引用格式：王晨旭，李西，2025. 弧形构造带构造特征及其数值模拟分析：以红河断裂中南段为例[J]. 地质力学学报，31（1）：39−60. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2024042

Citation: WANG C X，LI X，2025. Tectonic characteristics and numerical simulation analysis of an arcuate structural belt：A case study of the middle and southern segments of the Red River fault[J]. Journal of Geomechanics，31（1）：39−60. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2024042

弧形构造带构造特征及其数值模拟分析——以红河断裂中南段为例

王晨旭，李　西
WANG Chenxu，LI Xi

云南大学地球物理系，云南 昆明 650091
Department of Geophysics, *Yunnan University*, *Kunming* 650091, *Yunnan*, *China*

Tectonic characteristics and numerical simulation analysis of an arcuate structural belt：A case study of the middle and southern segments of the Red River fault

Abstract: ［**Objective**］The southeast Yunnan Arcuate Structural Belt, with the central and southern segments of the Red River fault as its main body, serves as the southwestern boundary of the Sichuan-Yunnan block and the forefront of its south-southeastward movement. However, there is still controversy as to whether its current motion is primarily characterized by transpression or transtension. This debate is strongly correlated with the complex stress-strain patterns surrounding the southeastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau. Clarification of the kinematic characteristics and genesis of the southeast Yunnan Arcuate Structural Belt will help to understand the regional tectonic evolution. ［**Methods**］This study utilized the interpretation of remote sensing images and geological field surveys to identify evidence for late Quaternary tectonic activity in the central and southern segments of the Red River fault. A three-dimensional (3D) geological model tailored to the actual characteristics of the region was established. It considers the influence of lower crustal flow and includes finite-difference numerical simulations with different velocity boundary conditions set at 26.5°N. ［**Results**］The study reveals: (1) Numerous geomorphic features and fault profiles in the central and southern segments of the Red River fault indicate that most of the faults along the line are predominantly high-angle, northwest-striking with a complex fault rock development. The presence of structural wedges and infill of overlying material has been observed in several typical outcrops. Additionally, there are significant undulations in the lower part of the overlying strata on both sides of the fault. (2) The numerical simulations show that the influence of the far-field stress on the horizontal and vertical deformation of the southeastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau is quite different on both sides of 26.5°N, and the deformation is further enhanced by the presence of lower crustal flow. (3) Numerical simulations of velocity fields, maximum shear strain rates, and maximum principal stresses demonstrate that surface motion trajectories, velocity distributions, stress conditions, and deformation accumulation differ among different models for the arcuate structural belt area; the presence of lower crustal flow promotes deformation accumulation and makes the magnitude of the velocity field closer to that of the current GPS horizontal velocity field. ［**Conclusion**］(1) The numerous geological profiles along the central and southern segments of the Red River fault reveal predominantly normal-strike-slip movement, indicating that the

基金项目：国家自然科学基金项目（42262028）
This research is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 42262028).
第一作者：王晨旭（1999—），男，在读硕士，主要从事构造地质学、活动构造、古地震等研究。Email：1584995769@qq.com
通信作者：李西（1975—），男，博士，高级工程师，主要从事构造地质学、活动构造、古地震、GIS 应用及开发、震害预测和评估等研究。Email：179298308@qq.com
收稿日期：2024−04−18；**修回日期**：2024−08−18；**录用日期**：2024−09−12；**网络出版日期**：2024−11−29；**责任编辑**：范二平

region is currently dominated by the effects of transtension; (2) Current tectonic deformation and landscape evolution in the southeastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau are mainly controlled by two different force sources: one is the southeastward movement of material, and the other is the arc-parallel extension and slab rollback beneath the Sunda-Java subduction zone. The presence of lower crustal flow influencess the scale of tectonic deformation in the southeastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau. In the southeast Yunnan Arcuate Structural Belt, arc-parallel extension and slab retreat play a more significant controlling role; (3) The initial curved shape of the southeast Yunnan Arcuate Structural Belt is mainly attributed to the influence of material migration towards the southeast and the Xiaojiang sinistral strike-slip fault. Under the constraints of pre-existing structural fabrics and the control of arc-parallel extension and slab retreat, it has led to continuous deformation. [**Significance**] The research contributes to the understanding of the current activity of the southeast Yunnan Arcuate Structural Belt and the causes of this activity. It provides a quantitative analysis reference and theoretical basis for the study of the tectonic evolution of the southeastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau.

Keywords: southeastern edge of the Qinghai-Tibet Plateau; southeast Yunnan Arcuate Structural Belt; Red River fault; geological 3D model; finite difference numerical simulation; structural deformation

摘　要：以红河断裂中南段为主体的滇东南弧形构造带作为川滇地块的西南边界和向南南东滑移的前端，现今的运动性质是以挤压为主的逆走滑运动还是以拉张为主的正走滑运动仍存在争议，这与青藏高原东南缘周围复杂的应力−应变模式有着强烈的关联。为进一步研究滇东南弧形构造带的运动学特征及成因，结合野外地质调查及已有研究成果，建立三维地质模型进行有限差分数值模拟，研究结果表明：红河断裂中南段沿线大量地质剖面显示正走滑运动性质，揭示出现今该区域主要受拉张−剪切应力作用的控制；青藏高原东南缘现今的构造变形及地貌演化主要受控于岩石圈物质的东南向移动以及苏门答腊−爪哇俯冲带下发生的弧后拉张、板块回撤2个不同力源的共同作用，同时，下地壳流的存在会显著影响青藏高原东南缘的构造变形尺度，在滇东南弧形构造带中，弧后拉张及板块回撤起着更为显著的控制作用；滇东南弧形构造带早期初始弯曲形态的形成主要归因于岩石圈物质东南向移动的影响及小江断裂左旋走滑的牵引，并在先存构造几何形态的限制和弧后拉张及板块回撤的控制下产生持续形变。研究结果有助于理解滇东南弧形构造带现今的活动特征及成因，并为青藏高原东南缘构造演化研究提供定量化分析的参考和理论依据。

关键词：青藏高原东南缘；滇东南弧形构造带；红河断裂；三维地质模型；有限差分数值模拟；构造变形
中图分类号：P54; P313　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1006−6616(2025)01−0039−22
DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2024042

0　引言

青藏高原形成于印度板块与欧亚板块的碰撞，自新生代以来发育宏伟的地质地貌景观及构造变形。川滇地块作为青藏高原东南缘的重要组成部分，其独特的地貌特征为深入研究高原生长、地表隆升过程和演化机制提供了理想的研究窗口（Tapponnier et al., 1982, 2001; Clark and Royden, 2000; Schoenbohm et al., 2006b; Wen et al., 2008; Sun et al., 2012; 王岸等, 2023; Chen et al., 2024a; 韩帅等, 2024; Shu et al., 2024）。大型活动断裂的几何学和运动学研究对于揭示大陆构造演化和地震破裂的动力学机制至关重要，而弧形构造带作为陆−陆碰撞变形较为剧烈的地区，构造活动非常复杂，蕴含着丰富的运动学信息并具备鲜明的特点（Ferrill and Groshong, 1993; Marshak, 1988; Macedo and Marshak, 1999）。著名地质学家李四光提出的“山”字型构造体系和扭转构造也将弧形构造带包括在内。因此，对弧形构造带进行研究是揭示陆内造山动力学的关键所在，并具有重要的现实意义（李四光, 1954; 李岩峰等, 2007; Ge et al., 2022; 董晓朋等, 2023; Jiao et al., 2024）。

川滇地块是指由红河断裂、曲江断裂、小江断裂、安宁河断裂和鲜水河断裂共同围合的一个构造单元，呈现不封闭的菱形结构。该地块相对于外围区域具有向南南东移动的趋势，控制着中国西南地区的主要地震活动（阚荣举等, 1977; Wen et al., 2008; 魏文薪, 2013; Fan et al., 2023; Li et al., 2023;

Chen et al., 2024a）。而红河断裂、石屏−建水断裂和曲江断裂正是位于川滇地块东南缘的 3 条断裂。这 3 条断裂平面展布特征相似，均呈弧形，弧顶向西南凸出，由南到北的总体走向为南东东—南东向，故被称为滇东南弧形构造或滇东南楔形构造（何宏林等，1992）。

目前对滇东南弧形构造带的相关研究存在不同的认识，特别是对断裂深部延伸状况及地壳的现今活动性质存在较大的分歧。关于断裂深部延伸状态，白志明和王椿镛（2003）认为红河断裂、曲江断裂和石屏−建水断裂 3 条断裂可能是深大断裂构造带在近地表处的分支构造；呼楠和韩竹军（2013）认为红河断裂倾向北东，曲江断裂和石屏−建水断裂倾向南西，且与深部汇聚的深大断裂带倾向相同，曲江断裂和石屏−建水断裂可能是深大断裂构造带在近地表的直接表现形式，而红河断裂可能为其次级分支断裂；Wen et al.（2011）则提出完全不同的观点，认为曲江断裂和石屏−建水断裂倾向北东，在深部交汇于同一滑脱面并表现为南西向逆冲推覆构造，虽然该滑脱面向上与红河断裂北侧一条倾向北东的逆断层相连，但红河断裂主断面倾向南西且与倾向北东的断面构成“对冲”构造；Li et al.（2020）则认为曲江断裂、石屏−建水断裂和红河断裂在深部都呈近南北—北北东倾向。

关于地壳现今活动性质，有研究表明以红河断裂中南段为主体的滇东南弧形构造带现今以正走滑运动为主（Wang et al., 1998; 王阎昭等，2008; 呼楠和韩竹军，2013; Zheng et al., 2017; 朱良玉，2020）。然而，这一特征与新近纪川滇地块北部南南东向推挤作用在滇东南地区造成的缩短变形和逆冲推覆断裂带结构（何宏林等，1992; Wen et al., 2011; 吴中海等，2015）存在显著差异。此外，闻学泽等（2011）提出的区域构造动力学模型以及万永魁等（2021）结合 GPS 长期（1991—2015 年）观测并采用“地块加载”方法模拟得到的红河断裂中南段显弱压性的解释，均未能与当前的正走滑运动特征相吻合。滇东南弧形构造带现今运动学特征的变形驱动力是什么？是否存在印证这一运动学特征的地质记录？

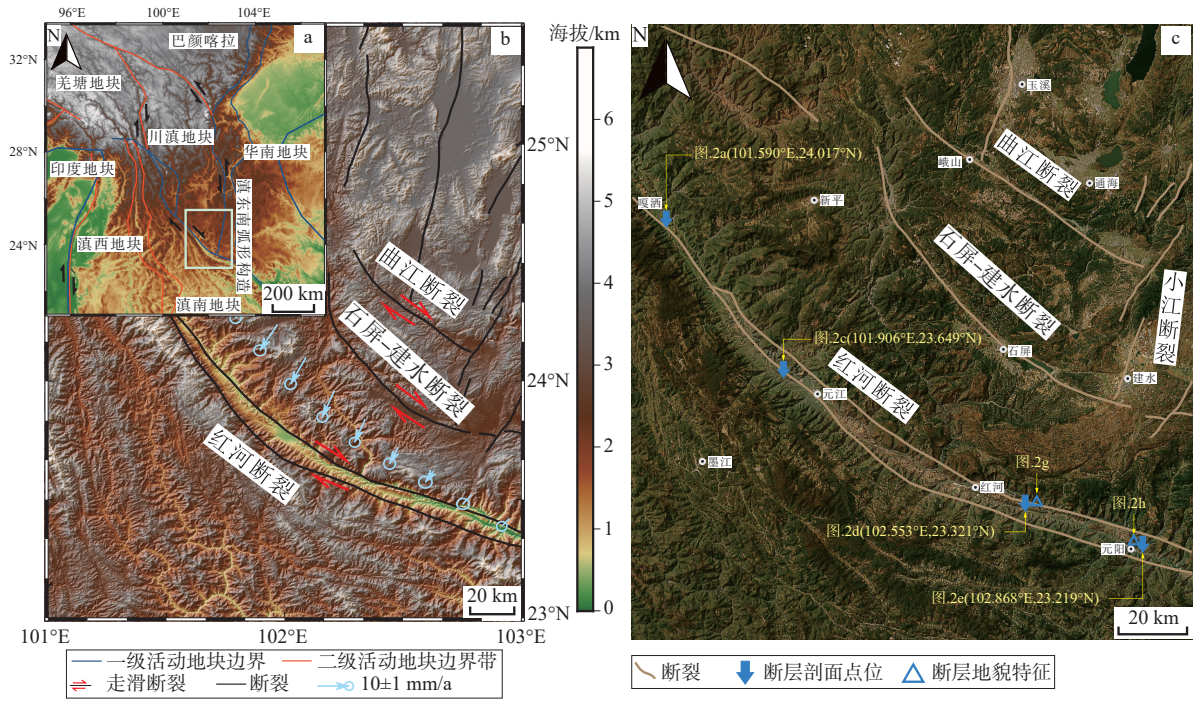
文章综合遥感影像解译、野外地质调查和已有研究成果，对红河断裂中南段构造活动进行考察，建立与研究区实际地形及莫霍面变化相符的地质模型并开展定量数值模拟，以期促进对区域构造演化的理解，并为断裂带及周边区域的地震危险性评估提供科学依据。

1　地质背景

滇东南弧形构造带位于喜马拉雅东构造结东侧 400～700 km 处，构成川滇地块西南边界和向南南东滑移的前端（图 1a），是印度—欧亚板块俯冲碰撞在青藏高原发育的活动断裂带之一，其变形特征与青藏高原东南缘复杂的应力−应变模式有关。

滇东南弧形构造带南侧为滇南地块，东侧为华南地块且与小江断裂交切，其中包含了石屏−建水断裂、曲江断裂和红河断裂中南段（图 1b）。参考 Macedo and Marshak（1999）提出的构造要素参数对 3 条断裂的形态特征进行定量描述，其中，红河断裂中南段的外凸率为 0.116，不对称度为 1.212，面比率为 0.855；石屏−建水断裂的外凸率为 0.196，不对称度为 1.248，面比率为 0.574；曲江断裂的外凸率为 0.069，不对称度为 1.196，面比率为 0.744。依据前缘线的规则程度与对称程度进行划分，发现 3 条断裂不对称度相似，且都属于杂乱型。尽管不排除 3 条断裂为相互构造，文中根据以往研究（何宏林等，1992; 呼楠和韩竹军，2013; 曹颖等，2023）和其形态特征将其视为 3 条弧形构造带，并统称为滇东南弧形构造带。

