

黄土高原坡度因子的多重分形谱特征

夏积德¹, 丛佩娟², 李俊锋³

(1.杨凌职业技术学院, 陕西 杨凌 712100; 2.水利部 水土保持监测中心, 北京 100053; 3.陕西测绘地理信息局, 陕西 西安 710054)

摘要: [目的] 有效科学量化地形因子, 兼顾地物局部与整体的自相似性, 总结黄土高原不同地貌区坡度地形因子的多重分形特点, 为后续黄土高原地形因子相关研究提供参考。[方法] 选取黄土高原不同地区数字高程模型(DEM)数据, 采用盒维数计算多重分形谱方法, 检验各研究区坡度数据的多重分形特征, 对坡度因子进行多重分形运算, 计算坡度分形体的多重分形谱和多重分形特征参数。[结果] 最小坡度奇异指数变化范围在黄土塬区为(1.82~2.90), 山地区为(1.92~2.43), 变化幅度较大; 黄土丘陵区 and 河谷平原区最小坡度奇异指数范围分别是(1.94~2.07)和(1.85~2.19), 变化范围较小, 地形较为均一。最大坡度奇异指数所对应的多重分形谱值最大值为 1.63, 在河谷平原区, 最小值为 1.57, 在黄土塬区坡度最小地貌单元在河谷平原区所占比例最大, 在黄土塬区所占比例最小。[结论] 不同研究区的多重分形谱差异可以真实反映出地形复杂程度。与传统量化方法统计的结果对比, 多重分形特征参数能够客观反映黄土高原不同地形区域的多重分形特征。

关键词: 地形因子; 多重分形; 黄土高原; 盒维数

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2021)03-0137-06

中图分类号: S157.1, S157.9

文献参数: 夏积德, 丛佩娟, 李俊锋. 黄土高原坡度因子的多重分形谱特征[J]. 水土保持通报, 2021, 41(3): 137-142. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2021.03.019; Xia Jide, Cong Peijuan, Li Junfeng. Multifractal general features of slope factors in Loess Plateau [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(3): 137-142.

Multifractal General Features of Slope Factors in Loess Plateau

Xia Jide¹, Cong Peijuan², Li Junfeng³

(1. Yangling Vocational and Technical College, Shaanxi, Yangling 712100, China;

2. Soil and Water Conservation Monitoring Center, Ministry of Water Resources, Beijing

100053, China; 3. Shaanxi Bureau of Surveying, Mapping and Geoinformation, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: [Objective] The topographic factors were effectively and scientifically quantified while accounting for the local and global self-similarity of ground objects, and the multifractal characteristics of slope topographic factors in different geomorphic areas of the Loess Plateau were summarized in order to provide a reference for subsequent research on topographic factors in the Loess Plateau. [Methods] The digital elevation model (DEM) data from different areas of the Loess Plateau were selected, and the multifractal characteristics of slope data in each study area were tested by using the method of box dimension calculation multifractal spectrum. The multifractal spectrum and multifractal characteristic parameters of slope fractal body were calculated by multifractal calculation of slope factor. [Results] The variation range of the minimum slope singularity index was 1.82—2.90 in the Loess Plateau area and 1.92—2.43 in the mountain area, and the variation range was relatively large. The minimum slope singularity index ranges were 1.94—2.07 and 1.85—2.19 in the loess hilly region and valley plain region, respectively, with relatively small variation range and relatively uniform topography. The maximum value of the multifractal spectrum corresponding to the maximum slope singularity index was 1.63, and the minimum value was 1.57 in the valley plain area. These geomorphic unit with the smallest slope had the largest proportion in the valley plain area and the smallest proportion in the Loess Plateau area. [Conclusion] Differences in multifractal spectrums in different

收稿日期: 2020-11-22

修回日期: 2021-01-20

资助项目: 国家重点研发计划项目“生态技术评价方法、指标体系及全球生态治理技术评价”(2016YFC0503700); 杨凌职业技术学院科学研究基金项目“基于遥感和 GIS 技术的黄土高原水土流失防治成效研究”(A2019026)

第一作者: 夏积德(1980—), 男(汉族), 河南省鹿邑县人, 副教授, 主要从事耕作侵蚀机理及效应研究。Email: xiajide@126.com。

study areas can truly reflect terrain complexity. Compared with the statistical results of traditional quantitative methods, the multifractal feature parameters can objectively reflect the multifractal features of different terrain regions in the Loess Plateau.

