

全新世以来滇东南地区林火演变规律及驱动机制研究综述

赵旭阳^{1,2}

¹云南师范大学地理学部, 云南 昆明

²云南省高原地理过程与环境变化重点实验室, 云南 昆明

收稿日期: 2026年5月18日; 录用日期: 2026年6月18日; 发布日期: 2026年6月30日

摘要

本研究系统梳理并剖析了滇东南地区全新世森林火灾相关记录数据, 揭示了区域林火的发生规律, 同时探究其与区域气候波动、人类活动进程之间的内在关联。研究得出如下结论: (1) 区域森林火灾发生频次与燃烧强度受自然环境条件制约特征显著, 高强度、高频次林火多出现于冷凉偏干气候阶段, 或是人类活动作用突出的时期; 而林火活动偏少的时段, 大多对应气候暖湿化程度较高、水热条件更为优越的阶段。(2) 从时间尺度来看, 调控森林火灾变化的主导因素发生明显转变。3300 cal yr BP以前, 气候环境变化是驱动区域林火波动的核心要素; 3300 cal yr BP以来, 林火演变转为气候要素与人类活动共同驱动。伴随人类生产生活活动不断加剧, 沉积物炭屑含量持续上升, 足以说明人为因素对森林火灾的影响程度, 已逐步超过自然气候的调控作用。(3) 现代区域炭屑含量的空间分布特征与卫星遥感测量的火灾数据高度一致。这一结果既验证了利用炭屑指标重建区域古火灾历史的科学性与准确性, 也直观反映出炭屑高含量分布区域, 和人类活动聚集区在空间分布上具有高度一致性。

关键词

全新世, 滇东南地区, 炭屑, 森林火灾, 演变规律

A Review of the Evolution Patterns and Driving Mechanisms of Forest Fires in Southeast Yunnan Since the Holocene

Xuyang Zhao^{1,2}

¹Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming Yunnan

²Yunnan Key Laboratory of Plateau Geographical Processes & Environmental Changes, Kunming Yunnan

Received: May 18, 2026; accepted: June 18, 2026; published: June 30, 2026

Abstract

This study systematically reviewed and analyzed the Holocene forest fire-related record data from southeastern Yunnan, clarifying the characteristics of forest fire occurrence and evolution in the region, and exploring its intrinsic connections with regional climate fluctuations and human activity processes. The study reached the following conclusions: (1) The frequency and intensity of regional forest fires are significantly constrained by natural environmental conditions. High-intensity and high-frequency forest fires often occur during cooler and drier climatic phases or periods with prominent human activities; whereas periods with less forest fire activity mostly correspond to stages with higher levels of warm and humid climate, as well as superior hydrothermal conditions. (2) From a long-term evolutionary perspective, the dominant factors regulating forest fire changes have undergone significant changes. Before 3300 cal yr BP, climatic and environmental changes were the core elements driving regional forest fire fluctuations; since 3300 cal yr BP, forest fire evolution has been jointly driven by climatic factors and human activities. With the intensification of human production and living activities, the content of charcoal fragments in sediments has continued to rise, indicating that the impact of human factors on forest fires has gradually exceeded the regulatory role of natural climate. (3) The spatial distribution characteristics of modern regional charcoal fragment content are highly consistent with satellite remote sensing-measured fire data. This result not only validates the scientificity and accuracy of using charcoal fragment indicators to reconstruct regional paleofire history, but also visually reflects that areas with high charcoal fragment content distribution are highly consistent with areas where human activities are concentrated in terms of spatial distribution.

