

引用格式: 顾文亚, 孟祥瑞, 朱晓晨, 等. 基于BEMD分解的地貌分类研究[J]. 地球信息科学学报, 2020, 22(3): 464-473. [Gu W Y, Meng X R, Zhu X C, et al. Geomorphological classification research based on BEMD decomposition[J]. Journal of Geo-information Science, 2020, 22(3): 464-473.] DOI: 10.12082/dqxxkx.2020.190262

基于BEMD分解的地貌分类研究

顾文亚¹, 孟祥瑞¹, 朱晓晨², 邱新法^{2*}

1. 南京信息工程大学滨江学院, 南京 210044; 2. 南京信息工程大学应用气象学院, 南京 210044

Geomorphological Classification Research based on BEMD Decomposition

GU Wenya¹, MENG Xiangrui¹, ZHU Xiaochen², QIU Xinfa^{2*}

1. School of Binjiang, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;

2. School of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China

Abstract: Geomorphology refers to the ups and downs of the terrain, that is, the shape of the surface. Geomorphological classification plays an important role in many application fields such as temperature, precipitation and solar irradiation. In this paper, the Digital Elevation Model (DEM) data of Fujian province with a spatial resolution of 90 m is selected as the geographic signal. The two-dimensional empirical mode decomposition (BEMD) is applied for decomposition processing to obtain several two-dimensional intrinsic mode functions (BIMF1~ BIMF3) with different scales and different physical meanings as well as the corresponding residual ORIG. These BIMF components correspond to the microtopography of different scales, and ORIG shows the geomorphic distribution trend of the study area, reflecting the general distribution area of plains, hills and mountains. The optimal calculation unit is determined by the method of variable point analysis, and the first order classification of each signal area is carried out by using the degree of relief, and the second level classification is carried out according to the absolute height. Finally, the first class classification and the second order classification are combined to realize the classification of terrain. This classification process reflects the complex characteristics of geomorphological assemblage in the study area. The results show that: (1) Superimpose BIMF components and extract the components and regions larger than 74m as high-frequency signal regions. The region is dominated by the low mountains with small relief amplitude, and is accompanied by middle mountain with small relief amplitude and hills. (2) The region with residual height less than or equal to 340m in ORIG was extracted, and the region containing high frequency signal was removed as the low-frequency signal region, which was mainly plain and hills. (3) The remaining area is defined as the intermediate frequency signal area, and the geomorphology of the area is dominated by flat hills and small mountains with small relief amplitude. The results show that the geomorphology of Fujian can be divided into seven main types:

收稿日期: 2019-05-30; 修回日期: 2019-12-06.

基金项目: 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(KYLX_0850); 国家自然科学基金项目(41805049); 滨江学院校级课题(2019bjyng005)。 [**Foundation items:** Research Innovation Program for Postgraduates of Ordinary Universities in Jiangsu Province, No.KYLX_0850; National Natural Science Foundation of China, No.41805049. The Subject of Binjiang School, No.2019bjyng005.]

作者简介: 顾文亚(1980—), 女, 江苏常州人, 副教授, 博士生, 主要从事3s集成与气象应用。E-mail: wygu@nuist.edu.cn

*通讯作者: 邱新法(1966—), 男, 浙江湖州人, 教授, 博士, 主要从事GIS与气象应用、气象防灾减灾、气候资源开发利用。

E-mail: xfqiu135@nuist.edu.cn

low frequency plain, low frequency hill, intermediate frequency hill, high frequency hill, low mountain with small degree of relief in middle frequency, low mountain with small degree of relief in high frequency, middle mountain with small degree of relief in high frequency.

Key words: topographic decomposition; DEM; BEMD; BIMF; ORIG; degree of relief; high-frequency; low-frequency

***Corresponding author:** QIU Xinfa, E-mail: xfqiu135@nuist.edu.cn

摘要:地貌是指地势高低起伏的变化,即地表的形态。地貌划分对气温、降水、太阳辐射等诸多应用领域都有着重要作用。本文选择空间分辨率为90 m的福建省的数字高程模型(DEM)数据作为地理信号,运用二维经验模态分解(BEMD)进行分解处理,得到多个具有不同尺度、不同物理意义的本征模函数(BIMF1—BIMF3)以及对应余量ORIG。这些BIMF分量对应不同尺度的微观地形,ORIG余量表现为该研究区的地貌分布趋势,体现了平原、丘陵与山地的大致分布区域。运用变点分析法确定最佳计算单元,利用地形起伏度对各个信号区域进行一级分类,依据绝对高度进行二级分类,最后将一级分类与二级分类相结合,实现对地形的分类,这一分类过程体现了研究地区地貌组合复杂的特征。结果表明:①叠加BIMF分量,提取出分量和大于74 m的区域为高频信号区域。该区域以小起伏度的低山为主,并伴随有丘陵和小起伏度中山。②ORIG余量中余量高度小于等于340 m的区域,去除其中包含的高频信号区域后为低频信号区域,该区域以平原、丘陵为主。③剩余区域定义为中频信号区域,该区域的地貌以平丘陵和小起伏的山地为主。研究成果表明福建地貌可分为7种主要类型:低频平原,低频丘陵,中频丘陵,高频丘陵,中频小起伏低山,高频小起伏低山,高频小起伏中山。

关键词:地形分解;数字高程模型(DEM);二维经验模式分解(BEMD);本征模函数(BIMF);余量函数(ORIG);地形起伏度;高频;低频

1 引言

地貌是地球表面各个圈层系统间的重要界面,地貌划分是数字地形分析的基础,是地貌制图研究的依据以及地貌分布规律研究的前提,是一项具有实际应用价值的研究^[1],可以为气温、降水^[2-3]、太阳辐射、土地利用和区域规划提供背景资料,为预防气候灾害提供指导方针。

