

李见, 陈佳, 叶泵, 等. 2024. 2013—2022 年滇西北地区 $M_s \geq 3.0$ 地震震源机制解及应力场特征分析. 中国地震, 40(3): 602~616.

2013—2022 年滇西北地区 $M_s \geq 3.0$ 地震震源机制解及应力场特征分析

李见 陈佳 叶泵 金明培 李孝宾

云南省地震局, 昆明 650224

摘要 采用 CAP 方法得到滇西北地区 2013 年 1 月—2022 年 5 月 259 次 3 级以上地震震源机制解, 采用阻尼参数方法反演应力场, 并结合漾濞 $M_s 6.4$ 地震震群对滇西北地区震源机制特征进行分析与讨论。结果显示: ①滇西北地区震源机制多为走滑类型, 部分为正断型, 震源深度较浅, 大多为高倾角地震; P 轴方向自北向南显示为 NNW 向、NW 和 NE 向, 表现出顺时针偏转趋势, P 轴、 T 轴均有较小的倾伏角, 地震震源应力作用以水平为主。②滇西北地区应力场类型以走滑型为主; 研究区北部德钦—中甸断裂附近为拉张型, 主压应力轴方向主要为 NW 向, 该区域受到了强烈的拉张作用; 东北部大理—丽江断裂附近有走滑型和拉张型分布, 拉张型在西南侧, 主压应力轴方向主要为 NNW 向; 大理地区红河断裂附近为走滑型和过渡型, 主压应力轴方向为 NNW 近 NS 和 NNE 向; 区域西南瑞丽—保山腾冲地区应力场为走滑型, 主压应力轴方向主要为 NE 向。整体上, 主压应力轴自北向南呈顺时针旋转, 在大理地区红河断裂附近顺时针旋转显著转变, 由 NNW 逐渐转变为 NNE。③维西—乔后断裂附近多次 5 级以上地震发震构造存在相同特征, 即发震构造均为维西—乔后西侧隐伏断裂或者次生断裂, 2022 年震源机制变化或许和断裂附近应力变化调整有关, 分析认为应进一步研究和重视该区中强地震活动。

关键词: 震源机制解 CAP 方法 滇西北 漾濞 6.4 级地震

[文章编号] 1001-4683(2024)03-0602-15 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

2021 年 5 月 21 日, 云南省漾濞县境内发生 $M_s 6.4$ 地震。漾濞 $M_s 6.4$ 地震发生于滇西北地区 ($24^\circ\text{N} \sim 29^\circ\text{N}$, $97^\circ\text{E} \sim 102^\circ\text{E}$), 该区域内地震活动性强烈, 自 1925 年有仪器记录以来, 包括漾濞 $M_s 6.4$ 地震在内, 共发生 22 次 6 级以上地震, 占同时期云南地区地震的 34%, 漾濞 $M_s 6.4$ 地震和区域内的上一次 6 级以上地震间隔 12 年, 这些震例为滇西北地区的震源机制研究丰富了新的资料(李见等, 2022)。2013 年 1 月至 2022 年 5 月, 滇西北地区共发生

[收稿日期] 2022-11-08 [修定日期] 2023-07-31

[项目类别] 中国地震局“三结合”课题(3JH-202401067)、云南省地震局科技人员传帮带(青年骨干人才培养)项目(CQ3-2021005)、云南省重点研发计划(公共安全专项)(202203AC100003)、云南省地震局科技创新团队(CXTD202411)共同资助

[作者简介] 李见, 男, 1994 年生, 工程师, 主要从事震源机制与地震流体监测研究。E-mail: 1586094020@qq.com

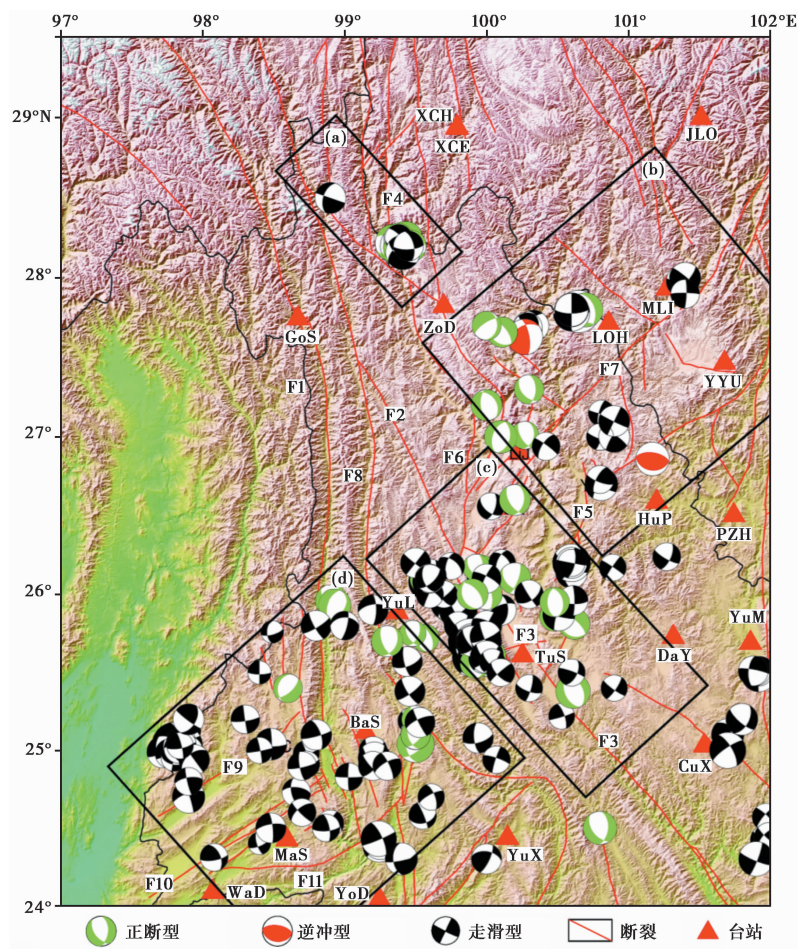
陈佳, 通讯作者, 女, 1982 年生, 高级工程师, 主要从事地震学与地震地质研究。E-mail: sarmar88@163.com

3级以上地震 259 次,其中,3.0~3.9 级地震 134 次,4.0~4.9 级 113 次,5.0~5.9 级地震 11 次,6.0~6.9 级地震 1 次。震源机制解是地震学研究的重要组成部分,对研究地震孕育发生、地壳应力场、强地面运动模拟、地震灾害评估等方面有着重要的意义(陈继锋等,2020)。大量中小地震震源机制解的优势结果可以反映区域构造应力场的特征,多个地震的震源机制解可反映出较大区域内的平均构造应力状况(龙海英等,2007;杨军等,2014;林向东等,2013)。

学者们对云南地区震源机制解特征开展了研究(盛书中等,2022;田建慧,2019;孙业君等,2017;Zhao et al,2013;Xu et al,2016;谢富仁等,2001),但在一些局部区域应力场研究上存在一定差异。如 Zhao 等(2013)对腾冲地区研究表明存在正断型应力场,认为其主要源自腾冲火山岩浆囊的贡献;盛书中等(2022)研究分析结果则为走滑型应力场,认为一定程度上反映了现今岩浆活动较弱;Xu 等(2016)研究结果为走滑型和不确定型应力场;谢富仁等(2001)认为该地区应力场较为复杂。前人对腾冲地区的应力场研究存在多种结果,且差异性较大。在资料选取上,前人研究多集中在 2020 年之前的震源机制解(钱晓东等,2011;孙业君等,2017;田建慧,2019;盛书中等,2022),然而,近年来,特别是 2021 年漾濞 6.4 级地震的发生,极大丰富了滇西北地区震源机制解资料。因此,本文基于云南地震台网和中国地震科学实验场大理中心小孔径测震台网资料,采用 CAP 方法计算滇西北地区 2013 年 1 月—2022 年 5 月 259 次 3 级以上地震震源机制解,并结合 2021 年 5 月 21 日漾濞 $M_s 6.4$ 地震的震群,对反演得到的震源机制类型、矩心深度、应力场特征等结果进行分析与讨论,研究结果既可以对前人局部差异性结果进行分析和验证,也可以为研究区构造应力场变化及地震活动性提供参考。

