

基于 DEM 的陕北黄土高原典型地貌分形特征研究

蔡凌雁, 汤国安, 熊礼阳, Kamila Justyna Lis, 谢婷, 李亚平

(南京师范大学 地理科学学院, 江苏 南京 210023)

摘要: 应用分形理论与方法, 结合陕北黄土高原 1:5 万 DEM 数据, 通过河网分形维数和稳定性系数计算, 研究了陕北黄土地貌空间分布特征。结果表明: (1) 陕北黄土高原不同地貌类型分形结构复杂程度各异, 表现出不同大小的水系分维值和稳定性系数, 其中, 黄土峁状、梁状丘陵沟壑区地貌结构最为复杂, 分维值最大, 稳定性系数最小。黄土残塬、黄土塬区分维值次之。黄土—风沙过渡区地形结构简单, 地势相对平坦, 分维值最低, 稳定性程度最高。(2) 以分形参数作为定量化指标进行黄土地貌特征研究是可行的, DEM 数据集是研究过程中的核心和基础。分形值所描述的分形特征与地貌类型、地质结构等有一定的相关性。此外, 对分形几何的地质机理还需要进一步分析。

关键词: 黄土高原; 黄土地貌; DEM; 分形维数

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2014)03-0141-04

中图分类号: P208

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2014.03.027

An Analysis on Fractal Characteristics of Typical Landform Patterns in Northern Shaanxi Loess Plateau Based on DEM

CAI Ling-yan, TANG Guo-an, XIONG Li-yan, Kamila Justyna Lis, XIE Ting, Li Ya-ping

(School of Geographic Science, Nanjing Normal University, Nanjing, Jiangsu 210023, China)

Abstract: Adapting the fractal analysis method and raster DEMs of 25 m×25 m, this paper probes into the spatial distribution of landform patterns in the loess landforms of Northern Shaanxi Province by calculating the fractal dimension and stability coefficient of stream-network. Experimental results show that: (1) The complexity of fractal structure differs with various types of loess landforms, embodied mainly in diverse fractal dimensions and stability coefficients. Among these, loess hill and ridge regions possess the highest fractal dimension and the lowest stability coefficient, reflecting its most complex geomorphological structure in the area; loess tableland and scattered loess tableland regions rank the second; and the transitional regions between loess and desert, with rather smooth and simple terrain, present the lowest fractal dimension and the highest stability coefficient. (2) It is proved that the fractal parameter based investigation on the geomorphic features of loess landforms is feasible, and DEM datasets can play a critical and fundamental role in the process. The outcomes derived from fractal dimension show a strong correlation to geomorphic type or geologic structure to some extent. Moreover, more attentions should be paid on its geographical mechanisms.

Keywords: Loess Plateau; loess landform; DEM; fractal dimension

黄土高原是世界上厚度最大、发育最为完整的黄土覆盖区。在长达 200 余万年的地质历史时期中,黄土高原受到各种内营力和外营力的作用,形成了以黄土塬、黄土梁、黄土峁及不同等级沟壑为代表的典型黄土地貌^[1]。黄土高原水热条件组合由南到北地域分异规律十分明显,在一定程度上塑造了由南向北逐渐分异的各种黄土地貌形态。黄土高原独特的地理景观^[2],具有重要的地学研究价值,对区域土壤侵蚀

的分析也具有一定的意义。

多年来,不同领域的学者对黄土高原进行了多方面的研究。吴良超^[3]从沟壑的个体特征及空间分异特征出发,分析黄土高原地区不同地貌的结构差异。王占礼等^[4]以土壤侵蚀为切入点,研究黄土高原典型地貌类型区侵蚀的类型、方式、强度及其分布与组合特征。王春^[5]从地面坡度组合的角度,在宏观尺度上揭示了地面坡度组合与黄土地貌类型之间的量化模

收稿日期:2013-06-06

修回日期:2013-06-24

资助项目:国家自然科学基金项目“基于 DEM 的黄土高原地貌形态空间格局研究”(40930531)

作者简介:蔡凌雁(1991—),女(汉族),江苏省丹阳县人,硕士研究生,研究方向为 GIS 及数字地形分析。E-mail:lingyan_0825@163.com。