地貌划分多以形态、成因为分类依据,包括形态分类、成因分类、形态成因分类等不同的分类方法。如戴维斯提出的地貌成因分类法^[4],Penk^[5]提出的地表形态分类法,斯皮里顿诺夫^[6]主张的形态成因综合考虑划分地貌法,H.C.波多别多夫从形态入手,列举正向地貌形态和负向地貌形态类型等^[7]方法。其中,按形态分类主要包括以下几类:①以相对高度为依据的地貌分类;如中国科学院成都地理研究所柴宗新的分类^[8]。该种分类法所划分出的地貌基本形态与人们观察中的山地观念一致,但由于丢弃了绝对高度,使得不同地区的山地不能进行对比。②以绝对高度对地貌基本形态进行分类,而把相对高度作为第二级分类。如中国科学院地理研究所1959年的《中国地貌区划(初稿)》^[9]以及高玄或的主客分类法^[10]。该分类方法实际是一种绝对高度分类法,其划分出的地貌类型与人们观念中的山地等地貌大相径庭。③以海拔高度和地势起伏

度为依据的地貌分类,如《中国地貌区划新论》^[11],上述地貌分类法的优点是继承了视角上传统地貌特征,又创新地推出了起伏度的山地划分指标,然而由于基本类型及其组合较多,区域地貌由规模较大的地貌类型组合决定而忽略了个别面积较小的地貌类型组合。④利用高程标准差、高程、剖面曲率、坡度等地形因子,基于面向对象分割方式划分地貌^[12-16]。该方法能比较精确快速地对基本地貌类型进行划分,然而该方法通常都很复杂又易受人为主观的影响^[17],且由于地貌类型的边界的不确定性,导致地貌类型边界的影像对象易被误分从而导致对地形的误判,特别是对高山^[16]和低山^[14]地区。

本研究基于DEM数据^[18-19]中含蕴的地形数据信息,提出运用BEMD方法对DEM数据进行分解,得到具有不同尺度、不同物理意义的地形信息,进而实现对地貌类型的宏观划分。利用该划分结果,可以进一步讨论宏观大地形对降水等气候问题的量化关系,从而分析各种地貌类型对降水等气候问题的影响程度。

2 研究方法数据来源

2.1 研究方法

2.1.1 BEMD分解

经验模态分解(EMD)方法是由黄鹄^[20]于1998

年提出的一种自适应信号时频处理方法。与建立在先验性的谐波基函数和小波基函数上的傅立叶分解和小波分解相比,该方法无需设定任何基函数。此外,该方法对分析非线性、非平稳信号序列具有很高的信噪比,因此,该方法被广泛应用于雷达信号、机械振动信号等^[21-22]。2005年,Nunes等^[23-24]将EMD方法扩充为BEMD后,该方法已经被应用于图像压缩、图像去噪和图像融合等图像处理中^[25,26]。本文采用BEMD方法对DEM数据作分析,经过层层筛分,BEMD将原始数据分解成有限个频率由高到低的本征模函数(BIMF_{*i*})以及对应的剩余分量(Res(x,y))。其中剩余量Res(x,y)为一单调函数,一般为原始数据变化趋势。设待处理的原始数据为DEM(x,y),通过筛分可得:

$$DEM(x, y) = \sum_{i=1}^j BIMF_i(x, y) + Res(x, y) \quad (1)$$

式中: x 为横坐标; y 为列坐标。

具体过程如下:

(1) 初始化:令 $I_0(x, y) = DEM(x, y)$, 且 $j = 1$ (j 为 BIMF 的标号);

(2) 提取第 j 个 BIMF 分量:

① 令 $h_0(x, y) = I_{j-1}(x, y)$, $i = 1$;

② 采用邻域搜索法(沿 DEM 各行列开辟 3×3 的窗口),计算二维数据 $h_{i-1}(x, y)$ 的局部极大、极小值点集;

③ 利用极大、极小值点集分别构造上下包络面 $upper_{i-1}(x, y)$ 和 $lower_{i-1}(x, y)$;

④ 计算均值包络面 $mean_{i-1}(x, y) = (upper_{i-1}(x, y) + lower_{i-1}(x, y)) / 2$;

⑤ 令 $h_i(x, y) = h_{i-1}(x, y) - mean_{i-1}(x, y)$, $i = i + 1$;

⑥ 根据 SD 值来判别 $h_i(x, y)$ 是否满足 BIMF 筛分条件,若满足, $BIMF_j = h_i(x, y)$, 否则,将 $h_i(x, y)$ 看做一个新信号,转至②,继续重复执行②-⑥,直至满足终止条件为止;

(3) 剩余分量: $ORIG_j(x, y) = I_{j-1}(x, y) - BIMF_j$;

(4) 给定 $imfcount$, 若 $j > imfcount$, 则该分解终止,否则 $j = j + 1$, 转至步骤(2),再执行步骤(2)-步骤(4),直到满足分解终止条件。

Huang等^[23]引入了标准偏差 SD (Standard Deviation) 来确定筛分出来的信号是否满足 IMF 条件, Nunes 给出一维判别条件推广到二维的情况下的 SD 计算公式:

$$SD = \sum_{x=0}^X \sum_{y=0}^Y \frac{[h_{k-1}(x, y) - h_k(x, y)]^2}{h_{k-1}^2(x, y)} \quad (2)$$

式中: X 为行标集, Y 为列标集; x 为横坐标, y 为列坐标。 SD 的值取经验值,一般为0.2~0.3,本文取为0.3。

2.1.2 地形起伏度计算方法

地形起伏度(Rf)是指特定区域内最高点与最低点的高程差,能够直观反映地表形态,是地貌类型划分的定量指标。通常可用窗口分析法提取地形起伏度,并在此基础上采用变点分析法来确定最佳统计单元^[27]。

