

藏东南地区晚白垩世隆升剥蚀与构造动力学研究

常 龙

桂林理工大学地球科学学院, 广西 桂林

收稿日期: 2026年5月4日; 录用日期: 2026年6月15日; 发布日期: 2026年6月24日

摘 要

藏东南地区地处青藏高原东南缘, 是新特提斯洋演化、印度 - 欧亚板块早期汇聚及原青藏高原生长的关键构造节点, 其晚白垩世(96~66 Ma)的隆升剥蚀过程记录了区域构造体制转换的核心信息, 对理解青藏高原早期生长模式具有重要意义。本文系统整合前人低温热年代学、沉积学、岩浆岩与构造解析成果, 开展多学科数据综合研究, 建立藏东南及邻区晚白垩世三阶段隆升剥蚀与构造演化模型, 明确区域隆升剥蚀的阶段性和空间差异及其动力学机制。研究表明, 藏东南晚白垩世隆升剥蚀可划分为晚白垩世早期(96~80 Ma)初始隆升剥蚀、中期(80~67 Ma)快速隆升剥蚀、晚期(67~66 Ma)构造调整三个阶段, 整体呈现阶段性增强与空间差异性分布特征。构造动力学分析显示, 区域隆升剥蚀受新特提斯洋北向俯冲、洋脊俯冲 - 板片窗效应、弧后收缩与地壳加厚共同控制, 其中洋脊俯冲引发的软流圈上涌与壳幔相互作用为核心驱动力, 班公湖 - 怒江缝合带等先存构造薄弱带控制隆升剥蚀的空间格局。本文作为系统性综合研究, 在已有工作基础上构建统一构造框架, 可为青藏高原早期构造演化与造山带动力学研究提供更完整的理论依据。

关键词

藏东南, 晚白垩世, 隆升剥蚀, 低温热年代学, 构造动力学

Study on Late Cretaceous Uplift, Erosion, and Tectonic Dynamics in Southeastern Xizang

Long Chang

College of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin Guangxi

Received: May 4, 2026; accepted: June 15, 2026; published: June 24, 2026

Abstract

The southeastern part of Xizang is located on the southeastern edge of the Qinghai-Xizang Plateau. It is a key tectonic node for the evolution of the Neotethis Ocean, the early convergence of the Indian-Eurasian Plate, and the growth of the original Qinghai-Xizang Plateau. The uplift and erosion process in the Late Cretaceous (96~66 Ma) recorded the core information of the regional tectonic system transformation and is of great significance for understanding the early growth pattern of the Qinghai-Xizang Plateau. This paper systematically integrates the previous achievements in low-temperature thermochronology, sedimentology, magmatic rock and structural analysis, conducts a comprehensive study of multi-disciplinary data, and establishes a three-stage uplift and erosion and structural evolution model of the Late Cretaceous in southeastern Xizang and its adjacent areas, clarifying the phased, spatial differences and dynamic mechanisms of regional uplift and erosion. Studies show that the uplift and erosion of the Late Cretaceous in southeastern Xizang can be divided into three stages: the initial uplift and erosion in the early late Cretaceous (96~80 Ma), the rapid uplift and erosion in the middle stage (80~67 Ma), and the structural adjustment in the late stage (67~66 Ma). Overall, it presents the characteristics of phased intensification and spatial differential distribution. Tectonic dynamics analysis shows that regional uplift and erosion are jointly controlled by the northward subduction of the Neotethes Ocean, the subduction-plate window effect of the ridge, post-arc contraction and crustal thickening. Among them, the asthenosphere upwelling and crust-mantle interaction triggered by ridge subduction are the core driving forces, and the spatial pattern of uplift and erosion is controlled by the existing weak tectonic zones such as the Bangong Lake-Nujiang suture zone. As a systematic and comprehensive study, this paper builds a unified tectonic framework on the basis of existing work, which can provide a more complete theoretical basis for the research on the early tectonic evolution and orogenic belt dynamics of the Qinghai-Xizang Plateau.

Keywords

Southeastern Xizang, Late Cretaceous, Uplift and Erosion, Low-Temperature Thermochronology, Tectonic Dynamics

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

青藏高原是全球最年轻、海拔最高的高原，其形成演化是地球科学核心问题，也是解析板块碰撞、气候变化与区域动力学的关键窗口。藏东南位于高原东南缘，是印度-欧亚板块碰撞前缘与新特提斯洋闭合的核心变形区，复杂构造与地貌为研究高原隆升-剥蚀机制提供了天然场所。晚白垩世是青藏高原早期演化的关键转折期，但该时期藏东南构造背景与动力学机制仍缺乏统一认识，已有成果多聚焦新生代晚期，对晚白垩世构造-剥蚀过程的整体梳理不足。

近年来，低温热年代学、沉积学与地球物理等方法推动了区域地质研究，但已发表数据多分散于不同构造单元、不同研究主题，缺乏系统整合与对比，尚未形成统一的晚白垩世构造演化框架。因此，本文以综合研究为定位，系统收集与整合藏东南八宿、次林错、三江、雅鲁藏布江缝合带等关键区域已发表数据如图1，通过对比、归纳与解析，提出覆盖全区的晚白垩世三阶段隆升剥蚀演化模型，明确各阶段隆升速率、剥蚀强度、沉积响应与岩浆活动特征，并深入探讨多板块相互作用下的构造动力学机制，为青藏高原早期生长与造山带动力学研究提供统一、可检验的构造框架。

