引用格式:曹建军,汤国安,方炫,等.基于地形剖面的黄土塬梁峁地形各向异性奇异强度研究[J].地球信息科学学报,2020,22(3):442-451. [Cao J J, Tang G A, Fang X, et al. Study on the singularity strength of topographic anisotropy of loess tableland, ridge, hill in Loess Plateau based on terrain profile[J]. Journal of Geo-information Science, 2020,22(3):442-451.] **DOI:**10.12082/dqxxkx.2020.190555

基于地形剖面的黄土塬梁峁地形各向异性奇异强度研究

曹建军[1,2],汤国安[2],方　炫[1,2],刘永娟[1],那嘉明[2],朱　莹[1],李金莲[1]

1. 南京晓庄学院环境科学学院,南京 211171; 2. 虚拟地理环境教育部重点实验室(南京师范大学),南京 210023

Study on the Singularity Strength of Topographic Anisotropy of Loess Tableland, Ridge, Hill in Loess Plateau based on Terrain Profile

CAO Jianjun[1,2*], TANG Guoan[2], FANG Xuan[1,2], LIU Yongjuan[1], NA Jiaming[2], ZHU Ying[1], LI Jinlian[1]

1. School of Environmental Science, Nanjing Xiaozhuang University, Nanjing 211171, China;

2. Key Laboratory of Virtual Geographic Environment (Nanjing Normal University), Nanjing 210023, China

Abstract: The characteristics of topographic relief variation are diverse from one landform type to another in the Loess Plateau. Great differences of topographic relief variation exist in different directions, which is known as topographic anisotropy. As fractal theory and geomorphology research become increasingly cooperative, Multifractal Detrended Fluctuation Analysis (MF-DFA) method, an effective means to quantitatively describe the nonlinear evolution process of complex sequences and the self-similar structural features formed by nonlinear evolution processes, manifests great potential in the study of topographic anisotropy of different landforms. In this paper, multifractal spectrum parameters were introduced to describe the variation characteristics of topographic anisotropy, in order to illustrate the local and global variation pattern of topographic anisotropy of different loess landforms. Based on 5 m-resolution Digital Elevation Model (DEM) data, three typical areas, Chunhua County of loess tableland, Ganquan County of loess ridge and Suide County of loess hill, were selected as the study areas. After that, MF-DFA of the variation characteristics of topographic anisotropy were conducted on these three areas. The results show that the topographic anisotropy of the three loess landform types has significant multifractal characteristics. The singularity strength of the topographic anisotropy from strong to weak turns out to be in the order of Chunhua, Suide and Ganquan counties. The probability of the singularity strength of topographic anisotropy in Chunhua County reaches the maximum at singular strength of 1.4, and there is a small peak around the singularity strength of 2.2. The probability of the singularity strength of topographic anisotropy in Ganquan County reaches the maximum at singularity strength of 0.7, with a second peak around the singularity strength of 1.8. Differently, the singularity strength of topographic anisotropy in Suide County is evenly distributed around 0.8, reaching the maximum at singularity strength of 0.8. The overall singularity strength of Chunhua and Ganquan counties are 1.4 and 0.7 respectively, while the probability distribution of topographic anisotropy in Suide County appears symmetrically. It can be concluded that the singularity strength of the topographic anisotropy is the highest in loess tableland, followed by that in loess hill. The singularity strength of the topographic anisotropy is the smallest in loess ridge. The results confirm that

收稿日期:2019-09-27;**修回日期:**2019-12-08.

基金项目:国家自然科学基金项目(41930102、41871313、41671389)。[**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China, No.41930102, 41871313, 41671389.]

作者简介:曹建军(1976—),男,陕西延安人,博士后,主要从事地形空间关系研究。E-mail: jjcao@njnu.edu.cn

multifractal singularity strength is an effective method for the description and analysis of the topographic anisotropy of loess landforms, e.g., tableland, ridge and hill. This study can provide quantitative information support for the accurate classification of loess landforms as well as topographic indicators for regional water and soil erosion assessment.

Key words: topographic anisotropy; singularity strength; terrain profile; topographic relief; MF-DFA; probability distribution; loess landforms; Loes Plateau

***Corresponding author:** CAO Jianjun, E-mail:jjcao@njnu.edu.cn

摘要：黄土高原不同地貌类型对应的地形起伏变化特征各不相同，地形起伏在不同方向上的变化特征具有很大差异性，即地形各向异性。本文引入多重分形谱参数描述不同地貌类型地形各向异性的变化规律，以反映不同黄土地貌地形各向异性的局部和整体变化格局。本研究以5 m分辨率的DEM数据为基础，选取淳化、甘泉、绥德3个典型黄土塬梁峁地貌类型研究样区，对其地形各向异性的变化特征进行分析。研究表明：①3种黄土地貌类型地形各向异性变化具有显著的多重分形特征，地形各向异性变化的奇异强度由强到弱依次为淳化、绥德、甘泉；②淳化样区地形各向异性奇异强度在1.4的概率最大，在奇异强度为2.2附近又有一个小的峰值，总体以奇异强度1.4为主；③甘泉样区的奇异强度在1.8有一个小的峰值，总体以奇异强度0.7为主；④绥德样区奇异强度为0.8的概率最大，且较为均匀地分布在0.8附近，地形各向异性的概率分布呈现为对称分布。研究结果为黄土塬梁峁地形各向异性变化奇异强度为黄土塬最大，黄土峁次之，黄土梁最小。该研究可为黄土地貌的精确分类提供定量信息支持，为区域水土侵蚀评价提供地形指标。

关键词：地形各向异性；奇异强度；地形剖面；地形起伏；多重分形去除波动趋势分析；概率分布；黄土地貌；黄土高原

1 前言

黄土高原水热条件由南到北具有明显的分异规律，导致其各种自然景观从南到北逐渐分化。因此黄土高原地形地貌也自南向北有序变化[1-2]，塑造成了黄土塬、梁、峁[3-4]以及各种等级沟壑为主的独特地理景观。在长期的内外动力作用下，不同地貌类型的黄土地表呈现出地形起伏、沟谷发育等在不同方向上具有很大差异性，即地形各向异性。黄土地貌实际的地形表面是一个各向异性、非线性、非平稳的三维场，在不同地貌类型和不同划分维度下的地形剖面，能够比较分析不同黄土地貌类型地形各向异性变化规律，能够为黄土地貌形成与变化规律以及地貌空间分异研究提供一定的评价标准。

