

引用格式:曾超. 基于典型地形指标和地貌实体单元的四川省地貌形态自动分类及分区[J]. 山地学报, 2021, 39(4): 587-599.

ZENG Chao. Classification and regionalization of geomorphological types based on typical terrain indicators and landform unit for Sichuan province, China [J]. Mountain Research, 2021, 39(4): 587-599.

# 基于典型地形指标和地貌实体单元的四川省地貌形态自动分类及分区

曾超<sup>a, b</sup>

(自然资源部 a. 四川基础地理信息中心; b. 应急测绘技术创新中心, 成都 610041)

**摘要:** 如何在保证基本地貌单元完整性的前提下, 实现基于 DEM 的平原、丘陵、山地、高原等多种地貌类型界线的自动、准确划定, 一直是我国数字地貌研究的技术难题。四川省是我国地貌类型相对最全及地势最为复杂的省份之一, 具有地形高差巨大、河流侵蚀切割强烈、山原丘陵广布等特点, 开展四川地貌分类和分区, 对自然资源开发利用和自然灾害防治等具有重要意义。通过构建河流相对侵蚀基准面, 计算了四川省地形起伏度, 提出了基于 DEM 的完整地貌实体单元的提取方法, 采用起伏度、海拔高度和坡度等指标对四川省地貌形态类型进行自动划分和区划。结果表明: 全省地形起伏度地域分布差异巨大, 总体由西北向东南递减, 纬度向的起伏度变化较经度向更为剧烈; 全省平均起伏高度为 560 m, 最大 4615 m, 起伏高度 200~2500 m 的区域面积最大, 约占全省面积的 65%。地貌形态类型可分为 13 类, 以山地为主, 面积达 33.02 万 km<sup>2</sup>, 占全省的 67.93%; 高原次之, 占 12.21%; 丘陵占 11.44%; 平原占 6.09%; 台地面积最小, 仅占 2.33%。本文分类方法和结果更符合传统地貌分类体系和原则, 工作效率较人工勾绘有所提升, 各级地貌区界线的划定更为精确, 结果体现了全省地势和各种地貌类型的空间分布格局。研究成果可为自然资源开发利用和自然灾害防治工作提供基础数据。

**关键词:** 地貌形态分类; 地貌区划; 地形起伏度; 地貌实体单元; 四川省

**中图分类号:** P931

**文献标志码:** A

地貌分类和分区是采用相关的指标和规则(形态、成因、组成和结构、地质年代以及空间相关性等), 将地形划分为概念性的空间单元或实体的过程<sup>[1]</sup>。它对认识和理解地表过程、地球年代、自然资源、自然灾害和景观演变起着至关重要的作用<sup>[2]</sup>。

最初, 地貌学家通过野外调查, 结合遥感数据、地形图、地质图等地图产品, 获取量化地貌信息, 并基于一定的分类体系和原则, 完成区域地貌分类和制图<sup>[3]</sup>, 例如: 1:250 万欧洲国际地貌图<sup>[4]</sup>、1:400 万中国地貌图<sup>[5-6]</sup>、1:300 万四川省地貌图<sup>[7]</sup>。这

些早期的地貌制图多依赖丰富的专家知识, 可利用的地理空间数据和数字分析手段有限, 对地貌单元界线精确划定存在一定的主观性和局限性, 且因工作量而影响大范围分类和区划效率<sup>[8]</sup>。随着高精度 DEM 和高分辨率遥感影像数据的极大丰富, 计算机地图制图及 GIS 空间分析技术普及和应用, 推动数字地貌自动化分类和制图快速发展<sup>[9]</sup>。技术的发展也促使我国数字地貌分类和区划的理论体系和方法更加成熟<sup>[10-12]</sup>。2009 年, 我国 1:100 万地貌图集编制完成<sup>[13]</sup>, 在此基础上通过实施第一次全国地理国情普查, 实现了全国 1:25 万地貌类型数据

收稿日期(Received date): 2020-12-14; 改回日期(Accepted date): 2021-05-26

基金项目(Foundation item): 国家对地观测科学数据中心开放基金项目(NODAOP2020020)。[National Earth Observation Science Data Center Open Fund Project(NODAOP2020020)]

作者简介(Biography): 曾超(1986-), 男, 重庆云阳人, 博士, 高级工程师, 主要研究方向: 山地灾害遥感与风险评估、自然资源调查监测。

[ZENG Chao (1986-), male, born in Yunyang, Chongqing province, Ph. D., senior engineer, research on remote sensing and risk assessment of mountain hazard, natural resources survey and monitoring] E-mail: zeng3chao@163.com

的大规模生产<sup>[14]</sup>,开展了青藏高原及其邻近地区地貌类型划分<sup>[15]</sup>。然而,从地貌分类理论和概念具体形式化(例如起伏度、海拔高度、坡度和坡向等量化),到数字化表达,再利用空间分析技术手段实现的过程中,由于学者在主观理解和技术操作方面的差异,往往导致分类结果具有差别较大<sup>[1]</sup>。这类差异突出表现两个方面:(1)地貌单元的完整性<sup>[16]</sup>。学者在基于规则格网(栅格)的地貌自动分类方面进行了深入研究<sup>[17-20]</sup>,但划分的山体、丘陵界线往往不能较好地保持地貌单元的完整性<sup>[21]</sup>。(2)地形起伏度的计算。目前多采用局部地势代替,即一定面积(格网数量)或统计单元内的高差,统计单元的面积阈值常由均值变点法确定<sup>[22-23]</sup>,但该方法针对不同分辨率 DEM 数据源和不同比例尺制图要求都会导致阈值差异较大,且在地貌类型复杂的西南地区,这种基于邻域窗口统计值代表中心网格值的计算方法,较难反映不同类型地貌单元起伏高度的整体差异,也难以准确划分不同地貌类型的过渡界线。

四川省是我国地貌类型相对最丰富和地势最复杂的省份之一,地势高差巨大,地貌类型区域差异明显。如何在保证基本地貌单元完整性的前提下,实现基于 DEM 的平原、丘陵、山地、高原等多种地貌类型界线的自动、准确划定,一直是我国数字地貌研究的技术难题。良好的解决方案对全国范围开展大比例尺地貌分类具有一定借鉴意义。本研究通过构建基于水系汇流节点的相对侵蚀基准面,计算地形起伏度,提出基于 DEM 的完整地貌实体单元提取方法,并参考前人的地貌分类和分区体系,对四川省地貌形态类型进行自动划分和区划,研究成果可为自然资源开发利用和自然灾害防治工作提供基础数据。

## 1 研究区概况

四川省位于我国西南,范围为  $97^{\circ}20'50''\text{E} \sim 108^{\circ}32'33''\text{E}$ ,  $26^{\circ}02'53''\text{N} \sim 34^{\circ}18'54''\text{N}$ ,总面积约 48.6 万  $\text{km}^2$ 。西北依托于青藏高原,南接云贵高原,北跨秦岭山脉,东邻重庆。全省地形起伏大,地势西高东低,西部为青藏高原的一部分,平均海拔约 4000 m;东部为海拔 1500 ~ 3000 m 的山地包围的菱形盆地,即四川盆地。省内海拔低于 500 m 的面积

比例为 16.43%,500 ~ 1000 m 面积占 12.05%,1000 ~ 3500 m 面积占 30.25%,3500 ~ 5000 m 面积占 40.78%,超过 5000 m 的占 0.49%(图 1)。省内最高峰为贡嘎山,海拔 7556 m,最低处位于广安邻水县文武村的御临河出省处,海拔仅 188 m,地表高差巨大。河流纵横、侵蚀切割强烈,大渡河、雅砻江、金沙江及其支流在川西高原面下切,形成深邃的高山峡谷,盆地边缘切割形成中山低山带,盆地内部受河流侵蚀形成破碎的丘陵和方山地貌等。构造抬升与流水强烈侵蚀使得全省山地、高原和丘陵广布,而平原面积相对狭小。

## 2 数据资料与方法

本研究采用了以下数据:四川省第一次地理国情普查生产的精细化 DEM 数据,数据生产时间为 2014—2015 年,空间分辨率为 10 m;利用 DEM 数据生成的坡度数据;全省 1:5 万和部分区域 1:1 万比例尺 DLG 数据;四川省 1:300 万比例尺地貌区划图,该图于 20 世纪 80 年代由中国科学院成都地理研究所联合西南师范学院、重庆师范学院共同编制。