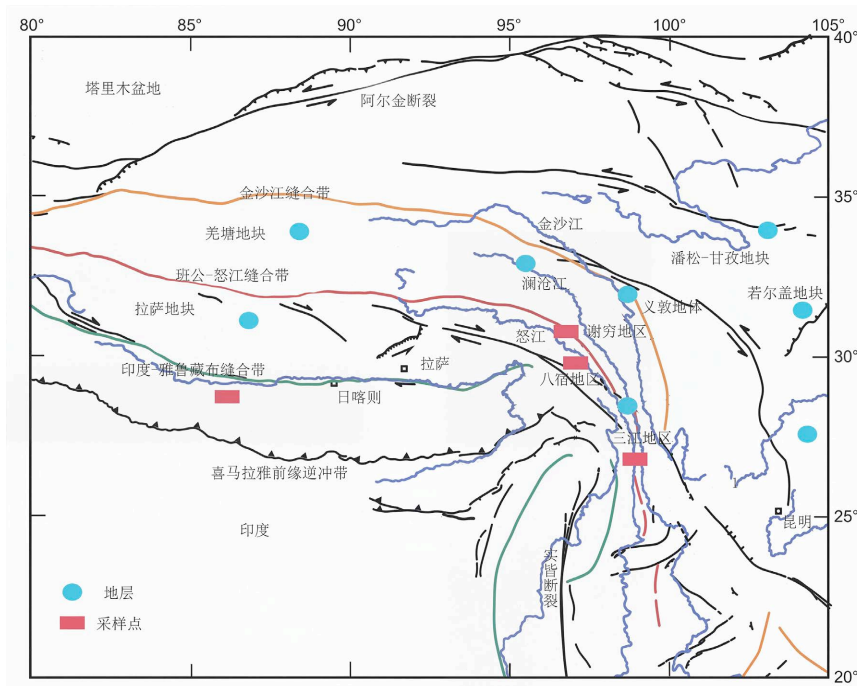


Figure 1. Geological map of the Southeastern Xizang region (The base map was modified according to [10])

图 1. 西藏区域地质图(底图根据[10]修改)

2. 区域地质背景

2.1. 区域构造格架

藏东南地区在晚白垩世的构造单元划分主要受控于新特提斯洋的俯冲作用及印度 - 欧亚大陆的碰撞过程。根据区域地质研究, 该区域可划分为多个构造单元, 包括冈底斯岩浆带、喜马拉雅地块以及羌塘地块等。这些构造单元之间以大型断裂系统为界, 如雅鲁藏布江缝合带(IYS)和班公湖 - 怒江缝合带(BNS)如图 1, 其中雅鲁藏布江缝合带作为新特提斯洋闭合的主边界, 在晚白垩世期间对区域构造演化起到了关键作用。断裂系统的分布呈现出近东西向展布的特点, 其性质多为逆冲断层或走滑断层, 反映了区域应力场以挤压为主的特征[1]。这种构造格局不仅控制了沉积盆地的形成与演化, 还对隆升剥蚀过程产生了深远影响。例如, 断裂活动导致的地壳缩短与增厚直接促进了山脉的隆升, 而断裂带附近的高地形则加剧了剥蚀作用的强度[2]。

此外, 藏东南地区在晚白垩世还发育了一系列韧性剪切带, 这些剪切带的形成与区域动力学机制密切相关。研究表明, 冈底斯岩浆带中段的韧性剪切带可能形成于晚白垩世至古近纪期间, 其动力学机制与印度板块向北俯冲引起的地壳变形有关。这些韧性剪切带的存在不仅改变了区域的构造形态, 还对地表剥蚀过程产生了重要影响[3]。例如, 剪切带内的高应变速率通常伴随着快速剥蚀作用, 从而导致地表地貌的显著变化。因此, 区域构造格架通过对断裂系统、韧性剪切带以及构造单元的空间配置进行控制, 进一步影响了藏东南地区晚白垩世的隆升剥蚀模式。

2.2. 地层特征

藏东南地区晚白垩世地层的岩性组合、沉积序列及厚度变化为研究该时期的隆升剥蚀过程提供了重要线索。根据前人研究, 该地区晚白垩世地层主要由海相沉积岩和少量陆相沉积岩组成, 其岩性包括砂

岩、泥岩、灰岩以及火山碎屑岩等。沉积序列表现出从下至上由深海相到浅海相再到陆相的转变，这种变化反映了区域构造活动对沉积环境的控制作用。例如，晚白垩世早期以深海相浊积岩为主，而晚期则逐渐过渡为浅海相碳酸盐岩和陆相砾岩，表明该时期可能存在多期次的构造隆升事件[4]。

Table 1. Main stratigraphic units and characteristics of the Late Cretaceous in Southeastern Xizang

