中国科学: 地球科学 2025 年 第 55 卷 第 10 期: 3333 ~ 3348
SCIENTIA SINICA Terrae earthcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
论 文

四川长宁工业开采区的速度结构成因分析及其对长宁地震的启示

李昱[1], 张风雪[1,2*], 吴建平[1], 陈洪平[1]

1. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081
2. 中国地震局震源物理重点实验室, 北京 100081
* 通讯作者, E-mail: zhangfengxue336@163.com

收稿日期: 2024-09-25; 收修改稿日期: 2025-08-05; 接受日期: 2025-08-22; 网络版发表日期: 2025-09-18
科技部国家重点研发计划项目(2020YFA0710600)和国家自然科学基金项目(U23A2029)资助

摘要 位于四川盆地南部的长宁地区历史上较为稳定, 近年来随着工业活动规模的扩大, 该区地震活动显著增强, 尤其短期内先后发生的兴文M_S5.7地震和长宁M_S6.0地震引起了包括地震学者在内公众的广泛关注. 为深入探讨工业活动与地下速度结构之间的关系及其对地震活动的影响, 本文从该地区密集布设的宽频带流动地震台记录中挑选了大量且高质量的P波和S波初动到时数据, 并进一步开展近震体波走时层析成像反演, 构建了长宁地区浅层地壳的P波和S波速度模型. 该模型一方面显示速度结构的高低与地层岩性的老新有一定的对应关系, 另一方面还表明工业开采层位附近存在与注采压力大小相关的局部速度异常结构. 此外, 本文成像结果还揭示兴文震区与长宁震区之间存在一条连续的P波低速异常带, 反映流体在深部迁移的现象. 尽管本研究不能排除存在其他孕震机制的可能性, 但本文结果倾向于支持流体沿兴文地震产生的长距离通道运移, 进而促使长宁地震发生的潜在触发机制.

关键词 长宁地震, 工业活动, 走时层析成像, 三维速度结构, 流体运移

1 引言

近年来, 随着能源需求的增长和工业技术的进步, 四川南部能源开采区的工业活动逐渐增多(Ellsworth, 2013; 何登发等, 2019; 雷兴林等, 2020; Schultz等, 2020). 作为川南地区重要能源开采区块的长宁地区, 在多期构造演化的作用下(何登发等, 2019; 公子龙等, 2023), 形成了较为复杂的地质构造背景, 发育有大量褶皱和错综复杂的断层结构(图1a和1b). 长宁背斜(主要由白象岩-狮子滩背斜、双河背斜和长宁大背斜组成)和建武向斜是该区域较有代表性的主级构造单元, 这两个构造单元内分别有盐卤和页岩气的工业开采活动(图1b). 随着时间推移, 工业活动的范围和规模逐步扩大, 长宁地区的地震频度和强度也随之上升(Lei等, 2017; Meng等, 2019). 特别是2019年6月17日, 盐矿开采区附近发生了长宁M_S6.0级地震, 打破该地区历史上

中文引用格式: 李昱, 张风雪, 吴建平, 陈洪平. 2025. 四川长宁工业开采区的速度结构成因分析及其对长宁地震的启示. 中国科学: 地球科学, 55(10): 3333–3348, doi: 10.1360/SSTe-2024-0272
英文引用格式: Li Y, Zhang F, Wu J, Chen Y. 2025. Velocity structure and its origin in the Changning hydraulic fracturing zone, Sichuan, China: Implications for the Changning earthquake. Science China Earth Sciences, 68(10): 3200–3215, https://doi.org/10.1007/s11430-024-1673-y

© 2025 《中国科学》杂志社

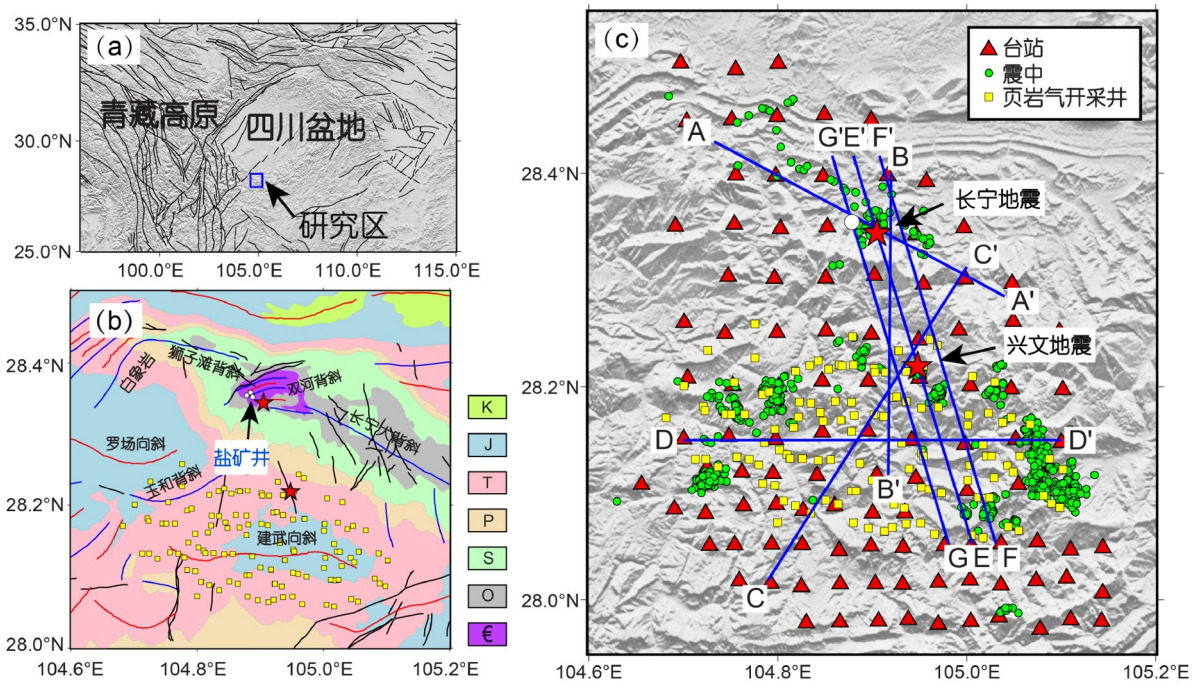


图 1　研究区构造背景、开采井位置、台站及震中分布

(a) 研究区构造背景图; (b) 长宁地区地质构造图, 红线代表研究区的向斜, 蓝线代表背斜, 黑线代表断层, 黄色方块代表页岩气开采井, 白色圆圈代表盐矿井, 红色五角星分别为长宁地震和兴文地震的震中(据易桂喜等, 2019); (c) 台站、地震以及井场分布图, 红色三角形为台站位置, 绿色圆圈代表震中位置, 黄色方块、白色圆圈和红色五角星同图b

无6级以上地震的记录. 而在此地震发生的数月前, 与之相距14km的页岩气开采区内还发生了兴文M_S5.7级地震. 这两次地震对当地居民的生命财产造成了严重危害, 引起了包括地震学者在内公众的广泛关注.

在地震学领域, 研究学者在单个井场小范围内的研究表明, 注入流体会导致局部低波速结构(Chen等, 2017; Tan等, 2020, 2023). 关于大范围、长时间工业注水活动对速度结构格局的作用机制, 研究学者尚未开展过充分的讨论. 高压注水不仅会破坏地下介质结构, 还会间接影响介质波速. 一般情况下, 固体岩石介质的波速通常高于流体介质. 然而, 介质波速不仅与介质本身的物理状态属性相关, 还受其他外部因素的影响, 如地层年代和孔隙流体压力等. 长宁地区不仅有年代分层性明显的地层结构, 还有高压流体注采的工业活动, 这是分析新老地层和流体压力对岩层介质波速结构影响的理想实验场. 此区域的已有研究(Long等, 2020; Zuo等, 2020)获得了波速结构与新老地层的基本对应关系, 认为老(新)地层中的介质波速普遍偏高(低). 很显然, 这些研究结果较为侧重于波速结构与新老地层之间的相关性分析, 对工业活动的注采压力与波速结构之间的关联性分析并不充分.