变点分析法是一种对非线性数据进行处理的数据统计方法,也是分析地形起伏度的最基础的一种方法^[27]。由于本研究通过BEMD法将地形数据进行分解为不同频率的地形区域,因此本研究采用局地变点分析法,得到不同频率对应的地形区域的最佳统计单元。在本研究中各区域的最佳统计单元窗口均为 8×8 。

2.2 研究区概况、数据源及技术路线

福建省位于中国东南部,陆域介于 $23^{\circ}33'N$ — $28^{\circ}20'N$ 、 $115^{\circ}50'E$ — $120^{\circ}40'E$ 之间。东隔台湾海峡,与台湾省相望,东北与浙江省毗邻,西北横贯武夷山脉与江西省交界,西南与广东省相连,连接长江三角洲和珠江三角洲,与台湾隔海相望,南北最长为 530 km,东西最宽为 480 km。地势总体上西北高东南低,横断面略呈马鞍形。因受新华夏构造的控制,在西部和中部形成北(北)东向斜贯全省的闽西大山带和闽中大山带。两大山带之间为互不贯通的河谷、盆地,东部沿海为丘陵、台地和滨海平原,如图1所示。

数据为 SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) 2000 年的 DEM 数据,在地理空间数据云获取 (<http://www.gscloud.cn/>),空间分辨率为 90 m,采用的地理坐标系为 WGS_1984_UTM_Zone_50N。

本文总体的技术路线如图2所示。

3 结果及分析

长期以来,国内外对于地貌形态的划分标准与实际地貌制图成果,对于不同比例尺的地貌条件及研究区范围,产生了众多的方案。

根据周延儒等^[28]在《中国地形区划草案》中采用海拔高度与相对高度并重的方案与指标,以及

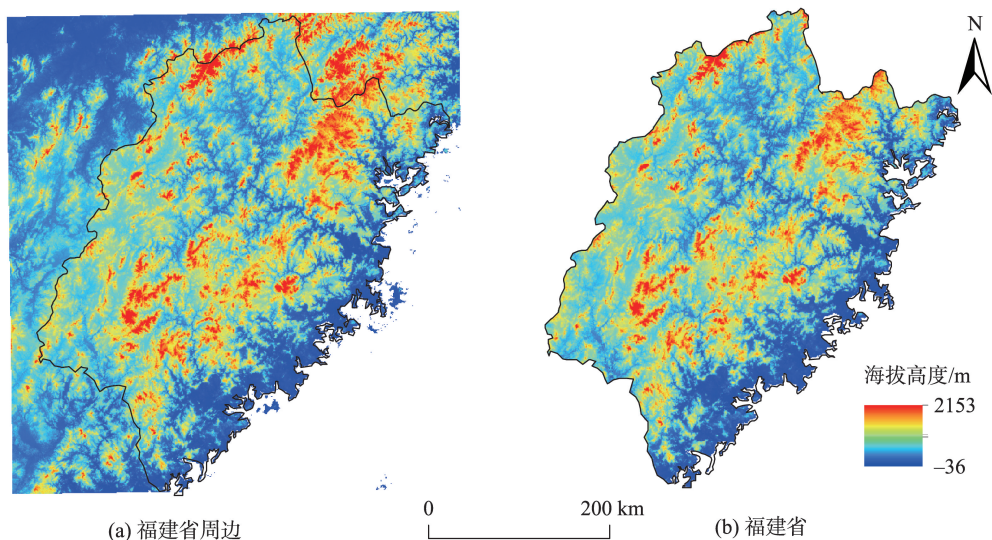


图1 2000年福建省及周边地区90 m×90 m分辨率的DEM空间分布

Fig. 1 DEM spatial distribution map with a resolution of 90 m×90 m in Fujian province and surrounding areas in 2000

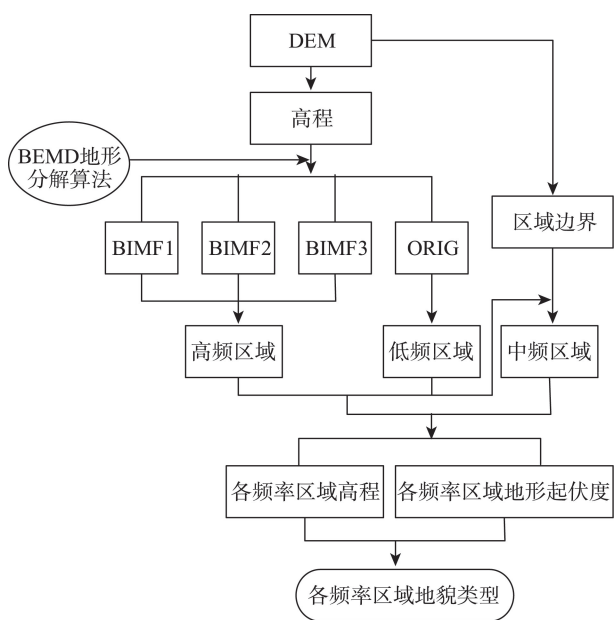


图2 基于BEMD地形分解的地貌分类技术路线

Fig. 2 The technical route of geomorphic classification based on BEMD topography decomposition

沈玉昌等^[29]在周延儒研究的基础上采用的海拔高度和地表切割深度的指标,得到地貌类型划分的海拔高度指标,如表1所示。

周成虎等^[31]提出的中国1:100万数字地貌分类六级体系中的第一级地貌划分标准,如表2所示。

本文基于地形分解,结合周延儒等^[28]、沈玉昌等^[29]和周成虎等^[31]的研究结果实现对地貌形态的划分。

表1 地貌分类的海拔高度指标^[30]

