

李伟, 王平, 丁智强, 李鹏映, 廖正杭, 华红莲, 李玉辉. 2023. 基于ALOS DEM的乌蒙山国家级自然保护区地貌特征研究. 热带地理, 43 (7): 1390-1399.

Li Wei, Wang Ping, Ding Zhiqiang, Li Pengying, Liao Zhenghang, Hua Hongliang, and Li Yuhui. 2023. Geomorphic Features of Wumeng Mountain National Nature Reserve Based on ALOS DEM. *Tropical Geography*, 43 (7): 1390-1399.

基于ALOS DEM的乌蒙山国家级自然保护区地貌特征研究

李伟¹, 王平², 丁智强³, 李鹏映¹, 廖正杭¹, 华红莲², 李玉辉²

(1. 云南乌蒙山国家级自然保护区管护局, 云南 昭通 657000; 2. 云南师范大学 地理学部, 昆明 650500;
3. 福建师范大学 地理科学学院, 福州 350007)

摘要: 以乌蒙山国家级自然保护区为对象, 融合野外地质地貌调查和ALOS DEM数字地形分析, 定量与定性相结合阐述区内地形分异、地貌格局与发育演化等特征。结果表明: 1) 保护区基本地貌类型以大起伏中山(57.45%)为主, 其次为大起伏亚高山(30.66%)和中起伏中山(11.17%), 海拔、起伏度、坡度、面积-高程积分值等定量地形指标的平均值从三江口片区至朝天马、海子坪片区逐渐降低, 夷平剥蚀面级数逐渐减少; 2) 保护区及附近地区共发育7级夷平剥蚀面, 其中I-III级为山顶面和残余夷平面, VII级为金沙江侵蚀阶地, IV~VI级为剥蚀面, 与区域3次构造旋回相对应; 3) 保护区面积-高程积分值在0.197~0.815之间, 平均为0.503, 超过80%的区域处于地貌演化的壮年阶段, 表明区域地表侵蚀动力较强, 在人类活动增强背景下存在较大的生态风险, 未来的保护规划应考虑各个基本地貌类型区的地表动力差异。综合而言, 独特、丰富的地貌结构使得保护区生物多样性及其所依附的生态环境要素得以保存, 加强地貌多样性研究有助于从整体性和系统性的角度实现保护区资源环境管理与可持续利用。

关键词: 基本地貌类型; 面积-高程积分; 地形剖面; ALOS DEM; 乌蒙山国家级自然保护区

中图分类号: P931.6

文献标志码: A

文章编号: 1001-5221(2023)07-1390-10

DOI: 10.13284/j.cnki.rddl.003703

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



由内外营力在漫长地质历史时期塑造的地貌形态特征影响着热量和水分条件的空间分异, 进而影响地表水文生态过程和生物多样性, 也直接驱动人类对国土空间开发利用的历史和强度(丁智强等, 2021a; 王平等, 2021)。区域地貌是区域自然地理学研究的重要组成部分, 其能从整体性和系统性的角度对其宏观表现、空间结构以及演化历史进行探索(汤国安等, 2017)。传统的区域地貌研究主要通过野外考察和纸质地形图对地貌特征进行定性描述, 能选取的地貌指标十分有限, 在研究区域上也多以流域、山脉等自然地理单元为主(冯金良等, 2004; 万晔等, 2005)。而随着高精度数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)数据获取技术

和手段的成熟, 相关学者对包括全球、国家、地区等不同空间尺度以及典型区域(包括黄土高原、青藏高原、西南喀斯特区以及月球地貌)的地貌特征和发育演化进行了研究(汤国安等, 2017; Xiong et al., 2022; 毕奔腾等, 2022), 如Snethlage等(2022)基于DEM数据开发了全球山脉分级清单, 程维明等(2018; 2019)探索了中国地貌区划和月球形貌类型划分方法, 熊礼阳等(2020)基于DEM数字地形数据系统分析了黄土地貌发育演化过程。这些成果极大促进了对区域地貌的认识, 同时也形成了丰富的地貌指标体系。相比而言, 海拔和起伏度是快速、直观反映区域地形结构特征的关键指标, 同时也是确定区域基本地貌类型、划分地貌

收稿日期: 2022-10-03; 修回日期: 2023-02-01

基金项目: 中央财政林业改革发展资金项目: 云南乌蒙山国家级自然保护区地质地貌资源调查与研究(53060020000000025798)

作者简介: 李伟(1981—), 男, 云南昭通人, 本科, 高级工程师, 研究方向为保护区可持续发展, (E-mail) 393371994@qq.com;

通信作者: 丁智强(1993—), 男, 云南禄劝人, 博士研究生, 研究方向为数字地形及资源环境效应, (E-mail) zhiqiang_ding9303@163.com。

单元的重要依据 (李炳元等, 2008); 坡度、坡向则主要影响水分和温度的空间分异, 对区域水土保持规划治理措施空间配置具有重要参考价值; 面积-高程积分 (Hypsometric Index, HI) 在揭示区域地貌演化阶段方面具有易获取、地貌意义明确的特点, 已得到广泛应用 (祝士杰等, 2013; 丁智强等, 2021b; Duan et al., 2022)。

保护地是政府批准以对典型生态系统、地质地貌遗迹、珍稀动植物资源、重要野生动物栖息地和植物生境进行特殊管理和保护的国土空间范围, 其类型包括风景名胜区、地质公园、历史遗迹、森林公园、自然保护区、世界遗产地等 (Huang et al., 2019)。经过近 40 年的快速发展, 中国有超过 15% 的国土面积被纳入保护地管理, 使全国生态系统服务功能得到显著改善 (Wu et al., 2019)。其中国家级自然保护区是最为重要、保护措施最为严格的一类保护地, 其首要任务是保护生物多样性, 相关研究也主要集中在生物多样性调查 (赵彩云等, 2022)、生态水文过程 (金奇豪等, 2021)、社区发展、生态旅游 (徐丽等, 2022) 等方面, 但越来越多的研究认为地质、地貌、土壤等的多样性, 特别是地貌类型多样性对生物多样性产生影响 (Tukiainen et al., 2019; Hjort et al., 2022), 比如丰富的地貌类型不仅增加了当地自然环境的异质性, 还为区域资源、微地形和微气候的形成提供了基础, 这为不同生物创造了多样化的生态位、微生境和避难所。Liu 等 (2021) 评估了云南省自然保护区自然环境异质性与生物多样性的关系, 认为自然环境异质性可以作为生物多样性的有效替代指标, Karna 等 (2019) 认为流域地貌多样性促进了河流生物多样性。但目前对自然保护区地貌特征的研究依然不足, 已有研究主要集中在地质公园类型上, 且多以地质公园申报、开展地质旅游、地质遗迹教育等需求为导向 (Chrobak et al., 2021; 魏玉燕等, 2021)。

加强对自然保护区地貌特征的范式研究, 有助于为特殊国土空间管控背景下自然保护区的资源环境管理、生态和生物多样性研究、以及空间生态治理提供地貌学支撑。乌蒙山国家级自然保护区位于云南高原向四川盆地过渡的斜坡地带, 受金沙江及其支流的强烈侵蚀切割, 地势起伏大, 地表破碎, 是典型的大起伏亚高山、中山峡谷山原地貌区, 其生境复杂多样, 珍稀、濒危、特有动植物物种丰富。地貌是引起该保护区及附近地区水分、热量及

