

# 利用分形参数进行地貌定量分区研究\*

## ——以鄂尔多斯块体及周边为例

毕丽思 何宏林 魏占玉 石峰

(中国地震局地质研究所国家地震活断层研究中心,北京 100029)

**摘要** 地貌分区是地学研究的基础内容之一。传统的地貌分区大多是定性的划分,随着数字地形技术以及分形分析方法的成熟,利用分形参数进行量化的地貌分区成为可能。本文利用水平分辨率为90m的SRTM数据,采用元分维模型,通过变差函数法计算了鄂尔多斯块体及周边地形的分形参数。在65×65,129×129以及257×257等3种尺度滑动窗口中得到的分形参数的特征表明了研究区地形分形特征的尺度不变性至少在2.97km到11.61km范围内是存在的,而且分形参数分布具有明显的区域差异。结合地表分维值和截距值用K-Means非监督分类法进行综合地貌定量分区,所得结果与地貌类型有很好的吻合关系,每一地貌分区都具有特征的分形值组合。河套盆地和银川盆地是地表分维值高值区和截距值低值区,分维值主要为2.8~3.0,截距值主要为0~1;鄂尔多斯块体南部陕北黄土高原区地表分维值主要为2.5~2.7,截距值主要为2.5~3.5;吕梁山、贺兰山、乌拉山等山区也是截距值高值区,主要为2.5~3.5,但地表分维值较低,主要为2.4~2.6。鄂尔多斯块体北部库布齐、毛乌素等沙漠区与渭河、山西盆地都是地表分维值低值区,地表分维值大部分低于2.5,但两区域的截距值差异明显。沙漠区地形起伏较缓,截距值主要为0~1.5,而渭河盆地和山西盆地带的截距值没有明显的优势范围。分形值组合所显示的分形特征与地质构造、地貌类型等具有明显的相关性。因此,利用分形参数进行地貌分区是一种可行的定量方法。

**关键词** 地貌分区 定量 分形 鄂尔多斯块体 变差函数 元分维 K-Means 非监督分类法  
**中图分类号** P553, P931 **文献标识码** A

## 1 引言

地貌即地球表面形态,是自然地域综合体的主导因素<sup>[1]</sup>,不同区域的内外力环境形成不同的地貌类型。地貌分区就是地球表面形态类型组合差异的区域划分<sup>[2]</sup>,是地学研究的核心与基础内容之一。地貌分区与分类由来已久,但我国至今尚未形成一个公认的地貌分类系统<sup>[3]</sup>。一般而言,地貌分区所考虑的原则可归纳为按形态、按成因、按形态成因、按多指标综合等方式<sup>[3,4]</sup>。上述方式中,除了按形态方式外,其余方式都是定性的分区,而且需要大量的野外调查工作。虽然形态方式中包含多种可量化的指标,但由于技术限制,早期地貌划分主要是按照海拔高度和起伏高度等指标,这两个指标难以确定反映地貌类型间差异的阈值。近年来,随着数字高程模型和计算机技术的发展进步,描述地貌形态的指标,如海拔高度、地形起伏度、坡度、坡向、形态密

度、地表切割深度等,都可以进行自动化计算。目前,不少学者利用各种地貌形态指标对不同研究区实现了地貌的量化、自动化分类<sup>[5-16]</sup>。但是,上述形态指标只是地形某一特征的反映,在地貌分区时需要多个指标,各指标之间冗余度大,而且这些指标依赖于尺度,同样的指标组合在不同的尺度下会产生不同的地貌分区结果;而分形参数恰恰克服了以上不足,能够定量地刻画地貌形态的综合特征尤其是跨尺度特征。实际上,地貌形态是极其复杂和不规则的,并不能用欧氏几何来描述。面对复杂的地貌形态,分形方法成为了处理其不规则性和自相似性的有力工具<sup>[17-21]</sup>。利用分形分析方法进行定量的、客观的地貌分区已取得了一定成果<sup>[22-25]</sup>。随着分维值计算方法的成熟以及数字地形、图像分类等相关技术的发展,分形分析方法在定量地貌分区方面展现出良好前景。

计算地貌分维值的方法很多,对于同一地貌不

第一作者简介:毕丽思 女 25岁 硕士研究生 活动构造学专业 E-mail:bi\_lisi@126.com

\*国家自然科学基金项目(批准号:40872128)资助

2010-08-09 收稿,2010-10-21 收修改稿

同方法计算得到的分维值往往是不相同的<sup>[20,26-29]</sup>。而变差函数法被认为是直接实现分形表面分维值求算的最可靠、最准确的方法<sup>[20,27,28]</sup>。另外,传统的分形模型往往把研究区域的分形特征看作是一致的,并用单一分维值来描述地表的空间复杂性<sup>[28]</sup>,这种大范围内单一的分维值严重忽略了地貌对象的内部变化,而且不利于地貌的分形分区,所以近年来利用元分维模型来分析地貌分形特征成为一种讨论地貌发育过程中空间差异的重要工具<sup>[23,24,30,31]</sup>。此外,元分维模型能更好地与K-Means非监督分类等分类模型结合,实现自动分类。

为了更好地体现利用分形参数进行地貌分区的可行性,本文选择鄂尔多斯块体及周边为研究区。鄂尔多斯是一个稳定块体,新生代以来随着印度板块与欧亚板块碰撞,青藏高原隆起并向北东扩展,发生了逆时针旋转并在其周边形成张剪性构造带<sup>[32-35]</sup>。差异明显的构造环境和演化历史,使鄂尔多斯块体及周边的构造带高程变化显著,地貌类型多样,地表形态不一。

## 2 研究区概况与 DEM 数据

鄂尔多斯块体位于南北地震带东侧,青藏高原的东北缘,同时也位于华北、华南和青藏三大亚板块

的交接部位,在大地构造上属于中朝准地台的西部。在早元古代末期,鄂尔多斯块体的结晶基底形成;中晚元古代至古生代,鄂尔多斯块体经受多次隆升-沉降旋回,存在多次沉积间断;中生代,鄂尔多斯块体作为稳定的地块相对周缘作不均一沉降,形成西深东浅的大型拗陷盆地,广泛发育了三叠纪至早白垩世的湖盆沉积;晚白垩世至古新世,全区处于缓慢隆升状态,遭受剥蚀夷平;始新世开始,由于喜马拉雅运动的影响,鄂尔多斯块体发生逆时针旋转并在周缘形成断陷带,接受巨厚的新生代沉积。现今的鄂尔多斯块体内部构造活动相对微弱,不发育大规模的活动断层,但周边盆地带运动复杂,活动构造发育,地震活动频繁,为张剪性构造边界。由于受青藏高原的强烈挤压,鄂尔多斯块体发生逆时针旋转并在其周边形成张剪性构造带,东、西两侧分别为北北东向右旋正走滑断裂控制的山西断陷盆地和银川-吉兰泰断陷盆地,南、北两侧则分别是受近东西向左旋正走滑断裂控制的渭河和河套断陷盆地(图1)<sup>[32-42]</sup>。另外,根据GPS观测结果表明,鄂尔多斯块体西边界向北北东方向运动,北边界向东运动,东边界和南边界总体上向南东方向运动<sup>[43]</sup>。