Keywords

Holocene, Southeast Yunan, Charcoal Debris, Forest Fires, Patterns of Evolution

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

火活动广泛参与地球圈层内生物地球化学循环、大气成分演变、土地利用格局变迁以及人类文明发展进程,是陆地生态系统不可或缺的重要构成要素[1]。火情活动能够显著改变森林植被分布格局与物种多样性,同时深刻调控全球碳循环过程,对气候环境演变产生极大作用[2]。高强度森林火情属于危害性极强的自然灾害,不仅严重破坏林区生态结构,还会大幅影响区域生态环境,对民众生产生活造成诸多不利影响。事实上,森林火情的出现并非偶然,而是具备明显的时空分布特征与演化趋势[3]。受监测手段、研究范围与时间尺度等条件制约,目前国内相关研究大多聚焦于短周期火情动态分析,针对长时段火灾演化趋势的探索仍较为欠缺。全新世始于距今约 11,500 年,是第四纪末次冰期结束后形成的间冰期,该阶段全球整体气候由寒凉干燥逐步转向温暖湿润,与此同时,人类各类生产活动也持续干预区域火情的发展进程[4]。由此可见,系统开展全新世古火灾历史研究,对厘清气候波动、生态环境演变与人类活动三者间的耦合关系,具备重要的学术研究价值。在古环境研究领域,湖泊沉积地层内保存的炭屑物质是恢复古火灾演化历程的可靠替代指标,现已在各类古火研究中得到普遍应用。滇东南区域沉积物中的炭屑组合特征,既可以精准还原当地古代森林火灾的爆发频次与燃烧强度,也能够有效追溯区域人类活

动发展历程，为重建历史火情演变过程提供坚实的数据与理论基础。基于此，本研究系统梳理并剖析滇东南地区全新世以来的古火灾相关数据，进一步探究该区域森林火灾的形成诱因与长期演变特征。

2. 研究区概况

滇东南地区位于中国云南省东南部，行政区划主要涵盖文山壮族苗族自治州和红河哈尼族彝族自治州(101°47'~106°12'E, 22°26'~24°48'N)，见图 1。该区域地处云贵高原向桂东丘陵过渡的斜坡地带，地势自西北向东南倾斜，地形起伏显著，海拔高差大，最高点为文山州薄竹山(海拔 2991 m)，最低处海拔仅百米左右[5]。地貌以中山山地为主，喀斯特地貌广泛发育，溶洞、地下河、峰林峰丛等景观普遍。这种巨大的海拔落差不仅塑造了复杂的局地环流，也为不同生态类型的植被分布提供了多样的生境。

作为东亚季风与印度洋季风交互影响的敏感区域，研究区属低纬高原季风气候，四季不明显，干湿季分明，因地势起伏大，气候表现为典型的立体气候特征[6]。复杂的地理环境与独特的气候条件共同造就了丰富的植被类型，各类植被特征各异，并在空间分布上呈现显著的交错带与镶嵌式分布特征，从而形成了高度多样化的生态系统格局。

滇东南的植被类型受地形影响明显，北部及喀斯特区以半湿润常绿阔叶林为主，石灰岩灌丛和藤刺灌丛广布；中南部为季风常绿阔叶林，以壳斗科、樟科、山茶科为主，伴生热带植物；南部河谷为热带季雨林，环境湿热，物种极为丰富；干热河谷的主要植被为稀疏草原[7]。植被种类错综复杂，森林资源丰富多样。

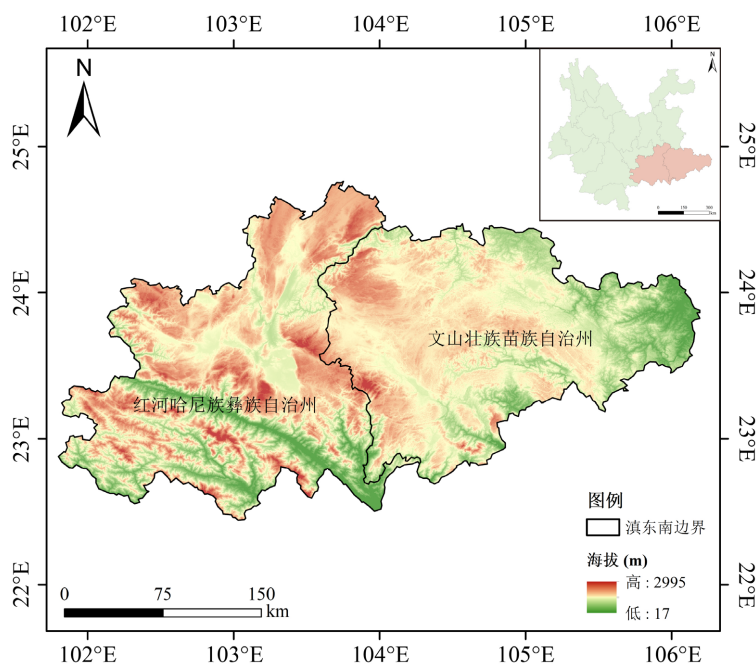


Figure 1. Overview of the research area, elevation data from <https://www.gscloud.cn/>
图 1. 研究区概况，高程数据来源于 <https://www.gscloud.cn/>