Keywords: terrain factor; multifractal; the Loess Plateau; box dimension

地形因子是水土流失、水文过程模拟的参数,科学量化地形因子对于水土流失这一地理界面过程的研究具有极为重要的意义。大量研究发现,自然界中大部分区域的地表形态复杂多变,呈现出明显的不均匀性和分形特征,即具有以非整数维形式充填空间的形态特征。若仅采用普通分形维数的方法并不能详细且全面地反映不同区域条件、不同尺度下的地形因子特征。在多重分形理论被提出后,由于其采用广义维数和多重分形谱来描述分形客体,考虑了对象属性在几何支集的空间奇异性分布这一特点^[1],即能考虑到复杂分形体内部不同区域呈现出不同分形特征,因而逐渐被用于包括地形地貌学在内的各种地理学相关研究。沈中原等^[2]借助多重分形理论构建了海拔信息空间分布概率计算模型;张建兴等^[3]探讨了黄土高原若干流域的河网分形特征并基于此建立起产沙模数模型;王民等^[4-5]运用多重分形理论及其实现方法分析了大理河流域地表形态的多重分形特征。这些研究多运用分形理论表征区域地貌形态的综合特征^[6],但对于黄土高原地区地形因子(如坡度)的多重分形研究还很少涉及。因此,本文运用多重分形理论来研究黄土高原地区地形因子的特点,旨在为黄土高原地区开展地形因子方面的研究提供参考。本研究对区域水文过程、水土流失预报模型的建立具有积极意义。

1 研究区概况

黄土高原地处中国中北部地区,辖内蒙古、山西、陕西、宁夏、甘肃、青海、河南 7 个省区,东西跨越 1 000 km 多,南北跨越近 750 km,总面积约为 6.40×10^4 km²,海拔高度介于 1 000~3 000 m,是中国 4 大高原之一。黄土高原整体表现出西北高东南低的特点,宁夏西南方的六盘山和山西西部的吕梁山将整个黄土高原划分为 3 个部分,在此划分基础上进一步按照地形地貌特点将黄土高原划分为山地区、黄土丘陵区、黄土塬区以及河谷平原区 4 种类型。山地区主要包括马衙山地区、拉脊山地区、六盘山地区、子午岭地区、太行山地区和吕梁山地区,海拔跨度大、地形地貌差异较大,由于长期受重力、流水以及风力等侵蚀因素的影响,山地区的地貌侵蚀现象严重,沟壑明显,坡度较大;丘陵区作为黄土高原地区较为典型的地形地貌区域有着十分广阔的分布区域,其占据了超过黄土高原地区一半的面积。丘陵区在黄土高原分布范

围辽阔,不同区域的丘陵区之间还存在不小的差异;黄土塬区中分布着大量塬面,塬面顶部十分平坦,地形复杂程度较低。与之形成强烈对比的是塬面周围陡峭的沟壑,这些沟壑分布在一个又一个塬面之间,使得黄土塬区内部的地形地貌形成了十分大的反差,地形复杂度对比强烈;河谷平原区以关中平原最具代表性,关中平原位于陕西省中部,呈东西带状分布,地形较为单一,多为平原,在长期的冲击下形成了平坦开阔的地貌景观。

2 研究方法

在黄土高原不同地貌类型区内选择合适的研究区,获取各子研究区的 DEM(来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>),空间分辨率为 30 m×30 m,并在 GIS 中提取得到坡度因子的栅格数据;随后,采用盒维数的计算方法,计算得到坡度因子的多重分形谱并对其主要参数及图像特征进行对比分析。

2.1 多重分形谱的计算

盒维数方法是一种基于统计学原理的计算多重分形的方法,具有简便且易于理解的特点,经常被用于地形地貌多重分形的计算^[7]。盒维数是用一系列紧密相连的正方形盒子去覆盖分形体,即将研究对象分为很多个(假设有 i 行 j 列总计 N 个)尺度大小为 r 的正方形网格单元^[8],然后计算每个网格单元内的概率测度。对于坡度因子来说,概率测度的大小可以用坡度概率函数表示,每个小网格单元的坡度概率函数的计算公式为:

$$P_{ij} = A_{ij}(r) / \sum_{i=1, j=1}^N A_{ij}(r) \quad (1)$$

式中: $P_{ij}(r)$ 表示位于第 i 行第 j 列的网格的坡度概率函数; $A_{ij}(r)$ 表示位于第 i 行第 j 列的网格内的坡度统计值; N 表示网格单元的总个数,其在数值上满足: $N = i \times j$ 。

根据公式(1)并结合多重分形理论^[9-10]可知,坡度概率函数可以粗略衡量一个网格单元区域的地形特点,数值越小表示该网格区域内坡度越小,具有越平坦的地形特点,如塬面、平原等;反之,坡度概率函数的数值越大表示网格区域内的坡度越大,地形起伏程度越大,如崩、坡面等。

在盒维数方法中,检验一个研究对象是否具有多重分形特征,有一个配分函数的概念^[11],配分函数的

计算公式如下:

$$X_q(r) = \sum_{i=1, j=1}^N [P_{ij}(r)]^q \quad (2)$$

式中: $X_q(r)$ 表示分形体的配分函数; $P_{ij}(r)$ 表示位于第 i 行第 j 列的网格的坡度概率函数; q 表示阶矩, 可以取任意实数, 配分函数中 q 的取值直接影响着不同的概率测度在整个配分函数上所占比重的大小。