通信作者:汤国安(1961—),男(汉族),浙江省宁波市人,博士,教授,博士生导师,主要从事 GIS 应用研究。E-mail:tanguoan@njnu.edu.cn。

型关系,研究表明,不同黄土地貌类型区的地面坡度组合模型不同,黄土高原地貌形态具有某种空间变异规律。高毅平等^[6]在陕北黄土地貌正负地形坡度组合研究中发现,黄土地貌正负地形存在明显差异,地面坡谱的个体差异及其空间差异反映了黄土地貌形态的空间分异。众多研究表明,黄土高原不同地貌类型在结构和分布上各有特点,尤其是以塬、梁、峁为典型代表的黄土地貌在地貌形态、地形结构和水系发育程度等方面表现出明显的地区性特征。然而,黄土地貌形态极其复杂,具有不规则性,许多研究指标尺度依赖性大,不同尺度下得出的结果不一致。所以,用欧式几何来描述地貌特征存在一定的局限性。

1967 年美籍数学家曼德布罗特^[7]在《科学》杂志上发表了题为《英国的海岸线有多长》的著名论文,由此引入了分形的概念。分形方法是处理复杂地貌不规则性和自相似性的有力工具,分形理论在地学分析中的服务与运用也越来越成熟。许多研究显示,黄土地貌表现出不同程度的自相似性,不同地貌组合具有互异的分形结构^[8-13]。本文以分形几何为立足点,以陕北黄土高原地区为研究对象,探讨黄土高原不同地貌类型区的分形特征,从分形分析的角度研究黄土地貌的空间结构和空间分异规律。

1 试验样区和 DEM 数据

本文以陕北黄土高原为研究对象(34°45′—39°40′N,107°28′—111°15′E),陕北地势西北高,东南低,整个地区黄土覆盖面积广,厚度大(一般为 100—200 m,最大厚度可达 300 m),第四纪地层发育完整(从早更新世到全新世黄土)。陕北黄土高原地貌类型从北到南也呈现一定的纬度地带性分异规律,依次分布风积平缓沙地、峁状丘陵、梁峁丘陵、黄土塬、黄土台塬等^[8-10],基本包含了黄土高原典型地貌组合及景观形态。介于陕北黄土高原独特的地理景观和地貌分布空间规律以及黄土高原地形、沟谷等具有较好的自相似性^[13],以此为试验样区利用分形理论进行地貌特征研究,具有一定的科学性和地学分析价值。

数字高程模型(digital elevation model, DEM)是地理信息系统空间数据分析的一种重要数据形式^[14]。试验中采用整个陕北地区 1:50 000 的 DEM 数据,覆盖面积广大,为黄土地貌类型区分形特征研究提供良好的数据基础。

2 试验过程

图 1 表示本研究技术路线。本研究分为前期准备、试验阶段和结果分析 3 个环节。

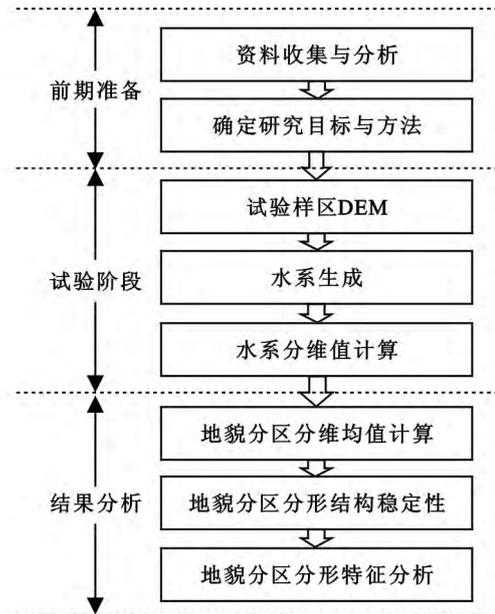


图 1 研究技术路线图

2.1 基于 ArcGIS 的水系自动提取

水系是描述流水地貌形态的有效因子。河网是由干流和不同层次支流组成的网络系统,其结构具有组织性,不同级别的河流之间遵循一定的幂律关系^[15]。从这种分层、分支的结构上来看,河网表现出典型的自相似性,适合作为分形分析对象^[16]。河网的分维值可以反映河流的发育程度及地表侵蚀状况,从而作为不同地貌类型区分异的基础。