其组合产生空间分异的主导因素, 但有关研究至今未见报道。就其地貌的类型、结构、演化等进行研究, 可为认识该保护区地貌特征, 有效管护资源环境, 研究生态和生物演化等提供地貌依据。因此, 本研究以乌蒙山国家级自然保护区为对象, 融合野外地质地貌调查和 ALOS DEM 数字地形分析, 定量与定性相结合阐述区内地形分异、地貌格局与发育演化等特征。

1 研究区概况

乌蒙山国家级自然保护区 (以下简称“保护区”) 于 2013 年经国务院批准建立, 位于云南省东北部昭通市下辖的大关、彝良、盐津、永善、威信 5 个县境内, 金沙江下游, 贵州岩溶山原、四川盆地、滇中高原、横断山脉东缘 4 个自然地理区域的结合部位和过渡地带。地理坐标为 $27^{\circ}47'41''-28^{\circ}17'40''$ N, $103^{\circ}51'47''-104^{\circ}45'05''$ E, 海拔 980~2 454.7 m, 总面积 26 186.65 hm^2 。保护区由互不相连的 3 个片区组成 (图 1), 其中, 三江口片区位于永善、大关、盐津 3 县境内, 面积 8 386.98 hm^2 , 朝天马片区位于彝良、盐津、大关 3 县境内, 面积 15 004.06 hm^2 , 海子坪片区位于彝良、威信 2 县境内, 面积 2 795.61 hm^2 。在中国大地构造分区中 (潘桂堂等, 2009) 位于“扬子陆块南部碳酸盐岩台地”西部, 区内主要有盐津—永善—巧家断裂、大关—昭通—巧家断裂、彝良—昭通—巧家断裂等 [图 1-b, 据文献 (李大虎等, 2019) 修绘]。出露的岩石地层以二叠系灰岩和玄武岩最为广泛, 其次是泥盆系石英砂岩、页岩、石灰岩等。三江口片区所在山地为五莲峰, 朝天马和海子坪 2 个片区则位于乌蒙山北部。上新世以来新构造抬升和金沙江及其支流横江、团结河、桧溪河等的侵蚀切割强烈, 保护区及附近地区地势起伏大, 区域地貌为大起伏中山峡谷山原。保护区是云南省唯一一个以典型常绿阔叶林生态系统为主要保护对象的森林生态系统类型国家级自然保护区, 以珙桐、南方红豆杉、福建柏、天麻、云豹、林麝、小熊猫、大鲵等为代表的国家重点保护的珍稀濒危特有动植物物种丰富。

2 数据与方法

2.1 数据源

数字地形分析基于 ALOS (Advanced Land Observation Satellite) DEM 数据, 像元分辨率 12.5 m \times 12.5 m, 祝士杰等 (2013) 的研究显示, 相近分辨

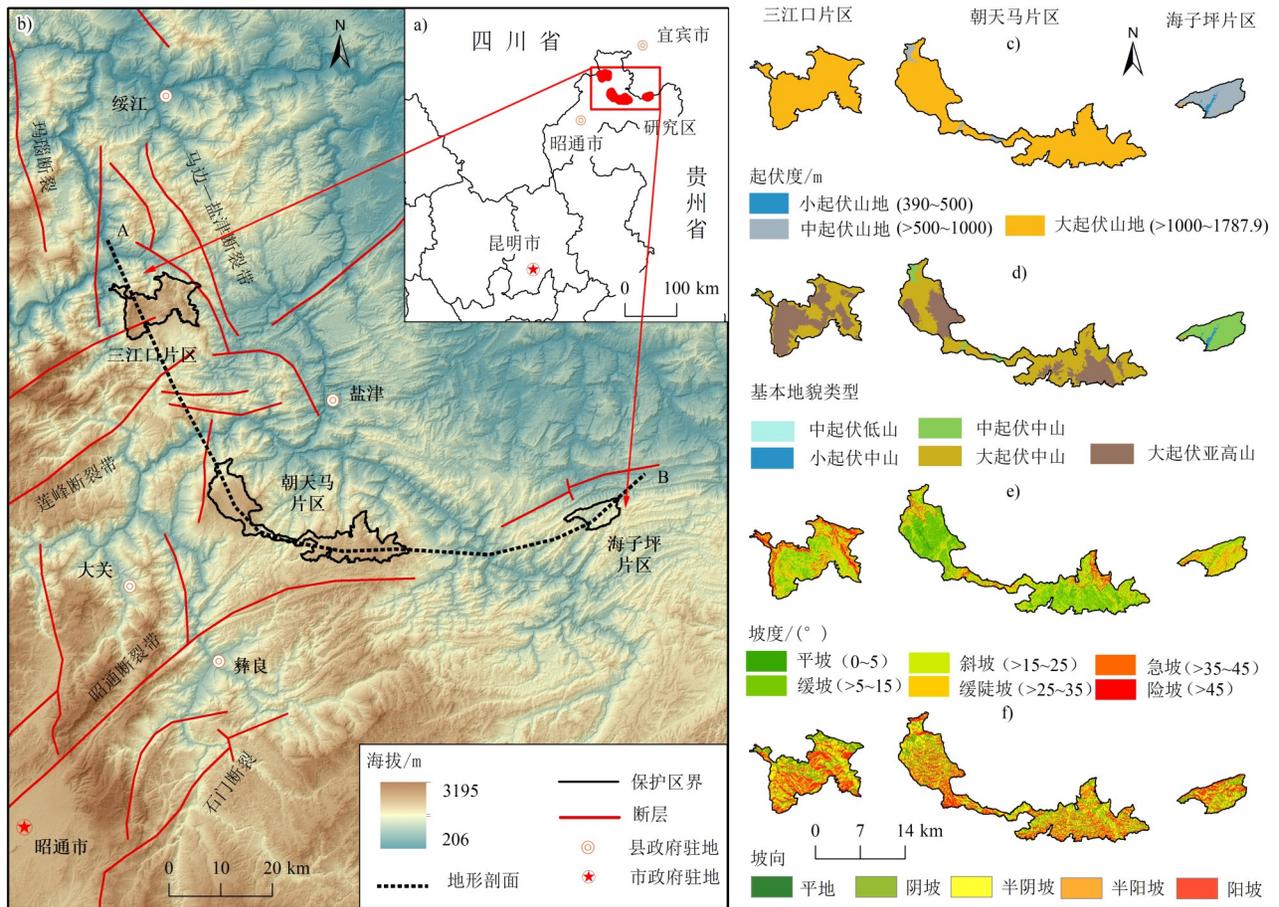


图1 保护区地理位置及定量地貌指标空间分布

Fig. 1 Geographic location of the reserve and spatial distribution of its quantitative geomorphic indicators

率可以保证地貌参数提取的精度要求。在 ArcGIS 10.2 中对 DEM 进行数据镶嵌、密度分割、几何校正、范围裁剪和彩色晕染等预处理, 并采用高志远等 (2019) 的方法对照 1 : 10 万地形图对海拔进行校正, 以满足研究需要。