对于给定的一对 r 和 q , 都可以通过公式(1)和公式(2)计算得到一个配分函数。在盒维数方法中, 如果研究对象具有多重分形特征, 那么配分函数 $X_q(r)$ 和 r 之间应该满足以下的关系^[12]:

$$X_q(r) \propto r^{\tau(q)} \quad (3)$$

式中: $\tau(q)$ 是关于 q 的一个表达式, 在探讨研究对象是否具有多重分形特征的过程中无关紧要。

根据上述关系可知, 对两边同时取对数, $\ln X_q(r)$ 和 $\ln r$ 满足线性关系。因此绘制以 $\ln r$ 为横轴, $\ln X_q(r)$ 为纵轴的散点分布图, 对其拟合, 如果 $\ln X_q(r) - \ln r$ 图像为一系列斜率不等的直线, 则表明研究对象具有多重分形特征^[13], 可以进一步计算其多重分形谱及其特征参数。

本研究利用 Chhabra 等^[14]提出的一种建立在盒维数方法基础上的通过拟合参数计算多重分形谱的方法来计算多重分形谱。这种方法需要设立一个经过归一化处理的测度集 $\mu_{ij}(q, r)$, 其计算公式如下:

$$\mu_{ij}(q, r) = \frac{P_{ij}(r)^q}{X_q(r)} \quad (4)$$

在这个测度集的基础上结合多重分形的概念, 可以通过下面的公式来计算多重分形中的奇异指数 α 和分形维数 $f(\alpha)$:

$$\alpha = \lim_{r \rightarrow 0} \sum_{i=1, j=1}^N [\mu_{ij}(q, r) \times \ln P_{ij}(r)] / \ln r \quad (5)$$

$$f(\alpha) = \lim_{r \rightarrow 0} \sum_{i=1, j=1}^N [\mu_{ij}(q, r) \times \ln P_{ij}(r)] / \ln r \quad (6)$$

奇异指数 α 是一个标度指数, 它是反映分形体内各个小区间的奇异程度的一个量, α 的数值与其所在的位置有关。将分形上具有相同 α 值的小区间数记为 $f(\alpha)$, 基于此可以得到 $\alpha - f(\alpha)$ 的函数图像, 称为奇异谱。横坐标的范围是多重分形谱奇异指数 α 的分布范围, α 的大小反映该部分的奇异程度。

在计算时, 常常按照公式(5)和公式(6)的数学几何意义借助拟合的方法来得到 α 和 $f(\alpha)$ 的值。将公式(5)处理可得:

$$\lim_{r \rightarrow 0} \sum_{i=1, j=1}^N [\mu_{ij}(q, r) \times \ln P_{ij}(r)] = \alpha \times \ln r \quad (7)$$

公式(7)根据一次函数相关概念及其图像性质可

知 α 为 $\sum \mu_{ij}(q, r) \cdot \ln P_{ij}(r) - \ln r$ 图像的斜率, 类似地, $f(\alpha)$ 为 $\sum [\mu_{ij}(q, r) \cdot \ln \mu_{ij}(q, r)] - \ln r$ 图像的斜率。

首先确定一个 q 值, 保持阶矩 q 不变而改变尺度 r , 每选取一个 r 进行计算, 按照公式(1), (2), (4)就可以得到一个对应的 $\sum \mu_{ij}(q, r) \cdot \ln P_{ij}(r) - \ln r$ 和 $\sum [\mu_{ij}(q, r) \cdot \ln \mu_{ij}(q, r)]$, 通过在二维坐标系中进行拟合便可得到每个 q 对应的奇异指数 α 和分形维数 $f(\alpha)$ 。改变阶矩 q 的值, 便能得到一系列的 α 和 $f(\alpha)$, 而多重分形谱就是以 α 为横坐标, $f(\alpha)$ 为纵坐标的图像。

2.2 特征参数的取值

(1) 格网大小(尺度) r 的选取。根据多重分形理论, 格网的大小直接影响到格网的总数量和每个格网的概率测度, 这两个因素决定着多重分形计算过程中的效率和准确性, 因此从简便、可实施的角度出发, 需选取大小为 30 m 整数倍的格网来覆盖研究区。结合所选 4 个研究区坡度数据的实际情况, 规定一个栅格大小即 30 m 为一个单位, 通过反复试验最终选取格网尺度大小为 20, 30, 40, ..., 190, 200 个单位, 亦即 600, 900, 1 200, ..., 5 700, 6 000 m, 共 19 种。

(2) 阶矩 q 取值范围的确定。公式(3)配分函数中 q 的取值直接影响着不同的概率测度在整个配分函数上所占比重的大小^[15], 当 q 取正值且取值越大, 配分函数越能反映具有较大坡度概率函数的那些网格单元的特征和性质; 当 q 取负值且取值越小, 则配分函数越能反映具有较小坡度概率函数的那些网格单元的特征和性质。因而 q 的取值对配分函数的计算结果影响很大, 不同区域坡度的位置分布和大小范围不同, 各研究区 q 的取值范围也不同, 研究表明, 在地形地貌多重分形的计算中, q 值分布在 0 左右且通常介于 ± 30 之间^[4]。

