

基于DEM数据的云南省地貌自动分类研究

时有浩

云南师范大学地理学部, 云南 昆明

收稿日期: 2026年7月1日; 录用日期: 2026年8月20日; 发布日期: 2026年8月31日

摘要

基于90 m分辨率的SRTM-DEM数据, 以云南省作为研究区, 利用ArcGIS分别对影响研究区地貌类型的地形因子进行分析, 得出研究区内中海拔(高程: 1000~3500 m)区域最广, 占云南省总面积的52.75%, 主要分布在云南省的中部和东部地区。地形起伏度为小起伏山地的地形分布最广, 面积在整个研究区中占58.16%。云南省绝大部分地区的坡度在25°以下, 占了整个研究区面积的80.95%。研究区以浅切割山地为主, 占总面积的42.98%, 深切割山地面积最小, 仅占研究区面积的4.60%, 分布于西北部山区。筛选了云南省地貌分类的最佳地形因子为地形起伏度、海拔高度、坡度、地表切割深度四个地形因子指标, 利用ArcGIS对四个地形因子进行组合, 提取出了研究区25种地貌类型, 结果表明研究区地貌特征总体比较破碎, 其中浅切割小起伏陡中山和浅切割小起伏平缓中山为主要地貌, 占研究区总面积的47.26%。研究成果为进一步对云南省地区的资源开发、土地利用和灾害防治等问题提供了数据参考。

关键词

DEM, 地形因子, 地貌分类, 云南省

A Study on Automatic Geomorphological Classification of Yunnan Province Based on DEM Data

Youhao Shi

Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming Yunnan

Received: July 1, 2026; accepted: August 20, 2026; published: August 31, 2026

Abstract

Based on SRTM-DEM data with 90 m resolution, Yunnan Province was taken as the study area, and

the topographic factors affecting the landform types of the study area were analyzed by ArcGIS. It was concluded that the altitude area (Elevation: 1000~3500 m) in the study area was the widest, accounting for 52.75% of the total area, and was mainly distributed in the central and eastern regions of Yunnan Province. Topographic relief is the most widely distributed small relief mountain, accounting for 58.16% of the whole study area. The slope in most areas of Yunnan Province is below 25°, accounting for 80.95% of the whole study area. The study area is dominated by shallow cut mountain area, accounting for 42.98% of the total area, while deep cut mountain area is the smallest, accounting for only 4.60% of the study area, distributed in the northwestern mountainous area. The best topographic factors for geomorphic classification in Yunnan Province were selected as topographic relief, altitude, slope and surface cutting depth. By combining the four topographic factors with ArcGIS, 25 geomorphic types were extracted in the study area. The results showed that the geomorphic features in the study area were generally fragmented. Among them, the main landforms are the shallow and small relief mountains and the shallow and small relief mountains, which account for 47.26% of the total area of the study area. The research results provide data reference for resource development, land use and disaster prevention and control in Yunnan Province.

Keywords

DEM, Topographic Factors, Geomorphological Classification, Yunnan Province

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

地貌是整个自然地理环境中最基本的组成要素，其直接或间接地影响着自然界中物质和能量的再分配，继而控制着自然地理环境的分异过程。因此，对地貌的研究就显得十分重要[1]。关于地貌类型的分类问题，已有许多学者进行过深入探讨，有传统的野外实地调查与测绘制图法，也有利用 GIS 技术对 DEM 进行数据处理的方法[2]-[7]，后者解决了前者工作量大、效率低，难以满足科研和现代社会要求等问题。但是其本身的研究过程也存在很多问题，如大多数是对单一因子或者一些固定的地貌因子进行分析和划分，或者从单个遥感图像中获得地面形貌特征的研究[8][9]。这些研究过程在对实际的地形进行描述时考虑的地貌因子单一，依靠人的主观意识对地貌的形态特征展开描述，具有片面性和主观性。在对地貌种类进行描述分析时，必须充分把各种地形因子对地貌分类的影响考虑在内。本文结合了高程，坡度，坡向，地形起伏度等 9 个地形因子，结合实际，借助 ArcGIS 获取云南省的地貌类型分布图。