2.2 定量地貌指标获取

综合研究区范围大小、数据精度以及研究目标, 选择表征区域地貌特征的海拔、起伏度、坡度、坡向和面积-高程积分 5 个地貌指标。其中, 海拔可以用 DEM 数据表示, 在讨论基本山地地貌类型时, 按低海拔 (980~1 000 m)、中海拔 (1 000~2 000 m) 和亚高海拔 (2 000~2 454.7 m) 进行等级划分。坡度利用 ArcGIS 中的 “Slope” 工具得到, 但由于从 DEM 上提取坡度时具有明显的尺度效应, 所以结合研究区的地形特征使用文献中的坡度变换方法 (刘飞等, 2019) 对从 DEM 计算得到的坡度进行修正, 最后参照《森林资源规划设计调查技术规程 (GB/T26424-2010)》(唐小平等, 2011),

将坡度划分为平地 (0°~5°)、缓坡 (>5°~15°)、斜坡 (>15°~25°)、缓陡坡 (>25°~35°)、急坡 (>35°~45°)、险坡 (>45°) 6 个等级。坡向利用 ArcGIS 中的 “坡向” 工具得到, 并按林超等 (1985) 提出的标准, 划分为阳坡 (>135°~225°)、半阳坡 (>90°~135°和 >225°~270°)、半阴坡 (>45°~90°和 270°~315°)、阴坡 (>315°~45°)、平地 (0°) 5 个等级。

2.3 面积-高程积分与热点分析

面积-高程积分的基本原理是以某区域的相对高度比为纵轴、相对面积比为横轴绘制得到面积-高程积分曲线 (Hypsometric Curve, HC), 曲线与 X 轴和 Y 轴围成的面积, HI 代表该流域受到风化侵蚀作用后地表残留物质所占原有物质的比例。当 HI > 0.6 时, HC 一般呈上凸形, 表示流域物质被侵蚀的量较少, 此时流域地貌特征为地表崎岖, 起伏较大, 地貌演化阶段处于幼年期; 当 0.35 ≤ HI ≤ 0.6 时, HC 一般呈 “S” 形, 表明流域物质受到强烈侵蚀,

地形起伏度达到最大, 地貌类型呈现多样化和复杂化, 此时流域地貌处于壮年期; 当 $HI < 0.35$ 时, HC 一般呈下凹形, 即表明大部分物质被侵蚀殆尽, 此时外动力条件以堆积夷平为主, 地形起伏逐渐减小, 地貌向准平原化发展, 流域地貌处于演化阶段的老年期 (Strahler, 1952)。

相关研究发现, HI 受 DEM 分辨率和空间分析尺度的影响较大 (Duan et al., 2022), 通过对 DEM 分辨率和网格大小的尝试, 最终确定以 $12.5\text{ m} \times 12.5\text{ m}$ DEM 分辨率和 $150\text{ m} \times 150\text{ m}$ 网格计算保护区 HI 。热点分析 (Getis Ord G_i^*) 用于展示高 HI (热点) 和低 HI (冷点) 的空间分布特征。热点分析的基本原理是对数据集中的每一个要素进行统计, 通过得到的 Z 得分和 P 值, 让高值或低值要素在空间上聚类, “极热点” 被定义为 Z 得分高, P 值 < 0.05 的区域, 而 “极冷点” 则定义为 Z 得分低, P 值 > 0.05 的区域, 具体公式见 Hazaymeh 等 (2022) 的描述。

3 结果分析

3.1 海拔、起伏度与基本地貌类型

保护区海拔 $980 \sim 2\,454.7\text{ m}$, 平均海拔 $1\,859.9\text{ m}$, 3 个片区平均海拔排序为三江口 ($1\,955.8\text{ m}$) $>$ 朝天马 ($1\,890.8\text{ m}$) $>$ 海子坪 ($1\,339.8\text{ m}$), 山地类型可划分为低山、中山和亚高山, 面积排序为中山 $>$ 亚高山 $>$ 低山, 占比分别为 69.33% 、 30.66% 和 0.01% 。3 个片区相比, 三江口和朝天马

均以中山为主, 次为亚高山, 低山占比很小, 海子坪全域均为中山。保护区内起伏度 $390 \sim 2\,104.7\text{ m}$, 平均起伏度 $1\,392.1\text{ m}$, 3 个片区平均起伏度排序为三江口 ($1\,629.8\text{ m}$) $>$ 朝天马 ($1\,454.5\text{ m}$) $>$ 海子坪 (706.1 m)。区内总体上以大起伏山地为主, 面积 $2\,34.95\text{ km}^2$, 占比 88.11% , 有 62.47% 分布于朝天马片区, 其次是三江口片区, 面积 86.65 km^2 , 占比 36.88% , 中起伏山地 29.80 km^2 , 占保护区总面积的 11.17% , 有 82.43% 分布于海子坪片区, 小起伏山地仅分布于海子坪片区, 面积 1.91 km^2 。

综合考虑海拔和起伏度的基本地貌类型划分对于保护区生物多样性管理和人类活动干扰评价等具有重要意义 (李炳元等, 2008)。将划分的 3 个海拔类型与 3 个起伏度类型在 ArcGIS 中进行空间叠加, 得到保护区基本地貌类型分布图 (图 1-d)。5 类基本地貌类型按面积排序为大起伏中山 $>$ 大起伏亚高山 $>$ 中起伏中山 $>$ 小起伏中山 $>$ 中起伏低山 (表 1), 其中大起伏中山面积 153.19 km^2 , 占比 57.45% , 主要分布在朝天马片区, 其次是三江口片区, 而海子坪片区分布较少。大起伏亚高山面积 81.76 km^2 , 占比 30.66% , 朝天马和三江口分布面积接近, 分别为 42.81 和 38.94 km^2 , 在海子坪片区无分布。中起伏中山面积 29.78 km^2 , 占比 11.17% , 其中有 82.72% 分布于海子坪片区。小起伏中山面积 1.91 km^2 , 占比 0.72% , 仅分布于海子坪片区。中起伏低山面积仅 0.02 km^2 , 占比 0.01% , 仅分布于三江口片区。

表 1 保护区基本地貌类型面积和占比

Table 1 Area and proportion of basic geomorphic types in Wumeng Mountain National Nature Reserve

基本地貌类型	总面积/ km^2	占比/%	三江口片区		朝天马片区		海子坪片区	
			面积/ km^2	占比/%	面积/ km^2	占比/%	面积/ km^2	占比/%
小起伏中山	1.91	0.72	0.00	0.00	0.00	0.00	1.91	6.81
中起伏低山	0.02	0.01	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00
中起伏中山	29.78	11.17	0.70	0.80	4.52	2.99	24.56	87.72
大起伏中山	153.19	57.45	47.71	54.61	103.95	68.72	1.53	5.46
大起伏亚高山	81.76	30.66	38.94	44.57	42.81	28.30	0.00	0.00

3.2 坡度、坡向与地形剖面特征

保护区坡度 $0^\circ \sim 75.5^\circ$, 平均坡度为 21.1° 。坡度结构以缓坡和斜坡为主, 面积分别为 92.88 和 83.22 km^2 , 占比为 34.83% 和 31.21% , 其次是缓陡坡, 面积为 46.85 km^2 , 占比 17.57% , 其余的急坡、平坡和险坡面积合计占比为 16.39% (表 2)。3 个片区平均坡度排序为三江口 (23.9°) $>$ 朝天马 (22.4°) $>$ 海子坪 (17.1°), 其中三江口和朝天马坡度结构均