本研究对每一个子研究区在 $-50 \sim 50$ 之间等间距选取不同的 q 值, 通过盒维数计算多重分形谱的方法验证 q 是否在合适的区间。在初步确定 q 的合适区间后继续加密 q 的取值, 最终得到每个研究区阶矩 q 的最佳取值范围见表 1。

表 1 研究区 q 最佳取值范围

研究区	山地区	黄土丘陵区	黄土塬区	河谷平原区
q 最佳取值范围	-2~15	-10~15	-1.5~5	-4~4

3 结果与分析

3.1 坡度概率分布特点

为更详细、系统地了解各研究区坡度大小的分布

情况,对 4 个研究区的坡度进行统计(图 1)。可以看出,山地区、黄土丘陵区、黄土塬区、河谷平原区的坡度介于 $0^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 之间的栅格占比分别为 35.80%, 35.50%, 60.75%, >99.99%; 介于 $10^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 之间的栅格占比分别为 24.23%, 40.59%, 16.94%, <0.01%;

介于 $20^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 之间的栅格占比分别为 20.48%, 20.92%, 13.74%, 0%; 介于 $30^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 之间的栅格占比分别为 15.76%, 2.89%, 7.54%, 0%; 介于 $40^{\circ}\sim 50^{\circ}$ 之间的栅格占比分别为 3.63%, 0.10%, 1.02%, 0%; 介于 $50^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 之间的栅格占比分别为 0.1%, 0%, 0.01%, 0%。

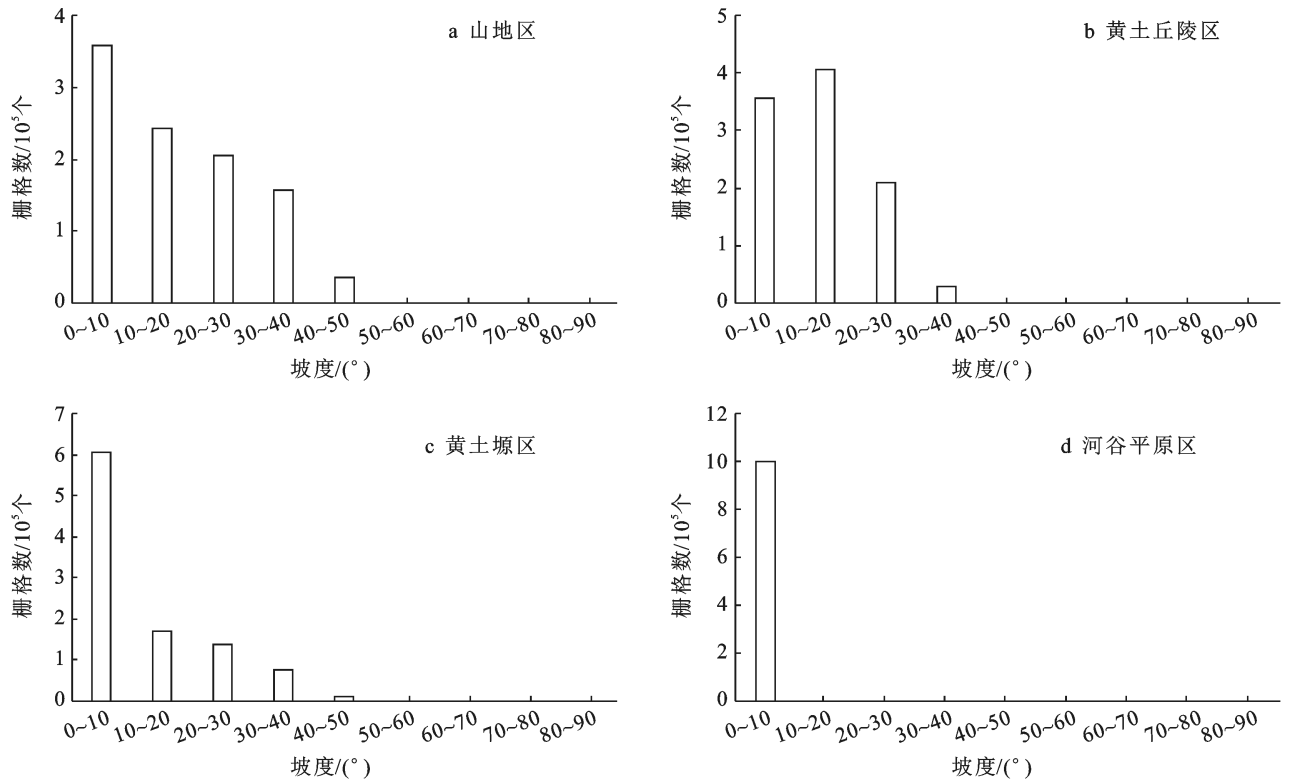


图 1 研究区不同地形坡度统计

由统计结果得知:①山地区的坡度分布区间最大,大部分栅格处于 $0^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 这一中小坡度区间,坡度大于 40° 的区间在 4 个研究区中占比最高;②黄土丘陵区坡度介于 $0^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 区间内的占比最少,坡度大部分位于 $10^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 这一坡度范围内。同时,大于 30° 的坡度占比较小,因此在黄土丘陵研究区内大坡度的地形较少,地形特点较为均一;③黄土塬区有大面积的平坦塬面,坡度大部分介于 $0^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 之间,因此坡度值往往很小,由于所选研究区面积固定为 $30\text{ km}\times 30\text{ km}$,在这样一个较大的范围内不可避免地包括了塬面周围的切沟、坡面等非塬面地形,因此也存在少量坡度大于 20° 的非塬面特征栅格;④河谷平原区的坡度统计图特征十分明显,几乎所有栅格的坡度均介于 $0^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 之间,在 4 个研究区中地形最为平坦。