滇东南弧形构造带经历了一系列复杂的构造演化。渐新世—早中新世（34～17 Ma），红河断裂的运动模式主要表现为左旋走滑，同时伴随有快速的冷却和隆升事件，这一时期中国南海的海底扩张也同时发生；上新世（约 5 Ma）以来，红河断裂发生了第 2 次快速冷却和隆升事件，其运动模式主要与现今观测到的右旋走滑相一致；在 17～5 Ma 期间红河断裂为慢速冷却和隆升阶段，断裂两侧的相对运动状态存在反转过渡（Allen et al., 1984; Tapponnier et al., 1990; Leloup et al., 1995; Replumaz et al., 2001; 向宏发等，2006; Cu'ò'ng et al., 2013）。红河断裂走向为北西 40°—50°，但在元江附近出现了明显的转变，形成较大的断裂弯曲，并在进入越南前断裂走向保持在北西 60°—70°。发生这一偏转的区域正是位于小江断裂和红河断裂交汇的区域，该区域在 100～200 km 的范围内显示出约 60 km 的左旋位错（Wang et al., 1998; Schoenbohm et al., 2006a; Shi et al., 2018）。石屏−建水断裂和曲江断裂分别位于红河断裂以北约 50 km 和 75 km 处，并与之平行，总体走向为北西—



a—滇东南弧形构造带位置(图中地块划分根据张培震等, 2003 修改); b—滇东南弧形构造带断裂分布及沿线水平 GPS 速度场(图中 GPS 水平速度场数据为相对华南板块的 GPS 水平速度场, 通过地表断裂迹线及推断未偏转的断裂迹线插值获取; Gan et al., 2022); c—滇东南弧形构造带地貌影像图(来自天地图 https://vgimap.tianditu.gov.cn/)

图 1 滇东南弧形构造带主要断裂分布及地貌影像图

Fig. 1 Distribution of major faults and topographic imagery, southeast Yunnan Arcuate Structural Belt

(a) Location of the southeast Yunnan Arcuate Structural Belt (block division based on Zhang et al., 2003); (b) Distribution of faults in the southeast Yunnan Arcuate Structural Belt and the horizontal GPS velocity field along the fault (the horizontal GPS velocity field is relative to the South China Plate; it is obtained by interpolating through surface fault traces and inferred undeflected fault traces; Gan et al., 2022); (c) Geomorphological imagery of the southeast Yunnan Arcuate Structural Belt (from https://vgimap.tianditu.gov.cn/)

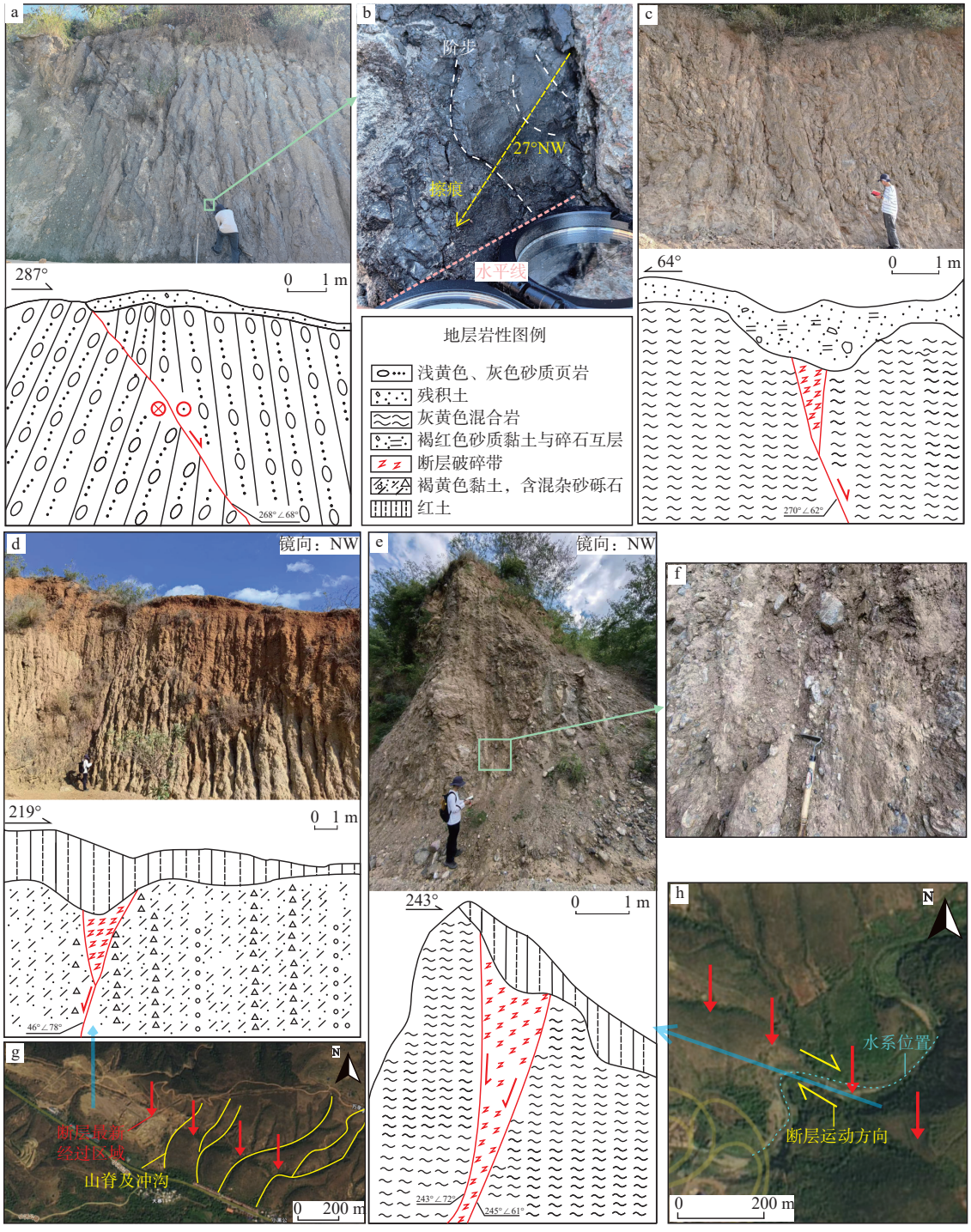
北西西向。从目前的研究来看, 2 条断裂与红河断裂一样自第四纪晚期以来以右旋走滑为主, 且 2 条断裂在发生右旋走滑前均经历了左旋走滑的历史阶段(张之立和刘新美, 1982; 韩新民等, 1982; Wang et al., 2014, 2022), 这些相似的运动学特征也揭示出红河断裂及其邻近断裂系统在构造活动中的内在联系。

2 红河断裂中南段活动性特征的野外调查

结合高分辨率遥感影像判读选取了弧形构造带中的红河断裂中南段进行野外踏勘(图 1c), 该区域断裂迹线清晰, 断裂沿线构造地貌特征明显, 如大量冲沟(河谷)沿断裂走向同步右旋位错, 反映右旋走滑运动特征。同时, 断裂还具有明显的正断分量(图 2)。

弧形构造带中的红河断裂中南段普遍为陡倾角断层, 走向北西, 断层带主要发育断层角砾岩、碎裂岩和断层泥, 局部断层面上可以观察到明显的擦痕及阶步, 如嘎洒收费站西北侧断层(图 2a)的擦痕侧伏向为北西, 侧伏角为 27°(图 2b), 指示断层具有右旋倾滑运动特征。在多个典型露头处, 观察到构造楔以及上覆地层物质的下漏填充或沉积加厚现象, 如元江县马鹿洞东南侧昆磨高速北侧断层剖面(图 2c)、红河县以南以及元阳县以北的大寨西北侧断层剖面(图 2d)。元阳县城南阿土断层剖面(图 2e)所揭露出的构造楔中发育断层角砾岩以及沿构造楔两边生长的方解石脉(图 2f), 结合断层破碎带上覆红土沿构造楔下掉特征, 推测断层具有正断运动特征。此外, 通过遥感影像解译与野外考察结合, 在红河县大寨西北侧和元阳县城南阿土均发现山脊、冲沟及河道沿断裂发生右旋位错(图 2g、2h), 而且这种右旋位错构造地貌特征沿红河断裂中南段广泛存在, 为断裂右旋走滑的变形表现。

结合李西等(2016)和 Zhou et al.(2023)的研究



a—嘎洒收费站西北侧断层；b—嘎洒收费站西北侧断层擦痕；c—马鹿洞东南侧断层；d—大寨西北侧断层；e—元阳县城南阿土断层；f—元阳县城南阿土断层破碎带细节；g—大寨西北侧大黑公山脊及冲沟右旋位错遥感影像；h—元阳县城南阿土龙岔河右旋位错遥感影像

图 2　红河断裂中南段典型露头和遥感影像解译（影像均来源天地图 https://vgimap.tianditu.gov.cn/）

Fig. 2　Typical outcrops and remote sensing image interpretation, middle and southern segments of the Red River fault zone (remote sensing images from Tianditu https://vgimap.tianditu.gov.cn/)

(a) Fault to the northwest of Gasa toll station; (b) Scratches on the fault to the northwest of Gasa toll station; (c) Fault to the southeast of Maludong; (d) Fault to the northwest of Dazhai; (e) Fault to the south of Yuanyang County Atu area; (f) Details of the fracture zone of the fault to the south of Yuanyang County Atu area; (g) Remote sensing image of the dextral dislocation of a ridge and gully at Dazhai, northwest of Daheigong; (h) Remote sensing image of the dextral dislocation of the Atu Longcha River in the south of Yuanyang County

成果，文章认为区内断裂第四纪晚期活动明显，以右旋走滑为主，伴有倾滑分量，整体表现为正走滑运动特征，表明区域主要受拉张−剪切（transtension）应力作用的控制。该认识与已有研究得出的现今为走滑−拉张环境一致（Shen et al., 2005; 王阎昭等, 2008; 呼楠和韩竹军, 2013; Wang et al., 2016; Zheng et al., 2017; 朱良玉, 2020）。

3 数值模拟

近年来，计算机数值模拟克服了时空尺度的局限性，综合地球物理、地质、地球化学等多个学科的研究方法及成果，实现了对地质模型的建立和模拟，使得还原一定时期的地质演变过程成为可能（Li, 2014; Li et al., 2015; 许志琴等, 2016; Chen et al., 2024b）。其中，构造应力场模拟研究体现了数值模拟方法在构造地质学中的深入应用，其核心在于利用计算机数值计算方法，对预设的地质模型域控制方程进行精确求解。这种方法在传统地质−地球物理−地球化学理论及分析方法的基础上，推进了学科定性−定量化研究的发展（林舸等, 2005; 郑洪伟等, 2006; 武红岭等, 2009; 谭晓慧等, 2010; 王瑞瑞等, 2013; 陈振坤等, 2019; Pei et al., 2021; 马海勇等, 2022; Jiao et al., 2023）。

利用三维地质模型进行数值模拟，考虑不同垂直构造（地质体在垂直方向上的空间分布、形态以及其相关的物理和力学特性）的变形情况对水平变形的影响。结合近年来有关该区域的研究成果，针对数值模拟研究区域的特征进行分析，并对地质模型构建范围、变形尺度、介质材料参数、变形本构关系、边界条件、计算方法及软件进行了合理选择。

3.1 地质模型选择

为抵消边界效应的影响，地质模型将模拟范围相对于研究区进行延伸（图 3a），充分考虑了数值模拟边界条件、远场的构造作用及近年 GPS 水平速度场数据。该范围是以拟合的速度场旋转中心（96.10°E、27.4°N）为圆心所圈定的扇环，所参考的旋转中心是朱良玉（2020）根据相对于华南地块的 GPS 速度场估算得出的。选择相对于华南地块的 GPS 速度场主要有 2 点优势：①估算的旋转中心与在青藏高原东南缘观测到的地质滑动位移和古地磁结果有更好的对应性（Wang et al., 1998; 李仕虎等, 2012; Hao et al., 2014; Li et al., 2020）；②模型中华南地块的边界速度值接近 0，为模拟提供了重要的约束条件。

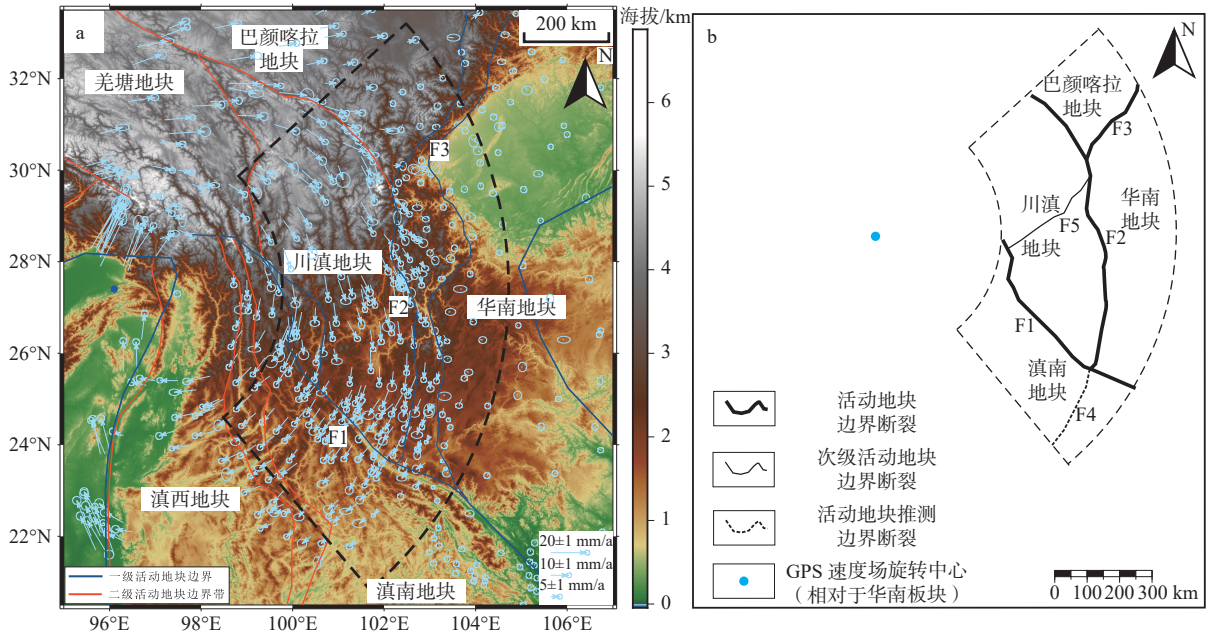
此次数值模拟区域断裂的选择如图 3b 所示。需要说明的是：①丽江−小金河断裂为川滇地块内部的分区断裂，两侧的地壳变形存在着显著差异（徐锡伟等, 2003; 刘晓霞和邵志刚, 2020）；②研究表明奠边府断裂两侧的地球物理场、地壳应力形变都存在显著差异，并指出奠边府断裂与鲜水河−安宁河−则木河−小江断裂系统共同构成围绕东喜马拉雅构造结现今地壳大规模顺时针旋转运动的外边界（Shen et al., 2005; Lai et al., 2012; 李力, 2015; 张建国和丁志峰, 2016）。

为尽可能地符合实际地质情况，通过数字高程模型数据进行等高线提取，在 Rhino 软件中进行扇环范围裁剪、点阵提取和网格面生成等，建立模型的实际地表起伏面。同时结合三维地壳模型 crust 1.0 及主要断裂格局构建三维地质体模型（图 4a）。该模型采用模拟效果更好、精度更高的六面体网格为主导，并在地表对模型网格进行加密，划分了 142029 个单元体。地质模型以图 3b 中的 F1、F2 和 F3 断裂为界，包含川滇地块、华南地块、滇南地块和巴颜喀拉地块 4 个活动地块（图 4b）。

