DOI:10.11721/cqnuj20220613

# 云南省地形隆起高度与切割深度分析*

肖丽琼[1]，周汝良[1]，龙晓敏[2]，田　园[1]
(1. 西南林业大学 地理与生态旅游学院，昆明 650224；2. 云南农业大学 水利学院，昆明 650500)

**摘要:**【目的】绝对海拔难以表达真实的地形隆起、沟谷切割或盆地塌陷程度，定义和量化地形隆起高度与切割深度对于多种山地地貌等地学现象的刻画与研究都具有支持作用。【方法】基于数字高程模型数据并以云南省为研究区，提出一种地形隆起与切割程度的指标构建方法。该方法以地理栅格地图代数为单元，利用小流域分割山地区域并选取每个流域的平均海拔为样本点构建地表平均趋势面，并以该趋势面为起算点。【结果】1) 地形隆起高度与切割深度能很好地表达大型地貌的隆起与切割变化，更能表征山体特征，体现大地域间的山体构造差异。2) 云南省地形隆起高度与切割深度取值主要集中于－500～500 m；它的空间分布特征与平均海拔变化规律相似，均呈倒“U”型分布。3) 云南省的低海拔区地形隆起高度与切割深度为－157～599 m；中海拔区东部地形隆起高度多小于 252 m 而切割深度的绝对值多小于 439 m，西部地形隆起高度为 252～<579 m 而切割深度为－439～<－157 m；高海拔区地形隆起高度为 579～<1 807 m 而切割深度为－1 332～<－439 m；极高海拔区地形隆起高度为 1 807 m。4) 云南省的地形隆起高度与切割深度在纬向上整体呈现出由西向东逐渐下降的趋势，在经向上则从北到南呈下降的趋势。【结论】地形隆起高度与切割深度指标的构建弥补了现有地学指标无法刻画山体向上隆起、沟谷向下切割特征的不足之处，更能反映大倾斜面即大地域间的山体构造状况，并为多种地学研究提供数据支撑。

**关键词:**隆起与切割；地形趋势面；应用研究；剖面分析；云南省
**中图分类号:**P931　　**文献标志码:**A　　**文章编号:**1672-6693(2023)02-0151-10

地形隆起高度与切割深度是描述地表形态变化特征及崎岖程度的指标，地形地貌多样性及相关变化是影响或驱动各种自然地理现象发生、形成和存在的主要原因。目前缺少有关度量山体向上隆起、沟谷向下切割程度的地理变量，而该种变量对地理事件发展的阻隔或联通效应影响重大，对外来物种的入侵、生物灾害的发生发展扩散、森林火灾的蔓延、近地表气流的阻挡以及降水(温度、湿度)场的形成分析都具有重要的意义。在垂直高度上的度量也对地貌要素及过程的量化模拟表达具有重要作用，如在衡量区域人居环境适宜程度与资源环境发展状况[1-2]、对生物多样性的地理指数描述[3]、生态环境保护[4]、自然灾害研究[5]、各种自然要素对区域协调发展的影响[6]、城市发展及土地利用状况分析[7]等方面都具有广泛应用价值。

已有的如地形复杂度、地形起伏度、地表破碎度、参照水准面上的绝对海拔等众多地学指标都无法刻画山体向上隆起的真实高度和沟谷的水平结构，并难以刻画发育于大倾斜面上的山地地貌，且很难区分大地域间的山体构造差异。已有的相关研究多基于最佳窗口定义的地形起伏度变量来刻画山体变化特征[8-10]，如杨艳昭等人[11]探索出省域层面最佳窗口尺度为 5 km×5 km；李威等人[12]认为市域层面 1 km×1 km 的窗口最为适宜进而反映整体地形起伏状况；封志明等人[13]利用均值变点法确定青藏高原最佳分析窗口约为 1.51 $km^2$，并以此进行地形起伏度的计算，然后探讨了青藏高原地形起伏特征的地理意义。由于地形起伏度随着分析窗口变化而变化，具有非确定性；因而它是一种表征垂直高度上地形起伏程度的相对指示值，无法精细化刻画局部地形区域内细小地貌特征，并限制了它在其他方面的应用。

云南省地处以山脉为骨架呈掌状向四周延伸的特殊地理位置区[14]，区域内断裂塌陷盆地及河谷星罗棋布、高山深谷纵横相间，由此制约了该省的经济社会发展。当前亟需进一步探索特殊山区地理环境特征，从而能够更好地为云南省的区域经济发展服务[14]。现今有关不同山体隆起与切割变化所表征出的地理意义的研究鲜有

* **收稿日期:**2021-10-17　**修回日期:**2022-11-25　**网络出版时间:**2022-12-08T16:38
**资助项目:**国家自然科学基金面上项目(No. 31860213)；云南省重大科技专项(No. 202002AA100007)
**第一作者简介:**肖丽琼，女，研究方向为山地灾害与空间信息技术，E-mail:1571370186@qq.com；**通信作者:**周汝良，男，教授，E-mail:zhou_ruliang@163.com
**网络出版地址:**https://kns.cnki.net/kcms/detail//50.1165.N.20221207.1715.012.html

学者涉及,因此本研究基于数字高程模型(DEM)数据构建了栅格化高程曲面模型,并以此为高度起算构建参照面来描绘真实的地形向上隆起与向下切割状况,从而进一步揭示云南省地形隆起高度与切割深度指标的空间分布格局及不同经纬向上的地理特征,相关成果不仅丰富了相关地学指标,也为多种地学研究提供了数据支撑。

## 1 研究区域概况及数据处理

### 1.1 研究区概况

云南省地处中国西南边陲,介于东经97°3′～106°11′、北纬21°8′～29°15′之间,全省山河相间纵列分布、盆地零星分布。云南省幅员面积约$3.941\times10^5$ km$^2$,其中山地面积占比约为94%[15]。在地形特征方面,云南省地势呈西北高、东南低的阶梯状分布;区域内以高海拔地形为主且地表割裂明显,是中国垂直地带特性和地表破碎最为明显区域之一[16]。在地貌类型方面,云南省以山地地貌为主并兼具沟谷、高原、坝子等多种地貌类型,地形高差变化明显;相对平坦的坝子地貌仅占全省总面积的6%左右。在典型地形区域方面,滇西北地区地处中国一级阶梯南部的横断山区,此区域高山屹立、沟谷深切、地形起伏变化剧烈;滇中、滇东地区位于中国第二阶梯内地形崎岖、峰岭众多的云贵高原;滇西、滇南位于中国边境地区,多河谷发育。