Tab. 1 Altitude indicators for geomorphological classification

地貌类型	海拔高度/m
平原	≤ 200
丘陵	≤ 500
低山	500~1000
中山	1000~3000
高山	3000~5000
极高山	>5000

表2 中国第一级地貌类型划分标准^[29]

Tab. 2 Classification standards of first-level geomorphic types in China

地貌类型	地形起伏度/m
平原	≤ 30
丘陵	30~200
小起伏山地	200~500
中起伏山地	500~1000
大起伏山地	1000~2500
极大起伏山地	>2500

3.1 分解结果

由于对DEM数据进行BEMD地形分解,会对边界产生污染。根据前面提到的BEMD分解算法,对略大地区的DEM数据进行分解,如图1(a)所示,得到地形分解的3个BIMF分量及其余量。提取位于区域内的各BIMF分量和余量,如图3所示。

由图3可知,BEMD地形分解是一个由细到粗、

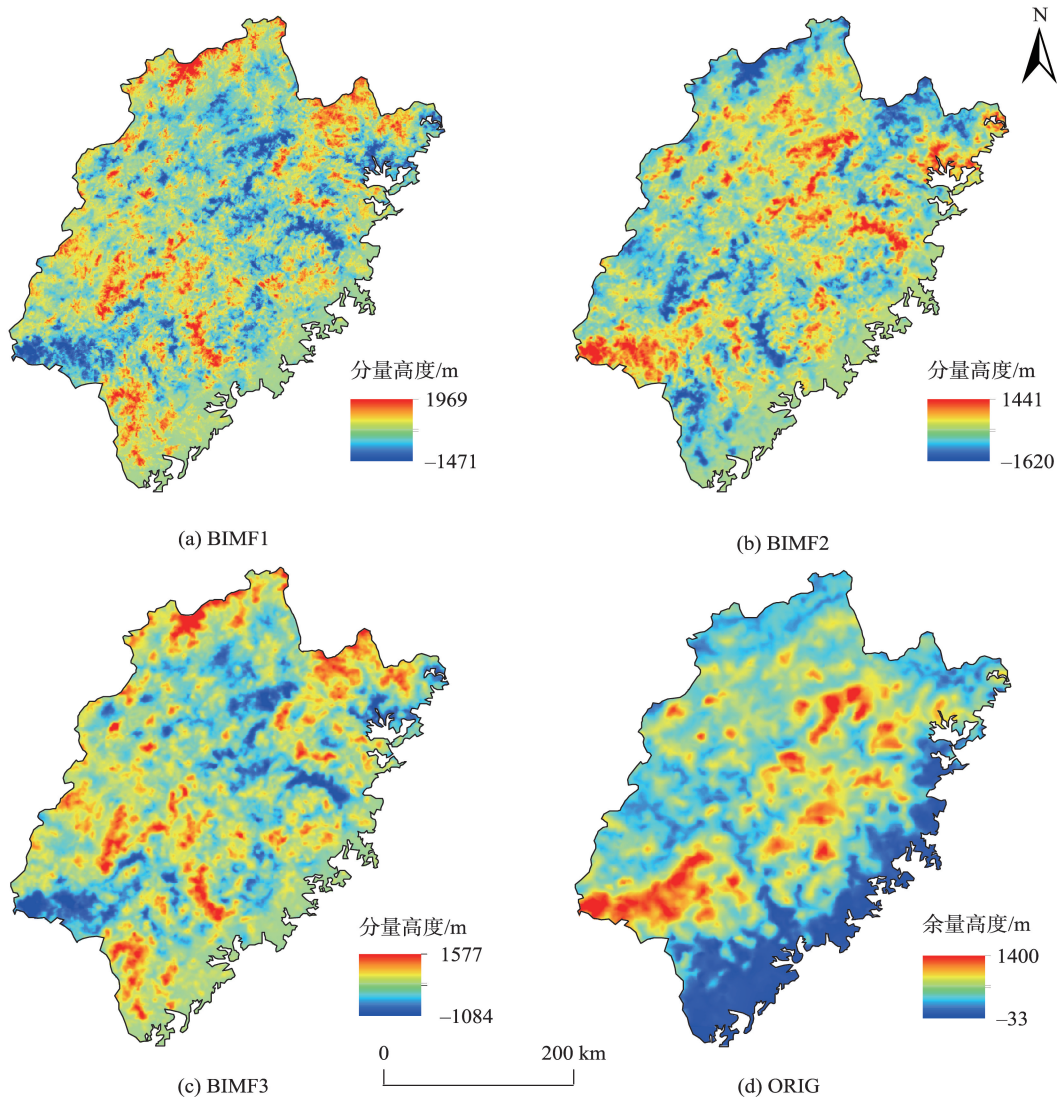


图3 2000年福建省DEM数据BEMD分解的BIMF分量、余量

Fig. 3 BIMF component and margin of BEMD decomposition of DEM data in Fujian province in 2000

由微观向宏观的分解过程^[30]。各BIMF分量由高到低,逐层提取出了微观局地破碎的地形信息,表现为由小到大的破碎斑块,本文选择频率比较高的3个分量,如图3(BIMF1)、(BIMF2)、(BIMF3)所示。图3(ORIG)为余量图,是在DEM数据中,提取3个BIMF分量后得到的余量图。该余量图大致表现出该地区地形分布的趋势,即西北地势高,而东南地势比较低的特点。