研究学者对2019年长宁M_S6.0级地震的孕震背景有不同的认识(易桂喜等, 2019; Lei等, 2019a; Zhang等, 2020; Anyiam等, 2024). 震源机制解的研究认为, 长宁地震除了有与地质构造相关的逆冲分量以外, 还存在走滑成分(Liu和Zahradník, 2020). 鉴于该区地震活动与工业生产之间有较强的时空关联性, 走滑成分被认为可能与长宁背斜区的采盐注水工业活动有关联(Liu和Zahradník, 2020; 戴坤等, 2023). 多种地球物理观测结果(陈弘, 2022; Anyiam等, 2023)表明, 采盐注水的地底残留液大多位于盐矿场的西北方位, 而长宁地震却发生于盐矿场的东南方位, 这暗示着长宁地震的孕震背景可能更加复杂. Lei等(2019a, 2019b)的研究发现, 2018年兴文M_S5.7级地震之后, 长宁震区的地震活动性显著增强, 两个震区间相距10余公里, 兴文地震对长宁地震的发生可能起到了促进作用, 但具体作用机制尚不明确. 一个可能的机制是, 兴文地震打开了一个高渗透性的断裂带, 形成长距离的水文通道连通了兴文

震区和长宁震区. 由此可见, 长宁地震究竟是构造成因, 还是注水诱发, 或是其他地震触发, 仍有很多值得深入探讨的空间.

在国家重点研发项目的资助下, 中国地震局地球物理研究所在川南工业开采区布设了107个宽频带流动地震台站, 本文利用其中的部分数据(2021年4月至2022年6月)开展基于快速波前行进法(fast marching method, FMM; Sethian, 1996; Sethian和Popovici, 1999)的近震走时层析成像反演, 构建了区域高分辨率的P波和S波速度结构模型, 根据成像结果深入讨论了不同注采压力对地下速度结构的影响. 同时, 本次成像还发现兴文震区和长宁震区之间存在连续的P波低速异常带, 该低速异常带为揭示长宁地震的孕震背景提供了新的地球物理观测证据.

2　数据与方法

2.1　数据

本次研究使用的数据来自长宁地区107个宽频带地震仪(台间距3~5km), 这些台站均匀覆盖了研究区的多个地震多发区域(图1c), 包括长宁背斜区和建武向斜区. 本文使用该台阵的近震资料开展研究, 近震震相到时的拾取使用了基于图形界面的测量平台TIMC-POT(Zhang等, 2023). 该平台既可以保留更多的人工经验, 又可以有效减少劳动成本. 利用该平台的便利性, 本文目视挑选了75095条P_g、65864条S_g射线走时数据, 与之对应的事件波形均有较高的信噪比和清晰的初至到时起跳点. 图2a为走时数据的时距散点图, 该图既揭示了走时数据的整体变化趋势, 又反映了局

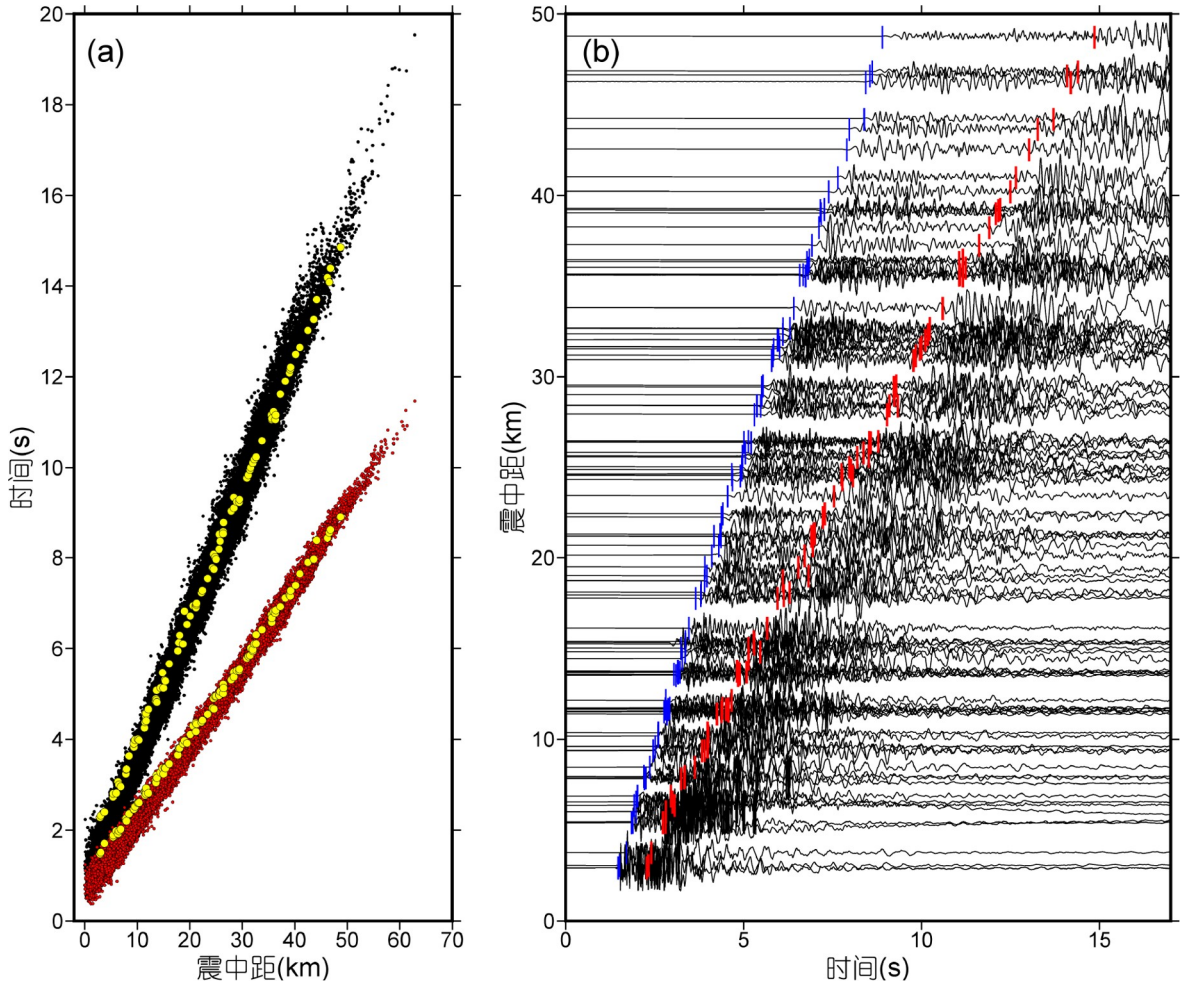


图 2　时距散点分布及示例地震的震相标记

(a) 近震事件的时距散点图, 红点代表P波, 黑点代表S波, 黄点代表右图示例地震震相标记的数据散点; (b) 示例地震的波形排列和震相标记

部地区走时的细微变化. 如图2a中黄色圆点所示, 其代表研究区中部某次地震的走时和震中距散点分布, 很显然, 有些散点位于簇集的边缘区域. 图2b为该示例事件的波形排列图, 从图中可以看出这些貌似异常的走时数据标记有较好的信号识别特征, 说明走时标记的合理性, 而散点数据偏离的现象可能代表局部的速度异常结构. 常规的拟合裁切方式很容易将此类数据排除在外, 而本文的筛选方式可将此类数据保留下来, 使研究结果能反映更精细的介质结构. 另外, 对于每个事件, 本文分别对P波和S波的初至到时记录进行了筛选, 要求每种震相中准确拾取、质量较高的到时记录(即有效记录)不少于6个. 一半以上事件在两种震相中均有超过80个有效记录. 最终, 共保留且用于成像反演的地震事件为814个(图1c中绿色圆圈).