### 1.2 数据处理

利用DEM作为基础数据可以客观表达研究区的地形地貌特征,并能快速、高效、准确地提取所需要的地形因子。在本研究中,首先下载覆盖中国区域的SRTM3数据集,它的栅格分辨率为90 m;然后运用ArcGIS软件的底层函数Grid Merge( )对数据文件拼接运算,将1°×1°的分块地图拼接成云南省的整体地图。由于接缝边缘存在像素灰阶不一致,构成肉眼可见的异常边缘"缝",因此采用平滑滤波处理消除缝隙。此外,对海拔值丢失或异常值数据区域进行填空处理和异常改正;对于某些超过正常海拔值的区域,利用邻域灰阶填充或用条带过滤,进行简单替换处理。

## 2 指标构建方法

流域是由分水线所包含的集水区域组成,相比传统窗口算法而言,流域是一个相关关系更为紧密且地理特征和区域差异明显的统计单元。本研究在ArcGIS地图代数、空间分析运算环境支持下,提出一种以小流域为单元的地表趋势面模型的构建方法,度量地形向上隆起与向下切割的程度。这样既能突出其中内在的逻辑性,也能表达出山体隆起与切割程度之间的外在差异性,更能刻画出在绝对海拔上大地域间的山体构造差异。

### 2.1 原理及方法

假设在古地质变迁中因巨大地壳板块水平、垂直运动、岩浆活动和变质作用而形成了大尺度范围内地形平均高低变化的参照面,并将它称为地形高差参照面。以该参照面为基础,在地球内外营力的共同作用下,各尺度地貌经过一系列抬升、隆起、冲刷、堆积等作用,逐渐形成了现有的地形地貌。以上述假设为前提,将离散点进行关联形成平面网络,基于网络单元构建连续的曲面,作为测算真实地表起伏变化的理论基础[17],构建地形趋势面模型。

就发育自大倾斜面上的山地地貌(图1)而言,因它处于北高南低的大倾斜面上,地形起伏变化明显;故使用参照水准面构建的DEM数据已无法刻画山体向上隆起的真正高度,也难以度量沟谷的水平密度和结构。周汝良等人[18]提出的改进方法是建立一个倾斜参照面,以替代绝对海拔来刻画垂直方向上山体的隆起和沟谷、盆地向下切割或沉降度量的变量。它的基本原理是:由于地形高差参照面是一个变化多样的曲面,因此首先假设每一个分水岭区域可以用一个理想斜面来定义该区域的山体隆起高度、沟谷切割的深度,并在每个分水岭区域的中部定义内接最大椭圆圆心,选取这个点的海拔为分水岭的平均海拔。然后,将所有分水岭中部的点连接起来,即可形成覆盖研究区的由无数小三角连接起来的曲面来代表地形隆起与切割测量的基准面。事实上,由于三角形各个面之间的连接过渡不平滑,故使用地理信息系统的内插法进行内插,则可生成连接较为光滑的曲面,进而构建地形隆起高度与切割深度变量。

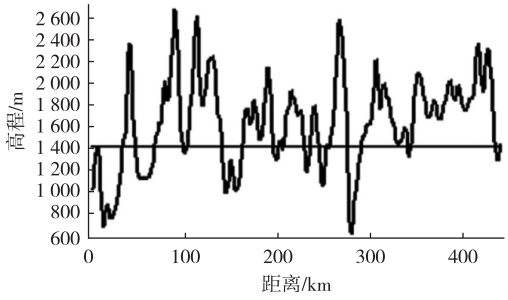



**图1 云南省北纬24°处山体剖面与趋势面**

**Fig. 1 Mountain profile and trend surface in Yunnan Province (24°N)**

### 2.2　流域分割及内插样本点的采集

流域整体上呈现系统嵌套特性，即每一个流域既由下一级子流域组成，亦是上一级流域中的子流域。这种特性既表现在它内在的层次结构上，也表现在它的空间差异性上。以此为基础进行研究，可以得到地理特征和区域差异更为明显的统计单元。

#### 2.2.1　提取分水岭单元

分水岭分割是 ArcGIS 的内置算法，根据河流流向和出水口共同确定的空间范围。相关计算的关键是确定分析窗口边缘的出水口位置。在进行流域盆地划分中，所有流域的出水口均处于分析窗口边缘，识别每个出水口上的汇流区域，得到各分水岭地貌单元的多边形 $F_V_i$。其中 $i$ 为各分水岭地貌单元的序列号，且 $i=1,2,\cdots,n$，$n$ 为分水岭单元的总数，进而得到覆盖整个地理研究区域的分水岭多边形。

#### 2.2.2　确定内接椭圆单元及样点位置

利用空间分析方法求算每个流域 $F_V_i$ 的最大内接椭圆，提取内接椭圆圆心坐标（$K_i$，$L_i$），以此作为流域内样点的坐标位置。

#### 2.2.3　样点高程的计算

计算 $F_V_i$ 所包含的所有栅格点的海拔指标的算术平均值，将它赋为 $u_i(K_i,L_i)$，并用它表达椭圆圆心坐标点上的平均海拔。构建算术平均值的计算模型如下：

$$u_i(K_i,L_i)=(h_1+h_2+\cdots+h_j)/m,$$

式中：$h_1,h_2,\cdots,h_j$ 为每个分水岭流域内栅格点的数字高程值；$m$ 为多边形内全部栅格点的数量；$j=1,2,\cdots,m$。

### 2.3　地形趋势面的内插

趋势面分析方法能通过模拟自然因子在空间上的分布规律，利用样本观测值建立空间模拟表达函数，从而实现样本数据的空间变化趋势分析，并表达连续的空间曲面变化。不同的内插方法会得到不同的趋势面模型，需选择最优的方法使结果更接近于真实地表。空间内插分析方法的基本原理是基于“地理学第一定律”的假设，即空间位置上越接近的点，相似的可能性就越大。其中空间自协方差最佳内插方法即克里金插值法[19]认为任何空间属性变化都具有一定不规则性且不能用简单的平滑数学函数来模拟，但可用随机表面进行恰当描述，因此该方法是一种寻求空间分布数据的最优、线性、无偏内插的估计计算方法。相较于常规方法而言，克里金插值法的优势在于考虑各已知数据点的空间相关性，而且在给出待估计点数值的同时，还可表示估计值精度的方差；在插值过程中该方法根据某种优化准则函数动态决定变量数值，从而使内插函数处于最佳状态。在内插完成后，还需对内插缺失面进行平滑滤波以及消除毛刺、边缘等噪声处理。