黄土地貌的非线性和非稳定性等特征使之成为基于DEM数字地形分析的热点区域。黄土地貌数字地形分析通过提取各类地形因子、地形特征点以及特征地形要素，对其进行数理统计、建模分析，从而研究其中各种要素间的相互关系及空间分异规律[5-8]。卢昱铭等[9]将地统计学相关的理论函数和数字地形分析方法相结合，对比分析黄土高原丘陵沟壑区空间频率组合变异函数的拟合模型，得到黄土高原地形空间频率层次性在各个样区的空间分异特征。仝迟鸣等[10]基于DEM数据，提取坡度小于15°的正地形，计算剖面平均坡度、沟壑密度等5个指标，对其进行等级划分，完成对黄土塬的不同发育阶段的划分。朱洪芬等[11]基于空间多尺度关系理论，分析黄土高原太原盆地区的土壤养分资源的空间分布特征，采用多元经验模态分解方法，揭示太原盆地区土壤养分与相关影响因子的空间多尺度关系。上述研究方法都运用了一定的数理结合的方法，定量地揭示了黄土地貌的空间分异特征，但在样区选择即黄土地貌的类型研究上比较单一。张苏等[12]采用小波分析和半方差函数分析方法，得到不同黄土地貌类型地理景观图谱的谱线峰值与谷值出现特征及其组合情况呈现显著差异，为黄土高原典型地貌景观的空间格局及空间分异规律提供重要的理论支撑。刘逸文等[13]用点格局分析方法，提取山顶点、鞍部点、径流节点等地形特征点，分析地形特征的空间结构特征，为地形特征结构和模式研究奠定重要的基础。张磊等[14]筛选不同尺度和对象的地形因子，演绎归纳得到了能够描述黄土地貌形态格局的核心地形因子，实现了黄土地貌类型的区域划分。周毅等[15-17]采用融合汇流特征与坡面形态的方法提取黄土地貌的正负地形，从流域单元尺度和区域尺度对黄土地貌正负地形特征及其空间分异规律进行了深入的探索，为黄土地貌形态参数描述和现代沟谷侵蚀发育提供了科学基础。这些研究在一定程度上对于黄土地貌空间分异与类型划分都做出了卓越的贡献，对于黄土地

貌空间分异与类型的划分主要聚焦于宏观的尺度单元，黄土小流域尺度单元较少涉及，也没有涉及地形各向异性的问题。

分形理论是为了研究不规则的客观实体而诞生的，多重分形把一个复杂分形客体分成许多具有不同奇异强度的小个体来研究，从而能分层次地去了解分形客体的内部精细结构。多重分形现已广泛应用于土壤学[18]、风电场风速预测[19]、金融股票收益率评定[20]、医学病症发作期强度检测[21]等多个领域。随着分形理论的发展，分形与地貌研究的联系也非常紧密[22]，成为地貌学研究中重要的分析工具，对地貌学的研究具有重要的意义。目前对于塬梁峁不同类型黄土地貌的宏观形态与空间分异已经有很成熟的研究成果，但塬梁峁黄土地貌的精细结构特征，尤其是其在不同方向上的地形变化特征即地形各向异性问题还没有深入的研究。

本研究以不同方向和维度下的地形剖面数据为基础，采用多重分形消除趋势波动分析方法来研究塬梁峁不同黄土地貌地形各向异性问题。选取了研究样区的中心点为布设地形剖面的出发点，按照逆时针方向，从正东方向开始依次布设等角度的不同方向地形剖面，通过比较和分析不同方向地形剖面多重分形奇异强度的差异性，得到不同类型黄土地貌地形各向异性的变化强度，进而为黄土地貌类型的科学精细划分提供支持。

2 研究区概况、数据来源及研究方法

2.1 研究区概况

本研究选取黄土地貌最为典型的塬梁峁3种地貌类型的研究样区，按照黄土塬、黄土梁、黄土峁地貌类型，分别选取淳化、甘泉、绥德3个典型样区，为了能够科学评价不同地貌类型地形各向异性特征，3个典型样区的选择遵循了地貌类型的典型性、流域的完整性、地形特征的代表性，其样区空间位置分布如图1所示。

2.2 数据来源

研究数据DEM分辨率为5 m，1 m间隔等高线，在1:10 000地形图中生成。在ArcGIS中运用三维分析（3D Analyst）方法，在塬、梁、峁3种典型黄土地貌类型样区，依据地形各向异性在方向夹角为11°左右时具有较强的相似性的预实验结果，以矩形样区中心为出发点，以正东方向开始沿逆时针方向，

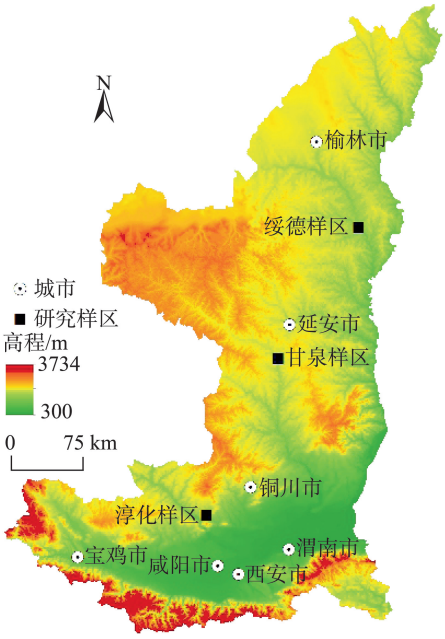


图1 黄土地貌塬梁峁地貌类型研究样区空间位置分布

Fig. 1 The study area and sampling sites of loess tableland, loess ridge and loess hill