ArcGIS 9.3 建立水系提取模型,实现局部区域河网的一体化批量提取。基于 DEM 的河网提取过程包括:(1) DEM 洼地填充,以确保提取出连续的水网;(2) 水流方向提取;(3) 汇流累积量计算;(4) 栅格河网提取;(5) 矢量水系生成^[17]。

在栅格河网提取过程中,阈值大小影响提取结果的沟壑密度。对同一个图幅样区,沟壑密度大则涵盖较多的信息量,表现出较为显著的分形特征。同时,阈值的选取还要根据 DEM 数据的比例尺和分辨率而定。在本试验中,选定阈值大小为 1 000,在 25 m 分辨率的 DEM 数据下,提取出的河网能基本概括该区域地形结构特征。

2.2 Matlab 环境下分维值计算

对于具有分形特征的对象,一般采用分形维数来描述其自相似性程度。分形维数的计算目前已有许多方法,例如分形布朗模型法、明科夫斯基方法、盒维数法、周长—面积法、分规法等^[18],其中盒维数法(box—counting)因计算相对简便且计算方法多样化而被广泛采用。盒维数法有许多等价定义,本试验中使用网格覆盖法^[19],网格覆盖法的基本原理与盒维数法相同。

设 F 是一个非空分形集,在欧式距离下,用边长为 r 的小网格紧邻地包含 F ,用 $N_r(F)$ 表示包含分形集 F 所需要的最小盒子数,则分维值 D 用如下公式来描述:

$$D = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\lg N_r(F)}{-\lg r} \quad (1)$$

随着格网边长 r 的逐渐减小, $N_r(F)$ 也会发生变化。通过计算得到一系列 $[-\lg r, \lg N_r(F)]$ 数据对,分维值就是用最小均方差方法计算出的 $\lg N_r(F)$ 对 $\lg R_r$ 的斜率^[18]。根据分形维数的定义,盒子越小,计算出的分维值越准确。所以,盒子大小 r 趋向于 0 时,则计算出最佳的分维值^[20]。

本试验在 Matlab 环境下计算河网的分形维数,使用图形图像作为记录对象物理信息的载体。在 ArcMap 中将水系按固定比例尺和分辨率导出成数字图像,然后通过灰度值范围设置,得到一系列二值图像(值为 0 或 1),在此基础上将二值图像导入到 Matlab 中计算盒维数^[21]。

3 结果与分析

根据陕北地区地貌分类图,统计不同地貌类型区

水系分维均值。从试验采用的规则格网 DEM 数据出发,不同地貌类型区的分维均值为其所包含的所有格网 DEM 水系分维值的平均值。通过空间分析和属性查询的功能对数据进行处理,实现不同地貌类型区分维均值的可视化表达。

试验显示,陕北黄土高原小单元规则 DEM 河网分维值 D 介于 1.36~1.46,各黄土地貌类型区分维均值 D_m 介于 1.39~1.42。分维值越大,沟壑密度越大,地形结构越复杂。通常认为,分维值为 1.5 时,该类型处于一种近似于布朗运动的随机状态,分维值越接近 1.5,表示该类型越不稳定,地表形态越多样化^[22]。所以,定义一个稳定性指数 S ^[23]:

$$S = |1.5 - D| \quad (2)$$

稳定性指数可以作为描述地形结构复杂度、结构状态稳定性程度的参考。稳定性指数值越大,表示空间形态越稳定,即地形复杂度缓相对和。稳定性指数越小,表示地形复杂程度高。

根据陕北黄土高原地貌类型图(附图 9)和单元图幅水系分维值结果(附图 10),统计几类黄土高原典型地貌类型分形特征,结果如表 1 所示。

表 1 黄土高原典型地貌类型水系分维信息

| 地貌类型 | 地貌特征 | 地理位置 | 分维均值 D_m | 稳定性指数 S |
|------|-------------------------------------|--------------------------------------|------------|-----------|
| 风积沙地 | 风沙—黄土过渡区,分布有连片的梁状丘陵沟壑,上面覆盖薄层片沙或低缓沙丘 | 38°53'—39°28'N, 109°56'—110°50'E' | 1.394 4 | 0.105 6 |
| 黄土梁峁 | 梁峁兼有,以峁为主。沟壑发育,坡面及沟谷流水侵蚀和重力侵蚀剧烈 | 36°54'—39°13'N, 108°52'—110°28'E | 1.407 6 | 0.924 0 |
| 黄土平梁 | 梁顶平坦的梁状地貌,多分布在塬的外围,是黄土塬为沟谷分割而成 | 35°48'—37°20'N, 109°51'—110°17'E | 1.399 6 | 0.100 4 |
| 黄土峁梁 | 丘与鞍状交替分布的梁,梁地间地为冲沟。河沟下切强烈,重力作用明显 | 36°10'—37°12'N, 108°45'—110°1'E | 1.403 7 | 0.096 3 |
| 黄土塬 | 厚层黄土组成的高地,顶部平坦宽阔,四周被沟谷深切 | 35°19'—36°80'N, 108°54'—109°37'E | 1.397 4 | 0.102 6 |
| 黄土残塬 | 受河流切割的黄土破碎塬或零星塬 | 34°42'—35°19'N, 107°39'—109°20'E | 1.400 8 | 0.099 2 |

分析表明,不同的黄土地貌表现出的分形特征和结构稳定性存在差异,即不同类型的地貌发育程度不一致,导致水系分维值大小的差异。黄土高原北部的风积低缓沙地地表坡度变化较缓,地面平均坡度约为 9°,风沙覆盖的地表形态相对简单,沟谷底部较宽,分维值最低,稳定性指数最高;黄土高原中部地区地形结构相对复杂,黄土梁峁、梁沟壑区梁峁兼有,上梁下梁,梁起伏,沟壑密度大,流水侵蚀和重力侵蚀作用强烈,地形起伏变化大,地表破碎,表现出复杂的分形结构,分维值大,则地形稳定性程度低,地表形态变化多样;由黄土塬受沟谷切割而形成的黄土平梁地

区,既有梁状地貌沟壑分布的特征,又有塬区地形相对平坦的特征,表现出次于梁峁区分形复杂度的地形结构。黄土塬、黄土残塬地区,塬面地势平坦,塬部中央倾角多为 1°左右,塬边受沟谷分割,参差不齐,地貌发育处于由青年期向壮年期过渡的阶段,分维值介于黄土梁峁区和风积沙地之间。黄土残塬区由于沟谷溯源侵蚀和下切侵蚀强烈,分维值较塬区要高。

4 结论

(1) 基于分形理论探讨黄土高原不同地貌类型特征的研究方法具有一定的实践意义。分形理论可

以用于复杂地貌类型区的分类研究,不仅能反映不同地貌形态的差异性,还能在一定程度上描述地貌形态的复杂程度。黄土地貌不同组合形态塑造了各种地形结构,进而影响到地表分维值的大小,分维值的差异成为不同地貌分类的理论依据。沟谷网络的分维值描述了黄土高原地表空间结构的复杂程度,据此可以描述侵蚀强度和流水切割深度各异的地貌类型。

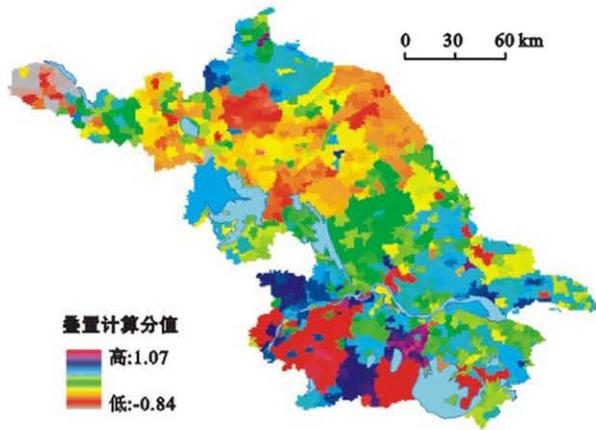
(2) 黄土高原不同地貌类型区水系分维值各不相同,分维值的大小反映了黄土高原地形的复杂程度。从陕北黄土高原的地理分布来看,北部风沙—黄土过渡区覆盖低缓沙丘,地形复杂度相对缓和,地形结构稳定性最高。中部地区梁、峁兼有,沟壑密布,分形结构相对复杂,黄土梁峁地区分维值较大。南部分布有黄土塬、黄土残塬,地形结构比较简单,分维值相对较小。