3. 研究方法

炭屑是植被燃烧不充分的产物，凭借稳定的化学特性，成为古火灾历史重建工作里极为关键的代用指标。这类物质可长期留存于湖泊、泥炭等各类沉积地层之中，能够完整记录时间尺度数千年乃至数百万年的古火事件，同时还可依据自身形态差异，判别燃烧植被种类与火灾发生类型[8]。炭屑颗粒大小与

火灾发生范围存在明显对应关系, 学界普遍认定粒径 $< 50 \mu\text{m}$ 的炭屑, 能够代表大范围区域性火情, 粒径 $> 50 \mu\text{m}$ 则多用于判定地方性火灾。其中 $< 50 \mu\text{m}$ 及 $50\sim 100 \mu\text{m}$ 的中小型炭屑重量较轻, 可借助大气环流实现远距离搬运, 最终沉积地点大多远离火灾发源地; 而粒径 $> 100 \mu\text{m}$ 的大型炭屑自重偏大, 沉降速度更快, 大多堆积在火源周边区域[9]。

沉积剖面内的炭屑富集程度, 和植被燃烧规模、覆盖范围以及起火频次息息相关, 而植被群落结构与空间分布又受区域自然生存环境制约[10]。综上所述, 利用炭屑开展实验分析, 已然成为恢复古生态环境、探究人为活动环境效应的主流研究方法。本研究基于滇东南地区已发表的炭屑分析数据和森林火灾记录, 在中国知网、万方数据、Web of Science 等数据库中输入全新世、滇东南、炭屑及火灾等关键词搜索建库至 2026 年来关于全新世以来滇东南地区的火灾记录及其规律研究, 排除了研究区域不符、简讯、会议摘要、重复发表文献以及未校正的原始测年数据, 探讨了森林火灾的变化规律及其与气候变化和人类活动的关系, 为该区域森林火灾历史的复原和火灾演变规律的揭示提供科学依据。

4. 森林火灾规律变化研究

4.1. 全新世以来滇东南森林火灾记录

云南大阴洞的遗址孢粉和炭屑记录表明, 森林火灾的高发期与西南季风的强弱变化密切相关, 主要集中在季风减弱时期[11]。本文基于滇东南异龙湖[12] [13]、阳宗海[14]及云南高原湖泊的沉积炭屑、黑炭记录, 结合西南季风区全新世古气候与古火灾已有研究成果, 将滇东南全新世以来森林火灾演化系统划分为六个阶段(见表 1), 这六个阶段清晰地记录了植被演替、气候变化以及森林火灾历史的协同演变过程, 分别是: (1) 11,500~9500 cal yr BP 期间, 以高山松、云南松为主的山地针叶林为优势, 伴生少量耐旱常绿栎灌丛, 整体植被覆盖度低、森林郁闭度差; 林下草本、枯枝落叶等可燃物生物量少、空间连续性弱。沉积物炭屑通量整体极低, 黑炭含量处于全新世最低水平, 仅存在零星自然弱火信号, 无区域性森林火灾事件。新仙女木事件结束后, 西南夏季风初步建立但强度较弱, 区域整体温度偏冷、湿度偏低、气候波动不稳定, 冷暖干湿交替频繁, 水热组合条件较差。此阶段对应早全新世前北方期 - 北方期早期。(2) 9500~7500 cal yr BP 期间, 壳斗科栎属和柯/栲属及樟科等常绿植物开始快速扩张, 针叶林占比逐渐下降, 形成针阔混交林景观; 植被覆盖率较前期明显提升, 林下草本与蕨类植物增多, 可燃物开始缓慢累积。沉积物炭屑浓度与通量较早期略有上升, 火灾活动仍以低频、小规模自然火情为主, 未出现大范围高强度燃烧记录。西南季风强度显著增强, 区域气温持续回升、降水稳步增加, 气候由冷凉偏干向温和偏暖湿过渡, 水热条件趋于稳定, 此时对应北方期晚期 - 大西洋期早期。(3) 7500~6000 cal yr BP 期间, 亚热带季风常绿阔叶林全面发育, 常绿栎属、柯/栲属、樟科、山茶科等为优势建群种, 森林茂密、郁闭度高, 区域植被覆盖度达到早全新世最高水平; 林下枯枝落叶、草本、蕨类可燃物大量富集, 物质基础充足。湖泊沉积炭屑通量明显升高, 黑炭含量持续增加, 为早全新世火灾活跃时段, 区域性自然火灾频发。西南季风接近鼎盛状态, 区域整体温暖湿润、水热条件优越, 温度与降水组合达到最优状态, 属于全新世气候适宜期前期。(4) 6000~3300 cal yr BP 期间, 季风常绿阔叶林达到全新世鼎盛, 原生常绿阔叶森林覆盖率最高、群落结构稳定, 林下可燃物储量丰厚、分布连续。沉积炭屑与黑炭记录显示, 该时段火灾频率整体相对较高, 炭屑通量维持在高值区间, 自然火源驱动下区域森林火灾频繁发生, 是近 6000 年以来火灾活跃度较强的阶段。西南夏季风强度鼎盛, 滇东南全年温暖湿润、降水丰沛、气候稳定性最强, 为中全新世典型气候适宜期。(5) 3300~800 cal yr BP 期间, 常绿阔叶林显著退缩、群落简化, 云南松等针叶林大面积扩张, 区域植被覆盖度显著下降, 山地形成针叶林 - 疏灌丛 - 草坡复合景观; 林下可燃物生产量大幅减少、可燃物连续性差, 物质供给严重不足, 沉积物炭屑通量与黑炭含量降至近 6000 年以来最低值, 火灾频次极低, 无大规模区域性火灾, 是全新世火灾最平静的时段。西南夏季风快速衰弱,