3.2 地貌类型划分

根据经验模态分解在二维图像中的应用研究,在提取图像不同尺度纹理特征时通常不单独分析BIMF分量,而是将各BIMF分量进行叠加,得到的合成信号如图4(a)所示。

该合成量数值高的地区能够显著表示福建省的山脉分布,且由于余量高度几乎均大于0(99.99%),可知合成量的分量和必定小于等于该地高程数据。由于随分量和高度的增大,区域内海拔高程大于500 m的区域的比例随之增大,在分量和高度为74 m时,这一比例的变化率最大。因此选择分量和高度大于等于74 m的区域作为山地区域,由于该部分区域是在高频叠加信号上提取的,故将该区域称为高频信号区,如图4(b)。

在高频区域中,62.97%地区的海拔高度在500~1000 m,13.14%地区的海拔高度在1000 m以上,50.97%地区的地形起伏度在30~200 m,48.59%地区的地形起伏度在200~500 m。可认为该区域以小起伏度的低山为主,并伴有丘陵和小起伏度中

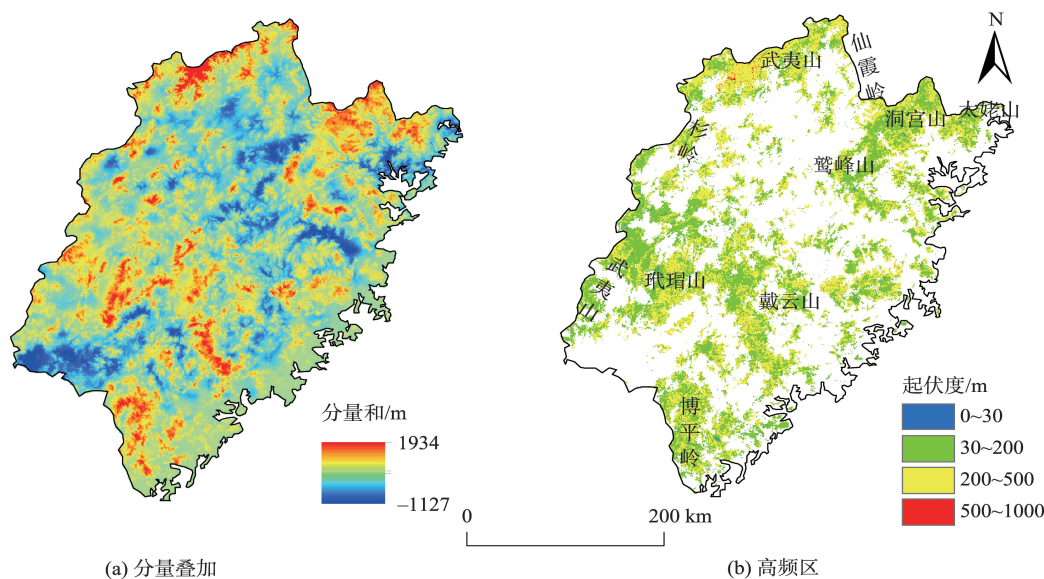


图4 基于2000年福建省DEM数据地形分解的高频区提取

Fig. 4 Extraction of high-frequency region based on topographic decomposition of DEM data in Fujian province in 2000

山。故把该区域的地貌类型依次定义为高频小起伏低山、高频丘陵和低频小起伏中山。

逐层提取地形信息中的本征模函数的过程，几何上，是一个构造数据包络面，将地形数据平滑的过程。这一过程使得地形分解的余量ORIG逐渐变得平缓，逐渐地表现出该地区地形的宏观分布趋势。ORIG余量图表现出西北高，东南低的地势分布趋势。

在ORIG余量图中，东部区域余量高度相对较低，一方面是该地区的海拔高度比较低；另一方

面是BEMD分解将局部的噪声平滑了。然而数据平滑的同时也抬高了东部地区的余量高度，且越邻近噪声区域，越邻近高频山地区域，这一效果越明显。因此，余量高度越低，代表原始地形海拔高度越低，地形越平缓。

据上述分析，由ORIG余量图可知，该区域地形平缓且海拔高度低的区域必定位于东南部。提取余量图中余量高度小于等于340 m的信号区域，可得图5(b)。由于数据平滑，高频区域与该信号区域有重叠，因此去除该区域中的高频区域，得到的区

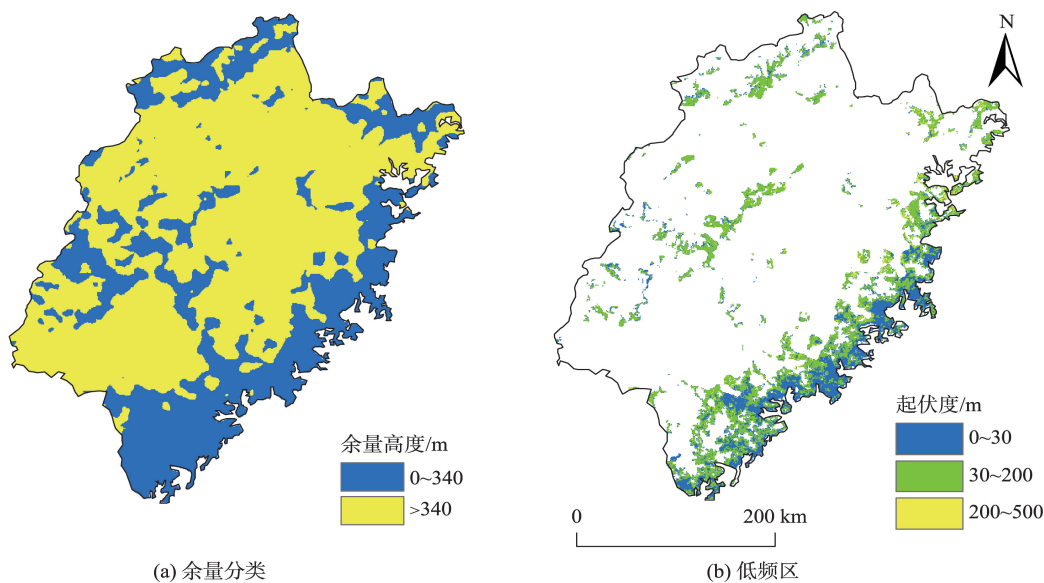


图5 基于2000年福建省DEM数据地形分解的低频区提取

Fig. 5 Extraction of low-frequency areas based on topographic decomposition of DEM data in Fujian province in 2000