(3) 在基于 DEM 的数字地形分析方法中,盒维数法计算分形维数是分形分析中应用比较广泛的方法。不同的计算方法计算出的分维值有差异,因为它们量化形状结构特征的角度和层次不一致。但从整体来看,每种计算方法都能够描述局部的差异性,以适用于局部的横向与纵向对比。盒维数法的原理和方法相对简单,能够定量地表达出不同地貌类型区分形结构特征,是快速计算分形维数的有效手段。

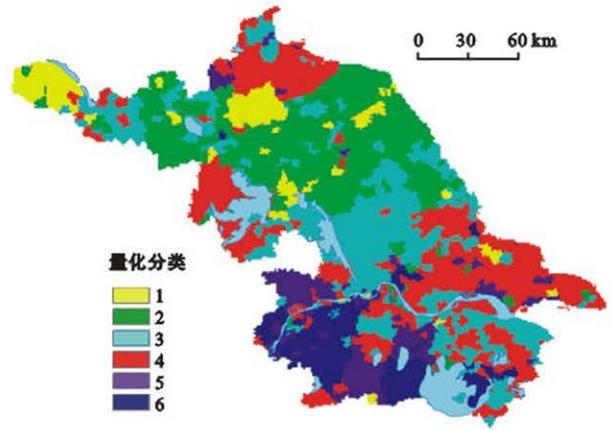
黄土地貌在地质作用、环境因素、人为活动的影响下形成不同的地形结构,表现出各不相同的分形特征。分形分析的方法多种多样,对于不同的研究对象,需要从实际情况出发,选择最优的研究方法。所以,基于分形理论的黄土地貌特征研究还需要更深入地探索,以形成更加全面、科学的研究结果。

[参 考 文 献]

- [1] 柴慧霞,程维明,乔玉良. 中国“数字黄土地貌”分类体系探讨[J]. 地球信息科学, 2006, 8(2): 6-13.
- [2] 吴成基,陶盈科,林明太,等. 陕北黄土高原地貌景观资源化探讨[J]. 山地学报, 2006, 23(5): 513-519.
- [3] 吴良超. 基于 DEM 的黄土高原沟壑特征及其空间分异规律研究[D]. 西安: 西北大学, 2005.
- [4] 王占礼,邵明安. 黄土高原典型地区土壤侵蚀共性与特点[C]. 山地学报, 2001, 19(1): 87-91.
- [5] 王春. 黄土高原不同地貌类型区地面坡度组合特征[C]// 中国地理学会 2004 年学术年会暨海峡两岸地理学术研讨会论文摘要集. 2004.
- [6] 高毅平,汤国安,周毅,等. 陕北黄土地貌正负地形坡度组合研究[J]. 南京师大学报: 自然科学版, 2009, 32(2): 135-140.
- [7] Mandelbrot B B. How long is the coast of Britain? [J]. Science, 1967, 156(3775): 636-638.
- [8] 龙毅,周炯,汤国安,等. 典型黄土地貌类型区的地形复杂度分形研究[J]. 山地学报, 2007, 25(4): 385-392.
- [9] 李军锋. 基于 GIS 的陕北黄土高原地貌分形特征研究[D]. 西安: 西北大学, 2006.
- [10] 曹颖. 基于 DEM 的地貌分形特征研究: 以陕北黄土高原部分样区为例[D]. 西安: 西北大学, 2007.
- [11] 崔灵周,李占斌,郭彦彪,等. 基于分形信息维数的流域地貌形态与侵蚀产沙关系[J]. 土壤学报, 2007, 44(2): 9-13.
- [12] 张兴建,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(1): 9-15.
- [13] 雷会珠,武春龙. 黄土高原分形沟网研究[J]. 山地学报, 2001, 19(5): 474-477.
- [14] 汤国安,刘学军,闫国年,等. 数字高程模型及地学分析的原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [15] 蒋甜,陈端吕. 基于 DEM 的河网水系分形特征研究[J]. 中国农学通报, 2013, 29(2): 166-171.
- [16] David G. Tarboton, Rafae L. Bras, Ignacio Rodriguez-Iturbe. The fractal nature of river networks [J]. Water Resources Research, 1988, 24(8): 1317-1322.
- [17] 汤国安,杨昕. ArcGIS 地理信息系统空间分析实验教程[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [18] 笃宪,曾文曲,文有为. 分形维数计算方法的研究[J]. 微机发展, 2004, 14(9): 17-19.
- [19] 冯志刚,周宏伟. 图像的分形维数计算方法及其应用[J]. 江苏理工大学学报: 自然科学版, 2001, 22(6): 92-95.
- [20] Tricot C. Curves and fractal dimension [M]. New York: Springer Verlag, 1995.
- [21] 杨书申,邵龙义. MATLAB 环境下图像分形维数的计算[J]. 中国矿业大学学报, 2006, 35(4): 78-82.
- [22] 杨洋,毕如田. 黄土高原典型地貌类型的土地利用分形特征[J]. 地理与地理信息科学, 2011, 27(1): 101-104.
- [23] 徐建华,艾南山. 西北干旱区景观要素镶嵌结构的分形研究: 以黑河流域为例[J]. 干旱区研究, 2001, 18(1): 35-39.