2. 研究区概况

云南省(97°31'~106°11'E, 21°8'~29°15'N)位于我国西南部，是云贵高原区域的主体部分(图 1)，总面积 394,100 km²，占全国国土面积的 4.1%。整体来看，研究区地表高差巨大，海拔在 76~6471 m，最高峰为梅里雪山主峰达到 6471 m，最低点为河口县内的元江与南溪河交汇处。研究区地势大致呈现出东南低，西北高的特点[10]。区内有众多山脉，横断山脉、高黎贡山位于西北地区，东北部主要是乌蒙山区，南部无量山、哀牢山。研究区河流纵横，加之构造抬升与流水强烈侵蚀使得云南省地貌类型多种多样，山地、高原和丘陵广布，而平原面积相对狭小。

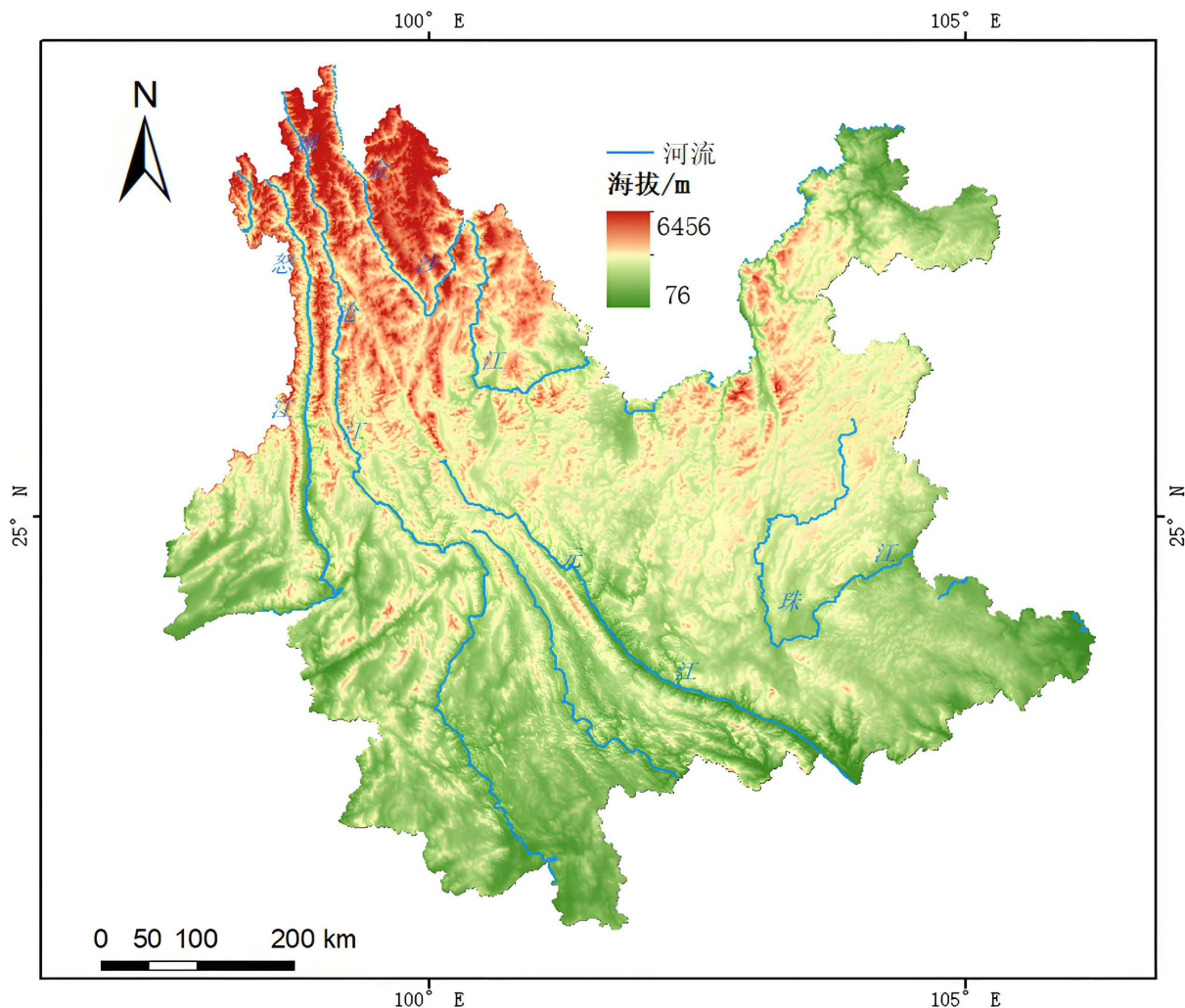


Figure 1. Location map of research area

图 1. 研究区地理位置图

3. 数据来源与处理方法

3.1. 数据来源

本文以 SRTM-DEM (空间分辨率 $90\text{ m} \times 90\text{ m}$) 的原始高程数据为数据基础, 它是由美国太空总署和国家测绘局联合测量, 获取的南北纬 56° 至 60° 之间, 面积约 $1.2 \times 10^9\text{ km}^2$ 的数字地形高程模型[11]。数据下载自(<http://www.gscloud.cn/>)。