区域气候发生显著转型,整体气温下降、降水减少、气候冷干化特征突出,季节性干旱有所增强。(6) 800 cal yr BP~至今,区域气候回暖增湿,常绿阔叶林次生植被逐步恢复,同时云南松人工林、经济林、次生灌草广泛分布,林下芒草、蕨类等易燃物大量繁衍,植被覆盖度与可燃物总量再次回升;叠加大规模农业植被与田间草本秸秆,可燃物类型更加多样。沉积炭屑与黑炭含量出现跳跃式激增,炭屑通量达到全新世历史峰值,火灾频率、燃烧强度与过火面积均为过去 6000 年以来最高;孢粉记录中农作物花粉显著增多,指示强烈人类活动干扰。此阶段气候整体回升为温暖湿润的格局,同时明清以来人口快速增长,近现代气候暖干波动叠加,自然气候背景适宜植被发育,人为火源持续增强。

Table 1. Forest fires in southeast Yunnan since the Holocene

表 1. 全新世以来滇东南森林火灾情况

年代	炭屑浓度	气候状况	人类活动
11,500~9500 cal yr BP	极低	偏冷偏干	无
9500~7500 cal yr BP	略有上升	轻微增暖增湿	无
7500~6000 cal yr BP	增高	增暖增湿	无
6000~3300 cal yr BP	增高	增暖增湿	轻微
3300~800 cal yr BP	降低	变冷变干	加强
800 cal yr BP~至今	增高	回暖增湿	强烈

炭屑浓度充分反映了森林火灾的发生情况,由研究可知,在不受人类活动干扰的情况下,炭屑浓度高低与气候变化呈现出耦合特征,其中炭屑浓度较高的时期对应着气候较为温暖期,而炭屑浓度较低的时期对应着气候较冷的时期,这可能与燃烧物质的多寡有关[15]。在气候温暖适宜期,树木生长旺盛,植被覆盖率较高,因而可燃物质也较多,易发生森林火灾;寒冷时期,许多植物失去了适宜生长的自然条件,植被覆盖率降低,燃烧物质匮乏,因而森林火灾频次亦呈减少状态。结合广南大阴洞遗址[16]、金平龙脖河矿冶遗址[17]、文山小龙遗址中发现的碳化稻谷、烧骨及灰烬层以及历史文献记录[18]和滇东南地区 3300 cal yr BP 以来原始森林快速退化现象,此时森林火灾的发生受到人类活动与气候的双重影响,但是人类活动对森林火灾的影响明显大于气候变化[19]。1253AD 蒙古灭大理国后,元朝在云南设立行省,推行军事屯垦,滇东南地区的人口和农业开发开始增加,为了解决人口数量增加带来的粮食问题,农民实行刀耕火种,从而造成该时段的炭屑含量的升高[20]。