在上述地质背景和构造活动的控制下,鄂尔多

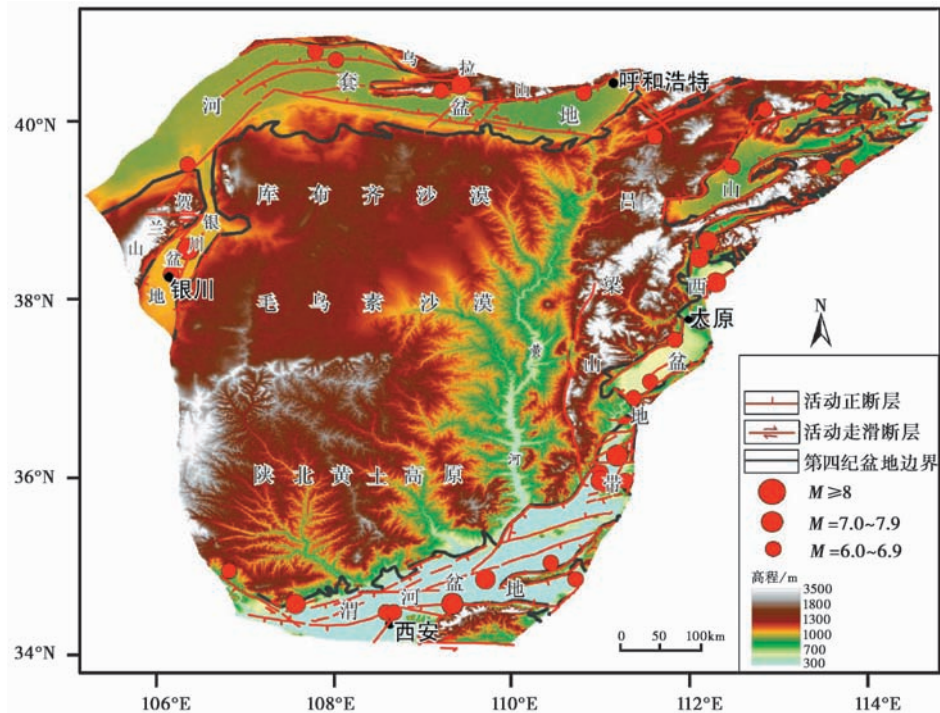


图1 鄂尔多斯块体及周边地区构造与地貌略图

地形数据为 SRTM, 活动构造和地震资料据邓起东等<sup>[42]</sup>

斯块体及周边的地貌具有明显的区域差异(图 1)。块体内部地质构造单一,是一个相对完整的隆起区,有白于山和子午岭等次级隆起地表变形微弱,北西翘起,向南东倾斜<sup>[35,44]</sup>。北部地形较为平坦,隆升幅度较低,以沙漠地貌为主,主要是库布齐沙漠和毛乌素沙漠,一般海拔高度为 1000 ~ 1400m;南部是陕北黄土高原,隆升幅度较大,发育多级河流,侵蚀作用强烈,河流切割较深,是典型的黄土高原地貌,一般海拔高度为 1300 ~ 1500m<sup>[35,45]</sup>。块体四周边缘发育有与周边断陷盆地带平行的长条状隆起带,它们一般高于高原块体数百米,如块体与其东边界之间的吕梁山隆起,其海拔高达 2000 ~ 2500m<sup>[35]</sup>。块体的北界为河套断陷盆地带,规模大,是一个复式盆地,由被西山咀凸起和包头凸起分隔开的呼包、白彦花和临河等 3 个连续的次级盆地组成,它们近乎平行排列,相互交错、重迭,略呈斜列形式,盆地断陷幅度大,北深南浅,但内部分异不明显<sup>[35,38,46-48]</sup>。南界为渭河断陷盆地带,海拔较低,盆地向南倾斜,沉降中心靠近南侧主断裂,盆地内存在小型断块山地及凸起<sup>[35,38]</sup>。西界为银川盆地,整体作近南北向延伸,为一东缓西陡的地堑式盆地,是晚新生代以来在新构造运动基础上发育的冲积、洪积、湖积平原,盆地内山前洪积扇被 NNE 向断裂断错,形成不连续断层崖带<sup>[35,38]</sup>。东界为山西断陷盆地带,形成于上新世,是鄂尔多斯块体周边断陷盆地系中形成最晚的盆地带,由十余个大小不等的北东、北北东走向的不连续分布的地堑或半地堑盆地左行斜列组成,总体走向北北东,平面上呈“S”形。盆地内次级隆起和凹陷发育,而且盆地之间发育与盆地走向平行的长条状隆起带,形成典型的盆岭构造<sup>[35,38,46]</sup>。

研究区的范围(图 1)是依据中国活动构造图<sup>[42]</sup>以及中国活动块体和边界构造带的划分<sup>[49]</sup>选取的。所选择的 DEM 地形数据是航天飞机雷达地形测量数据(SRTM),基本上没有噪声,水平分辨率为 90m,高程误差在 20m 左右,对于鄂尔多斯块体及周边几十万平方公里的区域性地貌研究是一个合理的分辨率,过低和过高的分辨率都会掩盖区域性的地貌分形信息。

### 3 研究方法

#### 3.1 变差函数法

目前对地貌分形特征的研究大多数是对地形剖面或等高线进行一维分形测量,这仅仅是二维曲面的

近似测量方法,它严重损失了地形的二维信息,使其准确性和应用价值受到影响<sup>[50]</sup>。而变差函数法被认为是直接实现分形表面分维值求算的最可靠、最准确的方法<sup>[20,27,28]</sup>。变差函数是刻画区域变量空间相关变异性的重要工具,所求得的分形参数可以区分不同的地貌区<sup>[27]</sup>。它在计算分形参数时以分形布朗运动表面为前提条件,而地貌的起伏形态已被证实符合分形布朗运动表面特征<sup>[29,51,52]</sup>。另外,变差函数法还十分适用于栅格形式的 DEM 数据<sup>[28]</sup>。

对于地表起伏的 DEM 数据  $Z(x, y)$ ,变差函数法的核心思想是:DEM 数据高程场的平均差异,即高程差的均方值,如何随点对间的距离变化,用数学公式表示为:

$$E[(Z(x, y) - Z(x + \Delta x, y + \Delta y))^2] = [(\Delta x^2 + \Delta y^2)^{\frac{1}{2}}]^{2H} \quad (1)$$

$E[(Z(x, y) - Z(x + \Delta x, y + \Delta y))^2]$  表示所有距离为  $(\Delta x^2 + \Delta y^2)^{\frac{1}{2}}$  的点对高程差的均方值。从公式(1)可以看出地表起伏面的变差函数遵循幂定律关系, $H$  为赫斯特指数,取值范围为  $[0, 1]$ 。分形维数  $D$  与  $H$  具有以下关系:

对于线状分形体:  $D = 2 - H$ ; 对于面状分形体:  $D = 3 - H$ 。

分维值  $D$  直接与变差函数(公式(1))双对数图中线性回归拟合直线(图 2)的斜率有关,本文定义拟合直线在最小点对距离(即 DEM 数据的分辨率,本文为 90m)处的截距为  $\gamma$ ,定义变差函数双对数图中直线部分的范围为  $R$ 。截距值  $\gamma$  表示 DEM 数据相邻像元点高程差的均方值, $R$  反映了地表形态分形特征存在的尺度范围。分维值( $D$ )、截距值( $\gamma$ )以及分形范围( $R$ )统称为由变差函数法得到的分形参数。学者们研究发现,分维值除了反映了地表起伏的复杂程度和不规则性外,更重要的是反映了地表形态的结构特征,即地表起伏的频率特征;高分维值表示地表形态中具有较多的高频成分,地形在局部范围内迅速变化,而在长距离上变化不大;低分维值则相反。截距值则反映了地表的起伏程度<sup>[23,24,27]</sup>。

#### 3.2 元分维模型

为了解决以往用单一分维值来代表一个地貌对象而忽略了地貌对象内部变化的问题,本文采用元分维模型,以便更全面地反映地表形态细节单元的分形特征,从而达到利用分形参数进行量化地貌

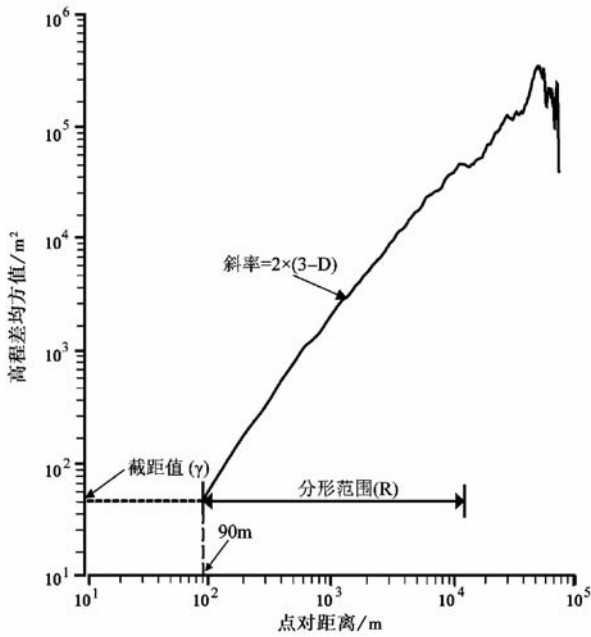


图2 变差函数双对数图

分形值 D 可通过拟合直线的斜率得到,截距值  $\gamma$  是拟合直线在最小点对距离(本文为 90m)处的截距,R 为变差函数双对数

图中拟合直线的线性范围,也是分形特征存在的范围

Fig.2 Schematic diagram of the variogram calculating the fractal parameters in log-log plot

分区的目的。

元分维模型主要是采用“滑动窗口”技术来实

现,详细操作过程如下:采用一个相同尺度的窗口,窗口尺度  $W = 2^n + 1$ ,其中 n 为正整数,如  $n = 6, W = 65, 65 \times 65$  为窗口大小;该窗口沿着 DEM 数据网格自上而下,从左到右依次滑动,将每一次的窗口区域作为一个地貌单元,计算其分形参数作为该窗口中心网格的属性值,窗口每次向右或向下移动的距离为  $\frac{1}{2}(W + 1)$  (图 3b),最终遍历整个地貌分析区域(图 3a)。这样分形参数代表了以滑动窗口中心网格为中心,范围为  $\frac{1}{2}(W + 1)$  的单元区域的分形特征值(图 3c),因而命名为元分维模型。

元分维模型不仅提供了一个直接反映地形复杂性空间变异的定量方法<sup>[31]</sup>,而且窗口内的地貌单元可看作是均质体,避免了多重分形特征的影响。在元分维模型中,滑动窗口尺度的选择是关键。若窗口尺度过小,不仅割裂了目标对象内部的连续性,而且使得用于计算分形参数的数据太少而增加分形参数的不确定性;若窗口尺度过大,一方面增加了窗口内地貌单元的异质性以及多重分形特征的影响,另一方面降低了分形参数的分辨率。实验发现,分形参数的准确度随着窗口尺度的减小而降低,30 × 30 是可选择的最小窗口尺度,得到的分形参数的准确度达 80%;当窗口尺度为 65 × 65 时,分形参数的

