

中国陆地地貌基本形态类型定量提取与分析

程维明, 周成虎, 柴慧霞, 赵尚民, 李炳元

(中国科学院地理科学与资源研究所 资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101)

摘要: 中国陆地地貌基本形态类型由海拔和地势起伏度两个指标组合划分而成, 其中海拔分 4 级, 地势起伏度分 7 级, 组合后的基本形态类型共 25 类。按照数字地貌分类体系, 海拔和起伏度拥有全国普适性的分级指标, 基于 DEM 数据可获得两指标的分级类型。试验表明, 基于 SRTM-DEM (水平分辨率 90m, 相当于 1:25 万比例尺) 数据可得出全国普适性的采用单元为 4km^2 , 利用 1:10 万、1:400 万等比例尺数据进行 DEM 试验, 得出我国存在 0.4、4、12、18、 21km^2 五种不同规模的采样单元, 并分别对应着不同的比例尺。因我国地貌复杂多样, 仅利用 DEM 数据所获得的海拔和地势起伏度分级数据不能完全反映不同地域的地貌特征, 故利用遥感等多源数据, 综合多种信息获得的地貌类型, 可很好地反映出我国的海拔 4 级分级特征和地势起伏度 7 级空间分布, 进而获得全国陆地的 25 种基本形态类型的面积及空间分布格局。

关键词: 陆地地貌; 基本形态; 形态地貌; 定量提取; 空间分析

1 引言

地表形态是地貌最直观的表现形式, 它的规模尺度从星球级海洋、陆地到冻融等作用形成的微地貌形态等都有反映, 每种地貌形态往往包含一定的成因意义, 地貌形态和成因是因果关系的统一体, 地貌“形态”是“成因”的结果, 又是研究“成因”的主要依据。我国传统的、最基本的两大地貌类型: 即山地与平原不仅仅是一种纯形态划分, 它们形成的内营力类型和经受外力地貌过程是不同的^[1]。

自地貌学萌芽起, 国内外人们都在自觉不自觉地利用高低、陡缓等指标来描述地貌实体的定性属性信息 (W.M.Davis, 1884), 用相对位置等描述地貌实体的空间位置信息 (A. 彭克, 1894)。19 世纪, 人们开始有目的地进行野外考察, 在地图上记录各种地形信息, 使地貌特征信息的定位化、定量化成为可能。

人们对地貌形态类型的研究经历了以下几个阶段。(1) 1894 年, A. 彭克将地貌分为平原、山

崖、河谷、山地、凹地和洞穴六种基本形态类型;

(2) 1956 年, 周廷儒、施雅风和陈述彭等在《中国地形区划草案》中, 基本采用形态指标将全国划分为平原、盆地、高原、丘陵、中山、高山 6 大类型^[2]; (3) 1958 年, 沈玉昌提出以“成因”为地貌分类标准的划分系统 5 大类^[3], 即构造地貌、侵蚀剥蚀的构造地貌、侵蚀剥蚀地貌、堆积地貌和火山地貌。大类之下分为类型, 类型下进一步划分出亚型, 形态类型就包含在类型和亚类中; (4) 1964 年出版的《中华人民共和国自然地图集》的“中国地貌图”按照内、外营力将中国地貌划分为堆积平原、剥蚀平原和高原、剥蚀台原和山地三大类, 形态类型也包含在内外营力中^[4]; (5) 1987 年出版的“中国 1:100 万地貌图制图规范”中^[5], 首先按照海拔划分出 7 个陆地基本形态类型, 即平原、台地、丘陵、低山、中山、高山、极高山, 再按照起伏度将丘陵和山地划分为低丘陵和高丘陵; 小起伏山地、中起伏山地、大起伏山地和极大起伏山地, 山地按照海拔和起伏度可组合出 14 种亚类, 加上平原、台地和

收稿日期: 2009-07-06; 修回日期: 2009-11-06

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40871177)、国家重点实验室基金项目“中国数字地貌空间格局图谱研究” (088RA304SA)、国家科技支撑计划 (2008BAK50B01-5 和 2008BAK50B01-6)、863 计划课题“基于多源遥感影像的灾害风险快速评估技术”共同资助。

作者简介: 程维明 (1973-), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向: 数字地貌与地学信息图谱, 发表论文 40 余篇。

E-mail: chengwm@lreis.ac.cn

丘陵,共 17个形态类型;(6)中国及其毗邻地区地貌图(1 400)(陈志明,1993)中^[6],划分出两类形态类型,即地形起伏等级(5级)和基本形态(7级);(7)中国 1 400万地貌图(李炳元,1994)和李炳元(2008)通过对已有的基本地貌分类及其划分指标进行系统分析和评估,认为中国陆地基本地貌类型按照起伏高度和海拔高度两个分级指标组合来划分的原则符合起伏复杂、多台阶中国地貌的基本特点,在 1 100万地貌图分类系统的基础上,划分出 7个基本形态,按照中国地势特征,划分出 5级海拔等级,组合出 28种基本地貌形态类型^[7-8]。

国际上,以国际地理联合会地貌调查与制图委员会编制的《1 250万欧洲国际地貌图》图例系统中的基本地貌形态分类研究为代表,也是以海拔高度和起伏高度为依据,将基本地形形态类型分为五大类^[9-10]。该分类方案与我国 20世纪 50年代早期的方案相类似,其中的高原、台原、山原、山垅等是一种组合类型。

对比上述地貌形态的研究成果,可知对地貌形态的研究在逐渐深化。分析表明,地貌形态类型之间具有等级概念,包括:(1)宏观形态:即平原和山地大地貌单元;(2)基本地貌形态类型:由地势起伏和海拔两组指标构成;(3)形态类型:它们可反映出成因,如冲积扇、河漫滩、阶地等,或冰水阶地、冰水漫滩等;(4)微地貌形态:如微高地、洼地、泻湖洼地、滨海低地、湖滩、滨湖低地、入湖三角洲、古河床洼地、古河漫滩、自然堤、低平地、泛滥平地、微倾斜平地、向河缓坡地、古河床高地等;(5)坡度和坡向及其组合:即地表面的坡面特征。

2 数字地貌及形态类型制图

数字地貌是以数字形式将所有与地貌相关的信息都集成存储于数据库中,便于信息加工、更新、空间分析,制作出不同类型的地貌图^[10-11]。

基于地形图上的各类信息以及野外实地调查获得的数据进行地貌形态特征的获取和计算是最常见的研究内容,包括形态示量图,如高度图、坡度和坡向图、切割密度图、地形能量图和其他形态指标图等^[10]。随着信息化和数字化时代的到来,要求对任何问题的研究方法和表达方式既要数字化,又能快速省时,因此,传统的地貌研究

与解译方法已不能满足当今社会发展的要求。为了保护我们的环境,需要进一步了解和掌握翔实的环境特征,故目前地貌图的精度等各个方面都有了很高的要求,而以前的地貌图由于受当时社会与技术的制约已无法施展更大的作用,故数字地貌也应运而生,苏时雨和李钜章在《地貌制图》^[10]一书提到电子地貌图,它将其内容以数字形式存储于计算机中,可适当改变或扩充其表达内容,甚至没有改变内容,其好处在于地貌分类可采用多级多要素方法,并将这些信息逐层逐级集成于地貌数据库中,只要在 GIS中按照专家知识(即不同的分类方案)来重新组织信息,便可生成各种类型的地貌图,同时,电子地貌图除具有出图功能之外,还可进行地貌要素之间的空间分析,这主要借助于 GIS软件的强大的空间分析功能。