以缓坡和斜坡为主, 其次是缓陡坡, 合计面积占比分别为 78.27% 和 86.31% , 而海子坪片区以斜坡和缓陡坡为主, 其次是缓坡, 三者面积合计占比为 85.75% (图 1-e)。保护区坡向结构以半阴坡面积最大, 占比 27.92% , 以阳坡面积最小, 占比 21.70% , 半阳坡和阴坡占比分别为 25.54% 和 24.55% (见表 2)。从各片区看, 三江口和朝天马均以半阴坡和半阳坡为主, 其次是阴坡, 平地的面积最小, 而三江

表2 保护区坡度、坡向结构特征

Table 2 Characteristics of slope and aspect structure of the protected area

坡度/坡向指标	总面积/km ²	占比/%	三江口		朝天马		海子坪		
			面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	
坡度结构	平坡(0°~5°)	13.70	5.14	2.06	2.35	10.93	7.23	0.72	2.56
	缓坡(5°~15°)	92.88	34.83	21.84	25.00	64.82	42.85	6.22	22.22
	斜坡(15°~25°)	83.22	31.21	27.85	31.88	45.28	29.93	10.08	36.03
	缓陡坡(25°~35°)	46.85	17.57	18.69	21.39	20.47	13.53	7.70	27.50
	急坡(35°~45°)	21.13	7.93	10.63	12.17	7.62	5.04	2.88	10.28
	险坡(>45°)	8.86	3.32	6.31	7.22	2.16	1.43	0.39	1.39
坡向结构	平地(0°)	0.77	0.29	0.15	0.17	0.56	0.37	0.06	0.21
	阴坡(315°~45°)	65.47	24.55	20.79	23.79	36.86	24.37	7.82	27.93
	半阴坡(45°~90°/270°~315°)	74.45	27.92	23.17	26.52	43.84	28.98	7.44	26.58
	半阳坡(90°~135°/225°~270°)	68.10	25.54	23.03	26.36	38.74	25.61	6.34	22.64
	阳坡(135°~225°)	57.85	21.70	20.24	23.16	31.28	20.68	6.33	22.63

口则以阴坡和半阴坡为主，其次是半阳坡和阳坡(图1-f)，在3个片区中光照资源最差。

地形剖面线是以海拔高度为纵轴，起算点到结束点空间距离为横轴的制图表达方式，其能通过地势在不同空间位置和相同海拔高度上的变化特征来揭示区域构造运动的特征。从经过三江口、朝天马和海子坪3个片区的地形剖面线可以看出，保护区海拔从西北向东南逐渐降低，对应的起伏度和坡度

也在逐渐减小。从保护区海拔最高的三江口片区腊子坪到金沙江河谷，共发育7级剥夷面(图2)，I级为山顶面，海拔2450m左右，II~VII级为剥蚀面，海拔从高到低分别为2200、1900、1600、1200、900、550m。从3个片区看，腊子坪发育有4级剥蚀面，朝天马片区发育5级剥蚀面，海子坪片区由于海拔高差较小，仅发育2级剥蚀面，反映构造隆升幅度自西北向东南逐渐减小的趋势。

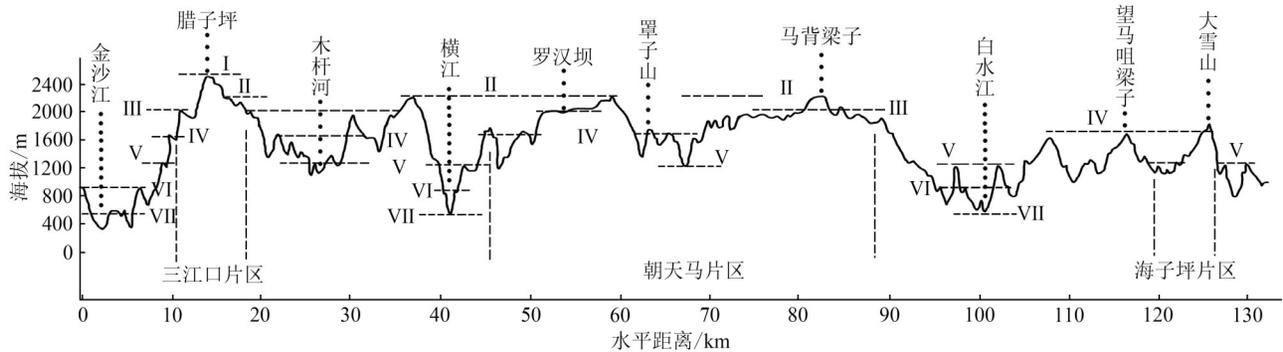


图2 保护区地形剖面结构特征

Fig.2 The structural features of the terrain profile in the reserve

3.3 面积-高程积分值特征

HI既是揭示区域地貌发育演化阶段的有效指标，亦可以指示区内水土流失强度的空间差异(祝士杰等, 2013)。保护区HI在0.197~0.815之间，平均为0.503，三江口、朝天马和海子坪3个片区平均HI分别为0.549、0.516和0.453，整体处于地貌演化的壮年早期阶段，具有较强的地表动力过程和水土流失风险。从各个地貌演化阶段的面积统计看(表3)，以处于壮年阶段的区域分布最广，包括壮年早期和壮年晚期，二者面积合计为221.01 km²，占保

保护区总面积的82.89%。其次是青年期地貌，面积36.16 km²，占保护区总面积的13.56%，主要分布于海拔较高的梁子、台地区域，如三江口片区的七家马梁子、腊子坪一带，以及朝天马片区的高龙塘、老碗长梁子、望香台等地，海子坪片区的雷打山以及大和地、尖子山一带。面积最少的是老年期地貌，面积9.47 km²，占比为3.55%，以朝天马片区面积最大，主要分布于罩子山和大坡梁子之间的生态廊道以及马背梁子、黄河梁子以南的峰丛洼地区，在三江口主要分布于南部的婆娘岩一带(图3)。

表 3 保护区各地貌演化阶段面积和占比

Table 3 Area and proportion of each geomorphic evolution stage in Wumeng Mountain National Nature Reserve

地貌演化阶段	总面积/km ²	占比/%	三江口片区		朝天马片区		海子坪片区	
			面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%
老年期(<0.35)	9.47	3.55	2.38	2.72	5.66	3.74	1.43	5.12
壮年晚期(0.35≤HI≤0.45)	58.85	22.07	18.99	21.73	32.21	21.29	7.65	27.33
壮年早期(0.45<HI≤0.6)	162.16	60.82	53.89	61.68	92.79	61.34	15.48	55.32
青年期(HI>0.6)	36.16	13.56	12.12	13.87	20.62	13.63	3.42	12.22