表 1. 藏东南地区晚白垩世主要地层单元及特征

区域	地层单元	沉积相	主要岩性	时代	沉积响应意义
八宿地区	竟柱山组	陆相	砾岩、含砾砂岩、砂岩互层	晚白垩世晚期 (70~66 Ma)	记录区域快速隆升剥蚀，碎屑物源来自班公湖-怒江缝合带岩体
雅鲁藏布江缝合带南侧	宗卓组	海相(海沟沉积)	砂岩、页岩、硅质岩互层，含混杂岩	晚白垩世早期 (96~80 Ma)	记录印度-欧亚板块初始碰撞初期的物质交换与构造变形
拉萨地块南部	设兴组	海陆过渡相-陆相	砂岩、泥岩、砾岩，顶部为厚层辫状河砾岩	晚白垩世中期 (80~70 Ma)	反映区域快速抬升，海退过程及隆升剥蚀加剧
三江地区(德钦、维西)	曲嘎寺组	海相-海陆过渡相	灰岩、砂岩、页岩，含火山碎屑岩	晚白垩世早期-中期(96~67 Ma)	记录岩浆活动与构造隆升的沉积响应，物源来自澜沧江断裂带两侧
谢穷地区	西西岩群 (侵入体围岩)	浅变质海相	变质砂岩、板岩、千枚岩	新元古代-晚白垩世	记录晚白垩世花岗岩侵入与区域构造变形

地层厚度的空间变化也为揭示隆升剥蚀过程提供了重要信息。研究表明，藏东南地区晚白垩世地层的厚度在南北方向上存在显著差异，南部地区厚度较大，而北部地区厚度较小，这种差异可能与区域构造活动有关。例如，南部靠近雅鲁藏布江缝合带的地层由于受到强烈的构造挤压作用，沉积物供应充足，因而厚度较大；而北部地区则因远离构造活动中心，沉积物供应有限，导致地层厚度较小。此外，地层记录中的沉积间断和不整合面也为识别隆升剥蚀事件提供了直接证据见表 1。例如，某些地区的地层中存在明显的角度不整合，表明该时期曾发生过大规模的隆升剥蚀作用，导致下部地层被剥蚀后再接受新的沉积[5]。综上所述，藏东南地区晚白垩世地层的岩性组合、沉积序列及厚度变化不仅记录了区域构造活动的历史，还为研究隆升剥蚀过程提供了重要的沉积学依据[6] [7]。

2.3. 岩浆活动

晚白垩世藏东南地区的岩浆活动集中分布于冈底斯岩浆带和喜马拉雅地块，其岩石类型多样，包括闪长岩、花岗闪长岩、花岗岩及其脉体等。这些岩浆岩的形成时代主要集中在 92.4~86.9 Ma 之间，属于晚白垩世早期岩浆作用的产物。地球化学分析显示，闪长岩和花岗闪长岩具有高钾钙碱性偏铝质特征，富集大离子亲石元素(Rb、Ba)和轻稀土元素(LREE)，亏损高场强元素(Nb、Ta)，表现出典型的弧岩岩浆特征。相比之下，花岗岩类岩石则具有更高的 SiO₂ 含量(72.09%~74.02%)，属于高钾钙碱性过铝质 S 型花岗岩，其成因可能与地壳部分熔融有关[8]。

岩浆活动的时空分布与区域构造动力学机制密切相关。研究表明，冈底斯岩浆带中的晚白垩世岩浆作用与新特提斯洋的北向俯冲有关，俯冲板片释放的流体引发了上覆地幔楔的部分熔融，从而形成了具有弧岩岩浆特征的闪长岩和花岗闪长岩[9]。与此同时，喜马拉雅地块中的花岗岩类岩石则可能与地壳加厚过程中的部分熔融有关，其形成时代略晚于冈底斯岩浆带的岩浆作用，反映了区域构造活动由北向南的迁移趋势。

岩浆活动对藏东南地区晚白垩世的隆升剥蚀过程产生了重要影响。一方面，大规模的岩浆侵入导致地壳增厚，进而促进了区域隆升；另一方面，岩浆活动伴随的热事件加速了地壳物质的重熔与再循环，为地表剥蚀作用提供了物质基础[10]。此外，岩浆岩的分布特征还揭示了区域应力场的变化规律，例如，

冈底斯岩浆带中岩脉的走向多与区域主压应力方向垂直,表明岩浆活动受区域构造应力场的严格控制。因此,晚白垩世藏东南地区的岩浆活动不仅是区域构造动力学的重要体现,还在一定程度上控制了隆升剥蚀的时空格局[11]。

3. 晚白垩世隆升剥蚀特征及证据

3.1. 隆升剥蚀的时间序列特征

(1) 晚白垩世早期(96~80 Ma): 初始隆升剥蚀阶段

该阶段是藏东南地区晚白垩世隆升剥蚀的起始阶段,区域构造活动相对缓和,隆升速率较慢,剥蚀作用较弱,整体处于海相-海陆过渡相沉积环境。

低温热年代学数据显示,该阶段区域冷却速率较慢,八宿地区锆石(U-Th)/He (ZHe)年龄主要集中在126~188 Ma,磷灰石裂变径迹(AFT)年龄为86~80 Ma,对应冷却速率约1.5°C~2.0°C/Myr,剥蚀速率约0.03~0.05 km/Myr。三江地区德钦、维西一带的AFT年龄为120~80 Ma,对应剥蚀速率为0.07~0.1 km/Myr,呈现出脉冲式剥蚀特征。