政府间气候变化专门委员会(IPCC)报告指出,全新世晚期是气候变化与人类活动相互作用最明显的一段时期,同时也是与当今乃至今后气候变化关系最为密切的时期之一[21],而森林火灾与气候变化和人类活动密切相关,我们的研究表明过去 6000 年尤其是过去 2000 年以来,炭屑浓度大幅升高,所以现在对于森林火灾的控制与预防主要从人类活动着手,禁止人类对森林的不良行为并加强火灾监测。

4.2. 现代滇东南森林火灾情况

根据对表土炭屑的研究表现(见表 2),滇东南文山州北部广南、富宁、丘北及红河州北部建水、石屏、弥勒等区域,以云南松林植被为主,整体火灾频次高、强度大[22],表土中 0~50 μm 炭屑含量可达 1800~2500 粒/g、占比 65%~75%, 50~100 μm 中粒径炭屑为 400~600 粒/g、占比 15%~20%, >100 μm 炭屑达 150~220 粒/g、占比 5%~10%,大颗粒木本炭屑富集,指示局地高强度人为森林火灾活动;文山州中部砚山、文山市与红河州中部开远、蒙自等地,以松阔混交林为主,火灾强度与频次中等,0~50 μm 炭屑含量 1000~1500 粒/g、占比 70%~80%, 50~100 μm 炭屑 200~350 粒/g、占比 10%~15%, >100 μm 炭屑 50~120 粒/g、占比

3%~5%，草本炭屑占比上升，多对应农业用火与中等强度火情；低火区为文山州南部马关、麻栗坡、西畴及红河州南部屏边、河口、元阳一带，植被以亚热带常绿阔叶林为主，整体火灾活动微弱、以自然低强度火情为主，0~50 μm 炭屑仅 300~600 粒/g、占比 80%~85%，50~100 μm 炭屑 50~150 粒/g、占比 8%~12%，>100 μm 炭屑含量普遍低于 50 粒/g、占比不足 3%，处于自然背景水平，整体来看，滇东南表土炭屑粒径越大、大颗粒占比越高，对应区域现代森林火灾强度与频次越高，从南部低火区到北部高火区呈现微炭屑占比递减、中大粒径炭屑浓度与占比递增的规律，炭屑粒径空间分布与现代火灾风险、植被类型及人类用火活动高度耦合。所以对于今后森林火灾的预防要从人类用火活动强烈的地方着手，加强火灾监测，同时制定完善的火灾应对计划、加强建设火灾应对设施。

Table 2. Forest fires in modern southeast Yunnan

表 2. 现代滇东南森林火灾情况

研究区域	炭屑粒度			其他
	0~50 μm	50~100 μm	>100 μm	
滇东南北部	高	中等	低	炭屑浓度最高
滇东南中部	高	低	极低	
滇东南南部	高	低	极低	

5. 结论

全新世以来滇东南森林火灾的发生受到气候变化和人类活动的双重影响，11,500~6000 cal yr BP 以来，气候变化对森林火灾的影响最大，温暖时期炭屑浓度较高，对应着高频率的森林火灾事件，寒冷时期炭屑浓度较低，对应着低频率的森林火灾事件；6000 cal yr BP 以来，人类活动逐渐增强，炭屑浓度升高，可见人类活动对森林火灾的影响较大，甚至远远超出了气候变化的影响。现有现代炭屑相关研究表明，细颗粒炭屑占比偏高可指示大范围区域性火灾活动。滇东南北部区域炭屑沉积浓度整体更高，同时该地带人类生产生活活动强度突出，由此证实人为活动对当地森林火灾发生发展存在显著驱动作用。本研究结合古环境记录与现代观测数据，双重证实人类活动是影响区域森林火灾演化的重要因素。据此建议，针对人口聚集、人为用火频繁的重点区域强化火情常态化监测管控，以此科学防范森林火灾灾害。

目前学界针对区域森林火灾的系统性探究尚且不足，受观测技术条件限制，现存现代火情监测记录仅能追溯数十年。依托炭屑代用指标开展长时序森林火灾演变研究，能够有效还原火灾演化历程、厘清其动态变化特征，具备极高的科研价值。本研究以滇东南全新世阶段为研究时段，系统剖析该区域森林火灾活动与气候波动、人为活动之间的内在关联，阐明自然环境演变与人类社会活动的交互作用，厘清不同历史时期人类行为对森林火灾发生频次与分布格局的调控机制。相关研究成果不仅可为区域林地生态保护、林业资源统筹管理提供理论支撑，也能为后续当地生态治理、林区管护以及火情预警防控工作提供可靠的数据参考与实践思路。