本研究首先基于 DEM 及坡度栅格数据,采用 GIS 空间分析方法,提取完整的基本地貌实体多边形单元;以基本地貌单元为基础,采用海拔高程和地形起伏度等指标,开展地貌形态类型分类;最后,根据地貌形态区域分区特征,参考前人地貌区划图,完成四川省地貌区划。

### 2.1 基本地貌单元提取

地貌单元是地貌形态类型的基本空间单元。借鉴陈加兵等<sup>[21]</sup>对基本地貌单元的定义和提取方法,将四川省基本地貌单元抽象为平缓面、锥形面和单斜面三类图斑(图 2),并采用美国 ESRI 公司开发的 ArcGIS 软件完成基本地貌单元的提取。

(1)平缓面:面积  $\geq 0.1 \text{ km}^2$  (最小制图单元<sup>[24]</sup>)且坡度  $\leq 2^{\circ}$  的地面,及其相邻的坡度  $\leq 5^{\circ}$ <sup>[25]</sup> 的连续区域。从全省 1:5 万和部分区域 1:1 万比例尺 DLG 数据中,抽取的河流、湖泊和水库等面状水域,包含水域面、平原、平坦高原及台地的面,不包括山丘地。

(2)锥形面:由一个或多个山峰点(高地点)且为一条封闭的汇水线包围的一个区域,包含丘陵和山地范围面。提取步骤为<sup>[26]</sup>:①地形倒置,山体变

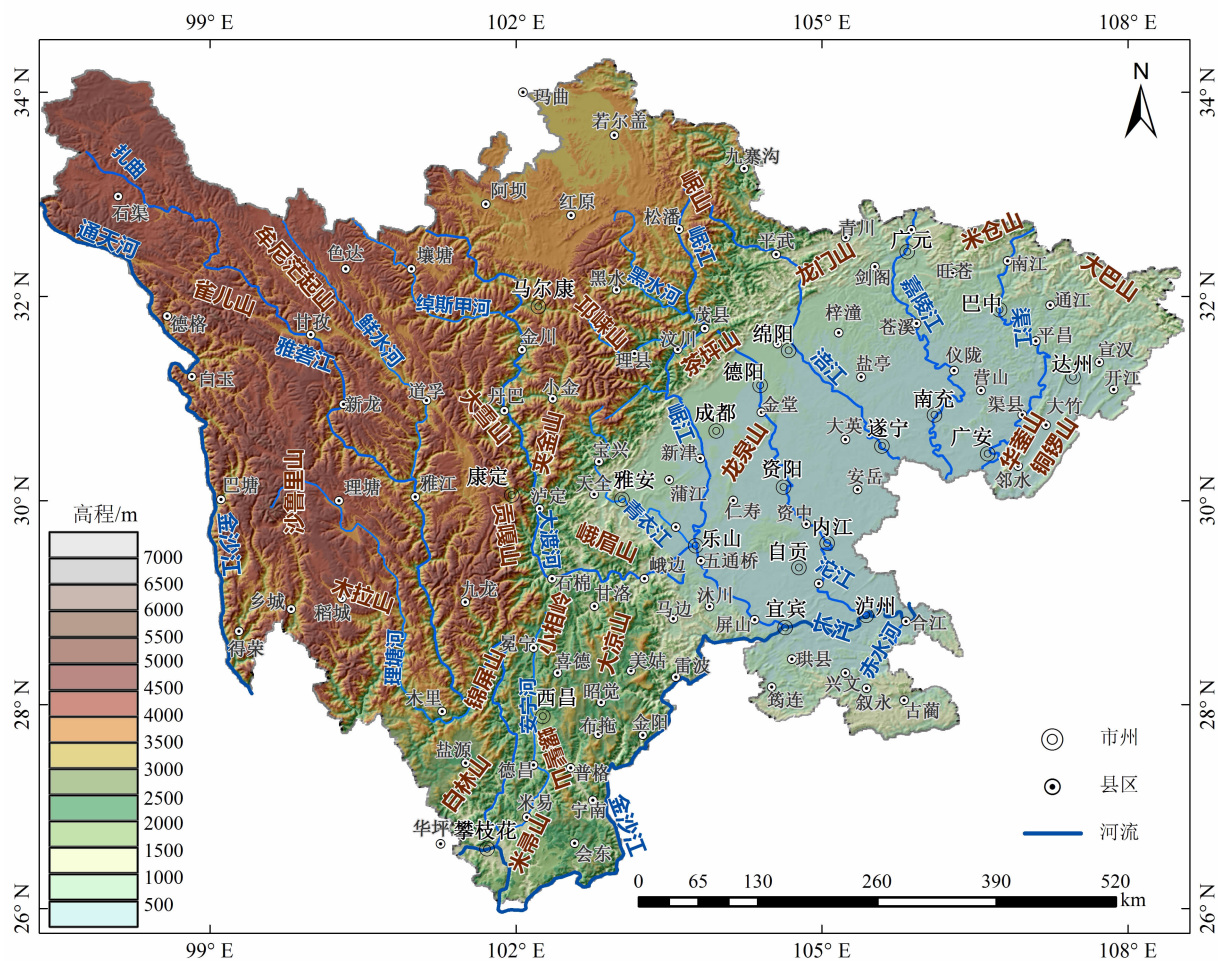


图 1 四川省的地势图

Fig. 1 Topography map of Sichuan province, China

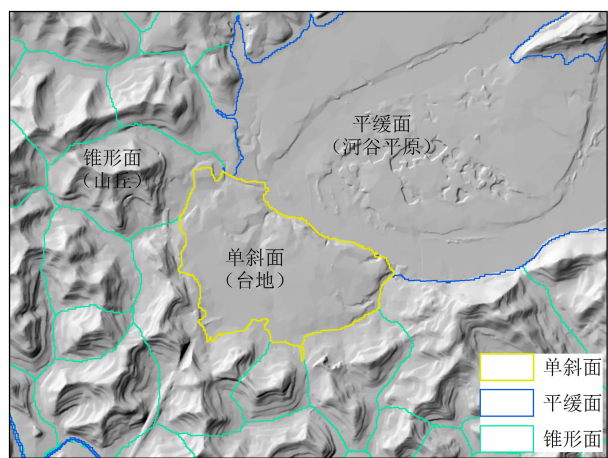


图 2 基本地貌单元提取结果

Fig. 2 Basic geomorphic unit extraction results

“漏斗”。将水域和平缓面以外区域的 DEM 数据做差值运算或者乘以 -1,原山峰变成锥形“漏斗”的最低点,山坡间的汇水线则变成锥形“漏斗”的边交

界线。②基于山丘划分规则的流域水文分析。从每一个最低点出发,利用 ArcGIS 水文分析模块,按划分流域的方法,依次通过填洼、流向分析、汇流分析和流域识别等流程,提取“漏斗”的边缘交界线,即为山丘地锥形面(面积 $\geq 0.1\text{ km}^2$ )。由于四川省西部山区和东部丘陵区相对高度具有明显差异,对两个区域分别按照 100 m 和 20 m 进行填洼处理,即相对高度小于 100 m 的山地及小于 20 m 的丘陵将被合并到相邻更大的山丘地。

(3)单斜面:不属于上述两类,而位于上述三类划出的区域之间的面,包括山峰点位于边界线上的区域,即除水域面、平缓面和锥形面以外的区域。包含台地的台坡、被省界切割的山体等。

## 2.2 地形起伏度的计算

地形起伏度(起伏高度)指一定统计单元内最高和最低点的高差,它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<sup>[11]</sup>。起伏高度是指自山脊沿顺坡向到最近的汇流面积大于 500 km<sup>2</sup> 的河流或到最近宽度大于 5 km 的平原的交点之间的高差,起伏高度的零点是较小范围内高出地貌发育的临时(地方)基准<sup>[27-28]</sup>。因此,本研究引入了相对侵蚀基准面作为计算起伏高度的临时基准,即河流等级六级以上(1~6 级)的水系汇流节点所在高程,经过插值后构成的虚拟地形面。将原始高程 DEM 与相对侵蚀基准面的差值,即为地形起伏度。

2.3 地貌形态分类方法

地貌形态分类即采用一定的分类指标和原则,对基本地貌单元进行合并、分割等操作。本研究参考了穆桂春等<sup>[29]</sup>提出的四川省 1:100 万比例尺地貌图的地貌类型划分指标和原则,将四川省地貌类型划分 13 类:平原、台地、丘陵(缓丘、低丘、中丘和高丘)、山地(低山、中山、亚高山、高山和极高山)、高原(丘状高原和高山原),见表 1。地貌分类具体技术流程主要如下:

(1)平原/平地、台地的划分:将平缓面与起伏高度≤20 m 的区域叠加,两者相交的区域即平原/平地;平缓面中除平原/平地外的其余区域(台面),及其相邻的海拔比它低的单斜面(台坡)合并,即为台地。

(2)山地、丘陵和高原的划分:基于 DEM 和地形起伏度数据,利用 ArcGIS 软件 Zonal statistics 功能分别统计锥形面、单斜面的海拔高度和起伏高度的最大值,按照表 1 的划分原则,划分丘陵、山地和高原的二级地貌类型。

(3)生成数字地貌图:将完成划分的各类型地貌单元合并到同一图层,生成四川省以完整地貌实体为单元的数字地貌形态类型图。

3 结果与讨论

3.1 四川省地貌形态分类

3.3.1 地形起伏度特征

四川省地形起伏高度总体由西北向东南部递减,且在西部高山高原区向东部盆地的过渡地带呈现剧烈减少的起伏特征(图 3)。全省平均起伏高度为 560 m,标准偏差为 538 m,最大值为 4615 m,位于贡嘎山主峰。起伏高度为 200~2500 m 之间的区域多集中分布于西部和南部的山区,约占全省总面积的 65%;小于 20 m 的平地区域主要分布在川西平原、若尔盖高原、石渠色达高原、沙鲁里高原,以及西昌盐源宽谷盆地等山间平坦谷地,面积约占

表 1 四川省地貌形态类型及划分指标

Tab.1 Geomorphological types and classification indexes in Sichuan province

地貌形态分类			划分指标		基本地貌单元		
一级	二级	编号	海拔高度/m	起伏高度/m	平缓地	锥形面	单斜面
平原		10		<20	是	否	否
台地		20		≥20	是(台面)	否	是(台坡)
丘陵	缓丘	31		≤20	否	是	否
	低丘	32		20~50	否	是	否
	中丘	33		50~100	否	是	否
	高丘	34		100~200	否	是	否
山地	低山	41	≤1000	200~1000	否	是	否
	中山	42	1000~3500	200~3500	否	是	否
	亚高山	43	3500~5000	1000~2500	否	是	否
	高山	44	3500~5000	2500~5000	否	是	否
	极高山	45	>5000	>1000	否	是	否
高原	丘状高原	51	>3500	200~500	否	是	否
	高山原	52	>3500	500~1000	否	是	否

注:表中空白值表示不受该指标限制;基本地貌单元列表示该地貌类型是否属于平缓地、锥形面、单斜面,例如,平原仅属于平缓地,而不属于锥形面和单斜面。



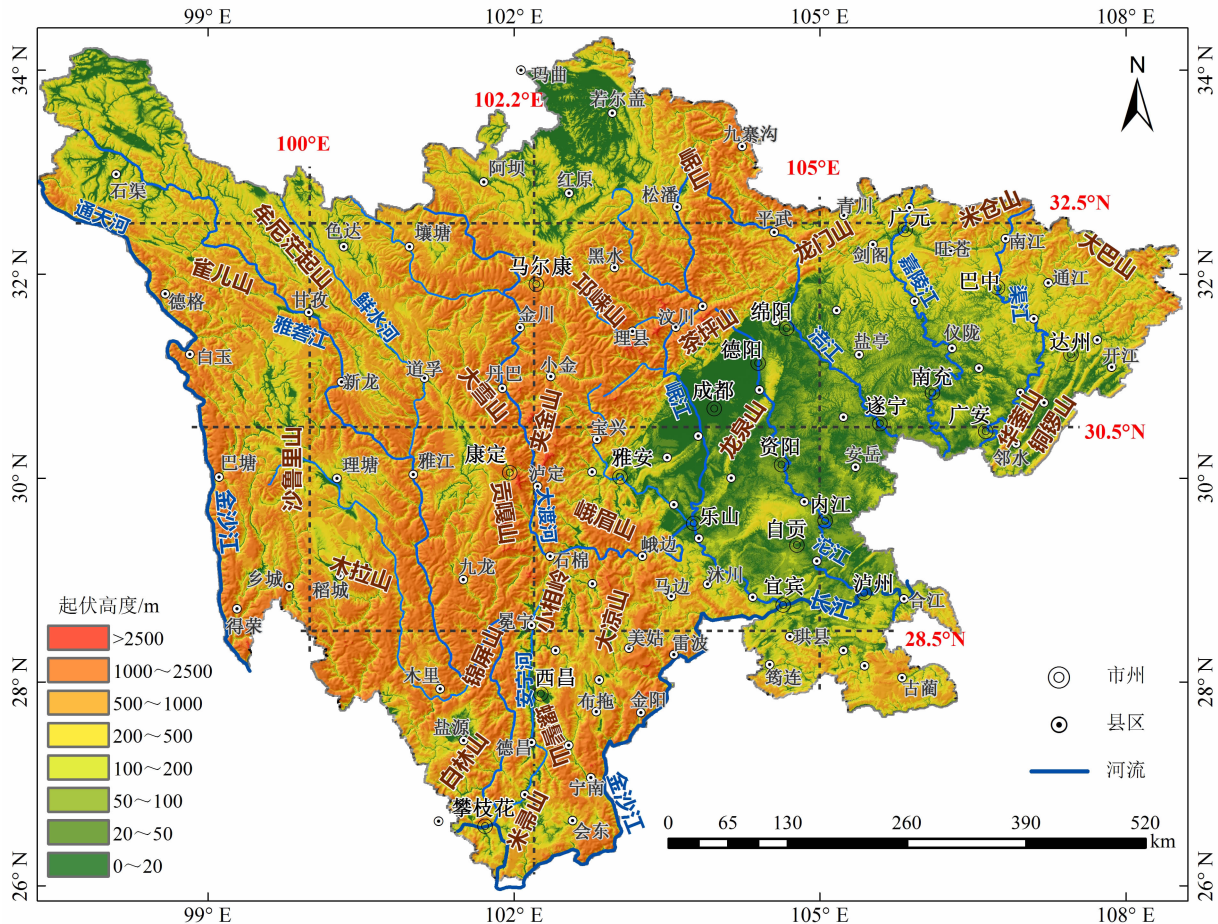


图3 四川省地形起伏高度分布

Fig. 3 Topographic relief of Sichuan province, China

10% ;20 ~200 m 的中低起伏区域,广泛分布在四川盆地中东部丘陵区,以及上述平地的周边区域,约占24% ;大于2500 m 的面积占比不到1% ,仅零星分布于邛崃山、大雪山等极高山地区。

选取不同纬度(28.5°N、30.5°N 和 32.5°N)与经度(100°E、102.2°E 和 105°E)(图3),进一步讨论四川省地形起伏度纬向与经向剖面特征。

#### (1) 纬向地形起伏度剖面特征

28.5°N 自西向东先后穿越木拉山(稻城以南)—水洛河—理塘河—雅砻江—安宁河—小相岭—美姑河—大凉山—金沙江,地形起伏度为0 ~2377 m(平均为754 m),东西向地形起伏变化剧烈,大凉山以西的系列深切河谷的两侧山脉起伏高度多超过2000 m,金沙江以东则进入四川盆地南部低山和丘陵区,起伏高度均在1000 m 以下(图4a)。

30.5°N 从西到东主要横跨金沙江—沙鲁里山—雅砻江—工卡拉山—鲜水河—大雪山(折多

山)—大渡河—夹金山—龙门山—成都平原—龙泉山—川中丘陵区—川东平行岭谷,横穿了省内大部分地貌类型,地表起伏度为0 ~2600 m(平均为500 m),山脉、高原、平原、丘陵阶梯式错落变化明显。成都平原以西地形起伏十分剧烈,在沙鲁里山、大雪山、折多山、夹金山和龙门山处起伏高度最大,均超过2000 m;成都平原及其东部,除龙泉山和川东平行岭谷外,其他区域起伏高度极小,均小于200 m(图4b)。

32.5°N 则经过石渠色达高原—雅砻江—大渡河—红原—岷江—岷山—涪江—龙门山(北段)—嘉陵江—大巴山区,地形起伏度为0 ~1900 m(平均为500 m)。岷江以西以高原为主,起伏略和缓,均在1000 m 以下;岷江以东岷山和龙门山两段起伏高度相对较大,约1800 m;大巴山起伏高度在1000 m 左右(图4c)。