目前,利用数字高程模型进行地貌形态类型的自动提取是数字地貌研究的热点,如 Philip T. Giles(1998)利用数字高程模型(DEM)来研究自动提取坡度单元的分类方法^[12];张会平等(2004)也利用 DEM数据来研究岷江上游地貌形态,主要利用 DEM来自动提取坡度等地形要素^[13];汤国安等(2003)利用 DEM自动提取黄土地貌类型的方法^[14],同时他们致力于研究不同比例尺之间的 DEM数据精度的转换,这对数字地貌研究起到很好的促进作用。许世远等(2000)发表于《地理学报》上的文章“地貌形态模拟”主要运用地理信息系统将数字高程模型和数学模型结合起来,来研究模拟地貌的动态研究过程等^[15]。汤国安等(2005)利用 1 100万 DEM数据及其所派生的多种地貌信息进行地貌形态类型自动划分的技术方法^[16],实验提取地形起伏度、地表切割度、地表粗糙度、高程变异系数、平均坡度、平均高程 6个地形因子,并将各因子置于不同的信息层面中,通过主成分分析,ISODATA非监督分类法与 Bayesian最大似然监督分类法相结合,对中国地貌的基本形态进行了多维信息综合分类。

数字地貌信息提取方法体现出有别于纸质地貌图的定量化和数字化特征,这里的信息包含从遥感影像、DEM和地质图等多种数据源上直接或间接获得的地貌特征。可直接获得的信息包括:海拔高度、地势起伏度、坡度、地貌形态、微地貌形态、地形地貌特征线等;可间接获得的数字

地貌信息包括：地貌形态的内外营力、内外营力的堆积和侵蚀特征、地貌年龄、地貌类型物质组成等。其中，地貌营力隐含在地貌形态上，它不可能直接获得，但可以通过地形外貌形态特征、地质、土地利用等信息综合获取。

数字地貌具有诸多优点，可满足目前信息时代的要求。(1)数字形式：数字地貌强调了用计算机来存储、加工和实时更新地貌信息，其内容都用数字形式显示，为了便于数据或信息的比较和显示，需要对某一些特定区域的各类地貌信息集成在一起，目前 ArcGIS 软件推出了适于数据管理的 Geodatabase，它可将同属于一个研究区内的各种信息(包括点、线、面)都放在同一个数据集中，原来一个文件只能存储一个图层，现在可任意加载图层信息，只要所有信息具有相同的投影和图幅范围就可集成在一起；(2)定量化及空间分析：这里的空间分析包涵两层含义，其一是将几种或多种要素进行叠加生成各种专题要素图，实际在应用过程中，一个要素可直接生成一种专题图件，如就海拔高度要素可生成地势海拔图，起伏度要素可生成地势低起伏图，海拔和起伏度叠加可生成基本地貌形态类型图等，其二是对划分指标是否合理进行评判。

3 基于 DEM 的地貌形态特征定量提取与分析

3.1 海拔高度的分级及提取

地貌面的海拔高度和地表的相对起伏度是最基本的地貌形态指标，它们在宏观上也体现了地貌内营力作用的特征和性质。根据中国陆地地貌形成与演化，以及三级台阶特征，在中国 1 100 万数字地貌分类系统中^[5]，海拔高度分为四级，即低海拔(<1 000m)、中海拔(1 000~3 500m)、高海拔(3 500~5 000m)和极高海拔(>5 000m)，其中 1 000m、3 500m 两个高程充分反映我国地势的三级台阶，同时 3 500m 高程为现代冰川和古冰川作用的下限(也就是多年冻土下线和森林上线高度)；5 000m 高程为雪线平均高程。基于全国 1 100 万 DEM 数据，在 ArcGIS 中利用空间分析功能模块，便可得出我国低海拔区域占 48.47%，中海拔区域为 37.409%，高海拔区域为 18.524%，极高海拔区域为 7.383%。

表 1 基于 DEM 的中国陆地海拔高度分级面积比例

Tab. 1 Area scales according to altitude classes of land geomorphology based on DEM in China

海拔高度分级	面积 (×10 ⁴ km ²)	百分比 (%)
低海拔 (<1 000m)	411. 252	48. 470
中海拔 (1 000 ~ 3 500m)	317. 398	37. 409
高海拔 (3 500 ~ 5 000m)	157. 169	18. 524
极高海拔 (>5 000m)	62. 644	7. 383

3.2 地势起伏度的计算及分析

地表起伏度是描述地貌形态的定量指标，也是区域地貌对比研究和地貌类型划分的客观依据。地势起伏度是指某一确定面积内最高和最低点之高差。李钜章(1982, 1987)^[17-18]认为地表起伏度应包括起伏高度和起伏密度。起伏度在一定程度上反映地貌的发育阶段：年青的、近期强烈抬升，褶皱或断裂形成的形态有较大的起伏度，老年的、经本期夷平作用的起伏度较小。同时，起伏度大小决定了近期侵蚀作用强度的重要要素之一，生产上有重要意义。

要编制反映某一区域内高差的起伏度图，首先必须确定度量的区域单元。例如，欧洲 250 万地貌图的地势起伏是指 16km²中的最高点与最低点的高差^[9]，“中国 1 100 万地貌图制图规范”中的山地起伏度是指山脊顶与顺坡向到最近大河汇流面积大于 500km²或到最近较宽宽度大于 5km 的平原或台地的交接点的高差^[10]。而实体高差是指单个地貌实体最高点与其外缘各点的平均高度的高差。李钜章先生 1987 年发表于《地理研究》的“中国地貌基本形态划分的探讨”一文中，讨论了相对高度、局部地势、实体图斑高差、实体图斑边缘高差、山体起伏高度(简称起伏度)的概念及含义^[18]。

通过对比发现，后几种都是非网格式的多边形区域，这些定义所规定的每个区域单元的面积和划分方法一般都不一致，故它们的高差可比性比较差，一般只适用于作为形态分类的划分指标因素，不适于编制起伏度图。

涂汉明等(1990)在编制 1 400 万中国及其邻区地貌图时，提出了地势起伏度的新概念^[19]。地势起伏度从数量上讲是单位面积内之高差，或称统计单元内之起伏高度，并得出起伏高度随面积的变化曲线为罗吉斯蒂克型。

按欧洲 1 250 万地貌图地势起伏的概念来编

制起伏度图,可采用直角网格式划分区域单元,以每一网格的最高点与最低点的高差,作为该网格的地势起伏度即可,网格大小显然不一定要取 16km^2 ,因为随着网格单元由小到大,单元内最高点与最低点的高差,无论何处都总是从小变大,一般情况下这种高差开始以较快的速度增加,以后增加的速度变缓,当单元面积达到某一阈值后,这种高差基本稳定在一个数值上,当网格大小取这个阈值时,应该能够较客观地反映区域特点。当然这个阈值及其对应的高差在不同地区是不同的,陈志明等在编制“中国及其毗邻地区 1:400 万地貌图”时^[6],曾对不同地区分别做了单元面积由小到大,其最高点与最低点高差变化的统计工作。结果得出,对我国大部分地区,当单元面积在 21km^2 时,其最高点与最低点高差基本达到稳定。也就是说,在研究我国的地形特征时,应该采用 21km^2 作为地势起伏的统计单元。这种大小的网格对于 1:25 万或 1:100 万的比例尺显然是相当大的,这样最后获得的地势起伏度图相当粗,不能准确地反映地形的实际情况,而且不同的网格原点得出的图形也会有相当大的差异。