1 构造特征

滇西北地区位于青藏高原东南缘,横断山脉中段,川滇菱形块体西南部,印度板块挤压造成青藏高原物质 E 向/ES 向流出和顺时针旋转,红河断裂东北部的川滇菱形块体向东南楔出,造成川滇块体的断裂多以走滑运动为主(许志琴等,2011;罗睿洁等,2015;盛书中等,2022;钱晓东等,2011)。该区构造特征错综复杂,由一系列反 S 型褶皱带与经向构造彼此交织复合、相互干扰、穿插、交接(黄小巾等,2014)。受印度板块与欧亚板块碰撞作用的影响,新构造活动显著,发育了众多受近 SN 向断裂控制的地堑或半地堑盆地,构成了“Z”字形的滇西北裂陷带(吴中海等,2008;黄小巾等,2014;罗睿洁等,2015)。在 55Ma 前后,印度板块朝 $NE23^\circ \sim 25^\circ$ 对欧亚板块碰撞,出现了区域性逆冲断层和推覆构造(Bertrand et al,2003)。这种区域性推覆作用造成滇西北地区断层多为高倾角,岩石圈的顺时针旋转使滇西北地区的构造断层多为走滑性质,同时从北到南的扇形构造(刘俊来等,2006)使得滇西北地区断层显示为部分正断层。特殊的构造位置使得滇西北地区分布大量错综复杂的断裂带(图 1),如区域北部的德钦—中甸断裂,该断裂在香格里拉 5.9 级地震序列前后,均没有其他大震记录,香格里拉 5.9 级地震序列的发生,丰富了滇西北北部的震源机制资料;东北部主要分布大理—丽江断裂、程海—宾川断裂;西南部分布有大盈江断裂、龙陵—瑞丽断裂、兰坪—永平断裂、畹町断裂等;中部大理地区分布有著名的红河断裂和维西—乔后断裂。维西—乔后断裂近年来地震频繁,2013—2022 年,发生了 2013 年洱源 $M_s 5.5$ 、2016 年云龙 $M_s 5.0$ 、2017 年漾濞 $M_s 5.1$ 、2021 年漾濞 $M_s 6.4$ 共 4 次 5



注：F1：怒江断裂，F2：维西—乔后断裂，F3：红河断裂，F4：德钦—中甸断裂，F5：程海—宾川断裂，F6：龙蟠—乔后断裂，F7：丽江—剑川断裂，F8：兰坪—永平断裂，F9：大盈江断裂，F10：龙陵—瑞丽断裂，F11：畹町断裂。

图1 研究区断裂、台站及CAP所得震源机制解

级以上地震，成为云南近年来地震相关研究的重要地区。

2 滇西北地区 CAP 震源机制解反演分析

CAP(Cut And Paste)方法是目前常用的确定震源机制的方法,该方法可以避免完整波形中由于P波振幅相较于S波和面波过小导致的P波波形信息利用不充分,减小模型对震源反演结果的影响(苏培臻等,2020;陈继锋等,2020),该方法最初由Zhao等(1994)提出,之后Zhu等(1996)为了减小波形记录中出现的大的振幅波形对反演结果的影响,对反演的目标函数进行了改进,最后,Zhu等(2013)将该方法进一步推广,用于非双力偶震源机制的反演。CAP方法不需要大量地震台站数目,在震源机制解与地震矩心深度研究方面的有效性与可靠性较好(朱音杰等,2017;赵小艳等,2014;孙业君等,2017;潘睿等,2019)。

本研究数据来源于云南地震台网和中国地震科学实验场大理中心小孔径测震台网在

2013 年 1 月—2022 年 5 月记录到的地震波形数据,所使用的速度模型为小孔径测震台网使用的速度模型(杨军等,2014),如表 1 所示。反演前,首先对观测波形进行了去除仪器响应,垂直、东西、南北 3 分量旋转至 r - t - z 方向,并对波形进行 0.08s 的重新采样。在震源机制求解的网格搜索过程中,设定断层面参数走向、倾角、滑动角搜索步长 5° ,深度步长 1km。考虑到震中附近台站记录的主震波形限幅,在给定波形权重时,将 70km 以内的近台面波权重设为 0,震中距范围选择在 350km 以内。

表 1 CAP 反演使用地壳速度模型

地壳厚度/km	$v_p/(km \cdot s^{-1})$	$v_s/(km \cdot s^{-1})$
1.25	4.30	2.10
16.75	5.92	3.43
18.00	6.49	3.60
9.00	6.93	3.74
50.00	7.96	4.35

本研究参照 Zoback(1992)分类标准,将震源机制解划分 6 类:正断型、正走滑型、走滑型、逆走滑型、逆冲型和不确定型,本研究将正走滑型归为正断型,将逆走滑型归为逆冲型,获得了 CAP 方法对 2013 年 1 月—2022 年 5 月滇西北地区 259 个 3 级以上地震震源机制的反演结果(图 1),结果显示滇西北地区地震的震源机制多为走滑类型,约占 80%,少量正断型,逆冲型最少,仅约 3%。震源深度大部分小于 10km,矩心深度最深达 15km,最浅为 1km,矩心深度在 10~15km 范围仅有 9%左右,其余矩心深度均在 10km 以下,属于上地壳脆性层内发生的地震,震源深度浅。节面 I 倾角小于 30° 的地震有 9 个(图 2),约占总共事件的 3%,倾角范围在 $30^\circ \sim 45^\circ$ 之间的地震事件有 21 个,约占总共事件的 8%,倾角范围在 $45^\circ \sim 60^\circ$ 之间的地震事件有 44 个,约占总共事件的 17%,倾角大于 60° 的地震事件有 185 个,约占总共事件的 72%;节面 II 倾角小于 30° 的地震有 3 个(图 2),约占总共事件的 1%,倾角范围在 $30^\circ \sim 45^\circ$ 之间的地震事件有 20 个,约占总共事件的 8%,倾角范围在 $45^\circ \sim 60^\circ$ 之间的地震事件有 47 个,约占总共事件的 18%,倾角大于 60° 的地震事件有 189 个,约占总共事件的 73%。如图 2 可知,滇西北地区大多为高倾角地震,地震破裂面较陡,这与前文所述的区域性推覆作用造成滇西北地区断层多为高倾角的结论(刘俊来等,2006)相吻合。根据 P 、 T 轴空间分布图(图 3), P 轴方向自北向南显示为 NNW 向、NW 和 NE 向,NNW 向、NW 向