### 2.4　地形隆起高度与切割深度模型的构建

地形趋势面模型只是模拟真实地表的曲面，要构建真正度量地形隆起高度与切割深度指标还需与真实地形数据做差，得到两者之间的高程差，以此来反映真实地表形态特征，模型构建流程如图 2 所示。则具体的地形隆起高度与切割深度计算模型为：$T=D-W$，其中 $T$、$D$ 和 $W$ 分别为地形隆起高度与切割深度、预处理后的 DEM 数据和地形趋势面。

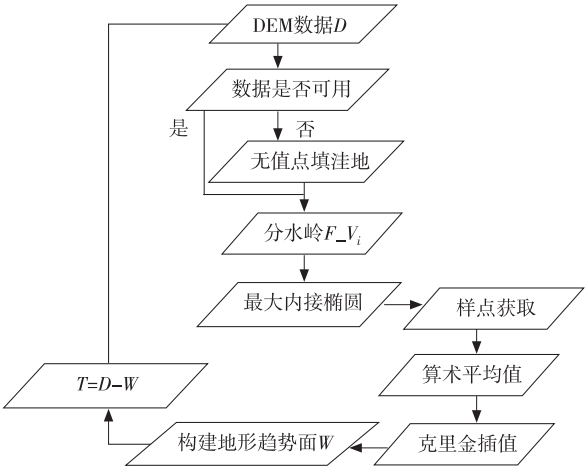



**图 2　模型构建流程**

**Fig. 2　Flowchart of model construction**

## 3　结果与分析

### 3.1　地形隆起高度与切割深度指标有效性分析

地形隆起高度与切割深度指标以山体隆起基部为起算点，不仅能体现不同尺度地域间的山体构造差异，而且能以定量化数值形式度量山体隆起高度与下切深度状况。数值为正表征山体向上隆起，数值越大隆起越越明显，山体发育越好；数值为负表示该地区多沟谷、盆地等塌陷地形，负值绝对值越大则沟谷下切越深。如图 3 所示，(a) 表征山体向上隆起状况，发育程度不同的山体隆起高度各不相同。(b) 为从正视视角出发在特定区域内地形向上隆起及向下切割的程度。(c) 为

沟谷向下切割的深度,低于参照水准面上绝对海拔的沟谷或盆地等凹陷地形,都表现为向下切割形态,而切割程度是该地形区内外营力共同作用的结果。

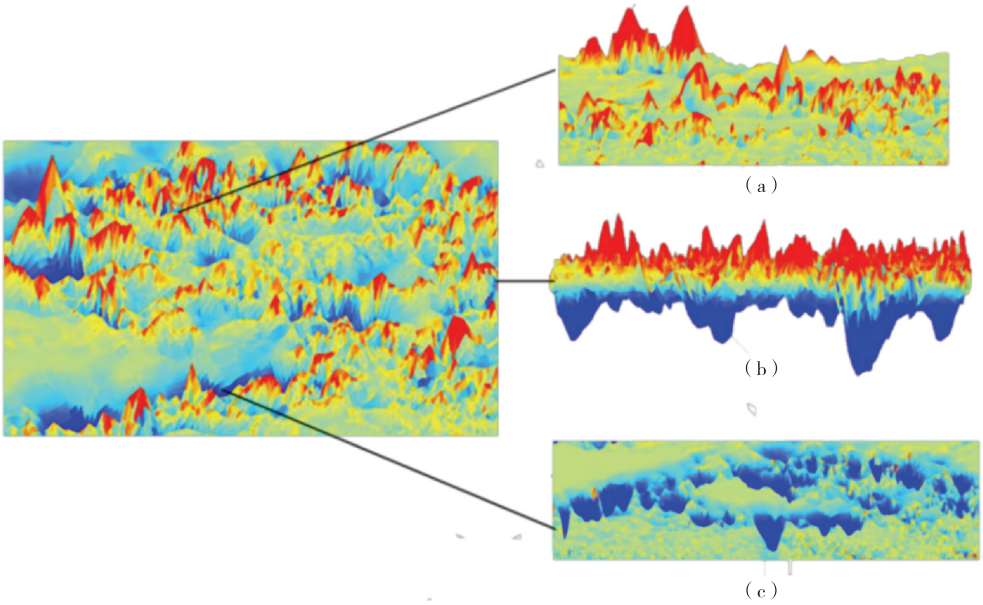



**图 3 局部区域隆起与切割表达**

**Fig. 3 Local uplift and cutting expression**

为进一步验证该指标的合理性,提取出 3 种典型地貌区进行比对,如图 4 所示。地形隆起高度与切割深度指标数值从语义定义角度反映了不同地貌类型区的地形变化特征:盆地区地形变化小,隆起与切割不明显故高差小(图 4a);沟谷区受地形河流影响表现为向下切割状态(图 4b);高山区山系发育明显,沟壑纵横隆起度最高(图 4c)。由于地壳大幅抬升,地形常表现为高山谷深形态,同时又多河流发育,落差大向下切割剧烈故又形成沟谷;因此从图 4 中可见山体隆起及向下切割沟谷总是同时伴随出现。