3.2. 处理方法

- 1) 基于 SRTM-DEM 数据, 利用 ArcGIS 技术, 对研究区的微观地貌因子(坡度、坡向、坡度变率以及坡向变率)进行提取。
- 2) 统计得出提取研究区内地形因子的最佳统计面积。
- 3) 利用 ArcGIS 软件提取出研究区的宏观地貌因子, 包括高程、高程变异系数, 地表切割深度, 地表粗糙度和地形起伏度。
- 4) 根据各种宏观和微观地貌因子开展地形特征分析, 选择适合的地形因子组合并划分出研究区的地

貌类型。

4. 结果与分析

4.1. 高程分析

高程的定义[12]是区域内的某点与海平面之间的高度差。高程变异系数反映的是地表一定区域内高程相对变化量,用这一区域高程标准差值与平均值的比来表示[13]。本文高程分析过程参照了中国 1:100 万数字地貌的制图规范[14]:低海拔区域高程小于 1000 m,中海拔区域高程在 1000 m 和 3500 m 之间,高海拔区域高程在 3500 m 和 5000 m 之间,极高海拔区域高程大于 5000 m 的规定,依据实际情况,将中海拔细分为中海拔(1000~2000 m)和亚高海拔(2000~3500 m)两类,将研究区内的高程细分为五类。从高程分级统计的结果(表 1)来看,研究区内中海拔区域所占面积最大,主要分布在云南省的中东部地区,占总面积的 52.75%;低海拔区域主要分布在东南区域,面积占研究区域的 20.34%;高海拔区域面积占 2.83%,主要分布在西北部的横断山区;极高海拔区域面积仅占 0.02%,主要分布在西藏东南端的横断山区的山脉区,其最高峰梅里雪山主峰海拔达到 6471 m。云南西部地区的高黎贡山及其延长线区域高程变异系数相对较大。另外,南部的哀牢山、无量山地区,滇东北的乌蒙山区,这些区域与周边区域高差很大,特别是高黎贡山位于青藏高原边缘,地形复杂,处于横断山区,沟壑纵横,河流下切侵蚀强烈。而中东部地区地势相对平坦,高程差异小。

Table 1. Statistics of classification of elevation

表 1. 高程分级统计

高程(m)	低海拔 < 1000	中海拔 1000~2000	亚高海拔 2000~3500	高海拔 3500~5000	极高海拔 > 5000
面积(km ²)	113234.05	293647.13	133939.65	15737.61	126.66
百分比(%)	20.34%	52.75%	34.46%	2.83%	0.02%

4.2. 地形起伏度分析

地形起伏度是反映地表形态的重要宏观地貌因子之一,是对区域内地貌类型划分的客观依据[15]。由于研究区域不同,计算面积选取有所差异,地形起伏度计算的结果也不同。参考宁婷等人的均值变点法对黄河流域地形起伏度的分析[16]作为参考对云南省进行地形起伏度分析,选用 11 × 11 网格为统计分析窗口,分析窗口面积为 1.0920 km²。

依据 1:100 万数字地貌的制图规范要求[17],可按照地形起伏度将云南省的地貌类型分为七个等级(见表 2),从地形起伏度的分级统计结果(表 2)可以看出,研究区内丘陵、台地、平原的面积占比较小,共占总面积的 32.79%,山地的面积占 67.21%,其中的小起伏山地占总面积的 58.16%,是研究区中分布最广的地形类型。各地貌类型分布的特征表现为丘陵主要分布在滇中及滇东地区,多为这些区域中的山体群,起伏度不大;小起伏山地分布在云南省大部分区域,尤其是哀牢山两侧,高黎贡山以东的区域;中起伏山地主要集中在研究区内的主要山脉附近,在哀牢山、无量山、乌蒙山区和横断山区集中分布;极大起伏山地以及大起伏山地多见于高黎贡山和横断山脉区。另外研究区的中部分布有高原面、盆地和湖泊,地形起伏度相对较小。