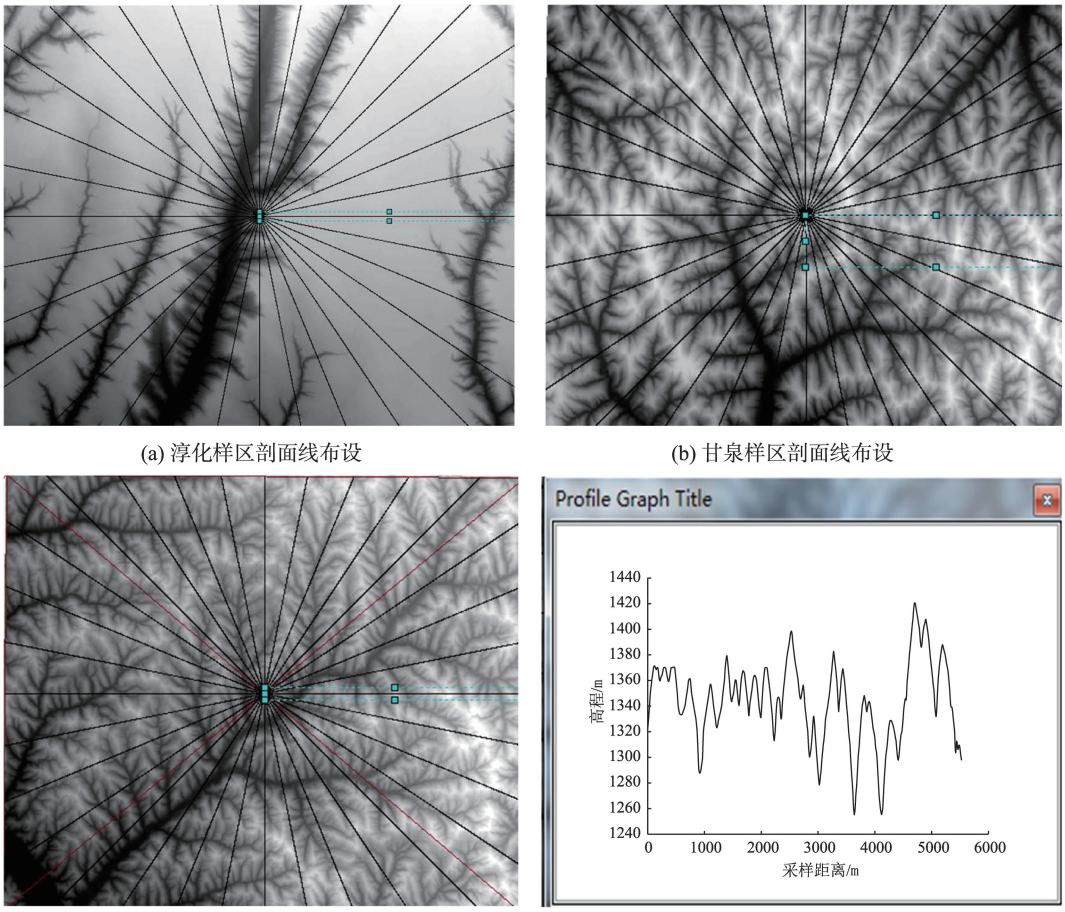
按照11.25°方位角的间隔布设地形剖面，每个样区布设了32条剖面，3个样区的地形剖面布设情况如图2所示。

2.3 研究方法

分形理论最初是由数学家曼德布罗特在研究英国海岸线长度的问题中引入统计自相似和分数维度而得出的概念。多重分形消除波动分析法（Multifractal Detrended Fluctuation Analysis，MF-DFA）是在消除趋势波动分析（Detrended Fluctuation Analysis，DFA）的基础上[23]，结合基于标准配分函数的多重分形体系发展起来的，DFA方法在去除各阶趋势成分上有显著效果，MF-DFA方法提高了度量非平稳序列波动奇异性的多重分形结构的精确性，克服了DFA方法的局限性，是一种能够定量描述复杂序列的非线性演化过程及其形成自相似结构特征的有效手段。在地貌学上，MF-DFA方法通过统计每个地形数据序列区间上波动的平均值，基于波动函数来定义Hurst函数，从而度量非平稳序列的结构和波动奇异性。设$\{x_i\}$是一个长度为N的数据序列。MF-DFA方法分以下6个步骤进行[24]：

（1）计算关于$\{x_i\}$的累积差值序列。

$$Y(i)=\sum_{k=1}^{i}[x_k-<x>] \tag{1}$$



(a) 淳化样区剖面线布设　　(b) 甘泉样区剖面线布设

(c) 绥德样区剖面线布设　　(d) 地形剖面

图2　黄土地貌塬梁峁地貌类型研究样区数据

Fig. 2　The data of loess tableland, loess ridge and loess hill

式中：i=1, 2, ⋯, N, $<x>$是$\{x\}$的平均值。

（2）把序列$Y(i)$分割成长度为s的$N_s=\mathrm{int}(N/S)$个互不相交的等长区间。因为序列的长度N通常不是给定长度s的整倍数，所以在分割的过程中，序列的末尾会保留一小段，为了不造成数据的遗漏，再将序列从末尾到头重复一遍这个分割过程，从而获得$2N_s$个等长的区间。

（3）用最小二乘拟合法求每个$2N_s$段均方误差

$$F^2(p,s)=\frac{1}{s}\sum_{i=1}^{s}\left\{Y\left[(p-1)s+i\right]-y_p(i)\right\}^2 \quad (2)$$

$$F^2(p,s)=\frac{1}{s}\sum_{i=1}^{s}\left\{Y\left[N-(p-N_s)s+i\right]-y_p(i)\right\}^2 \quad (3)$$

式中：y_p是第p个小区间上的拟合多项式；p是段的数量；s是长度尺度；F是方差。

（4）计算序列的q阶波动函数。

当q=0时，

$$F_q(s)=\exp\left\{\frac{1}{4N_s}\sum_{p=1}^{2N_s}\ln\left[F^2(p,s)\right]\right\} \quad (4)$$

当q为任意不等于0的实数时，

$$F_q(s)=\left\{\frac{1}{2N_s}\sum_{p=1}^{2N}\left[F^2(p,s)\right]^{q/2}\right\}^{1/q} \quad (5)$$

