和后 4 个阈值分别拟合水系密度和阈值的线性函数。两条拟合直线的交点即为拐点, 对应最优阈值(集水面积)。据此阈值确定燕沟流域的水系结构。

(3) 水系分形维数的估计采用计盒维数的方法<sup>[4]</sup>, 即用不同边长( $r$ )的正方形网格覆盖上一步获取的水系结构, 统计被水系占据的网格数量( $N$ )。计盒维数通过如下公式计算:

$$\ln N = -D \ln r + A \quad (1)$$

式中:斜率  $D$  为水系的计盒维数值; $A$  为常数; $r$  为网格边长(范围为 30~600 m, 间隔为 30 m 的向量, 即 1~20 个栅格大小); $N$  为水系占据的网格数量。

1.3.2 地貌侵蚀发育判断标准 基于分维数的数值, 何隆华等<sup>[8]</sup>建立了一套划分流域地貌侵蚀发育的判断标准, 即水系分维值  $D \leq 1.6$  时, 流域地貌处于侵蚀发育的幼年阶段; 水系分维值  $1.6 < D \leq 1.89$ , 流域侵蚀发育处于壮年期; 水系分维值  $1.89 < D \leq 2.0$  时, 流域侵蚀发育处于老年阶段。

为了验证分形维数阈值的判断方法的合理性, 本研究还采用地貌方法判断流域侵蚀发育程度。地貌学的判断方法较多, 例如积分曲线法<sup>[15]</sup>、体积比例法<sup>[9]</sup>以及起伏比法<sup>[16]</sup>等。各种地貌学判断的方法在过去的评估中一般都会得出一致的结果<sup>[17-18]</sup>, 因此, 本文只采用一种方法(积分曲线方法)。具体计算过程如下:

设流域面积为  $A$ , 流域内某等高线以上面积为  $a$ , 该等高线与流域最低点的差值为  $h$ , 流域最高点与流域最低点的高差为  $H$ , 设,  $X = \frac{a}{A}$ ,  $Y = \frac{h}{H}$ 。以  $X$  为横坐标,  $Y$  为纵坐标, 绘出高程面积曲线, 曲线下方与坐标轴间的面积即为高程面积积分值(HI)。据此数值, Strahler<sup>[17]</sup>将地貌侵蚀发育分为 3 个阶段: 当  $HI > 0.6$  时, 地貌处于侵蚀发育幼年期; 当  $0.35 < HI < 0.6$  时, 地貌处于侵蚀发育壮年期; 当  $HI < 0.35$  时, 地貌处于侵蚀发育老年期。

## 2 结果与分析

### 2.1 最优流量阈值和水系结构

根据设置的 11 个集水面积阈值, 计算出对应的水系密度, 范围为 0.68~2.61 km/km<sup>2</sup>。水系密度与集水面积阈值关系的拟合结果见图 1A, 结果表明拐点位于 286 个栅格, 该位置就是最优面积阈值。利用该数值, 确定的燕沟流域水系结构如图 1B 所示, 表明水系长度为 61.6 km, 水系密度为 1.29 km/km<sup>2</sup>, 水系数量 109 条。

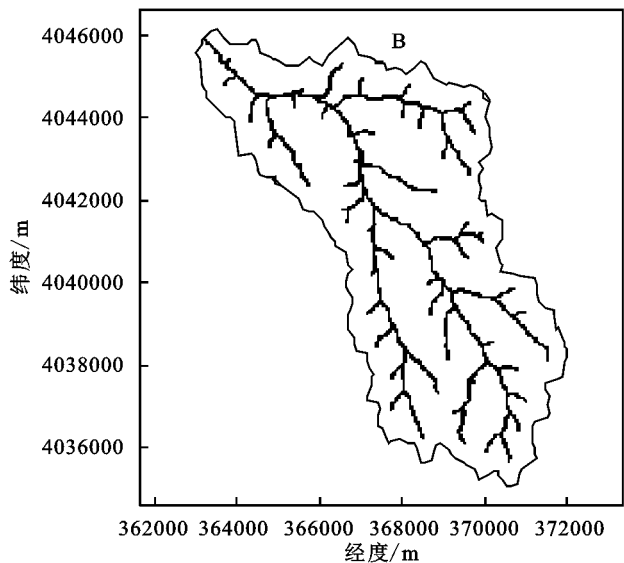
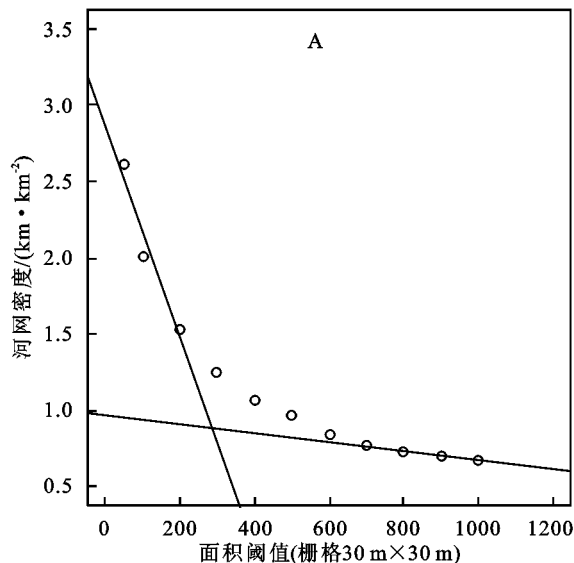