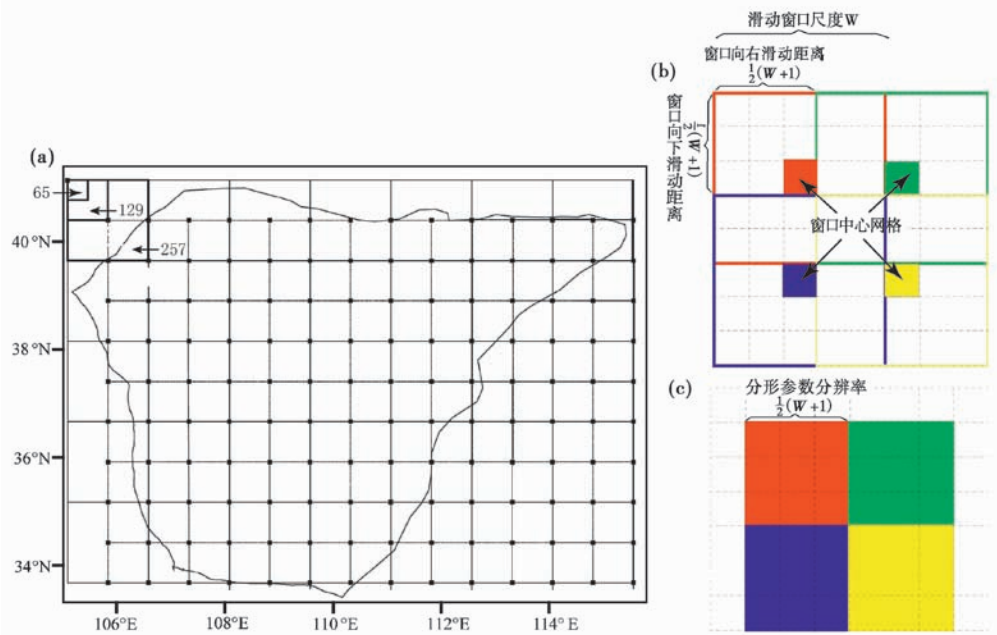


图3 元分维模型示意图

(a)3 种尺度滑动窗口遍历鄂尔多斯地块及周边地区示意图,所画窗口大小并不代表对应区域的实际面积 (b)“滑动窗口”技术在元分维

模型中实现过程示意图,滑动窗口尺度为 W,红、绿、紫、黄框示意窗口依次滑动的位置,每次向右或向下滑动的距离为  $\frac{1}{2}(W + 1)$

(c) 对应于(b)滑动窗口尺度 W 得到的分形参数的分辨率为  $\frac{1}{2}(W + 1)$

Fig.3 Schematic diagram of the cellular fractal model



准确度达 90% 以上,此时分形参数的分辨率  $33 \times 33$  亦比较合适<sup>[23]</sup>。本文使用表 1 所示的 3 种窗口尺度。另外,元分维模型中每个窗口内的数据都保持 DEM 数据的二维矩阵栅格格式,这对利用变差函数计算分形参数十分有利。

表 1 滑动窗口尺度及对应的分形参数的分辨率

Table 1 Spatial unit of calculating fractal parameters by the moving window operation

滑动窗口 尺度(DEM 栅格点数)	窗口滑动 距离(DEM 栅格点数)	分形参数的 空间分辨率 (栅格点数)	分形参数的 单位面积 /km <sup>2</sup>
65 × 65	33	33	2.97 × 2.97
129 × 129	65	65	5.85 × 5.85
257 × 257	129	129	11.61 × 11.61

### 3.3 K-Means 非监督分类

随着计算机技术和遥感技术的发展,计算机遥

感图像分类越来越成熟,它的核心是统计模式识别技术,分类的依据主要是图像像素值或灰度值的相似程度。其中 K-Means 非监督分类法是比较先进、成熟,也比较常用的方法之一。它首先以 K 为参数,计算数据空间上均匀分布的初始类别均值,然后用最短距离技术对像元进行聚类,把它们聚集到最相似的类中。每次聚类重新计算类别均值,并且用这一新的均值对像元进行再分类。这一过程持续到类内的相似度高而类间的相似度最低,或者有关参数达到允许的范围。K-Means 非监督分类法简单,不需要较多的先验知识,减少了人为误差,而且分类精度可观<sup>[53-55]</sup>。

本文利用变差函数法和元分维模型计算鄂尔多斯块体及周边不同尺度窗口下的分形参数,把每个单元的分形参数作为该像元的属性值,并按照线性关系赋予灰度值,这样就得到了反映分形特征的灰度图像,能够利用 K-Means 非监督分类法进行自动分类。

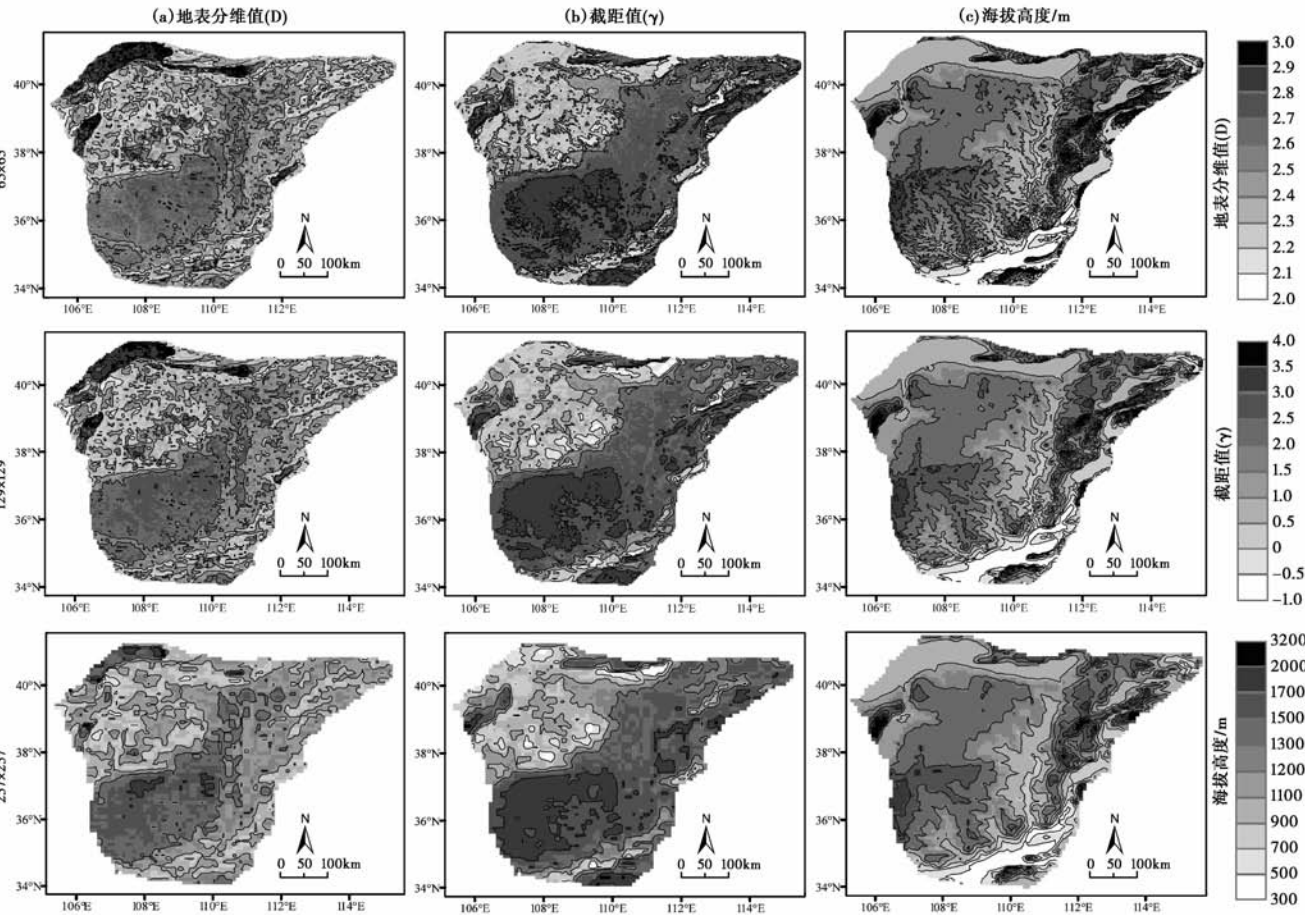


图 4 鄂尔多斯块体及周边不同分辨率的地表分维值(a)、截距值(b)以及海拔高度(c)的等值线分布图

Fig. 4 The contour maps of the surface fractal dimension, the ordinate-intercept and the elevation of Ordos Block and surrounding areas in different resolutions

### 4 结果

利用表 1 所列 3 种尺度滑动窗口分别计算鄂尔多斯块体及周边地貌的分形参数。计算结果显示, 分别在 3 种滑动窗口下计算得到的变差函数双对数

图在窗口尺度范围内均为直线, 即窗口尺度未超出地形地貌的分形尺度  $R$ , 所以每种窗口尺度的单元均可看作具有单一分形特征, 多重分形特征不明显。另外, 不同尺度窗口下的地表分维值与截距值的等值线分布形态 (图 4a 和 4b) 均十分相似。上述特