（5）使用几个不同的q值确定波动函数的标度指数。若在序列$\{x_i\}$中存在长距离相关，则$F_q(s)$和s符合一定的幂律关系，即符合

$$\log F_q(s)=\log \mathrm{C}+Hq\log s \quad (6)$$

式中：s是距离尺度；C是常数；Hq是波动函数的标度指数，即广义的Hurst指数。

因为Hurst指数是从全局衡量地形高程序列的波动，所以局部的高程序列波动可以用给定的位置周围的本地序列片段中执行Hq来计算估计Ht。

（6）计算q阶的质量指数tq、奇异性指数hq和分形维度Dq。

参数质量指数tq和Hurst指数Hq的关系如下：

$$tq = q \times Hq - 1 \tag{7}$$

用质量质素 tq 估计的 q 阶奇异性指数 hq 和分形维度 Dq 的关系如下：

$$hq = dtq/dq \tag{8}$$

$$Dq = tq/(q-1) \tag{9}$$

式中：hq 是用于描述时间序列中各个区间的奇异指数。

另外一种用于描述多重分形奇异性强度的方法是Dhq，定义为：

$$\Delta hq = hq\max - hq\min \tag{10}$$

式中：奇异性指数 hq 的最大值和最小值分别用 hqmax 和 hqmin 表示。

3 结果与分析

3.1 地形各向异性多重分形分析

图3(a)、图4(a)、图5(a)分别是淳化、甘泉和绥德研究样区地形各向异性变化选取的正东方向地形剖面的 q 阶波动函数，根据式(1)-(5)，完成分析的波动尺度函数最小二乘法拟合趋势图。设置波动阶数 q 分别为-5，0，5，分析尺度变化范围16~512，波动函数使用以2为底的对数。从图中可以看出淳化、甘泉和绥德3个样区的 q 阶波动函数 $F(q)$ 随波动阶数 q 的增大而增大，而赫斯特指数 Hq 即函数斜率却随着阶数 q 的增大而逐渐减小。由此可以初步判定，淳化、甘泉和绥德3个样区的地形剖面高程数据序列是具有多重分形结构特征的。在判断一个客体是否具有多重分形结构特征时，一个重要的标志就是在不同波动阶数下，分形客体的尺度函数的斜率是否具有不同的取值。波动阶数的取值很重要，一般的取值范围在(-10，10)，但对于地貌分形体，波动阶数取值范围只要在(-5，5)就可以了，如果取更大范围的值对于判断分形特征没有意义，这一点在前人的研究文献里有过证实。

图3(b)、图4(b)、图5(b)分别是淳化、甘泉和绥德研究样区地形各向异性变化选取的正东方向地形剖面，根据式(6)计算所获得的赫斯特指数关系图。从图中可以看出赫斯特指数 Hq 和波动阶数 q 成反比例函数，Hq 随着 q 的增大而减少，进一步证实之前的初步判断是正确的，即3个研究样区的地形剖面高程数据序列是具有多重分形结构特征的。在波动阶数 q 从-5到5逐渐增加的过程中，从图3(b)和表1中可以看出，淳化样区的赫斯特指数 Hq 从2.3105下降到了1.0371，其中的跨度为1.2734。从图4(b)和表1中可以看出，甘泉样区的赫斯特指数 Hq 从1.7256下降到了1.1946，其中的跨度为0.5310。从图5(b)和表1中可以看出，绥德样区的赫斯特指数 Hq 从1.704下降到了1.2435，其中的跨度为0.4605。结合表1，计算3个样区的平均局部赫斯特指数变化的跨度，可得淳化样区为1.2072，甘泉样区为0.6145，绥德样区为0.5583。即淳化样区的平均赫斯特指数 Hq 变化跨度最大，甘

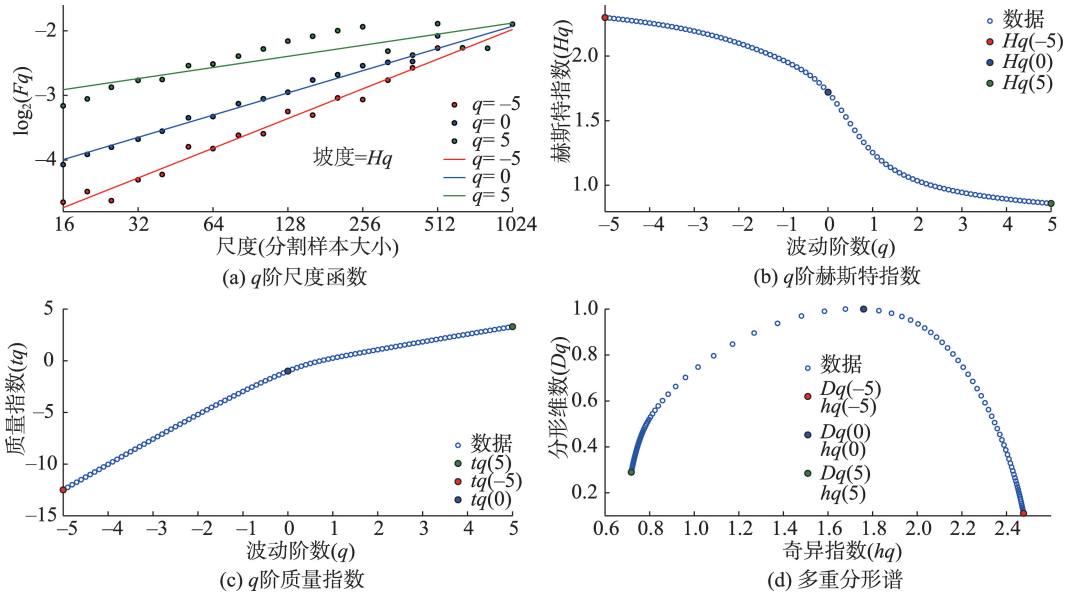


图3 淳化样区正东方向地形各向异性的多重分形分析

Fig. 3 Multi-fractal analysis of topographic anisotropy of the east terrain profile in Chunhua site