3.2 物理模型及边界条件

此模型采用 Maxwell 模型黏弹性体本构关系进行有限差分数值模拟，该黏弹性体在短时间尺度上表现为弹性体，可以与迅速改变载荷下的岩石对应；在长时间尺度上表现为流体，可以和高温、高压下岩石圈的长期变形相对应。因此，在时间尺度较大的情况下，Maxwell 体可以作为岩石圈运动变形模型的近似（Liu et al., 2000），而且通过赋予岩石圈不同分层对应的黏滞系数，可以模拟分层之间的黏滞性耦合作用。模拟时间的选取在该本构关系当中非常重要，因为当模拟的计算时间大于材料的松弛时间（一般定义为黏滞系数和杨氏模量的比值）时，应力才能达到稳定的状态。研究中采用 1 年为一个时间步长，计算 100000 步（10 万年），使得上下地壳和上地幔全部达到材料的松弛时间，从而能够通过模型结果反映出岩石圈的长期变形特征。

结合以往关于区域岩石圈的厚度、速度和黏度结构等方面的研究成果（张子琦, 2019; 董蕾等, 2020; 朱良玉, 2020; 黄周传等, 2021; 张智奇, 2022），参考全球三维地壳模型对莫霍面及上、下地壳的分界面位置进行插值设置，各构造单元（活动地块）的



F1—红河断裂；F2—鲜水河–安宁河–则木河–小江断裂系统；F3—龙门山断裂；F4—奠边府断裂；F5—丽江小金河断裂

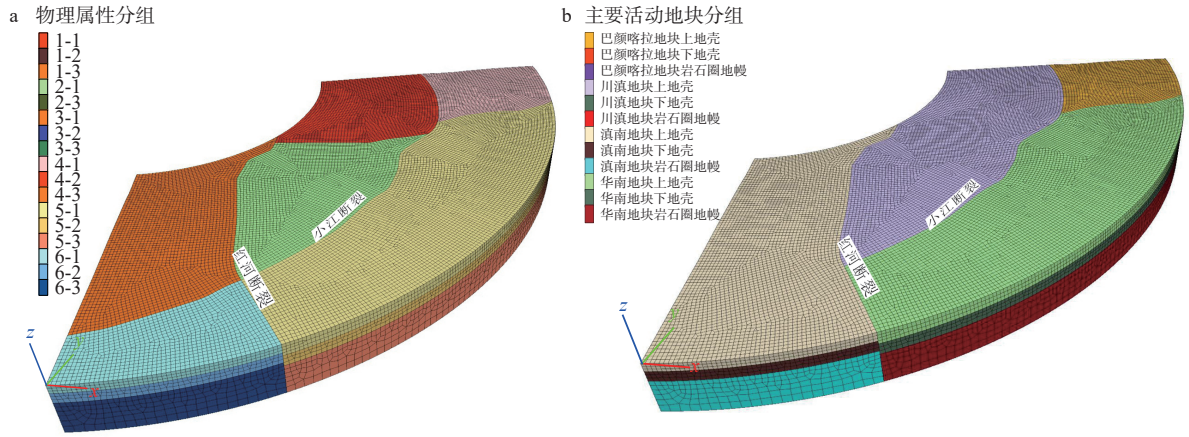
a—青藏高原东南缘 GPS 水平速度场（数据来自 Gan et al., 2022；图中蓝色圆点为拟合的相对华南地块旋转中心）；b—地质模型中主要断裂格架

图 3　数值模拟研究区域

Fig. 3　Study area of the numerical simulation

(a) Horizontal GPS velocity field of the southeastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau (data are from Gan et al., 2022; The blue dots in the figure denote the fitted rotation center relative to the South China Block); (b) The primary fault framework in the geological model

F1: Red River Fault; F2: Xianshui River-Anning River-Zemu River-Xiaojiang Fault System; F3: Longmenshan Fault; F4: Dianbianfu Fault, F5: Lijiang-Xiaojinhe Fault



a—物理属性分组；b—主要活动地块分组

图 4　研究区域三维地质模型

Fig. 4　Three-dimensional (3D) geological model of the study area

(a) Grouping by physical properties; (b) Grouping by major active blocks

介质属性参数见表 1。

研究表明，该区域岩石圈地震各向异性在 26.5°N 附近出现了明显的分界现象。分界以北岩石圈厚度为 120～140 km，以南为 80～100 km。地壳厚度也存在变化，分界以南地壳厚度和泊松比呈现快速减小特征。GPS 速度场揭示的地表总体运动方向在分界以北为南东向运动，径向运动方向相对于喜马拉雅东构造结向外（图 5a），分界以南为南西向

表 1 各构造单元（活动地块）的介质属性

Table 1 Material properties of each tectonic unit

地块/分层		深度/km	P波速度/（km/s）	S波速度/（km/s）	密度/（g/m³）	泊松比	杨氏模量/GPa	剪切模量/GPa	黏滞系数/（Pa·s）
川滇地块	上地壳	16.1～27.0	6.00～6.10	3.52～3.55	2.72～2.74	0.238～0.244	83.419～85.908	33.702～34.531	1×10^{22}～3×10^{22}
	下地壳	38.0～59.9	6.30～7.00	3.65～3.99	2.78～2.95	0.241～0.259	92.396～118.291	37.037～46.964	3×10^{20}～6×10^{20}
	岩石圈地幔	100.0	8.02～8.12	4.46～4.51	3.28～3.34	0.276～0.277	168.045～173.501	65.841～67.936	8×10^{20}～4×10^{21}
滇南地块	上地壳	14.59～17.38	6.00～6.10	3.52～3.55	2.72～2.74	0.238～0.244	83.419～85.908	33.702～34.531	5×10^{21}
	下地壳	30.0～41.7	6.30～7.00	3.65～3.99	2.78～2.95	0.247～0.259	92.396～118.291	37.037～46.964	8×10^{20}
	岩石圈地幔	100.0	7.90～7.94	4.40～4.42	3.26～3.37	0.275～0.276	169.431～177.461	63.114～64.079	2×10^{20}
华南地块	上地壳	21.02～22.80	6.00～6.10	3.52～3.55	2.72～2.74	0.238～0.244	83.419～85.908	33.702～34.531	1×10^{23}
	下地壳	38.0～46.8	6.30～7.00	3.65～3.99	2.78～2.95	0.247～0.259	92.396～118.291	37.037～46.964	1×10^{22}
	岩石圈地幔	100.0	8.12～8.13	4.50～4.51	3.34～3.35	0.277～0.278	173.501～174.128	67.936～68.139	5×10^{21}
巴颜喀拉地块	上地壳	22.89～27.54	6.00～6.10	3.52～3.55	2.72～2.74	0.238～0.244	83.419～85.908	33.702～34.531	1×10^{22}
	下地壳	53.2～59.0	6.30～7.00	3.65～3.99	2.78～2.95	0.241～0.259	92.396～118.291	37.037～46.964	1×10^{20}
	岩石圈地幔	100.0	7.96～8.01	4.43～4.45	3.28～3.30	0.276～0.277	164.226～166.871	64.370～65.348	9×10^{20}

运动，径向运动方向相对于喜马拉雅东构造结向内（Shi et al., 2012; 常利军等, 2015; Yang et al., 2017; Zhang and Gao, 2019; 高原等, 2020）。该分界现象非单一变形驱动力所致，可能是由多个力源共同引起的突变现象。

因此，在完成模型几何形态和本构关系的确定及介质属性参数的赋予后，在模型速度边界条件设置时，将该分界两侧的速度边界条件作为对照组（图 5b—5d）。模型一主要考察 26.5°N 以北远场传递过来的应力所造成的弧形构造带变形特征，通过设定川滇地块和巴颜喀拉地块的速度边界条件来模拟这一过程（图 5b）；模型二主要考察 26.5°N 以南远场传递过来的应力所造成的弧形构造带变形特征，通过设定滇南地块的速度边界条件来模拟这一过程（图 5c）；模型三考察所有应力场综合作用所造成的弧形构造带变形特征，将模型的所有速度边界进行约束来模拟这一过程（图 5d）。

在上述 3 组初步模型中（模型一、模型二、模型三），速度边界条件设置均参照相对于华南地块的 GPS 速度场，且假设速度不随深度而变化。但研究表明青藏高原东南缘存在大范围连通的下地壳流（白志明和王椿镛, 2004; Wang et al., 2007; Bai et al., 2010; 宁铄现和陈永顺, 2023），并认为下地壳流对上地壳的拖拽力与板块之间的作用力一样不可忽略，在数值模拟的边界条件设置中为下地壳施加相对更高的位移约束可以得到与实际观测更吻合的拟合结果（朱守彪和石耀霖, 2004; 曹建玲等, 2009）。例如，王辉等（2007）在川滇地区地壳形变模拟中，假设了西边界下地壳运动速度比 GPS 速度场高 10 mm/a, 模拟结果与实际观测更为接近。

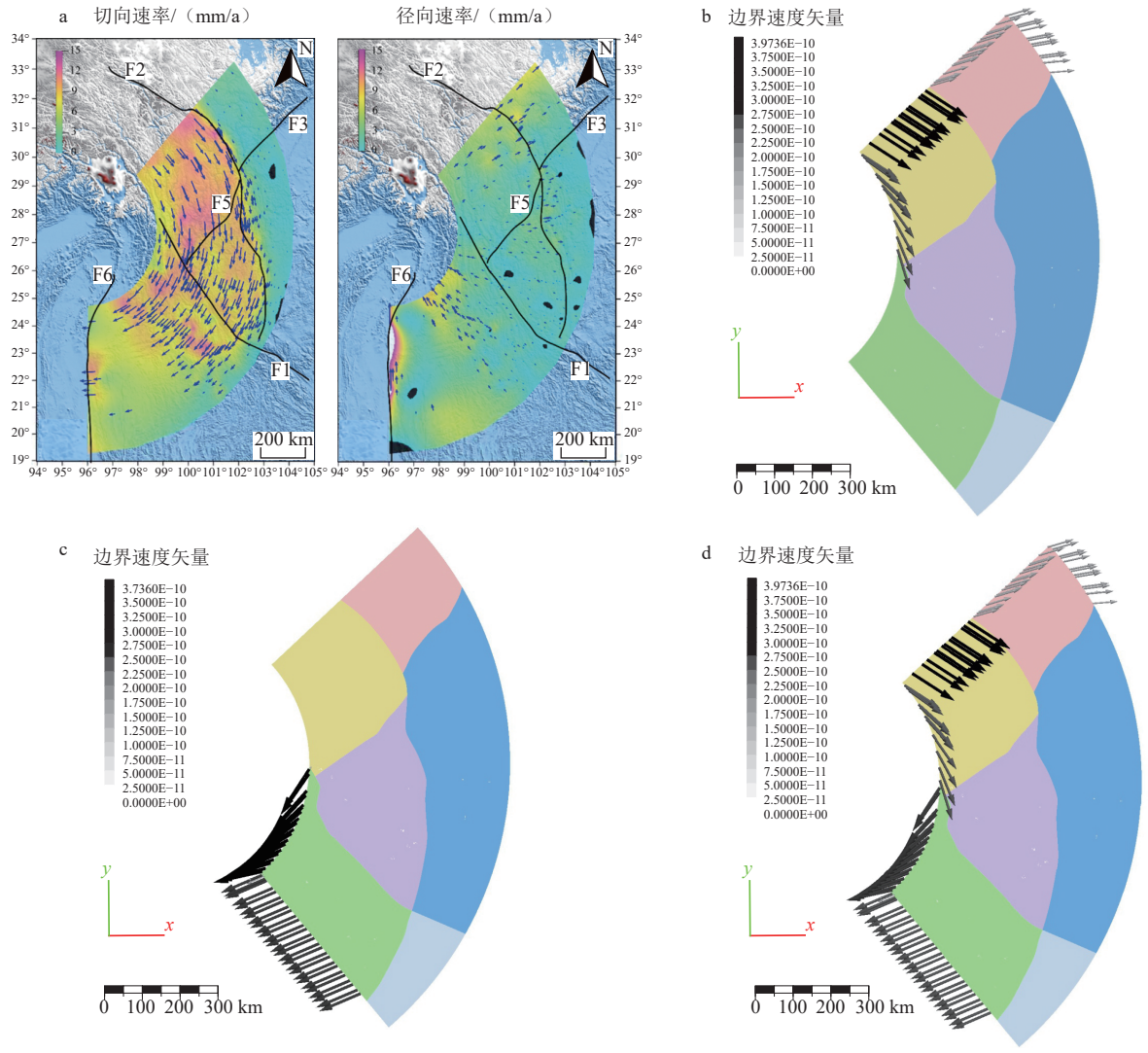
为进一步确定下地壳流对研究区域运动学特征的影响，基于已有研究成果，在 3 组初步模型的基础上施加了下地壳流边界条件，构建了模型四、模型五、模型六。由于此次研究设置的速度边界更为复杂，并不适合将下地壳速度统一增快 10 mm/a, 结合实际地表 GPS 速度场及各构造单元介质属性，将下地壳的速度边界条件设置为上地壳和上地幔速度边界的 2 倍。6 组模型边界条件设置见表 2。

3.3 数值模拟结果

此次研究采用有限差分软件 FLAC^{3D} 导入建立的三维地质模型，并进行本构关系及对应介质参数赋值。FLAC^{3D} 软件的基本原理是将连续介质离散化为有限差分网格，利用差分方程代替连续介质力学中的微分方程，通过数值方法求解这些方程来模拟岩土体的力学行为。通过为各个模型设置特定的边界条件，进行对照性计算和求解。经过后处理分析，得到各个模型对应的 x、y、z 轴位移云图、位移矢量云图、最大剪切应变率云图及最大主应力云图等可视化模拟结果。

3.3.1 位移速度结果

3 组初步模型在 x、y 和 z 方向的位移结果云图见图 6。位移大小在云图中用不同的颜色进行区



F1—红河断裂；F2—鲜水河−安宁河−则木河−小江断裂系统；F3—龙门山断裂；F5—丽江小金河断裂；F6—实皆断裂；图 b、c、d 中不同色块分别对应被赋予不同物理参数的构造单元，其中箭头指向指示了速度矢量的方向，箭头颜色和长度指示边界速度大小，具体数值对应图左侧的色标，单位为 m/s

a—相对于华南地块速度场旋转中心进行切向和径向分量投影（朱良玉，2020）；b—模型一速度边界条件；c—模型二速度边界条件；d—模型三速度边界条件

图 5　模型速度边界条件

Fig. 5　Velocity boundary conditions of the model

(a) Projections of the tangential and radial components relative to the rotation center of the velocity field of the South China Block (Zhu, 2020); (b) Velocity boundary condition of Model 1; (c) Velocity boundary condition of Model 2; (d) Velocity boundary condition of Model 3

F1: Red River Fault; F2: Xianshuihe-Anninghe-Zemuhe-Xiaojiang Fault System; F3: Longmenshan Fault; F5: Lijiang-Xiaojinhe Fault; F6: Sagaing Fault

In figures b, c, and d, the different colors of the blocks correspond to tectonic units with different physical parameters assigned. The arrows point ate the velocity vector directions. Arrow color and length indicate the magnitude of the boundary velocity. The specific values correspond to the color bar on the left of the figure, with units in m/s.