该阶段隆升剥蚀的主要驱动因素是新特提斯洋北向俯冲引发的弧后收缩,地壳开始缓慢加厚,地表逐渐抬升,海退过程逐步启动,剥蚀作用主要集中在岩浆弧及缝合带附近,整体强度较弱[12]。

(2) 晚白垩世中期(80~67 Ma): 快速隆升剥蚀阶段

该阶段是藏东南地区晚白垩世隆升剥蚀的鼎盛阶段,区域构造活动强烈,地壳加厚加剧,隆升速率与剥蚀速率显著提高,海相沉积基本消失,整体转变为陆相沉积环境。

低温热年代学数据显示,该阶段区域冷却速率大幅提升,八宿地区通过QTQt热史反演获得80~55 Ma期间快速冷却过程,其中80~67 Ma阶段冷却速率约4°C/Myr,对应剥蚀速率0.1~0.2 km/Myr。次林错岩体通过Pecube三维热动力学模拟,揭示了67~58 Ma快速剥蚀事件的起始阶段(80~67 Ma),冷却速率约3.5°C~4.0°C/Myr,剥蚀速率0.08~0.15 km/Myr。三江地区德钦、维西一带的AHe年龄集中在80~67 Ma,剥蚀速率为0.15~0.3 km/Myr,其中德钦地区剥蚀速率明显高于维西地区,反映了区域剥蚀的空间差异性[13]。

该阶段岩浆活动强烈,谢穷淡色花岗岩体(88.5±0.7 Ma、85.8±2.3 Ma)、次林错花岗岩体(83~79 Ma)等均形成于该阶段,岩浆底侵与地壳加厚共同驱动地表快速隆升,同时区域挤压变形加剧,逆冲断裂活动强烈,进一步促进了隆升剥蚀过程。

(3) 晚白垩世晚期(67~66 Ma): 构造调整与持续剥蚀阶段

该阶段藏东南地区构造活动相对缓和,区域构造体制开始从挤压向伸展转换,隆升速率有所减缓,但剥蚀作用仍持续进行,局部伴随岩浆活动与构造调整。

低温热年代学数据显示,该阶段区域冷却速率略有下降,八宿地区AHe年龄集中在67~66 Ma,冷却速率约3.0°C~3.5°C/Myr,剥蚀速率约0.08~0.1 km/Myr。次林错岩体ZHe年龄为67~58 Ma,其中67~66 Ma阶段剥蚀速率约0.05~0.08 km/Myr,较中期有所下降。

该阶段构造调整主要表现为局部伸展构造的发育,正断裂与地堑盆地开始形成,这与地壳加厚后的构造减压有关,同时新特提斯洋俯冲接近尾声,板块汇聚速率有所减缓,导致隆升速率下降,但前期隆升形成的地形高差仍驱动剥蚀作用持续进行[14]。

3.2. 低温热年代学证据

低温热年代学方法作为一种有效的定量研究工具,在揭示藏东南地区晚白垩世隆升剥蚀历史方面具有不可替代的作用。磷灰石裂变径迹(AFT)和锆石(U-Th)/He(ZHe)等低温热年代学技术能够记录岩石在冷

却过程中所经历的温度变化历史，从而为隆升剥蚀事件的时空特征提供关键约束。磷灰石裂变径迹方法主要适用于 60°C 至 120°C 的温度区间，而锆石(U-Th)/He 方法则对 170°C 至 200°C 的温度范围更为敏感，这两种方法的结合使用可以有效覆盖地壳浅部的热历史信息[15]。

针对藏东南地区的晚白垩世隆升剥蚀年龄的系统统计如表 2。可见快速剥蚀时间主要大约发生在 120 Ma~75 Ma。

若尔盖地块：刘树根等(2019)通过锆石(U-Th)/He (ZHe)、磷灰石裂变径迹(AFT)的测试方法得出来了 126 Ma~78 Ma 的年龄[16]。

羌塘盆地双湖地区南部：Li Yalin *et al.* (2010)通过 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年测试方法得出来了 75.9 ± 0.5 Ma 的年龄[17]。

乌托 - 南汀河 - 鹤庆剖面：Wu Limin *et al.* (2024)通过磷灰石裂变径迹(AFT)测试方法得出来了 83.6 ± 13.6 Ma 的年龄[18]。

澜沧江上游：曾宪阳(2024)通过 AHe、ZHe 测试方法得出来了~72.85 Ma 的年龄[19]。

中甸弧 - 雪鸡坪矿区：张静静(2022)通过锆石(U-Th)/He、磷灰石(U-Th)/He 测试方法得出来了 127.1 ± 1.1 的年龄[20]。

松潘 - 甘孜褶皱带：Deng *et al.* (2012)通过锆石裂变径迹(ZFT)、锆石(U-Th)/He (ZHe)、锆石 U-Pb 测试方法得出来了 104.7~68 Ma 的年龄[21]。

拉萨分水岭南侧汇水区：He *et al.* (2026)通过磷灰石裂变径迹(AFT)、AHe、AFT 测试方法得出来了 72.6~68 Ma 的年龄[22]。

四川盆地南缘、楚雄盆地北部：姜磊等(2019)通过重矿物组合、金红石地球化学、金红石微量元素、金红石 Zr 温度计测试方法得出来了 80~70 Ma 的年龄[23]。