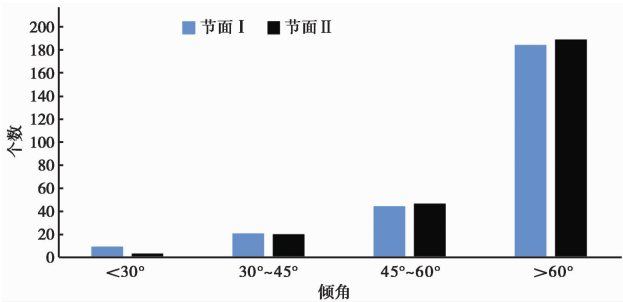
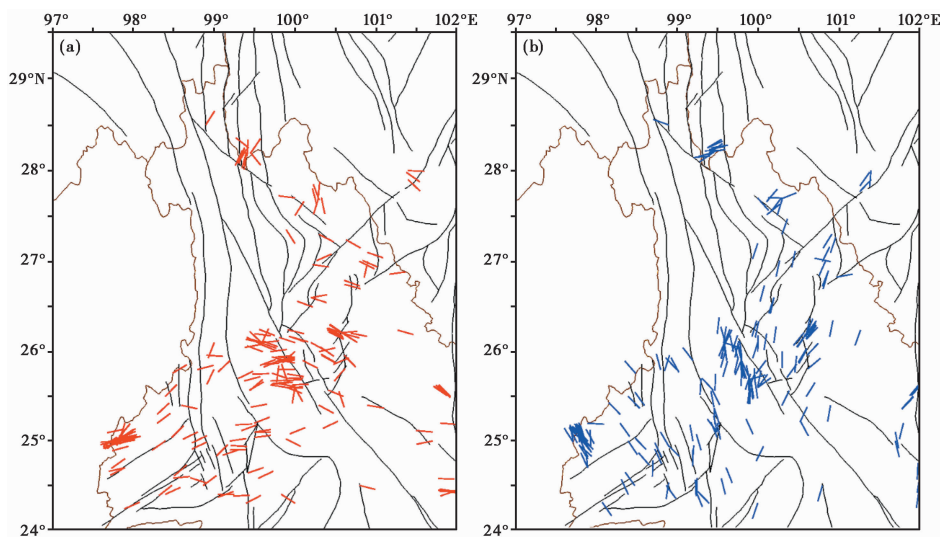


图 2 研究区地震震源机制解节面 I、节面 II 倾角大小与数量分布

集中于区域内北部,NE 向分布于区域西南部,自北向南有顺时针偏转趋势,这与前人对云南地区应力场研究结果一致(田建慧,2019; Zhao et al, 2013; 崔效锋等,2006), T 轴方向为 NEE、NE 和 NW 向。 P 轴倾伏角(图 4)小于 30° 的地震多达 174 个,约占总共事件的 67%,大于 45° 的地震 65 个,约占总共事件的 26%, T 轴倾伏角(图 4)小于 30° 的地震多达 238 个,约占总共事件的 91%,大于 45° 的地震 9 个,约占总共事件的 3%。 P 轴、 T 轴均有着较小的倾伏角,滇西北地区地震震源应力作用以水平为主。



注:线段的方向代表方位角;线段的长短表示倾角大小,越短倾角越大,越长倾角越小。

图 3 P 轴(a)、 T 轴(b)空间分布

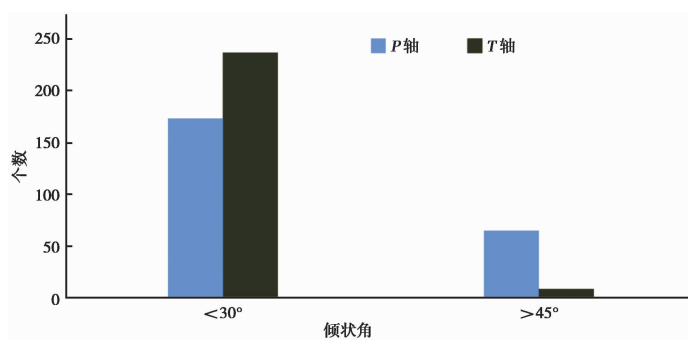
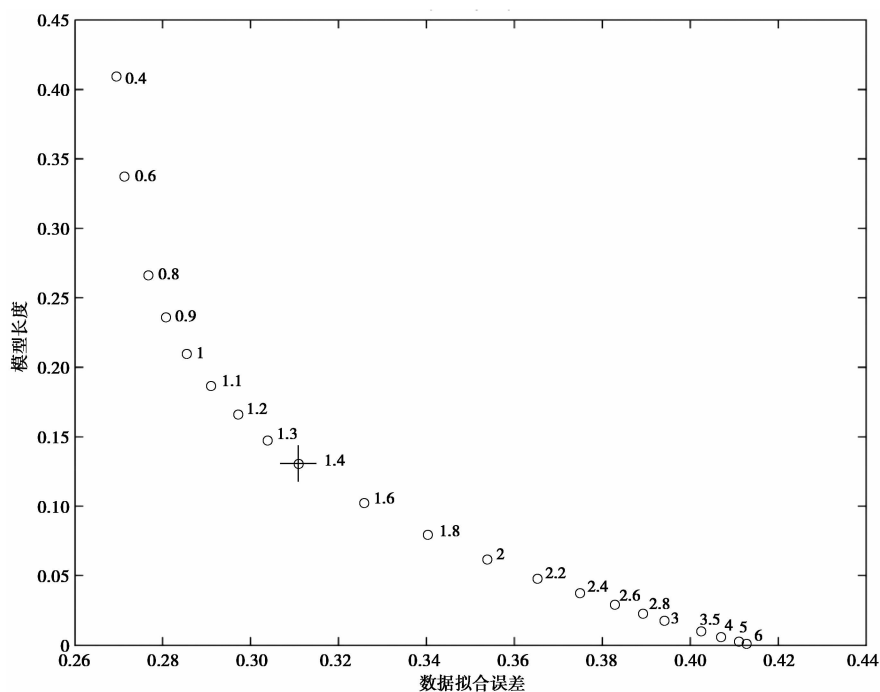


图 4 研究区 P 轴、 T 轴倾伏角大小与数量分布

3 应力场反演结果及分析

本研究通过阻尼反演方法获得(Hardebeck et al, 2006; Martinez-Garzon et al, 2014)滇西北地区的构造应力场,Hardebeck 等(2006)提出了区域尺度的应力张量阻尼反演方法 SATSI (Spatial And Temporal Stress Inversion)算法; Martinez-Garzon 等(2014)在 Matlab 环境下基于 SATSI 算法开发形成了应力反演的 MSATSI 软件包,本文使用 MSATSI 软件包进行反演计算。

阻尼反演方法被广泛应用于应力场的反演研究,在应力场反演的计算过程中加入一个合适的阻尼因子,使得相邻网格的应力张量差异变化减小,从而消除因人为划分反演区域而造成的应力偏转假象,能更好地呈现应力场的整体特征(戴盈磊等,2021;盛书中等,2022;田建慧,2019;孙业君等,2017)。获得的模型长度和数据拟合残差之间的折中曲线如图 5 所示,最佳阻尼参数 $e = 1.4$,本研究以 $0.8^\circ \times 0.8^\circ$ 对滇西北地区进行网格化,划分为 36 个应力单元,每个网格内参与应力场反演的最少地震事件数为 5 个,重采样次数设置为 2000 次,在 95% 的置信度水平下进行反演。反演结果如图 6、图 7 所示,共获得 15 个网格的应力场最优方向 and 不确定范围以及应力场类型。可以明显看到,滇西北地区主压应力轴(σ_1)优势方向由北向南呈 NW 向、NNW 向、NE 向分布,整体表现为由北向南的顺时针旋转,这和图 3 中 P 轴方向的空间分布一致; R 值自北向南显示出由高降低再升高变化,最大值在德钦—中甸地区,大于 0.5,中间主应力接近于主张应力,其余 R 值小于 0.5;滇西北地区总体受走滑应力场控制(图 7),但在北部的德钦—中甸地区和丽江地区附近受拉张应力场控制,大理地区红河断裂附近存在两处过渡型应力场,腾冲地区为走滑型。