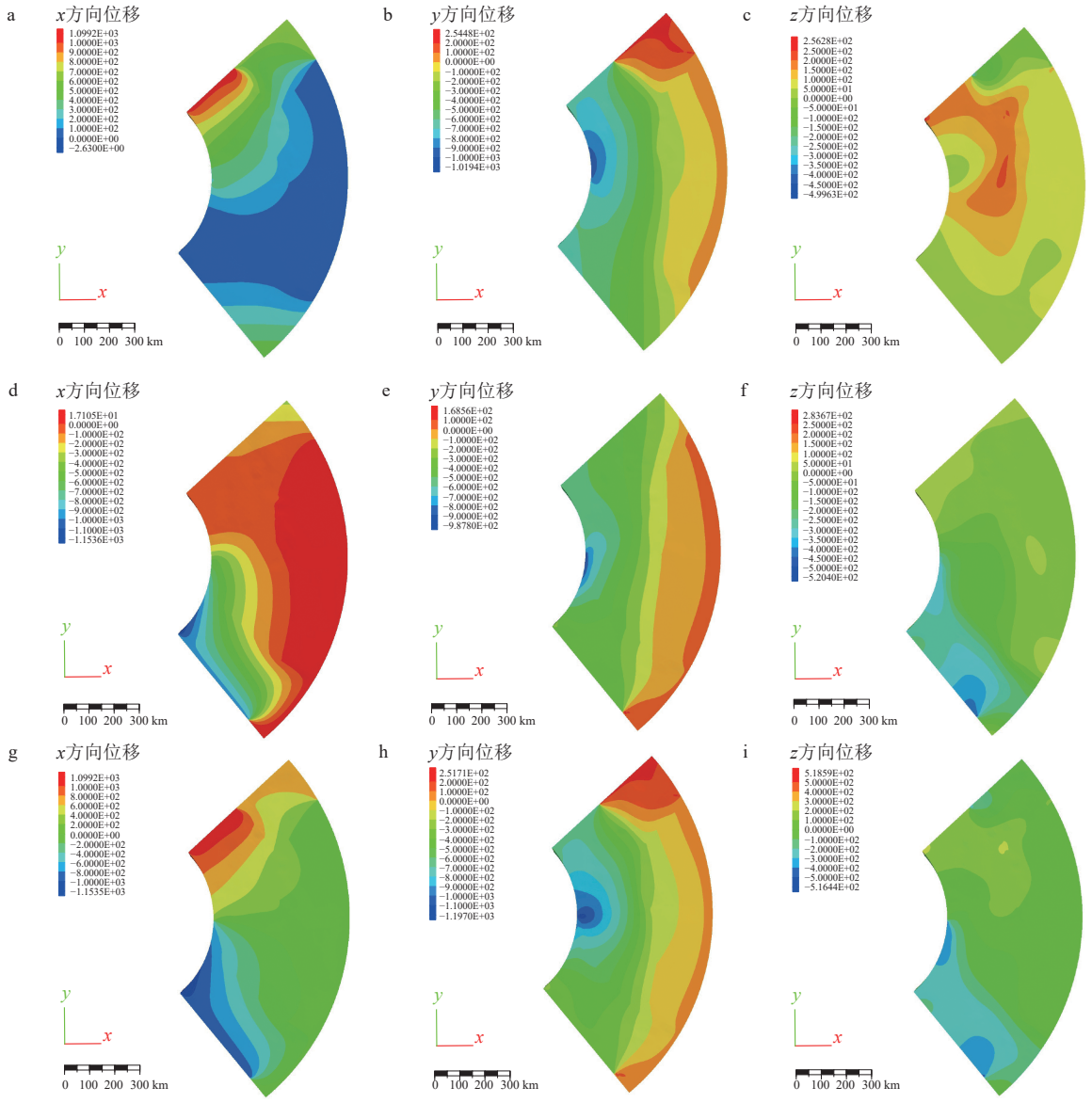
分，为突出每个方向上的相对位移分布，此次研究分别为每个方向选定了适合的位移范围，并采用多项式外插法（polynomial extrapolation）进行数据的插值处理。

模型一中 x 方向的位移以正值为主，即网格节点相对于初始模型向东位移，沿 y 轴负方向呈现先减小再增大，其中接近 0 甚至为负值的区域，主要受到华南地块速度边界的约束（图 6a）；y 方向的位

表 2 模型边界条件设置方案

Table 2 Boundary condition setting of the model

模型名称	模型一	模型二	模型三	模型四	模型五	模型六
川滇地块速度边界	施加	未施加	施加	施加	未施加	施加
滇南地块速度边界	未施加	施加	施加	未施加	施加	施加
华南地块速度边界	施加	施加	施加	施加	施加	施加
巴颜喀拉地块速度边界	施加	未施加	施加	施加	未施加	施加
下地壳流影响	未考虑	未考虑	未考虑	考虑	考虑	考虑



位移大小及方向对应每个云图左上角的色标：正值表示沿 x、y、z 方向位移；负值表示沿 x、y、z 反方向位移，具体位移大小为该颜色对应的绝对值，单位为 m

a、b、c—模型一；d、e、f—模型二；g、h、i—模型三

图 6 三维地质模型数值模拟 x、y、z 轴位移云图（不考虑下地壳流）

Fig. 6 Contour maps for numerical geological 3D simulations (no lower crustal flow) of x, y, and z axis displacement

(a), (b), (c) Model 1; (d), (e), (f) Model 2; (g), (h), (i) Model 3

Displacement magnitudes and directions are given as absolute values in meters corresponding to the color bar in the top left corner of each contour map: positive values indicate displacement along the x, y, z direction; negative values indicate displacement along the opposite x, y, z direction.

移普遍为负值，即网格节点相对于初始模型向南位移，沿 x 轴正方向位移不断减小，其中接近 0 甚至为正值的区域，主要受到华南地块和巴颜喀拉地块速度边界的影响（图 6b）；z 方向的位移基本为正值，即网格节点相对于初始模型向上位移（图 6c）。数值模拟计算结果表明：模型一（模拟 26.5°N 以北远场传递过来的应力）的地质体在水平方向上主要表现为向南东方向的位移，其中异常区域受华南地块和巴颜喀拉地块速度边界的约束；在垂直方向上，则显示出大范围的地表隆升。

模型二中 x 方向的位移以负值为主，即网格节点相对于初始模型向西位移，沿 x 轴正方向位移逐渐减小，其中接近 0 甚至为负值的区域，主要受到华南地块速度边界的约束（图 6d）；y 方向的位移普遍为负值，即网格节点相对于初始模型向南位移，沿 x 轴正方向位移不断减小，其中接近 0 甚至为正值的区域，主要受到华南地块速度边界的影响（图 6e）；z 方向的位移基本为负值，即网格节点相对于初始模型向下位移（图 6f）。数值模拟计算结果表明：模型二（模拟 26.5°N 以南远场传递过来的应力）的地质体在水平方向上，主要表现为向南西方向的位移，其中异常区域受华南地块速度边界的约束；在垂直方向上，则显示出大范围的地表下降。

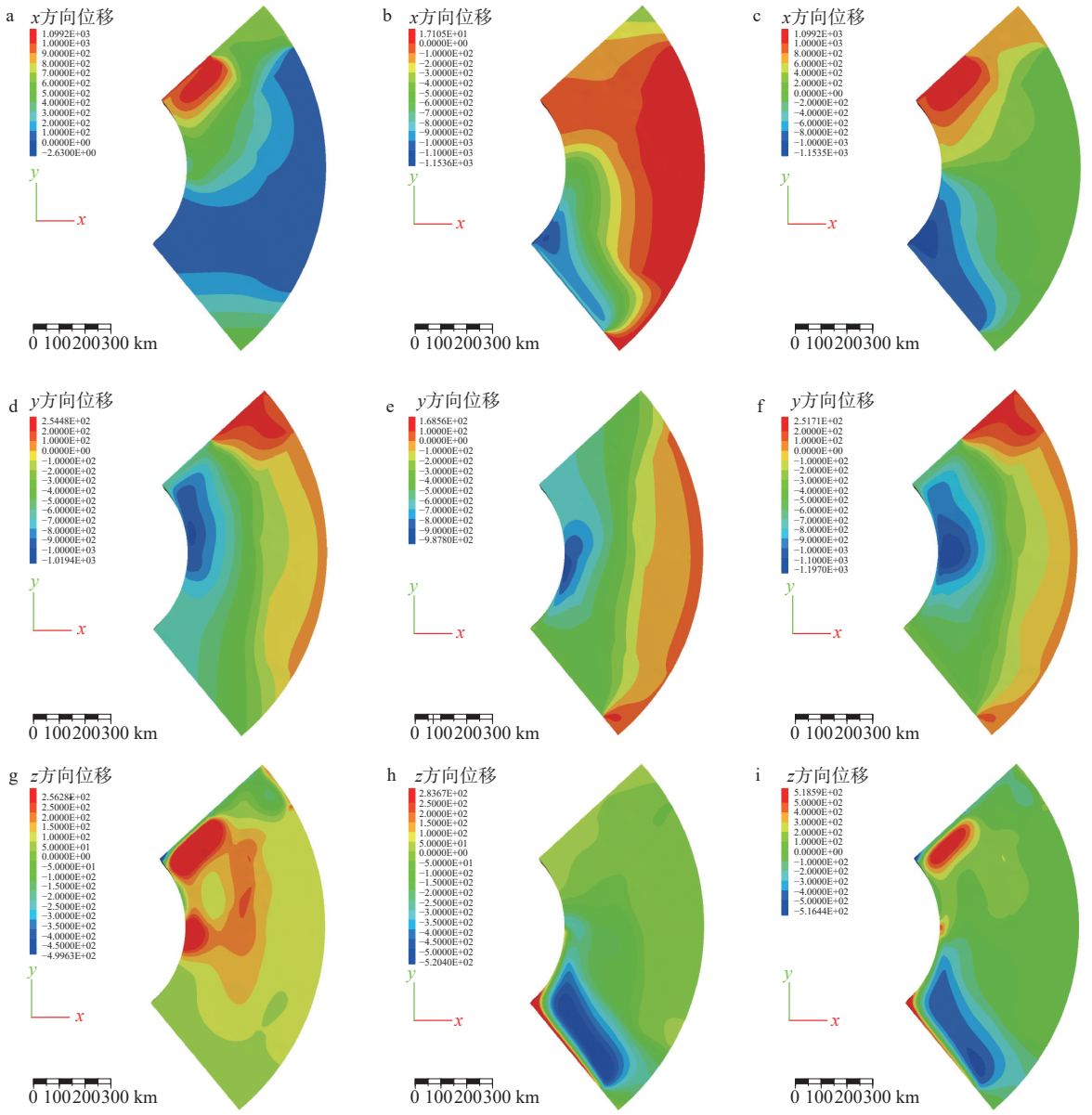
模型三中 x 方向的位移有明显的正负值分区，沿 y 轴正方向位移由负值转变为正值，即网格节点相对于初始模型北部向东位移、南部向西位移，中部位移接近 0 的区域为位移转向的过渡带，且受到华南地块速度边界的约束（图 6g）；y 方向的位移普遍为负值，即网格节点相对于初始模型向南位移，沿 x 轴正方向位移不断减小，其中接近 0 甚至为正值的区域，主要受到华南地块和巴颜喀拉地块速度边界的影响（图 6h）；z 方向的位移与 x 方向的分区相近，沿 y 轴正方向位移由负值转变为正值，即网格节点相对于初始模型北部以向上位移为主、南部以向下位移为主（图 6i）。数值模拟计算结果表明：模型三（模拟 2 个远场应力的叠加效果）的地质体在水平方向上，主要位移趋势为南向，其中北部以南东方向为主，南部以南西方向为主，不符合整体运动趋势的异常区域受华南地块和巴颜喀拉地块速度边界的约束；在垂直方向上，位移也体现出区域性，北部地表隆升，南部地表下降。

将上述模拟结果与现今 GPS 水平速度场和水准垂直速度场进行对比，26.5°N 以北现今 GPS 水平速度矢量方向为南东向，以南为南西向（图 3a），这与模型三的 x、y 方向位移模拟结果是相符的；水准垂直速度场显示研究区北部（除四川盆地）整体表现为地表隆升，南部则存在区域性的地表下降（Hao et al., 2014），这与模型三 z 方向的位移结果云图有很好的对应性，可以推断引起地表隆升和下降的动力源并非统一的。

考虑下地壳流对上地壳的拖拽作用及影响，此次研究建立了与 3 组初步模型相对应的模型四、模型五、模型六作为对比实验组。图 7 为模型四、模型五和模型六在 x、y、z 3 个方向上的位移结果云图。云图中通过不同的颜色区分位移大小和方向，并分别采用了与 3 组初步模型相对应的位移范围和多项式外插法，以便于模型间的对比分析。

在相对位移的分布上，模型四、模型五、模型六与 3 组初步模型有很好的对应性，而相对于模型中各节点初始位置的绝对位移大小，则普遍发生了一定程度的变化。x 方向位移变化是局部的，在模型四中体现为北部正值变大，即在模型中该区域的各网格节点相对于初始模型向东的位移增加（图 7a）；在模型五中则体现为南部负值变小，即在模型中该区域的各网格节点相对于初始模型向西的位移增加（图 7b）；在模型六中变化则是呈现两端分异，北部正值变大，南部负值变小，但总体来说位移大小的绝对值都在增大（图 7c）。y 方向的位移变化并不大，主要体现在内弧区域负值变小，即在接近喜马拉雅东构造结的区域，模型中的各网格节点相对于初始模型向南位移增加（图 7d—7f）。相比 x 和 y 方向，z 方向的位移变化则显著很多，位移变化同样为区域性的，在模型四中体现为北部正值变大，即在模型中该区域的各网格节点相对于初始模型向上的位移增加（图 7g）；在模型五中则体现为南部负值区域变小，即在模型中该区域的各网格节点相对于初始模型向下的位移增加（图 7h）；在模型六中变化同样呈现两端分异，北部正值变大，南部负值变小（图 7i），位移在两端沿不同的方向都有一定程度的增加。综上所述，在增加下地壳流的边界条件后，模型的位移改变主要体现在水平方向近地表位移的增加和垂直方向局部地表隆起或下降增加，忽略边界效应的影响，各个模型整体的相对位移分布情况并未发生明显改变。