基于这些数据的热模拟结果进一步显示，藏东南地区在晚白垩世的剥蚀量可能达到数千米，这与沉积学证据形成了良好的互补关系。

值得注意的是，低温热年代学数据的解释需要结合区域地质背景和其他年代学方法进行综合评估。例如，藏南拆离系的活动历史对低温热年代学信号的干扰需要进行详细分析，以避免对冷却事件的误判。尽管如此，现有数据已足以证明，藏东南地区在晚白垩世时期经历了多期次的隆升剥蚀事件，这些事件与区域构造变形和岩浆活动密切相关，共同塑造了该地区的地貌格局。

3.3. 隆升剥蚀数据的局限性与不确定性

本次研究基于低温热年代学与区域地质记录，揭示了藏东南晚白垩世隆升剥蚀时空特征，但数据与模型存在明显局限性与不确定性。不同区域热年代学结果差异显著，八宿、澜沧江上游、若尔盖地块及松潘 - 甘孜褶皱带的年龄数据分散，主要源于测试方法封闭温度不同、采样位置不均、新生代构造叠加及物源与沉积区记录解耦，导致热信号被改造或滞后记录。QTQt 与 Pecube 模拟存在固有假设与多解性，前者忽略热扰动与走滑作用，速率误差可达±30%；后者受输入参数不确定性影响，结果易被放大偏差。总体来看，三阶段隆升剥蚀格局稳定可靠，但阶段时限存在±3~5 Ma 浮动，剥蚀速率存在±0.05 km/Myr 误差，仍需多体系定年、垂直剖面采样与多证据交叉验证进一步约束。

Table 2. Chronological data statistics of Southeastern Xizang and adjacent areas

表 2. 藏东南地区及相邻地区年代学数据统计表

No.	样品编号	采样地点	年龄(Ma)	测试方法	来源
1	HCl 系列 (浅部~200 m)	若尔盖地块 - 红参 1 井	~120	锆石(U-Th)/He (ZHe)	刘树根等(2019)

续表

2	HC1 系列 (浅部~200 m)	若尔盖地块 - 红参 1 井	~80	锆石(U-Th)/He (ZHe)	刘树根等(2019)
3	HC1 系列(全井段)	若尔盖地块 - 红参 1 井	~87	磷灰石裂变径迹(AFT)	刘树根等(2019)
4	HC1 系列(全井段)	若尔盖地块 - 红参 1 井	~78	磷灰石(U-Th)/He (AHe)	刘树根等(2019)
5	HC1 系列(全井段)	若尔盖地块 - 红参 1 井	~126	锆石(U-Th)/He (ZHe)	刘树根等(2019)
6	L-6-01	羌塘盆地双湖地区南部	75.9 ± 0.5	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年	Li Yalin <i>et al.</i> (2010)
7	17YG-28	乌托 - 南汀河 - 鹤庆剖面	83.6 ± 13.6	磷灰石裂变径迹(AFT)	WU Limin <i>et al.</i> (2024)
8	MK11-04	澜沧江上游	76.6 ± 8.0	AHe、ZHe	曾宪阳(2024)
9	MK11-09	澜沧江上游	69.1 ± 9.9	AHe、ZHe	曾宪阳(2024)
10	XJP11-29	中甸弧 - 雪鸡坪矿区	127.1 ± 1.1	锆石(U-Th)/He、 磷灰石(U-Th)/He	张静静(2022)
11	2007-2	松潘 - 甘孜褶皱带东北段	91 ± 8.6	锆石裂变径迹(ZFT)	Deng <i>et al.</i> (2012)
12	97-2	松潘 - 甘孜褶皱带东北段	87 ± 6.9	锆石(U-Th)/He (ZHe)	Deng <i>et al.</i> (2012)
13	FT-1	松潘 - 甘孜褶皱带中东部	68 ± 8	锆石裂变径迹(ZFT)	Deng <i>et al.</i> (2012)
14	T37	松潘 - 甘孜褶皱带西南段	104.7 ± 1.0	锆石 U-Pb	Deng <i>et al.</i> (2012)
15	LS92	拉萨分水岭南侧汇水区	68.0 ± 14.0	磷灰石裂变径迹(AFT)	He <i>et al.</i> (2026)
16	LS93	拉萨分水岭北侧汇水区	72.6 ± 3.2	AHe、AFT	He <i>et al.</i> (2026)
17	S110106	楚雄盆地北部	~70	重矿物组合、金红石地球化学	姜磊等(2019)
18	C123108	楚雄盆地北部	~70	重矿物组合、金红石微量元素	姜磊等(2019)
19	C123101	楚雄盆地北部	~80	重矿物分析、金红石 Zr 温度计	姜磊等(2019)

4. 构造动力学机制

4.1. 区域构造动力学背景

晚白垩世时期, 全球板块构造格局发生重大调整, 新特提斯洋处于北向俯冲的晚期阶段, 印度板块开始向欧亚板块快速汇聚, 太平洋板块向西俯冲的远程效应也对藏东南地区产生一定影响, 形成了复杂的多板块相互作用格局[23]。新特提斯洋作为连接印度板块与欧亚板块的重要海洋盆地, 其北向俯冲是驱动藏东南地区晚白垩世构造演化的核心动力。其晚白垩世的构造演化如图 2。