涂汉明等(1990, 1991)曾对全国 600 各样点和两个小区的详细研究,论证了中国地势起伏度最佳统计单元的存在^[19-20]。研究表明,中国存在 2、10、16、20、 22km^2 五种不同规模的地势起伏度最佳单元,得出 2km^2 适用于在比例尺大于 1:2.5 万的地形图上操作,6、16、20 和 22km^2 分别适用于在比例尺大于 1:55 万、1:90 万、1:100 万、1:105 万地形图上操作。分析表明具有全国普适性的最佳统计单元为 21km^2 ,其比例尺应为 1:100 万。

基于 ArcGIS 的空间分析功能计算地势起伏度可表示为如下公式: $RF = H_{\max} - H_{\min}$, 式中: RF 是分析区域内的地形起伏度; H_{\max} 是分析窗口内的最大高程值; H_{\min} 是分析窗口内的最小高程值。由此得到 $n \times n$ 网格单元与地势起伏度的关系。具体计算方法为,利用 ArcMap 中的空间分析 (Spatial Analyst) 模块中的领域分析 (Neighborhood Statistic) 工具,以 $n \times n$ 像元的矩形为模板算子,从 3×3 开始 (一直计算到 65×65),对整个研究区进行移动计算,先计算出 $n \times n$ 像元内的网格最大值 maximum ,然后计算出其领域最小值 minimum ,再利用模块中的栅格计算工具 (Raster Calculator) 计算最大值与最小值高程差,就得到了该 $n \times n$ 窗

口的地形起伏度结果值^[11]。

唐飞等(2007)选取了代表新疆基本地貌特征戈壁、沙漠、丘陵、高山的克拉玛依幅含阿勒泰幅影像进行了试验^[21]。得出准噶尔盆地及其西北山区地势起伏度计算的最佳统计单元为 4km^2 ;作者选取了代表中国基本地貌特征——平原、高原、山地、丘陵的南京幅 (I-50)、兰州幅 (J-48) 和西宁幅 (J-47) 进行了试验。将网格单元从 3×3 、 4×4 、...、一直扩大到 60×60 等,对比不同网格单元内起伏度值的变化情况,并制作图,其横坐标为网格单元,纵坐标为相应的起伏大小,对比可以看出,利用 1:25 万 DEM 来计算地势起伏度时, 20×20 的网格大小 (4km^2) 可作为曲线变化的拐点,即为曲线由陡变缓的阈值^[11]。另外,对塔克拉玛干沙漠内部沙垄区试验的最佳网格单元为 0.4km^2 ;对藏北高原区试验结果为 2.15km^2 ,对横断山区试验结果为 5.10km^2 。郎玲玲等(2007)以福建省 1:25 万 DEM 为实验数据,计算地势起伏度,确定研究区的最佳分析窗口面积为 4.41km^2 ,得出中国低山丘陵区计算基本地貌形态类型的最佳尺度 DEM 为 1:25 万比例尺^[22]。

分析以上试验结果可以得出,在全国范围内,基于 1:25 万 (100m 网格大小) 尺度的 DEM 计算地势起伏度,具有普适性的采样单元为 4km^2 ,从而修正了我国地貌学家以前确定的 21km^2 作为全国地表起伏度计算的统计单元,为地貌单元特征定量提取确定了统一的指标基础。

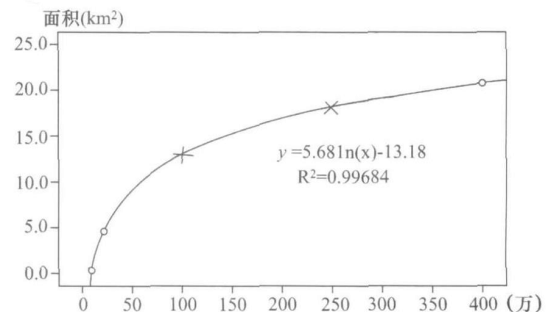


图 1 不同尺度 DEM 与最佳统计单元面积拟合曲线 (引自郎玲玲, 2007)

Fig. 1 Fitting curve of the relationship between grid units and different DEM scales

高守英(2003)^[23]基于 1:1 万 DEM 进行龙口市泳汶河流域起伏度提取中,采用 3×3 (0.0009km^2) 格网单元;郎玲玲等(2007)^[22]研究 1:10 万

DEM的采样单元为 0.4km^2 ，1 25万 DEM的采样单元为 4km^2 ；1 400万 DEM编制中国 1 400万地貌图中，采用 21km^2 的最佳统计单元。因此，可得出多尺度 DEM数据所对应的最佳格网单元大小(图 1)，由拟合统计数据得，判定系数 $R^2=0.996\ 84$ ，作拟合优度检验，拟合度良好，对数方程为 $y=5.68\ln(x)-13.18$ 。从图 1中可以发现，1 250万 DEM尺度下所对应的 18km^2 ，与欧洲用 1 250万 DEM提取地势起伏度时采用的 16km^2 非常接近，这在一定程度上印证了该对应关系的合理性。据此我们可以进一步推测：对于 1 250万 DEM数据，最佳统计单元为 18km^2 ，1 100万 DEM数据，最佳统计单元为 12km^2 。从而得出我国存在 0.4 、 4 、 12 、 18 、 21km^2 五种不同规模的地势起伏度最佳单元，并分别对应着不同的比例尺。

基于以上分析结果，在 1 100万地貌图分类中，利用 SRTM-DEM数据(网格大小为 90m ，接近于 1 25万尺度)，采用 4km^2 的采样单元，按照平原(起伏度 $<30\text{m}$)、台地(起伏度一般 $>30\text{m}$)、丘陵(起伏高度 $<200\text{m}$)、小起伏山地(起伏高度 $200\sim500\text{m}$)、中起伏山地(起伏高度 $500\sim1\ 000\text{m}$)、大起伏山地(起伏高度 $1\ 000\sim2\ 500\text{m}$)和极大起伏山地(起伏高度 $>2\ 500\text{m}$)的分类方法，得出中国的 1 25万尺度上的地势起伏度分布(表 2)。其中小起伏山地所占比例最大，为 27.018% ，其次为丘陵，占 26.907% ，平原类型第三，占 21.060% 。

表 2 基于 SRTM-DEM的中国地势起伏度分级面积比例(4km^2)

Tab. 2 Area scales according to relief classes of land geomorphology based on SRTM-DEM in China (4km^2)		
起伏度类型	面积 ($\times 10^4\text{km}^2$)	百分比 (%)
平原 ($<30\text{m}$)	200.659	21.060
台地 ($>30\text{m}$)	81.937	8.600
丘陵 ($<200\text{m}$)	256.365	26.907
小起伏山地 ($200\sim500\text{m}$)	257.431	27.018
中起伏山地 ($500\sim1\ 000\text{m}$)	137.463	14.427
大起伏山地 ($1\ 000\sim2\ 500\text{m}$)	18.938	1.988
极大起伏山地 ($>2\ 500\text{m}$)	0.005	0.001