域(该区域中,高程 ≤ 200 m的百分比变化率最大)定义为低频区域,可得图5(a)。

该区域的基本情况为:海拔高度 ≤ 200 m的区域占该区域的76.01%(200~500 m的区域占23.99%)。起伏度 ≤ 30 m的区域占36.06%,起伏度在30~200 m的区域占总面积的61.26%以上,即该区域以平原、丘陵为主。故此将该区域的地貌类型依次定义为低频平原和低频丘陵。在空间上,该区域与1:100万中国地理图册上福建省的冲积平原位置相对应。

在研究区的DEM图中去除高频和低频信号区域,剩余的区域错落于巍峨群山之间,本文将该部分区域称为中频信号区域,如图6所示。

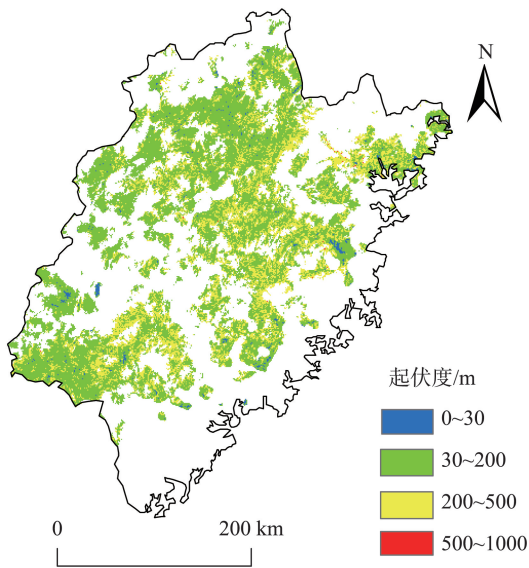


图6 基于2000年福建省DEM数据地形分解的中频区提取
Fig. 6 Extraction of intermediate frequency region based on topographic decomposition of DEM data in Fujian province in 2000

该区域中,海拔高度在200~500 m之间的地貌占总面积的56.77%(≤ 200 m的区域占14.89%,500~1000 m的区域占27.97%)。68.36%以上区域的地形起伏度在30~200 m之间,30.4%区域的地形起伏度在200~500 m之间,即该区域以丘陵地貌为主,伴随有小起伏的低山地貌。该区域的地貌类型可定义为中频丘陵和中频小起伏低山2类。

3.3 宏观分类下的福建省地貌类型分析

对3个区域图层按地形起伏度通过拼接得到研究区的主要地貌形态类型图7所示。

BEMD地形分解方法从宏观上将研究区的地

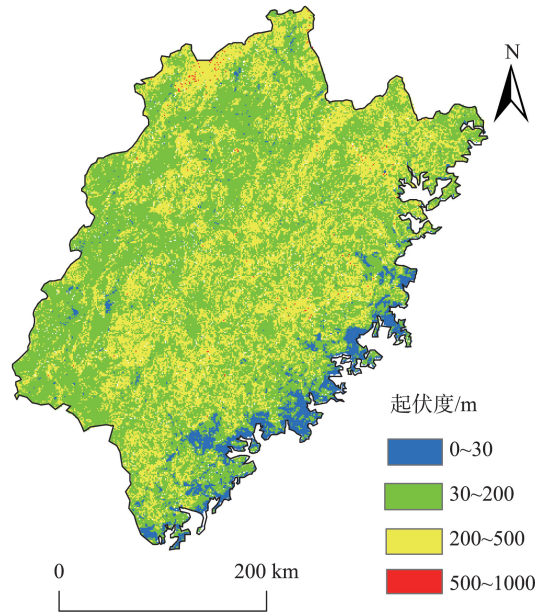


图7 基于2000年福建省DEM数据地形分解的图层联合
Fig. 7 Combined layers based on topographic decomposition of DEM data in Fujian province in 2000

貌分成3个区域:高频区,低频区和中频区。由图7可知,5.38%地区起伏度在0~30 m之间;起伏度在30~200 m的地区占总面积的60.07%;起伏度在200~500 m的地区占总面积的34.42%。由起伏度的分布可知,研究区的地貌以丘陵和小起伏的山地为主。

针对每一个频率区域,以地形起伏度为主,绝对高度为辅,对地形进一步分类。即首先依据地形起伏度进行一级分类,将地貌形态分为平原、丘陵、小起伏山、中起伏山、大起伏山、极大起伏山等,然后依据海拔高度进行二级分类,将地貌分为五类,即平原、丘陵、低山、中山、高山。然后将一级分类与二级分类相结合,形成微观上地貌基本形态的分类系统。如表3所示。

表3 宏观分类下的福建省地貌类型
Tab. 3 Geomorphic types in Fujian province under macroscopic classification

频率	起伏度/m	高程/m	地貌类型
低频	≤ 30	≤ 200	低频平原
	≤ 200	≤ 500	低频丘陵
中频	≤ 200	≤ 500	中频丘陵
	≤ 500	≤ 1000	中频小起伏低山
高频	≤ 200	≤ 500	高频丘陵
	≤ 500	≤ 1000	高频小起伏低山
	≤ 500	≤ 2500	高频小起伏中山