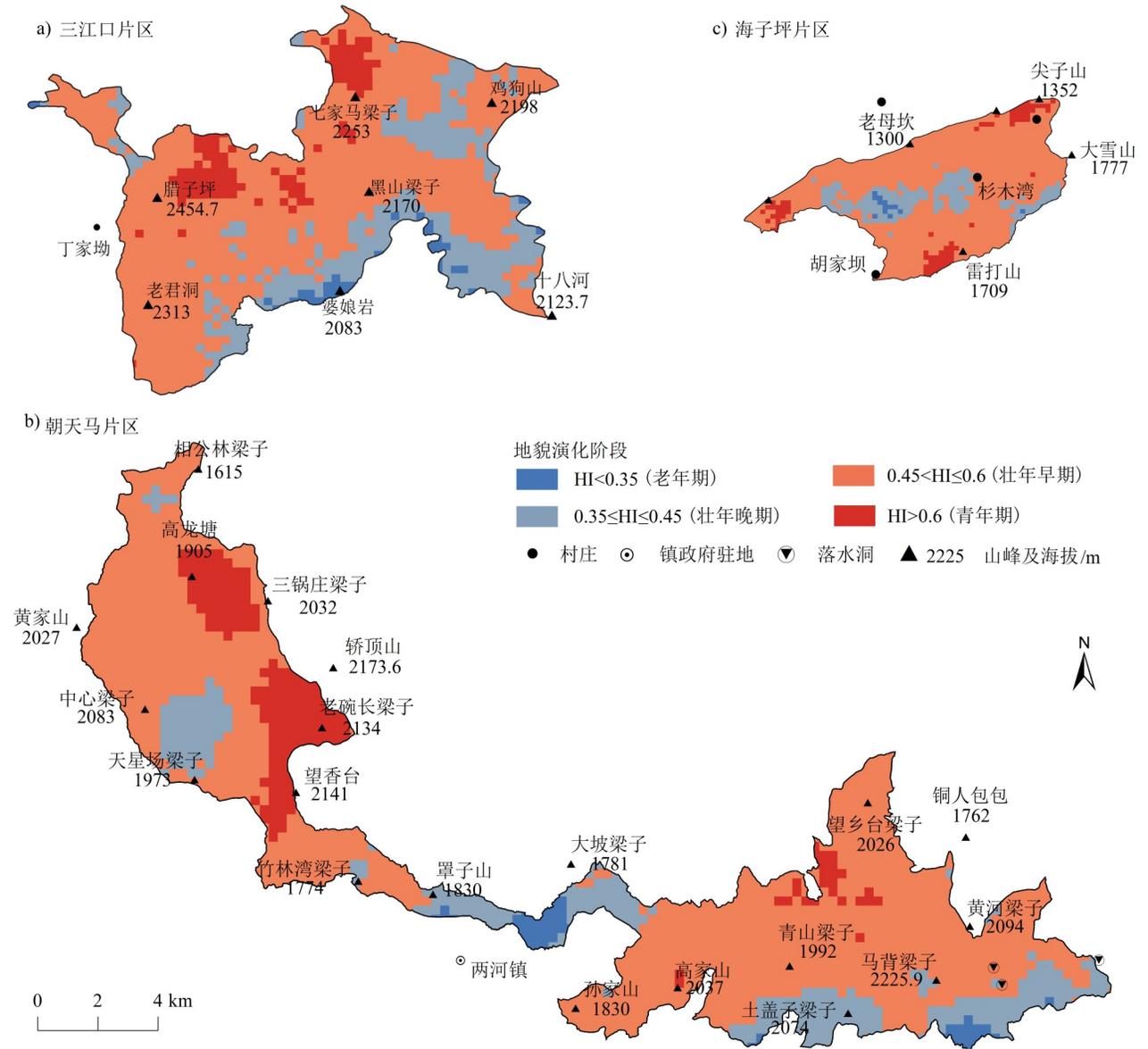


图 3 保护区面积-高程积分空间分布

Fig.3 Spatial distribution of hypsometric integral of the reserve

4 讨论

3 个片区海拔、起伏度、坡度、HI 等地貌因子表现出自西向东逐渐减小的变化特征，这与该区域断裂构造活动息息相关。三江口和朝天马片区更靠

近华南块体与大凉山次级块体的交界区域（张培震等，2003），有昭通—莲峰断裂带和马边—盐津断裂带在此交汇。昭通—莲峰断裂带为晚第四纪—全新世活动断裂，具逆冲—右旋走滑运动性质，走滑

速率南段为5~7 mm/a, 中—北段为3~4 mm/a (闻学泽等, 2013)。马边—盐津断裂带为大凉山次级块体的东部边界, 为挤压逆冲性质(张世民等, 2005)。2条断裂带总体表现为断裂之间地块的差异性、间隙性隆升, 其隆升幅度总体西部大、东部小, 形成地势上显著下降的趋势。受区域隆升作用的影响, 该区域流水切割作用相当强烈, 金沙江、横江、白水江等干流及其各支流的切割深度超过1 000 m, 从腊子坪到金沙江河谷的高差则接近2 000 m。内外营力的共同作用使得该区域表现出高海拔、高起伏度、高坡度和高HI值的特点, 而海子坪片区由于远离断裂交汇区, 地势起伏度和HI值相对较小。

构造断裂的差异性和间歇性活动特征是保护区层状地貌形成和空间差异的重要原因。影响保护区地貌发育演化的昭通—莲峰断裂和马边—盐津断裂带位于青藏高原东南缘, 其构造运动特征与始新世以来青藏高原的形成演化和构造变形过程密切相关, 亦具有差异性和间歇性隆升特征(方小敏, 2017), 导致保护区及附近地区地貌具有层级特征, 层状地貌发达。虽然后期受地表河流切割破坏, 但通过地形剖面线分析依然可以看出该区域共有7级夷平剥蚀面, 各等级夷平剥蚀面的类型具有差异性。根据已有研究, 该区第I、II级为高原隆升之前的山顶面(冯金良等, 2004), 第III级为残余古夷平面(Clark et al., 2004), 第VII级为金沙江河流阶地面, 第IV、V、VI级为剥蚀面, 形成于高原隆升及初始地貌面解体之后, 其形成与区域地壳阶段性隆升有关, 所以三级剥蚀面可以指示该区经历的三次构造隆升—夷平旋回过程, 这与方小敏(2017)、Liu等(2019)的研究一致, 说明该区域普遍存在的夷平剥蚀面与更大空间尺度上的构造运动阶段具有可对比性。

特殊的地貌结构和发育演化特征有助于保护区生物多样性的形成和可持续发展。通过野外地质地貌调查, 结合12.5 m×12.5 m的ALOS数字地形数据分析, 乌蒙山国家级自然保护区地势在空间上从西北到东南逐渐降低, 保护区分布于高海拔的山顶面和夷平面范围内(见图3), 因此在区内地势相对平坦, 起伏较小, 四周向金沙江、横江、白水江等河谷过渡的区域往往地形起伏大, 坡度以急坡和险坡为主。乌蒙山区人类活动历史悠久, 人地矛盾向来突出, 人口增长带来的森林退化和过度开发是该区域面临的严重生态环境问题, 但正是由于保护区

独特地形结构特征, 导致历史上很少有人类涉足, 才使得区域内的生物多样性及其所依附的各环境要素得以保留其原始状态。因此, 从长时间尺度看, 丰富的地貌结构类型为区内的动植物提供了高度异质性的生境类型, 使保护区内生物多样性得以形成, 同时独特的地貌结构特征也是保护区内生物多样性得以存续发展的重要基础。本研究没有直接分析地貌特征多样性与保护区生物多样性的相关关系和直接影响, 未来将进一步对保护区内重点保护动植物生存发展的微生境展开调查, 计算包括地质、地貌、土壤等非生物环境因素的多样性, 评估地理环境多样性对重点保护动植物的影响。