2.2 方法

本文采用近震走时层析成像方法开展长宁工业开采区的速度结构反演研究, 层析成像反演受初始速度模型的影响较大. 为了选取较为合理的初始模型, 本文在前述高质量走时数据的基础之上, 对比分析了两个区域模型(Lei等, 2017; 孙权等, 2021)中的地震重定位结果, 重定位过程采用基于正演过程的网格搜索法(Chen和Holland, 2016). 两个速度模型分别为基于背景噪声成像(Lei等, 2017)和参考钻井数据(孙权等, 2021)的结果且考虑了地形起伏的变化, 地表以上的速度值由地表速度值延拓而来(图3). 图4为使用不同速度模型开展重定位前后地震位置的空间变化, 结果表明, 不同速度模型中震中位置并没有较大改变(图4a~4c, 变化量均未超过0.4km), 震源位置在孙权等(2021)模型中的深度比Lei等(2017)模型偏深1~2km(图4d、4e). 考虑速度模型和震源深度之间的耦合关系(Gomberg等, 1990; 张风雪等, 2025)以及工业活动区注采的实际情况(Meng等, 2019; Zhao等, 2023), 本文选用Lei等(2017)的模型作为本次层析成像的初始模型.

在层析成像中, 射线追踪过程采用张风雪等(2010)改进的快速波前行进法, 该方法能够在三维非均匀介质中准确且稳定求解地震波的射线路径和传播时间. 此外, 本文射线追踪过程还考虑了地势起伏和台站高程的变化(图5). 反演过程采用带阻尼因子的LSQR算法(Paige和Saunders, 1982a, 1982b)求解, 阻尼因子控制速度模型变化量和剩余走时残差之间的折衷

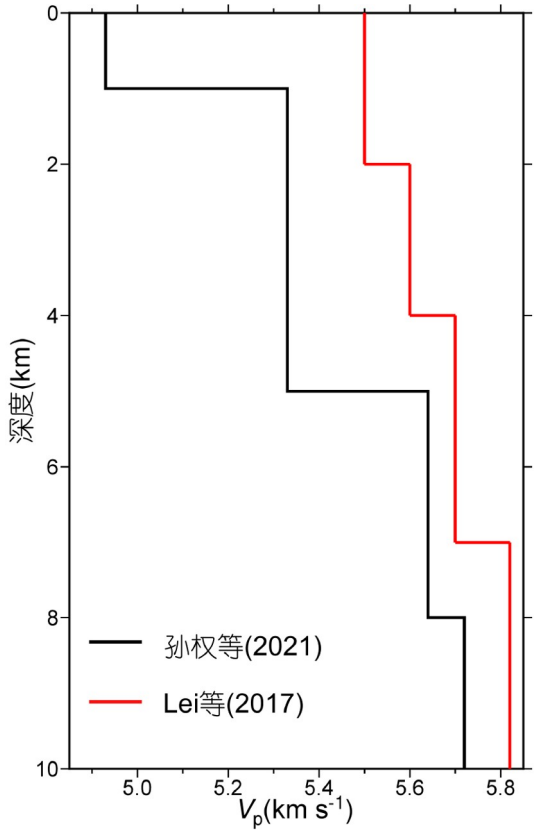


图 3 长宁地区的区域波速模型

黑色折线和红色折线代表的速度模型分别据孙权等(2021)和Lei等(2017)

关系, 参照折衷关系曲线(图6), 本文最终将P波和S波反演阻尼参数均设定为3. 该阻尼值可以确保速度模型既不过于复杂, 又能拟合大部分观测数据. 本次反演采用分阶段的方式开展, 首次反演获得速度模型后, 以此模型为基础开展地震重定位, 并更新走时数据, 然后再次开展成像反演. 对比反演前后的走时残差统计图(图7)可得, 反演后P波和S波的剩余走时残差均符合高斯分布, 且其均方根值有所下降, 说明反演模型比初始模型能更好地拟合观测数据. 最终, P波走时残差方差从0.0231s^{2}降至0.0109s^2, S波走时残差方差从0.1376s^{2}降至0.0583s^2, 降幅分别为52%和57%, 说明反演模型能更好地刻画真实的地下结构.

3 模型分辨率测试

鉴于研究区的台站和地震射线均较为密集, 本研

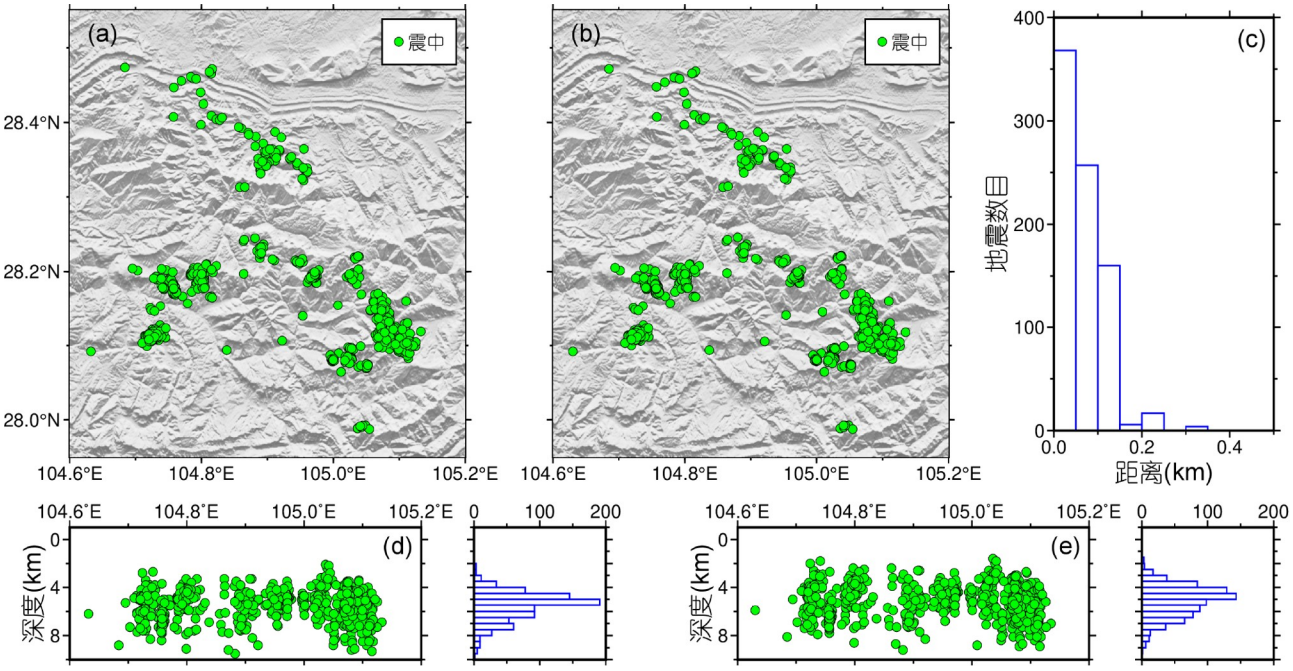


图 4　使用不同模型重定位后的震中位置和震源深度的比较

(a、b)分别为使用孙权等(2021)和Lei等(2017)模型定位得到的震中位置, (c)为两个模型中震中位置差异的统计直方图, (d、e)分别为两个速度模型中震源深度分布及其直方图

究采用水平间隔为0.01°、垂直间隔为0.2km的剖分参数对研究空间进行三维网格参数化. 为了评估层析成像反演的分辨能力, 本研究开展基于网格剖分的分辨率测试, 即组合大小不同、正负相间的输入块体进行测试. 大块体为0.02°×0.02°×0.4km, 小块体为0.01°×0.01°×0.2km, 大小块体的速度异常幅值均设置为相间分布的±3%. 测试中使用的地震事件、台站布设和反演方法与实际数据的反演保持一致. 图8和图9依次展示了测试结果的水平切片和垂直切片. 结果显示, 大块体的恢复效果明显优于小块体, 其幅值和形态均接近于输入模型. 大块体测试结果显示, P波和S波在5km以浅的大部分区域内均有较好的分辨能力; 在6km深度上, 仅在地震较多的局部范围有较好的恢复效果. 同时, 垂直切片也显示可分辨的区域不深于6km. 因此, 本文认为此次成像的分辨率在6km以浅的空间内, 水平方向可达0.02°, 垂直方向可达0.4km.