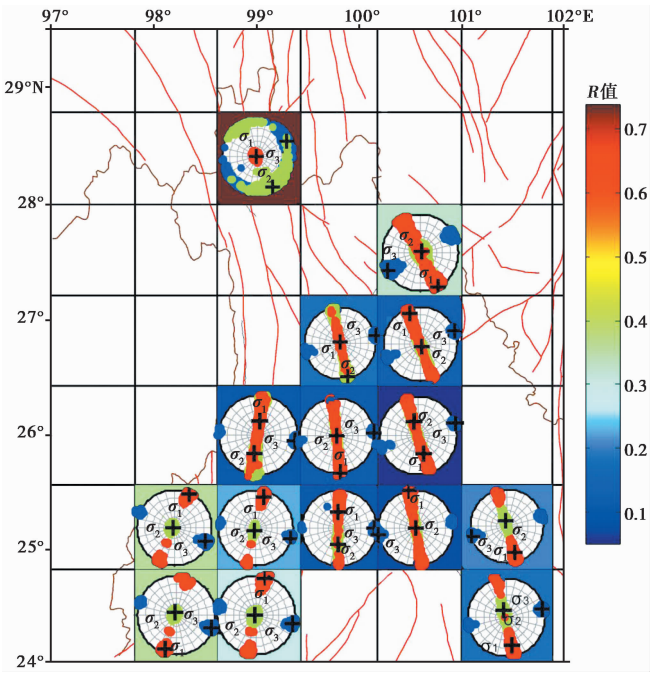


注: 圆圈旁的数字表示阻尼参数 e 的取值; 图中十字代表最佳阻尼参数。

图 5 模型长度和数据拟合残差的折中曲线

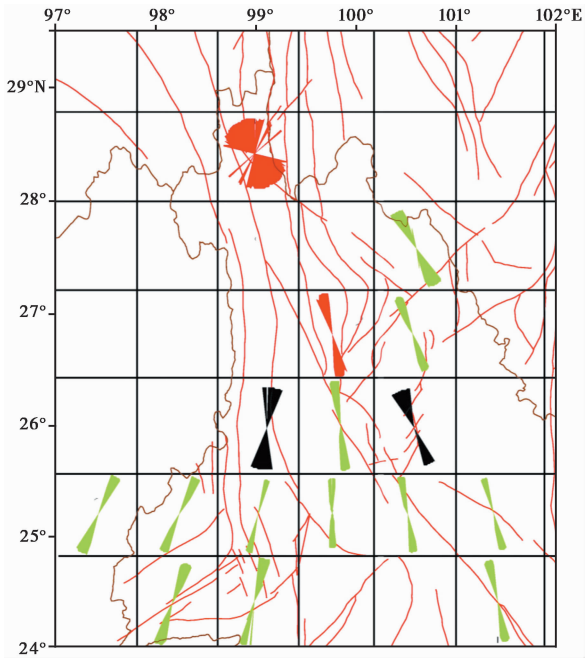
根据震源机制空间分布(图 1)来看,滇西北地区地震主要集中在四个地区,分布在区域主体断裂附近,分别为区域北部德钦—中甸断裂(图 1(a))、东北部大理—丽江断裂(图 1(b))、大理地区红河断裂及维西—乔后断裂(图 1(c))以及西南部大盈江断裂、龙陵—瑞丽断裂、兰坪—永平断裂(图 1(d))四个区域附近。下面分别对四个区域进行分析和讨论。

德钦—中甸断裂(图 1(a))附近地震活动不强,主要地震事件为 2013 年香格里拉—得



注： σ_1 、 σ_2 、 σ_3 分别表示最大、中间和最小主压应力轴；红点、绿点和蓝点分别表示在 95% 置信度水平下， σ_1 、 σ_2 、 σ_3 的不确定范围；加号“+”表示最优解；网格颜色表示应力形因子 R 分布。

图 6 应力场反演结果



注：绿色代表走滑型；红色代表正断型；黑色代表不确定型。

图 7 滇西北地区主压应力方向的空间分布和应力场类型

荣 5.1 级、5.9 级震群序列,该地震序列发生于德钦—中甸断裂带中段(田建慧,2019;孙业君等,2017),震源机制解结果为正断型,根据 P 轴、 T 轴空间分布(图 2), P 轴方向主要为 NNW 向,接近直立状态, T 轴方向主要为 NEE 向,接近水平状态,应力场反演结果显示为正断型,前人对该区域研究较多,应力场类型也基本一致(罗钧等,2015;孙业君等,2017;盛书中等,2022;田建慧,2019),该区域受到强烈的拉张作用,和前人利用 GPS 资料分析得到的该区域多种力源导致拉张作用显著的结果吻合(程佳等,2012)。

大理—丽江断裂图 1(b)附近震源机制解类型以走滑型和正断型为主,少部分为逆断型,该区域正断型地震较多,沿大理—丽江断裂带东北段至南段,震源机制解类型从走滑型转变为正断型。 P 轴方向为 NNW 向, T 轴方向为 NE 向。从应力场反演结果来看,该区域存在走滑型和正断型应力场,分布于丽江—剑川一带,从东北侧向西南,应力场类型从走滑转变为拉张,与震源机制解的空间分布表现出一致性。同时,从图 7 来看,最大水平主压应力方向在此开始顺时针旋转,由 NW 向转为 NNW 向。

顺时针旋转持续向南延伸,在大理地区红河断裂附近旋转幅度最大,由 NNW 转向 NNE 向。大理地区红河断裂及维西—乔后断裂(图 1(c))附近地震震源机制解以走滑和正断层为主,走滑型较多,正断层占一定比例, P 轴方向复杂,由维西—乔后断裂东北 NW 向到西南 NEE 变换交汇, T 轴方向主要为 NNE 向近直立。该区域是滇西北地区最大水平主压应力顺时针旋转变化的显著转变区域,最大水平主压应力方向逐渐由 NNW 向转为 NNE 向,孙业君等(2017)研究认为这或许表示了该区构造应力场的复杂性,表明附近存在 2 处过渡型应力场。该区域地震震群丰富,2013—2022 年发生了多次 5 级以上的中强地震,如 2013 年洱源 $M_s 5.5$ 、2016 年云龙 $M_s 5.0$ 、2017 年漾濞 $M_s 5.1$ 以及 2021 年漾濞 $M_s 6.4$ 地震。

最大水平主压应力方向持续顺时针旋转,在区域西南部(图 1(d))兰坪—永平断裂、大盈江断裂、龙陵—瑞丽断裂附近旋至 NE 向。该地区地震震源机制以走滑为主,部分为正断型, P 轴优势方位为 NE 向, T 轴优势方位为 NW 向,区域由西南向东北,震源机制类型由走滑向正断型变化,正断型地震主要靠近腾冲一带。应力场为走滑型,最大水平主压应力轴为 NE 向和 NNE 向,主张应力轴方位为 SEE 向, R 值在 0.3 左右,与盛书中等(2022)研究结果一致。

4 分析和讨论

根据前文滇西北地区震源机制和应力场反演结果,滇西北地区地震的震源机制多为走滑类型,部分为正断型,逆冲型最少,震源深度较浅,矩心深度主要集中在 10km 以内,大多为高倾角地震,这与区域性推覆作用造成滇西北地区断层多为高倾角特征相吻合(刘俊来等,2006)。 P 轴方向自北向南显示为 NNW 向、NW 和 NE 向,从北向南有顺时针偏转趋势, P 轴、 T 轴均有着较小的倾伏角,滇西北地区以水平应力为主。滇西北地区主压应力轴(σ_1)优势方向由北向南呈 NW 向、NNW 向、NE 向分布,整体表现为由北向南的顺时针旋转,这与图 3 中 P 轴方向的空间分布一致; R 值从北向南显示出由高降低再升高的变化,最大值在德钦—中甸地区, R 值大于 0.5,中间主应力接近于主张应力,其余 R 值小于 0.5;滇西北地区总体受走滑应力场控制,但在北部的德钦—中甸地区和丽江地区附近存在 2 处正断型应力场,大理地区红河断裂附近存在 2 处过渡型应力场,腾冲地区为走滑型。前人研究显示丽江—剑川一带是布格重力异常区(苏有锦等,1998),也是磁场变化剧烈、正负交替变化迅速