3.3 平原和山地大地貌单元的自动提取

从形态结构看，山地可以理解为由一个个坡度大于某一阈值相互连接而达到一定面积的坡面组成。据此，只要恰当的选择坡度分级方法，

并合理设置坡度和面积阈值，则可以完成山地、平原界线的自动提取^[24]，其具体的提取步骤为：

- (1) 结合中国 1 100万数字地貌制图工作，基于 SRTM-DEM数据，选择合理坡度算法，进行坡度分级方法实验，判断最佳断点，提取基于单一坡度的平原、山地图；
- (2) 在提取初级图基础上，进行 GIS的连通性分析，采用四向/八向两种方式相结合的搜索方式，将相邻且具有相同坡度分级值的栅格归为一个区域；
- (3) 任何地貌单元，只有面积达到一定阈值时才被单独提取，故因此邻域搜索后，需合理设定面积阈值，处理面积小于阈值大小的破碎图斑；
- (4) 对于栅格转化得到的矢量非圆滑边界折线，进行 GIS平滑处理，完成基于 SRTM-DEM的平原山地自动提取。

目前，坡度计算方法很多，对于全国性山地和平原提取采用 ArcGIS中常见的 3×3 网格的坡度计算方法即可满足要求。相比其计算方法而言，坡度阈值的选择更为重要，如肖飞(2008)^[25]以昆仑山为例，在进行山地和平原界线自动提取，所采用的坡度阈值为 7° ；龙恩(2008)^[24]在长白山地区平原和山地分割中坡度阈值为 3.5° ；郎玲玲(2007)^[22]在福建地区的坡度阈值为 3° 。作者在试验塔克拉玛干沙漠边缘区分新月形沙丘和沙地的坡度阈值为 $3\sim7^\circ$ ；在沙漠腹地区分沙垄和缓起伏沙地的坡度阈值达 15° ；天山南麓山前的洪积扇的上缘和下缘的坡度阈值分别为 15 和 7 等等。可见，因我国地貌区域差异较大，目前，还没有一个确定的坡度阈值来进行全国范围内的山地和平原自动划分。

4 遥感影像等多源数据的地貌形态特征提取及分析

地貌卫星遥感解译是地貌制图的工作重点，全国数字地貌解译主要采用陆地卫星 TM/ETM 等数据，进行人机交互地貌解译的方法完成的。以卫星遥感影像为基础，参考现有地貌图、地形图、DEM计算出的地势起伏度、坡度和形成的三维立体晕渲图、地质图等有关资料，采取综合分析和对比，由此及彼，由表及里的分析，从定性到定量，由已知推未知，扩展为对全区域的认识，确定形态成因类型，找出各种地貌类型的形态和空间分布规律。

本次数字地貌解译采用分层解译与图斑分割的方法,即从地貌实体的多尺度特征出发,采用分层解译,从基本的形态出发,然后,逐步深化,不断进行图斑的分割,最后,得到形态成因的地貌图斑。初始层命名为第零层,主要为平原(含河谷平原)与山地地貌特征的解译,要求精确地确定平原与山地的分界线;第一层为基本地貌形态类型解译,主要是依据地形起伏度和地貌面的海拔高度进行地貌界线的确定;第二层为15种主要成因类别;第三层解译次级成因类型;第四层根据成因确定形态差异划分类型;第五层根据形态确定次级形态差异划分类型;第六层根据坡度、坡向及其组合划分地貌的倾斜程度或坡度;第七层根据物质组成或岩性确定的地貌物质类型;第八层合并第一、二、三、四、五、六、七层图斑属性编码并命名,完成每一图幅的数字地貌遥感解译,实现了数据的分层分级和无缝拼接。

在数字地貌解译过程中,基于DEM计算的各种地形形态示量图(包括高度图、起伏度图、坡度图等)对判断地貌界线有很大的作用,但实际解译中,应以影像等多种资料进行综合判断,且需要对DEM计算的指标做区域调整,方能辅助进行遥感解译,下面将详细讨论对DEM生成的陆地地貌基本形态指标的具体调整。

4.1 海拔高度的区域调整

因我国地域辽阔,地貌形态和成因类型复杂多样,在海拔高度等级的划分上,上世纪80年代编制15幅地貌图时曾争论了相当长的时间,最后各位专家达成基本一致意见,以我国的三级台阶来划分海拔等级,即1000、3500、5000m^[5]。但实际应用中,因山地的类型复杂多变,各地都在这三条等高线上下可作适当调整。东部地区山地较少,但起伏相对较大,因此在长白山、山东低山丘陵区、东南沿海低山丘陵区低山与中山分界线降为800m;大兴安岭、太行山一线,低山与中山分界线为900m;往西的山地低山与中山的界线基本都为1000m,这样处理能较好地反映东部山地的特征。我国西部山地较大,特别是青藏高原区的各主要山地大部分都位于5000m以上,为能反映西部山地的总体规律,在保证主要山地的海拔不变外,一些小的分支山地需要将海拔高度降低,这样才能拉开山地等级关系,大量资料表

明,海拔5500m以上的山地基本都为极高山无异议,这与现代冰川及现代雪线的位置基本相符,需要人为来确定。

因此,按照上述原则,在地貌制图规范及流程中,为了能充分反映各地区山地特征,在保证1000、3500、5000m三条等高线的框架下,可有500m的上下浮动。因此不能按照一刀切的方法,来严格定义1000m以下就为低山,5000m以上都为极高山,等等,如按一刀切的办法,我国东部就几乎没有中山,青藏高原的山地几乎都为极高山,这不合乎常理,也是地貌复杂、无法用某种确定算法来自动计算的原因,只能根据专家知识来判断^[26]。

如果严格按照等高线1000m、3500m、5000m来定义低海拔、中海拔、高海拔和极高海拔界线时,也会出现等高线将完整山地从半山腰切割的现象,显然这是不合理的,为了既能反映海拔,又能完整地反映一个山地,需要解译过程中将山地之间的坡折线、沟谷线、山麓线等特征线作为区分界线,而不是完全利用等高线来区分^[26]。

利用气候地貌指标为海拔分级更为重要,我国西部地区的冰缘(即多年冻土)下线为划分中、高海拔的分界线,现代雪线下界为高海拔和极高海拔的分界线。如阿尔泰山南坡的干燥上限大致为1000~1500m;冰缘下界大致为2400m;现代雪线为3200m。天山北坡干燥上限为2000m;冰缘下界2800m;现代雪线3500m。天山南坡干燥上限2000~2500m;冰缘下界西段为3500m,向东逐渐降低,巴里坤附近3200m,东端最低处3000m;现代雪线天山南坡西4500m、中4200m、东4000m、天山内部,3500m。昆仑山脉,冰缘下界西部为3500m,中东部为4600~4800m;现代雪线大致上西部为4500m,中东部为5500m。秦岭地区的多年冻土下界,北坡2000m;南坡2500m。青海南部3500m;若尔盖草原东缘4000m,再往西到高原面为4600m左右;松潘黄龙地区一带3000m;南部四川黑水一带4000m。总体而言,随着纬度的升高,现代雪线下降,即高海拔的地区实际海拔高度越低^[27-28]。

在我国西部,当地人习惯于将冰缘线以上的区域称为高山和极高山区,因此,如按照全国统一的3500m左右高山的划分界线,类似阿尔泰山、准噶尔西部山地、天山北麓等区域的冰缘地貌将

被视为中山区，这是不合乎常理的，因此，对于全国尺度上的地貌类型的划分，必须结合遥感、DEM和地质等资料，综合判断，并将形态与其相对应的成因类型完全统一起来，方能获得相对准确可靠的数据，表 3 为根据遥感影像等多源数据获得的全国海拔高度分级的面积及百分比，中海拔所占比例最大，为 38.506%，其次为低海拔，占 36.758%。