4　结果

本次层析成像结果显示, 3km以浅地层速度的横向不均一性较为强烈, 而3km以深的横向不均一性随深度增加明显减弱(图10和图11). P波和S波速度结构整体上呈现出较好的一致性, 但在局部区域也存在一定差异. 研究区浅层速度结构的不均一性与复杂的地质构造密切相关. 长宁背斜和建武向斜两个构造单元的近地表(1km)速度结构存在显著的差异: 长宁背斜区主要呈现高速异常结构, 建武向斜区显示出大范围低速异常结构(图10和图11), 其中S波速度结构在两个区域的差异较P波更为显著, Li等(2023)也观察到类似的速度结构分布. 背斜区和向斜区的速度结构差异与Long等(2020)和Zuo等(2020)的成像结果较为相符, 这些现象均暗示高低速结构与地层岩性的新老程度有一定的对应关系.

本研究使用的观测台站间距较前人更为密集(图1c), 测量地震波走时的过程考虑了更多的人工经验(Zhang等, 2023), 走时数据包含更多的细节特征(图2a和2b). 因此, 反演结果的分辨率和可靠性均得到显著提升(图8和图9). 成像结果显示局部区域有与地层岩性新老程度明显不一致的速度异常结构: 长宁背斜盐矿场附近1~2km深度为寒武纪(Є)、奥陶纪(O)和志留

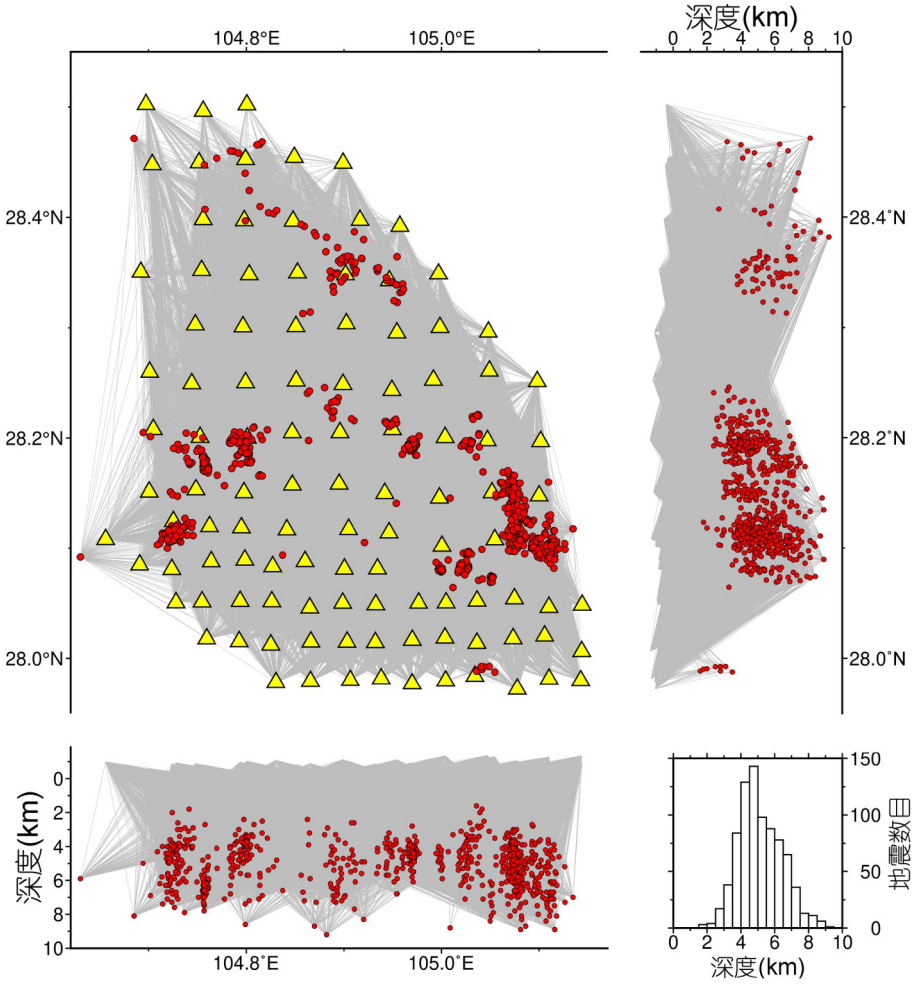


图 5　地震射线路径分布图

图中黄色三角形为台站位置, 红色圆圈代表震中位置, 灰色直线代表地震射线路径, 右下角为地震深度统计直方图. 由于考虑了台站的高程, 地震事件的深度以海平面为基准