#### (2) 经向地形起伏度剖面特征

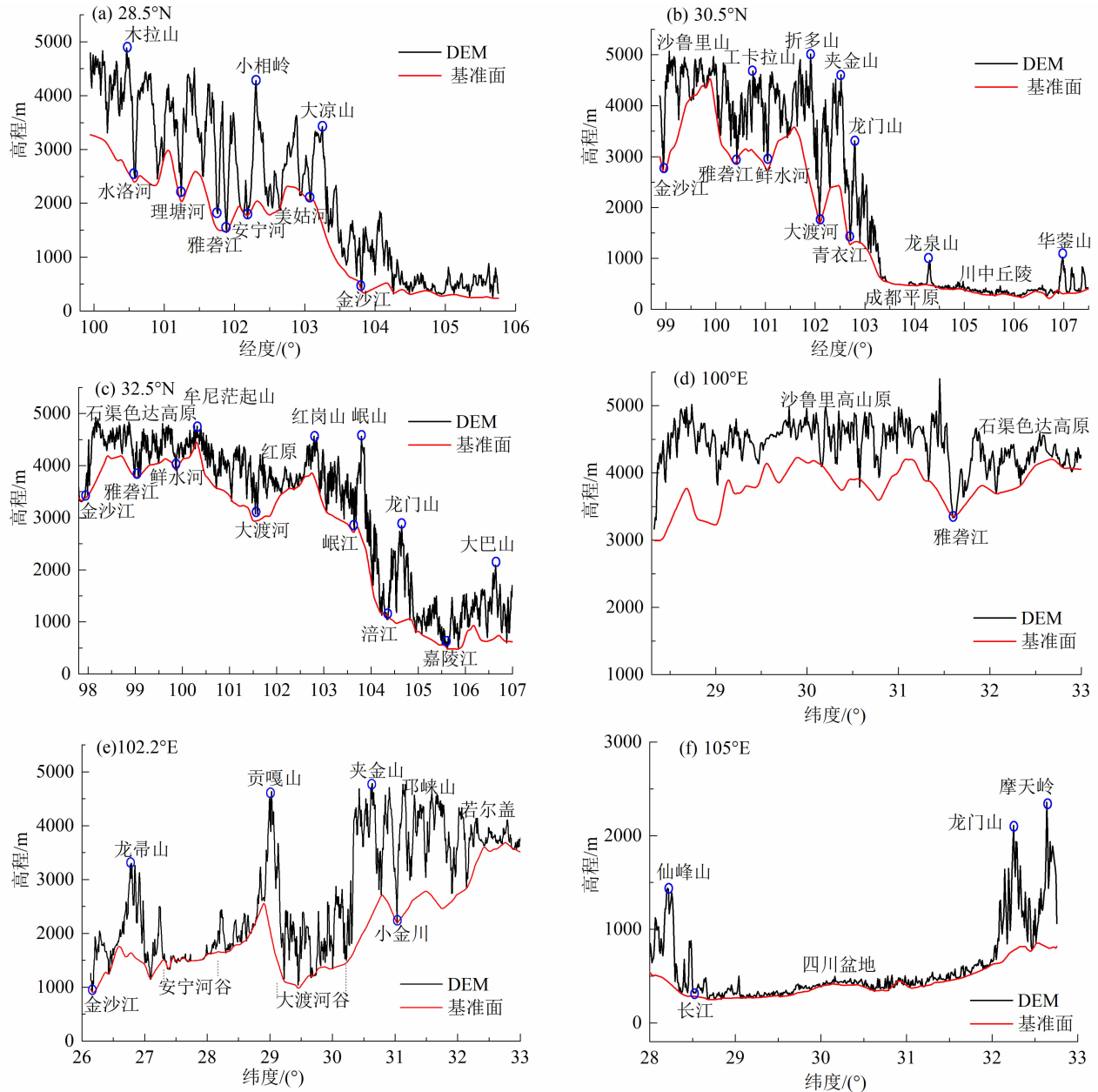


图4 四川省纬度、经度向地形起伏高度剖面分析

Fig. 4 Topographic relief profile of Sichuan province along latitude and longitude direction

经向南北起伏程度较纬度相对和缓。100°E 自南向北穿过沙鲁里山原—雅砻江—石渠色达高原，地形起伏度为 0 ~ 1700 m（平均为 600 m），纵向以高山原和深切峡谷为主，地形起伏变化小，仅在雅砻江右岸（雀儿山西南段）地形起伏较大（图 4d）。

102.2°E 自南向北纵贯金沙江—龙鼎山—西昌（安宁河宽谷）—贡嘎群山—泸定（大渡河河谷）—夹金山—邛崃山脉—若尔盖高原，地形起伏度为 0 ~ 2813 m（平均为 700 m），地形起伏剧烈，山脉、河谷、盆地交替起伏，最大起伏高度位于贡嘎山跌落至大渡河河谷地带，最大为 2813 m，向北经过起伏剧

烈的邛崃山脉高山峡谷区，最终于若尔盖高原趋于平缓（图 4e）。

105°E 纵向穿过乌蒙山北缘—四川盆地—龙门山—摩天岭（米仓山以东），地形起伏度最大为 1500 m（平均为 150 m），南北向地形起伏较小，仅于盆地南缘山地和北缘大巴山区出现较高起伏区域，盆地内部则呈现北高南低趋势，起伏高度普遍小于 100 m（图 4f）。

### 3.1.2 地貌形态分类结果

四川省地貌类型以山地为主，面积达到 33.02 万 km<sup>2</sup>，占全省总面积的 67.93%（表 2），其中亚高



山和中山的面积相对较大,均超过 10 万 km<sup>2</sup>,面积占比分别为 28.87% 和 20.96%,极高山和低山较小,分别占 7.74% 和 7.37%。高原是第二大地貌类型,面积为 5.94 万 km<sup>2</sup>,占全省 12.21%,其中高山高原的面积远超过丘状高原,占 10.17%。丘陵面积为 5.56 万 km<sup>2</sup>,占全省 11.44%,其中以高丘和中丘为主,面积分别占 6.31% 和 4.39%,低丘和缓丘相对很小,均不到 1% 的占比。平原面积为 2.96 万 km<sup>2</sup>,占全省 6.09%。台阶地面积最小,为 1.13 万 km<sup>2</sup>,占全省 2.33%。

3.2 四川省地貌区划

地貌区划是在地貌形态分类基础上,进一步把成因上相关地貌类型加以组合、归并,形成具有独特地貌景观特点的区域地貌单位,区划遵循地貌形态为主、成因次之的区域相似性原则。本研究参考柴宗新等<sup>[7]</sup>提出的四川省地貌区划方案,完成四川省地貌三级区划(图 5)。不同地貌区之间的界线按照

表 2 四川省地貌形态类型面积及占比

Tab.2 Area and proportion of geomorphological types in Sichuan province

地貌形态分类		编号	面积/km <sup>2</sup>	面积占比/%	
一级类	二级类			二级类	一级类
平原		10	29 594.40	6.09	6.09
台(阶)地		20	11 307.10	2.33	2.33
丘陵	缓丘	31	501.63	0.10	11.44
	低丘	32	3128.58	0.64	
	中丘	33	21 325.95	4.39	
	高丘	34	30 679.78	6.31	
山地	低山	41	35 836.96	7.37	67.93
	中山	42	101 908.03	20.96	
	亚高山	43	140 328.62	28.87	
	高山	44	14 522.51	2.99	
	极高山	45	37 622.04	7.74	
高原	丘状高原	51	9939.37	2.04	12.21
	高山原	52	49 420.58	10.17	
全省总计			486 116.29	100.00	100.00