5 结论

将野外地质地貌调查与ALOS DEM数字地形分析相结合, 选用海拔、起伏度、基本地貌类型、坡度、坡向、面积-高程积分值和地形剖面等地形指标反映乌蒙山国家级自然保护区地貌特征, 得出以下结论:

1) 保护区海拔980~2 454.7 m, 平均为1 859.9 m, 起伏度390~2 104.7 m, 平均为1 392.1 m, 基本地貌类型以大起伏中山(57.45%)为主, 其次为大起伏亚高山(30.66%); 平均坡度21.1°, 以缓坡(34.83%)和斜坡(31.21%)为主, 其次是缓陡坡(17.57%); 各坡向面积排序为半阴坡(占27.92%)>半阳坡(25.54%)>阴坡(24.55%)>阳坡(21.70%)>平地(0.29%)。

2) 保护区位于山体中上部, 各保护片区具有中部坡度、起伏度小而四周大等特点, 从三江口片区到朝天马、海子坪片区, 海拔、起伏度、坡度、面积-高程积分值等地貌参数平均值具有逐渐减小, 夷平剥蚀面级数逐渐减少的趋势, 其中平均海拔由1 955.8 m降低到1 890.8和1 339.8 m, 平均起伏度由1 092.0 m降低到1 024.0、468.8m, 平均坡度由23.9°降低到22.4°和17.1°, 平均HI由0.549降低到0.516和0.453; 夷平剥蚀面由7级减少至6级和4级; 中山所占面积比例则由55.42%增大到71.69%和100%, 各片区基本地貌类型面积比例差异显著。

3) 保护区面积-高程积分值0.197~0.815, 平均为0.503, 超过80%的区域处于地貌演化的壮年阶段; 保护区及附近地区层状地貌发育, 共有7级夷平剥蚀面, 第I、II、III级为残余古山顶面和古夷平面, 第VII级为金沙江侵蚀阶地面, 第IV、V、VI级为构造剥蚀面, 与区域3次构造旋回相对应, 同

时从三江口到朝天马和海子坪片区的剥蚀面级数逐渐减少, 反映构造隆升幅度随之逐渐减小的趋势。

4) 地貌是森林生态系统类型保护区自然生态环境的基础和重要组成部分, 本研究基于海拔、起伏度、坡度、坡向、面积-高程积分等量化指标以及基本地貌类型划分来探讨乌蒙山国家级自然保护区地貌特征, 其结果不仅能为保护区生物多样性形成、演化及续存机制分析提供支撑, 也能为其他类似保护区的地貌特征研究提供范式参考。

参考文献 (References):

- 毕奔腾, 杨辰, 李景文, 姜建武, 周立新. 2022. 基于数字高程模型的中国岩溶地貌研究进展及前景分析. *中国岩溶*, 41 (2): 318-328. [Bi Benteng, Yang Chen, Li Jingwen, Jiang Jianwu, and Zhou Lixin. 2022. Research Progress and Prospect of Karst Geomorphology in China Based on Digital Elevation Model. *Carsologica Sinica*, 41(2): 318-328.]
- 程维明, 刘楠漪, 王娇, 高文信, 刘建忠. 2018. 全月球形貌类型分类方法初探. *地球科学进展*, 33 (9): 885-897. [Cheng Weiming, Liu Qiangyi, Wang Jiao, Gao Wenxin, and Liu Jianzhong. 2018. A Preliminary Study of Classification Method on Lunar Topography and Landforms. *Advances in Earth Science*, 33(9): 885-897.]
- 程维明, 周成虎, 李炳元, 申元村. 2019. 中国地貌区划理论与分区体系研究. *地理学报*, 74 (5): 839-856. [Cheng Weiming, Zhou Chenghu, Li Bingyuan, and Shen Yuancun. 2019. Geomorphological Regionalization Theory System and Division Methodology of China. *Acta Geographica Sinica*, 74(5): 839-856.]
- Chrobak A, Novotny J, and Strus P. 2021. Geodiversity Assessment as a First Step in Designating Areas of Geotourism Potential. Case Study: Western Carpathians. *Frontiers in Earth Science*, 9(11): 69-78.
- Clark M K, Schoenbohm L M, Royden L H, Whipple K X, Burchfiel B C, Zhang X, Tang W, Wang E, and Chen L. 2004. Surface Uplift, Tectonics, and Erosion of Eastern Tibet from Large-Scale Drainage Patterns. *Tectonics*, 23(1): 610-620.
- 丁智强, 王平, 李玉辉, 庞云海. 2021a. 双河—磨南德水源林自然保护区地貌特征. *中国水土保持科学*, 19 (4): 34-43. [Ding Zhiqiang, Wang Ping, Li Yuhui, and Pang Yuanhai. 2021a. Geomorphological Characteristics of Shuanghe-Monande Nature Reserve Based on Digital Elevation Model Analysis. *Science of Soil and Water Conservation*, 19(4): 34-43.]
- 丁智强, 王平, 李玉辉. 2021b. 基于面积-高程积分值的喀斯特地貌演化动力机制研究. *第四纪研究*, 41 (6): 1546-1557. [Ding Zhiqiang, Wang Ping, and Li Yuhui. 2021b. Dynamic Mechanism of Karst Geomorphology Evolution Based on Hypsometric Index. *Quaternary Sciences*, 41(6): 1546-1557.]
- Duan Y, Pei X, and Zhang X. 2022. The Hypsometric Integral Based on Digital Elevation Model for the Area West of Lvliang Mountains in Loess Plateau, Shanxi, China. *Frontiers in Earth Science*, 10(2): 36-45.
- 方小敏. 2017. 青藏高原隆升阶段性. *科技导报*, 35 (6): 42-50. [Fang Xiaoming. 2017. Phased Uplift of the Tibetan Plateau. *Science & Technology Review*, 35(6): 42-50.]
- 冯金良, 崔之久, 张威, 李德文, 刘耕年, 朱立平. 2004. 云南东川地区层状地貌面的成因. *山地学报*, 22 (2): 165-174. [Feng Jinliang, Cui Zhijiu, Zhang Wei, Li Deiwun, Liu Gennian, and Zhu Liping. 2004. Genesis of the Layered Landform Surfaces in Dongchuan, Yunnan Province. *Mountain Research*, 22(2): 165-174.]
- 高志远, 谢元礼, 王宁练, 蒋广鑫, 周鹏. 2019. 青藏高原地区 3 种全球 DEM 精度对不同地形因子的响应. *水土保持通报*, 39 (2): 184-191. [Gao Zhiyuan, Xie Yuanli, Wang Ninglian, Jiang Guanxin, and Zhou Peng. 2019. Response of Three Global DEM Data Accuracy to Different Terrain Factors in Qinghai-Tibet Plateau. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 39(2): 184-191.]
- Hazaymeh K, Almagbile A, and Alomari A H. 2022. Spatiotemporal Analysis of Traffic Accidents Hotspots Based on Geospatial Techniques. *Isprs International Journal of Geo-Information*, 11 (4): 260-271.
- Hjort J, Tukiainen H, Salminen H, and Hunter M L. 2022. A Methodological Guide to Observe Local-Scale Geodiversity for Biodiversity Research and Management. *Journal of Applied Ecology*, 59(7): 1756-1768.
- Huang Y, Fu J, Wang W, and Li J. 2019. Development of China's Nature Reserves over the Past 60 Years: An Overview. *Land Use Policy*, 80(7): 224-232.
- 金奇豪, 汪倩旻, 李艺, 李杨帆. 2021. 中国沿海陆地自然保护区景观连接度评价. *地理学报*, 76 (11): 2830-2840. [Jin Qihao, Wang Qianmin, Li Yi, and Li Yangfan. 2021. Evaluation of Landscape Connectivity in China's Coastal Terrestrial Nature Reserves Based on an Improved Minimum Cumulative Resistance Model. *Acta Geographica Sinica*, 76(11): 2830-2840.]
- Karna O M, Heino J, Laamanen T, Jyrkankallio M J, Pajunen V, Soininen J, Tolonen K T, Tukiainen H, and Hjort J. 2019. Does Catchment Geodiversity Foster Stream Biodiversity?. *Landscape Ecology*, 34(10): 2469-2485.
- 李炳元, 潘保田, 韩嘉福. 2008. 中国陆地基本地貌类型及其划分指标探讨. *第四纪研究*, 28 (4): 535-543. [Li Bingyuan, Pan Baotian, and Han Jiafu. 2008. Basic Terrestrial Geomorphological Types in China and Their Circumscription. *Quaternary Sciences*, 28(4): 535-543.]
- 李大虎, 丁志峰, 吴萍萍, 梁明剑, 吴朋, 顾勤平, 康清清. 2019. 川滇交界东段昭通-莲峰断裂带的深部结构特征与 2014 年鲁甸 Ms6.5 地震. *地球物理学报*, 62 (12): 4571-4587. [Li Dahu, Ding Zhifeng, Wu Pingping, Liang Mingjing, Wu Peng, Gu Qingping, and Kang Qingqing. 2019. Deep Structure of the Zhaotong and Lianfeng Fault Zones in the Eastern Segment of the Sichuan-Yunnan Border and the 2014 Ludian Ms6.5 Earthquake. *Chinese Journal of Geophysics*, 62(12): 4571-4587.]
- 刘飞, 范建容, 崔兆岩, 程多祥, 唐嘉寅. 2019. 基于 DEM 分形特征的坡度尺度变换模型. *山地学报*, 37 (1): 129-136. [Liu Fei, Fan Jianrong, Cui Zhaoyan, Chen Duoxiang, and Tan Jiayan. 2019. A Model of Re-Scaling Slope Based on DEM Fractal