Table 2. Classification statistics of topographic relief

表 2. 地形起伏度分级统计

地形起伏度	平原	台地	丘陵	小起伏山地	中起伏山地	大起伏山地
高程(m)	<30	30~70	70~200	200~500	500~1000	1000~2500
面积(km ²)	7709.39	16720.62	159837.00	326811.49	50501.15	374.02
百分比(%)	1.37	2.98	28.44	58.16	8.99	0.07

4.3. 坡度分析

坡度[18]是地形面与水平面之间夹角的大小，其值介于 0°和 90°之间。坡度是一种重要的微观地形因子，对地面的能量流动和物质转移有直接或间接影响；坡度变率是在提取出的坡度值后对地面再次求算坡度后的结果。本文参照王红等对坡度分级的标准[19]，将云南省地区的坡度划分成六级(表 3)，再对各级坡度进行面积统计。根据坡度分级统计结果(表 3)，得出研究区中大部分区域的坡度值都在 7°~25°之间，面积占比为 66.34%，而坡度小于 7°的地区面积较小，仅占 17.61%，其中，平坦区域仅占研究区总面积的 3.72%。平坦地区主要分布在乌蒙山两侧，以滇东地区最为集中；倾斜地区分布大致紧接着平坦区往周围辐散，缓坡区分布于云南省绝大部分地区，除西北部的横断山区以及乌蒙山区外都有大面积连片分布；陡坡和急陡坡区集中分布于乌蒙山区中部和高黎贡山区，南部哀牢山也有明显分布区。总体而言，坡度超过 25°的区域通常处于大型山系或断层构造带上，受河流强烈冲刷和地质作用的影响，导致这些区域具有较大的坡度和复杂的地形；但研究区内部的坝子、湖泊等区域坡度较小，地形相对平缓。研究区的坡度变率在 0°~21.99°范围内，其变化规律与坡度的变化规律大致相似，坡度变率小的区域集中分布中东部地区、西部地区。后两个地区中坡度变率小的区域也多是高原上湖泊周围；研究区东北部的乌蒙山区坡度变率逐渐变大，西北部横断山脉区山谷沟壑分布密集，加之河流下切严重，坡度变率极大。

Table 3. Gradient classification statistics
表 3. 坡度分级统计

坡度级	平坦	起伏/倾斜	平缓	缓坡	陡坡	急陡坡
坡度(°)	0~2	2~7	7~15	15~25	25~35	>35
面积(km ²)	20678.69	77216.42	168567.35	183539.03	82313.13	23583.79
百分比(%)	3.72%	13.89%	30.32%	33.02%	14.81%	4.24%

4.4. 地表粗糙度与地表切割深度分析

地表粗糙度[20]是影响很多陆面过程的关键因子。是一种表达地表垂直形态的宏观指示因子。地表切割深度[21]能够反映出地表被外力侵蚀的程度，沈玉昌[22]确立了中国地貌分类标准：0~100 m 为丘陵；100~500 m 为浅切割山地；500~1000 m 的中等切割山地；1000 m 以上的为深切割山地。梁宏艳等[23]依据实际情况将研究区地貌进行细分为四类(表 4)。从地表切割深度统计(表 4)可知研究区以浅切割山地为主，占总面积的 42.98%，深切割山地面积很小，仅占 4.60%；在横断山区附近，高黎贡山沿线以及乌蒙山区地表粗糙度与地表切割深度较大；而滇中和滇东地区地表粗糙度与地表切割深度都较小，尤其是哀牢山附近相对明显。从整体上看，研究区内分布有许多高大山脉，如横断山脉、哀牢山、高黎贡山等，构造与侵蚀造成云高贵高原区地势陡峭，而这些山脉一侧地势相对平缓，导致高程落差大，地表粗糙度与地表切割深度大；研究区中部多为高原湖泊、丘陵，地表粗糙度与地表切割度均较小；而研究区西北部由于处于构造带发育区，区域内山高谷深、地形复杂，加之河流的不断侵蚀下切，使得该区域地表切割度和地表粗糙度均较大。

Table 4. Cutting depth grading statistics
表 4. 切割深度分级统计

切割深度(m)	微切割(0~100)	浅切割(100~200)	中等切割(200~300)	深切割(>300)
面积(km ²)	211203.03	241501.81	83404.72	25844.11
占比(%)	37.58%	42.98%	14.84%	4.60%

4.5. 坡向分析

坡向是局部地区地面的朝向，其决定地面接收热量的多少，坡面朝向重新分配着太阳辐射的能量，进而影响着局部地区的气候。对云南省内的坡向值以方位角进行分区，其平缓坡主要集中分布在研究区内的湖泊、平原和台地；从坡向统计表(表 5)来看，各种坡向类型的面积占比相差很小，分布位置也很分散。