的磁异常区(钱晓东等,2011),反映了该区地壳介质结构的高度横向不均匀性;田建慧(2019)和胡鸿翔等(1993)研究分析该区域下部有高速物质呈穹状隆起,推测是岩浆沿深大断裂的缝隙上涌,在基底层形成较大范围的侵入岩带;陈佳等(2021)利用接收函数研究滇西北地区地壳厚度及泊松比特征,显示丽江—小金河断裂深部存在流变物质,因此该区域可能存在侵入岩继续褶皱和向上垂直压缩,丽江地区附近正断型应力场或许与这种垂直应力有关(田建慧,2019;胡鸿翔等,1993)。前人对腾冲地区的应力场类型做了大量研究,但结果存在一定差异,Zhao等(2013)研究结果显示在腾冲地区存在正断型应力场,并认为该应力场主要源自腾冲火山岩浆囊的贡献;盛书中等(2022)研究分析结果为走滑型应力场,且该地区应力场结果显示出连续性和规律性,一定程度上反映了现今岩浆活动较弱。本文获得的应力场为走滑型,最大水平主压应力轴为 NE 向和 NNE 向,主张应力轴方位为 SEE 向, R 值在 0.3 左右,与盛书中等(2022)结果一致,总体上显示该区域应力场可能受岩浆活动产生的拉张作用的影响在减弱,主体上仍受控于区域板块碰撞作用,本文和盛书中等(2022)的研究均以 $0.8^{\circ} \times 0.8^{\circ}$ 网格化进行应力场反演或许是结果接近的原因,和其他学者研究成果有所差异可能是与采用的方法、网格化尺度以及本文使用的数据相对较新有关。德钦—中甸地区应力场反演结果显示该区域受到拉张作用,很多学者对该区域应力场类型进行了分析,研究结果与本文基本一致(罗钧等,2015;孙业君等,2017;盛书中等,2022;田建慧,2019)。该地区的主张应力方向研究结果存在一定差异,盛书中等(2022)认为区域阻尼应力场反演方法可能会出现应力场被个别网格内反演结果所平滑的现象,最终不能显示该地区应力场的差异性变化,这时使用不同的资料就会获得不同的结果,因此其采用无阻尼应力场反演获得主张应力方向为 NEE 向。本文采用阻尼应力场反演获得的主张应力方向为 NE 向,与盛书中等(2022)结果有所差异。

大理地区红河断裂及维西—乔后断裂附近最大水平主压应力方向逐渐由 NNW 向转为 NNE 向,是滇西北地区最大水平主压应力的顺时针旋转变化的显著转变区域,为走滑型应力场,周围存在 2 处过渡型应力场。万永革(2020)研究认为挤压应力体系只能产生逆断型、逆走滑型和走滑型震源机制;拉张应力体系则只产生正断型、正走滑和走滑型震源机制,随 R 值增大,正断型震源机制逐渐增多;而走滑应力体系可以产生正断型、正走滑、逆断型、逆走滑型和走滑型震源,随 R 值增大,正断型震源机制减少。该区域震源机制以走滑为主,部分为正断型,从右向左 R 值增大,正断型震源机制减少,可能主要受走滑应力体系控制,反演得到的 2 处过渡型应力场或许和该区构造应力场的复杂性(孙业君等,2017)以及网格化尺度等有关。该区域地震震群丰富,2013—2022 年,分别发生了 2013 年洱源 $M_s 5.5$ 、2016 年云龙 $M_s 5.0$ 、2017 年漾濞 $M_s 5.1$ 以及 2021 年漾濞 $M_s 6.4$ 地震。

对于 2021 年漾濞 6.4 级地震序列,很多学者采用不同方法进行了研究,研究结果存在一定差异(叶涛等,2021;王光明等,2021;雷兴林等,2021;龙锋等,2021)。本文也获得了漾濞 6.4 级地震震源机制解,理论波形与观测波形拟合及震源机制解反演残差随深度分布见李见等(2022)结果。结果显示(表 2)漾濞 6.4 级主震矩心深度 5.8 km,矩震级 $M_w 6.03$,震源机制节面 I 走向 39° 、倾角 75° 、滑动角 -16° ;节面 II 走向 133° 、倾角 75° 、滑动角 -164° ; P 轴方位 356° 、倾伏角 22° ; T 轴方位 86° 、倾伏角 1° 。这一结果与雷兴林等(2021)、USGS、GCMT、Seismology 结果相近,质心深度 5.7 km 基本一致(雷兴林等,2021),2 次 5.0 级以上地

表 22021 年 6 月 21 日漾濞 $M_s 6.4$ 地震与 $M \geq 5.0$ 地震震源机制解

震例	发震时刻 (年-月-日 T 时:分:秒)	M_w	矩心 深度 /km	节面 I 参数/(°)			节面 II 参数/(°)			来源
				走向	倾角	滑动角	走向	倾角	滑动角	
$M_s 6.4$	2021-05-21 T21:48:34.8	6.03	5.7	43	75	-9	135	82	-165	USGS
				46	78	4	315	86	168	GCMT
				45	84	-3	136	87	-174	Seismology
				44	77	-15	137	75	-167	雷兴林等(2021)
				39	75	-16	133	75	-164	本文
$M_s 5.6$	2021-05-21 T21:21:25.1	5.20	6.0	122	70	5	30	85	-20	Seismology
		5.46	7.0	122	80	-165	30	75	-10	本文
$M_s 5.2$	2021-05-21 T22:31:10	5.14	7.6	28	52	-58	162	48	-124	Seismology
				39	72	-40	144	52	-157	本文

震反演结果与 Seismology 结果相近,互相印证结果可靠。分析认为漾濞 6.4 级地震为一次 NW 向高倾角右旋走滑型地震,其发震构造为维西—乔后—巍山断裂西侧一条 NW 走向的隐伏断裂或者次生断裂(李见等,2022),这与王光明等(2021)研究分析认为该位于地震序列展布和维西—乔后断裂之间的一条隐伏断裂或者是其伴生断裂为草坪断基本一致,和龙锋等(2021)认为的发震断层与维西—乔后断裂平行不同的是,李见等(2022)的结果认为发震断层与维西—乔后断裂并不完全平行,存在一点夹角。