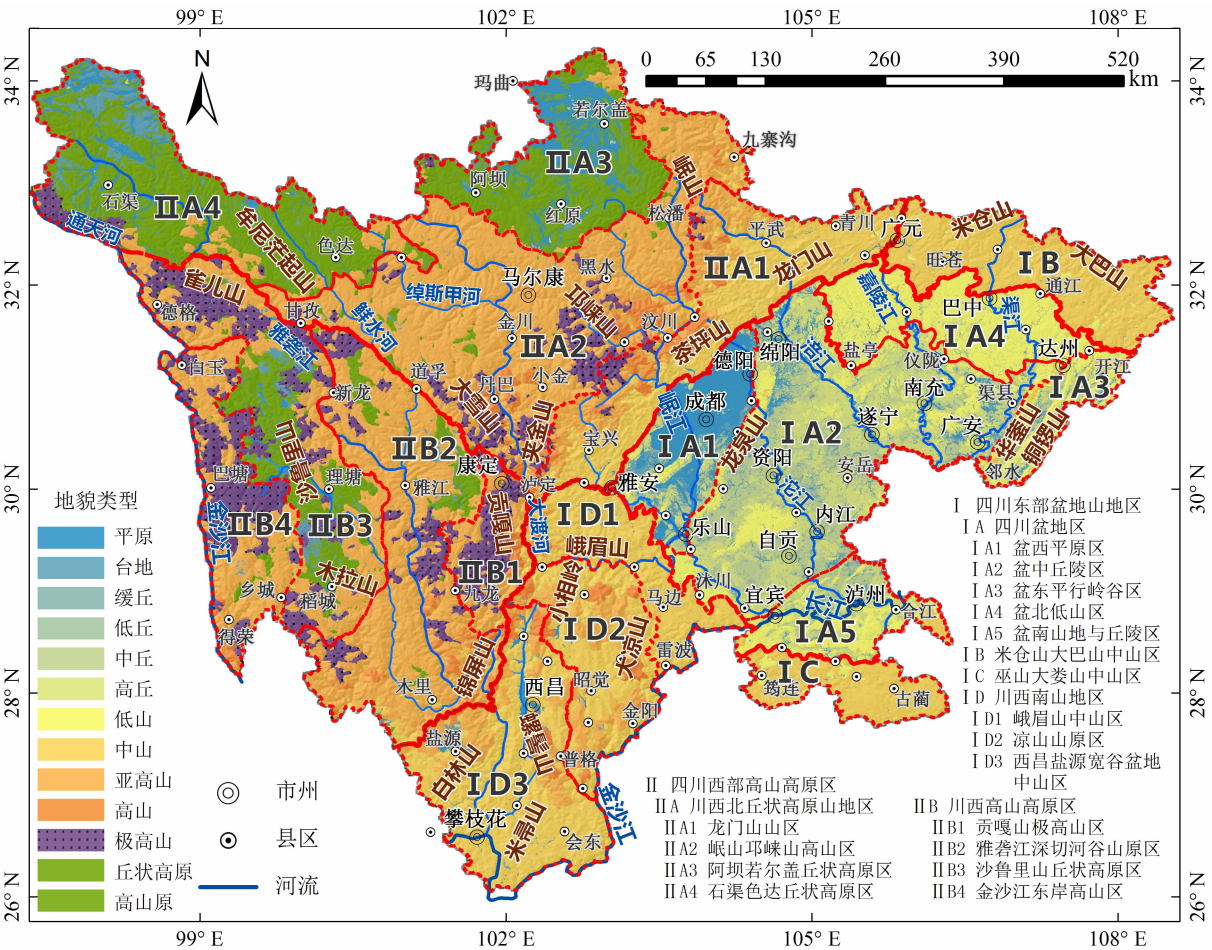


图 5 四川省地貌形态类型及分区

Fig.5 Geomorphological types and regionalization of Sichuan province

地形特征突变界线为划分依据,做精细化处理,即以山地或高原为主的地貌区之间,在成因相似基础上,以河流的分水岭或重要山脉地形特征线作为界线;以平原、丘陵为主的地貌区与山地之间,以山地的山麓为界限。以此,将四川省地貌划分为 2 个一级地貌区,六个二级地貌区和十六个三级地貌区(图 5),地貌区的编码方式参考了相关文献<sup>[30]</sup>。

四川省的地貌区划分主要由区内主导地貌形态类型决定,各级地貌区均体现出了不同地貌类型的空间分布格局。一级地貌区界线大致从广元起,沿龙门山山麓,至雅安折向西到泸定,后南下沿大渡河,经锦屏山东侧,再折向西,绕过木里南,抵达省界

(图 5)。两个地貌区大致将全省平分,四川东部盆地、山地区(I)由丘陵、平原和低山主导,面积约 20.8 万 km<sup>2</sup>,四川西部高山、高原区(II)由山地和高原主导,面积约 27.8 万 km<sup>2</sup>(表 3)。

四川东部盆地、山地区(I)划分为 4 个二级地貌区,以四川盆地区(IA)和川西南山地区(ID)为主体,面积分别约 11.02 万 km<sup>2</sup> 和 6.8 万 km<sup>2</sup>,其次是巫山、大娄山中山区(IC)和米仓山、大巴山中山区(IB)。四川盆地区南接川西南山地区和巫山、大娄山中山区,其界线大致从雅安起,沿青衣江向东,与夹江县转南至峨眉山市、沐川县,过屏山县,折向东经高县、珙县和兴文县至省界;北靠米仓山、大巴山

表 3 四川省地貌分区及其地貌形态类型  
Tab. 3 Geomorphological types and regions of Sichuan province

编码	名称	总面积/km <sup>2</sup>	地貌类型面积占比/%				
			平原	台(阶)地	丘陵	山地	高原
I	四川东部盆地、山地区	207 968.30	7.09	2.05	26.92	63.93	0.00
IA	四川盆地区	110 211.50	12.18	3.36	50.78	33.68	0.00
IA1	盆西平原区	15 639.70	58.73	8.98	25.56	6.74	0.00
IA2	盆中丘陵区	55 992.72	6.08	3.07	74.27	16.58	0.00
IA3	盆东平行岭谷区	7918.323	4.45	2.17	34.30	59.08	0.00
IA4	盆北低山区	18 426.17	1.02	0.72	9.08	89.18	0.00
IA5	盆南山地与丘陵区	12 234.55	2.40	2.21	49.01	46.38	0.00
IB	米仓山、大巴山中山区	20 002.44	0.44	0.15	0.02	99.39	0.00
IC	巫山、大娄山中山区	9700.798	0.55	0.40	0.08	98.97	0.00
ID	川西南山地区	68 053.65	1.74	0.73	0.02	97.50	0.00
ID1	峨眉山中山区	14 981.66	0.50	0.25	0.09	99.16	0.00
ID2	凉山山原区	20 054.91	0.72	0.35	0.00	98.93	0.00
ID3	西昌盐源宽谷盆地中山区	33 017.09	2.92	1.19	0.01	95.88	0.00
II	四川西部高山、高原区	278 147.90	3.83	2.57	0.06	72.01	21.54
IIA	川西北丘状高原、山地区	164 396.20	5.85	2.77	0.09	63.78	27.50
IIA1	龙门山山区	32 892.06	0.61	0.12	0.21	99.06	0.00
IIA2	岷山、邛崃山高山区	67 210.04	0.19	0.22	0.01	97.34	2.24
IIA3	阿坝若尔盖丘状高原区	25 395.95	24.37	3.69	0.17	4.46	67.30
IIA4	石渠、色达丘状高原区	38 898.18	7.98	8.83	0.08	14.70	68.40
IIB	川西高山高原区	113 751.70	0.90	2.27	0.00	83.90	12.92
IIB1	贡嘎山极高山区	10 073.40	0.06	0.07	0.00	99.56	0.32
IIB2	雅鲁江深切河谷山原区	44 609.72	0.34	0.97	0.00	92.02	6.67
IIB3	沙鲁里山丘状高原区	37 853.76	2.22	5.36	0.01	63.34	29.07
IIB4	金沙江东岸高山区	21 214.83	0.13	0.55	0.01	96.07	3.24

注:地貌类型面积占比是指在同一地貌区内不同地貌类型面积占该地貌区面积的比。

中山区,大致以广元剑阁县、巴中市、通江县、宣汉县为界;西邻四川西部高山、高原区;东为四川和重庆省界。四川盆地区划分为5个三级地貌区:盆西平原区(IA1)、盆中丘陵区(IA2)、盆东平行岭谷区(IA3)、盆北低山区(IA4)和盆南山地与丘陵区(IA5)。盆西平原区以平原和丘陵地貌类型为主,分别占58.73%和25.56%,其界线北起绵阳安州区境内涪江支流安昌河与凯江分水岭,东界为龙泉山西麓,西界为龙门山、峨眉山山麓,南止于乐山市五通桥区,面积约1.56万km<sup>2</sup>,区内包括成都平原、夹江平原、洪雅平原和总岗山等地貌单元,其中成都平原在该区的新津县和蒲江县以北,面积约9883km<sup>2</sup>。