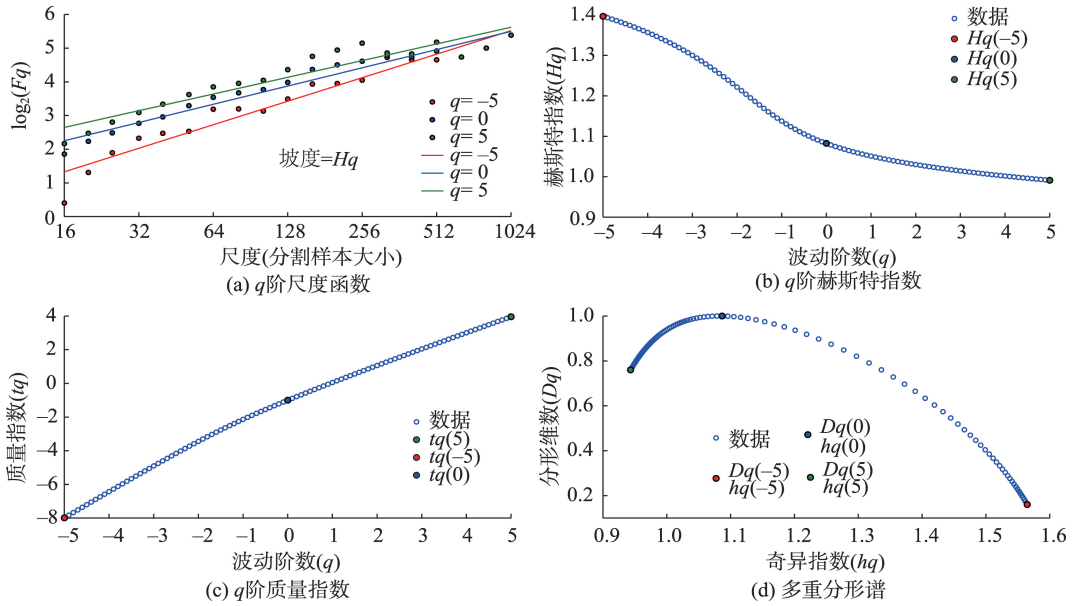


图4　甘泉样区正东方向地形各向异性的多重分形分析

Fig. 4　Multi-fractal analysis of topographic anisotropy of the east terrain profile in Ganquan site

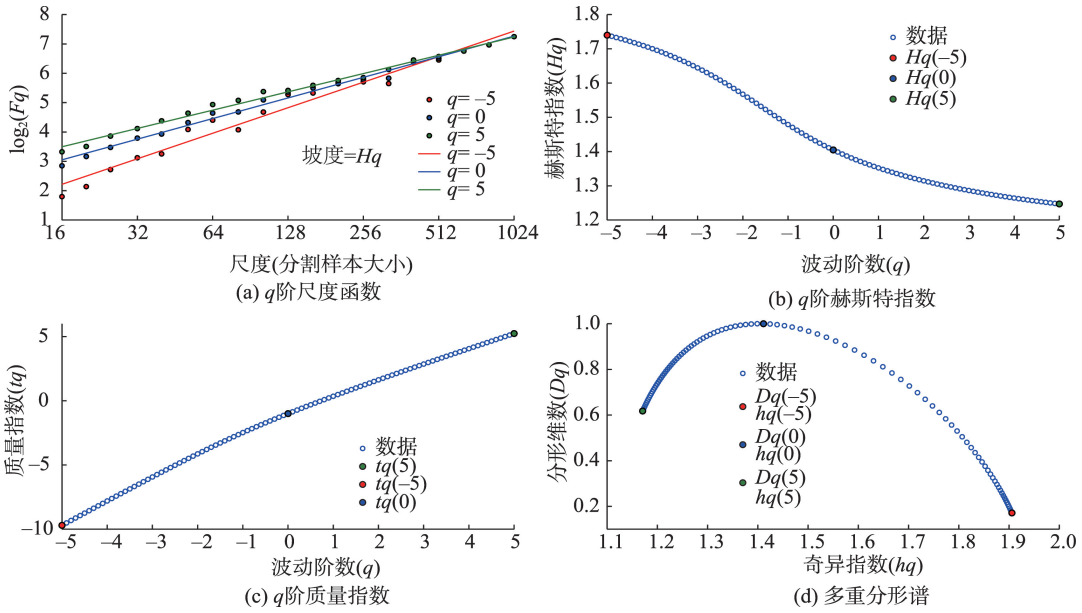


图5　绥德样区正东方向地形各向异性的多重分形分析

Fig. 5　Multi-fractal analysis of topographic anisotropy of the east terrain profile in Suide site

泉样区的平均赫斯特指数Hq变化跨度略高于绥德样区。这个结果显示3个样区的地形各向异性变化多重分形特征强度存在差异，其中多重分形特征强弱关系为淳化样区最强，甘泉样区次之，绥德样区最弱。

图3(c)、图4(c)、图5(c)分别是淳化、甘泉和绥德研究样区地形各向异性变化选取的正东方向的地形剖面，根据式(7)计算所得的质量指数tq和波动阶数q的关系图。从图中可以看出，质量指数tq和波动阶数q成正比关系，质量指数tq随阶数q的增大而增大，是一个明显的正比增长趋势，整体是一条上凸的非线性的曲线，这就进一步证明了3个研究样区地形剖面的变化具有多重分形结构特征。曲线上凸越大，表明多重分型客体的分形结构特征越显著，从图3(c)、图4(c)、图5(c)可以看出，3条曲线具有不一样的上凸程度。淳化样区的质量指数曲线上凸程度最大，甘泉样区的质量指数曲线上凸程度居中，绥德样区的质量指数曲线上凸程度

表1 研究样区地形各向异性MF-DFA分析参数

Tab. 1 Parameters of topographic anisotropy by multi-fractal analysis of the study sites