图 1 燕沟流域最优阈值及对应水系结构

## 2.2 水系分形维数与地貌侵蚀发育

本文利用网格法得到燕沟流域的水系分形维数(图 2A),拟合的线性较强( $R^2=0.99$ ,  $p<0.05$ ),这表明燕沟流域水系的分形维数为 0.98。根据何隆华等<sup>[8]</sup>的判断标准,认为燕沟流域处于地貌侵蚀发育的幼年期。

利用高程面积积分曲线法进行验证,获得燕沟流域高程面积曲线(图 2B),经计算燕沟流域的曲线下面积(HI)为 0.497。据此,可以判段燕沟流域处于地貌侵蚀发育壮年阶段。这表明高程面积积分曲线法与何隆华等<sup>[8]</sup>提出的分形阈值方法的判断结果不同。

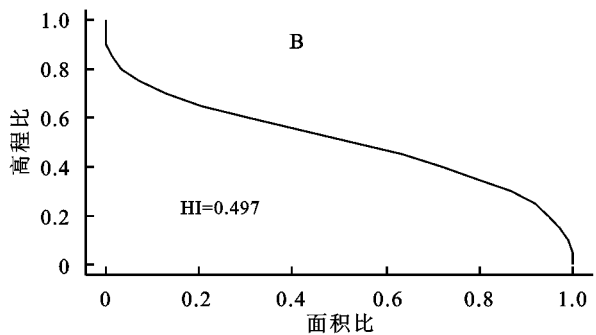
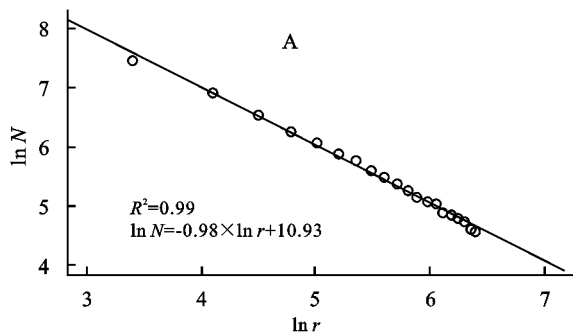


图 2 燕沟流域  $\ln r$  与  $\ln N$  拟合曲线以及高程面积积分曲线

## 3 讨论

本研究以延安市燕沟流域为例,计算了燕沟流域水系的分形维数,得到计盒维数数值为 0.98。这与黎武等<sup>[19]</sup>使用同种方法计算出来的黄土丘陵区大流域(如延河流域)水系分形值的数值 1.042 近似;明显小于张建兴等<sup>[7]</sup>计算出的延河流域水系的分形值为 1.259。水系的分形值一般被认为与流域的地貌侵蚀发育有关,这意味着燕沟流域的地貌侵蚀发育小于或近似等于延河流域的侵蚀发育程度。以张建兴<sup>[7]</sup>和黎武<sup>[19]</sup>等的平均值(1.151)推算,燕沟流域的地貌整体侵蚀强度可能仅仅是延河流域地貌整体侵蚀强度的 85%,同时意味着流域地貌侵蚀强度具有等级差异性,如流域的上、中、下游地貌侵蚀发育强度可能不同。

处于地貌侵蚀发育的幼年期。该定性的判断与大多数基于该方法的判断结果一致。如张建兴<sup>[7]</sup>和黎武<sup>[19]</sup>等对延河流域水系分形值的计算虽然大于燕沟流域,但仍然被判定为幼年期。虽然利用同种方法得出相似的结论,但并不能保证该阈值划分标准是适用于黄土高原地区。

我们通过传统的地貌学方法(高程面积积分法)对燕沟流域侵蚀发育计算曲线下面积,得到的数值为 0.497,判定燕沟流域处于侵蚀发育的壮年期。王汝兰等<sup>[15]</sup>在利用传统地貌方法判断延河流域的侵蚀发育阶段时,得到延河流域的 18 条支流的曲线下面积介于 0.42~0.56,也认为是该流域属于壮年期。从燕沟流域的研究以及黄土丘陵区的其他相关案例的研究中,可以得出何隆华等<sup>[8]</sup>提出的分形阈值判断地貌侵蚀方法将低估黄土丘陵区流域侵蚀地貌的发育程

依据何隆华等<sup>[8]</sup>提出的阈值划分标准,燕沟流域

度。赵越等<sup>[20]</sup>在浙江省西北部钱塘江流域地貌发育的研究中,也认为何隆华等<sup>[8]</sup>提出的分形阈值判断方法将严重低估流域的侵蚀发育阶段。