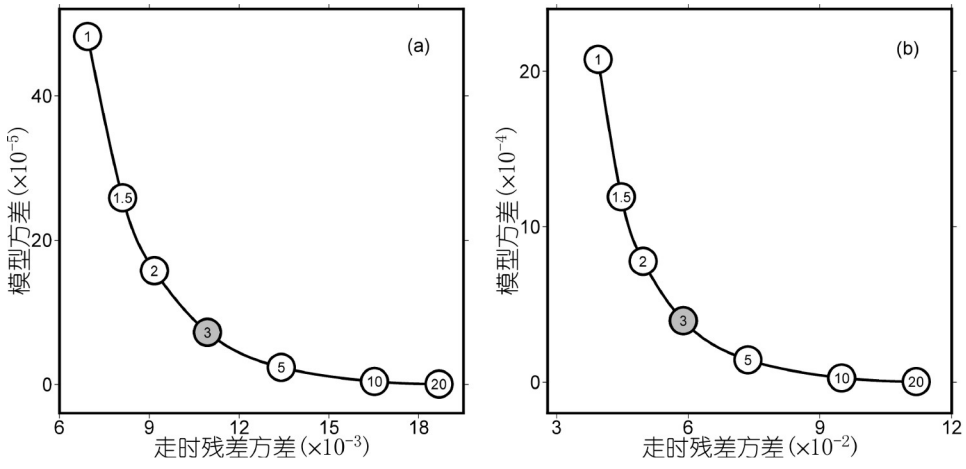


图 6　走时残差方差和速度模型方差间的折衷曲线

(a) P波反演的曲线; (b) S波反演的曲线. 本研究选取3作为反演参数值

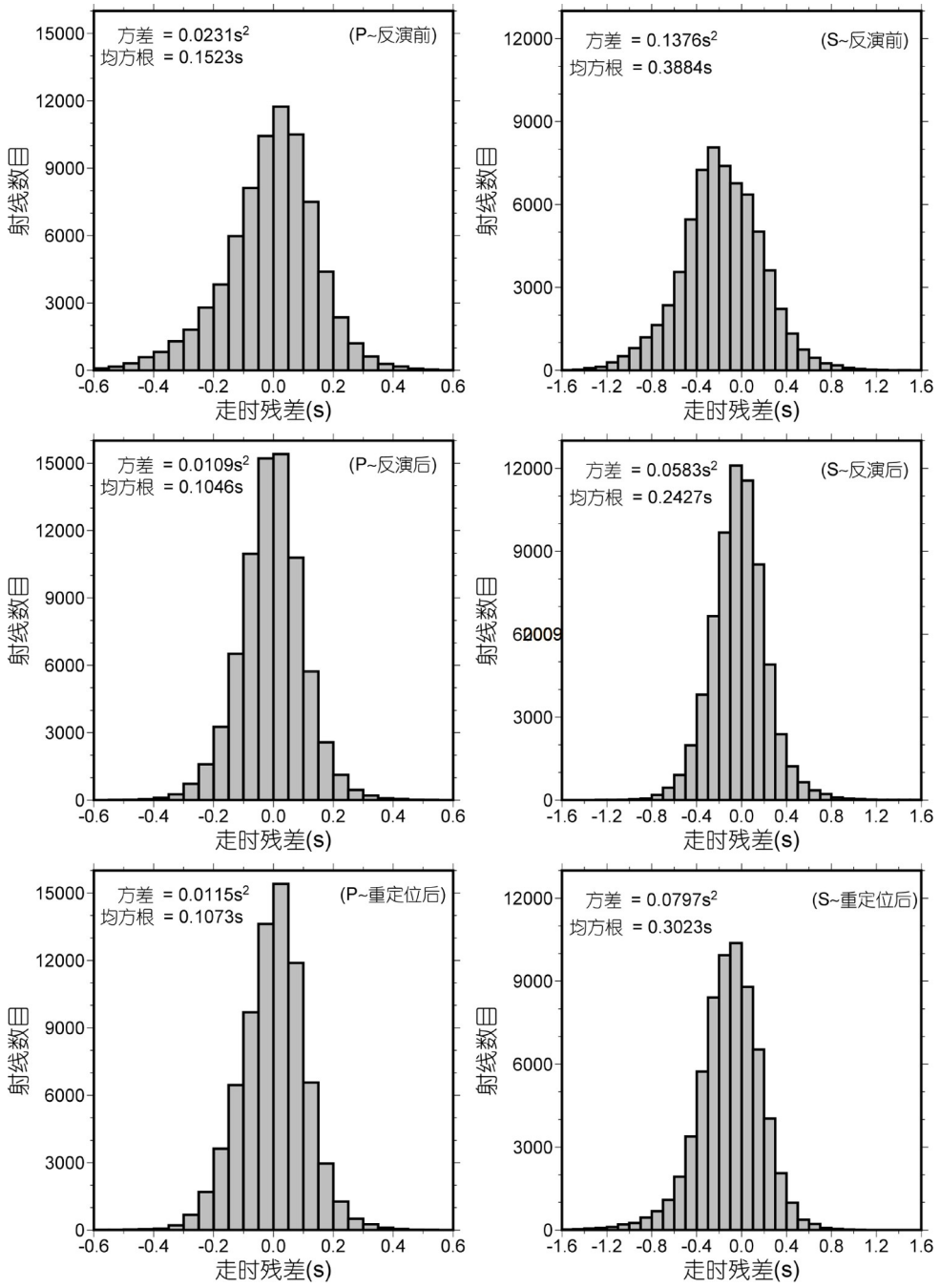


图 7　反演前后和重定位后的走时残差统计直方图

第一和第二排图分别为反演前和反演后的走时残差, 第三排图为采用最终速度模型重定位后的走时残差; 左列图和右列图分别为P波和S波的走时残差

纪(S)的老地层，成像结果显示P波速度偏低，S波速度偏高(图10~图12a)，明显不同于该背斜东南部相同层位的速度异常——P波和S波均为高速(图12a~12c)；然而建武向斜区相同层位的老地层中P波和S波均表现为低速异常(图12c和12d). 概括而言, 虽然同为老地层, 但在局部区域却有不同的表现, 即在盐矿开采活动区P波为低速，S波为高速(图12a)，在页岩气开采活动区P波和S均为低速(图12c和12d). 这些速度结构特征一方

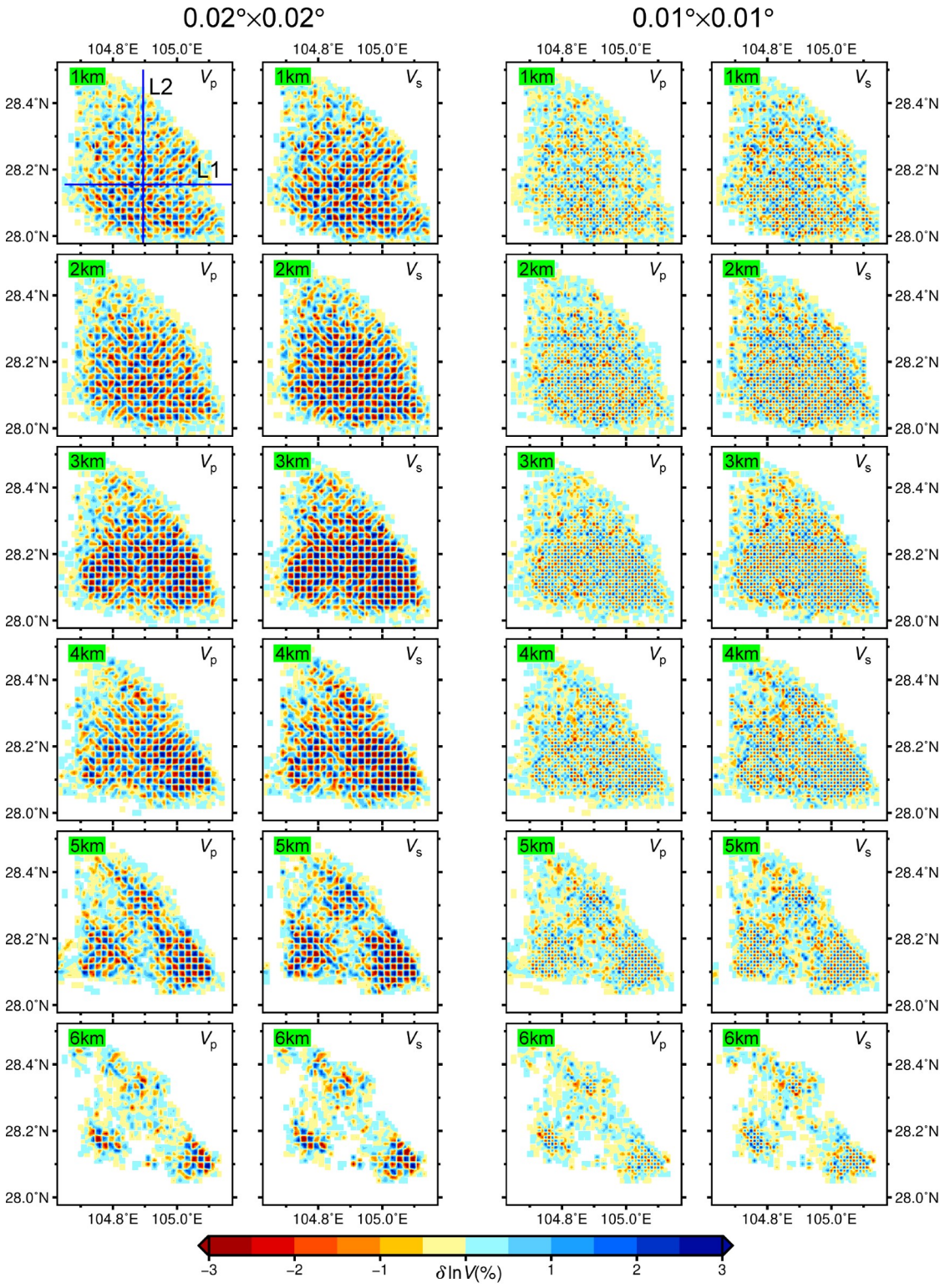


图 8　不同深度水平切片的检测板测试

第一列和第二列分别为大块体(0.2°×0.2°×0.4km)的P波和S波检测板输出结果; 第三列和第四列分别为小块体(0.1°×0.1°×0.2km)的P波和S波检测板输出结果