研究样区	剖面编号	波动阶数	质量指数	奇异指数	分形维数	赫斯特指数	奇异强度
淳化	1(东方向)	−5	−12.5525	2.4748	0.1787	2.3105	1.5594
		0	−1	1.7651	1	1.8008	
		5	4.1856	0.9154	0.3913	1.0371	
	9(北方向)	−5	−12.0216	2.3706	0.1686	2.2043	1.3519
		0	−1	1.5347	1	1.5633	
		5	4.6423	1.0186	0.4510	1.1285	
	17(西方向)	−5	−12.5910	2.5003	0.0893	2.3182	1.1683
		0	−1	1.7889	1	1.8079	
		5	6.1382	1.3320	0.5221	1.4276	
	25(南方向)	−5	−12.9688	2.6012	−0.0370	2.3938	1.4984
		0	−1	1.6622	1	1.6915	
		5	4.9918	1.1027	0.5219	1.1984	
甘泉	1(东方向)	−5	−9.6280	1.9154	0.0511	1.7256	0.7454
		0	−1	1.2390	1	1.2431	
		5	4.9730	1.1700	0.8769	1.1946	
	9(北方向)	−5	−11.8572	2.3967	−0.1262	2.1714	1.4216
		0	−1	1.4349	1	1.4527	
		5	4.5126	0.9706	0.3403	1.1025	
	17(西方向)	−5	−11.1124	2.2205	0.0098	2.0225	0.9254
		0	−1	1.5057	1	1.5120	
		5	5.8723	1.2951	0.6034	1.3745	
	25(南方向)	−5	−10.9682	2.1815	0.0609	1.9936	0.8208
		0	−1	1.6014	1	1.6091	
		5	6.1585	1.3606	0.6445	1.4317	
	1(东方向)	−5	−9.5202	1.8849	0.0957	1.7040	0.7132
		0	−1	1.3744	1	1.3795	
		5	5.2177	1.1717	0.6410	1.2435	
绥德	9(北方向)	−5	−9.5046	1.9024	0.0076	1.7009	0.9605
		0	−1	1.2206	1	1.2294	
		5	4.1827	0.9419	0.5269	1.0365	
	17(西方向)	−5	−10.1930	2.0422	−0.0181	1.8386	1.0032
		0	−1	1.2235	1	1.2306	
		5	4.5034	1.0391	0.6919	1.1007	
	25(南方向)	−5	−9.9855	1.9817	0.0769	1.7971	0.8563
		0	−1	1.3785	1	1.3857	
		5	5.0525	1.1255	0.5747	1.2105	

最小，这也说明了3个样区地形剖面变化的多重分形结构特征的强弱程度。

图3(d)、图4(d)、图5(d)分别是淳化、甘泉和绥德研究样区地形各向异性变化选取的正东方向的地形剖面，根据式(7)得出的分形维数Dq和奇异指数hq的多重分形谱的关系图。从图中可以看出，3个样区的多重分形谱都呈现单峰倒U形曲线，而且3个样区的多重分形谱曲线的形状完全不同，曲线的开口宽度也不一样，说明3个样区的地形剖面变化具有不同的多重分形结构特征。其中淳化样区的多重分形谱曲线呈现出左右近似对称的钟形曲线，多重分形谱的谱宽，即地形剖面变化的奇异强度也最大，为1.5594。甘泉样区的多重分形谱曲线呈现出带有一个右长尾巴的钩状曲线，多重分形

谱的谱宽为0.7454，绥德样区的多重分形谱曲线呈现出带有右长尾巴的左偏钟形曲线，多重分形谱的宽度为0.7132。从表1可以看出，淳化样区地形各向异性的地形剖面变化的多重分形谱宽度，即奇异强度都比较大，其奇异强度的平均值为1.5058，是3个样区最大的。甘泉样区的地形各向异性地形剖面变化的奇异强度平均值为0.8649，是3个样区里面居中。绥德样区的地形各向异性地形剖面变化的奇异强度平均值为0.5583，是3个样区里面最小的。奇异强度越大，表明研究样区的地形各向异性地形剖面变化的波动性越大而且地形变化分布是不均匀的。淳化样区的地形各向异性地形剖面起伏变化奇异强度是最大的，说明淳化样区地形剖面起伏变化在不同方向上具有很大的差异性，而且起伏变化具有很大的突变性，分布也不均匀。因为淳化样区地貌类型为黄土残塬，塬面地形起伏平缓，塬边缘深沟分布，地形起伏变化差异很大。绥德样区的奇异强度相较其他2个样区的值就较小，说明绥德样区的地形各向异性地形起伏变化的波动性相对而言比较小而且地形在不同方向的起伏变化是比较均匀分布的。

3.2 地形各向异性奇异强度概率分布

根据多重分形谱的奇异强度作出的各样区地形各向异性奇异强度的概率密度分布，图6是淳化样区、甘泉样区和绥德样区的地形各向异性奇异强度的概率密度分布图，如图所示，淳化样区奇异强度分布不均匀，呈现中间多，两边少的趋势，奇异强度为1.4左右的概率最大，在奇异强度为2.2附近又有一个小的峰值，总体以奇异强度1.4为主。这是由于淳化样区地貌类型主要为黄土残塬，地形变化多样，且黄土塬地貌虽顶面平坦开阔，部分黄土塬边的沟壑甚至比黄土梁和黄土峁的沟壑发育规模还要大，地形起伏变化差异大。甘泉样区奇异强度分布不均匀，存在一定的差异性，在奇异强度为1.8时有一个小的峰值，总体以奇异强度0.7左右为主。甘泉样区所属地貌主要为黄土梁，长梁状的黄土地貌分布比较规整，一般不会掺杂其它地貌类型，所以甘泉样区的地貌异质性不强，同质性比较强。绥德样区奇异强度在0.8左右的概率最大，且较为均匀地分布在0.8附近，呈现较为对称的分布，在奇异强度为1.7附近有一个小的峰值。绥德样区的地貌类型主要为黄土峁，地形变化比较单一，但地形侵蚀比较破碎，沟壑众多，所以相对长梁状的甘泉样区地形各向异性奇异强度稍大一些。