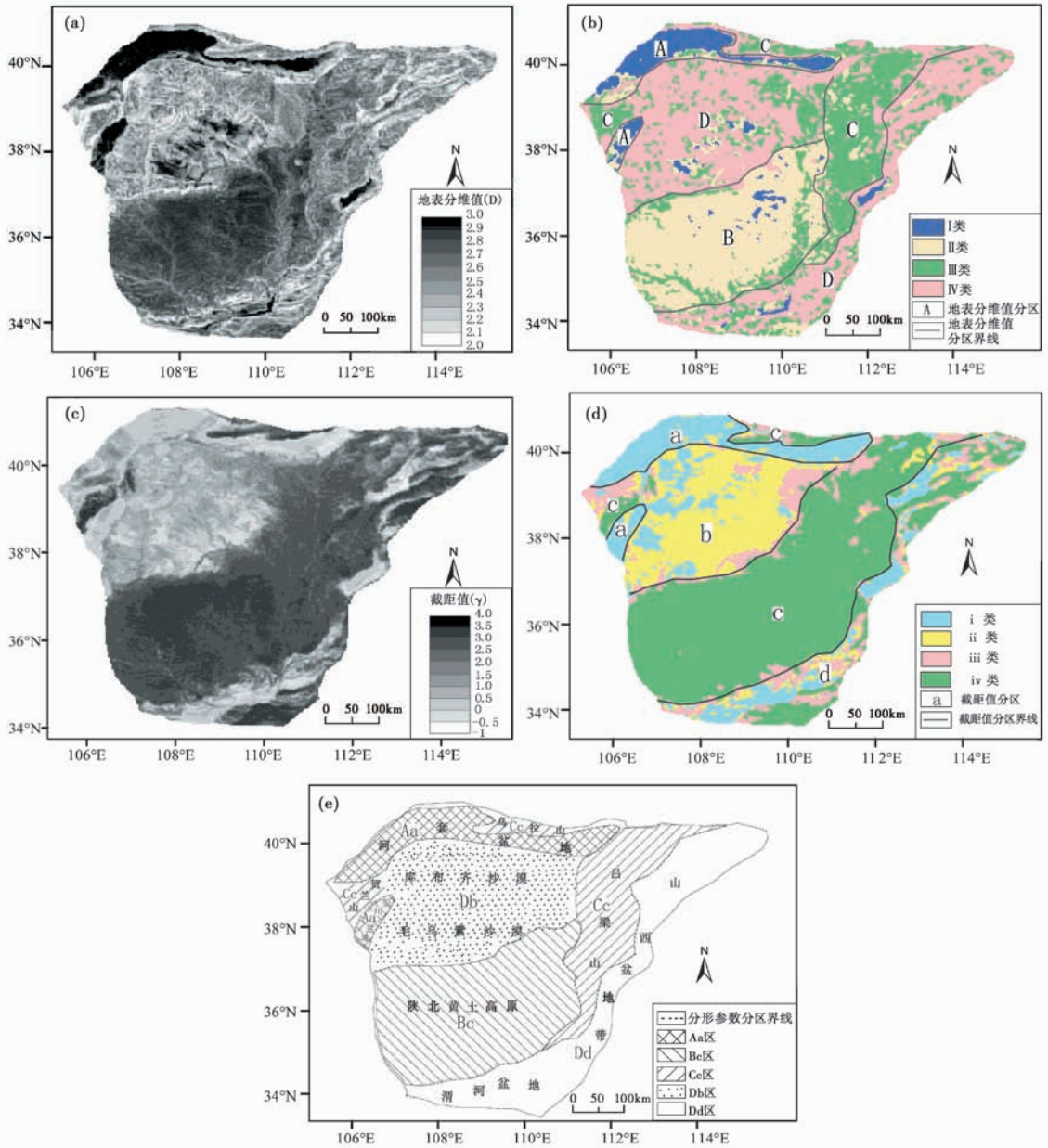


图 5 鄂尔多斯块体及周边地貌分形参数定量分区图

(a) 地表分维值分布图 (b) 基于地表分维值, 由 K-Means 非监督分类法得到的地形分维数定量分区结果 (I, II, III 和 IV 是聚类过程中自动产生的类别的代号, 其代表的地表分维值依次降低; A, B, C 和 D 是根据地表分维值的聚类结果划分的地貌分区的代号) (c) 截距值分布图 (d) 基于截距值, 由 K-Means 非监督分类法得到的地形截距值定量分区结果 (i, ii, iii 和 iv 是聚类过程中自动产生的类别的代号, 其代表的截距值依次增大; a, b, c 和 d 是根据地形截距值的聚类结果划分的地貌分区的代号) (e) 综合地表分维值  $D$  与截距值  $\gamma$  得到的地形分形定量分区结果及其与实际地貌类型的对应关系 (Aa, Bc, Cc, Db 和 Dd 是地表分维值  $D$  与截距值  $\gamma$  联合定量分区的代号)

Fig. 5 Maps of the quantitative geomorphologic zonation based on the surface fractal dimension and the ordinate-intercept in Ordos Block and surrounding areas

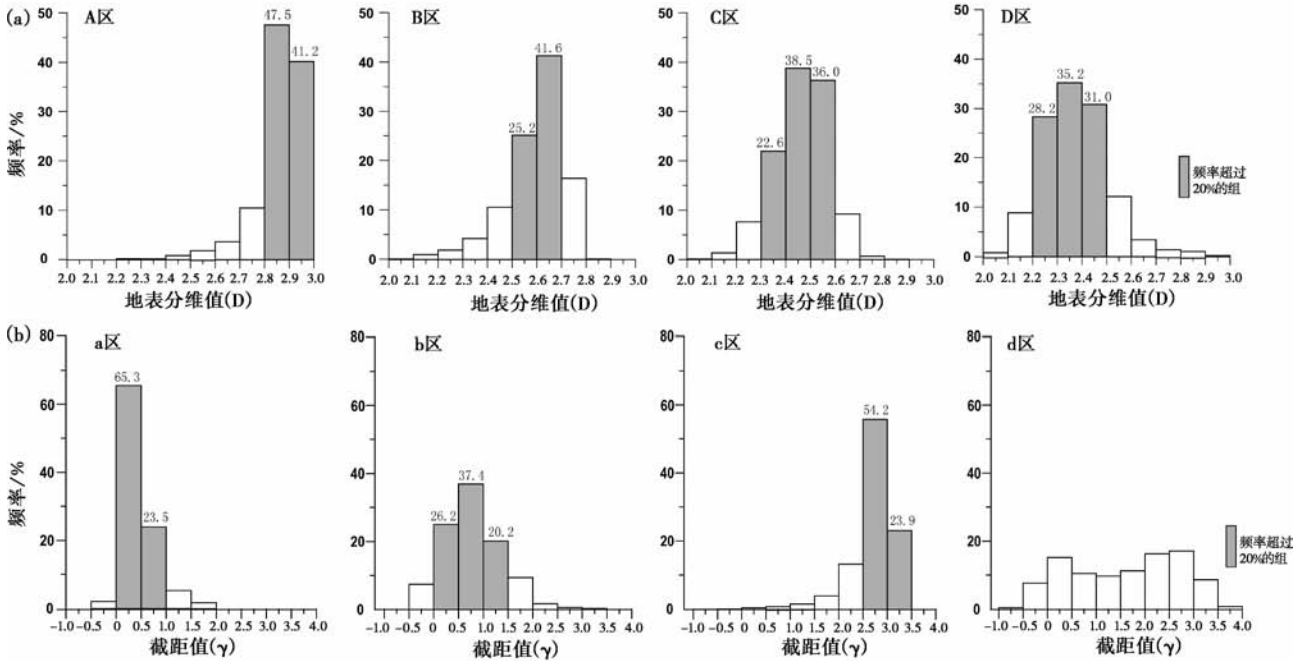


图6 鄂尔多斯块体及周边地表分维值(D)及截距值( $\gamma$ )直方图  
 (a) 鄂尔多斯块体及周边各地表分维值分区(对应于图5b)的分维值直方图  
 (b) 鄂尔多斯块体及周边各地形截距值分区(对应于图5d)的截距值直方图

Fig. 6 Histograms of the surface fractal dimension and the ordinate-intercept in each zone classified by D and  $\gamma$ , respectively

征表明鄂尔多斯块体及周边地貌分形特征的尺度不变性至少在 2.97km 到 11.61km 范围内是存在的,也反映了变差函数法在计算地表分形参数时相对于滑动窗口的尺度变化是稳定的。同时,地表分维值的分布显示,起伏低缓的盆地,如河套盆地、银川盆地等具有较高的分维值;起伏较陡峻的山区,如贺兰山、吕梁山等具有较低的分维值;在低缓盆地向山区过渡的边界带以及具有长波长起伏的沙漠区,分维值最低。而截距值的分布显示出两个大的分区,鄂尔多斯北部库布齐沙漠、毛乌素沙漠和河套地区的低值,以及鄂尔多斯南部、吕梁山等山区的高值。

由于地形分形参数反映了地表起伏的综合特征,而且从图4可以看出,地表分维值和截距值的分布特征具有明显的区域差异,形成的纹理与实际地表形态吻合。因此,利用分形参数进行地貌定量分区是可能的。我们利用 K-Means 非监督分类法对本文获得的分形参数(图5a和5c)进行定量聚类,将鄂尔多斯块体及周边划分为不同区域(图5b和5d),图6和表2、表3展示了分别根据地表分维值和截距值得到的地貌分区的分形参数的优势范围、平均值和标准差。分别根据两个分形参数识别出的地貌分区(图5b和5d)具有较好的形态相似性和