- Feature. *Mountain Research*, 39(1): 129-136.]
- Liu F, Gao H, Pan B, Li Z, and Su H. 2019. Quantitative Analysis of Planation Surfaces of the Upper Yangtze River in the Sichuan-Yunnan Region, Southwest China. *Frontiers of Earth Science*, 13(1): 55-74.
- Liu F, Hu J, Yang F, and Li X. 2021. Heterogeneity-Diversity Relationships in Natural Areas of Yunnan, China. *Chinese Geographical Science*, 31(3): 506-521.
- 林超, 李昌文. 1985. 阴阳坡在山地地理研究中的意义. *地理学报*, 40(1): 20-28. [Lin Chao, and Li Changwen. 1985. The Significance of Aspect in Mountain Geography. *Acta Geographica Sinica*, 40(1): 20-28.]
- 潘桂堂, 肖庆辉, 陆松年, 邓晋福, 冯益民, 张克信, 张智勇, 王方国, 邢光福, 郝国杰, 冯艳芳. 2009. 中国大地构造单元划分. *中国地质*, 36(1): 1-16, 255, 17-28. [Pan Guitang, Xiao Qinghui, Lu Songnian, Deng Jinfu, Feng Yimin, Zhang Kexin, Zhang Zhiyong, Wang Fangguo, Xing Guangfu, Hao Guojie, and Feng Yanfang. 2009. Subdivision of Tectonic Units in China. *Geology in China*, 36(1): 1-16, 255, 17-28.]
- Sneath M A, Geschke J, Ranipeta A, Jetz W, Yoccoz N G, Korner C, Spehn E M, Fischer M, and Urbach D. 2022. A Hierarchical Inventory of the World's Mountains for Global Comparative Mountain Science. *Scientific Data*, 9(1): 149-157.
- 汤国安, 那嘉明, 程维明. 2017. 我国区域地貌数字地形分析研究进展. *测绘学报*, 46(10): 1570-1591. [Tang Guo'an, Na Jiaming, and Cheng Weiming. 2017. Progress of Digital Terrain Analysis Regional Geomorphology in China. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 46(10): 1570-1591.]
- 唐小平, 陈雪峰, 翁国庆, 张敏, 李晖, 李利国. 2011. 森林资源规划设计调查技术规程 (GB/T26424—2010). 北京: 国家林业局调查规划设计院. [Tang Xiaoping, Chen Xuefeng, Weng Guoqing, Zhang Min, Li Hui, and Li Ligu. 2011. *Technical Regulations for Inventory for Forest Management Planning and Design (GB/T 26424-2010)*. Beijing: Survey & Planning Institute of State Forestry Administration.]
- Tukiainen H, Kiuttu M, Kalliola R, Alahuhta J, and Hjort J. 2019. Landforms Contribute to Plant Biodiversity at Alpha, Beta and Gamma Levels. *Journal of Biogeography*, 46(8): 1699-1710.
- 万晔, 韩添丁, 段昌群, 杨惠安. 2005. 滇西名山点苍山地区地貌结构与特征研究. *冰川冻土*, 27(2): 241-248. [Wan Ye, Han Tianding, Duan Changqun, and Yang Hui'an. 2005. Landform System Structures and Characteristics of the Diancang Mountain Areas in West Yunnan Province. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 27(2): 241-248.]
- 王平, 丁智强, 华红莲, 李玉辉, 段霄. 2021. 云南省老山自然保护区地貌特征及其对土地利用类型分布的影响. *水土保持通报*, 41(5): 287-295. [Wang Ping, Ding Zhiqiang, Hua Honglian, Li Yuhui, and Duan Xiao. 2021. Geomorphological Characteristics and Their Impacts on Land Use Patterns in Laoshan Nature Reserve of Yunnan Province. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 41(5): 287-295.]
- 魏玉燕, 张雄, 胡峰, 贺赤城, 何昌成, 罗旭, 李长超. 2021. 大巴山国家地质公园地质遗迹成因及演化历史分析. *地质论评*, 67(S1): 245-246. [Wei Yuyan, Zhang Xiong, Hu Feng, He Chicheng, He Chancheng, Luo Xu, and Li Changchao. 2021. The Origin and Evolution of Geological Heritages in Dabashan Geopark. *Geological Review*, 67(S1): 245-246.]
- Strahler A N. 1952. Hypsometric (Area-Altitude) Analysis of Erosional Topography. *Bulletin of the Geological Society of America*, 63(3): 1117-1142.
- 闻学泽, 杜方, 易桂喜, 龙锋, 范军, 杨攀新, 熊仁伟, 刘晓霞, 刘琦. 2013. 川滇交界东段昭通-莲峰断裂带的地震危险背景. *地球物理学报*, 56(10): 3361-3372. [Wen Xueze, Du Fang, Yi Guixi, Long Feng, Fan Jun, Yang Panxin, Xiong Renwei, Liu Xiaoxia, and Liu Qi. 2013. Earth Quake Potential of the Zhaotong and Lianfeng Fault Zones of the Eastern Sichuan-Yunnan Border Region. *Chinese Journal Geophys*, 56(10): 3361-3372.]
- 熊礼阳, 汤国安. 2020. 黄土高原沟谷地貌发育演化研究进展与展望. *地球信息科学学报*, 22(4): 816-826. [Xiong Liyang, and Tang Guo'an. 2020. Research Progresses and Prospects of Gully Landform Formation and Evolution in the Loess Plateau of China. *Journal of Geo-Information Science*, 22(4): 816-826.]
- Xiong L, Li S, Tang G, and Strobl J. 2022. Geomorphometry and Terrain Analysis: Data, Methods, Platforms and Applications. *Earth-Science Reviews*, 19(10): 104191-104204.
- 徐丽, 武振良, 侯继华, 李明旭, 何念鹏. 2022. 基于理想参照系和关键指标的自然保护区生态系统质量评估——以额尔古纳、辉河和锡林郭勒国家级自然保护区为例. *自然资源学报*, 37(7): 1735-1747. [Xu Li, Wu Zhengliang, Hou Jihua, Li Mingxu, and He Nianpeng. 2022. Assessment of Ecosystem Quality in Nature Reserves Based on Ideal References and Key Indicators: A Case Study of Erguna, Hui River, and Xilin Gol National Nature Reserves. *Journal of Natural Resources*, 37(7): 1735-1747.]
- Wu R, Possingham H P, Yu G, Jin T, Wang J, Yang F, Liu S, Ma J, Liu X, and Zhao H. 2019. Strengthening China's National Biodiversity Strategy to Attain an Ecological Civilization. *Conservation Letters*, 12(5): 12660-12671.
- 赵彩云, 柳晓燕, 李飞飞, 朱金方, 郭朝丹, 李俊生. 2022. 我国国家级自然保护区主要外来入侵植物分布格局及成因. *生态学报*, 42(7): 2532-2541. [Zhao Caiyun, Liu Xiaoyan, Li Feifei, Zhu Jinfang, Guo Chaodan, and Li Junsheng. 2022. The Distribution Pattern and Determinant Factors of the Main Invasive Alien Plants in National Nature Reserves in China. *Acta Ecologica Sinica*, 42(7): 2532-2541.]
- 张培震, 邓起东, 张国民, 马瑾, 甘卫军, 闵伟, 毛凤英, 王琪. 2003. 中国大陆的强震活动与活动地块. *中国科学 (D辑: 地球科学)*, 33(S1): 12-20. [Zhang Peizheng, Deng Qidong, Zhang Guomin, Ma Jin, Gan Weijun, Min Wei, Mao Fengying, and Wang Qi. 2003. Strong Earthquake Activity and Active Block in Mainland China. *Scientia Sinica (Terrae)*, 33(S1): 12-20.]
- 张世民, 聂高众, 刘旭东, 任俊杰, 苏刚. 2005. 荣经-马边-盐津逆冲构造带断裂运动组合及地震分段特征. *地震地质*, 27(2): 221-233. [Zhang Shiming, Nie Gaozhong, Liu Xudong, Ren Junjie, and Su Gang. 2005. Kinematical and Structural Patterns of Yingjing-Mabian-Yanjin Thrust Fault Zone, Southeast of Tibetan Plateau, and Its Segmentation from Earthquakes. *Seismology and Geology*, 27(2): 221-233.]
- 祝士杰, 汤国安, 李发源, 熊礼阳. 2013. 基于DEM的黄土高原面