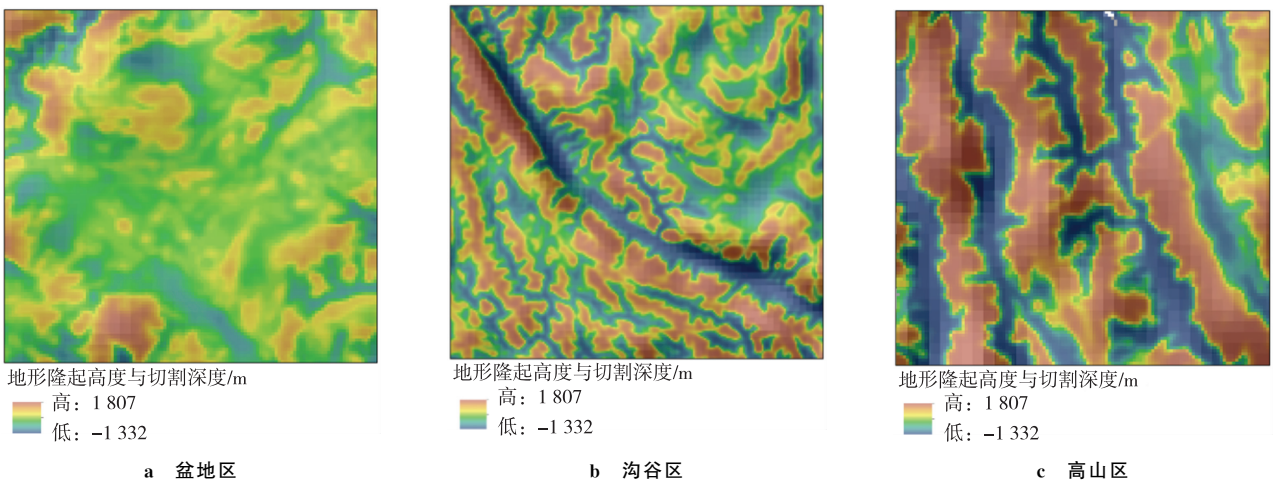



**图 4 典型地貌区的隆起与切割**

**Fig. 4 Uplift and cutting of typical geomorphology areas**

### 3.2 地形隆起高度与切割深度全局性特征分析

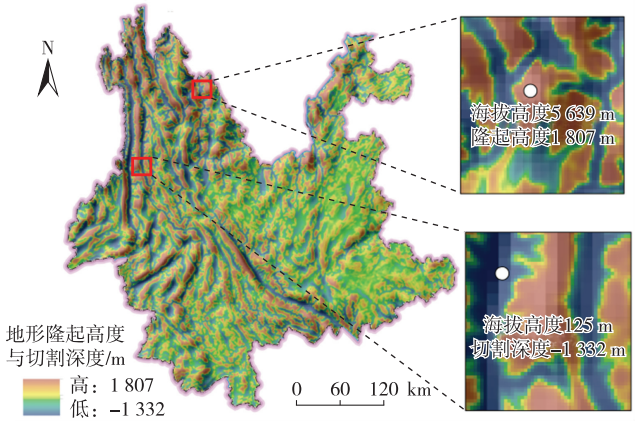
利用构建的地形趋势面模型度量云南省地形隆起高度与切割深度状况,由图 5 可看出:云南省地形最大隆起高度为 1 807 m,位于玉龙雪山;切割深度绝对值最大为 1 332 m,地处怒江河谷;云南省地形隆起高度与切割深度均值为 16 m,由西北部向东南部、东部递减。采用自然间断法将云南省地形隆起高度与切割深度分为 6 个等级:1) 地形切割深度小于 −421 m 的地域集中分布于云南省西部的怒江、澜沧江、金沙江、高黎贡山、云岭等巨大河流与山脉发育地区,山高谷深,地形高差悬殊。除此之外,滇西北的峡谷及幽深狭窄的哀牢山区域切割也最

为显著。2）地形切割深度为－138～－421 m 的地域零星分布于云南省北部及南部的江河切割较剧烈区，地形高差也相对明显。3）地形隆起高度小于 58 m、切割深度大于－138 m 的地域多分布于云南省南部河谷及滇东高原的边缘坝子区域，呈现出广泛且集中的分布态势。由于云南省多地势低平的中小型坝区，因此起伏和缓多河流发育故隆起与切割程度相对和缓。4）地形隆起高度为 58～292 m 的地域在全云南省陆域范围内均有分布，主要原因为各种类型山地在云南全省均有分布，如云南省西北部山体隆起明显，滇东高原上为残存的一些低矮山体隆起高度较小。5）地形隆起高度与切割深度值为＞292～625 m 的地域主要分布于云南省北部及滇东北东川地区的小江流域一带的中山、高原边缘的破碎地带。6）地形隆起高度与切割深度大于 625 m 的地域零星分布在高黎贡山、乌蒙山、大娄山、哀牢山等极高山地区。

### 3.3　地形隆起高度与切割深度与平均海拔相关性分析

对定量化的云南省地形隆起高度与切割深度以及平均海拔数据进行统计分析，结果如图 6 所示：两个指标呈现线性变化关系，且均呈现出倒“U”型变化特征。具体表现为在不同等级海拔区，地形隆起高度与切割深度也随之发生变化：1）低海拔区（平均海拔小于 1 000 m）地形隆起高度小于或等于 599 m，切割深度为－157～0 m。2）中海拔区（平均海拔为 1 000～3 500 m）地形隆起高度与切割深度东西部差异明显：东部区域地形隆起高度多小于 252 m，切割深度的绝对值多小于 439 m；在地形复杂、起伏明显的多山体分布的西部地区，地形隆起高度为 252～＜579 m，而切割深度为－439～＜－157 m。3）高海拔区（平均海拔为＞3 500～5 000 m）地形隆起高度为 579～＜1 807 m，切割深度范围为－1 332～＜－439 m。4）极高海拔区（平均海拔大于 5 000 m）在云南省分布较少，地形隆起高度为 1 807 m。在哀牢山、拱王山、高黎贡山、横断山、云岭、绵绵山、雪盘山、梅里雪山等高大山体发育、海拔较高的典型地域，地形隆起也最明显。在某些特殊地区也存在例外，如帮马山海拔较低为 2 938 m，而隆起高度值较大，为 1 515 m。高大而狭窄的云岭海拔为 4 711 m，隆起高度仅为 1 090 m。其中原因主要为该山体海拔与河谷海拔受多种内外力作用影响，并不具有一致的变化趋势。

从空间分布上看，随着海拔的增加，整体上地形隆起与切割变化也越剧烈。云南省境内以平均海拔为 1 000～3 500 m 的中海拔地形为主，而地形隆起高度集中于 0～500 m 范围内，在地貌类型上为中山、高山、滇东高原及一些较为低缓山体区。而切割深度在－500～＜0 m 范围最为集中，广泛分布于横断山、云岭、高黎贡山、哀牢山、怒江等地形切割剧烈的典型代表单元，山高谷深、地形呈窄条带变化且河谷强烈发育地区。海拔在 2 000 m 以下的区域多为较平坦地区和向下切割的盆地或沟谷。在海拔 4 000 m 以上区域，隆起与切割变化也最为剧烈，但在云南省分布较少，主要分布于该省北部高大山区如担当力卡山、梅里雪山、玉龙雪山等区域。