参考文献

- [1] Bowman, D.M.J.S., Balch, J.K., Artaxo, P., Bond, W.J., Carlson, J.M., Cochrane, M.A., *et al.* (2009) Fire in the Earth System. *Science*, **324**, 481-484. <https://doi.org/10.1126/science.1163886>
- [2] Pausas, J.G. and Keeley, J.E. (2009) A Burning Story: The Role of Fire in the History of Life. *BioScience*, **59**, 593-601. <https://doi.org/10.1525/bio.2009.59.7.10>
- [3] 云南省地方志编纂委员会. 云南省志·地貌志[M]. 昆明: 云南人民出版社, 1998.

- [4] 王宇. 云南山地气候[M]. 昆明: 云南科技出版社, 2005.
- [5] 吴征镒, 朱彦丞. 云南植被[M]. 北京: 科学出版社, 1987.
- [6] Whitlock, C. and Larsen, C.P. (2001) Charcoal as a Fire Proxy. In: *Tracking Environmental Change Using Lake Sediments*, Kluwer Academic Publishers, 75-97.
- [7] Patterson, W.A., Edwards, K.J. and Horton, D.G. (1987) Fire History of the Western United States Inferred from Charcoal in Lake Sediments. *Quaternary Science Reviews*, **6**, 243-261.
- [8] Whitlock, C. and Anderson, R.S. (2003) Fire History and Climate Change: Lessons from the Past. *Annual Review of Environment and Resources*, **28**, 387-424.
- [9] 张俞, 杨青, 杨帆, 等. 云南大阴洞遗址 MIS3 阶段以来的环境变迁与人类活动[J]. 第四纪研究, 2024, 44(1): 29-47.
- [10] 张俞, 蒙红卫, 黄林培, 等. 滇南异龙湖流域近 150 年森林火灾史及其驱动因素[J]. 生态学杂志, 2025, 44(2): 345-353.
- [11] 李凯, 倪健. 云南异龙湖沉积物孢粉记录揭示的末次盛冰期以来植被与气候变化[J]. 第四纪研究, 2024, 44(1): 48-58.
- [12] 余晓珊, 蒙红卫, 黄林培, 等. 人类活动影响下的云南阳宗海近百年有机碳与黑炭湖泊沉积记录[J]. 湖泊科学, 2025, 37(4): 1123-1132.
- [13] Marlon, J.R., Bartlein, P.J., Danialu, A., Harrison, S.P., Maezumi, S.Y., Power, M.J., *et al.* (2013) Global Biomass Burning: A Synthesis and Review of Holocene Paleofire Records and Their Controls. *Quaternary Science Reviews*, **65**, 5-25. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2012.11.029>
- [14] 张潇, 黄康有, 贾鑫, 等. 末次冰期以来中国西南地区火灾活动历史及其对植被生态系统的影响[J]. 第四纪研究, 2024, 44(1): 59-71.
- [15] Li, H., Jing, Y., Zhang, H., Shang, X., Duan, L., Li, H., *et al.* (2024) Human-Altered Water and Carbon Cycles in the Lake Yangzong Basin since the Yuan Dynasty. *Water*, **16**, Article 1271. <https://doi.org/10.3390/w16091271>
- [16] 司马迁. 史记·西南夷列传(点校本) [M]. 北京: 中华书局, 1982.
- [17] 常璩. 华阳国志·南中志[M]. 任乃强, 校注. 上海: 上海古籍出版社, 1987.
- [18] 云南少数民族古籍整理出版规划办公室. 云南少数民族史诗集成[M]. 昆明: 云南人民出版社, 2003.
- [19] IPCC (2023) Synthesis Report of the Sixth Assessment Report (AR6). United Nations. <https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar6/>
- [20] 张淑荣, 沈慧, 李小强, 等. 云南现代山火炭屑形态分析及其环境意义[J]. 第四纪研究, 2024, 44(1): 214-225.
- [21] 赵东玥, 吕峥, 张泽涛, 等. 云南大阴洞遗址先民经济模式的稳定同位素分析[J]. 人类学学报, 2022, 41(2): 295-307.
- [22] 韩汝玢, 李晓岑. 云南古代青铜技术的起源与发展[J]. 自然科学史研究, 2007, 26(2): 129-140.