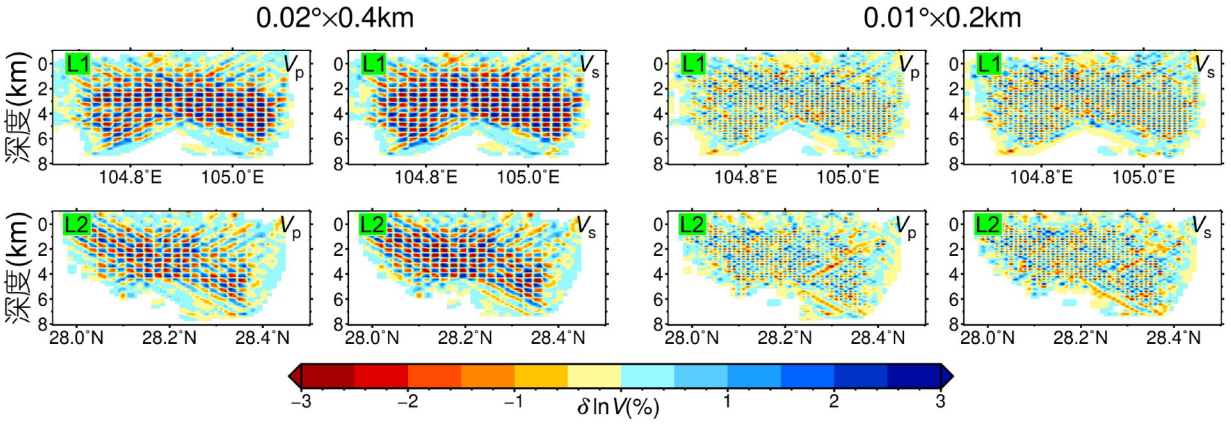


图 9　垂直剖面的检测板测试

剖面(L1和L2)位置见图8中的蓝色直线; 第一列和第二列分别为大块体(0.2°×0.2°×0.4km)的P波和S波检测板测试结果; 第三列和第四列分别为小块体(0.1°×0.1°×0.2km)的P波和S波检测板测试结果

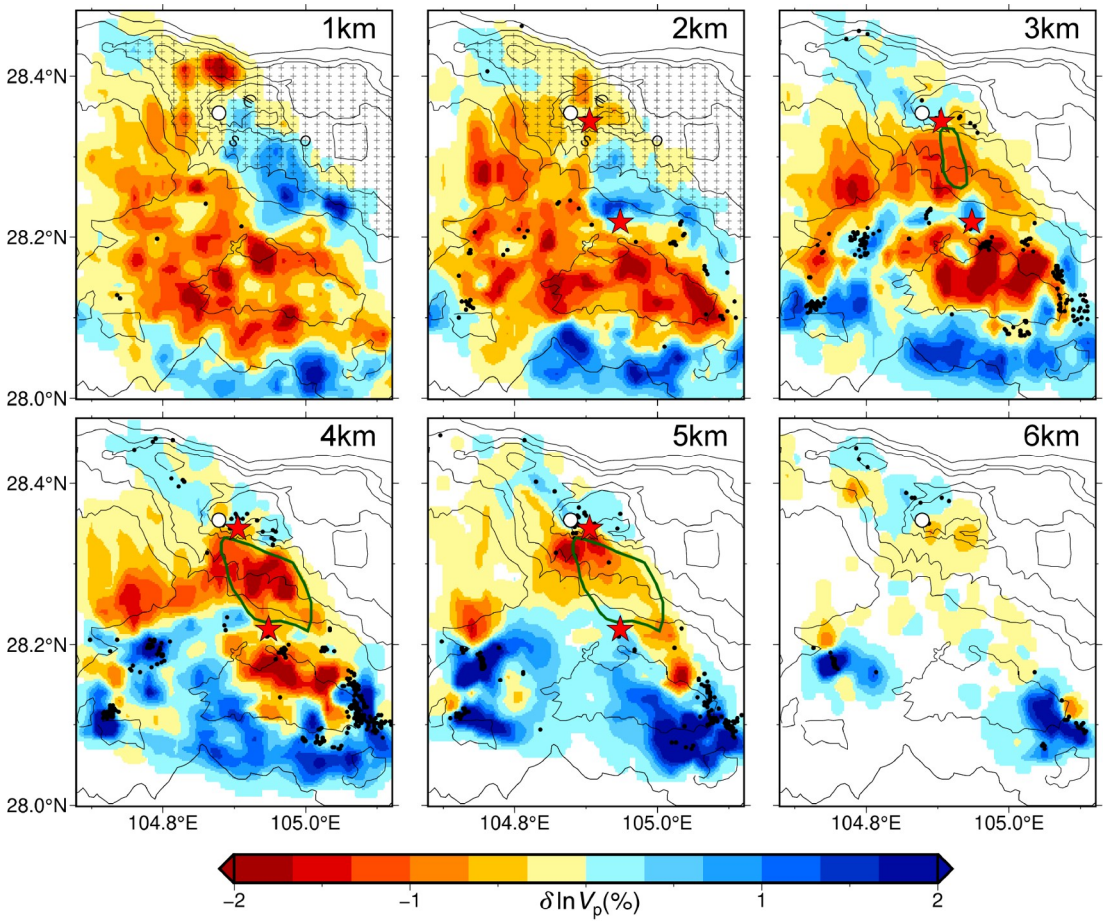


图 10　P波在不同深度的水平切片

图中的蓝色和红色区域分别表示相对于初始模型(见图3)的速度正扰动和负扰动, 各个深度水平切片中黑线勾画出的地质构造轮廓均与图1b一致; 1~2km水平切片背斜附近的寒武纪(Є)、奥陶纪(O)和志留纪(S)老地层区域用灰色十字符号表示; 3~5km水平切片中的绿线所圈区域代表连接长宁震区和兴文震区的低速条带; 黑色圆点表示重定位得到的震中位置(距离切片0.5km范围内), 白色圆圈代表盐矿井场, 五角星分别为长宁震地震和兴文地震的震中位置(据易桂喜等, 2019)

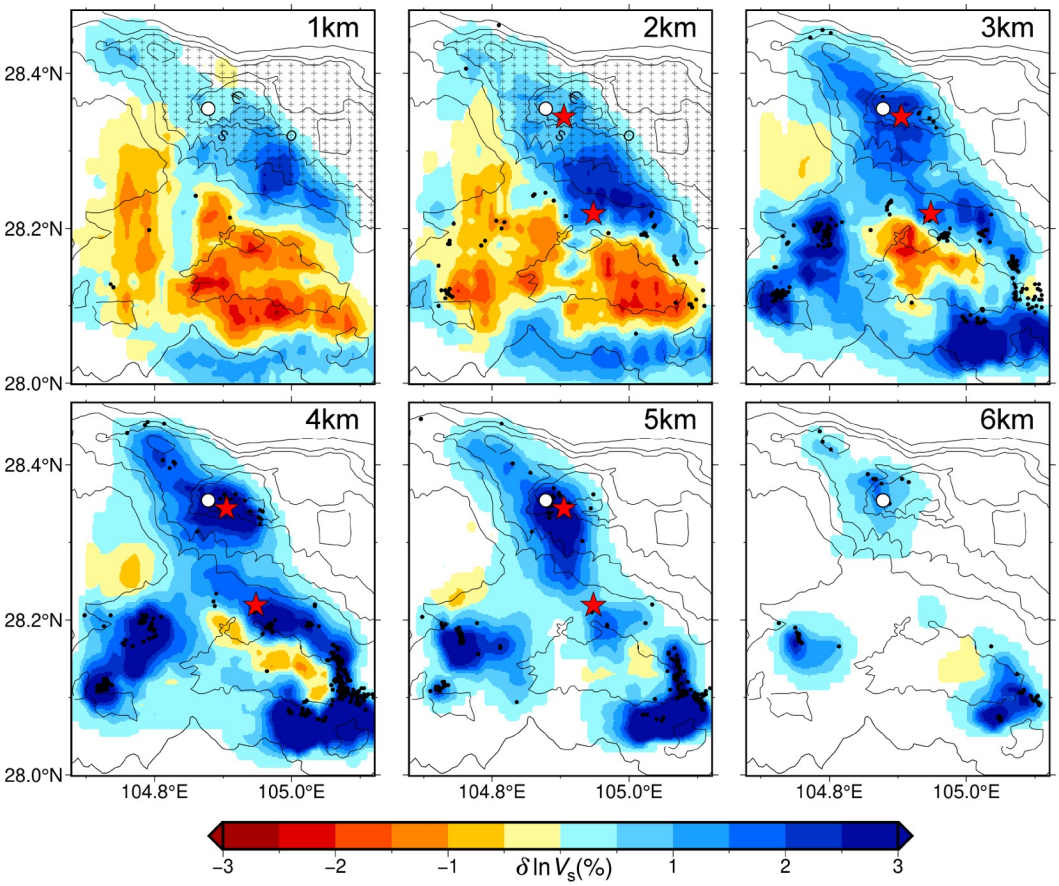


图 11　S波在不同深度的水平切片

图中的地质构造轮廓、地层示意、盐矿井位和地震震中与图10相同

面说明, 工业活动对该区的速度结构, 尤其是老地层中的速度结构产生了显著影响; 另一方面还暗示地层的速度结构对不同工业活动的响应机制有一定的区别, 即介质结构响应与页岩气和盐卤开采的不同注采工艺相关联.