注：底图数据来源于自然资源部标准地图服务网站（http://bzdt.ch.mnr.gov.cn/），审图号：GS(2019)3333 号。

**图 5　云南省地形隆起高度与切割深度空间分布**

**Fig. 5　Spatial distribution of topographic uplift height and cutting depth in Yunnan Province**

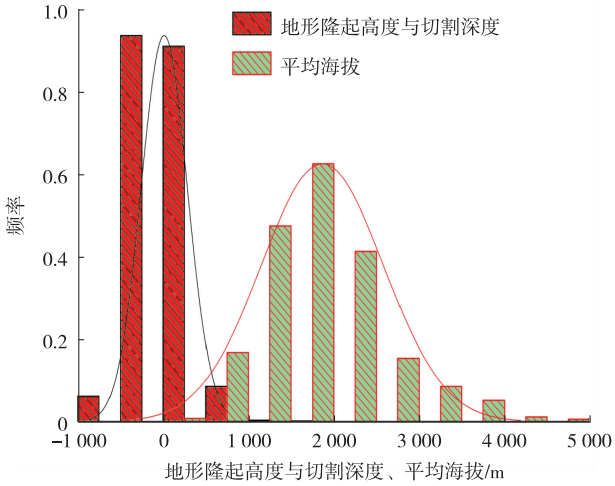



**图 6　地形隆起高度与切割深度与平均海拔相关性分析**

**Fig. 6　Correlation analysis between topographic uplift height and cutting depth and average altitude**

### 3.4　地形隆起高度与切割深度经纬向分布特征分析

由于云南省北部为高山与极高峡谷区，中部为高山深谷高原区，南部为中山、沟谷和盆地，地貌与经纬度关系密切，故以经纬度为参照进行分析。为进一步探讨云南省地形隆起与切割状况，选取不同纬度（北纬 24°和北

纬26°)及经度(东经100°和东经103°)的剖面特征图来表征不同维度的地形隆起与切割状况。

### 3.4.1 纬度分析

1)北纬24°处东西部地形起伏差异明显,横穿帮马山—无量山—哀牢山—南盘江,山体隆起高度为1 205 m,切割深度为-625 m(图7a)。隆起最明显区域在帮马山附近,切割最深处位于横贯南北的哀牢山与北纬24°的交界处。在东经100°~102°之间途经无量山及哀牢山两座高大山体且途经横断山脉的延伸部分山高谷深,地形隆起高度与切割深度变化最为剧烈;东部穿过区域即云贵高原上滇东地区由残留高原面及一些低矮破碎山体组成,地形起伏变化较为和缓。2)北纬26°处自西向东横穿高黎贡山南段—雪盘山—怒江—澜沧江—点苍山—拱王山—普渡河—乌蒙山,地形隆起高度与切割深度介于831~-826 m之间,其中点苍山隆起程度最明显,而南盘江及澜沧江表现出向下切割最深状况,地形起伏较北纬24°横穿地区更小(图7b)。在东经101°~103°之间地形隆起与切割程度小,主要由于该区域地处滇东高原古夷平面上,多为坝子及起伏和缓的低矮山地。由此可见,在纬向(北纬24°~26°)上,云南省北部地形隆起高度与切割深度变化相对剧烈,中部略为和缓,西部地区属横断山脉南段多高山及江河发育从而隆起与切割较为明显,整体上呈现出由西向东地形隆起与切割程度逐渐下降的趋势。

### 3.4.2 经度分析

1)东经100°自南向北纵贯澜沧江—金沙江—点苍山—玉龙雪山—横断山边缘地带。由于西部地势被大幅抬升,加之澜沧江、怒江等河流强烈的侵蚀切割,地貌高差大,全云南省地势北高南低,呈现出以山脉为骨架由西北向四周延伸形态(图7c)。地形最大隆起高度为820 m,位于点苍山;切割深度最大绝对值为713 m,位于由盆地及河谷断裂塌陷而成的金沙江河谷内,它的南部由低山、河谷及盆地组成。2)东经103°纵贯滇东高原地形平坦的坝子区域,途经哀牢山南缘—南盘江—普渡河—拱王山等地区,地形起伏较为和缓,从而导致地形隆起与切割频率低,地形隆起高度与切割深度为-860~1 169 m(图7d)。地形隆起高度最为明显区域为拱王山主峰雪峰处;于普渡河附近地形切割最深,两岸陡峭多深切峡谷。东经103°的地形由北向南呈阶梯状下降且与纬线降低方向具有高度一致性;在北纬23.5°~26°范围内山体低矮,间距较大,地形高差小。由此可见,在经向(东经100°~103°)上,云南省地形隆起高度与切割深度变化在东西方向相对剧烈,在中部表现和缓,整体上地形隆起与切割程度从北到南呈减少趋势。在整个云南省境内的南北方向空间分布格局上,地形隆起高与切割深度变化以东经103°为分割点:东经103°以西地区东西部地形隆起高度与切割深度变化和缓,中部地形隆起高度与切割深度变化较为剧烈;东经103°以东则为东西部地形隆起高度与切割深度变化较为剧烈,中部地形隆起高度与切割深度变化和缓。

## 3.5 地形隆起高度与切割深度的应用分析

绝对海拔难以表达真实的地形向上隆起、沟谷向下切割或盆地塌陷状况。而在实际应用中,地形隆起高度与切割深度这种可以度量山体变化特征的指标在如测绘、地质、农林生产、遥感、资源、环境、城市建设、灾害分析等研究领域都有着广泛的应用价值。

### 3.5.1 测绘方面

地形测绘工作中一般需要采集水文、地形、岩石圈、生物圈等多方面的数据信息。就地形而言,它的隆起与切割程度影响着测绘工作的开展,对测绘设备信号也造成较为严重干扰,进而影响研究区域内相关地理要素数据的采集。在进行大地域间的测量工作时,因测量范围过大,不仅会导致测量点位选择困难,而且在测量过程中易出现特征点位遗漏或记录错误的现象[20]。利用地形隆起高度与切割深度能测算大区域内地形构造状况及特定区域内该指标的具体数值。基于该变量结合GIS软件进行分析、筛选及借助摄影图像或卫星图像的辅助,从而规划合理的测量路线并进行相应点位的选择,由此能够防止特征点遗漏,从而提高测量工作效率。

### 3.5.2 灾害分析方面

在地质灾害特征研究中,地形地貌特征是重要的孕灾环境变量,地形起伏变化越复杂的区域越容易发生灾害,且灾害的危害程度越大。章豪等人[21]基于坡度构建滑坡面模型,为地质灾害防治提供了依据。而在实际应用中,地形隆起高度与切割深度能够将坡度相近但存在深切沟谷的流域与平缓地表分离开来。因此,利用该指标进行建模更能客观反映出不同倾斜面的特征,使分析结果更加科学。例如由于森林所在沟谷切割较深,再加上当地地形破碎,从而影响到风力和风向的改变,因此易导致特殊火行为发生并最终造成森林火灾。有鉴于此,可在有关森林火灾的研究中增加地形隆起高度与切割深度这一指标,从而提供更加客观的分析数据。又如在有

害生物测报研究中，由于地形地貌变化特征与地球表面的风场、大气环流有关，同时也与寄主分布、生物生长发育或直接与有害生物有关，因此它们对有害生物的测报预警产生了影响，而地形隆起高度与切割深度则无疑有助于相关研究工作的开展。