表2 鄂尔多斯块体及周边地表分维值定量分区(对应于图5b)统计表\*

Table 2 Statistics of the surface fractal dimension in each zone(in Fig. 5b)

地表分维值分区	地表分维值优势范围	地表分维值平均值	地表分维值标准差	主要地貌区
A	2.8 ~ 3.0	2.85	0.10	河套盆地、银川盆地
B	2.5 ~ 2.7	2.59	0.12	陕北黄土高原
C	2.3 ~ 2.6	2.46	0.11	吕梁山、贺兰山、乌拉山
D	2.2 ~ 2.4	2.38	0.16	库布齐沙漠、毛乌素沙漠、山西盆地、渭河盆地

\* 表2以及表3、表4中的优势范围是指各区域分形参数值的直方图(图6)中频率大于20%的组对应的范围

表3 鄂尔多斯块体及周边地形截距值定量分区(对应于图5d)统计表

Table 3 Statistics of the ordinate-intercept in each zone(in Fig. 5d)

截距值分区	截距值优势范围	截距值平均值	截距值标准差	主要地貌区
a	0 ~ 1	0.45	0.36	河套盆地、银川盆地
b	0 ~ 1.5	0.76	0.54	库布齐沙漠、毛乌素沙漠
c	2.5 ~ 3.5	2.68	0.50	陕北黄土高原、吕梁山、贺兰山、乌拉山
d	无	1.6	1.10	渭河盆地、山西盆地

表 4 鄂尔多斯块体及周边地表分维值与截距值联合定量分区(对应图 5e)统计表

Table 4 Statistics of the surface fractal dimension and the ordinate-intercept in each zone(in Fig. 5e)

分形参数分区	地貌区	地表分维值 优势范围	地表分维值 平均值	地表分维值 标准差	截距值 优势范围	截距值 平均值	截距值 标准差	平均高程 /m
Aa	河套盆地、银川盆地	2.8~3.0	2.85	0.10	0~1.0	0.45	0.36	1028.7
Bc	陕北黄土高原	2.5~2.7	2.59	0.12	2.5~3.5	2.68	0.50	1260.0
Cc	吕梁山、贺兰山、乌拉山	2.4~2.6	2.46	0.11	2.5~3.5	2.68	0.50	1406.5
Db	库布齐沙漠、毛乌素沙漠	2.2~2.4	2.38	0.16	0~1.5	0.76	0.54	896.8
Dd	山西盆地、渭河盆地	2.2~2.4	2.37	0.14	无	1.6	1.10	1335.5

分区边界一致性,但是两个分形参数的分区结果并不是完全一致的,而且基于单一分形参数并不能很好地区分不同的地貌类型,如沙漠区与山西盆地属于同一个地表分维值分区(图 5b 和表 2),陕北黄土高原区与吕梁山区属于同一个截距值分区(图 5d 和表 3)。因此,结合两个分形参数进行综合地貌定量分区是合适的选择。结果表明,两分形参数的联合定量分区结果与地貌类型有很好的吻合关系(图 5e),表 4 总结了地表分维值与截距值联合定量分区每一地貌分区的分形特征值组合。Aa 区地貌上属于河套盆地和银川盆地,是地表分维值高值区,分维值在 2.8~3.0 范围内的窗口单元达 88.7%,平均分维值达 2.85,截距值较低,88.8% 为 0~1,高程主要在 1000m 左右。由于这两个盆地规模大,盆地内地形起伏基本一致,因此形成的地表分维高值区以及截距值低值区十分明显。Bc 区的地表分维值低于 Aa 区,分维值在 2.5~2.7 范围内的窗口单元达 66.8%,平均值为 2.59,地表起伏较大,接近 80% 的窗口单元的截距值在 2.5~3.5 的高值范围。该区为典型的黄土高原地貌,发育多级河流,侵蚀作用较强。Cc 区包括为吕梁山区、贺兰山、乌拉山,具有中等大小的分维值,近 75% 的窗口单元的分维值为 2.4~2.6,平均值约为 2.46;该区域地势高,地形起伏较大,有 78.7% 的窗口单元的截距值在 2.5~3.5 的高值范围。Db 区与 Dd 区均为地表分维值低值区,两区共有超过 90% 的窗口单元的地表分维值低于 2.5,但两区域的截距值差异明显。Db 区位于鄂尔多斯高原北部,截距值比较低,84.8% 的窗口单元的截距值在 0~1.5 范围内,地貌上包括库布齐沙漠和毛乌素沙漠。Dd 区为鄂尔多斯块体东缘及东南缘,地貌包括渭河断陷盆地和山西断陷盆地,与 Aa 区内的盆地相比,Dd 区内的盆地规模较小,且不连续,盆地之间被条带状隆起相隔,而且盆地内还发育次一级凹陷,所以 Dd 区整体分维值较低。另外,由于 Dd 区内的盆岭构造,地形

起伏缓陡交替变化,导致截距值并没有明显的优势范围,是低值和高值的混合,分别对应于区内的盆地地形以及山地地形。

## 5 分形地貌分区的可行性

地貌形态是地球内外营力共同作用的结果,而地貌的分形特征是由各种地质作用的分形特征共同产生的。地表分维值的高低并不是简单地与侵蚀、沉积区对应,地质特征、构造作用以及侵蚀、沉积等外力作用共同影响了地形的频率结构特征和起伏特征,也决定了地形起伏的随机性与方向性,从而形成了各具特色的地貌区。因此,地貌形态与分形特征密切相关,分形参数不但是描述地表复杂形态的有力工具,而且可以利用分形参数进行地貌分区。图 7 显示了研究区各分形地貌分区内的地质构造、地貌类型与分形特征的关系,不同的分形分区具有不同的地貌和地质构造特征。

鄂尔多斯块体周缘的盆地在正走滑断裂的控制下处于断陷沉积环境,盆地内主要是全新世的冲积-湖积层,为砾石、砂、粘质砂等覆盖<sup>[38,56]</sup>。松散的全新世沉积物易形成短波长的高频成分<sup>[24]</sup>(图 8a),虽然盆地内地形起伏平缓,但地形的方向性差,起伏的趋势是随机的,高程的相关性差<sup>[26]</sup>,这样导致了 Aa 区的河套、银川等盆地具有高地表分维值,而且盆地内的沉降环境使地形起伏幅度低,截距值小。对于 Dd 区的渭河盆地和山西盆地,虽然同样是断陷盆地,但其内部地形与 Aa 区的盆地不同。Dd 区内的断裂比 Aa 区更发育,密度大,而且分布近乎均匀,断裂活动导致渭河盆地内发育凸起和小型断块山地等次级构造单元以及山西盆地内发育盆岭构造<sup>[38]</sup>。Dd 区内的构造隆起一方面在长波长上影响地形<sup>[57,58]</sup>,使分维值降低;另一方面,隆升区内主要出露中生代、古生代及前寒武纪地层,其岩性主要是变质岩及火山碎屑岩,受侵蚀作用较弱,地表未形成大量的高频起伏成分。此外,隆起与盆地



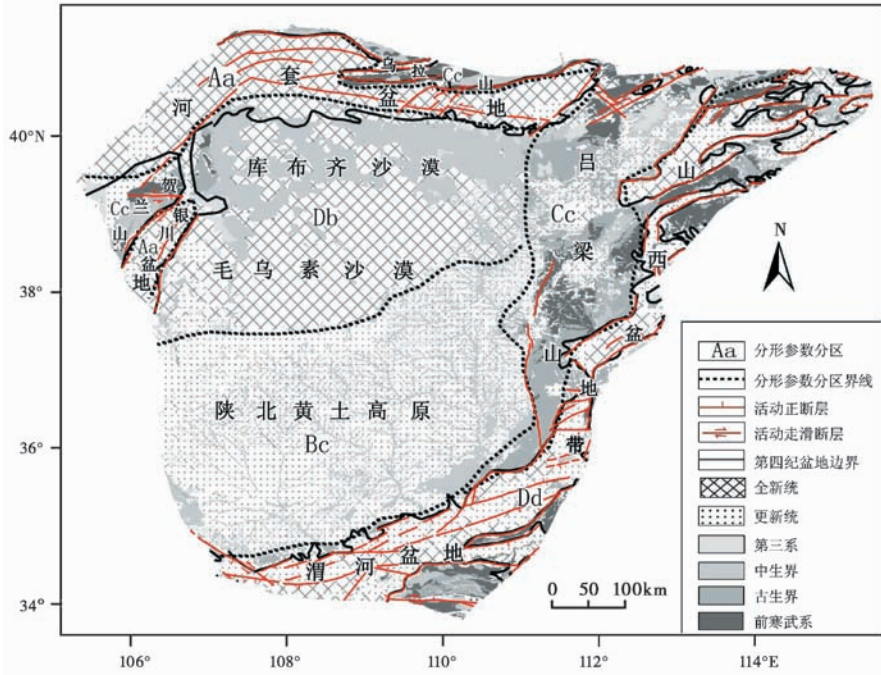


图 7 鄂尔多斯块体及周边分形分区的地质构造、地貌类型与分形特征关系简图

Fig. 7 Schematic map showing the relationship between geological structures, geomorphologic types and the fractal features in each fractal zone in Ordos Block and surrounding areas