积高程积分研究. 地理学报, 68 (7): 921-932. [Zhu Shijie, Tang Guoan, Li Fayuan, and Xiong Liyang. 2013. Spatial Variation of Hypsometric Integral in the Loess Plateau Based on DEM. *Acta Geographica Sinica*, 68(7): 921-932.]

作者贡献声明:

李 伟: 设计研究方案, 野外调查和数据分析, 论文初稿撰写和修改;

王 平: 项目获取, 设计实验方案, 野外调查, 论文审阅和修改;

丁智强: 提出研究思路, 设计实验方案, 野外调查, 论文审阅和修改;

李鹏映、廖正杭: 野外调查和数据分析;

华红莲: 论文审阅和修改;

李玉辉: 论文审阅与修改。

Geomorphic Features of Wumeng Mountain National Nature Reserve Based on ALOS DEM

Li Wei¹, Wang Ping², Ding Zhiqiang³, Li Pengying¹, Liao Zhenghang¹, Hua Hongliang², and Li Yuhui²

(1. Yunnan Wumeng Mountain National Nature Reserve Management Bureau, Zhaotong 657000, China; 2. Department of Geography, Yunnan Normal University, Kunming 651500, China; 3. School of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China)

Abstract: Geomorphic features contribute to variations in regional climate, soil, and other ecological environment factors, which are also an important basis for the biodiversity and evolution of ecosystems. Studying geomorphic features in nature reserves provides a geomorphic basis for resource and environmental management and protecting ecology and biodiversity in these areas. This study revealed the terrain variation, geomorphic patterns, and developmental evolution of the Wumeng Mountain National Nature Reserve by combining quantitative and qualitative methods by investigating geomorphic features and advanced land observing satellite (ALOS) digital elevation model (DEM) terrain analysis. The results indicated that: (1) the reserve elevation was 980~2,454.7 m, with an average of 1,859.9 m, and the undulation was 390~2,104.7 m, with an average of 1,392.1 m. The basic geomorphic types of the reserve were mainly large undulating middle mountains (57.45%), large undulating subalpine mountains (30.66%), and medium undulating mesas (11.17%), with an average slope of 21.1°. The gentle slopes (34.83%) had the highest proportion, followed by slopes (31.21%) and gently steep slopes (17.57%). The area of each aspect was the highest on half shady slopes (27.92%) and the least on sunny slopes (21.70%); (2) the reserve was located at the top part of the mountain, with the slope and undulation in the middle of each area being low and the surrounding area being high. From Sanjiangkou to Chaotianma and Haiziping, the average values of geomorphic parameters, such as elevation, undulation, slope, and hypsometric integral, decreased gradually, and there was a trend of progressive reduction in planation surfaces; (3) the terrain profile indicated seven planation surface levels around the reserve. Among them, levels I-III were the summit surfaces and residual planation surfaces, level VII was the Jinsha River erosional terrace surface, and levels IV-VI were the planation surfaces, corresponding to the three tectonic cycles in the area; (4) the hypsometric integral of the reserve ranged from 0.197 to 0.815, with an average of 0.503, and more than 80% of the area was in adulthood of geomorphic evolution, indicating that the surface erosion dynamics of the area was strong, and there was a greater ecological risk with enhanced human activities. Consequently, future conservation planning should consider differences in the surface dynamics of areas with various basic geomorphic types. Geomorphic features form an important part of the natural ecosystems of forest reserves. The unique and rich geomorphic structure enables the conservation and development of biodiversity along with the elements of the ecological environment on which it depends. Geomorphic diversity supports the analysis of the biological formation, evolution, and persistence mechanisms in reserves and provides geomorphic evidence for studying neotectonic activity in the area.

Keywords: basic geomorphic type; hypsometric integral; terrain profile; ALOS DEM; Wumeng Mountain National Nature Reserve