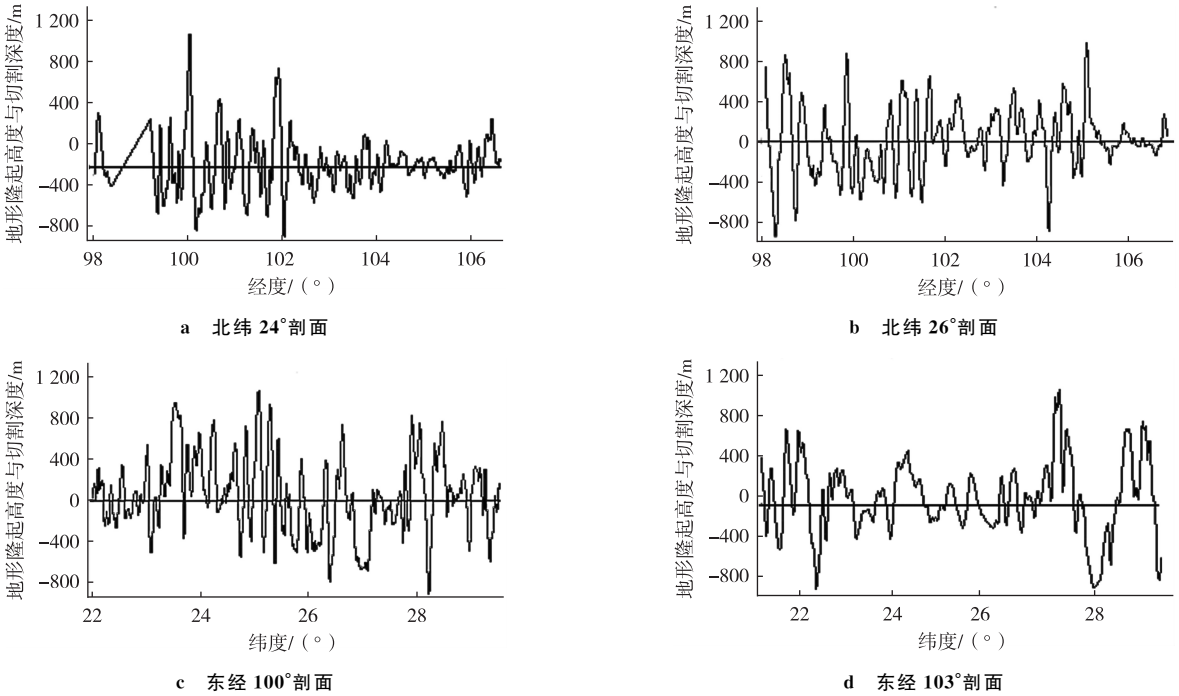



**图 7　云南省地形隆起高度与切割深度的经纬向分布规律**

**Fig. 7　The latitudinal and longitudinal distribution features of topographic uplift height and cutting depth in Yunan province**

### 3.5.3　遥感方面

地形的隆起与切割程度不同会造成投影误差，使不同坡向存在辐射误差，进而影响遥感图像的预处理。其次，遥感数据的几何精度因地面特征变化而变化，地形平缓、隆起与切割高差相对较小的地区遥感影像几何精度也会相应提高。周桃勇等人[22]为了能更加直观地分析地形对地表温度空间分布的影响，将地表温度分布图与 DEM 数据叠加来分析地表温度的变化状况。但 DEM 数据只包含高程信息，不能反映处于不同地形区的隆起与凹陷坡向的太阳辐射影响。因此采用地形隆起高度与切割深度这一能反映地形隆起与沟谷切割状况的指标，将使有关研究更具有实践意义。

### 3.5.4　城市建设方面

地形既是城市发展的载体也是制约因素。一般地貌高差变化小的地区，地形也较为平坦，且人口密集、经济活动频繁，从而加速了城市的发展。地形隆起高度与切割深度对关于交通布局、城市规划布局、景观格局空间布局等方面的研究都具有重要意义，例如在进行海绵城市建设[23]时就可充分利用该指标对降水的渗透、径流方式及特点进行量化的综合分析，从而为城市规划建设提供更为客观的建议。

### 3.5.5　农林生产方面

地形隆起与切割相对高差的大小、坡度等都影响农林业土地质量、数量与耕作条件，进而制约人均耕地面积的比例，影响农林业生产类型及生产成本。平坦、起伏和缓地区的面积与耕地类型及分布呈正相关，隆起与切割面积越大越明显地区则与之相反。在进行林地资源与地形因子的空间分布格局研究时，有研究者利用林业资源与坡向进行叠加分析[24]；而在此基础上，还可叠加地形隆起高度与切割深度来分析不同坡位坡向上林业资源的分布格局，这将使分析结果更加全面细致。

### 3.5.6　地学研究方面

地形隆起高度与切割深度变化状况是地学领域研究的重要参数。在进行地貌分类区划研究时，地貌分类体系往往存在分类指标多样、等级较少的情况[25]，较多研究者趋向利用海拔和地势起伏度进行分级。然而中国地貌复杂多样，区域差异明显，仅利用海拔和地势起伏度数据来进行地貌分类不能完全反映地表形态的整体性。

因此,可结合地形隆起高度与切割深度来刻画大地域间的地貌差异,使地貌区划指标体系更加客观且全面。

## 4 讨论与结论

用内接椭圆圆心定义分水岭的中心点坐标,比使用质心等得到的结果更好,因为这样可避免类似月牙形的分心岭,造成中心点定义到分水岭之外。其次,分水岭中部坐标点的位置选取区域内的平均海拔,可能与造山地质过程不尽吻合。如果能明确某个地理区域的隆起和切割比率,那么可使用这个比率对中部的代表海拔进行加权。一般来说,如果这个海拔值的定义使隆起测算加大,则相应的切割深度会减少;反之亦然。最后,由于ArcGIS系统的内插曲面方法很多,各有特点,所以参照基准面内插也可以使用其他方法,但从理论及实验验证上看,克里金插值法的效果最好。

地形隆起高度与切割深度作为地学研究领域的重要参数,度量着特定区域内地势起伏高低变化、表面粗糙程度及地形走向等众多重要的地形信息。构建该地学指标可为测绘、地质、农林生产、城市建设、灾害分析等众多领域研究提供数据支撑。云南省地处中国西南边陲,境内以山地地貌为主,且山高谷深。本研究基于地形隆起高度与切割深度分析了云南省地形特征,并刻画该省地形隆起高度与切割深度的取值及分布机理。这种定量化的表征方式在多山地地貌的研究中具有普遍适应性。基于地形隆起高度与切割深度特征的地理学研究能为揭示多种地理现象提供定量化的数据支持,例如它可为口口相传的“高山出好茶”等提供地形方面的理论解释;这一指标所表征的地理意义值得后续研究。此外,还可以进一步引入人口、社会、经济等发展状况的定量化数据以及生态环境等变量的栅格数据产品等来补充分析云南省地形隆起高度与切割深度对人口、社会、生态、经济的有效表征。