晚白垩世早期(96~80 Ma), 新特提斯洋洋壳持续北向俯冲至欧亚板块之下, 俯冲角度约 30° ~ 45° , 引发弧后收缩与地壳加厚, 冈底斯岩浆弧持续活动, 藏东南地区开始进入初始隆升剥蚀阶段。

晚白垩世中期(80~67 Ma), 新特提斯洋中脊发生俯冲, 形成板片窗, 软流圈沿板片窗上涌, 引发地幔楔、俯冲洋壳及上地壳的部分熔融, 导致强烈的幔源岩浆作用与地壳快速加厚[24]。此时, 印度板块与欧亚板块开始进入初始碰撞阶段, 板块汇聚速率加快, 区域挤压变形加剧, 班公湖 - 怒江缝合带等先存构造薄弱带发生强烈复活, 驱动藏东南地区进入快速隆升剥蚀阶段[25]。

晚白垩世晚期(67~66 Ma), 新特提斯洋俯冲接近尾声, 洋壳基本消亡, 印度板块与欧亚板块碰撞加剧, 区域构造体制开始从挤压向伸展转换, 地壳加厚达到一定程度后发生构造减压, 局部出现伸展构造, 岩浆活动有所减弱, 隆升速率减缓, 但剥蚀作用仍持续进行[26]。

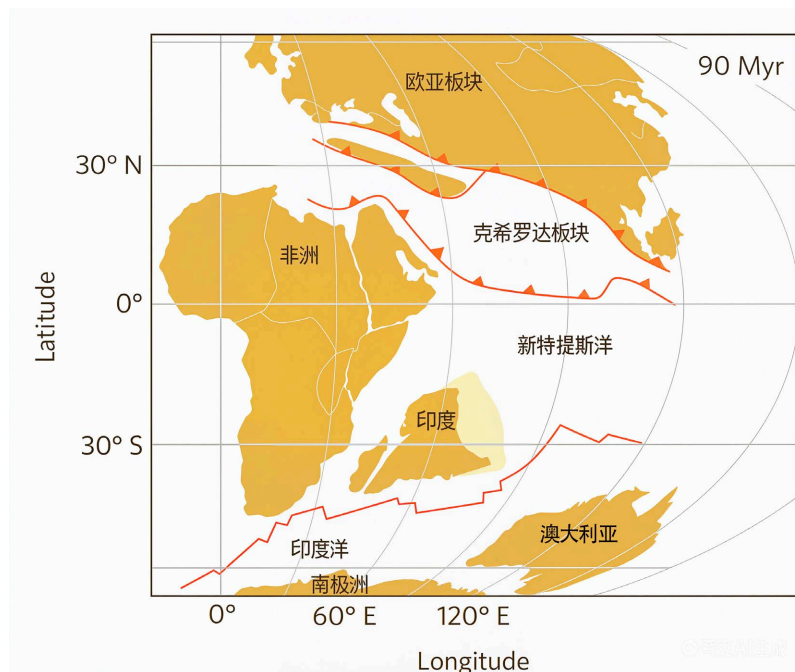


Figure 2. Tectonic dynamic evolution pattern map of the late Cretaceous in South-eastern Xizang (The base image has been modified according to [26])

图 2. 藏东南地区晚白垩世构造动力学演化模式图(底图根据[26]修改)

4.2. 板块相互作用

印度板块与欧亚板块的碰撞与俯冲作用是控制藏东南地区晚白垩世隆升剥蚀的核心动力学因素。新特提斯洋的俯冲闭合过程始于晚侏罗世，至晚白垩世进入关键阶段，这一时期印度板块北向移动的速度显著加快，导致两大板块之间的汇聚速率达到峰值。在此背景下，藏东南地区经历了强烈的地壳缩短与增厚，形成了冈底斯岩浆带等一系列重要的构造单元。地球化学研究表明，晚白垩世岩浆岩的成因与新特提斯洋壳的俯冲脱水作用密切相关，俯冲板片释放的流体促使上覆地幔楔发生部分熔融，进而形成了具有高钾钙碱性特征的中酸性岩浆岩[27]。

板块相互作用对藏东南地区晚白垩世隆升剥蚀的影响还体现在远程效应上。印度板块的持续俯冲不仅导致了地壳的垂向隆升，还引发了大规模的地表剥蚀作用[28]。沉积学证据表明，这一时期的沉积物源区发生了显著变化，粗碎屑沉积物的比例明显增加，反映了物源区隆升剥蚀速率的加快。

此外，藏南拆离系的形成与活动也与板块相互作用密切相关。拆离断层的发育为地壳物质的侧向运移提供了通道，同时促进了高喜马拉雅单元的地表剥露，形成了大规模的淡色花岗岩体。这些地质现象共同表明，印度-欧亚板块的碰撞与俯冲作用不仅是藏东南地区晚白垩世构造变形的直接驱动力[29]。