最为明显的是, 本次成像发现了连通长宁震区和兴文震区的低速异常条带. P波水平切片结果(图10)显示, 长宁震区和兴文震区均有低速异常: 长宁震区的低速异常幅值偏弱, 而兴文震区的低速异常幅值偏强. 两个震区的低速异常在3km深度切片上开始显现出连通性, 4~5km深度的切片显示该带状低速异常的水平宽度约为6km(见图10中绿色曲线轮廓). 垂直剖面清晰地显示长宁地震和兴文地震分别位于低速条带的两端(图12e~12g). 鉴于长宁震区和兴文震区有较近的水平距离(14km)和较短的发震间隔(6个月), 该低速条带暗示着两次地震有一定关联.

本文的反演结果不仅反映了工业活动区的速度结构特征, 该结果模型还可以用于约束更精准的地震位置. 比如, 在最终速度模型基础之上本文再次开展地震重定位, 并将其位置投影在速度结构剖面图上(图10~12). 不难发现, 震群大多位于高速异常内, 此种特征与Li等(2023)的结果基本一致. 另外, 重定位后的剩余走时残差显著低于一维模型定位结果, 但与反演后的剩余走时残差相当(图7), 表明最终模型已趋于稳定, 且能有效拟合实际观测数据.

5　讨论

5.1　地层岩性差异和工业活动共同控制研究区的速度结构

已有的速度结构成像结果(Long等, 2020; Zhang等, 2020)揭示, 研究区的浅层速度结构在长宁背斜区

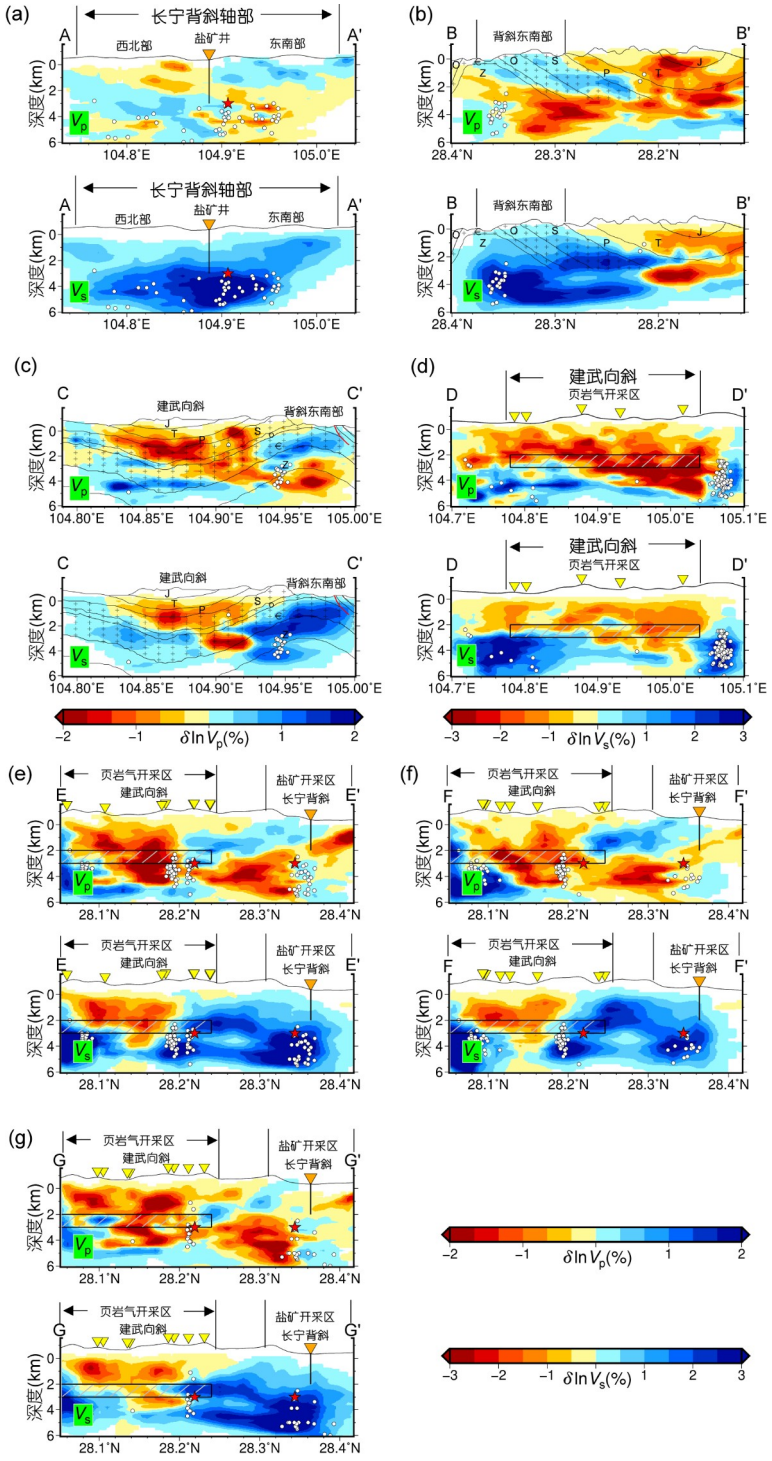


图 12　不同垂直剖面的V_p、V_s成像结果

垂直剖面位置见图1c. 图中的蓝色和红色区域分别表示相对于初始模型(见图3)的速度正扰动和负扰动, 白色圆圈表示重定位得到的地震事件(距离剖面2km范围内)在各个剖面上的投影位置, 黄色和橙色三角形分别表示页岩气开采井和盐矿开采井位置; (a、e~g)中红色五角星表示长宁地震和兴文地震(据易桂喜等, 2019); (b)中BB′剖面的地层地质构造修改自Chen等(2014), 该文给出的构造信息仅至3km深度, (c)中CC′剖面的地层地质构造修改自何登发等(2019), 寒武纪(Є)、奥陶纪(O)和志留纪(S)的老地层在(b、c)中均用灰色十字符号表示; (d~g)中灰色虚线条带大致表示页岩气开采层深度

域(盐矿开采区)表现为高速异常，建武向斜区(页岩气开采区)表现为低速异常. Long等(2020)分析认为背斜和向斜区域的高低速分布主要受控于地层年代的新老差异, 但Zhao等(2023)的成像结果显示, 建武向斜区的部分老地层也存在低速异常. 这些结果揭示, 高低速异常与新老地层虽然有一定的关联性，但并不是完全对应.

此次研究使用了数量较多的高质量走时数据，层析成像结果表现出更多的细节特征，在成像分辨率较高的工业活动区(页岩气和盐矿注采区)发现与流体长期注入相关的波速异常结构. 在页岩气开采较密集的建武向斜区域，2km以浅的地层以页岩和泥岩为主且年代较新(Li等, 2023), 成像结果显示该深度范围内的地层表现为偏低的速度结构(图12c和12d)，地层年代的新老与速度异常的低高有较好的对应关系. 随着深度的增加, 比如2~4km的范围内, 建武向斜的地层主要以年代较老的寒武纪地层为主, 但该深度范围内的P波与S波均为低速结构(图12c和12d)，而从图10，图11和12a中可得，地层年代相当的长宁背斜区西北部P波速度偏低(与建武向斜区域的P波异常较为一致)，S波速度偏高(与建武向斜区域的S波异常并不一致). 可见, 两个区域的S波速度结构形成鲜明差异. 概括而言，建武向斜区域的P波和S波的变化趋势较为一致，而长宁背斜区域的P波和S波的变化趋势并不完全一致，这种区域差异可能与不同的工业活动有关. 长宁背斜区域主要为采盐注水，压力约为8~10MPa(Lei等，2019a), 建武向斜区域主要为采气注水，压力约为60~70MPa (任勇等，2015). 由此可见，两个区域的注采压力存在明显差距.