本研究利用分水岭构建了地形趋势面模型,并应用该模型对云南省地形隆起高度与切割深度状况进行空间差异性分析,在此基础上进一步探讨了云南省地形隆起高度与切割深度特征,主要结果如下:

1) 云南省地形隆起高度与切割深度取值主要集中于−500～500 m,由西北部向东南、东部递减,且经度方向上的地形隆起与切割特征较纬度方向上变化剧烈。地形最大隆起高度为1 807 m,位于玉龙雪山;切割深度最大绝对值为1 332 m,地处怒江河谷。

2) 云南省的地形隆起高度与切割深度和平均海拔呈线性变化关系,具体表现为两者均呈倒“U”型变化趋势且成正相关关系。不同等级海拔区地形隆起高度与切割深度不同:低海拔区地形隆起高度与切割深度值为−157～599 m。中海拔区地形隆起与切割深度在东西部地区差异明显:东部地区地形隆起高度多小于252 m,切割深度绝对值多小于439 m;西部地区多复杂地貌单元,地形隆起高度为252～<579 m,切割深度为−439～<−157 m。高海拔区地形隆起高度为579～<1 807 m,切割深度为−1 332～<−439 m。极高海拔区分布较少,地形隆起高度为1 807 m。

总之,本研究对地形隆起高度与切割深度指标的构建弥补了现有地理变量无法刻画山体向上隆起、沟谷向下切割特征的不足之处,更能反映大倾斜面即大地域间的山体构造状况,并为多种地学研究提供数据支撑。

**参考文献:**

[1] 封志明,唐焰,杨艳昭,等.中国地形起伏度及其与人口分布的相关性[J].地理学报,2007,62(10):1073-1082.
FENG Z M, TANG Y, YANG Y Z, et al. The relief degree of land surface in China and its correlation with population distribution[J]. Acta Geographica Sinica,2007,62(10):1073-1082.

[2] 郝庆,封志明,杨艳昭,等.西藏土地资源承载力的现实与未来:基于膳食营养当量分析[J].自然资源学报,2019,34(5):911-920.
HAO Q,FENG Z M,YANG Y Z,et al. Evaluation on land carrying capacity of Tibet based on dietary nutrients:present and prospects[J]. Journal of Natural Resources,2019,34(5):911-920.

[3] 王艳霞,丁琨,周汝良.基于地形、水热指标的陆地生物多样性富集度评估:以云南为例[J].云南大学学报(自然科学版),2017,39(3):481-493.
WANG Y X,DING K,ZHOU R L. Spatial estimation of the terrestrial biodiversity enrichment based on topographical and water-energy indexes:as Yunnan for example[J]. Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition),2017,39(3):481-493.

[4] 吴江,高宇.基于低空高精度数字高程模型(DEM)的风沙草滩特征及稳定性评价[J].中国沙漠,2019,39(6):23-29.

WU J，GAO Y. Feature extraction and stability evaluation of windy sand beach area based on high-resolution DEM with low altitude aerial photography[J]. Journal of Desert Research，2019，39(6)：23-29.

[5] 刘新华，杨勤科，汤国安. 中国地形起伏度的提取及在水土流失定量评价中的应用[J]. 水土保持通报，2001，21(1)：57-59.
LIU X H，YANG Q K，TANG G A. Extraction and application of relief of China based on DEM and GIS method[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2001，21(1)：57-59.

[6] 唐倩，李孝坤，钟博星，等. 基于 GIS 的重庆城口县村落空间分布特征及人居环境适宜性评价研究[J]. 水土保持研究，2019，26(2)：305-311.
TANG Q，LI X K，ZHONG B X，et al. GIS-based research on the evaluation of spatial distribution of villages and human settlements environment suitability in Chengkou County of Chongqing[J]. Research of Soil and Water Conservation，2019，26(2)：305-311.

[7] 张锦明，游雄. 地形起伏度最佳分析区域预测模型[J]. 遥感学报，2013，17(4)：728-741.
ZHANG J M，YOU X. A prediction model of optimum statistical unit of relief[J]. Journal of Remote Sensing，2013，17(4)：728-741.

[8] 王让虎，张树文，蒲罗曼，等. 基于 ASTER GDEM 和均值变点分析的中国东北地形起伏度研究[J]. 干旱区资源与环境，2016，30(6)：49-54.
WANG R H，ZHANG S W，PU L M，et al. Analysis on the relief amplitude in Northeast China based on ASTER GDEM and mean change point method[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment，2016，30(6)：49-54.

[9] 亢孟军. 数字高程模型不规则四边形网建模方法研究[D]. 武汉：武汉大学，2011.
KANG M J. Research on DEM quadrianglated irregular network modeling method[D]. Wuhan：Wuhan University，2011.

[10] 朱阿兴，杨琳，樊乃卿，等. 数字土壤制图研究综述与展望[J]. 地理科学进展，2018，37(1)：66-78.
ZHU A X，YANG L，FAN N Q，et al. The review and outlook of digital soil mapping[J]. Progress in Geography，2018，37(1)：66-78.

[11] 杨艳昭，郭广猛. 基于 GIS 的内蒙古人居环境适宜性评价[J]. 干旱区资源与环境，2012，26(3)：9-16.
YANG Y Z，GUO G M. Natural envrionment suitability for human settlements in Inner Mongolia based on GIS[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment，2012，26(3)：9-16.

[12] 李威，赵卫权，苏维词. 基于 GIS 技术的黔中地区人居环境自然适宜性评价[J]. 长江流域资源与环境，2018，27(5)：1082-1091.
LI W，ZHAO W Q，SU W C. Nature suitability evaluation of human settlement environment based on GIS technique in Central Guizhou Province[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin，2018，27(5)：1082-1091.

[13] 封志明，李文君，李鹏，等. 青藏高原地形起伏度及其地理意义[J]. 地理学报，2020，75(7)：1359-1372.
FENG Z M，LI W J，LI P，et al. Relief degree of land surface and its geographical meanings in the Qinghai-Tibet Plateau，China [J]. Acta Geographica Sinica，2020，75(7)：1359-1372.