2013 年洱源 $M_s 5.5$ 地震 9 次震源机制解结果如图 8(a)所示,包括 $M_s 5.5$ 主震,共 4 次

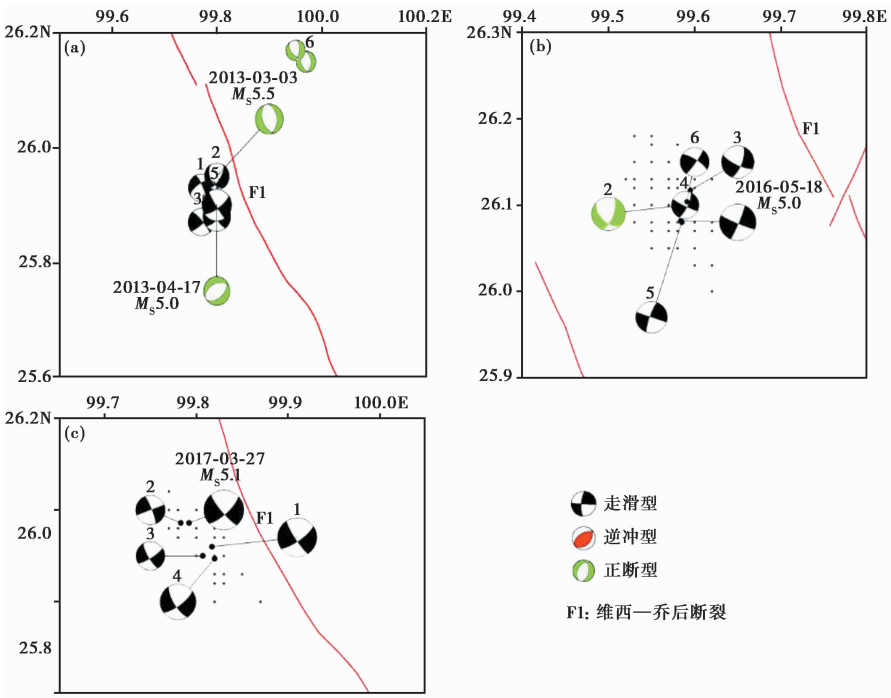
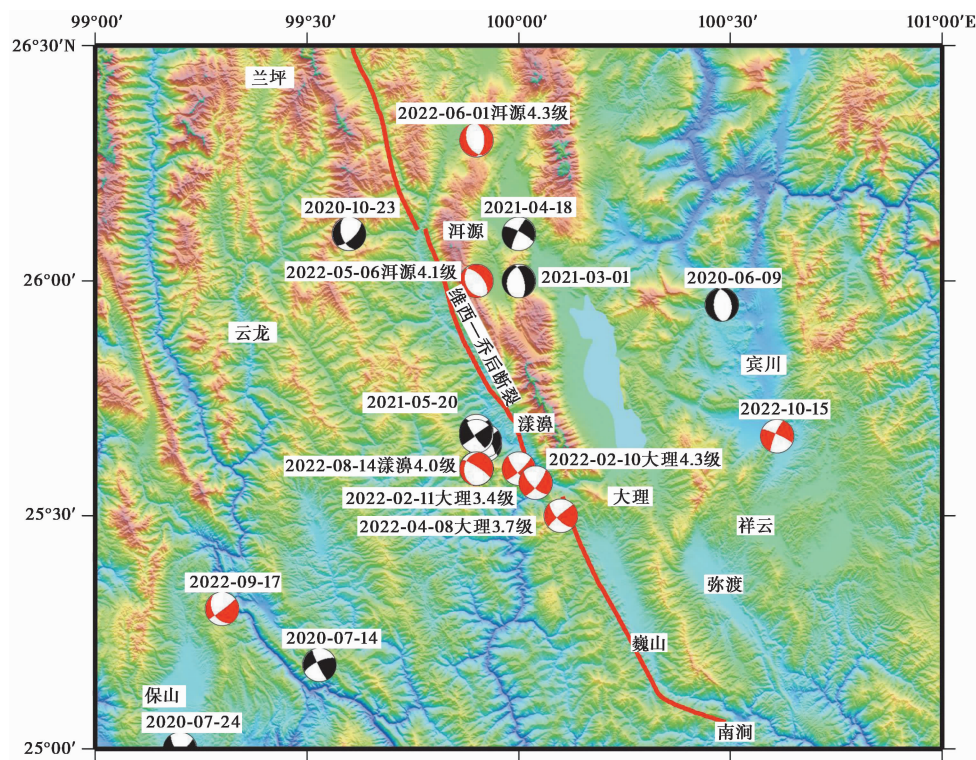


图 8 2013 洱源 $M_s 5.5$ (a)、2016 云龙 $M_s 5.0$ (b)、2017 漾濞 $M_s 5.1$ (c) 地震震源机制解结果

地震为正断型,地震序列集中分布于维西—乔后西侧 10km 左右,发育一条走向和维西—乔后断裂基本一致的次生断裂(炼铁断裂),地震发生在炼铁断裂附近,杨军等(2015)对洱源 $M_s5.5$ 地震及余震的震源机制解特征结果显示为正断型,李涛等(2018)通过余震空间展布分析得出:主震序列的空间展布和正断型特征和炼铁断裂特征吻合。本文洱源 $M_s5.5$ 地震序列中震源机制解结果多数为正断型,倾向于炼铁断裂为其发震断层。对于此次地震序列,正断层的地震类型较多,一致性较好,显示区域受一定拉张作用影响,结合前人研究分析,洱源地震序列位处滇中西南单元和滇西地区的交汇区域,可能受滇中西南单元 NEE-SWW 的拉张性变形影响(胡家富等,2003;杨军等,2015;赵小艳等,2014)。2016 年云龙 $M_s5.0$ 地震序列 6 次 $M \geq 3.0$ 地震(包括主震)的震源机制解结果如图 8(b)所示, $M_s5.0$ 主震为走滑型,主震北西侧一次余震为走滑兼正断型,其余均为走滑型。前人研究认为其发震断层可能是位于维西—乔后断裂和澜沧江断裂之间的 NNE 向隐伏断层或次生断层,2016 年云龙 $M_s5.0$ 地震可能是兰坪—思茅地块内部新生的 NE 向走滑断层活动的结果(Jiang et al, 2019)。2017 年 3 月 27 日漾濞 $M_s5.1$ 地震发生于 2013 年洱源地震南部,二者距离较近,但震源机制解结果(图 8(c))显示漾濞 $M_s5.1$ 主震矩心深度 3.8km,矩震级 $M_w4.93$,断层节面 I 走向 147° 、倾角 81° 、滑动角 -165° ,节面 II 走向 54.60° 、倾角 75.19° 、滑动角 -9.31° ,包括主震在内 5 次 $M \geq 3.0$ 的余震震源机制解均为走滑型,一致性较好,余震均发生于主震发震断层面上,发震断层已不是正断型的炼铁断裂。潘睿等(2019)对漾濞地震精定位结果显示地震序列震源位置在水平方向呈 NNW 向线性分布,结合震源机制解分析认为节面 I 可能为发震断层,发震构造可能为右旋走滑的维西—乔后断裂。

根据前文分析显示,2013—2022 年,该区域共发生 4 次 5.0 级以上地震震群,有 3 次(2013 年洱源 $M_s5.5$ 、2016 年云龙 $M_s5.0$ 、2021 漾濞 $M_s6.4$ 地震)距维西—乔后断裂较近,但发震构造并不是维西—乔后断裂,而是维西—乔后断裂西侧次生断裂或隐伏断裂。从构造上看,该区域位于青藏高原东南缘的川滇菱形块体西侧兰坪—思茅盆地内,兰坪—思茅盆地内部构造复杂,发育了早期的逆冲断层、推覆构造与晚期的走滑构造断层(刘俊来等,2006)。青藏高原物质持续向东南挤出的过程中,因受到兰坪—思茅地块的阻挡,导致该区产生 NNW 至近 SN 向构造应力场,进而引发了区域内部先存断层复活和新生断层出现(王光明等,2021),这或许和 2013—2022 年该区发生的多次 5 级以上地震发震构造均为次生断裂或隐伏断裂活动有密切关系,维西—乔后断裂附近可能存在先存隐伏断层或次生断层重新活动趋势。2022 年以来,滇西北区域内的维西—乔后断裂一共发生了 6 次 3 级以上地震(图 9),3 次为走滑型,3 次为正断型,对比 2021 年,存在一定规律,从空间上看,走滑与正断的分界线即为漾濞县平坡镇;从时间上看,以 5 月 6 日洱源地震为界,5 月 6 日以前的 3 次地震均为走滑型,5 月 6 日之后,3 次地震均为正断型;最后一次 3 级以上地震发生于 8 月 14 日,这可能与区内维西—乔后断裂的应力方向的调整有所联系。一些学者认为(丁国瑜等,1979;徐杰,2011,王光明等,2021),在区域地质构造演化过程中,当某一构造阶段的动力条件和构造应力状态发生变化后,活动断层带的分布相对于先存断层构造既具有继承性,又具有新生性的特点,既构造应力状态的变化也会导致先存隐伏断层或次生断层重新活动。因此维西—乔后断裂 2013—2022 年 3 次 5 级以上地震发震构造均为维西—乔后断裂西侧次生断裂或隐伏断裂,可能与维西—乔后断裂的应力状态变化导致区域先存隐伏断裂重新