从微观地貌分类结果上看,研究区有7种主要的地貌类型:低频平原、低频丘陵、中频丘陵、高频丘陵、中频小起伏低山、高频小起伏低山、高频小起伏中山。在低频区域中,地貌类型以低频平原和低频丘陵为主;在中频区域中,地貌类型以中频丘陵,中频小起伏低山为主;在高频区域中,地貌类型以高频丘陵,高频小起伏低山和低频小起伏中山。这一分类过程体现了研究地区地貌组合复杂的特征。

本研究采用BEMD方法对DEM数据进行分解,从宏观角度将地形分为高频、中频和低频区域。其中高频地区提取了研究区的中低山区域,而低频地区提取了研究区的平原地区,中频区域表现为其它的地貌类型。而其他传统的地形分类方法从宏观上只是把地形分为2类:山地和平原^[32]。这一过程对复杂的地貌组合问题的划分得以初步实现,有助于分析各种频率的区域对气候的影响程度。其次,该分解方式不仅可用于对于局地的地貌分类,也可用于全国的地貌划分,对于全国的山脉^[30]、平原地区的分类具有同样的效果。最后,利用地形起伏度与绝对高度相结合的方式对各频率区域实现地貌再分类,使得微观地貌分类得以实现。但该种分类方法也存在缺陷:①区域地貌由规模较大的地貌类型组合决定而忽略了个别面积较小的地貌类型组合;②地形分解的结果对边界区域易产生污染而导致对边界区域的地貌分类不准。

4 结论与讨论

4.1 结论

本研究以2000年90 m×90 m分辨率的福建省的DEM数据为地形信号,以地形分解为基础,结合地形起伏度和绝对高度,实现了对福建省地貌的划分。主要结论为:

(1)将DEM数据作为地形信号,采用BEMD方法做信号处理,将福建省的地形信息分为微观地形信息和宏观地形分布趋势信息。其宏观地形分布趋势与福建省西北地势高,而东南地势比较低的特点相符。

(2)基于BEMD分解得到的福建省的微观地形信息,可提取出福建省的高频区。结合地形起伏度

和海拔高度,该区域的地貌类型可分为高频丘陵,高频小起伏低山,高频小起伏中山。基于BEMD分解得到的福建省的宏观地形分布信息,可提取出福建省的低频区,该区域与1:100万中国地理图册上福建省的冲积平原位置相对应。结合地形起伏度和海拔高度,低频区地貌类型可分为低频平原,低频丘陵。剩余区域为中频区,主要地貌类型为中频丘陵,中频小起伏低山。

(3)将基于BEMD分解得到的福建省的各频率区联合,根据地形起伏度的分布规律可知,福建省的地貌以丘陵和低山为主,与《中国地貌区划新论》中福建的地貌分类^[1]相符。

4.2 讨论

基于地形分解的地貌划分为研究区的地貌分类提供了依据,在此基础上可进一步讨论在此地貌分类下的降水问题,讨论高频,中频,低频地区对降水的影响程度。

本研究采用的是90 m×90 m分辨率的DEM数据,然而由于现有设备的限制,对更大区域地形的处理分析只能基于低分辨率的DEM数据。如何基于高分辨率的DEM数据进行大区域地形处理,有待今后进一步研究。

参考文献(References):

- [1] 许丽,李江海,刘持恒,等.基于数字高程模型(DEM)的可西里地貌及区划研究[J].北京大学学报(自然科学版),2017,53(5):833-842. [Xu L, Li J H, Liu C H, et al. Research on geomorphological morphology and regionalization of Hoh Xil based on digital elevation model(DEM) [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2017,53(5):833-842.]
- [2] 廖要明,陈德亮,高歌,等.中国天气发生器降水模拟参数的气候变化特征[J].地理学报,2009,64(7):871-878. [Liao Y M, Chen D L, Gao G, et al. Impacts of climate changes on parameters of a weather generator for daily precipitation in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2009, 64(7):871-878.]
- [3] 王凌梓,苗俊峰,韩芙蓉.近10年中国地区地形对降水影响研究进展[J].气象科技,2018,46(1):64-75. [Wang L Z, Miao J F, Han F R. Overview of impact of topography on precipitation in China over last 10 years[J]. Meteorological Science and Technology, 2018,46(1):64-75.]
- [4] 苏时雨,李钜章.地貌制图[M].北京:测绘出版社,1999.