由滇东南弧形构造带及邻区的地表水平运动速度矢量云图（图 8）可知，模型一的地表水平运动



位移大小及方向对应每个云图左上角的色标：正值表示沿 x、y、z 方向位移；负值表示沿 x、y、z 反方向位移；具体位移大小为该颜色对应的绝对值，单位为 m

a、d、g—模型一；b、e、h—模型二；c、f、I—模型三

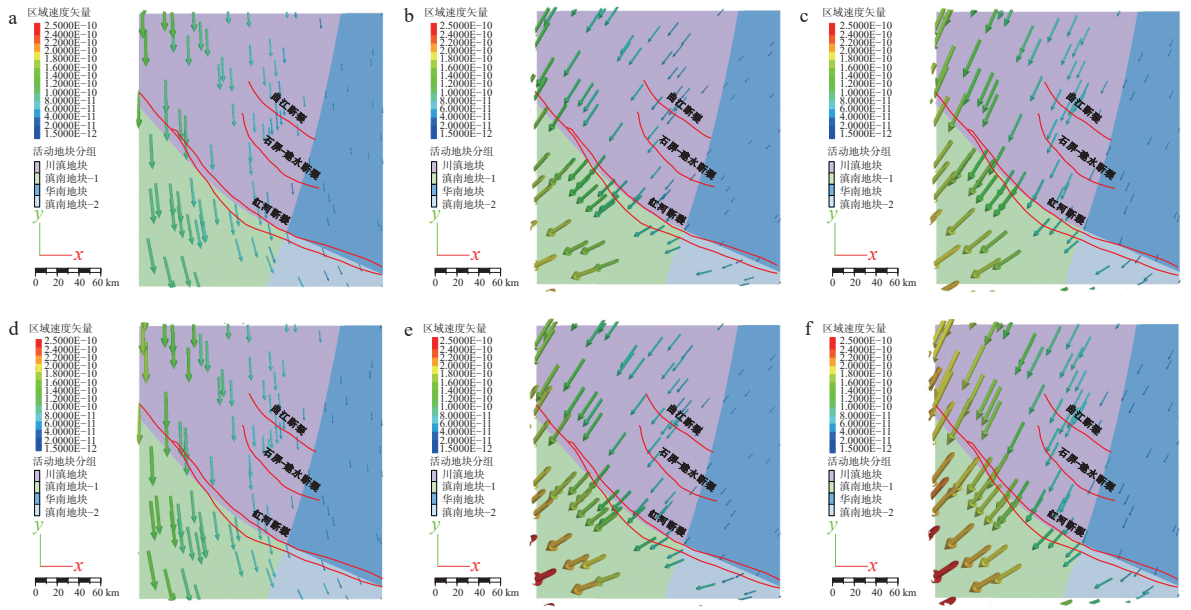
图 7 三维地质模型数值模拟 x、y、z 轴位移云图（考虑下地壳流）

Fig. 7 Contour maps for numerical geological 3D simulations (including lower crustal flow) of x, y, and z axis displacement

(a), (d), (g) Model 1; (b), (e), (h) Model 2; (c), (f), (i) Model 3

Displacement magnitudes and directions are given as absolute values in meters corresponding to the color bar in the top left corner of each contour map: positive values indicate displacement along the x, y, z direction; negative values indicate displacement along the opposite x, y, z direction.

速度矢量主要轨迹方向为南南东向，沿断裂地表迹线速度大小范围为 2.57×10^{-11}～1.28×10^{-10} m/s(图 8a)；模型二的地表水平运动速度矢量主要轨迹方向为南西向，沿断裂地表迹线速度大小范围为 1.69×10^{-11}～1.13×10^{-10} m/s(图 8b)；模型三的地表水平运动速度矢量主要轨迹方向为南南西向，沿断裂地表迹线速度大小范围为 2.67×10^{-11}～1.55×10^{-10} m/s(图 8c)。对比结果显示，模型一在滇东南弧形构造带的地表水平运动速度矢量方向与现今该区域GPS水平速度场方向(图 3a)存在显著差异；模型二的地表水平运动速度矢量方向(SW32°—44°)和模型三的地表水平运动速度矢量方向(SW22°—25°)



箭头颜色和长度指示速度大小，具体数值对应每个云图左上角的色标，单位为 m/s；箭头指向指示了速度矢量的方向

a—模型一；b—模型二；c—模型三；d—模型四；e—模型五；f—模型六

图 8　三维地质模型数值模拟速度矢量云图

Fig. 8　Contour maps for numerical geological 3D simulations of velocity vectors

(a) Model 1; (b) Model 2; (c) Model 3; (d) Model 4; (e) Model 5; (f) Model 6

Arrow colors and lengths indicate the velocity magnitude; specific values correspond to the color bar in the upper left corner of each cloud diagram; units are in m/s; arrows point to the direction of the velocity vectors.

与现今该区域 GPS 水平速度场方向（SW24°—38°）更为接近。据此认为，模型二中的速度边界条件在该区域起着更重要的控制作用，且在该边界条件的作用下弧形构造带的挠度将进一步变大。

在施加下地壳流对上地壳拖拽作用边界条件后，地表水平运动速度矢量的主要方向保持不变，但速度的大小却发生了明显变化（图 8d—8f）。其中，模型四沿断裂地表迹线的水平运动速度大小范围为 2.89×10^{-11}～1.43×10^{-10} m/s（图 8d）；模型五沿断裂地表迹线的水平运动速度大小范围为 2.07×10^{-11}～1.44×10^{-10} m/s（图 8e）；模型六沿断裂地表迹线的水平运动速度大小范围为 3.13×10^{-11}～1.85×10^{-10}m/s（图 8f）。3 组模型的地表水平运动速度相对于 3 组初步模型显示出更快的速度。

将上述 6 个模型沿红河断裂中南段地表迹线的水平运动速度与该区域现今 GPS 速度场（图 1b）进行对比可知，3 组初步模型的速度大小明显小于现今 GPS 速度场（7.31×10^{-11}～2.96×10^{-10} m/s），而考虑下地壳流存在的 3 组模型的速度大小更接近现今 GPS 速度场，但仍小于现今 GPS 速度场。此结果可能是低估了下地壳流对上地壳的拖拽力所导致，从而也印证了以往有关该区域存在下地壳流的探索与讨论（王辉等，2007；曹建玲等，2009）。

3.3.2　应力−应变率结果

各模型在滇东南弧形构造带及邻区近地表的剪切变形程度和主应力分布特征如图 9 所示，揭示出该区域在不同方向和机制下的受力情况及变形积累，其中应变率积累的大小往往与地震活动的活跃程度密切相关。模型一中，滇东南弧形构造带及邻区近地表的最大剪切应变率在小江断裂西侧自北东向南西方向呈梯度下降；而在小江断裂沿线区域表现出显著的负值，指示明显的左旋剪切运动特征；小江断裂东侧无显著的剪切应变率，表征该区域（华南地块）相对稳定（图 9a）。模型二中，近地表的最大剪切应变率同样在小江断裂沿线显示出明显的负值，但在其沿线两侧并未显示出明显分区；红河断裂以南显示出更大的最大剪切应变率，并在断裂北端出现串珠状高值异常（图 9b）。在模型三中，最大剪切应变率分布与模型二较为接近，区别在于局部出现了最大剪切应变率的增大，如小江断裂沿线区域及小江断裂西侧的北东区域，显示出 2 个远场叠加对该区域最大剪切应变率的影响是分

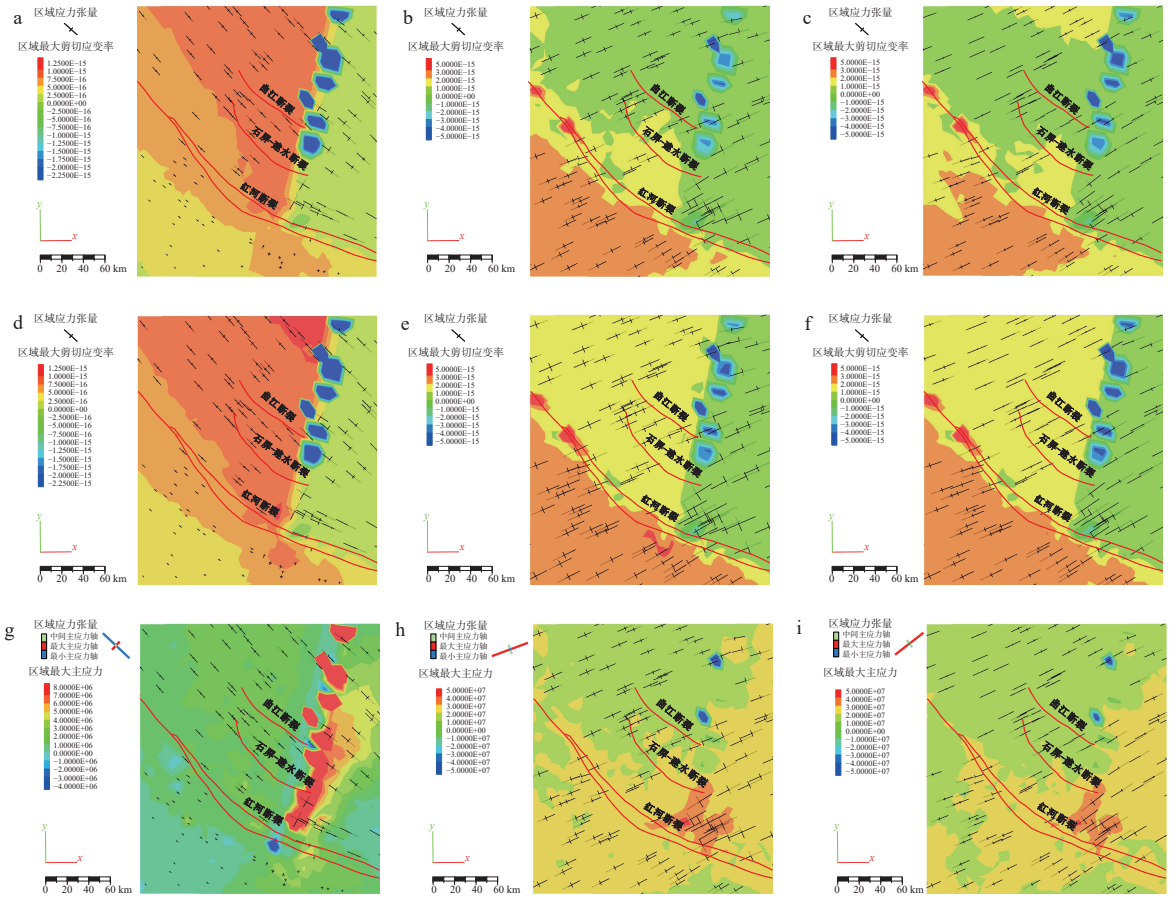
区的(图 9c)。改变下地壳速度边界条件的 3 组模型(图 9d—9f)显示,在小江断裂西侧的最大剪切应变率比 3 组初步模型显著增大,表明下地壳流的存在对于小江断裂以西区域的最大剪切应变率积累起到促进作用。

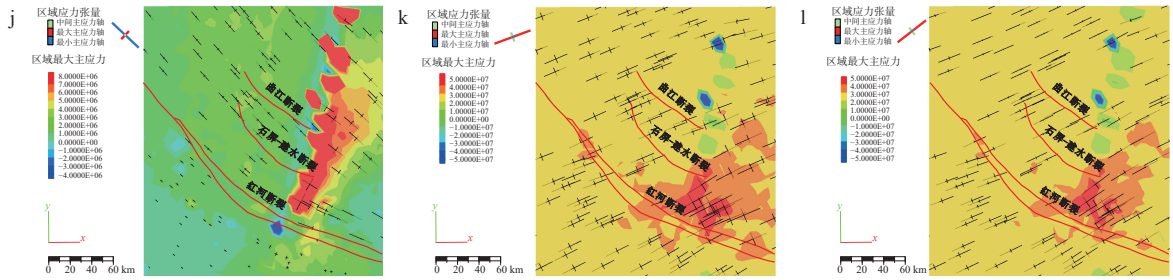
模型一最大主应力云图显示,滇东南弧形构造带及邻区近地表在北东—南西向主要显拉张,应力张量各主轴的大小则表征该区域北西—南东向的挤压占主导地位,并且小江断裂沿线及红河断裂转折处在北东—南西向也显挤压状态,这一结果也为滇东南弧形构造带的形成提供了新的演化思考(图 9g)。模型二显示,滇东南弧形构造带及邻区近地表在北东东—南西西向显拉张,且该区域北东东—南西西向的拉张占主导地位,仅在小江断裂沿线的局部区域显示出北东东—南西西向的挤压状态,而红河断裂中段的转折处与石屏-建水之间的区域在北东东—南西西向显示出较大的拉张应力(图 9h)。模型三(图 9i)和模型二的最大主应力数值大小及分布只存在较小范围的差别,但主要显拉张的方向在模型三中表现为北东—南西向。此外,模型二和模型三的应力张量显示挤压最大的方向与地表近垂直,这与位移云图中滇东南弧形构造带及邻区近地表垂直方向上主要显示地表下降相对应。将改变下地壳速度边界条件的 3 组模型(图 9j—9l)与初步模型进行对比,结果显示:最大主应力的整体分布情况相似,但上述显示出较大拉张应力的区域范围有明显扩张。这表明下地壳流的存在对于拉张占主导地位的区域具有显著的应力增强效应。现今 GPS 水平速度场和长期水准观测研究显示滇东南弧形构造带及邻区近地表存在近东西方向的拉伸和北西方向的挤压,且从现今地壳变形特征分析,该区域受到的挤压作用较弱,而近东西方向的拉张作用反而较强(Wang et al., 2016; Zheng et al., 2017; 朱良玉, 2020; Li et al., 2023),与模型二和模型三结果所呈现的最大主应力及应力张量相吻合。

4 讨论

4.1 区域构造特征及活动性质

目前关于现今滇东南弧形构造带区域是处于





云图中叠加了对应的应力张量，用于指示最大、最小和中间主应力的方向及大小，其中 g—l 图例中提取了各主轴优势方向，并通过不同颜色进行区分（红色指示最大主应力轴，蓝色指示最小主应力轴，绿色指示中间主应力轴）

a—f—6 个模型近地表最大剪切应变率云图（最大剪切应变率的大小及剪切方向对应每个云图左侧的色标：正值表示顺时针方向；负值表示逆时针方向，最大剪切应变率具体数值为该颜色对应的绝对值，单位为 s^{-1}）；g—l—6 个模型近地表最大主应力云图（最大主应力的大小及特性对应每个云图左侧的色标：正值表示最大主应力方向为拉张；负值表示最大主应力方向为挤压，最大主应力具体数值为该颜色对应的绝对值，单位为 Pa）

图 9　三维地质模型数值模拟最大剪切应变率及最大主应力云图

Fig. 9　Contour maps for numerical geological 3D simulations of maximum shear strain rate and maximum principal stress

(a—f) Near-surface maximum shear strain rate contours of the six models (the magnitude and shear direction of the maximum shear strain rate are absolute values in s^{-1} and correspond to the color bar on the left side of each contour map: positive values indicate clockwise direction; negative values indicate counterclockwise direction); (g—l) near-surface maximum principal stress contours of the six models (the magnitude and characteristics of the maximum principal stress are absolute values in Pa and correspond to the color bar on the left side of each contour map: positive values indicate tension in the direction of the maximum principal stress; negative values indicate compression in the direction of the maximum principal stress)

The contour maps are superimposed with the corresponding stress tensors to indicate the direction and magnitude of the maximum, minimum, and intermediate principal stresses. In the legend from g to l, the dominant directions of each principal axis are extracted and distinguished by different colors (red indicates the maximum principal stress axis, blue indicates the minimum principal stress axis, and green indicates the intermediate principal stress axis).