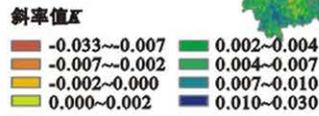
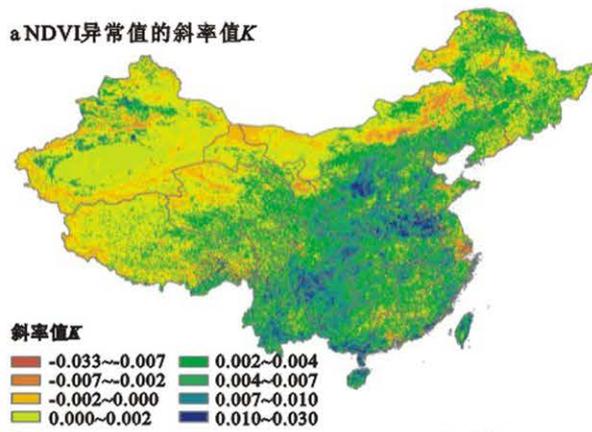


附图6 江苏省水土保持区划指标要素图层有条件栅格图像

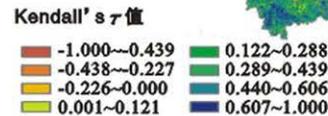
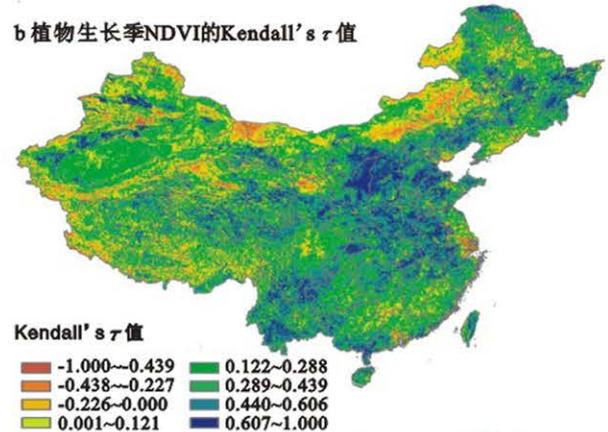