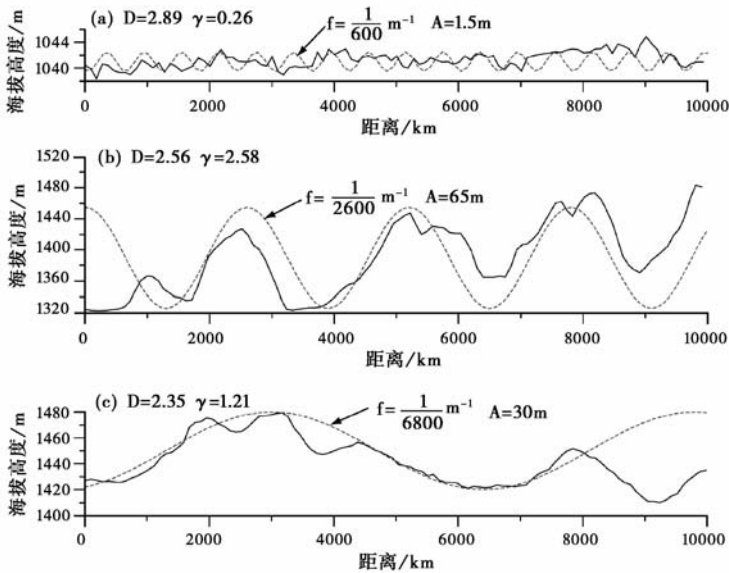


图 8 鄂尔多斯块体及周边内 3 个典型地形剖面及其对应的拟合波形

(a)河套平原典型地形剖面 (b)吕梁山区典型地形剖面 (c)库布齐沙漠区典型地形剖面  
实线为实际地形起伏,虚线为拟合实际地形起伏的余弦波; f 为余弦波的频率, A 为余弦波的振幅

Fig. 8 The typical topographic profiles and their fitted wave lines in Ordos Block and surrounding areas

相间排列,使滑动窗口内跨越不同的地貌类型及地表起伏形态,不同地貌类型间容易产生边界效应,使地表分维值平滑降低,从而产生鄂尔多斯东缘及南缘的地表分维值较低,仅在山西盆地中部及渭河盆地中部形成范围较小的高分维值区。该区域的盆岭

构造使地形起伏缓陡交替变化,高低截距值混合,没有明显的优势范围,平均值大小中等。对于 Cc 区,吕梁山、贺兰山和乌拉山等山区同样由于构造隆升作用以及变质岩、岩浆岩等基岩形成了地形中长波长成分(图 8b),而且地形起伏具有明显的方向性。

另外,基岩山区内小尺度上的坡面漫流等漫散作用显著,使地形趋于平滑,地表分维值较小。而这些隆升山区地形起伏大,截距值大。Bc区虽然与Cc区都是块体的隆起区,但Bc区内主要覆盖了更新世的黄土,形成了典型的黄土高原地貌,松散的更新世黄土易被侵蚀,加上该区域内河流发育,切割深,侵蚀作用强,使地形趋于粗糙化,地形中形成的高频成分显著,地形起伏也大,因而具有较高的地表分维值和截距值。与Bc区相比,Db区的隆升幅度较低,北部见不连续的中生代湖盆相的砂页岩、泥岩,但主要出露全新世的风成砂,沙丘形态相似,并作规律性排列,这样使区内的地形呈长波长缓振幅起伏(图8c),分维值和截距值都较低。

## 6 结论

本文选择构造环境差异显著,地貌类型多样的鄂尔多斯地块及周边为研究区,利用水平分辨率为90m的SRTM数据,采用元分维模型,通过变差函数法计算了鄂尔多斯块体及周边地形的分形参数,基于地表分维值和截距值利用K-Means非监督分类法对研究区进行定量地貌分区,并分析了分形分区内地质构造、地貌类型与分形特征的关系,得出以下结论:

(1)地表分维值和截距值从整体上定量反映了地表形态的综合特征。本文选择的3种尺度窗口计算得到的地表分维值和截距值的分布形态十分相似,而且窗口尺度未超出地形地貌的分形尺度R。因此,研究区的地形在3种尺度窗口单元均可看作具有单一分形特征,分形特征的尺度不变性至少在2.97km到11.61km范围内存在。

(2)鄂尔多斯块体及周边地形的分形参数分布具有明显的区域差异,结合地表分维值和截距值两个分形参数,用K-Means非监督分类法对研究区进行定量地貌分区,结果与地貌类型间具有很好的吻合关系,每一地貌分区都具有特征的分形值组合。河套盆地和银川盆地是地表分维值高值区和截距值低值区,分维值主要为2.8~3.0,截距值主要为0~1;陕北黄土高原区的地表分维值主要为2.5~2.7,截距值主要为2.5~3.5,是截距值高值区;吕梁山、贺兰山、乌拉山等山区也是截距值高值区,截距值主要为2.5~3.5,但地表分维值较低,主要为2.4~2.6;库布齐、毛乌素等沙漠区与渭河、山西盆地带都是地表分维值低值区,地表分维值大部分低于2.5,但两区域的截距值差异明显。沙漠区地形起伏

较缓,截距值主要为0~1.5,而渭河盆地和山西盆地带由于盆岭构造的格局,地形起伏缓陡交替变化,该区内的截距值没有明显的优势范围。

(3)地貌形态与其分形特征共同决定于地质特征、构造作用以及侵蚀、沉积等外力作用的影响,因此地貌形态与分形特征密切相关,可以利用分形参数进行地貌分区。结果表明,鄂尔多斯块体及周边不同的分形分区具有不同的地貌和地质构造特征。

**致谢** 感谢北京邮电大学刘育文在编写计算分形参数程序给予的帮助,感谢中国科学院地理科学与资源研究所张英在GIS技术提供的大力支持和帮助;另外,真诚感谢审稿专家和编辑部老师提出的建设性修改意见。

## 参考文献(References)

- 龙恩,程维明,周成虎等.基于SRTM-DEM与遥感的长白山基本地貌类型提取方法.山地学报,2007,25(5):557~565  
Long En, Cheng Weiming, Zhou Chenghu *et al.* Extraction of landform information in Changbai Mountains based on SRTM-DEM and TM data. *Journal of Mountain Research*, 2007, 25(5): 557~565
- 李炳元.横断山区地貌区划.山地研究,1989,7(1):13~20  
Li Bingyuan. Geomorphologic regionalization of the Hengduan Mountains region. *Mountain Research*, 1989, 7(1): 13~20
- 李炳元,潘保田,韩嘉福.中国陆地基本地貌类型及其划分指标探讨.第四纪研究,2008,28(4):535~543  
Li Bingyuan, Pan Baotian, Han Jiafu. Basic terrestrial geomorphological types in China and their circumscriptions. *Quaternary Sciences*, 2008, 28(4): 535~543
- 周成虎,程维明,钱金凯等.中国陆地1:100万数字地貌分类体系研究.地球信息科学,2009,11(6):708~724  
Zhou Chenghu, Cheng Weiming, Qian Jinkai *et al.* Research on the classification system of digital land geomorphology of 1:1000000 in China. *Journal of Geo-information Science*, 2009, 11(6): 708~724
- 施炜.黄河中游晋陕峡谷的DEM流域特征分析及其新构造意义.第四纪研究,2008,28(2):288~299  
Shi Wei. DEM drainage analysis of the Shanxi-Shaanxi Gorge in the middle reaches of the Huanghe River and its neotectonic implications. *Quaternary Sciences*, 2008, 28(2): 288~299
- 李勇, Densmore A L, 周荣军等.青藏高原东缘数字高程剖面及其对晚新生代河流下切深度和下切速率的约束.第四纪研究,2006,26(2):236~243  
Li Yong, Densmore A L, Zhou Rongjun *et al.* Profiles of Digital Elevation Models(DEM) crossing the eastern margin of the Tibetan Plateau and their constraints on dissection depths and incision rates of Late Cenozoic rivers. *Quaternary Sciences*, 2006, 26(2): 236~243
- 陈建军,季建清,余绍立.雅鲁藏布江大峡谷地貌响应时间域的定量计算.第四纪研究,2008,28(2):264~272