地面的坡向变率是依据坡度变率的提取原理，在提取出坡向后，进一步提取坡向的坡度。值得注意的是，在 ArcGIS 处理过程中，坡向变率在提取北面坡过程中会产生误差，当计算正北方向附近坡向时，0°和 360°两个坡向相同计算值与真实值相差巨大。这里需要借助反地形坡向变率值来对原有的坡向变率值进行修正。结果表明滇东南区域数值较大，说明该区域内坡向变化快，且该区域是典型的喀斯特区域，喀斯特景观广泛分布，主要为峡谷、峰丛、峰林、瀑布等。喀斯特地貌类型多样，造成地面起伏变化的结果，反映出这一区域喀斯特地貌很发育[24]。

Table 5. Slope direction statistics
表 5. 坡向统计表

坡向	面积(km ²)	百分比
平面(-1)	55489.42	9.98%
北(0°~22.5°, 337.5°~360°)	62299.75	11.21%
东北(22.5°~67.5°)	69702.32	12.54%
东(67.5°~112.5°)	64286.55	11.56%
东南(112.5°~157.5°)	56135.47	10.10%
南(157.5°~202.5°)	59276.81	10.66%
西南(202.5°~247.5°)	66510.05	11.96%
西(247.5°~292.5°)	65528.09	11.79%
西北(292.5°~337.5°)	56669.95	10.19%

4.6. 地形因子组合分析

选取高程、起伏度、坡度和切割深度四种地形因子进行组合，基于 ArcGIS 软件对不同等级的地形因子组合进行提取，继而提取出研究区的不同地貌类型。统计各种地貌类型图斑数，本文将云南省地貌形态类型划为 25 类，并统计了研究区各类地貌的面积(表 6)。

Table 6. Geomorphological morphological statistics of the study area
表 6. 研究区地貌形态统计

地貌形态	面积(km ²)	占比(%)
深切割大起伏极陡极高山	2.02	0.00%
深切割大起伏陡极高山	3.24	0.00%
深切割中起伏陡极高山	16.07	0.00%
深切割大起伏陡高山	43.28	0.01%
深切割中起伏陡高山	2402.34	0.46%
中切割中起伏陡高山	1798.24	0.35%

续表

中切割中起伏陡高山	1797.69	0.35%
中切割中起伏平缓高山	700.12	0.13%
中切割小起伏平缓高山	2172.31	0.42%
中切割中起伏陡亚高山	6823.24	1.31%
中切割小起伏陡亚高山	14151.32	2.72%
中切割中起伏平缓亚高山	2769.39	0.53%
中切割小起伏平亚高山	11321.23	2.17%
浅切割中起伏陡亚高山	310.36	0.06%
浅切割中起伏平缓亚高山	182.02	0.03%
浅切割小起伏平缓亚高山	23888.41	4.58%
浅切割中起伏陡中山	10781.27	2.07%
浅切割小起伏陡中山	129485.38	24.85%
浅切割中起伏平缓中山	396.21	0.08%
浅切割小起伏平缓中山	116783.04	22.41%
浅切割中起伏平缓低山	260.15	0.05%
浅切割小起伏平缓低山	50717.03	9.73%
丘陵	1232290.24	23.65%
高原面	18704.78	3.59%
平原、盆地	4105.88	0.79%

5. 结论

基于 ArcGIS 对云南省进行了高程等 9 种地形因子进行分析, 选取最佳地形因子组合, 主要结论如下:

1) 研究区地貌划分最佳地形因子组合为高程、地形起伏度、坡度和切割深度; 云南省地区浅切割小起伏陡中山和浅切割小起伏平缓中山的面积占比较大, 分布广泛, 集中分布于除滇中与滇东以外的区域。

2) 丘陵在滇东南区域分布占比较大, 平原和盆地集中分布于滇中和滇东部, 零散分布于滇西和滇南, 整体面积较小, 占比极小。

3) 高原面的分布以东部区域为主, 在滇西部也有零星分布, 面积占比较小; 深切割高海拔山地分布于滇西北部横断山区, 面积占研究区的 1.37%。

4) 亚高山分布于滇西北部, 是高海拔山地和中海拔山地的过渡区, 占研究区的 11.4%; 低海拔山地连续分布在研究区南部和东部的边缘地带, 面积占比为 9.78%。