表 3 基于遥感和 DEM 等多源数据综合判读的地貌类型海拔高度分级面积比例

Tab. 3 Area scales according to altitude classes of land geomorphology based on multi-sources data such as SRIM-DEM and RS imageries etc in China

高度分级	斑块数 (个)	面积 (×10 ⁴ km ²)	百分比 (%)
低海拔	59 881	349. 290	36. 758
中海拔	43 243	365. 895	38. 506
高海拔	22 702	141. 093	14. 849
极高海拔	8 611	93. 955	9. 888

对比表 1 和表 3，可以看出，表 1 低海拔面积比例最大，而表 3 中海拔面积比例最大，这是由于低海拔 1 000m 的高度值在长白山、山东丘陵和东南沿海丘陵区被调整为 800m (图 2)。图 2 的左为仅用 DEM 数据的海拔分级，右为基于遥感等多源数据解译获得的海拔分级，对比可以看出，图 2 右对我国三级台阶的各大山体反映更好，特别是东部第一台阶很明显；相比较而言，图 2 左的大兴安岭、小兴安岭、长白山、山东低山丘陵和江南低山丘陵所反映第三级台阶较差。再在高海拔区域，图

2 左的阿尔泰山、天山、青藏高原边缘山体、台湾的中央山脉等都不明显，说明仅用 DEM，且使用相同的确定值来划分全国海拔所得出的结论肯定存在问题，而应利用多源数据，结合当地实际情况灵活处理，方能获得确实可靠的数据。

4.2 地势起伏度的区域调整

对于地势起伏度计算的七种形态的划分数量关系和海拔一样也是相对值，不能完全说起伏度为 2 500m 就肯定为极大起伏山地，也需要做一些小的微调，要视具体山地来定^[26]。但好处是，只要我们能确定图斑，就可以在 GIS 中算出图斑的起伏度值。按照影像与地形图等资料确定了图斑后，在给每个图斑赋具体的海拔与起伏度值时，需要判断它与周围图斑的相对高差关系。首先，确定主要山体图斑的属性值，按照实际来赋，然后，按照相对关系与垂直带原理对周围图斑的海拔或者起伏度需要作一些小的调整，否则分开的图斑会因属性一致又要合并在一起。这种情况包括：(1)图斑之间明显有高差关系，但海拔和起伏度又一样时；(2)面积特大的图斑，但边缘可划分图斑时；明显需要反映垂直带分布规律，相邻图斑之间缺少垂直带中的某一海拔高度时等。再丘陵、台地的高、低类型等都是需要根据图斑的所处位置及相对关系来判断，几乎没有明显的数量对应关系。这些现象对于连绵起伏的山地较常见，当山顶到鞍部的相对高差超过 200m 时，就需要勾

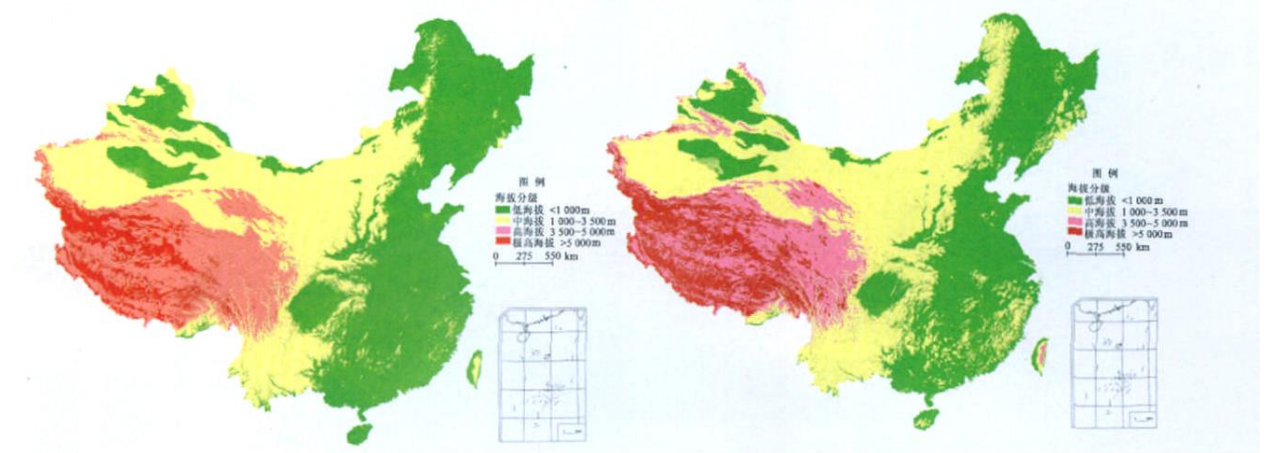


图 2 基于 DEM 和遥感影像等多源数据获得的中国海拔分级分布
(左：利用 DEM 数据的海拔分级；右：遥感等多源数据获得的海拔分级)
Fig. 2 Spatial distribution of altitude classes of land geomorphology based on SRIM-DEM and RS imageries in China (left: only DEM; right: multi-sources data)

画不同起伏的山地或丘陵类型。

在数字地貌解译过程中，要注意山地地貌形态和成因类型的垂直带分布规律，从山顶到山脚依次可能出现极高山、高山、中山、低山、丘陵、台地、平原等类型，因此，如果在一个极高山图斑中间勾画出一个高山、中山、低山、丘陵都是不对的，依次类推。但在山地类型图斑内部存在台地和平原类型又是对的。另一种情况，如果一个河谷从丘陵一直延伸到高山区，在与河谷接壤的区域的高山区，勾画出一个中山、低山、丘陵是合理的，因为河谷的海拔较低，在它的两旁出现比实际山体海拔较低的地貌类型是可能的，也是合理的。

基于遥感影像等多源数据综合判读解译获得的全国地势起伏度分级及分布见表 4 和图 3，其中，平原所占比例最大，为 27.146%，其次为丘陵，占 20.228%。

比较表 2 和表 4、图 3 的左和右图，可以发现，基于遥感影像等多源数据所获得的全国地势起伏度分级比例中，平原类型的面积比例增加，且分布比例变为最大，分析其原因，利用 SR TM 数据，基于 4km² 的采样单元进行计算时，山区的河谷平原类型很难被区分出来，而在人机交互解译过程中，对于山区的河谷平原类型可全部得到表达。台地类型的判断是地貌解译中最困难的一类，如利用遥感影像等多源数据，就可综合判断出东北平原山前地带和大巴山以北等区域大片的冲积洪积台地、侵蚀剥蚀台地，黄土高原地区的塬、台塬等类型。而仅用 DEM 自动提取台地时，

表 4 基于遥感和 DEM 等多源数据综合判读的中国地势起伏度分级面积比例

Tab. 4 Area scales according to relief classes of land geomorphology based on multi-sources data such as SR TM DEM and RS imageries etc in China

类型	斑块数(个)	面积 (×10 ⁴ km ²)	百分比 (%)
平原 (<30m)	43 475	257. 954	27. 146
台地 (>30m)	14 620	88. 354	9. 298
丘陵 (<200m)	34 650	192. 213	20. 228
小起伏山地 (200 ~ 500m)	21 483	152. 556	16. 055
中起伏山地 (500 ~ 1 000m)	15 000	171. 113	18. 007
大起伏山地 (1 000 ~ 2 500m)	4 961	83. 515	8. 789
极大起伏山地 (>2 500m)	248	4. 529	0. 477