- Chen Jianjun, Ji Jianqing, Yu Shaoli. Quantitative analysis of geomorphologic response time-scale of the Yarlung Zangbo Great Canyon. *Quaternary Sciences*, 2008, **28**(2): 264 ~ 2726
- 8 张会平, 张培震, 吴庆龙等. 循化-贵德地区黄河水系河流纵剖面形态特征及其构造意义. 第四纪研究, 2008, **28**(2): 299 ~ 309
- Zhang Huiping, Zhang Peizhen, Wu Qinlong *et al.* Characteristics of the Huanghe River longitudinal profiles around Xunhua-Guide area (NE Tibet) and their tectonic significance. *Quaternary Sciences*, 2008, **28**(2): 299 ~ 309
- 9 张会平, 刘少峰. 青藏高原东北缘循化-贵德盆地及邻区更新世时期沉积与后期侵蚀样式研究. 第四纪研究, 2009, **29**(4): 806 ~ 816
- Huiping Zhang, Shaofeng Liu. Pleistocene deposition and subsequent erosion distribution around Xunhua-Guide Basin, north Eastern Tibetan Plateau. *Quaternary Sciences*, 2009, **29**(4): 806 ~ 816
- 10 朱红春, 张友顺, 汤国安等. 基于 DEM 的黄土地貌类型提取与制图——以黄土高原丘陵沟壑实验样区为例. 地球信息科学, 2003, **5**(4): 110 ~ 113
- Zhu Hongchun, Zhang Youshun, Tang Guo'an *et al.* DEM-based landforms extraction and application——A case study in the hilly-gully areas of the Loess Plateau. *Geo-information Science*, 2003, **5**(4): 110 ~ 113
- 11 张永民, 周成虎, 张 旸. 图像数据融合的地貌类型识别分类与制图. 地球信息科学, 2006, **8**(2): 131 ~ 136
- Zhang Yongmin, Zhou Chenghu, Zhang Yang. Automatic classification and mapping of regional landforms based on fusion of DEM and TM image. *Geo-information Science*, 2006, **8**(2): 131 ~ 136
- 12 杨晏立, 何政伟, 杨 斌等. 最佳因子复合的四川省地貌类型自动划分. 陕西理工学院学报(自然科学版), 2009, **25**(4): 74 ~ 79
- Yang Yanli, He Zhengwei, Yang Bin *et al.* Automatic classification of landform types in Sichuan Province with the optimum factors complex. *Journal of Shaanxi University of Technology (Natural Science Edition)*, 2009, **25**(4): 74 ~ 79
- 13 薛显武, 陈 喜, 张志才等. 基于地形因子特征值的喀斯特流域地貌类型判别. 中国岩溶, 2009, **28**(2): 175 ~ 180
- Xue Xianwu, Chen Xi, Zhang Zhicai *et al.* Categorization of karst landform on the basis of landform factor eigenvalue. *Carsologica Sinica*, 2009, **28**(2): 175 ~ 180
- 14 单新建, 叶 洪, 陈国光. 利用 ERS-2 SAR 图像纹理分析方法揭示长白山天池火山近代喷发物空间分布特征. 第四纪研究, 2002, **22**(2): 123 ~ 130
- Shan Xinjian, Ye Hong, Chen Guoguang. Revealing distribution of modern eruption of Changbaishan Mountain Tianchi volcano by ERS-2 SAR image. *Quaternary Sciences*, 2002, **22**(2): 123 ~ 130
- 15 付碧宏, 二官芳树, 董彦芳等. 三维遥感图像生成技术及其在第四纪构造地貌研究中的应用. 第四纪研究, 2008, **28**(2): 189 ~ 196
- Fu Bihong, Yoshiki Ninomiya, Dong Yanfang *et al.* Generation of 3-Dimensional perspective satellite imagery and its application on Quaternary geomorphological analysis. *Quaternary Sciences*, 2008, **28**(2): 189 ~ 196
- 16 谢小平, 付碧宏, 王兆印等. 基于数字化海图与多时相卫星遥感的长江口九段沙形成演化研究. 第四纪研究, 2006, **26**(3): 391 ~ 396
- Xie Xiaoping, Fu Bihong, Wang Zhaoyin *et al.* Formation and evolution of the Jiuduansha shoal at the Changjiang estuary based on the digitized sea chart and multi-temporal satellite images. *Quaternary Sciences*, 2006, **26**(3): 391 ~ 396
- 17 艾南山, 李后强. 从曼德布罗特景观到分形地貌学. 地理学与国土研究, 1993, **9**(1): 13 ~ 17
- Ai Nanshan, Li Houqiang. From Mandelbrot landscapes to fractal geomorphology. *Geography and Territorial Research*, 1993, **9**(1): 13 ~ 17
- 18 艾南山, 李后强. 分形地貌学概述. 百科知识, 1993, (5): 60 ~ 61
- Ai Nanshan, Li Houqiang. Overview of fractal geomorphology. *Encyclopedic Knowledge*, 1993, (5): 60 ~ 61
- 19 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. 地理研究, 1994, **13**(3): 104 ~ 112
- Zhang Jie, Bao Haosheng. Fractal geomorphology——Review and prospect. *Geographical Research*, 1994, **13**(3): 104 ~ 112
- 20 艾南山, 陈 嵘, 李后强. 走向分形地貌学. 地理学与国土研究, 1999, **15**(1): 92 ~ 96
- Ai Nanshan, Chen Rong, Li Houqiang. Fractal geomorphology. *Geography and Territorial Research*, 1999, **15**(1): 92 ~ 96
- 21 李 锰, 朱令人, 龙海英. 分形在地貌学中应用的几个问题的分析. 地震研究, 2002, **25**(2): 156 ~ 162
- Li Meng, Zhu Lingren, Long Haiying. Several issues on fractal theory application to geomorphology. *Journal of Seismological Research*, 2002, **25**(2): 156 ~ 162
- 22 Outcalt S I, Hinkel K M, Nelson F E. Fractal physiography? *Geomorphology*, 1994, **11**(2): 91 ~ 106
- 23 Sung Q C, Chen Y C, Chao P C. Spatial variation of fractal parameters and its geological implications. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 1998, **9**(4): 655 ~ 672
- 24 Sung Quocheng, Chen Yenchieh. Self-affinity dimensions of topography and its implications in morphotectonics: An example from Taiwan. *Geomorphology*, 2004, **62**(3~4): 181 ~ 198
- 25 刘 嵘. 地形数据的分形特征值计算与地形分类. 解放军测绘研究所学报, 2002, **22**(2): 17 ~ 20
- Liu Rong. Calculation of the fractal eigenvalue of the topographic data and the topographic classification. *Journal of PLA Institute of Surveying and Mapping*, 2002, **22**(2): 17 ~ 20
- 26 Carr J R, Benzer W B. On the practice of estimating fractal dimension. *Mathematical Geology*, 1991, **23**(7): 945 ~ 958
- 27 Klinckenberg B, Goodchild M F. The fractal properties of topography: A comparison of methods. *Earth Surface Processes and Landform*, 1992, **17**(3): 217 ~ 234
- 28 Xu Tingbao, Moore I D, Gallant J C. Fractal, fractal dimensions and landscapes——A review. *Geomorphology*, 1993, **8**(4): 245 ~ 262
- 29 Gallant J C, Moore I D, Hutchinson M F *et al.* Estimating fractal dimension of profiles: A comparison of methods. *Mathematical Geology*, 1994, **26**(4): 455 ~ 481
- 30 Cheng Y C, Lee P J, Lee T Y. Self-similarity dimensions of the