[14] 杨梅. 地形起伏度视域下云南山区经济发展的空间效应研究[D]. 昆明：云南师范大学，2021.
YANG M. Research on the spatial effect of the relief degree of land surface on the economic development of Yunnan Mountainous Area [D]. Kunming：Yunnan Normal University，2021.

[15] 李超，李文峰，赵耀，等. 基于 GIS 的云南山区玉米生态适宜性评价方法与应用[J]. 中国农业科学，2019，52(3)：445-454.
LI C，LI W F，ZHAO Y，et al. A method of ecological suitability evaluation and its application for maize planted in mountain farmland based on GIS (case study：Xundian County)[J]. Scivntia Agricultura Sinica，2019，52(3)：445-454.

[16] 杨子生. 云南山区城镇建设用地适宜性评价中的特殊因子分析[J]. 水土保持研究，2015，22(4)：269-275.
YANG Z S. Analysis on the special factors for evaluating mountainous urban construction land suitability in Yunnan Province [J]. Research of Soil and Water Conservation，2015，22(4)：269-275.

[17] 刘育成，赵廷宁. 基于变点分析法提取废弃采石场地形起伏度的方法[J]. 水土保持研究，2016，23(3)：269-273.
LIU Y C，ZHAO T N. Method for extraction of relief amplitude of abandoned quarry based on change point method[J]. Research of Soil and Water Conservaion，2016，23(3)：269-273.

[18] 周汝良，叶江霞，王艳霞. 一种度量地貌高差的栅格化高程曲面的构建方法及系统：CN111127646A[P]. 2020-05-08.
ZHOU R L，YE J X，WANG Y X. A method and system for constructing rasterized elevation surface to measure landform height difference：CN111127646A[P]. 2020-05-08.

[19] 李海涛，邵泽东. 空间插值分析算法综述[J]. 计算机统计应用，2019，28(7)：1-8.
LI H T，SHAO Z D. Review of spatial interpolation analysis algorithm[J]. Computer Systems & Applications，2019，28 (7)：1-8.

[20] 贾王军. 关于测绘工程中特殊地形的测绘技术方案的研究[J]. 信息化建设，2015(11)：362.

JIA W J. Research on surveying and mapping technical scheme of special terrain in surveying and mapping engineering[J]. Information Construction,2015(11):362.

[21] 章豪,温剑峰,陈温清,等.对陡坡陡崖引发地质灾害的潜在影响范围进行建模分析[J].测绘通报,2021(6):117-121.
ZHANG H,WEN J F,CHEN W Q,et al. Modeling and analyzing the potential impact range of geological disasters caused by the escarpments[J]. Bulletin of Surveying and Mapping,2021(6):117-121.

[22] 周桃勇,王正海,秦昊洋,等.地形效应校正的遥感地热异常提取[J].遥感学报,2020,24(3):265-276.
ZHOU T Y,WANG Z H,QIN H Y,et al. Remote sensing extraction of geothermal anomaly based on terrain effect correction [J]. Journal of Remot Sensing,2020,24(3):265-276.

[23] 黄筱,黄仕元,李青青,等.复杂地形小城镇海绵城市建设问题及改善策略[J].水利规划与设计,2019(12):28-30.
HUANG X,HUANG S Y,LI Q Q,et al. Problems and improvement strategies of sponge city construction in small towns with complex terrain[J]. Water Resources Planning and Design,2019(12):28-30.

[24] 李常春,杨家军.嘉陵江中上游林地资源与地形因子时空变化研究:以四川省武胜县为例[J].四川林业科技,2020,41(4):28-37.
LI C C,YANG J J. Temporal and spatial changes of forest land resources and topographical factors in the middle and upper reaches of the Jialing river:a case study in Wusheng County,Sichuan Province[J]. Journal of Sichuan Forestry Science and Technology,2020,41(4):28-37.

[25] 程维明,周成虎,李炳元,等.中国地貌区划理论与分区体系研究[J]地理学报,2019,74(5):839-856.
CHENG W M,ZHOU C H,LI B Y,et al. Geomorphological regionalization theory system and division methodology of China [J]. Acta Geographica Sinica,2019,74(5):839-856.

## Analysis of Topographic Uplift Height and Cutting Depth in Yunnan Province

XIAO Liqiong[1], ZHOU Ruliang[1], LONG Xiaomin[2], TIAN Yuan[1]

(1. School of Geography and Ecotourism, Southwest Forestry University; Kunming 650224;
2. School of Water Resources, Yunnan Agricultural University, Kunming 650500, China)

**Abstract**: [**Purposes**] It is difficult to express the real degree of topographic uplift, gully cutting or basin collapse by absolute elevation, and defining and quantifying the height and depth of topographic uplift and cutting are useful for the portrayal and study of various geological phenomena such as mountainous landforms. [**Methods**] Based on the digital elevation model data and Yunnan Province as the research area, a method is proposed to construct an index for the degree of topographic uplift and cut. The method uses the geographic raster map algebra as the part, divides the mountainous area by small watersheds and selects the average elevation of each watershed as the sample point to construct the average trend surface, and uses this trend surface as the starting point. [**Findings**] 1) Topographic uplift height and depth of cut can well express the uplift and cut changes of large landforms, better characterize mountain features, and reflect the differences of mountain structure between large regions. 2) The values of topographic uplift height and depth of cutting in Yunnan Province are mainly concentrated in the range of −500 to 500 m, and its spatial distribution characteristics are similar to that of the average elevation changing pattern with inverted "U" type distribution. 3) The uplift height and cutting depth of low altitude terrain in Yunnan Province are −157～599 m. In the middle elevation area, the eastern uplift height is mostly less than 252 m and the absolute value of the cutting depth is mostly less than 439 m, while the western topographic uplift height is 252～<579 m and the cutting depth is −439～<−157 m; The elevation of topographic uplift in high altitude area is 579～<1 807 m and the cutting depth is −1 332～<−439 m. The elevation of topographic uplift in extremely high-altitude area is 1 807 m. 4) The topographic uplift height and cutting depth of Yunnan Province are analyzed by latitude and longitude profiles. In the latitudinal direction, the overall trend is gradually decreasing from west to east. From north to south, the cutting of topographic uplift is decreasing. [**Conclusions**] The construction of the topographic uplift and cutting depth index compensates for the shortcomings of the existing geological indexes that cannot characterize the upward uplift of mountains and the downward cutting of valleys, which can better reflect the mountain tectonic conditions of large inclined surfaces, for example, large inter-regional areas, and provide data support for various geological studies.

**Keywords**: uplift and cutting; terrain trend surface; application research; profile characteristics; Yunnan Province

(责任编辑 方 兴)