挤压状态还是拉张状态，观点仍不统一。主张其处于挤压状态的学者主要论据有 2 个：①地壳缩短变形在滇东南弧形构造带区域普遍存在（何宏林等，1992）；②小江断裂南段的左旋走滑速率相比北段显著减小，据此认为减小的速率可能转化为曲江断裂、石屏−建水断裂和红河断裂中部的逆走滑运动（闻学泽等，2011；Li et al.，2020）。

针对论据①，Schoenbohm et al.（2006b）认为地壳增厚是在没有明显的上地壳缩短的情况下发生的，通过下地壳流动实现增长；呼楠和韩竹军（2013）则认为上地壳缩短变形可能并没有持续到第四纪晚期；Leloup et al.（2001）曾提出拉链构造模型（zipper tectonic model）理论，指出一个大型走滑断层带可以经历不同的构造活动阶段，即挤压构造—走滑构造—拉张构造。根据上文分析，并结合有关该区域构造演化及物质迁移模型的研究（Schoenbohm et al.，2006b；Qiao et al.，2018；Wang et al.，2022），文章认为广泛存在的褶皱和逆冲构造可能指示该区域在新生代早期存在过地壳缩短，而自中新世晚期以来，随着物质迁移模式的过渡和区域构造反转，印度板块前缘回撤和下地壳流的活动对区域的地表隆升及地壳变形的影响逐渐显著，形成了现今以拉张−剪切为主的应力背景。针对论据②，目前大量 GPS 和地震波资料研究表明，该地区的断裂及发震构造以正走滑运动为主，小震震源机制解的结果也显示出该区域整体逆走滑性质的节面数仅约为正走滑的 1/2（王椿镛等，1978；Shen et al.，2005；王阎昭等，2008；呼楠和韩竹军，2013）；此外，沿红河断裂中南段野外踏勘也发现该区域断裂以右旋走滑为主并伴有倾滑分量，整体表现为正走滑运动特征。

4.2　青藏高原东南缘的动力学背景探究

研究表明，青藏高原东南缘 GPS 速度场、泊松比、地壳厚度、岩石圈厚度及地震各向异性都在 26.5°N 附近出现明显分界（Shi et al.，2012；常利军等，2015；Yang et al.，2017；Zhang and Gao，2019；高原等，2020）。笔者将分界两侧的速度边界条件作为

对照，分别模拟了26.5°N以北和以南远场传递过来的应力所造成的构造带变形特征，最终的模拟结果也验证了多力源共同作用这一猜想，并认为青藏高原东南缘现今的构造变形及地貌演化主要受控于2个不同的力源共同作用所导致。目前最符合这一特征的2个力源分别是：①由于印度板块对欧亚板块北向推挤作用，经过稳定地块及构造的阻挡导致岩石圈物质的东南向移动（曾融生和孙为国，1992; Wang et al., 2016; Li et al., 2020; Fan et al., 2023）；②由于印度−澳洲板块向欧亚板块的俯冲作用，于苏门答腊−爪哇俯冲带下发生的弧后拉张及板块回撤（Allmendinge et al., 2007; Schellart et al., 2019; Zheng et al., 2020）。对于这2个力源在该区域的作用时间与范围虽然已有较多讨论（Wang et al., 2022），但此次研究无法给出更准确的佐证，故并未进一步讨论。

文中主要是基于边界条件的设置对三维地质模型的地表变形进行讨论，鉴于深部地下结构的不确定性，特别是下地壳流的存在及分布范围、断裂的倾向等深部延伸情况仍存在分歧，研究无法给出区域内更为精细的力源机制（如软流圈的流动、熔融下地壳的主动流动及被动剪切、上地壳内部复杂的先存构造等）。尽管如此，文中的研究结果仍然有助于理解青藏高原东南缘现今的动力学背景，在未来的研究中可以进一步探讨下地壳流与软流圈流动之间的相互作用，以及更为精细的断裂形态等因素，以便更全面地揭示青藏高原东南缘地区的构造演化和地表特征形成机制。

4.3 下地壳流对区域构造变形的影响

大量研究表明青藏高原东南缘存在大范围连通的下地壳流（白志明和王椿镛，2004; Wang et al., 2007; Bai et al., 2010; Qiao et al., 2018; 宁铄现和陈永顺，2023），并认为下地壳流对上地壳的拖拽力与板块间的作用力一样是不可忽略的（朱守彪和石耀霖，2004; 王辉等，2007; 曹建玲等，2009）。因此，此次数值模拟也考虑了下地壳流的影响。

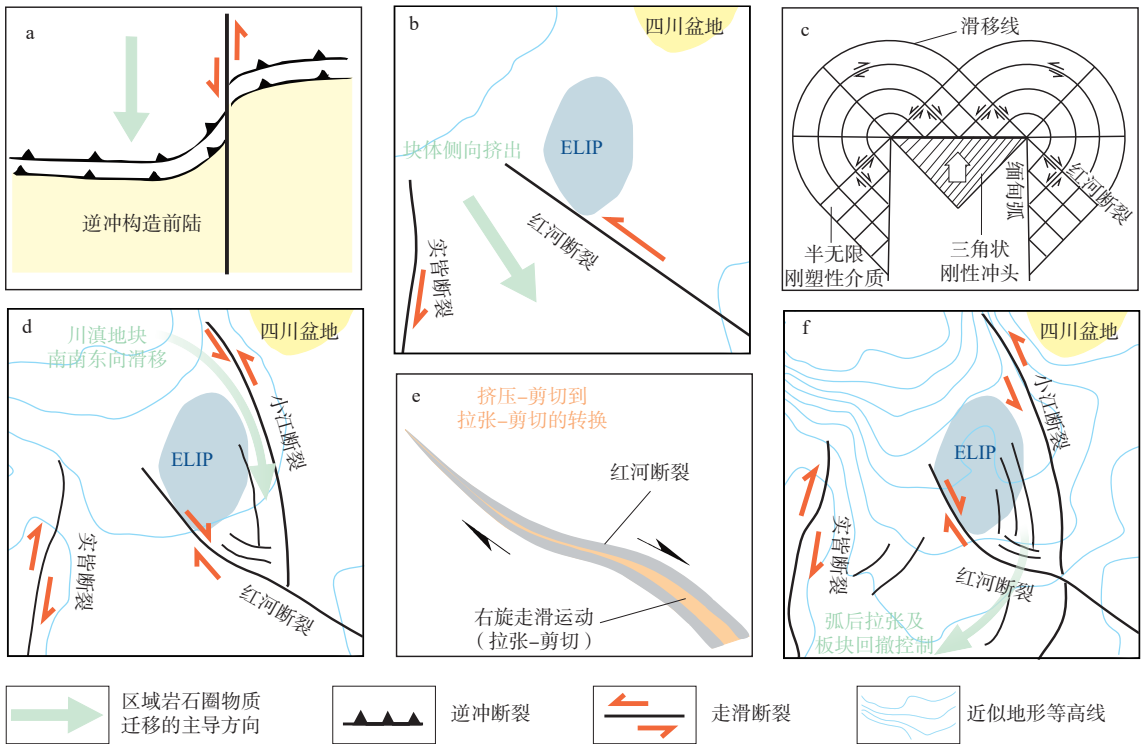
研究结果表明，下地壳流的存在对区域构造变形及应力状态起着重要的调节和控制作用。下地壳流的存在对区域的构造变形尺度具有显著影响，在水平方向上使得模型近地表位移量增加，在垂直方向上使得模型北部的地表隆起和模型南部的地表下降位移量增加。同时，下地壳流的存在使得速度场大小更接近现今GPS水平速度场，并且对区域最大剪切应变率积累起到促进作用，其对于拉张占主导地位的区域具有显著的应力增强效应，可能会进一步加剧这些区域的拉伸作用，影响区域的构造稳定性。

4.4 弧形构造带成因分析

上文认为青藏高原东南缘现今的构造变形主要受控于2个不同力源的共同作用，这2个力源作用在滇东南弧形构造带中所反映出的水平位移矢量及应力−应变结果，进一步验证了该观点。对比模拟结果中2个叠加力源和单一力源在该区域显示的水平位移矢量与现今该区域的GPS水平速度场推断出，苏门答腊−爪哇俯冲带下发生的弧后拉张及板块回撤在滇东南弧形构造带起着更为显著的控制作用，并且在该力源的作用下沿水平速度场方向弧形构造带的挠度将进一步变大，最大主应力云图（图9k）中显示的红河断裂弧顶弯折区域的拉伸应力异常值及区域应力张量的方向也为这一推论提供了有力的证据。

Macedo and Marshak（1999）基于简单的沙箱模型对弧形构造带形成发育的各种构造背景进行分析，提出了弧形构造带常见的几种成因：①卷入逆冲构造的盆地中存在横向不均匀的沉积盖层；②受逆冲构造前缘两端的障碍物影响而发生弯曲；③逆冲构造的前陆边界本身是弯曲的；④逆冲构造基底的横向拆离层强度不均匀；⑤逆冲构造受走滑断层的牵引而弯曲；⑥2个非平行（不同时期）造山带相交和重叠造成的弯曲；⑦因构造楔入体的作用而弯曲。在该区域以往的研究认识中并不存在显著的前陆构造不均匀作为构成大多数弯曲形态形成的必要条件，因此，文章认为滇东南弧形构造带初始弯曲形态的形成与上述成因⑤相吻合（图10a），并推测力源来自岩石圈物质的东南向移动。

滇东南弧形构造带早期的运动性质与现今并不相同（图10b），由于印度−欧亚板块的横向汇聚和侧向挤出作用，使得红河断裂经历了左旋走滑运动（Tapponnier et al., 1982, 1990; Leloup et al., 1995, 2001; 任龙龙等，2020; Wang et al., 2020）。结合Tapponnier and Molnar（1976）提出的滑移线场理论（图10c），印度板块对欧亚板块北向推挤作用经过稳定地块及构造的阻挡，造成了川滇地块南南东向的主动滑移运动，进而形成了现今红河断裂右旋走滑的运动特征，并伴生小江断裂带呈现出以西盘为主动盘的剧烈左旋走滑运动（图10d），模型一所模拟的远场应力传递与这一过程有很好的对应性，其最大剪切应



a—受走滑断层控制的逆冲构造（修改自 Macedo and Marshak, 1999）；b、d、f—滇东南弧形构造演化（图中浅蓝色近似地形等高线参考自 Schoenbohm et al., 2006a；ELIP 表示峨眉山大火成岩省的内区，范围圈定参考 Xu et al., 2004）；c—滑移线场模式（修改自 Tapponnier and Molnar, 1976，其中三角状刚性冲头用于类比印度板块，半无限刚塑性介质用于类比亚洲大陆，滑移线则指示了材料中的最大剪切应力和变形的位置）；e—红河断裂中南段右旋走滑拉张–剪切变形示意图

图 10　滇东南弧形构造形成与演化

Fig. 10　Formation and evolution of the southeast Yunnan Arcuate Structural Belt

(a) Thrust structures controlled by a strike-slip fault (modified from Macedo and Marshark, 1999); (b), (d), (f) The evolution of southeast Yunnan Arcuate Structural Belt (the light blue areas are approximate topographic contours from Schoenbohm et al., 2006a; ELIP represents the inner zone of the Emeishan large igneous province, and its range is delineated with reference to Xu et al., 2004); (c) Slip-line field model (modified from Tapponnier and Molnar, 1976, the triangular rigid punch is used to analogize the Indian Plate, the semi-infinite rigid-plastic medium is used to analogize the Asian Continent, and the slip lines indicate the locations of maximum shear stress and deformation in the material); (e) Schematic diagram of dextral strike-slip and transtension in the central and southern segments of the Red River fault

变率模拟结果（图 9a）也支持这一推论。参考 Leloup et al.（2001）提出的“拉链”构造模型，笔者推测在川滇地块南南东向的主动滑移运动的过程中，同样存在从挤压–剪切（transpression）到拉张–剪切（transtension）的转换（图 10e），而在挤压–剪切过程中逆冲分量叠加剧烈左旋走滑运动的小江断裂进行牵引，形成了早期滇东南弧形构造带的初始弯曲形态（图 10d）。

此外，模型一的最大主应力模拟结果显示，滇东南弧形构造带及邻区近地表在仅受岩石圈物质东南向移动的远场作用下，弧形构造带沿线虽然以北西—南东向的挤压作用占主导，但除小江断裂和红河断裂的交汇处，北东—南西向仍显示为拉张作用（图 9g），这与现今该区域的地壳应力特征相符（Wang et al., 2016; Zheng et al., 2017; 朱良玉，2020; Li et al., 2023）。结合模型一近地表最大剪切应变率（图 9a）和水平运动速度矢量的方向（图 8a），笔者推断在滇东南弧形构造带初始弯曲形态形成后，川滇地块南南东向的主动滑移运动，在弧形构造带上产生挤压作用，然而，由于先存构造几何形态的限制，该挤压作用转化为构造带的顺时针旋转，并表现为断裂转折处作为支点的拉张现象（图 10e）。

综上所述，文章认为早期滇东南弧形构造带的形变与岩石圈物质的东南向移动有关，挤压–剪切应力背景中的逆冲分量在小江断裂左旋走滑运动的牵引下形成了早期弧形构造带的初始弯曲形态，而后期，弧形构造带在先存构造几何形态的限制和弧后拉张及板块回撤的控制下，沿水平速度场方向继续产生形变，进而形成现今以拉张–剪切为主的

应力背景，据此推断弧形构造带的挠度将在未来进一步变大（图 10f）。

5 结论

（1）红河断裂中南段现今以右旋走滑运动为主，并伴有明显的倾滑分量，整体显示正走滑运动性质，这些普遍存在的正走滑断层进一步证实该区域主要受拉张–剪切的应力作用控制。

（2）青藏高原东南缘现今的构造变形及地貌演化主要受控于岩石圈物质的东南向移动和苏门答腊–爪哇俯冲带下发生的弧后拉张及板块回撤 2 个不同的力源共同作用，其中弧后拉张及板块回撤对滇东南弧形构造带现今的构造变形起着更为重要的控制作用。此外，下地壳流的存在会显著影响该区域构造变形的尺度，同时对区域构造变形速率及应力状态起着重要的调节和控制作用。

（3）滇东南弧形构造带初始弯曲形态的形成主要受控于早期岩石圈物质东南向移动以及小江断裂左旋走滑运动的牵引。后期该构造带则受到弧后拉张及板块回撤的控制，并在先存构造几何形态的限制下，沿水平速度场方向产生持续形变，进而形成了现今拉张–剪切为主的应力背景。

References

ALLEN C R, GILLESPIE A R, YUAN H, et al., 1984. Red River and associated faults, Yunnan Province, China: Quaternary geology, slip rates, and seismic hazard[J]. Geological Society of America Bulletin, 95(6): 686-700.