很难将台地和丘陵区区分开来。

另一个变化是沙丘的表示，在基于 DEM 计算的地势起伏度分级中，多数沙丘因起伏度较小，都被划分到平原类型中，在数字地貌的分类体系中，把沙丘归为丘陵类型，这在“中国 1 100 万地貌图制图规范”(1987)也可得到证实，故我国北方的几个大盆地的沙漠地貌中出现了大片的丘陵类型(图 3 右)。

5 中国陆地地貌基本形态类型的空间分布格局

基于遥感影像等多源数据解译获得的中国陆地地貌的四级海拔高度(即低海拔、中海拔、高海拔、极高海拔)和七级地势起伏度(即平原、台地、丘陵、小起伏山地、中起伏山地、大起伏山地、

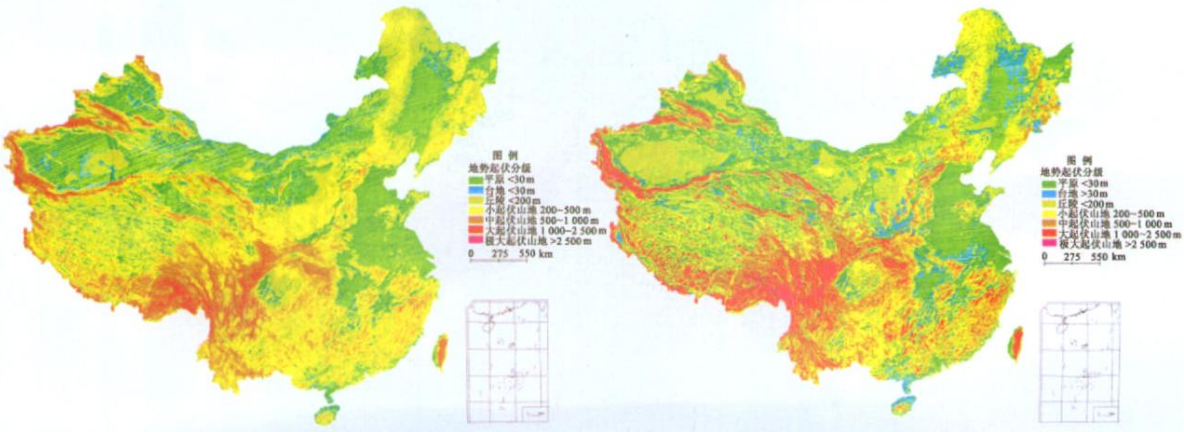


图 3 基于 DEM 和遥感影像等多源数据获得的全国地势起伏度分级及空间分布
(左图用 DEM 数据的地势起伏度分级，右图基于遥感等多源数据获得的地势起伏度分级)

Fig. 3 Spatial distribution of relief classes of land geomorphology based on SR TM DEM and RS imageries in China.
(left only DEM; right multi-sources data)

极大起伏山地)两个指标相组合,便获得中国陆地地貌的 25 种基本形态类型(李炳元, 2008, 将其命名为基本地貌类型^[8]),其分布格局见图 4, 面积比例和图斑数见表 5 和图 5。

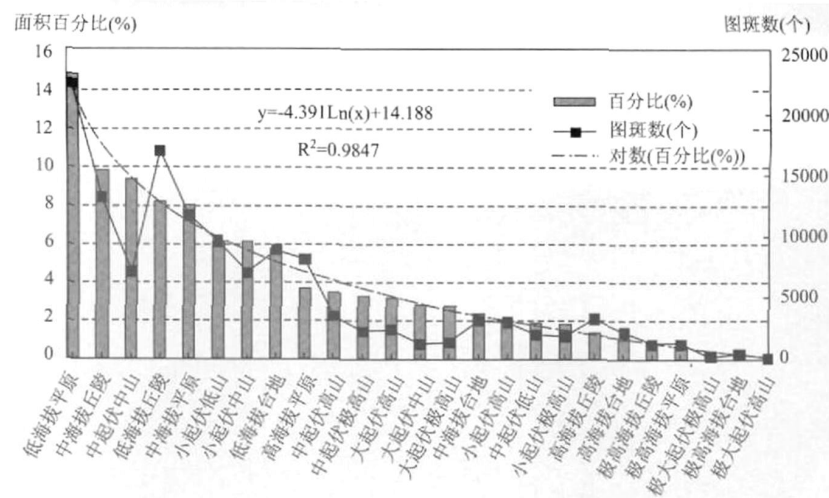


图 4 中国陆地地貌基本形态类型面积比例及图斑数关系

Fig.4 Relationship between area scales and patch numbers of basic morphological types of land geomorphology in China

表 5 基于遥感影像等多源数据获得的中国陆地地貌基本形态类型面积及百分比

Tab.5 Area scales and proportions of basic morphological types of land geomorphology based on multi-sources data such as SRIM-DEM and RS imageries etc in China

基本地貌形态类型	编码	斑块数 (个)	面积 (×10 ⁴ km ²)	百分比 (%)
低海拔平原	11	22 443	142. 523	14. 846
中海拔丘陵	32	13 158	94. 635	9. 858
中起伏中山	52	7 105	90. 015	9. 377
低海拔丘陵	31	16 920	78. 599	8. 187
中海拔平原	12	11 676	77. 002	8. 021
小起伏低山	41	9 590	58. 619	6. 106
小起伏中山	42	7 044	58. 529	6. 097
低海拔台地	21	8 898	55. 020	5. 731
高海拔平原	13	8 111	35. 673	3. 716
中起伏高山	53	3 598	33. 011	3. 439
中起伏极高山	54	2 267	31. 726	3. 305
大起伏高山	63	2 386	30. 547	3. 182
大起伏中山	62	1 173	27. 163	2. 83
大起伏极高山	64	1 402	26. 663	2. 777
中海拔台地	22	3 087	22. 312	2. 324
小起伏高山	43	3 016	19. 684	2. 05
中起伏低山	51	2 030	18. 120	1. 887
小起伏极高山	44	1 833	17. 292	1. 801
高海拔丘陵	33	3 313	13. 026	1. 357
高海拔台地	23	2 204	9. 777	1. 019
极高海拔丘陵	34	1 259	7. 930	0. 826
极高海拔平原	14	1 245	5. 407	0. 563
极大起伏极高山	74	174	3. 750	0. 391
极高海拔台地	24	431	2. 153	0. 224
极大起伏高山	73	74	0. 825	0. 086

图 4 和表 5 表明,在我国陆地的 25 类基本形态地貌类型中,低海拔平原分布面积最大,占 14. 846%,如我国的几大平原(包括东北平原、华北平原、长江中下游平原等)和几个大盆地的一部分(包括准噶尔盆地、塔里木盆地和四川盆地等)。其次为中海拔丘陵,占 9. 858%,包括我国二级台阶上的高原区、盆地区;第三为中起伏中山,占 9. 377%,包括我国东部第三级台阶和第二级台阶的山地等等^[29]。