附图7 江苏省水土保持区划量化分类

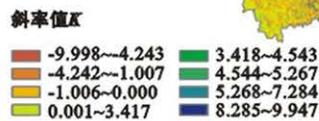
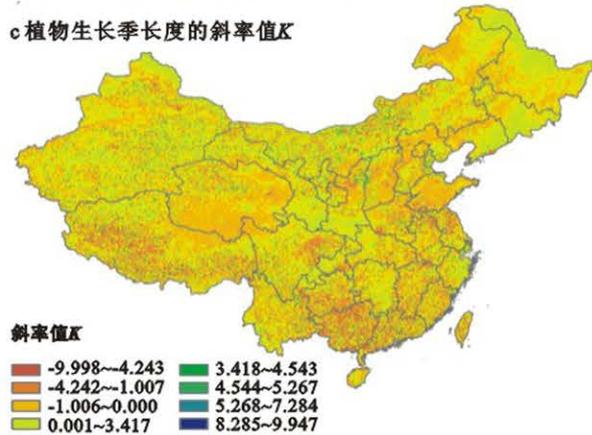
a NDVI异常值的斜率值K



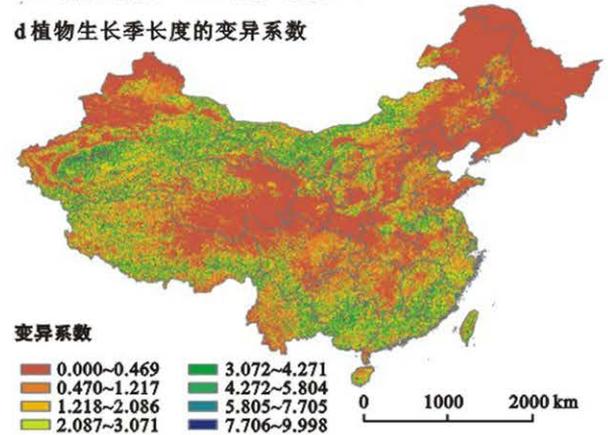
b 植物生长季NDVI的Kendall's τ 值



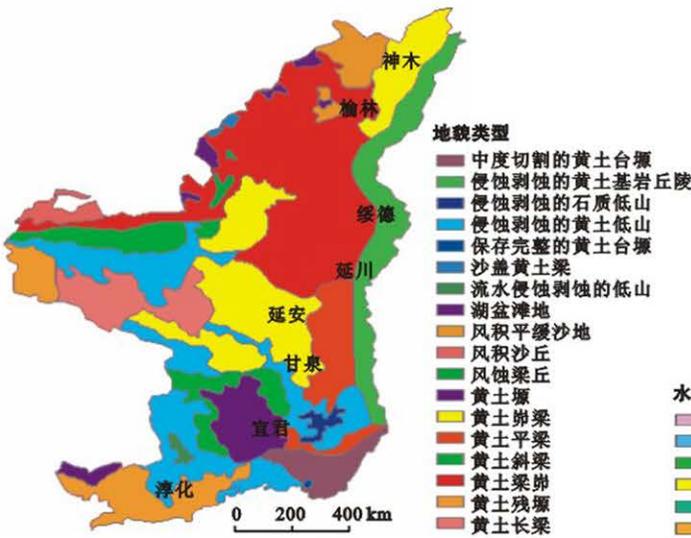
c 植物生长季长度的斜率值K



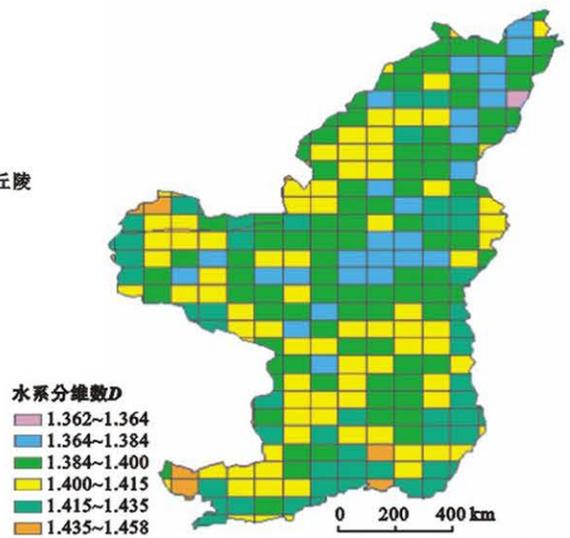
d 植物生长季长度的变异系数



附图8 中国1999—2010年植被覆盖特征趋势空间分布



附图9 陕北黄土高原地貌类型



附图10 陕北黄土高原单元幅水系分维数可视化结果