3.2 多重分形特征检验结果

在计算坡度信息多重分形谱前需要先验证研究对象是否具有多重分形特征。为此,在平面坐标系中,以 $\ln r$ 为横坐标, $\ln X_q(r)$ 为纵坐标,绘制出每个

研究区的 $\ln X_q(r)$ 曲线,4 个研究区坡度地形因子绘制的 $\ln X_q(r) - \ln r$ 曲线见图 2。

从图 2 中可以看出,每个研究区在各自合适的 q 范围内,当尺度对数满足 $3.0 \leq \ln r \leq 5.3$ 时,配分函数对数与尺度对数之间存在很好的线性关系,表明黄土高原区域上述 4 个研究区的坡度信息具有明显的多重分形特征,可以进行多重分形谱的计算。

3.3 坡度信息多重分形谱及其参数

以坡度数据为基础,利用多重分形理论原理和计算方法得到研究区坡度信息多重分形谱散点分布图(图 3)及其参数结果(表 2)。由图 3 的多重分形谱可以看出,不同研究区的多重分形谱均为凸函数。在一个研究区内,多重分形谱函数值随着坡度奇异指数的增加均呈现出先递增后递减的变化特征。而在各研究区之间,坡度多重分形谱的对称性、图像分布范围均有不同,这是由于各研究区多重分形谱参数的差异导致的。通过对多重分形谱图的二维坐标系进行拟合,得到各研究区详细的多重分形谱参数信息见表 2。