奇异强度的大小表示一个区域地形各向异性变化的强弱程度。从图6可以看出，淳化样区整体奇异强度较甘泉和绥德样区偏右，说明淳化样区的地形各向异性变化较甘泉和绥德样区是明显的，黄土残塬地形各向异性变化强度是最强的。淳化和甘泉样区的地形各向异性奇异强度概率分布都拥有多个峰值，但在奇异强度为1.5后的概率，甘泉样区要远小于淳化样区，尽管甘泉样区和绥德样区的地形各向异性变化也较明显，但是相较于淳化样区还是比较缓和的。甘泉样区和绥德样区的地形各向异性奇异强度分布范围大体一致，甘泉样区的奇异强度稍小一点，为0.7，绥德样区的奇异强度为0.8，所以，甘泉样区和绥德样区的地形各向异性变化强度比较接近。

4 结论与讨论

4.1 结论

本研究选取淳化、甘泉和绥德3个典型黄土地貌类型的研究样区，运用MF-DFA方法对3个样区

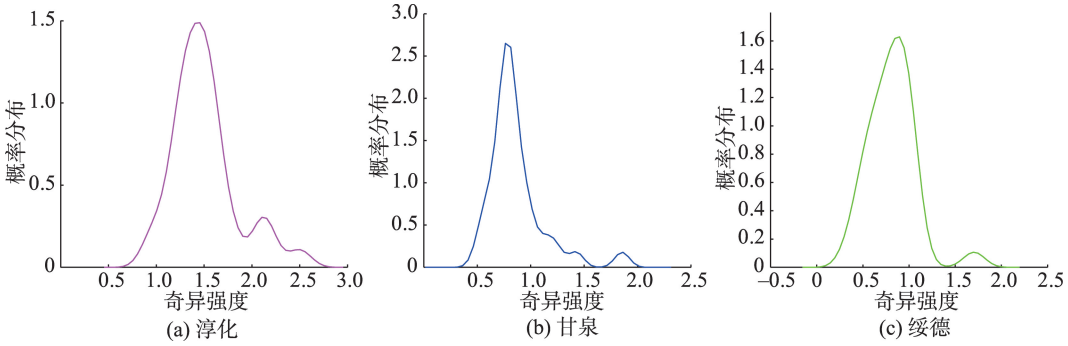


图6　研究样区地形各向异性奇异强度概率分布

Fig. 6　Probability distribution of singularity strength for topographic anisotropy in sample sites

地形各向异性变化奇异强度进行分析研究，主要结论如下：

（1）黄土地貌中典型的塬梁峁地貌类型，其地形起伏变化复杂多样，具有显著的多重分形结构特征和地形各向异性特征，进而运用多重分形分析对塬梁峁地貌类型地形各向异性进行分析。得出黄土塬的淳化样区地形各向异性的重分形谱宽度最大，其平均值为1.5058。黄土梁的甘泉样区的地形各向异性多重分形谱宽度居中，平均值为0.8649。黄土峁的绥德样区地形各向异性的多重分形谱宽度最小，平均值为0.5583。黄土塬梁峁地貌类型地形各向异性变化的多重分形结构特征强弱程度为黄土塬最强，黄土梁次之，黄土峁最弱。

（2）黄土塬梁峁地貌类型地形各向异性具有明显的分异特征，奇异强度能够标识出不同地貌类型地形各向异性变化的强弱程度。3种地貌类型地形各向异性变化的奇异强度的概率分布显示，淳化样区的地形各向异性奇异强度的概率分布主要集中在1.5，甘泉样区的奇异强度概率分布以0.7为中心，绥德样区的奇异强度均匀地分布在0.8附近。表明黄土塬梁峁地貌类型的地形各向异性变化的奇异强度不同，地形各向异性奇异强度强弱关系为，黄土塬最强，黄土峁次之，黄土梁最弱。

4.2 讨论

在地形各向异性研究方面，有学者提出了用于量化地形各向异性的方向和尺度依赖性的全方向变异函数分析方法，主要用来区分河流和构造运动对地表演化的贡献[25]。也有研究使用地形各向异性和地形起伏的方向相关性，在一定尺度范围内来表征和确定沿海和风沙过度组合的复杂多样海岛地貌的演化过程[26]。这些研究重点考虑了地形各向异性的尺度效应，主要用地形各向异性来标识和区分不同地貌类型及其演化。本研究选取黄土塬梁峁典型的3种地貌类型研究样区，运用MF-DFA方法对其地形各向异性的变化特征进行分析，黄土塬梁峁3种地貌地形各向异性变化的奇异强度为黄土塬最强，黄土峁居中，黄土梁最弱。本研究能够为黄土地貌小流域尺度的地貌类型精细分类提供依据，是黄土地貌地形描述和分析是一种独特的指标和方法，对于黄土地貌分类和分区具有科学与实践意义。另外，本研究在进行地形各向异性剖面数据提取时，是以规则的矩形DEM数据为基础进行剖面布设的，选取的中心点也是数学上的几何中心点，且地形各向异性剖面布设数量较其他研究要多，因此后续的研究可以考虑以形状不规则的黄土小流域系统为出发点进行地形各向异性地形剖面的设置。

参考文献(References):

[1] 徐双,李飞雪,刘爱利.典型黄土地貌高程空间变异性研究[J].水土保持研究,2014,21(5):1-6. [Xu S, Li F X, Liu A L. Research on spatial variability of elevation in typical loess landform[J].Research of soil and water conservation, 2014,21(5):1-6.]

[2] 刘双琳,李发源,蒋如乔,等.黄土地貌类型的坡谱自动识别分析[J].地球信息科学学报,2015,17(10):1234-1242. [Liu S L, Li F Y, Jiang R Q, et al.A method of loess landform automatic recognition basedon slope spectrum[J]. Journal of Geo- information Science, 2015,17(10):1234-1242.]

[3] 薛凯凯,熊礼阳,祝士杰,等.基于DEM的黄土崾岘提取及其地形特征分析[J].地球信息科学学报,2018,20(12):1710-1720. [Xue K K, Xiong L Y, Zhu S J, et al. Extraction of loess dissected saddle and its terrain analysis by using digital elevation models[J]. Journal of Geo-information Science,2018,20(12):1710-1720.]

[4] 段家朕,熊礼阳,汤国安.基岩露头采样密度对黄土古地形重建的影响[J].地球信息科学学报,2016,18(4):461-468. [Duan J Z, Xiong L Y, Tang G A. Effect of outcrop sampling density on the underlying terrain reconstruction [J]. Journal of Geo-information Science, 2016,18(4):461-468.]