ALLMENDINGER R W, REILINGER R, LOVELESS J, 2007. Strain and rotation rate from GPS in Tibet, Anatolia, and the Altiplano[J]. Tectonics, 26(3): TC3013.

BAI D H, UNSWORTH M J, MEJU M A, et al., 2010. Crustal deformation of the eastern Tibetan plateau revealed by magnetotelluric imaging[J]. Nature Geoscience, 3(5): 358-362.

BAI Z M, WANG C Y, 2003. Tomographic investigation of the upper crustal structure and seismotectonic environments in Yunnan Province[J]. Acta Seismologica Sinica, 25(2): 117-127. (in Chinese with English abstract)

BAI Z M, WANG C Y, 2004. Tomography research of the Zhefang-Binchuan and Menglian-Malong wide—angle seismic profiles in Yunnan Province[J]. Chinese Journal of Geophysics, 47(2): 257-267. (in Chinese with English abstract)

CAO J L, SHI Y L, ZHANG H, et al., 2009. Numerical simulation of GPS observed clockwise rotation around the eastern Himalayan syntax in the Tibetan Plateau[J]. Chinese Science Bulletin, 54(8): 1398-1410. (in Chinese with English abstract)

CAO Y, FU H, QIAN J W, 2023. Characteristics of 3D velocity structure in the arcuate tectonic belt of southeastern Yunnan[J]. Journal of Seismological Research, 46(2): 245-260. (in Chinese with English abstract)

CHANG L J, DING Z F, WANG C Y, 2015. Upper mantle anisotropy beneath the southern segment of North-South tectonic belt, China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 58(11): 4052-4067. (in Chinese with English abstract)

CHEN C Y, ZHAN W, LI X C, et al., 2024a. Block motion, slip rates, and earthquake hazard assessment of boundary faults in the Sichuan–Yunnan region, China[J]. Acta Geophysica, 72(6): 3831-3848.

CHEN Y Y, LI Z H, TANG K, et al., 2024b. Mechanism of metamorphic fluid expulsion from ductile contact aureole: Insights from numerical modeling of a growing mid-crustal magma chamber[J]. Earth and Planetary Science Letters, 626: 118545.

CHEN Z K, SU J B, LU Y, 2019. Application and trend of numerical simulation in dynamic study of orogenic belt in China[J]. Journal of Geomechanics, 25(2): 151-165. (in Chinese with English abstract)

CLARK M K, ROYDEN L H, 2000. Topographic ooze : building the eastern margin of Tibet by lower crustal flow[J]. Geology, 28(8): 703-706.

CU'Ò'NG N, TOKARSKI A K, ŚWIERCZEWSKA A, et al., 2013. Late Tertiary tectonics of the Red River Fault Zone: Structural evolution of sedimentary rocks[J]. Journal of Geodynamics, 69: 31-53.

DONG L, SHEN X Z, QIAN Y P, 2020. Study on velocity and density contrasts across the Moho in the southeastern margin of the Tibetan Plateau[J]. Chinese Journal of Geophysics, 63(3): 915-927. (in Chinese with English abstract)

DONG X P, LI Z H, JING X H, et al., 2023. Stratigraphic sequence characteristics and geochronology research progress of the Cenozoic in the arcuate tectonic belt on the northeastern margin of the Tibet Plateau[J]. Journal of Geomechanics, 29(4): 465-484. (in Chinese with English abstract)

FAN W J, ZHU Y, JI Y F, et al., 2023. Present-day tectonic stress evolution in southern Yunnan based on focal mechanisms[J]. Sensors, 23(17): 7406.

FERRILL D A, GROSHONG R H, 1993. Kinematic model for the curvature of the northern Subalpine Chain, France[J]. Journal of Structural Geology, 15(3-5): 523-541.

GAN W J, MOLNAR P, ZHANG P Z, et al., 2022. Initiation of clockwise rotation and eastward transport of southeastern Tibet inferred from deflected fault traces and GPS observations[J]. GSA Bulletin, 134(5-6): 1129-1142.

GAO Y, SHI Y T, WANG Q, 2020. Seismic anisotropy in the southeastern margin of the Tibetan Plateau and its deep tectonic significances[J]. Chinese Journal of Geophysics, 63(3): 802-816. (in Chinese with English abstract)

GE J, SHI X H, CHEN H L, et al., 2022. Two kinematic transformations of the Pamir salient since the Mid-Cenozoic: constraints from multi-timescale deformation analysis[J]. Frontiers in Earth Science, 10: 967529.

HAN S, WU Z H, WANG S F, et al., 2024. Late Quaternary surface deformation and tectonic implications of the Bue Co strike-slip fault system in central-western Qiangtang block[J]. Journal of Geomechanics, 30(2): 298-313. (in Chinese with English abstract)

HAN X M, CHAI T J, XIAO J A, et al., 1982. Neotectonic movement of the

central part of the Shiping-Jianshui Fault in Yunnan Province and earthquake[J]. Journal of Seismological Research, 5(2): 220-225. (in Chinese with English abstract)

HAO M, WANG Q L, SHEN Z K, et al., 2014. Present day crustal vertical movement inferred from precise leveling data in eastern margin of Tibetan Plateau[J]. Tectonophysics, 632: 281-292.

HE H L, LI P, FANG Z J, 1992. Analysis of seismogenic conditions in the wedge tectonic region of Southeast Yunnan Province[J]. Seismology and Geology, 13(3): 217-226. (in Chinese with English abstract)

HU N, HAN Z J, 2013. Seismological study on behaviors of present-day movement of arcuate tectonic belt in Southeast Yunnan[J]. Seismology and Geology, 35(1): 1-21. (in Chinese with English abstract)

HUANG Z C, JI C, WU H T, et al., 2021. Review on the crustal structures and deformations in the southeastern margin of the Tibetan Plateau[J]. Reviews of Geophysics and Planetary Physics, 52(3): 291-307. (in Chinese with English abstract)

JIAO L Q, TAPPONNIER P, DONZÉ F V, et al., 2023. Discrete element modeling of southeast Asia's 3D lithospheric deformation during the Indian collision[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 128(1): e2022JB025578.

JIAO L Q, TAPPONNIER P, MCCALLUM A C C, et al., 2024. The shape of the Himalayan " Arc" : an ellipse pinned by syntaxial strike-slip fault tips[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 121(4): e2313278121.

KAN R J, ZHANG S C, YAN F T, et al., 1977. Present tectonic stress field and its relation to the characteristics of recent tectonic activity in southwestern China[J]. Acta Geophysica Sinica, 20(2): 96-109. (in Chinese with English abstract)

LAI K Y, CHEN Y G, LÂM D Đ, 2012. Pliocene-to-present morphotectonics of the Dien Bien Phu fault in northwest Vietnam[J]. Geomorphology, 173-174: 52-68.

LELOUP P H, LACASSIN R, TAPPONNIER P, et al., 1995. The Ailao Shan-Red river shear zone (Yunnan, China), tertiary transform boundary of Indochina[J]. Tectonophysics, 251(1-4): 3-84.

LELOUP P H, ARNAUD N, LACASSIN R, et al., 2001. New constraints on the structure, thermochronology, and timing of the Ailao Shan - Red River shear zone, SE Asia[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 106(B4): 6683-6732.

LI L, 2015. Study on the activity of the Xiaojian-Dianbianfu fault[D]. Kunming: Yunnan University. (in Chinese)

LI L Y, ZHAN W, CHEN C Y, et al., 2023. Stress-strain characteristics before the 2021 M_s 6.4 Yangbi earthquake in Yunnan Province, China, and implications for the seismogenic mechanism[J]. Pure and Applied Geophysics, 180(7): 2543-2559.

LI S G, 1954. Vortex structure and other problems relating to the compounding of geotectonic systems of northwestern China[J]. Acta Geological Sinica, 34(4): 339-410. (in Chinese)

LI S H, HUANG B C, ZHU R X, 2012. Paleomagnetic constraints on the tectonic rotation of the southeastern margin of the Tibetan Plateau[J]. Chinese Journal of Geophysics, 55(1): 76-94. (in Chinese with English abstract)

LI X, RAN Y K, CHEN L C, et al., 2016. The Holocene seismic evidence on southern segment of the Red River fault zone[J]. Seismology and Geology, 38(3): 596-604. (in Chinese with English abstract)

LI Y F, QU G S, ZHANG J, 2007. Developments in research of arcuate structure[J]. Advances in Earth Sciences, 22(7): 708-715. (in Chinese with English abstract)

LI Z H, 2014. A review on the numerical geodynamic modeling of continental subduction, collision and exhumation[J]. Science China Earth Sciences, 57(1): 47-69.

LI Z H, LIU M Q, GERYA T, 2015. Material transportation and fluid-melt activity in the subduction channel: numerical modeling[J]. Science China Earth Sciences, 58(8): 1251-1268.

LI Z J, WANG Y, GAN W J, et al., 2020. Diffuse deformation in the SE Tibetan Plateau: new insights from geodetic observations[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 125(10): e2020JB019383.

LIN G, ZHAO C B, ZHANG Y H, et al., 2005. The principle, method and related research progress on the numerical modeling of geological structural deformation[J]. Advance in Earth Sciences, 20(5): 549-555. (in Chinese with English abstract)

LIU M, YANG Y Q, STEIN S, et al., 2000. Crustal shortening in the Andes: why do GPS rates differ from geological rates?[J]. Geophysical Research Letters, 27(18): 3005-3008.

LIU X X, SHAO Z G, 2020. Current fault movement characteristics in the Lijiang-Xiaojinhe fault zone[J]. Chinese Journal of Geophysics, 63(3): 1117-1126. (in Chinese with English abstract)

MA H Y, LUO A X, WANG C Y, et al., 2022. Formation and evolution characteristics of arcuate tectonic belt[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 42(4): 752-759. (in Chinese with English abstract)

MACEDO J, MARSHAK S, 1999. Controls on the geometry of fold-thrust belt salients[J]. Geological Society of America Bulletin, 111(12): 1808-1822.

MARSHAK S, 1988. Kinematics of orocline and arc formation in thin-skinned orogens[J]. Tectonics, 7(1): 73-86.

NING S X, CHEN Y S, 2023. Is there an interconnected lower crustal channel flow beneath southeastern margin of Tibetan Plateau?[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 59(3): 395-406. (in Chinese with English abstract)

PEI X, LI Z H, SHI Y L, 2021. Formation mechanism of arcuate tectonic structures around Northeast Tibetan Plateau: insight from 3 - D numerical modeling[J]. Terra Nova, 33(4): 345-355.

QIAO L, YAO H J, LAI Y C, et al., 2018. Crustal structure of Southwest China and northern Vietnam from ambient noise tomography: implication for the large - scale material transport model in SE Tibet[J]. Tectonics, 37(5): 1492-1506.

REN L L, ZHANG B, ZHENG D W, et al., 2020. Tectonic transformation and its exhumation history of the Ailao Shan-Red River shear zone in Oligocene: Evidences from apatite fission track thermochronology of the southern segment of the Ailao Shan range[J]. Acta Petrologica Sinica, 36(6): 1787-1802. (in Chinese with English abstract)

REPLUMAZ A, LACASSIN R, TAPPONNIER P, et al., 2001. Large river offsets and Plio-Quaternary dextral slip rate on the Red River fault (Yunnan, China)[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 106(B1): 819-836.

SCHELLART W P, CHEN Z, STRAK V, et al., 2019. Pacific subduction control on Asian continental deformation including Tibetan extension and eastward extrusion tectonics[J]. Nature Communications, 10(1): 4480.

SCHOENBOHM L M, BURCHFIEL B C, LIANGZHONG C, et al., 2006a. Miocene to present activity along the Red River fault, China, in the context of continental extrusion, upper-crustal rotation, and lower-crustal flow[J]. GSA Bulletin, 118(5-6): 672-688.

SCHOENBOHM L M, BURCHFIEL B C, LIANGZHONG C, et al., 2006b. Propagation of surface uplift, lower crustal flow, and Cenozoic tectonics of the southeast margin of the Tibetan Plateau[J]. Geology, 34(10): 813-816.

SHEN Z K, LÜ J, WANG M, et al., 2005. Contemporary crustal deformation around the southeast borderland of the Tibetan Plateau[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 110(B11): 1-17.

SHI X H, SIEH K, WELDON R, et al., 2018. Slip rate and rare large prehistoric earthquakes of the Red River fault, southwestern China[J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 19(7): 2014-2031.

SHI Y T, GAO Y, SU Y J, et al., 2012. Shear-wave splitting beneath Yunnan area of Southwest China[J]. Earthquake Science, 25(1): 25-34.

SHU Y H, SHI X H, HAINES S, et al., 2024. Illite K - Ar dating of the Leibo fault zone, southeastern margin of the Tibetan Plateau: Implications for the quasi - synchronous far - field tectonic response to the India - Asia collision[J]. Geophysical Research Letters, 51(6): e2023GL108027.

SUN Y, NIU F, LIU H, et al., 2012. Crustal structure and deformation of the SE Tibetan plateau revealed by receiver function data[J]. Earth and Planetary Science Letters, 349-350: 186-197.

TAN X H, SONG C Z, ZHA F S, et al., 2010. Application of numerical simulation in tectonic deformation research[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 33(12): 1851-1857. (in Chinese with English abstract)

TAPPONNIER P, MOLNAR P, 1976. Slip-line field theory and large-scale continental tectonics[J]. Nature, 264(5584): 319-324.

TAPPONNIER P, PELTZER G, LE DAIN A Y, et al., 1982. Propagating extrusion tectonics in Asia: new insights from simple experiments with plasticine[J]. Geology, 10(12): 611-616.

TAPPONNIER P, LACASSIN R, LELOUP P H, et al., 1990. The Ailao Shan/Red River metamorphic belt: tertiary left-lateral shear between Indochina and South China[J]. Nature, 343(6257): 431-437.

TAPPONNIER P, XU Z Q, ROGER F, et al., 2001. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet Plateau[J]. Science, 294(547): 1671-1677.

WAN Y K, SHEN X Q, LIU R F, et al., 2021. Present slip and stress distribution of block boundary faults in the Sichuan-Yunnan region[J]. Seismology and Geology, 43(6): 1614-1637. (in Chinese with English abstract)

WANG A, WANG G C, WANG T L, et al., 2023. Cenozoic tectonics and geomorphic evolution of the lower Jinsha River on the southeastern margin of the Tibetan Plateau[J]. Journal of Geomechanics, 29(4): 453-464. (in Chinese with English abstract)

WANG C Y, ZHU C N, LIU Y Q, 1978. Determination of earthquake fault parameter for the Tonghai earthquake from ground deformation data[J]. Acta Geophysica Sinica, 21(3): 191-198. (in Chinese with English abstract)

WANG C Y, HAN W B, WU J P, et al., 2007. Crustal structure beneath the eastern margin of the Tibetan Plateau and its tectonic implications[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 112(B7): B07307.