4.3. 隆升剥蚀与构造动力学耦合模型

藏东南地区晚白垩世隆升剥蚀与构造动力学耦合模型分为三个阶段，各阶段构造与隆升剥蚀耦合关系显著。初始耦合阶段(96~80 Ma)，新特提斯洋壳北向俯冲引发岩浆活动，弧后收缩使地壳缓慢加厚、地表低速隆升，剥蚀以河流侵蚀和化学风化为主，强度较弱，沉积为海相-海陆过渡相，二者呈弱耦合。强耦合阶段(80~67 Ma)，洋中脊俯冲形成板片窗[30]，壳幔相互作用强烈，印欧板块初始碰撞加剧挤压，先存构造带复活，地壳快速加厚，地表快速隆升、地形高差扩大，剥蚀转为构造剥蚀与河流侵蚀，强度显著提升，与构造活动呈强耦合。整体模型清晰呈现了不同时期构造动力学过程对隆升剥蚀特征的调控作用。

4.4. 动力学模型讨论与模型合理性分析

藏东南晚白垩世隆升剥蚀的动力学机制存在多种解释,除本文采用的新特提斯洋脊俯冲-板片窗模型外,主要还包括弧后挤压模型、先存构造活化模型与印度-欧亚远程碰撞效应模型。弧后挤压模型强调俯冲引发的弧后收缩与均匀地壳加厚;先存构造活化模型突出缝合带与断裂带的浅部复活控制;远程碰撞模型则侧重板块远距离汇聚的应力传递。

综合热年代学、岩浆与沉积记录可见,上述模型仅能解释局部现象,难以匹配区域多阶段快速隆升剥蚀过程。80~67 Ma 冷却与剥蚀速率显著跃升、伴随强烈岩浆活动与地壳熔融,无法用匀速挤压解释;区域性隆升峰值与洋脊俯冲高度耦合,并非单纯断裂活化所能主导;且当时印度板块尚处远距离汇聚阶段,远程应力难以引发强烈壳幔作用。相比之下,洋脊俯冲-板片窗模型可同时解释快速剥蚀、岩浆活动与构造转换,统一深部动力与浅部响应,与本文证据最为契合。

5. 结论

本文系统综合前人低温热年代学、沉积学、岩浆岩与构造解析成果,开展系统研究并建立藏东南晚白垩世三阶段隆升剥蚀模型,为青藏高原早期构造演化提供统一区域框架。研究表明,藏东南晚白垩世隆升剥蚀可划分为 96~80 Ma 初始隆升剥蚀、80~67 Ma 快速隆升剥蚀及 67~66 Ma 构造调整三个阶段,具有显著阶段性与空间差异性。区域隆升剥蚀受新特提斯洋北向俯冲、洋脊俯冲-板片窗效应、弧后收缩及地壳加厚共同控制,其中洋脊俯冲引发的软流圈上涌与壳幔相互作用为核心动力,班公湖-怒江缝合带等先存构造带控制空间分布格局。

作为综合研究,本文在构建统一演化模型的同时,也指明了未来的研究方向:关键构造带仍缺乏高密度垂直剖面年代学数据,热史模拟多解性有待约束;洋脊俯冲与板片窗深部过程需地球物理探测与高压实验验证;先存构造定量耦合关系及印欧板块初始碰撞时限仍需高精度年代学与跨区域对比。未来通过补充原创数据与精细模拟,可进一步提升对藏东南晚白垩世构造演化与高原早期生长的定量约束能力。

参考文献

- [1] 沈续文,沈晓明,刘静,曾令森,杨超群,葛玉魁,邢宇堃,曾宪阳,王子君,李云帅,李金阳. 青藏高原东南缘次林错岩体晚白垩世—早新生代快速剥蚀[J]. 地质学报, 2022, 96(10): 3332-3344.
- [2] 马泽良,何治亮,罗开平,彭金宁,庄新兵,杨帆,刘栩. 青藏高原南羌塘坳陷白垩纪以来的隆升剥蚀历史——来自低温热年代学的约束[J]. 石油实验地质, 2024, 46(1): 75-86.
- [3] 李广旭,曾令森,赵令浩,高利娥,高家昊. 藏南冈底斯岩基东段晚白垩世早期朗县杂岩的岩石成因和深部地球动力学过程[J]. 岩石学报, 2021, 37(11): 3348-3376.
- [4] 褚杨,郭宜琳,刘谭杰,刘小驰,胡方泐,雷宜阳,林伟. 藏南拆离系活动与淡色花岗岩就位——以希夏邦马峰地区为例[J]. 岩石学报, 2024, 40(5): 1461-1474.
- [5] 唐灼,董汉文,王亚莹,李广旭,费镕泽. 藏南错那拆离断层的活动时间限定及其构造意义[J]. 岩石学报, 2023, 39(12): 3572-3584.
- [6] 孟元库,许志琴. 藏南冈底斯地体中段南缘构造演化[J]. 地球学报, 2017, 38(S1): 15-18.
- [7] 毕文军,张佳伟,李亚林,邓玉珍. 西藏中部羌塘地体白垩纪以来隆升剥露过程[J]. 地学前缘, 2023, 30(2): 18-34.
- [8] 王晓先,张进江,杨雄英. 藏南吉隆淡色花岗岩地球化学特征、成因机制及其构造动力学意义[J]. 大地构造与成矿学, 2017, 41(2): 354-368.
- [9] 郑波,陈文彬,王增振,冯丽霞,张艳雄,万友利,吴林. 羌塘地块白垩纪剥蚀-冷却事件[J]. 地质论评, 2020, 66(5): 1143-1154.
- [10] Jing, L.Z., Zhang, J.Y., McPhillips, D., et al. (2018) Multiple Episodes of Fast Exhumation since Cretaceous in Southeast Tibet, Revealed by Low-Temperature Thermochronology. *Earth and Planetary Science Letters*, 490, 62-76.