注: 红色代表 2022 年震源机制结果; 黑色代表 2020、2021 年震源机制结果。

图 9 2022 年维西—乔后断裂附近 3 级以上地震震源机制

活动或者是重新活动后联通而形成的可适应现今应力环境的新断裂有关。同时考虑到, 2013—2022 年该区域 5 级以上中强震空间上距离较近、相连, 存在自北向南迁移的趋势, 可能存在应力触发的相互作用, 结合前文分析, 认为有必要加强对该区域地震活动的监测和研究。

5 结论

本研究基于云南区域台网和中国地震科学实验场大理中心小孔径台网 2013 年 1 月—2022 年 5 月期间记录到的地震波形数据, 利用 CAP 方法对滇西北地区 259 个 3.0 级以上地震的震源机制进行了反演, 采用阻尼参数方法进行应力场反演, 基于反演结果对滇西北地区震源机制和应力场特征进行讨论。获得以下主要结论和认识:

(1) 滇西北地区地震的震源机制多为走滑类型, 部分为正断型, 逆断型最少, 震源深度较浅, 矩心深度主要集中在 10km 以内, 大多为高倾角地震, 这与区域性推覆作用造成滇西北地区断层多为高倾角特征相吻合(刘俊来等, 2006)。P 轴方向自北向南显示为 NNW 向、NW 和 NE 向, 从北向南有顺时针偏转趋势, P 轴、T 轴均有着较小的倾伏角, 滇西北地区以水平应力为主。

(2) 应力场反演结果显示, 滇西北地区应力场类型以走滑型为主, 存在局部的正断和过渡型, 主压应力轴方向从北向南顺时针旋转。滇西北地区北部德钦—中甸地区德钦中甸—大具断裂附近震源机制解主要为正断型, P 轴方向主要为 NNE 向, 接近直立状态, T 轴

方向主要为 *NEE* 向,接近水平状态,应力场反演结果显示该区域受到拉张作用,与前人研究结果基本一致,主压应力轴方向为 *NW* 向,主张应力轴方向 *NE* 向,与盛书中等(2022)无阻尼反演的 *NNE* 向的结果有所差异;东北部大理—丽江断裂附近震源机制解类型以走滑型和正断型为主,该区域正断型地震较多,沿断裂东北至西南,震源机制解类型从走滑型转变为正断型,从应力场反演结果来看,该区域存在走滑型和拉张型应力场,从东北侧向西南,应力场类型从走滑转变为拉张,与震源机制解的空间分布表现出一致性。结合前人研究,该区域拉张型应力场或许与区域的垂直压应力有关,最大水平主压应力方向在该区域开始顺时针旋转变;区域西南部震源机制解以走滑为主,部分为正断型,*P* 轴优势方位为 *NE* 向,*T* 轴优势方位为 *NW* 向,正断型地震主要靠近腾冲区域,应力场类型为走滑型,主压应力轴方向主要为 *NE* 向;大理地区红河断裂及维西—乔后断裂附近地震类型复杂,中强震频发,震源机制解以走滑和正断层为主,走滑型较多,*P* 轴方向主要为 *NWW* 向,*T* 轴方向主要为 *NNE* 向,应力场类型为走滑型和过渡型,主压应力轴方向为 *NNW* 近 *NS* 和 *NNE* 向,滇西北地区主压应力的顺时针旋转在大理地区红河断裂附近显著转变,由 *NNW* 逐渐转变为 *NNE*。

(3) 区域内维西—乔后断裂附近 2013—2022 年地震活动性强,共发生 4 次 5 级以上地震震群(2013 年洱源 $M_s5.5$ 、2016 年云龙 $M_s5.0$ 、2017 年漾濞 $M_s5.1$ 及 2021 年漾濞 $M_s6.4$ 地震),漾濞 6.4 级主震矩心深度 5.8km,矩震级 $M_w6.03$,震源机制节面 I 走向 39° 、倾角 75° 、滑动角 -16° ;节面 II 走向 133° 、倾角 75° 、滑动角 -164° ;其发震构造为维西—乔后—巍山断裂西侧的一条 *NW* 走向的隐伏断裂或者次生断裂。该结果与王光明等(2021)、雷兴林等(2021)研究结果接近,与龙锋等(2021)判定发震构造为维西—乔后断裂的平行伴生断裂存在一定差异。

(4) 维西—乔后断裂附近 4 次 5 级以上地震震群中有 3 次地震的发震构造均为维西—乔后西侧隐伏断裂或者次生断裂,考虑到 2022 年震源机制结果规律性变化,或许可能与维西—乔后断裂应力的变化有关,区域应力的变化可能导致存隐伏断裂重新活动或者是重新活动后联通而形成新的可适应现今应力环境的断裂,维西—乔后断裂附近可能存在先存隐伏断层或次生断层重新活动趋势,故有必要进一步加强对该区域地震活动性的研究和关注。

参考文献

- 陈继锋,蒲举,罗仁昱,等. 2020. 海原及周边地区中小地震震源机制解研究. 地震工程学报, **42**(5):1049~1054,1064.
- 陈佳,邓嘉美,叶泵,等. 2021. 利用接收函数研究滇西北地区地壳厚度及泊松比特征. 中国地震, **37**(1):127~139.
- 程佳,徐锡伟,甘卫军,等. 2012. 青藏高原东南缘地震活动与地壳运动所反映的块体特征及其动力来源. 地球物理学报, **55**(4):1198~1212.
- 崔效锋,谢富仁,张红艳. 2006. 川滇地区现代构造应力场分区及动力学意义. 地震学报, **28**(5):451~461.
- 戴盈磊,张文静,王承伟,等. 2021. 基于 MSATSI 的辽宁地区构造应力场特征. 防灾减灾学报, **37**(3):1~8.
- 丁国瑜,李永善. 1979. 我国地震活动与地壳现代破裂网络. 地质学报, (1):22~34.
- 胡鸿翔,高世玉. 1993. 滇西地区地壳浅部基底速度细结构的研究. 中国地震, **9**(4):70~77.
- 胡家富,苏有锦,朱雄关,等. 2003. 云南的地壳 *S* 波速度与泊松比结构及其意义. 中国科学(D 辑), **33**(8):714~722.
- 黄小中,吴中海,李家存,等. 2014. 滇西北裂陷带的构造地貌特征与第四纪构造活动性. 地质通报, **33**(4):579~593.
- 李见,陈佳,金明培,等. 2022. 漾濞 $M6.4$ 地震序列 $M \geq 5.0$ 地震震源机制解及构造特征. 大地测量及地球动力学, **42**(7):680~686.
- 李涛,付虹,姜金钟,等. 2018. 2013 年云南洱源 $M_s5.5$ 地震序列不同地震观测台网地震定位结果对比分析. 地震研究, **41**(1):55~63.
- 林向东,葛洪魁,徐平,等. 2013. 近场全波形反演: 芦山 7.0 级地震及余震矩张量解. 地球物理学报, **56**(12):4037~4047.