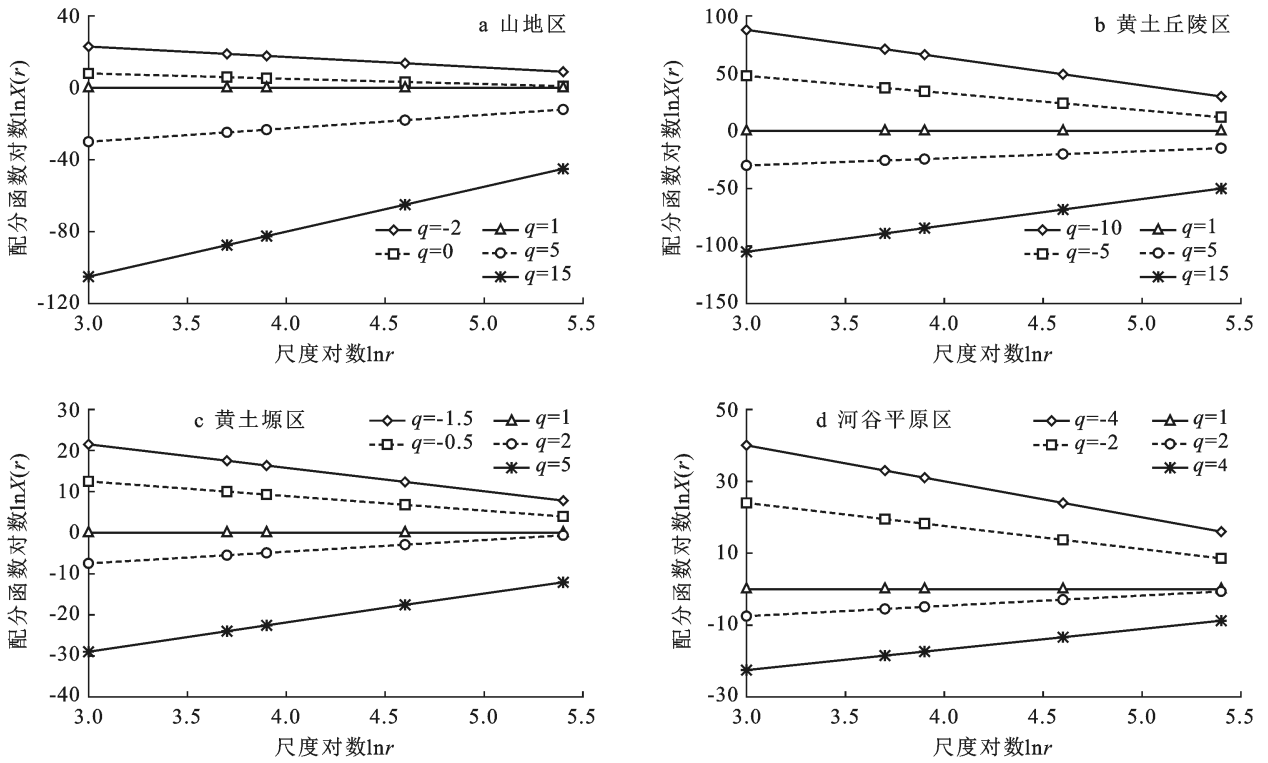


图 2 研究区不同地形 $\ln X_q(r) - \ln r$ 特征

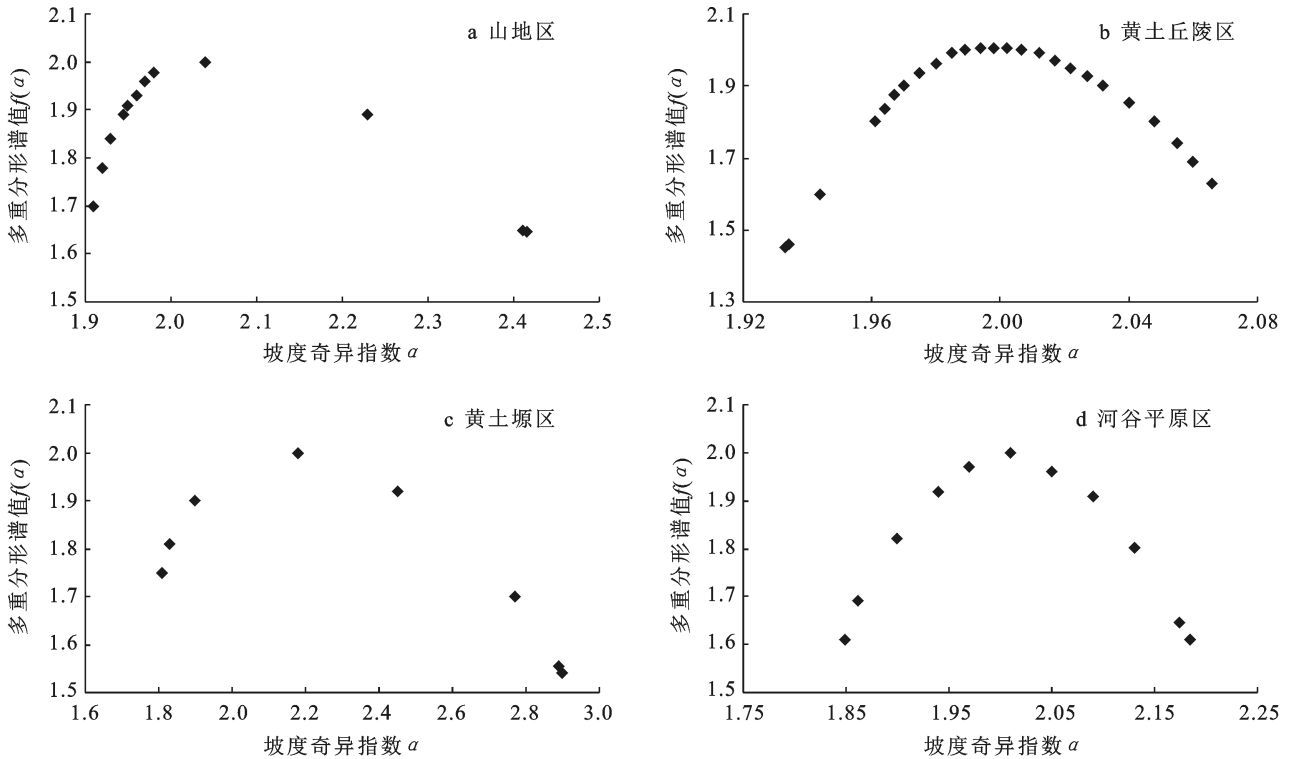


图 3 研究区不同地形多重分形谱特征

表 2 研究区多重分形特征参数

研究区	α_{\min}	$f(\alpha_{\min})$	α_{\max}	$f(\alpha_{\max})$	$\Delta\alpha$	$\Delta f(\alpha)$
山地区	1.92	1.70	2.43	1.62	0.50	0.08
黄土丘陵区	1.94	1.45	2.07	1.62	0.13	-0.17
黄土塬区	1.82	1.78	2.90	1.57	1.08	0.22
河谷平原区	1.85	1.61	2.19	1.63	0.35	-0.02

从多重分形谱参数统计表中可以看出,最小坡度奇异指数的最大值为 1.94,出现在黄土丘陵区,最小值为 1.82,出现在黄土塬区,说明在 4 个研究区中,坡度最大的地貌单元出现在黄土塬区(奇异指数最小值对应的是坡度最大地貌单元的性质);最小坡度奇异