- [Su S Y, Li J Z. Geomorphic mapping[M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 1999.]
- [5] Walther Penck. Analysis of geological morphology[M]. Moscow: National Geological Bibliography Press, 1961.
- [6] 斯皮里顿诺夫(苏).地貌制图学[M].北京:地质出版社, 1956. [Слиридонов А И. Geomorphic cartography[M]. Beijing: Geological Publishing, 1956.]
- [7] 波多别多夫.自然地理第二篇地貌学[M].北京:地质出版社, 1958. [Подобедов Н С. Physical Geography Part II Geomorphology [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1958.]
- [8] 柴宗新.按相对高度划分地貌基本形态的建议[M].北京:测绘出版社, 1986. [Chai Z X. The suggestion of basic geomorphological types according to relative height[M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 1986.]
- [9] 中国科学院自然区划工作委员会.中国地貌区划(初稿)[M].北京:科学出版社, 1959. [Working committee of natural zoning, Chinese academy of sciences. Geomorphologic division of China(draft)[M]. Beijing: Science Press, 1959.]
- [10] 高玄戔.地貌基本形态的主客分类法[J].山地学报, 2004, 22(3):261-266. [Gao X Y. The subjective and objective classification of geomorphologic forms[J]. Journal of Mountain Science, 2004, 22(3):261-266.]
- [11] 李炳元,潘保田,程维明,等.中国地貌区划新论[J].地理学报, 2013, 68(3):291-306. [Li B Y, Pan B T, Cheng W M, et al. Research on geomorphological regionalization of China[J]. Acta Geographica Sinica, 2013, 68(3):261-266.]
- [12] Drăgut L, Blaschke T. Automated classification of landform elements using object-based image analysis[J]. Geomorphology, 2006, 81(3):330-344.
- [13] Drăgut L, Eisank C. Automated object-based classification of topography from SRTM data[J]. Geomorphology, 2012, 141:21-33.
- [14] 田丹,刘爱利,丁滢,等.地貌形态类型面向对象分类法的改进[J].地理与地理信息科学, 2016, 32(2):46-51. [Tian D, Liu A L, Ding H, et al. Improvement of object-oriented classification method for landform types[J]. Geography and Geo-information Science, 2016, 32(2):46-51.]
- [15] 李婧晗,江岭,左颖,等.面向对象的安徽省基本地貌类型划分方法.地理与地理信息科学, 2018, 34(5):80-86. [Li J H, Jiang L, Zuo Y, et al. Landform classification based on object-oriented method in anhui province. Geography and Geo-information Science, 2018, 34(5):80-86.]
- [16] 汪禹芹,李艳,刘爱利.基于面向对象思想的中国地貌形态类型划分.遥感信息, 2012, 1:13-18. [Wang Y Q, Li Y, Liu A L. Object-oriented Method Based Research on Classification of Relief Form in China. Remote Sensing Information, 2012, 1:13-18.]
- [17] 仲伟敬,邢立新,潘军,等.基于DEM数据的地貌类型快速划分系统研究[J].吉林大学学报(信息科学版), 2018, 36(5):388-396. [Zhong W J, Xing L X, Pan J, et al. Study on fast partitioning system of geomorphic types based on DEM data[J]. Journal of Jilin University(Information Science Edition), 2018, 36(5):388-396.]
- [18] 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 Geographica Sinica, 2014, 69(9):1305-1325.]
- [19] 孟伟,李润奎,段峥,等.基于地貌特征的数字高程模型融合方法[J].地球信息科学学报, 2018, 20(7):895-905. [Meng W, Li R K, Duan Z, et al. Digital elevation model fusion by landform characteristics[J]. Journal of Geo-information Science, 2018, 20(7):895-905.]
- [20] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The empirical mode decomposition and the hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. Proceedings of the Royal Society of London A, 1998, 454(1971):903-995.
- [21] Bai X R, Xing M D. Imaging of micromotion targets with rotating parts based on empirical mode decomposition[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46(11):3514-3523.
- [22] 沈路,杨富春,周晓军,等.基于改进EMD与形态滤波的齿轮故障特征提取[J].振动与冲击, 2010, 29(3):154-157. [Shen L, Yang F C, Zhou X J, et al. Gear fault feature extraction based on improved EMD and morphological filter [J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(3):154-157.]
- [23] Nunes J C, Guyot S, Deléclle E. Texture analysis based on local analysis of the bidimensional empirical mode decomposition[J]. Machine Vision and Applications, 2005, 16(3):177-188.
- [24] 宋立新,高凤娇,郝朝晖.二维EMD分解方法的比较与改进[J].电子与信息学报, 2008, 30(12):2890-2893. [Song L X, Gao F J, Xi Z H. Compared and improved research of bidimensional empirical mode decomposition method. Journal of Electronics & Information Technology, 2008, 30(12):2890-2893.]
- [25] 宋平舰.二维EMD方法及其在图象处理中的应用[D].青岛:国家海洋局第一海洋研究所, 2001. [Song P J. Bidimensional empirical mode decomposition method and its application in image processing[D]. Qingdao: The First Institute of Oceanography, 2001.]

- [26] 高凤娇.二维EMD方法及其在图像处理中的应用研究[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学,2008. [Gao F J. Bidimensional empirical mode decomposition method and its application research in image processing[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2008.]
- [27] 任德智,肖前刚,王勇军,等.基于DEM的成都市基本地貌形态研究[J].四川林业科技,2018,39(2):79-84. [Ren D Z, Xiao Q G, Wang Y J, et al. Research on the basic geomorphology form of Chengdu based on DEM[J]. Journal of Sichuan Forestry Science and Technology, 2018,39(2): 79-84.]
- [28] 周廷儒,施雅风,陈述彭.中国地形区划草案[M].北京:科学出版社,1956:21-56. [Zhou T R, Shi Y F, Cheng S P. Geomorphologic regionalization in China(Draft)[M]. Beijing: Science Press, 1956:21-56.]
- [29] Shen Y C, Su S Y, Yin Z S. Retrospect and prospect of the research work on the classification, regionalization and mapping of the geomorphology of China. *Scientia Geographica Sinica*, 1982,2(2):97-104.
- [30] 乔森.地形分解与气象要素局地分布规律分析[D].南京:南京信息工程大学,2017. [Qiao M. Analysis on terrain decomposition and distribution rule of meteorological elements[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2017.]
- [31] 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[J].地球信息科学学报,2009,11(6):707-724. [Zhou C H, Cheng W M, Qian J K, et al. Research on the classification system of digital land geomorphology of 1:1 000 000 in China[J]. Journal of Geo-Information Science, 2009,11(6):707-724.]
- [32] 程维明,周成虎,柴慧霞,等.中国陆地地貌基本形态类型定量提取与分析[J].地球信息科学学报,2009,11(6):725-736. [Cheng W M, Zhou C H, Chai H X, et al. Quantitative Extraction and Analysis of Basic Morphological Type of Land Geomorphology in China[J]. Journal of Geo-information Science,2009,11(6):725-736.]