将我国陆地地貌的 25 种基本形态类型按照面积和百分比从大到小依次排列,可将所有 25 类划分为四大类,第一大类为百分比大于 10%,仅有低海拔平原一种;第二大类面积百分比 4% ~ 10%,包括中海拔丘陵、中起伏中山、低海拔丘陵、中海拔平原、小起伏低山、小起伏中山和低海拔台地,共 7 种;第三大类的面积百分比为 2% ~ 4%,包括高海拔平原、中起伏高山、中起伏极高山、大起伏高山、大起伏极高山、中海拔台地和小起伏高山,共七种;第四大类的面积百分比小于 2%,包括中起伏低山、小起伏极高山、高海拔丘陵、高海拔台地、极高海拔丘陵、极高海拔平原、极大起伏极高山、极高海拔台地和极大起伏高山,共 9 种^[29]。

将我国陆地地貌 25 种基本形态类型的面积百分比和图斑数进行排列,可以发现,25 种基本形态类型的面积分布呈现出对数模式,且相关系数

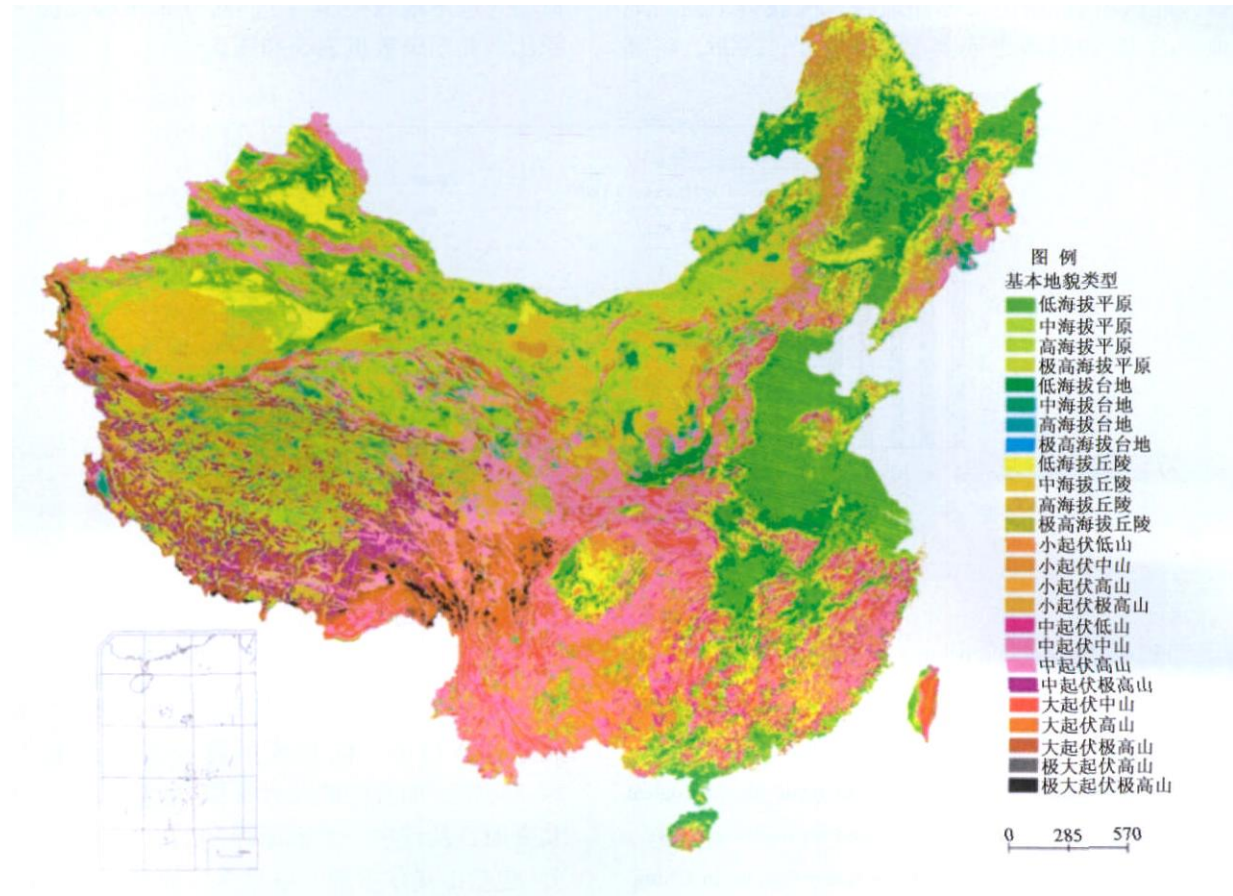


图 5 遥感影像等多源数据获得的中国陆地地貌基本形态类型的空间分布特征

Fig. 5 Spatial distribution of basic morphological types of land geomorphology based on multi-sources data such as SRTM-DEM and RS imageries etc in China

达 0.98(图 5)。面积百分比和图斑数基本呈现出正相关关系，即类型的面积大，图斑数也大。但不同类型的面积和图斑数存在差异，即平原、台地和丘陵的面积数大，图斑数也大；相反，山地类型因其完整性等特征，单个图斑都相对较大，故该类型的图斑数也相应地位于拟合线的下方。说明了我国地貌类型中，丘陵和台地基本都位于过渡带，地貌比较破碎，而山体相对完整^[29]。

6 结论和讨论

通过对 DEM 计算的地形特征和遥感等多源数据综合判断的形态特征进行对比分析，可得出如下结论：

(1)在全国范围内，基于 1 25 万尺度的 DEM 计算地势起伏度，具有普适性的采样单元为 4km²，对于全国 1 400 万尺度，其采样单元为 21km²，对比可知，1 250 万 DEM 数据，最佳采样单元为

18km²，1 100 万 DEM 数据，最佳采样单元为 12km²，从而得出我国地形地貌格局分析和地貌制图中存在 0.4、4、12、18、21km² 五种不同规模的地势起伏度最佳单元，并分别对应着不同的比例尺；

(2)基于全国尺度上的基本形态指标 (包括海拔和起伏度)的划分依据，在实际解译过程中，需参考 DEM 计算的形态示量指标，结合当地的实际情况进行适当的调整，这样才能得出比较可行的地貌形态数据，通过综合解译，得出我国陆地地貌的 4 个海拔分级、7 个起伏度分级和 25 个基本形态类型的面积及空间分布；

(3)坡度是划分平原和山地，反映地貌单元内地表起伏关系的主要指标之一，但因我国地貌类型复杂多样，不同成因的山地和平原的坡度阈值各不相同，从 3 到 15 不等，可见目前还没有一个确定的阈值进行全国性山地和平原类型的划分。