指数相应的多重分形谱值的最大值为 1.78, 出现在黄土塬区, 最小值为 1.45, 出现在黄土丘陵区, 这说明最小坡度奇异指数对应的地貌类型单元在黄土塬区所占比例最大, 这与鲁克新等^[16]的研究结果相一致, 在黄土丘陵区所占比例最小, 即坡度最大的子区域在黄土塬区占比最高, 而在黄土丘陵区占比最低; 最大坡度奇异指数的最大值为 2.90, 出现在黄土塬区, 最小值为 2.07, 出现在黄土丘陵区, 说明地形特征最简单的地貌单元出现在黄土塬区; 最大坡度奇异指数所对应的多重分形谱值最大值为 1.63, 出现在河谷平原区, 最小值为 1.56, 出现在黄土塬区, 说明最大坡度奇异指数对应的地貌类型单元在河谷平原区所占比例最大, 在黄土塬区所占比例最小。黄土塬区对应的坡度奇异指数的极值最大, 为 1.08, 山地区次之, 为 0.50, 然后是河谷平原区的 0.35, 而黄土丘陵区为 0.13。

在多重分形谱左端点值与右端点值之差这个参数上, 从绝对值的大小来看, 黄土塬区最大, 数值为 0.22, 说明该研究区最小坡度奇异指数对应的地貌单元所占比例与最大坡度奇异指数对应的地貌单元所占比例的差异性最大, 黄土丘陵区次之, 差异性最小的是河谷平原区。从正负的角度来看, 黄土丘陵区 and 河谷平原区为负值, 山地区、黄土塬区为正值, 说明前两个研究区的大坡度地貌单元所占比重较后两个研究区要小。

4 讨论与结论

目前, 已有大量研究者采用简单分形维数、多重分形谱和联合多重分形等方法来表征复杂地貌的形态及其特征^[17], 但对于坡度因子的多重分形研究还很少涉及。本研究在 DEM 数据的基础上, 将黄土高原按照不同地形地貌划分为山地区、黄土丘陵区、黄土塬区、河谷平原区, 并对坡度因子的多重分形谱图像和多重分形特征参数进行了对比分析, 总结出各自区域的多重分形谱特点, 为后续开展黄土高原地形因子方面的研究打下了基础, 对区域水文过程、水土流失预报模型的建立具有积极意义。

像元尺度的选取是地形因子分形维数计算的关键, 像元尺度在范围之外时, 地形因子的分形计算没有意义。本研究对研究区的多重分形特征进行验证, 结果表明尺度对数满足 $3.0 \leq \ln r \leq 5.3$ 时, 黄土高原地区坡度地形因子的配分函数对数与尺度对数之间的线性关系良好, 表明黄土高原区域上述 4 个研究区的坡度信息具有明显的多重分形特征, 可以进行多重分形谱的计算。

不同地形的多重分形谱图以及特征参数都有着

明显的差异, 其横坐标奇异指数 α 的大小反映该区域的奇异程度, 这一参数的数值越大, 表明分形体坡度特征的分异现象越大, 其内部越不均匀、越复杂, 两极化趋势越明显, α 最小值、最大值所对应的多重分形谱值记为 $f(\alpha_{\min})$, $f(\alpha_{\max})$, 描述了小坡度单元区域和大坡度单元区域在整个研究区域内所占的比例高低。通过多重分形谱的研究可以发现, 最小坡度奇异指数的最小值为 1.82, 相应的多重分形谱值的最大值为 1.78, 最大坡度奇异指数在 4 个研究区内最大, 所对应的多重分形谱在 4 个研究区最小为 1.57, 说明坡度最小地貌单元在黄土塬区所占比例最小, 坡度最大的地貌单元出现在黄土塬区且占比最高。黄土丘陵区、河谷平原区则表现出较小的奇异指数变化范围, 黄土丘陵区最小坡度奇异指数的最小值为 1.94, 最大值为 2.07, 河谷平原区最小坡度奇异指数的最小值为 1.85, 最大值为 2.19, 相比之下地形较为均一。

通过多重分形谱与统计直方图对照研究可以发现, 在 4 个研究区中, 黄土塬区有不少坡度达到了 40° , 且坡度最大的地貌单元出现在黄土塬区且占比最高, 在地势平坦的塬面出现这种情况是由于所选研究区面积固定为 $30 \text{ km} \times 30 \text{ km}$, 而单个塬面通常面积有限, 在这样一个较大且规则的范围内不可避免地包括了塬面周围的切沟、坡面等非塬面地形, 因此其坡度统计中也存在少量坡度大于 20° 的非塬面特征栅格, 这也是黄土塬区的多重分形谱中奇异指数最小、对应的多重分形谱值在 4 个研究区中最大的原因, 同时也反映了研究区地形复杂的特点。结合多重分形理论的相关知识发现, 本研究结果与实际情况有着较好的对应, 表明基于多重分形理论与方法对黄土高原地区的地形因子进行量化研究是可行的, 为黄土高原地区开展地形因子方面的研究提供了参考, 对区域水文过程模拟、水土流失预报模型的建立具有积极意义。可为黄土高原的地貌学研究、土壤侵蚀研究和水土保持规划工作的开展提供技术支持和帮助。

[参 考 文 献]

- [1] 钟明寿, 龙源, 谢全民, 等. 基于分形盒维数和多重分形的爆破地震波信号分析[J]. 振动与冲击, 2010, 29(1): 7-11, 233.
- [2] 沈中原, 李占斌, 李鹏, 等. 流域地貌形态特征多重分形算法研究[J]. 水科学进展, 2009, 20(3): 385-391.
- [3] 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.
- [4] 王民. 基于 GIS 的流域地貌多重分形特征与侵蚀产沙关系研究[D]. 陕西 西安: 西安理工大学, 2009.