- <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2018.03.011>
- [11] 李开玉, Marie-Luce, C., 李海兵, 潘家伟, 王世广, 白明坤, 刘富财, 王平. 藏南冲巴雍错淡色花岗岩体热年代学及其对藏南拆离系和亚东裂谷构造活动时限的制约[J]. 岩石学报, 2020, 36(10): 3097-3116.
- [12] 胡志伟, 吕丁友, 王德英, 赵婧, 陈心路, 程鑫. 渤海海域前新生代关键构造期变形特征与潜山油气成藏意义[J]. 中国海上油气, 2023, 35(1): 50-62.
- [13] 朱训璋. 班公湖-怒江缝合带东段八宿地区构造隆升过程[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质科学院, 2024.
- [14] 梁肖肖, 高睿, 刘函. 西藏谢穷地区晚白垩世淡色花岗岩体和岩脉年龄及地球化学特征: 对班公湖-怒江带后碰撞背景的制约[J]. 地质通报, 2023, 42(1): 92-106.
- [15] 赵建华, 王加昇, 付浩, 等. 三江造山带水泄铜矿床伴生钴赋存形式及其富集机制[J/OL]. 地质学报: 1-18. <https://link.cnki.net/urlid/11.1951.P.20260428.1821.004>, 2026-05-02.
- [16] 刘树根, 李智武, Kamp, P.J.J., 等. 青藏高原东缘中生代若尔盖古高原的发现及其地质意义[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2019, 46(1): 1-28.
- [17] Li, Y., Wang, C., Li, Y., Ma, C., Wang, L. and Peng, S. (2010) The Cretaceous Tectonic Event in the Qiangtang Basin and Its Implications for Hydrocarbon Accumulation. *Petroleum Science*, 7, 466-471. <https://doi.org/10.1007/s12182-010-0096-7>
- [18] Wu, L.M., Peng, T.P., Fan, W.M., *et al.* (2024) Multiple Uplift and Exhumation of the Southeastern Tibetan Plateau: Evidence from Low-Temperature Thermochronology. *Acta Geologica Sinica*, 28, 569-584.
- [19] 曾宪阳. 青藏高原东南缘三江地区晚白垩世-新生代剥露演化历史[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国地震局地质研究所, 2024.
- [20] 张静静. 青藏高原东南缘义敦地体中生代花岗岩体剥露历史及其地质意义[D]: [硕士学位论文]. 抚州: 东华理工大学, 2022.
- [21] Deng, B., Liu, S., Li, Z., Cao, J. and Sun, W. (2012) Late Cretaceous Tectonic Change of the Eastern Margin of the Tibetan Plateau—Results from Multisystem Thermochronology. *Journal of the Geological Society of India*, 80, 241-254. <https://doi.org/10.1007/s12594-012-0134-8>
- [22] He, P.J., Song, C.H. and Bai, K. (2026) Low-Temperature Thermochronologic Constraints on Differential Denudation in the Drainage Divide Region of the Lhasa Terrane, Southern Tibetan Plateau. *Geomorphology*, 492, Article 110052. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2025.110052>
- [23] 姜磊, 刘树根, 王自剑, 等. 上扬子盆地西缘晚白垩世物源变化及指示[J]. 地质论评, 2019, 65(2): 477-490.
- [24] 李春辉. 藏东南(中甸)区域隆升动力模型: 地球化学和热年代学[D]: [硕士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2012.
- [25] 陈小宇. 藏东南地区变质杂岩新生代构造与剥露机制[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018.
- [26] Jagoutz, O., Royden, L., Holt, A.F. and Becker, T.W. (2015) Anomalously Fast Convergence of India and Eurasia Caused by Double Subduction. *Nature Geoscience*, 8, 475-478. <https://doi.org/10.1038/ngeo2418>
- [27] 王二七, 孟恺, 许光, 等. 印度陆块新生代两次仰冲事件及其构造驱动机制: 论印度洋、特提斯和欧亚板块相互作用[J]. 岩石学报, 2018, 34(7): 1867-1875.
- [28] 丁林, Maksatbek, S., 蔡福龙, 等. 印度与欧亚大陆初始碰撞时限、封闭方式和过程[J]. 中国科学: 地球科学, 2017, 47(3): 293-309.
- [29] 刘俊来, 宋志杰, 曹淑云, 等. 印度-欧亚侧向碰撞带构造-岩浆演化的动力学背景与过程——以藏东三江地区构造演化为例[J]. 岩石学报, 2006(4): 775-786.
- [30] 闫佳鑫. 陆-陆碰撞造山带中、下地壳物质流动[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国地质大学(北京), 2022.