WANG E, BURCHFIEL B C, ROYDEN L H, et al. , 1998. Late Cenozoic Xianshuihe-Xiaojiang, Red River, and Dali fault systems of southwestern Sichuan and central Yunnan, China[M]. Geological Society of America.

WANG H, CAO J L, ZHANG H, et al., 2007. Numerical simulation of the influence of lower-crustal flow on the deformation of the Sichuan-Yunnan region[J]. Acta Seismologica Sinica, 29(6): 581-591. (in Chinese with English abstract)

WANG R R, XU Z Q, LIANG F H, 2013. Origin of the Dabashan salient: evidence from numerical modelling[J]. Acta Geologica Sinica, 87(10): 1489-1497. (in Chinese with English abstract)

WANG Y, ZHANG B, HOU J J, et al., 2014. Structure and tectonic geomorphology of the Qujiang fault at the intersection of the Ailao Shan–Red River fault and the Xianshuihe–Xiaojiang fault system, China[J]. Tectonophysics, 634: 156-170.

WANG Y, ZHANG B, SCHOENBOHM L M, et al., 2016. Late Cenozoic tectonic evolution of the Ailao Shan - Red River fault (SE Tibet): implications for kinematic change during plateau growth[J]. Tectonics, 35(8): 1969-1988.

WANG Y, WANG Y J, SCHOENBOHM L M, et al., 2020. Cenozoic exhumation of the Ailaoshan - Red River shear zone: New insights from low-temperature thermochronology[J]. Tectonics, 39(9): e2020TC 006151.

WANG Y, WANG Y J, ZHANG P Z, et al., 2022. Cenozoic tectonic evolution of regional fault systems in the SE Tibetan Plateau[J]. Science China Earth Sciences, 65(4): 601-623.

WANG Y Z, WANG E N, SHEN Z K, et al., 2008. GPS-constrained inversion of present-day slip rates along major faults of the Sichuan-Yunnan region, China[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 51(9): 1267-1283. (in Chinese with English abstract)

WEI W X, 2013. Study on mechanisms and characteristics of major faults in the eastern boundary of the Sichuan-Yunnan block[D]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration. (in Chinese with English abstract)

WEN X Z, MA S L, XU X W, et al., 2008. Historical pattern and behavior of earthquake ruptures along the eastern boundary of the Sichuan-Yunnan faulted-block, southwestern China[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 168(1-2): 16-36.

WEN X Z, DU F, LONG F, et al., 2011. Tectonic dynamics and correlation of major earthquake sequences of the Xiaojiang and Qujiang-Shiping fault systems, Yunnan, China[J]. Science China Earth Sciences, 54(10): 1563-1575.

WU H L, SHI W, DONG S W, et al., 2009. A numerical simulating study of mechanical characteristic of superposed deformation in Daba Mountain Foreland[J]. Earth Science Frontiers, 16(3): 190-196. (in Chinese with English abstract)

WU Z H, LONG C X, FAN T Y, et al., 2015. The arc rotational-shear active tectonic system on the southeastern margin of Tibetan Plateau and its dynamic characteristics and mechanism[J]. Geological Bulletin of China, 34(1): 1-31. (in Chinese with English abstract)

XIANG H F, WAN J L, HAN Z J, et al., 2007. Geological analysis and FT

dating of the large-scale right-lateral strike-slip movement of the Red River fault zone[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 50(3): 331-342. (in Chinese with English abstract)

XU X W, WEN X Z, ZHENG R Z, et al., 2003. Pattern of latest tectonic motion and its dynamics for active blocks in Sichuan-Yunnan region[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 46(2): 210-226.

XU Y G, HE B, CHUNG S L, et al., 2004. Geologic, geochemical, and geophysical consequences of plume involvement in the Emeishan flood-basalt province[J]. Geology, 32(10): 917-920. (in Chinese with English abstract)

XU Z Q, WANG Q, LI Z H, et al., 2016. Indo-Asian collision: tectonic transition from compression to strike slip[J]. Acta Geologica Sinica, 90(1): 1-23. (in Chinese with English abstract)

YANG H Y, PENG H C, HU J F, 2017. The lithospheric structure beneath southeast Tibet revealed by P and S receiver functions[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 138: 62-71.

ZENG R S, SUN W G, 1992. Discussion on seismic activity, source mechanism and eastward flow of material from the Qinghai-Tibet Plateau and its adjacent regions[J]. Acta Seismologica Sinica, 14(S1): 534-564. (in Chinese)

ZHANG J G, DING Z F, 2016. Discussion about several issues on Dien Bien Phu fault & North-South Seismic Belt[J]. Journal of Seismological Research, 39(4): 527-536. (in Chinese with English abstract)

ZHANG P Z, DENG Q D, ZHANG G M, et al., 2003. Active tectonic blocks and strong earthquakes in the continent of China[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 46(2): 13-24.

ZHANG Z L, LIU X M, 1982. The focal characteristics of the Tonghai earthquake, Yunnan province, on January 5, 1970[J]. Acta Geophysica Sinica, 25(5): 440-447. (in Chinese with English abstract)

ZHANG Z Q, 2019. Crustal thicknesses and Poisson's ratios of the southeastern margin of the Tibetan Plateau[D]. Beijing: Institute of Earthquake Forecasting, China Earthquake Administration. (in Chinese with English abstract)

ZHANG Z Q, GAO Y, 2019. Crustal thicknesses and Poisson's ratios beneath the Chuxiong - Simao Basin in the Southeast Margin of the Tibetan Plateau[J]. Earth and Planetary Physics, 3(1): 69-84.

ZHANG Z Q, 2022. Crust and upper mantle shear wave velocity structure of the southeastern Tibetan Plateau and its deformation characteristics[D]. Beijing: University of Science and Technology of China. (in Chinese with English abstract)

ZHENG G, WANG H, WRIGHT T J, et al., 2017. Crustal deformation in the India - Eurasia collision zone from 25 years of GPS measurements[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 122(11): 9290-9312

ZHENG H W, LI T D, GAO R, et al., 2006. The advance of numerical simulation in geodynamics[J]. Progress in Geophysics, 21(2): 360-369. (in Chinese with English abstract)

ZHENG T Y, HE Y M, DING L, et al., 2020. Direct structural evidence of Indian continental subduction beneath Myanmar[J]. Nature Communications, 11(1): 1944.

ZHOU Q Y, LI X, CHANG Y Q, et al., 2023. Strong earthquake recurrence interval in the southern segment of the Red River Fault, southwestern China[J]. Frontiers in Earth Science, 11: 1280787.

ZHU L Y, 2020. Numerical simulation of crustal deformation dynamics in southeastern Tibet[D]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration. (in Chinese with English abstract)

ZHU S B, SHI Y L, 2004. Genetic algorithm-finite element inversion of drag forces exerted by the lower crust on the upper crust in the Sichuan-Yunnan area[J]. Chinese Journal of Geophysics, 47(2): 232-239. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

白志明，王椿镛，2003. 云南地区上部地壳结构和地震构造环境的层析成像研究[J]. 地震学报，25(2)：117-127.

白志明，王椿镛，2004. 云南遮放-宾川和孟连-马龙宽角地震剖面的层析成像研究[J]. 地球物理学报，47(2)：257-267.

曹建玲，石耀霖，张怀，等，2009. 青藏高原GPS位移绕喜马拉雅东构造结顺时针旋转成因的数值模拟[J]. 科学通报，54(2)：224-234.

曹颖，付虹，钱佳威，2023. 滇东南弧形构造区三维速度结构特征[J]. 地震研究，46(2)：245-260.

常利军，丁志峰，王椿镛，2015. 南北构造带南段上地幔各向异性特征[J]. 地球物理学报，58(11)：4052-4067.

陈振坤，苏金宝，陆艺，2019. 中国造山带动力学研究中的数值模拟应用与发展[J]. 地质力学学报，25(2)：151-165.

董蕾，沈旭章，钱银苹，2020. 青藏高原东南缘Moho面速度密度跃变研究[J]. 地球物理学报，63(3)：915-927.

董晓朋，李振宏，井向辉，等，2023. 青藏高原东北缘弧形构造带新生代地层沉积序列及年代学研究进展[J]. 地质力学学报，29(4)：465-484.

高原，石玉涛，王琼，2020. 青藏高原东南缘地震各向异性及其深部构造意义[J]. 地球物理学报，63(3)：802-816.

韩帅，吴中海，王世锋，等，2024. 羌塘地块中西部布木错走滑断裂系的第四纪晚期地表变形特征与构造意义[J]. 地质力学学报，30(2)：298-313.

韩新民，柴天俊，肖九安，等，1982. 石屏-建水断裂中段的新活动与地震[J]. 地震研究，5(2)：220-225.

何宏林，李玶，方仲景，1992. 滇东南楔形构造区发震构造背景探讨[J]. 地震地质，13(3)：217-226.

呼楠，韩竹军，2013. 滇东南弧形构造带现今活动性质的地震学研究[J]. 地震地质，35(1)：1-21.

黄周传，吉聪，吴寒婷，等，2021. 青藏高原东南缘地壳结构与变形机制研究进展[J]. 地球与行星物理论评，52(3)：291-307.

阚荣举，张四昌，晏凤桐，等，1977. 我国西南地区现代构造应力场与现代构造活动特征的探讨[J]. 地球物理学报，20(2)：96-109.

李力，2015. 小江—奠边府断裂活动性研究[D]. 昆明：云南大学.

李四光，1954. 旋卷构造及其他有关中国西北部大地构造体系复合问题[J]. 地质学报，34(4)：339-410.

李仕虎，黄宝春，朱日祥，2012. 青藏高原东南缘构造旋转的古地磁学证据[J]. 地球物理学报，55(1)：76-94.

李西，冉勇康，陈立春，等，2016. 红河断裂带南段全新世地震活动证据[J]. 地震地质，38(3)：596-604.

李岩峰，曲国胜，张进，2007. 弧形构造研究进展[J]. 地球科学进展，22(7)：708-715.

林舸, 赵重斌, 张晏华, 等, 2005. 地质构造变形数值模拟研究的原理、方法及相关进展[J]. 地球科学进展, 20(5): 549-555.

刘晓霞, 邵志刚, 2020. 丽江—小金河断裂带现今断层运动特征[J]. 地球物理学报, 63(3): 1117-1126.

马海勇, 罗安湘, 王朝阳, 等, 2022. 弧形构造带形成演化特征研究[J]. 西安科技大学学报, 42(4): 752-759.

宁铄现, 陈永顺, 2023. 青藏高原东南缘存在连通的下地壳流吗?[J]. 北京大学学报(自然科学版), 59(3): 395-406.

任龙龙, 张波, 郑德文, 等, 2020. 哀牢山-红河剪切带渐新世的构造体制转换与剥露历史: 来自哀牢山南段磷灰石裂变径迹的证据[J]. 岩石学报, 36(6): 1787-1802.

谭晓慧, 宋传中, 查甫生, 等, 2010. 数值模拟方法在构造变形研究中的应用[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 33(12): 1851-1857.

万永魁, 沈小七, 刘瑞丰, 等, 2021. 川滇地区活动块体边界断裂现今运动和应力分布[J]. 地震地质, 43(6): 1614-1637.

王岸, 王国灿, 王团乐, 等, 2023. 青藏高原东南缘金沙江下游新生代构造与地貌演化[J]. 地质力学学报, 29(4): 453-464.

王椿镛, 朱成男, 刘玉权, 1978. 用地形变资料测定通海地震的地震断层参数[J]. 地球物理学报, 21(3): 191-198.

王辉, 曹建玲, 张怀, 等, 2007. 川滇地区下地壳流动对上地壳运动变形影响的数值模拟[J]. 地震学报, 29(6): 581-591.

王瑞瑞, 许志琴, 梁凤华, 2013. 大巴山弧形构造的成因: 来自数值模拟的证据[J]. 地质学报, 87(10): 1489-1497.

王阎昭, 王恩宁, 沈正康, 等, 2008. 基于GPS资料约束反演川滇地区主要断裂现今活动速率[J]. 中国科学 D辑: 地球科学, 38(5): 582-597.

魏文薪, 2013. 川滇块体东边界主要断裂带运动特性及动力学机制研究[D]. 北京: 中国地震局地质研究所.

闻学泽, 杜方, 龙锋, 等, 2011. 小江和曲江-石屏两断裂系统的构造动力学与强震序列的关联性[J]. 中国科学: 地球科学, 41(5): 713-724.

武红岭, 施炜, 董树文, 等, 2009. 大巴山前陆叠加构造力学特征的模拟研究[J]. 地学前缘, 16(3): 190-196.

吴中海, 龙长兴, 范桃园, 等, 2015. 青藏高原东南缘弧形旋扭活动构造体系及其动力学特征与机制[J]. 地质通报, 34(1): 1-31.

向宏发, 万景林, 韩竹军, 等, 2006. 红河断裂带大型右旋走滑运动发生时代的地质分析与FT测年[J]. 中国科学 D辑: 地球科学, 36(11): 977-987.

徐锡伟, 闻学泽, 郑荣章, 等, 2003. 川滇地区活动块体最新构造变动样式及其动力来源[J]. 中国科学(D辑), 33(S1): 151-162.

许志琴, 王勤, 李忠海, 等, 2016. 印度-亚洲碰撞: 从挤压到走滑的构造转换[J]. 地质学报, 90(1): 1-23.

曾融生, 孙为国, 1992. 青藏高原及其邻区的地震活动性和震源机制以及高原物质东流的讨论[J]. 地震学报, 14(S1): 534-564.

张建国, 丁志峰, 2016. 奠边府断裂与南北地震带若干问题讨论[J]. 地震研究, 39(4): 527-536.

张培震, 邓起东, 张国民, 等, 2003. 中国大陆的强震活动与活动地块[J]. 中国科学(D辑), 33(S1): 12-20.

张之立, 刘新美, 1982. 1970年1月5日云南通海地震的震源特征[J]. 地球物理学报, 25(5): 440-447.

张智奇, 2022. 青藏高原东南缘地壳上地幔速度结构与变形特征研究[D]. 北京: 中国科学技术大学.

张子琦, 2019. 青藏高原东南缘地壳厚度和泊松比研究[D]. 北京: 中国地震局地震预测研究所.

郑洪伟, 李廷栋, 高锐, 等, 2006. 数值模拟在地球动力学中的研究进展[J]. 地球物理学进展, 21(2): 360-369.

朱良玉, 2020. 青藏高原东南缘地壳形变动力学数值模拟研究[D]. 北京: 中国地震局地质研究所.

朱守彪, 石耀霖, 2004. 用遗传有限单元法反演川滇下地壳流动对上地壳的拖曳作用[J]. 地球物理学报, 47(2): 232-239.