四川西部高山、高原区(II)划分为2个二级地貌区,川西北丘状高原、山地区(IIA)和川西高山高原区(IIB),面积分别约16.44万km<sup>2</sup>和11.38万km<sup>2</sup>,其界线北起雀儿山以北金沙江与雅砻江分水岭,向东南至德格县浪多乡,后沿雅砻江至甘孜县,至炉霍县又沿鲜水河继续向东南至道孚县,经郭宗山和大马山以南至泸定县。川西北丘状高原、山地区划分为4个三级地貌区,其中龙门山山区(IIA1)和岷山、邛崃山高山区(IIA2)山地占95%以上,阿坝若尔盖丘状高原区(IIA3)以高原和平原为主,石渠、色达丘状高原区(IIA4)以高原、山地为主。川西高山高原区划分为4个三级地貌区:贡嘎山极高山区(IIIB1)和雅砻江深切河谷山原区(IIIB2)以山地为主,面积超过90%;沙鲁里山丘状高原区(IIIB3)以山地和高原为主,分别占63.34%和29.07%;金沙

江东岸高山区(IIIB4)以山地为主,占96.07%。

### 3.3 讨论

本文以基本地貌单元为分类基础,以地形起伏度取代局部地势,形成的四川省地貌形态类型划分和区划结果,在概念内涵的表达和地貌单元的完整性方面,更接近于传统地貌分类体系和原则,各级地貌区均体现了不同地貌类型的空间分布格局,且自动化提取方法也可提升分类和分区的工作效率。

(1)地貌形态分类实际工作中,需要利用海拔高程、起伏高度等指标的阈值界线划分地貌类型,同时又必须保持地貌实体单元(特别是山体和丘陵)的完整性,这一直是一项技术难题。我国1:100万<sup>[13]</sup>和1:25万<sup>[14]</sup>地貌分类实施过程中,虽然采用人工勾绘和数值地貌分类相结合的方法克服这一难题,但分类成果中仍存在诸多完整的地貌实体单元被分割的现象,且人工勾绘往往因认识上难以达到统一,导致界线划定不够准确。如:图6a中1:100万地貌分类成果,完整的山体被分割为中山、高山、极高山等不同的地貌类型,河谷地区被误分为小起伏中山。本研究首先采用坡度和面积阈值提取平地,利用山丘倒置为盆地的思路及水文分析方法提取山地和丘陵,实现了地貌实体单元界线提取,最后通过统计各单元的高程和起伏高度等指标,完成地貌自动分类,结果更好地保证了山体、丘陵等地貌实体单元的完整性(图2,图6b)。

(2)采用一定面积(格网数量)内高差表示地形起伏度,是目前数字地貌分类研究中较为常用做法,

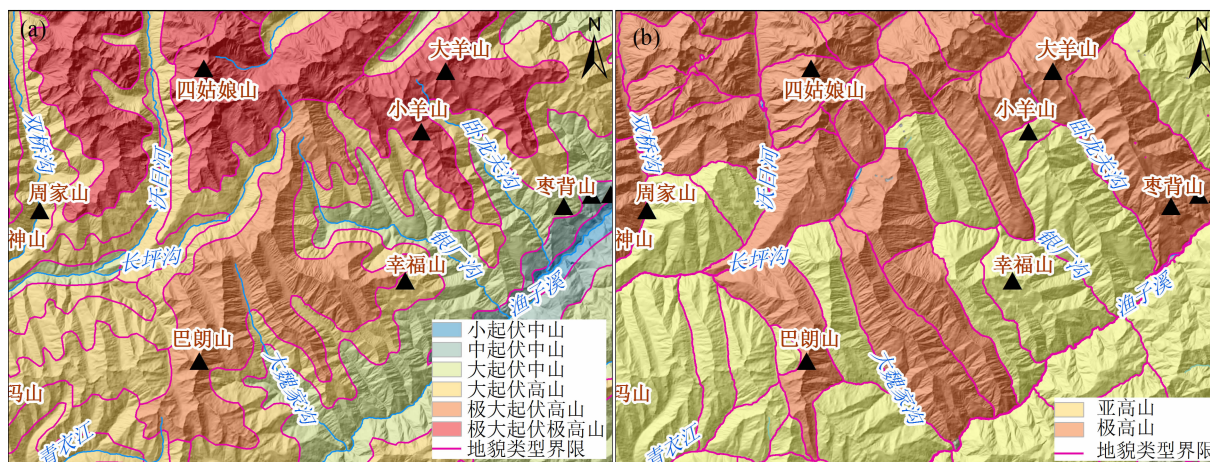


图6 地貌形态分类结果对比图:(a)中国1:100万地貌图分类结果(部分区域);(b)本文地貌形态分类结果

Fig. 6 Comparison of geomorphological classification results: (a) geomorphological classification results in the geomorphologic atlas of China (1:100 000); (b) geomorphological classification results of this paper



其中面积阈值的确定极为关键。已有研究<sup>[11,18-19,22]</sup>采用均值变点法确定了我国不同比例尺、西南地区及四川省的适宜面积阈值,然而阈值差别较大,地形起伏度计算结果存在一定差异(图 7b-d),且这种基于邻域窗口高差代表中心网格起伏高度的方法,可能导致山腰的起伏度高于山顶,山谷起伏度高于山顶和山腰等反常现象(图 7b-d),影响地貌类型界线划分的准确性。本研究利用水系的汇流节点构建了相对侵蚀基准面,以此计算相对该基准面的地形起伏度,概念上相对更为符合地貌成因理论,结果更为准确且不受数据尺度(或 DEM 分辨率)影响,也更符合沟谷、山地实际地形特征(图 7a),起伏高度从山谷到山麓、山腰至山顶呈逐步增大趋势,较好地反映了实际地形变化特征,山地界线也划分得更准确。

(3)20 世纪 80 年代,柴宗新等<sup>[7]</sup>编制了四川省 1:300 万比例尺地貌区划图,但由于当时缺乏高精度的 DEM、DLG 等地形数据及 GIS 技术支撑,区划界线的确定多基于丰富的专家知识勾绘。本文在上述学者地貌分区理论体系基础上,不仅从数据质量提升和分析方法优化方面做了改进,同时利用本文地貌形态分类结果对部分界线做出细化和调整,使分区结果更能反映全省不同地貌类型的空间分布格局。

(4)本研究对基本地貌单元的分类注重宏观尺度,例如完整的锥形山体、平地、台地;在微观尺度上,基本地貌单元还可细分诸多基本地表坡面形态,例如山峰、山脊、坡肩、坡脚、直背坡、凸背坡、凹背坡、坡脚,这些地表形态分类研究工作可为今后开展更大比例尺(如县区级别,中等或小流域尺度)的地貌类型分类和区划提供更好的借鉴。