- Taiwan Island landscape. *Computers & Geosciences*, 1999, **25** (9): 1043 ~ 1050
- 31 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. *山地学报*, 2007, **25** (4): 385 ~ 392  
Long Yi, Zhou Tong, Tang Guo'an *et al.* Research on terrain complexity of several typical regions of loess landform based on fractal method. *Journal of Mountain Science*, 2007, **25** (4): 385 ~ 392
- 32 Molnar P, Tapponnier P. Cenozoic tectonics of Asia: Effects of a continental collision. *Science*, 1975, **189**: 419 ~ 426
- 33 Tapponnier P, Peltzer G, Le Dain A Y *et al.* Propagating extrusion tectonics in Asia: New insights from simple experiments with plasticine. *Geology*, 1982, **10** (2): 611 ~ 616
- 34 徐锡伟, 程国良, 马杏垣等. 华北及其邻区块体转动模式和动力来源. *地球科学——中国地质大学学报*, 1994, **19** (2): 129 ~ 138  
Xu Xiwei, Cheng Guoliang, Ma Xingyuan *et al.* Rotation model dynamics of blocks in North China and its adjacent areas. *Earth Science——Journal of China University of Geosciences*, 1994, **19** (2): 129 ~ 138
- 35 邓起东, 程绍平, 闵伟等. 鄂尔多斯块体新生代构造活动和动力学的讨论. *地质力学学报*, 1999, **5** (3): 13 ~ 21  
Deng Qidong, Cheng Shaoping, Min Wei *et al.* Discussion on Cenozoic tectonics and dynamics of Ordos block. *Journal of Geomechanics*, 1999, **5** (3): 13 ~ 21
- 36 叶连俊. 华北地台沉积建造. 北京: 科学出版社, 1983. 1 ~ 80  
Ye Lianjun. Sedimentary Built-up in the North China Platform. Beijing: Science Press, 1983. 1 ~ 80
- 37 Ye Hong, Zhang Botao, Mao Fungying. The Cenozoic tectonic evolution of the great North China: Two types of rifting and crustal necking in the great North China and their tectonic implication. *Tectonophysics*, 1987, **133** (3 ~ 4): 217 ~ 227
- 38 国家地震局《鄂尔多斯周缘活动断裂系》课题组. 鄂尔多斯周缘活动断裂系. 北京: 地震出版社, 1988. 5 ~ 136  
The Research Group on "Active Fault System around Ordos Massif", State Seismological Bureau. Active Fault System around Ordos Massif. Beijing: Seismology Press, 1988. 5 ~ 136
- 39 Sager W W, Handschumacher D W, Hilde T W C *et al.* Tectonic evolution of the Northern Pacific plate and Pacific-Farallon-Izanagi triple junction in the Late Jurassic and Early Cretaceous (M21 ~ M10). *Tectonophysics*, 1988, **155** (1 ~ 4): 345 ~ 364
- 40 丁国瑜, 蔡文伯, 余品清等. 中国岩石圈动力学概论. 北京: 地震出版社, 1991. 1 ~ 600  
Ding Guoyu, Cai Wenbo, Yu Pinqing *et al.* Summary of the Lithospheric Dynamics in China. Beijing: Seismology Press, 1991. 1 ~ 600
- 41 邓起东, 张培震, 冉勇康等. 中国活动构造基本特征. *中国科学 (D辑)*, 2002, **32** (12): 1020 ~ 1030  
Deng Qidong, Zhang Peizhen, Ran Yongkang *et al.* Basic characteristics of active tectonics of China. *Science in China (Series D)*, 2002, **46** (4): 356 ~ 372
- 42 邓起东, 徐锡伟, 冉勇康等. 中国活动构造图. 北京: 地震出版社, 2007  
Deng Qidong, Xu Xiwei, Ran Yongkang *et al.* Map of Active Tectonics of China. Beijing: Seismology Press, 2007
- 43 张培震, 王琪, 马宗晋. 中国大陆现今构造运动的 GPS 速度场与活动地块. *地质前缘*, 2002, **9** (2): 430 ~ 441  
Zhang Peizhen, Wang Qi, Ma Zongjin. GPS velocity field and active crustal blocks of contemporary tectonic deformation in continental China. *Earth Science Frontiers*, 2002, **9** (2): 430 ~ 441
- 44 刘红桂, 周红晖, 陈书清等. 鄂尔多斯块体 Lg 尾波衰减及其分布图像. *地球物理学进展*, 2008, **23** (2): 351 ~ 358  
Liu Honggui, Zhou Honghui, Chen Shuqing *et al.* Lg coda attenuation and its distribution image beneath Ordos massif. *Progress in Geophysics*, 2008, **23** (2): 351 ~ 358
- 45 邸领军, 张东阳, 王宏科. 鄂尔多斯盆地喜山期构造运动与油气成藏. *石油学报*, 2003, **24** (2): 34 ~ 37  
Di Lingjun, Zhang Dongyang, Wang Hongke. Primary discussion on Himalayan tectonic movement and petroleum reservoir in Ordos Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 2003, **24** (2): 34 ~ 37
- 46 刘仲温, 王贵华, 张文国等. 构造力学性质与地震强度的关系——以鄂尔多斯地块及其周边地区为例. *西北地震学报*, 1989, **11** (2): 70 ~ 78  
Liu Zhongwen, Wang Guihua, Zhang Wenguo *et al.* Relation between the features of tectonic mechanics and the earthquake strength——Cite an example in Ordos Block and its surrounding region. *North Western Seismological Journal*, 1989, **11** (2): 70 ~ 78
- 47 彭浩, 彭美焯, 啜永清. 鄂尔多斯周缘地震活动性和近期地震趋势分析. *东北地震研究*, 2001, **17** (3): 7 ~ 14  
Peng Hao, Peng Meixuan, Chuai Yongqing. Analysis on seismicity and earthquake tendency in the peripheral area of the Aerdusi. *Seismological Research of North East China*, 2001, **17** (3): 7 ~ 14
- 48 李建彪, 冉勇康, 郭文生. 呼包盆地第四纪地层与环境演化. 第四纪研究, 2007, **27** (4): 632 ~ 644  
Li Jianbiao, Ran Yongkang, Guo Wensheng. Division of Quaternary beds and environment evolution in Hubao Basin in China. *Quaternary Sciences*, 2007, **27** (4): 632 ~ 644
- 49 张培震, 邓起东, 张国民等. 中国大陆的强震活动与活动地块. *中国科学 (D辑)*, 2003, **23** (增刊1): 12 ~ 20  
Zhang Peizhen, Deng Qidong, Zhang Guomin *et al.* Large earthquakes and active blocks in China continent. *Science in China (Series D)*, 2003, **23** (Suppl. 1): 12 ~ 20
- 50 谢焱石, 谭凯旋, 陈广浩. 地表的分形测量及其大地构造学意义. *大地构造与成矿学*, 2004, **28** (1): 74 ~ 80  
Xie Yanshi, Tan Kaixuan, Chen Guanghao. Fractal measure of the Earth's surface and its significance to geotectonics. *Geotectonica et Metallogenia*, 2004, **28** (1): 74 ~ 80
- 51 Mark D M, Aronson P B. Scale-dependent fractal dimensions of topographic surfaces: An empirical investigation, with application in geomorphology and computer mapping. *Mathematical Geosciences*, 1984, **16** (7): 671 ~ 683
- 52 Pentland A P. Fractal-based description of natural scenes. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1984, **6** (6): 661 ~ 674
- 53 陈宇达, 刘艳梅, 汪新庆. 非监督分类的 K-means 方法在从化市 Landsat-7 遥感图像的应用. *科技资讯*, 2007, (2): 1 ~ 2

- Chen Yuda, Liu Yanmei, Wang Xinqing. The application in Landsat-7 image of Conghua City of K-means unsupervised classification. *Science and Technology Information*, 2007, (2): 1 ~ 2
- 54 孟海东,郝永宽,王淑玲. 聚类分析在非监督图像分类中的应用研究. *计算机与现代化*, 2009, (10): 88 ~ 91
- Meng Haidong, Hao Yongkuan, Wang Shuling. Application research on clustering analysis in unsupervised image classification. *Computer and Modernization*, 2009, (10): 88 ~ 91
- 55 赵春霞,钱乐祥. 遥感影像监督分类与非监督分类的比较. *河南大学学报(自然科学版)*, 2004, 34(3): 90 ~ 93
- Zhao Chunxia, Qian Lexiang. Comparative study of supervised and unsupervised classification in remote sensing image. *Journal of Henan University( Natural Science )*, 2004, 34(3): 90 ~ 93
- 56 内蒙古自治区地质矿产局. 内蒙古自治区区域地质志. 北京: 地质出版社, 1991. 645 ~ 651
- Inner Mongolia Bureau of Geology and Mineral Resources. *Regional Geology of Inner Mongolia Autonomous Region*. Beijing: Geological Publishing House, 1991. 645 ~ 651
- 57 Chase C G. Fluvial landsculpting and the fractal dimension of topography. *Geomorphology*, 1992, 5(1 ~ 2): 39 ~ 57
- 58 Lifton N A, Chase C G. Tectonic, climatic and lithologic influences on landscape fractal dimension and hypsometry: Implications for landscape evolution in the San Gabriel Mountains, California. *Geomorphology*, 1992, 5(1 ~ 2): 77 ~ 114

## STUDY ON THE GEOMORHOLOGIC ZONATION BY FRACTAL PARAMETERS ——A CASE STUDY OF ORDOS BLOCK AND ITS SURROUNDING AREAS

Bi Lisi      He Honglin      Wei Zhanyu      Shi Feng

(National Centre of Active Fault Studies, Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029)

### Abstract

Geomorphologic zonation is one of the fundamental works in Geoscience, but it was mostly qualitative in the past. Several studies on the quantitative geomorphologic zonation have been done based on the terrain factors such as slope, aspect and relief in recent years, however, many problems are still unresolved. As the digital terrain technology and the fractal theory become more mature, it is possible to classify quantitatively landforms by such fractal parameters as the surface fractal dimension ( $D$ ) and the ordinate-intercept ( $\gamma$ ). In this paper Ordos Block and its surrounding areas were chosen, and, based on the 90-m-resolution SRTM data, the variogram method and the cellular fractal model were adopted to calculate their fractal parameters in such three sizes of the moving windows as  $65 \times 65$ ,  $129 \times 129$  and  $257 \times 257$ . The results in these moving windows indicate together that the scale-invariance of the landforms of Ordos Block and its surrounding areas hold over at least from 2.97km to 11.61km, and the distributions of the fractal parameters are region-dependent apparently. The quantitative geomorphologic zonation by the fractal dimension and the ordinate-intercept comprehensively is achieved with the K-Means unsupervised classification. The resultant regions are consistent with the geomorphologic types and each zone has the characteristic fractal values. Hetao Basin and Yinchuan Basin are characterized by high surface fractal dimensions and low ordinate-intercepts ( $D = 2.8 \sim 3.0$ ,  $\gamma = 0 \sim 1$ ) in contrast to the mountainous areas including Luliang Mountain, Helan Mountains and Wulaer Mountains where low surface fractal dimensions and high ordinate-intercepts ( $D = 2.4 \sim 2.6$ ,  $\gamma = 2.5 \sim 3.5$ ) are found. The other regions are defined by the following fractal parameters respectively: North Shaanxi Loess Plateau in the southern part of Ordos Block,  $D = 2.5 \sim 2.7$  and  $\gamma = 2.5 \sim 3.5$ ; Kubuqi Desert and Mu Us Desert in the northern part of Ordos Block,  $D = 2.2 \sim 2.4$  and  $\gamma = 0 \sim 1$ ; Shanxi Basin Belt and Weihe Basin,  $D = 2.2 \sim 2.4$  and no predominant ordinate-intercept values. The comprehensive zonation result shows that the fractal feature is related with the geological structures and the geomorphologic types closely in each zone, it is therefore feasible to classify landforms quantitatively by fractal parameters.

**Key words**      geomorphologic zonation, quantitative, fractal parameters, Ordos Block, variogram, cellular fractal model, K-Means unsupervised classification