[5] 汤国安,李发源,熊礼阳.黄土高原数字地形分析研究进展[J].地理与地理信息科学,2017,33(4):5-11. [Tang G A, Li F Y, Xiong L Y. Progress of digital terrain analysis in the Loess Plateau of China[J]. Geography and Geo-information science, 2017,33(4):5-11.]

[6] 汤国安.我国数字高程模型与数字地形分析研究进展[J].地理学报,2014,69(9):1305-1325. [Tang G A.Progress of DEM and digital terrain analysis in China[J]. Acta GeographicaSinica, 2014,69(9):1305-1325.]

[7] 汤国安,那嘉明,程维明.我国区域地貌数字地形分析研究进展[J].测绘学报,2017,46(10):372-393. [Tang G A, Na J M, Cheng W M. Progress of digital terrain analysis on regional geomorphology in China[J]. Acta Geodaetica et CartographicaSinica, 2017,46(10):372-393.]

[8] Tang G A , Li F Y , Liu X J , et al. Research on the slope spectrum of the Loess Plateau[J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2008,51(1Supplement):175-185.

[9] 卢昱铭,乔雪丽,吴佳琪.地形空间频率层次性及其空间分异性研究——以黄土高原丘陵沟壑区为例[J].地下水,2018,40(1):155-157. [Lu Y M, Qiao X L, Wu J Q. Research on the spatial hierachical frequency and variability of topography: A case study of the gully area of the Loess Plateau[J]. Groundwater, 2018,40(1):155-157.]

[10] 仝迟鸣,周成虎,程维明.基于DEM的黄土塬形态特征分析及发育阶段划分[J].地理科学进展,2014,33(1):42-49. [Tong C M, Zhou C H, Cheng W M.Morphological characteristics and developmental stages of loess tablelands based on DEM[J]. Progress in Geography, 2014,33(1):42-49.]

[11] 朱洪芬,南锋,徐占军.黄土高原盆地土壤有机质与影响因子的空间多尺度关系[J].生态学报,2017,37(24):8348-8360. [Zhu H F, Nan F, Xu Z J. Multi-scale spatial relationships between soil organic matter and influencing factors in basins of the Chinese Loess Plateau[J]. Acta Ecological Sinica, 2017,37(24):8348-8360.]

[12] 张苏.基于遥感纹理的黄土地貌景观图谱研究-以陕北黄土高原为例[D].西安:西北大学2017. [Zhang S.Study on Geo-Info Tupu of loess landform landscape based on remote sensing texture-Takingthe Loess Plateau in northern Shaanxi as an example[D]. Xi'an: Northwest University, 2017.]

[13] 刘逸文,熊礼阳,方炫.黄土地貌地形特征点格局研究[J].地理与地理信息科学,2017,33(4):35-41. [Liu Y W, Xiong L Y, Fang X. Pattern analysis of terrain feature points of Loess topography[J]. Geography and Geo-information science, 2017,33(4):35-41.]

[14] 张磊.基于核心地形因子分析的黄土地貌形态空间格局研究[D].南京:南京师范大学,2013. [Zhang L.Study on the spatial pattern of loess geomorphology based on the analysis of core topographic factors[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2013.]

[15] 李阳,周毅,雷雪,等.基于流域单元的黄土地貌正负地形因子量化关系模拟[J].干旱区资源与环境,2019,33(7):78-84. [Li Y, Zhou Y, Lei X. Simulation of quantitative relationship between positive and negative topographic factors of loess based on catchment unit[J]. Journal of Arid land resources and environment, 2019,33(7):78-84.]

[16] 周毅.基于DEM的黄土高原正负地形及空间分异研究[D].南京:南京师范大学,2011. [Zhou Y. DEM based research on positive-negative terrains and their spatial variation on Loess Plateau[D]. Nanjing:Nanjing Normal University, 2011.]

[17] Zhou Y, Tang G A, Yang X, et al. Positive and negative terrains on northern Shaanxi Loess Plateau[J].Journal of Geographical Sciences, 2010,20(1):64-76.

[18] 张佳瑞,王金满,祝宇成.分形理论在土壤学应用中的研究进展[J].土壤通报,2017,48(1):221-228. [Zhang J R, Wang J M, Zhu Y C. Application of fractal theory on pedology:a review[J]. Chinese Journal of soil science, 2017, 48(1):221-228.]

[19] 孙斌,姚海涛.风电场风速时间序列的多重分形去趋势波动分析[J].电工技术学报,2014,29(6):204-210. [Sun B, Yao H T. Multi-fractal detrended fluctuation analysis of wind speed time series in wind farm[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2014,29(6):204-210.]

[20] 陈晓娜.股票收益率序列的多重分形特征分析[J].淮北师范大学学报(自然科学版),2014,2:27-32. [Chen X N. Multifractal analysis of stock returns[J]. Journal of Huaibei Normal University(naturalscienceedition), 2014, 2:27-32.]

[21] 张翔,丁勇,刘小峰.MF-DFA在癫痫发作期及发作强度检测中的应用[J].数据采集与处理,2013,28(5):664-671. [Zhang X, Ding Y, Liu X F. Detection of Seizure time-course and index of Seizure intensity with Multifractal detrended fluctuation analysis[J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2013,28(5):664-671.]

[22] 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. [Zhang J, Bao H S. Fractal geomorphology-review and propect[J]. Geographical research,1994,13(3):104-112.]

[23] Peng C K, Buldyrev S V, Havlin S, et al. Mosaic organization of DNA nucleotides[J]. Physical review, 1994,49(2): 1685.

[24] Kantelhardt J W, Zschiegner S A, Koscielny-Bunde E, et al. Multifractal detrended fluctuation analysis of nonstationary time series[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2002,316(1-4):87-114.

[25] Roy S G, Koons P O, Osti B, et al. Multi-scale characterization of topographic anisotropy[J]. Computers & geosciences, 2016,90:102-116.

[26] Houser C, Bishop M, Wernette P. Multi-scale topographic anisotropy patterns on a Barrier Island[J]. Geomorphology, 2017,297:153-158.