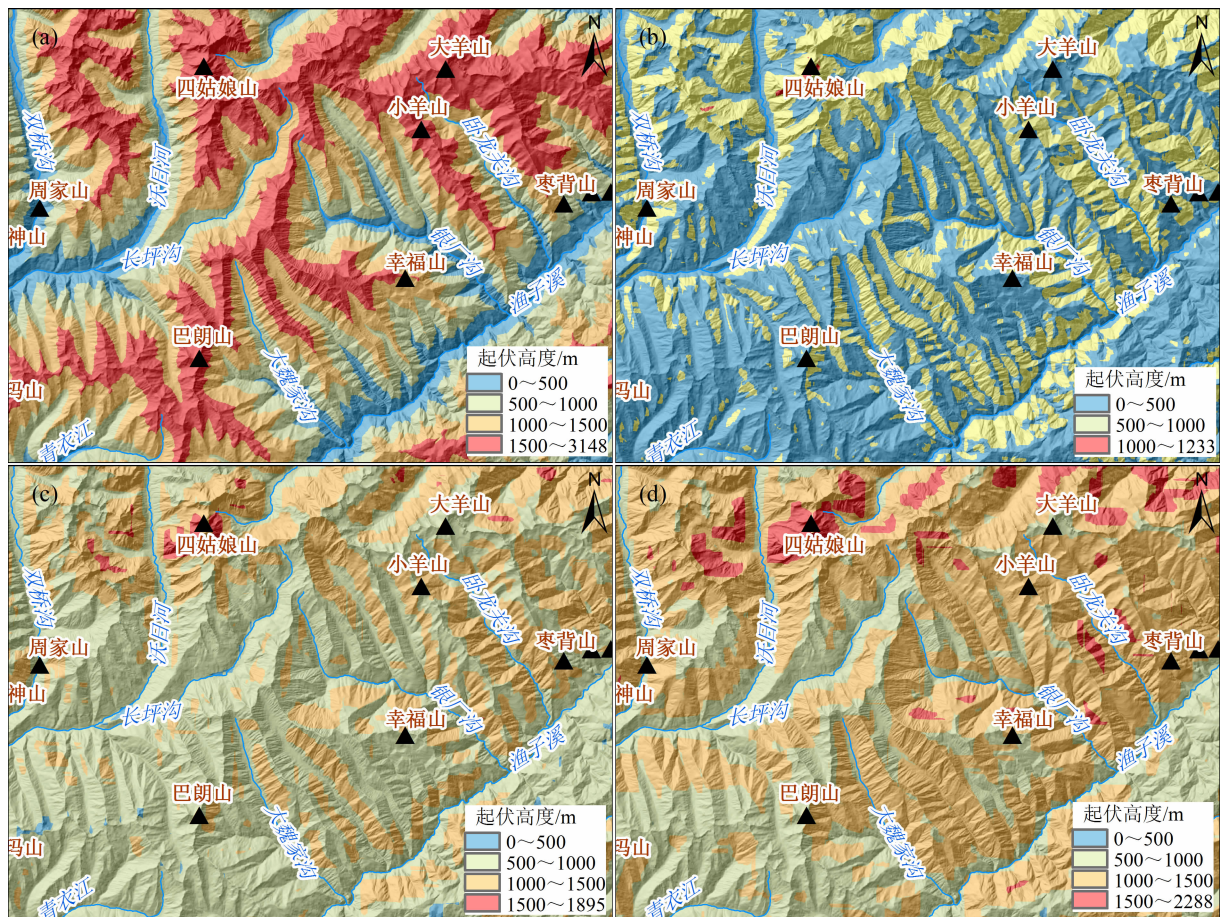


图 7 地形起伏度计算结果对比图:(a)本文计算结果;(b)采用文献[18]方法计算结果(统计单元面积为  $0.4 \text{ km}^2$ );  
(c)采用文献[19]方法计算结果(统计单元面积为  $2.34 \text{ km}^2$ );(d)采用文献[11]和[22]方法计算结果(统计单元面积为  $4 \text{ km}^2$ )

Fig. 7 Comparison of topographic relief calculation results: (a) calculation results of this paper;

(b) calculation results by reference [18] (the area of statistical unit is  $0.4 \text{ km}^2$ ); (c) calculation results by reference [19] (the area of statistical unit is  $2.34 \text{ km}^2$ ); (d) calculation results by references [11] and [22] (the area of statistical unit is  $4 \text{ km}^2$ )

## 4 结论

本文以四川省 10 m 空间分辨率 DEM、1:5 万和 1:1 万比例尺 DLG 数据、水系和流域数据等为基础,采用 GIS 空间分析和流域水文分析等方法,构建基于重要水系汇流节点高程的相对侵蚀基准面,计算了四川省地形起伏度,提取了完整基本地貌单元,以地形起伏度和海拔高程等为指标,开展了地貌形态类型自动划分,并完成地貌区划。主要结论如下:

(1) 四川省地形起伏度地域分布差异巨大,总体由西北向东南递减。全省平均起伏高度为 560 m,最大为 4615 m。起伏高度 200 ~ 2500 m 的区域约占全省面积 65%,集中分布于西部和南部的山地;20 ~ 200 m 的中低起伏区域约占 24%,广泛分布在四川盆地丘陵区;小于 20 m 的平地主要分布在成都平原和川西北高原,面积约占 10%;大于 2500 m 的仅零星分布于邛崃山、大雪山等极高山区。起伏度在纬向的变化较经向变化更为明显,其中 30.5°N 横穿省内大部分地貌类型,山脉、高原、平原、丘陵阶梯式错落变化明显,地表起伏度最为剧烈。

(2) 四川省地貌形态类型可分为 13 类,以山地为主,面积达 33.02 万 km<sup>2</sup>,占全省 67.93%,且高山和中山占比相对较大,面积均超过 10 万 km<sup>2</sup>;高原次之,面积为 5.94 万 km<sup>2</sup>,占 12.21%,且以高山原为主;丘陵面积为 5.56 万 km<sup>2</sup>,占 11.44%,以高丘和中丘为主。平原面积为 2.96 万 km<sup>2</sup>,占 6.09%。台阶地面积最小,占 2.33%。

## 参考文献 (References)

- [1] BISHOP M P, JAMES L A, SHRODER JR J F, et al. Geospatial technologies and digital geomorphological mapping: Concepts, issues and research [J]. *Geomorphology*, 2012 (137): 5 - 26. DOI: 10.1016/j.geomorph.2011.06.027
- [2] BLASZCZYNSKI J S. Landform characterization with geographic information systems [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1997, **63**(2), 183 - 191.
- [3] 沈玉昌, 苏时雨, 尹泽生. 中国地貌分类、区划与制图研究工作的回顾与展望 [J]. *地理科学*, 1982, **2**(2): 97 - 105. [SHEN Yuchang, SU Shiyu, YIN Zesheng. Retrospect and prospect of the research work on the classification, regionalization and mapping of the geomorphology of China [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 1982, **2**(2): 97 - 105] DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.1982.02.97
- [4] 尹泽生. 1:250 万《欧洲国际地貌图》评介 [J]. *地理科学进展*, 1982, **1**(2): 28 - 35. [YIN Zesheng. Review of 1:250 000 000 European international geomorphology map [J]. *Progress in Geography*, 1982, **1**(2): 28 - 35] DOI: 10.11820/dlkxjz.1982.02.006
- [5] 陈志明. 论中国地貌图的研制原则、内容与方法——以 1:4 000 000 全国地貌图为例 [J]. *地理学报*, 1993, **48**(2): 105 - 113. [CHEN Zhiming. On the principle, contents and methods used to compile the Chinese geomorphological maps: Taking the 1:4 000 000 Chinese geomorphological map as an example [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1993, **48**(2): 105 - 113] DOI: 10.11821/xb199302002
- [6] 李炳元, 李钜章. 中国地貌图 (1:400 万) [M]. 北京: 科学出版社, 1994. [LI Bingyuan, LI Juzhang. 1:4000000 geomorphological map of China [M]. Beijing: Science Press, 1994]
- [7] 柴宗新, 穆桂春, 陈升琪, 等. 四川省农业资源与区划 (上篇) [G]. 成都: 四川省社会科学院, 1986: 111 - 163. [CHAI Zongxin, MU Guichun, CHEN Shengqi, et al. sichuan agricultural resources and regionalization part I [G]. Chengdu: Sichuan Academy of Social Sciences, 1986: 111 - 163]
- [8] 王彦文, 秦承志. 地貌形态类型的自动分类方法综述 [J]. *地理与地理信息科学*, 2017, **33**(4): 16 - 21. [WANG Yanwen, QIN Chengzhi. Review of methods for landform automatic classification [J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2017, **33**(4): 16 - 21] DOI: 10.3969/j.issn.1672-0504.2017.04.003
- [9] 汤国安, 那嘉明, 程维明. 我国区域地貌数字地形分析研究进展 [J]. *测绘学报*, 2017, **46**(10): 1570 - 1591. [TANG Guoan, NA Jiaming, CHENG Weiming. Progress of digital terrain analysis on regional geomorphology in China [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, **46**(10): 1570 - 1591] DOI: 10.11947/j. AGCS.2017.20170388
- [10] 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 Chenghu, CHENG Weiming, QIAN Jinkai, 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]
- [11] 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 Weiming, ZHOU Chenghu, CHAI Huixia, et al. Quantitative extraction and analysis of basic morphological types of land geomorphology in China [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2009, **11**(6): 725 - 736]
- [12] 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 Bingyuan, PAN Baotian, CHENG Weiming, et al. Research on geomorphological regionalization of China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2013, **68**(3): 291 - 306] DOI: 10.11821/xb201303001
- [13] 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 (1:100 万) [M]. 北京: 科学出版社, 2009. [The