- 刘俊来, 宋志杰, 曹淑云, 等. 2006. 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. 岩石学报, **22**(4): 775~786.
- 龙锋, 祁玉萍, 易桂喜, 等. 2021. 2021年5月21日云南漾濞 $M_s 6.4$ 地震序列重新定位与发震构造分析. 地球物理学报, **64**(8): 2631~2646.
- 龙海英, 高国英, 聂晓红, 等. 2007. 乌鲁木齐地区中小地震震源机制解及构造应力场. 地震, **27**(3): 89~96.
- 罗钧, 赵翠萍, 周连庆. 2015. 2013年8月香格里拉德钦-得荣 $M_s 5.9$ 地震序列震源机制与应力场特征. 地球物理学报, **58**(2): 424~435.
- 罗睿洁, 吴中海, 黄小龙, 等. 2015. 滇西北宾川地区主要活动断裂及其活动构造体系. 地质通报, **34**(1): 155~170.
- 潘睿, 姜金钟, 付虹, 等. 2019. 2017年云南漾濞 $M_s 5.1$ 及 $M_s 4.8$ 地震震源机制解和震源深度测定. 地震研究, **42**(3): 338~348.
- 苏有锦, 张俊伟. 1998. 震区深部构造. 一九九六年丽江地震. 北京: 地震出版社, 57~64.
- 钱晓东, 秦嘉政, 刘丽芳. 2011. 云南地区现代构造应力场研究. 地震地质, **33**(1): 91~106.
- 盛书中, 胡晓辉, 王晓山, 等. 2022. 云南及邻区地壳应力场研究. 地球物理学报, **65**(9): 3252~3267.
- 苏培臻, 安祥宇, 李恩来, 等. 2020. 辽宁地区近期中小地震震源机制研究. 地球物理学报, **63**(11): 4023~4036.
- 孙业君, 赵小艳, 黄耘, 等. 2017. 云南地区震源机制及应力场特征. 地震地质, **39**(2): 390~407.
- 田建慧. 2019. 云南地区构造应力环境研究. 硕士学位论文. 北京: 中国地震局地震预测研究所.
- 王光明, 吴中海, 彭关灵, 等. 2021. 2021年5月21日漾濞 $M_s 6.4$ 地震的发震断层及其破裂特征: 地震序列的重定位分析结果. 地质力学学报, **27**(4): 662~678.
- 万永革. 2020. 震源机制与应力体系关系模拟研究. 地球物理学报, **63**(6): 2281~2296.
- 雷兴林, 王伟志, 马胜利, 等. 2021. 关于2021年5月滇西漾濞 $M_s 6.4$ 地震序列特征及成因的初步研究. 地震学报, **43**(3): 261~286.
- 吴中海, 张永双, 胡道功, 等. 2008. 滇西北哈巴-玉龙雪山山东麓断裂的晚第四纪正断层作用及其动力学机制探讨. 中国科学(D辑): 地球科学, **38**(11): 1361~1375.
- 谢富仁, 苏刚, 崔效峰, 等. 2001. 滇西南地区现代构造应力场分析. 地震学报, **23**(1): 17~23.
- 徐杰. 2011. 新生地震构造带的研究——地震地质研究新开拓的一项工作. 华南地震, **31**(4): 23~28.
- 许志琴, 李海兵, 唐哲民, 等. 2011. 大型走滑断裂对青藏高原地体构架的改造. 岩石学报, **27**(11): 3157~3170.
- 杨军, 苏有锦, 陈佳, 等. 2014. 利用CAP方法快速计算云南地区中小地震震源机制解. 中国地震, **30**(4): 551~559.
- 杨军, 苏有锦, 李孝宾, 等. 2015. 2013年洱源 $M_s 5.5$ 地震序列 $M_L \geq 3.4$ 地震的震源机制解研究. 地震研究, **38**(2): 194~202.
- 叶涛, 陈小斌, 黄清华, 等. 2021. 2021年5月21日云南漾濞地震($M_s 6.4$)震源区三维电性结构及发震机制讨论. 地球物理学报, **64**(7): 2267~2277.
- 赵小艳, 付虹. 2014. 2013年洱源 $M_s 5.5$ 和 $M_s 5.0$ 地震发震构造识别. 地震学报, **36**(4): 640~650.
- 朱音杰, 刘檀, 赵英萍, 等. 2017. CAP方法反演2016年唐山 $M_L 4.3$ 地震震源机制解. 华北地震科学, **35**(1): 50~55.
- Bertrand G, Rangin C. 2003. Tectonics of the western margin of the Shan plateau (central Myanmar): Implication for the India Indochina oblique convergence since the Oligocene. J Asian Earth Sci, **21**(10): 1139~1157.
- Hardebeck J L, Michael A J. 2006. Damped regional-scale stress inversions: methodology and examples for southern California and the Coalinga aftershock sequence. J Geophys Res, **111**(B11): B11310.
- Jiang J Z, Li J, Fu H. 2019. Seismicity analysis of the 2016 $M_s 5.0$ Yunlong earthquake, Yunnan, China and its tectonic implications. Pure Appl Geophys, **176**(3): 1225~1241.
- Martinez-Garzon P, Kwiatak G, Ickrath M, et al. 2014. MSATSI: a MATLAB package for stress inversion combining solid classic methodology, a new simplified user-handling, and a visualization tool. Seism Res Lett, **85**(4): 896~904.
- Xu Z G, Huang Z C, Wang L S, et al. 2016. Crustal stress field in Yunnan; implication for crust-mantle coupling. Earthq Sci, **29**(2): 105~115.
- Zhao L, Luo Y, Liu T Y, et al. 2013. Earthquake focal mechanisms in Yunnan and their inference on the regional stress field. Bull Seism Soc Am, **103**(4): 2498~2507.
- Zhao L S, Helmberger D V. 1994. Source estimation from broadband regional seismograms. Bull Seism Soc Am, **84**(1): 91~104.
- Zhu L P, Ben-Zion Y. 2013. Parametrization of general seismic potency and moment tensors for source inversion of seismic waveform

- data. *Geophys J Int*, **194**(2):839~843.
- Zhu L P, Helmberger D V. 1996. Advancement in source estimation techniques using broadband regional seismograms. *Bull Seism Soc Am*, **86**(5):1634~1641.
- Zoback M L. 1992. First- and second-order patterns of stress in the lithosphere; the world stress map project. *J Geophys Res*, **97**(B8):11703~11728.

The Focal Mechanism and Stress Field Characteristics of $M_s \geq 3.0$ Earthquakes in Northwest Yunnan from 2013 to 2022

Li Jian, Chen Jia, Ye Beng, Jin Mingpei, Li Xiaobin

Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650224, China

Abstract In this paper, we utilize the CAP (Cut and Paste) method to determine the focal mechanisms of 259 earthquakes with magnitudes of 3.0 or greater in northwest Yunnan, spanning the period from May 2013 to 2022. We apply the damping parameter method to invert the regional stress field and analyze the seismic source mechanisms in conjunction with the Yangbi $M_s 6.4$ earthquake cluster. The key findings are as follows: ① The focal mechanisms in northwest Yunnan are predominantly strike-slip, with some normal faulting. Earthquakes generally occur at shallow depths and have high dip angles. The P -axis orientation varies from NNW to NW and NE, with a noticeable clockwise deflection from north to south. Both the P -axis and T -axis exhibit small inclination angles, indicating that the stress at the earthquake sources is mainly horizontal. ② The stress field in northwest Yunnan is primarily strike-slip. In the northern part of the study area, near the Deqin-Zhongdian fault, tensile stress dominates, with the principal compressive stress axis oriented NW. In the northeastern region, near the Dali-Lijiang fault, both strike-slip and tensile stress fields are present, with tensile stress concentrated on the southwest side and the principal compressive stress axis oriented NNW. Near the Honghe fault in the Dali area, the principal compressive stress axis shifts from NNW to NNE. In the southwestern region, particularly in the Ruili-Baoshan and Tengchong areas, the stress field is strike-slip, with the principal compressive stress axis oriented NE. Overall, the principal compressive stress axis rotates clockwise from north to south, with a marked shift from NNW to NNE near the Honghe fault in the Dali area. ③ The seismic tectonics of several magnitude 5 or greater earthquakes near the Vexi-Qiaohou fault share common characteristics. These earthquakes are associated with hidden or secondary faults west of the Vexi-Qiaohou fault. The observed changes in seismicity mechanisms in 2022 may be related to the complex stress adjustments near the fault. This area warrants further study and monitoring for potential moderate to strong seismic activity. These findings contribute to a deeper understanding of the complex seismic dynamics in northwest Yunnan and highlight the importance of continued monitoring and research in the region.

Keywords: Focal mechanism; CAP method; Northwest Yunnan; The Yangbi $M_s 6.4$ earthquake