5) 整体而言, 中海拔山地为研究区主要地貌, 分布在研究区大部分地带, 约占总面积的 50%; 云南省的整体地势特点为西北部高, 东南部低, 中部为高原面, 边缘为山地。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 苏时雨, 李钊章. 地貌制图[M]. 北京: 测绘出版社, 1999.
- [3] Burrough, P.A., van Gaans, P.F.M. and MacMillan, R.A. (2000) High-Resolution Landform Classification Using Fuzzy

- K-Means. *Fuzzy Sets and Systems*, **113**, 37-52. [https://doi.org/10.1016/s0165-0114\(99\)00011-1](https://doi.org/10.1016/s0165-0114(99)00011-1)
- [4] Bishop, M.P., Shroder, J.F. and Colby, J.D. (2003) Remote Sensing and Geomorphometry for Studying Relief Production in High Mountains. *Geomorphology*, **55**, 345-361. [https://doi.org/10.1016/s0169-555x\(03\)00149-1](https://doi.org/10.1016/s0169-555x(03)00149-1)
- [5] Giles, P.T. and Franklin, S.E. (1998) An Automated Approach to the Classification of the Slope Units Using Digital Data. *Geomorphology*, **21**, 251-264. [https://doi.org/10.1016/s0169-555x\(97\)00064-0](https://doi.org/10.1016/s0169-555x(97)00064-0)
- [6] Miliareisis, G. and Argialas, D. (2000) Extraction and Delineation of Alluvial Fans from Digital Elevation Models and Landsat Thematic Mapper Images. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, **66**, 1093-1101.
- [7] Miliareisis, G.C. (2001) Extraction of Bajadas from Digital Elevation Models and Satellite Imagery. *Computers & Geosciences*, **27**, 1157-1167. [https://doi.org/10.1016/s0098-3004\(01\)00032-2](https://doi.org/10.1016/s0098-3004(01)00032-2)
- [8] 张宝雷, 宋孟强, 周万村. GIS 支持下三峡库区主要地类自动分类方法研究[J]. 遥感技术与应用, 2006, 21(1): 71-76.
- [9] 李爱农, 江小波, 马泽忠, 等. 遥感自动分类在西南地区土地利用调查中的应用研究[J]. 遥感技术与应用, 2003, 18(5): 282-285.
- [10] 王文, 黄瑾, 崔巍. 云贵高原区干旱遥感监测中各干旱指数的应用对比[J]. 农业工程学报, 2018, 34(19): 131-139+309.
- [11] 汪凌. 美国航天飞机雷达地形测绘使命简介[J]. 测绘通报, 2000, 21(12): 38-40.
- [12] 姜雨璇, 查小春. 基于 DEM 的巴山地区地貌区划研究[J]. 水土保持研究, 2022, 29(1): 127-132+139.
- [13] 刘静, 丁林, 曾令森, 等. 青藏高原典型地区的地貌量化分析——兼对高原“夷平面”的讨论[J]. 地学前缘, 2006, 13(5): 285-299.
- [14] 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.
- [15] 涂汉明, 刘振东. 中国地势起伏度研究[J]. 测绘学报, 1991(4): 311-319.
- [16] 宁婷, 崔伟, 马晓勇. 基于均值变点法提取地形起伏度的影响因素分析——以黄河流域(山西段)为例[J]. 测绘通报, 2022(2): 159-163.
- [17] 姜瑾斐, 公培臻, 王栋, 等. 基于 SRTM 的山东省地形起伏度研究[J]. 河北地质大学学报, 2021, 44(3): 71-75.
- [18] 何振芳, 赵牡丹, 韩羽. 不同地貌类型坡度提取算法的比较[J]. 水土保持通报, 2008, 28(6): 126-129.
- [19] 王红, 王均. 国家基本地理单元数据集的初步研究[J]. 测绘科学, 2004, 29(3): 22-25.
- [20] 江冲亚, 方红亮, 魏珊珊. 地表粗糙度参数化研究综述[J]. 地球科学进展, 2012, 27(3): 292-303.
- [21] 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[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [22] 沈玉昌. 沈玉昌与中国现代地貌学[J]. 地理研究, 1997(1): 77-84.
- [23] 梁宏艳, 赵尚民, 马顶. 基于 ALOS DEM 的山西省西山矿区地貌形态类型提取[J]. 太原理工大学学报, 2023, 54(5): 950-958.
- [24] 赵青松. 黔西南州数字地貌类型划分及信息提取[D]: [硕士学位论文]. 贵阳: 贵州师范大学, 2020.