是什么原因导致分形维数阈值判断方法低估流域地貌侵蚀程度呢?赵越等<sup>[20]</sup>认为何隆华等<sup>[8]</sup>所研究的数据是全国范围,所得到的划分标准可能不适用于小流域尺度。除此之外,本研究认为基于流域水系的分形维数可能仅反映了地貌侵蚀的沟蚀方面,而无法反映流域地貌面蚀及溅蚀的维度<sup>[21]</sup>;而在传统的地貌判断方法中,能全面地描述沟蚀、面蚀和溅蚀 3 个方面重要内容,能准确地刻画流域土壤侵蚀量的大小。在沟蚀占主导地位的区域,分形维数阈值判断方法可能适用,而在面蚀占主导地位的区域,分形维数阈值判断方法可能不适用。

由于黄土疏松、易于侵蚀,面蚀在黄土高原的总侵蚀中占据较大的比重<sup>[22]</sup>,因此,基于流域水系的分形维数判定方法在黄土高原的研究中可能总会低估流域地貌侵蚀的发育程度。认为基于何隆华等<sup>[8]</sup>提出的阈值划分标准在黄土高原流域的研究中可能不具有普适性,阈值划分标准需要被修正。

## 4 结 论

(1) 利用 DEM 和 GIS 提取水系特征的方法,快捷有效,利用此方法可为研究区的水土保持工作提供参考依据。

(2) 燕沟流域水系的分形维数数值为 0.98,高程面积曲线下面积为 0.497,燕沟流域地貌处于侵蚀发育的壮年期,需要加强该地区水土流失治理。

(3) 利用何隆华等<sup>[8]</sup>的阈值划分标准判定地貌侵蚀发育阶段的方法在黄土高原地区并不适用,它将低估该地区地貌发育阶段,阈值划分标准需要被修正。

### 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: 636-638.
- [2] Shreve R L. Infinite topologically random channel networks[J]. Journal of Geology, 1967, 75(2): 178-186.
- [3] Rosso R, Bacchi B, Barbera P L. Fractal relation of main-stream length to catchment area in river networks[J]. Water Resources Research, 1991, 27(3): 381-387.
- [4] 冯平,冯焱.河流形态特征的分维计算方法[J].地理学报, 1997, 52(4): 38-44.
- [5] 李华晔,黄志全,姜彤.河流水系分形的初步研究[J].华北水利水电学院学报, 1998, 19(4): 37-39.
- [6] 蔡凌雁,汤国安,熊礼阳,等.基于 DEM 的陕北黄土高原典型地貌分形特征研究[J].水土保持通报, 2014, 34(3): 141-144, 329.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 常直杨,王建,白世彪,等.面积高程积分值计算方法的比较[J].干旱区资源与环境, 2015, 29(3): 171-175.
- [10] 张良德.黄土丘陵区燕沟流域刺槐细根分布特征研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学, 2011.
- [11] 张树君,朱勤东. GIS 环境下泾河流域水系特征的提取及探讨[J].人民黄河, 2014, 36(10): 55-57.
- [12] 林靛靛,毕华兴,刘鑫,等.基于 DEM 的流域地貌气候瞬时单位线地貌参数的提取[J].中国水土保持科学, 2007, 5(5): 5-10.
- [13] 常周梅,胡建桥,张丽娟.基于 DEM 的青海省西宁市地区河网流域特征自动提取[J].水利与建筑工程学报, 2016, 14(4): 31-35.
- [14] 张鹏举,孟宪萌,周宏,等.不同集水面积阈值确定方法在典型黄土侵蚀地貌的适用性分析[J].水电能源科学, 2019, 37(8): 26-29.
- [15] 王汝兰,蒲阳,罗明良,等.延河流域地貌发育阶段的定量分析[J].干旱区资源与环境, 2018, 32(7): 172-179.
- [16] 邵崇建,李勇,赵国华,等.基于面积-高程积分对龙门山南段山前河流的构造地貌研究[J].现代地质, 2015, 29(4): 727-737.
- [17] Strahler A N. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography[J]. Geological Society of America Bulletin, 1952(63): 1117-1142.
- [18] 张威,唐倩玉,刘亮,等.基于面积—高程积分的他念他翁山玉曲流域地貌学分析[J].地理科学, 2020, 40(8): 1394-1402.
- [19] 黎武,王汝兰,徐珍,等.基于 DEM 的延河流域河网水系分形特征研究[J].安徽农学通报, 2017, 23(5): 121-124.
- [20] 赵越,吴涛,李凤全,等.基于分形维数的钱塘江流域地貌发育研究[J].绿色科技, 2015(11): 9-11, 16.
- [21] 张翼.黄土高原丘陵沟壑区土壤侵蚀研究[J].水土保持研究, 2000, 7(2): 39-47.
- [22] 朱显谟.黄土区土壤侵蚀的分类[J].土壤学报, 1956, 4(2): 99-115.