- Editorial Committee of Geomorphologic Atlas of People's Republic of China. The geomorphologic atlas of People's Republic of China (1:1 000 000) [M]. Beijing: Science Press, 2009]
- [14] 赵荣,程维明,刘纪平,等. 中国陆地高精度地貌类型的划分[J]. 测绘科学, 2019, **44**(6): 248 - 255. [ZHAO Rong, CHENG Weiming, LIU Jiping, et al. Accurate division of geomorphological types in China [J]. Science of Surveying and Mapping, 2019, **44**(6): 248 - 255] DOI: 10.16251/j.cnki.1009-2307.2019.06.037
- [15] 常直杨,孙伟红,王建,等. 青藏高原及其邻近地区地貌类型划分[J]. 山地学报, 2017, **35**(1): 1 - 8. [CHANG Zhiyang, SUN Weihong, WANG Jian, et al. Object-oriented method based on classification of geomorphic type in the Tibet plateau and adjacent regions [J]. Mountain Research, 2017, **35**(1): 1 - 8] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000189
- [16] 岳健,杨发相,穆桂金,等. 关于中国 1:100 万数字地貌制图若干问题的讨论[J]. 干旱区研究, 2009, **26**(4): 591 - 598. [YUE Jian, YANG Faxiang, MU Guijin, et al. Discussion on some issues about the 1:1 000 000 digital geomorphologic mapping in China [J]. Arid Zone Research, 2009, **26**(4): 591 - 598]
- [17] IWAHASHI J, PIKE R J. Automated classifications of topography from DEMs by an unsupervised nested-means algorithm and a three-part geometric signature [J]. Geomorphology, 2007, **86**(3): 409 - 440. DOI: 10.1016/j.geomorph.2006.09.012
- [18] 刘爱利,汤国安. 中国地貌基本形态 DEM 的自动划分研究[J]. 地球信息科学, 2006, **8**(4): 8 - 14. [LIU Aili, TANG Guoan. Dem based auto-classification of Chinese landform [J]. Geo-Information Science, 2006, **8**(4): 8 - 14] DOI: 10.3969/j.issn.1560-8999.2006.04.003
- [19] 郎玲玲,程维明,朱启疆,等. 多尺度 DEM 提取地势起伏度的对比分析—以福建低山丘陵区为例[J]. 地球信息科学, 2007, **9**(6): 1 - 8. [LANG Lingling, CHENG Weiming, ZHU Qijiang, et al. A comparative analysis of the multi-criteria DEM extracted relief: Taking Fujian low mountainous region as an example [J]. Geo-Information Science, 2007, **9**(6): 1 - 8] DOI: 10.3969/j.issn.1560-8999.2007.06.001
- [20] 曹伟超,陶和平,孔博,等. 利用最佳地形特征空间进行地貌形态自动识别—以西南地区为例[J]. 武汉大学学报信息科学版, 2011, **36**(11): 1376 - 1380. [CAO Weichao, TAO Heping, KONG Bo, et al. Topographic automatic recognition based on optimal topography feature space—taking southwest China as an example [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2011, **36**(11): 1376 - 1380]
- [21] 陈加兵,李慧,陈文惠,等. 基于 DEM 与 DLG 的福建省地貌形态自动分类[J]. 地球信息科学学报, 2013, **15**(1): 75 - 80. [CHEN Jiabing, LI Hui, CHEN Wenhui, et al. Auto-classification of geomorphological types based on DLG and DEM for Fujian province [J]. Journal of Geo-Information Science, 2013, **15**(1): 75 - 80] DOI: 10.3724/SP.J.1047.2013.00075
- [22] 程维明,周成虎. 多尺度数字地貌等级分类方法[J]. 地理科学进展, 2014, **33**(1): 23 - 33. [CHENG Weiming, ZHOU Chenghu. Methodology on hierarchical classification of multi-scale digital geomorphology [J]. Progress in Geography, 2014, **33**(1): 23 - 33] DOI: 10.11820/dlkxjz.2014.01.003
- [23] 张伟,李爱农. 基于 DEM 的中国地形起伏度适宜计算尺度研究[J]. 地理与地理信息科学, 2012, **28**(4): 8 - 12. [ZHANG Wei, LI Ainong. Study on the optimal scale for calculating the relief amplitude in China based on DEM [J]. Geography and Geo-Information Science, 2012, **28**(4): 8 - 12]
- [24] GBT 12343.1-2008. 国家基本比例尺地图编绘规范第 1 部分 1:25 000, 1:50 000, 1:100 000 地形图编绘规范[S]. 北京:中华人民共和国质量监督检验检疫总局和中国国家标准化管理委员会, 2008. [GBT 12343.1-2008. Compilation specifications for national fundamental scale maps-part 1: Compilation specifications for 1:25 000, 1:50 000 and 1:100 000 topographic maps [S]. Beijing: General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China and Standardization Administration of the People's Republic of China (SAC), 2008]
- [25] 胡卓玮,李洋,王志恒. 基于 DEM 的四川省低山丘陵区坡度提取不确定性分析[J]. 山地学报, 2012, **30**(5): 636 - 640. [HU Zhuowei, LI Yang, WANG Zhiheng. Uncertainty analysis extracting from the slope of hilly area of Sichuan province based on DEM [J]. Mountain Research, 2012, **30**(5): 636 - 640] DOI: 10.3969/j.issn.1008-2786.2012.05.020
- [26] 肖飞,张百平,凌峰,等. 基于 DEM 的地貌实体单元自动提取方法[J]. 地理研究, 2008, **27**(2): 459 - 466. [XIAO Fei, ZHANG Baiping, LING Feng, et al. DEM based auto-extraction of geomorphic units [J]. Geographical Research, 2008, **27**(2): 459 - 466] DOI: 10.3321/j.issn:1000-0585.2008.02.023
- [27] 李钜章. 中国地貌基本形态划分的探讨[J]. 地理研究, 1987, **6**(2): 32 - 39. [LI Juzhang. Classification of fundamental types of geomorphological form in China [J]. Geographical Research, 1987, **6**(2): 32 - 39] DOI: 10.11821/yj1987020004
- [28] 中国科学院地理研究所. 中国 1:100 万地貌图制图规范[M]. 北京:科学出版社, 1987. [Institute of Geography, Chinese Academy of Sciences. 1:1 000 000 Geomorphological mapping specification [M]. Beijing: Science Press, 1987]
- [29] 穆桂春,刁承泰. 四川省百万分之一地貌图的地貌分类系统[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 1988(3): 93 - 99. [MU Guichun, DIAO Chengtai. The geomorphological classificatory system on the 1:1 000 000 geomorphological map of Sichuan province [J]. Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition), 1988(3): 93 - 99]
- [30] 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 Weiming, ZHOU Chenghu, LI Bingyuan. Geomorphological regionalization theory system and division methodology of China [J]. Acta Geographica Sinica, 2019, **74**(5): 839 - 856] DOI: 10.11821/dlxb201905001

# Classification and Regionalization of Geomorphological Types Based on Typical Terrain Indicators and Landform Unit for Sichuan Province, China

ZENG Chao<sup>a,b</sup>

(Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China a. Sichuan Geomatics Center,

b. Emergency Surveying and Mapping Technology Innovation Center, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** Sichuan is one of the provinces with the most comprehensive geomorphological types and complex topography in China. It has the geomorphological characteristics of large topographic relief, strong river erosion, and widespread mountain and hills. The geomorphological classification and regionalization are of significant for natural resources utilization and disaster prevention in Sichuan. Firstly, in this paper it calculated topographic relief amplitude by a reference surface, called regional erosion datum, which interpolated with elevation point of river confluence node. Secondly, the basic landform elements (such as the single mountain and hill) for geomorphological classification were also been extracted by watershed hydrological model in ArcGIS software base on Digital Elevation Model (DEM). Finally, the landform elements were classified into 13 geomorphological types, by the classification indexes of slope, topographic relief and altitude. The results show that the distribution of topographic relief in the province was quite different. The relief generally decreased from northwest to southeast, and the relief amplitude along latitude direction were more severe than those along longitude direction; the average relief altitude of Sichuan province was 560 m, the largest relief altitude was 4615 m, and about 65% of the province's area relief was 200 ~ 2500 m. The geomorphological morphology was divided into 13 types, such as plain, platform, low hill, high hill, low mountain and plateau, etc. The mainly geomorphological type was mountainous area with 330 200 km<sup>2</sup>, accounting for 67.93% of the province; The second was plateaus, accounting for 12.21%; Hills and plains accounted for 11.44% and 6.09%, respectively; The terrace area was the smallest, only accounting for 2.33%. A three-order (major-region, sub-region, and small-region) geomorphological regionalization was proposed and divided according to previous research. The classification and regionalization results of this paper are more in line with the traditional geomorphological classification system and principles, and with more accurate boundary, and the geomorphological regionalization also reflect the spatial distribution pattern of different geomorphological types in the province.

**Key words:** geomorphological types classification; geomorphological regionalization; topographic relief; landform unit; Sichuan province