(下转第 151 页)

- 2014,5(5):423-431.
- [17] Goward S N, Xue Yongkang, Czajkowski K P. Evaluating land surface moisture conditions from the remotely sensed temperature/vegetation index measurements: An exploration with the simplified simple biosphere model[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002,79(2/3):225-242.
- [18] Kamran K V, Pirnazar M, Bansouleh V F. Land surface temperature retrieval from Landsat 8 TIRS: Comparison between split window algorithm and SEBAL method[C]// *Third International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment*, Paphos, Cyprus, 2015.
- [19] Rikimaru A, Roy P S, Miyatake S. Tropical forest cover density mapping [J]. *Tropical Ecology*, 2002,43(1):39-47.
- [20] Xu H. A new index for delineating built-up land features in satellite imagery [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2008,29(14):4269-4276.
- [21] 张乃明,陈冬花,邢菲,等.基于遥感生态指数的新疆干旱区博乐市生态变化分析 [J].*水土保持通报*,2019,39(1):154-159,166.
- [22] 高忠咏,高源.青海格尔木市矿区生态环境综合评价及其影响研究[J].*世界有色金属*,2018(15):271,274.
- [23] 王丽春,焦黎,来风兵,等.基于遥感生态指数的新疆玛纳斯湖湿地生态变化评价[J].*生态学报*,2019,39(8):2963-2972.
- [24] 高鹏文,阿里木江·卡斯木,图尔荪阿依·如孜,等.哈密市生态环境效益时空分析[J].*干旱区研究*,2020,37(4):1057-1067.
- [25] Liu Qin, Yang Zhaoping, Han Fang, et al. Ecological environment assessment in world natural heritage site based on remote-sensing data: A case study from the Bayinbuluke [J]. *Sustainability*, 2019,11(22):6385.
- [26] Gao Pengwen, Kasimu A, Zhao Yongyu, et al. Evaluation of the temporal and spatial changes of ecological quality in the Hami Oasis based on RSEI [J]. *Sustainability*, 2020,12(18):7716.
- [27] Wen Xiaole, Ming Yanli, Gao Yonggang, et al. Dynamic monitoring and analysis of ecological quality of Pingtan Comprehensive Experimental Zone, a new type of sea island city, based on RSEI [J]. *Sustainability*, 2019,12(1):21.
- [28] Xu Hanqiu, Wang Yifan, Guan Huade, et al. Detecting ecological changes with a remote sensing based ecological index (RSEI) produced time series and change vector analysis [J]. *Remote Sensing*, 2019,11(20):2345.
- [29] 岳辉,刘英,朱蓉.基于遥感生态指数的神东矿区生态环境变化监测[J].*水土保持通报*,2019,39(2):101-107,114.

(上接第142页)

- [5] 王民,李占斌,崔灵周,等.大理河流域地貌多重分形特征空间分异研究[J].*水土保持研究*,2017,24(5):178-181,188.
- [6] 朱永清,李占斌,鲁克新,等.地貌形态特征分形信息维数与像元尺度关系研究[J].*水利学报*,2005,36(3):333-338.
- [7] 夏积德,江仕荣,周波.渭河干流杨凌段水边线提取及其分维数计算方法研究[J].*水资源与水工程学报*,2019,30(6):45-49.
- [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] Grassberger P. Generalized dimensions of strange attractors [J]. *Physics Letters A*,1983,97(6):227-230.
- [10] Halsey T C, Jensen M H, Kadanoff L P, et al. Fractal measures and their singularities: The characterization of strange sets [J]. *Nuclear Physics B-Proceedings Supplements*, 1987,2:501-511.
- [11] Hentschel H G E, Procaccia I. The infinite number of generalized dimensions of fractals and strange attractors [J]. *Physica (D): Nonlinear Phenomena*, 1983,8(3):435-444.
- [12] 曹建军,方炫,那嘉明,等.基于多重分形的黄土高原不同地貌类型区沟沿线起伏特征研究[J].*地理与地理信息科学*,2017,33(4):51-56.
- [13] 彭松.基于小波变换的期货市场多重分形谱研究[D].安徽合肥:安徽大学,2010.
- [14] Chhabra A, Jensen R V. Direct determination of the $f(\alpha)$ singularity spectrum [J]. *Physical Review Letters*, 1989,62(12):1327-1330.
- [15] 范雪霜,孙强,吕深圳,等.人体甲状腺动态红外图像多重分形分析[J].*红外与激光工程*,2019,48(4):309-318.
- [16] 鲁克新,王民,李占斌,等.岔巴沟流域三维地貌多重分形特征量化[J].*农业工程学报*,2012,28(18):248-254.
- [17] 郑伟,张鑫,童亚文,等.地貌发育阶段判识方法研究:以泥河沟流域和枣子沟流域为例[J].*西北林学院学报*,2020,35(2):197-201,228.