利用 DEM 计算地貌形态示量图 (如坡度、坡

向、起伏度、高度、曲率等)对数字地貌研究具有很大的指导和帮助作用,但因地貌是形态和成因的结合体,需要综合遥感、地貌图、地质、地形等多源数据方能获得“定量、定位和定性”的数字地貌数据,目前,利用DEM进行地势坡度分级、大区域地势起伏计算、山地和盆地等大地貌单元的方法相对比较成熟,多数利用DEM提取地貌形态都集中在特殊地貌特征线上,如山脊线、山麓线、沟谷线、沟沿线等和地貌部位的提取,所计算的指标多为坡度、坡位、坡向等,地貌形态多为黄土梁、塬、峁等明显的类型上;另外利用遥感影像进行地貌形态和成因信息提取的方法更是很少,G. Ch. Miliareisis是目前国内外利用DEM和遥感影像进行地貌信息提取的权威专家^[30],他在研究Death Valley of California的洪积扇提取时,主要用DEM进行坡度分级,利用连通性过滤微小图斑,圈定洪积扇外围轮廓,再利用遥感影像和原有地貌图进行精确定位,可见在目前现状下,遥感影像上反映的地貌、地质、构造等信息仍没有有效的自动提取方法。鉴于遥感影像所包含信息的多样性和非直观性,加上地貌特征本身的复杂性,故目前大多数字地貌信息提取方法还停留基于DEM的数字地形分析和专家知识的遥感影像目视解译的基础上,其方法技术并不完善,故需进一步深入地研究高精度DEM、高分辨率和多源遥感影像,构建遥感影像的地貌图谱和解译标志,借助高分辨率遥感影像的面向对象分割方法,以及多源遥感影像的色调、纹理和结构对比分析等进行地貌特征的自动/半自动人机交互提取方法,甚至达到特殊地貌类型的全自动提取方法,通过野外实地验证以提高提取精度,并编制典型区中比例尺地貌图,可进一步促进我国地貌学的发展,为研究和编制全国性大中比例尺地貌图奠定基础。

参考文献:

- [1] 斯皮里顿诺夫. 地貌制图学. 北京:地质出版社, 1956
- [2] 周廷儒,施雅风,陈述彭. 中国自然区划草案. 中国地形区划草案. 北京:科学出版社, 1956
- [3] 沈玉昌. 中国地貌的类型与区划问题的商榷. 中国第四纪研究, 1958, 1(1): 33-41.
- [4] 中国自然区划工作委员会. 中国地貌区划(初稿). 北京:科学出版社, 1959.
- [5] 中国科学院地理研究所. 中国 1:100万地貌制图规范(征求意见稿). 北京:科学出版社, 1987.
- [6] 陈志明. 中国及其毗邻地区地貌图(1:400万). 北京:科学出版社, 1993.
- [7] 李炳元. 中国地貌图(1:400万). 北京:科学出版社, 1994.
- [8] 李炳元,潘保田,等. 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.
- [9] Demek J, Embleton C. International geomorphological map of Europe (1:2 500 000). Cartography, Lithography and Printing: Geodetiky a Kartograficky Podnik Praha, SP: 1976, 1988, 1989.
- [10] 苏时雨,李钜章. 地貌制图. 北京:测绘出版社, 1999, 35-45.
- [11] 程维明博士后出站报告. 中国 1:100万地貌-地表覆盖-景观生态制图方法研究. 中国科学院地理科学与资源研究所, 2005.
- [12] Philip T Giles, Steven E Franklin. An Automated Approach to the Classification of the Slope Units Using Digital Data. Geomorphology, 1998, 21: 251-264.
- [13] 张会平,张平安,张威,等. 基于DEM的岷江断裂带构造地貌模拟. 辽宁工程技术大学学报, 2004, 23(5): 603-605.
- [14] 汤国安,杨玮莹,杨昕,等. 对DEM地形定量因子挖掘中若干问题的探讨. 测绘科学, 2003, 28(1): 28-32.
- [15] 许世远,孙以义. 地貌形态模拟. 地理学报, 2000, 55(3): 266-273.
- [16] 汤国安,刘学军,闫国年. 数字高程模型及地学分析的原理与方法. 北京:科学出版社, 2005.
- [17] 李钜章. 中国地貌形态基本类型数量指标初探. 地理学报, 1982, 37(1): 17-26.
- [18] 李钜章. 中国地貌基本形态划分的探讨. 地理科学, 1987, 6(2): 32-39.
- [19] 涂汉明,刘振东. 中国地势起伏度最佳统计单元的求证. 湖北大学学报(自然科学版), 1990, 12(3): 265-271.
- [20] 涂汉明,刘振东. 中国地势起伏度研究. 测绘学报, 1991, 20(4): 311-318.
- [21] 唐飞,陈曦,程维明,等. 基于DEM的准葛尔盆地及其西北山区地势起伏度研究. 干旱区地理, 2006, 29(3): 388-391.
- [22] 郎玲玲,程维明,等. 多尺度DEM提取中国基本地貌类型的对比分析——以福建低山丘陵区为例. 地球信息科学, 2007, 9(6): 1-8.
- [23] 高守英,吴泉源,安国强. 基于GIS的龙口市泳汶河流域地貌形态定量分析. 遥感技术与应用, 2003, 18(2): 87-90.
- [24] 龙恩,程维明. 利用SR TM+DEM和TM数据提取平原山

- 地信息的研究. 测绘科学, 2008, 22(2): 53-56
- [25] 肖飞, 张百平, 等. 基于 DEM 的地貌实体单元自动提取方法. 地理研究, 2008, 27(2): 459-466
- [26] 周成虎, 程维明, 钱金凯. 数字地貌遥感解析与制图. 北京: 科学出版社, 2009.
- [27] 程维明, 赵尚民. 中国冰川地貌空间分布格局研究. 冰川冻土, 2009, 31(4): 587-596
- [28] 程维明, 柴慧霞, 周成虎, 等. 新疆地貌空间分布格局分析. 地理研究, 2009, 28(5): 1157-1169.
- [29] 中华人民共和国地貌图集编辑委员会. 中华人民共和国地貌图集. 北京: 科学出版社, 2009.
- [30] George Ch Miliareisis. Extraction of Bajadas from Digital Elevation Models and Satellite Imagery. Computers & Geosciences, 2001, 27: 1157-1167.

Quantitative Extraction and Analysis of Basic Morphological Types of Land Geomorphology in China

CHENG Weiming, ZHOU Chenghu, CHAI Huixia, ZHAO Shangmin, LI Bingyuan

(State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: Basic morphological types of land geomorphology in China are made up of two indexes: altitude and relief amplitude. The altitude index is divided into 4 classes, that is: low altitude <1 000m, middle altitude 1 000 ~ 3 500m, high altitude 3 500 ~ 5 000m, highest altitude >5 000m; relief amplitude is divided into 7 classes, that is: plain < 30m, tableland >30m, hill <200m, low relief mountain 200 ~ 500m, moderate relief mountain 500 ~ 1 000m, high relief mountain 1 000 ~ 2 500m, highest relief mountain >2 500m. Then, the combined basic morphological types are 25 kinds. According to classification system of digital geomorphology, the classification indexes of altitude and relief amplitude are suitable for the whole Chinese continent; the above classified types from these two indexes can be calculated by means of multi-source data, such as DEM, Landsat TM/ETM etc. The experiments show: based on DEM data (such as SRTM-DEM 90m, equivalent to the scale of 1:250 000), the adopted sampling unit which can be suitable for the whole Chinese continent is 4km²; corresponding to different scales respectively, 5 types of sampling units, that is: 0.4, 4, 12, 18, 21km², existing in the whole Chinese continent, can be attained by calculating from DEM data at different scales, such as 1:100 000, 1:4 000 000 etc. Because of the complexity and multiplicity of Chinese geomorphology, the geomorphologic features of different regions can not be only reflected by means of elevation value and relief amplitude acquired from DEM data; hence, based on multi-source data such as remote sensing, the spatial distribution of 4 classes of elevation characteristics and 7 classes of relief amplitude characteristics in China can be well represented by means of the geomorphologic boundary acquired from artificial virtual interpretation; furthermore, the area and spatial distribution pattern of 25 kinds of basic morphological types of land geomorphology in China are achieved.

Key words: land geomorphology; basic morphology; morphological geomorphology; quantitative extraction; spatial analysis