实验表明，若将流体注入压力控制在岩层破裂压力前，岩层的主体承压框架不会发生破坏，流体注入会充填裂缝或孔隙导致岩层孔隙结构的纵横比增大. 岩层孔隙结构纵横比的变化会进一步影响剪切模量和体积模量. Shearer(1988)研究表明，具有较大纵横比(>0.1)裂缝的流体饱和岩层，体积模量K的减小幅度较剪切模量μ更显著，这意味着岩层的P波速度$\left(V_{\mathrm{p}}=\sqrt{(K+4\mu/3)/\rho}\right)$减小得比例较S波速度$\left(V_{\mathrm{s}}=\sqrt{\mu/\rho}\right)$更大(Kuster和Toksöz，1974). 长宁背斜区的采盐作业并没有破坏主体承压结构，仅是通过流体溶解作用开采岩层孔隙中的盐卤成分. 随着盐卤成分逐步减少，岩层孔隙结构的纵横比逐渐增大，使得盐矿区的V_{p}和V_{s}波速对流体产生不一致的响应，即V_{p}降幅较大表现为低速，V_{s}降幅较小，老地层仍是V_{s}波速的主控因素，故V_{s}表现为高速(如图12a和12e~12g). 速度成像结果及以上分析说明盐矿开采区的高V_{s}异常可能仍与地层岩性有关, 与盐矿注水关联性不大.

当注采压力增加达到岩层发生破裂的临界条件时, 岩层的主体承压框架将被流体所取代. 此时V_{s}会显著减小，甚至接近于零，虽然V_{p}也会减小，但不至于接近零值. 建武向斜区域的页岩气开采层位深约2~3km (图12d~12g中阴影示意)，该地层以深富含石英和二氧化硅(Jia等，2006; Anyiam等，2024)，具有较大的脆性，在较高的页岩气注采压力下，非常容易发生破裂产生裂缝带. 建武向斜区域的页岩气开采井位较为密集，其水平井的长度与井口间距较为相当. 因此，在大规模、长时间的页岩气开采活动影响之下，建武向斜区域的V_{p}和V_{s}均表现为低速异常(图12c~12g).

总体而言，V_{p}和V_{s}在较老地层区域表现为高速，在较新地层区域表现为低速. 在工业注水层位深度，V_{p}和V_{s}随注采压力的变化会有不同的响应机制. 在低压区域，尽管V_{p}和V_{s}均会降低，但两者的敏感性不一致，V_{p}降幅偏大, 表现为低速, V_{s}降幅偏小, 表现为高速; 在高压流体区域, 两者均表现为低速结构. 综上可得, 地层岩性和工业活动的注采压力共同控制研究区内波速展布和结构的复杂特征.

5.2 长宁地震的发震背景

长宁地震的发震背景涉及多方面因素. 已有的研究推测, 长宁地震可能与附近井场的采盐注水有关(Jia等, 2020; 雷兴林等, 2020; Liu等, 2023). 然而, 地震成像(Anyiam等，2023)和大地电磁测深结果(陈弘，2022)显示，盐矿注水活动的残留液体主要聚集在井场西北方向，但长宁地震却发生在井场的东南方向(图1). 本文的成像结果揭示，井场东南方向约2km深度存在低V_{p}异常(图12a)，表明该区域可能也有残留液体，但其范围明显小于西北部. 这表明大量残留液体集中在井场西北部，而东南部仅存在少量残留液体. 长宁地震的主震发生在流体聚集区之外的井场东南部，暗示着地震的发震背景不仅与盐矿注水有关，可能还存在其他影响因素.

在长宁地震发生的数月前，研究区南部的页岩气

开采区发生了兴文5.7级地震. 兴文地震后, 长宁震区附近的地震活动性有所增强(Lei等, 2019a), 这表明兴文地震可能对长宁地震的发生起到了促进作用. Lei等(2019a, 2019b)的震源机制解提供了兴文地震断层的走向信息, 基于地震与InSAR数据的反演结果(Wang等, 2022; Li等, 2023; 缪思钰等, 2024)揭示了破裂的空间展布与时空演化特征, 综合以上研究可推测, 兴文地震引发了NNW向的单向破裂, 破裂延伸至双河背斜附近. 然而, 地表未见如此长距离的破裂, 兴文地震可能产生了NNW向的壳内深层断裂带. 本次成像结果显示, 兴文震区和长宁震区之间存在连续的带状低V_p异常(图12e~12g), 该低速异常带可能是该深层断裂带的速度响应. 由于断裂带本身具有较高的流体渗透性, 它可以引导流体进入断层(Improta等, 2017). 本文的成像结果显示, 该断裂带基本处在页岩气开采层位以下, 有利于形成密闭性良好的长距离通道(Chen等, 2004; Chen和Wang, 2009; Tian等, 2024). 鉴于页岩气开采区工业注水压力较大且地势偏高, 在工业活动压力差(Brown和Ge, 2018)和地势高差共同作用下, 流体经长距离密闭通道从建武向斜区域逐渐流向长宁背斜区域. 深部流体沿通道运移会促进孔隙压力的传播, 从而激活长宁震区的先存断层(Chiarabba等, 2018; Galloway等, 2018), 引发流体超压较大的地震(图13)(Lei等, 2019a; 戴坤等, 2023). 同时, 随着流体的聚集, 长宁震区的速度结构表现出明显的变化, 如兴文地震前的成像结果显示该区域V_p波速偏高(Long等, 2020), 而震后的相关研究(Zhang等, 2020; Zuo等, 2020)及本文成像结果显示该区的V_p速度有所降低. 以上结果暗示, 长距离流体运移对长宁地震的孕震背景产生了显著影响.

介质波速的降低除了与断裂带中的流体成份有关以外, 还与断裂带中裂缝纵横比相关(Takei, 2002; Wang等, 2019; Wang Z等, 2020). 断裂带中的裂隙纵横比较大, Tan等(2020)对此现象开展了定性研究, 当裂缝纵横比较大时, 认为P波和S波速度均会降低. Kuster和Toksöz(1974)开展过定量估计, 其研究结果表明若岩石裂缝的纵横比为0.1, 当充水饱和时, V_p速度下降3.4%, 而V_s速度仅下降1.3%, S波的下降幅值明显小于P波. 图12e~12f显示, 除了P波有明显的低速异常以外, 该深部流体通道内的S波速也有略微降低的现象. 即尽管S波表现为高速异常, 但相比于深部流体通道周围区域, 通道区域的S波速度仍有一定程度的降低. 综上所述, 该深部流体通道中较大的P波降幅和较小的S波降幅, 可能表明该区域为已充满流体的断裂带区域, 进一步表明该区有深部流体运移的现象.

长距离的流体运移会对长宁震区造成多种影响. 比如, Wang S等(2020)通过InSAR观测发现, 在长宁地震发震前4个月, 长宁震区出现了1~2cm的地表抬升, 这种变形指示地下流体的大量净增加和岩层孔隙压力的提升. 据本文调研, 长宁地震前夕盐矿场并没有注水量增加或减少的巨量变化, 大量净增加的地下流体极有可能通过长距离流体通道从页岩气开采区运移而来. 戴坤等(2023)结果表明长宁主震的震源机制有流体作用的因素, 且流体超压达34MPa; Lei等(2019a)对长宁震群开展震源破裂过程研究, 发现部分余震的流

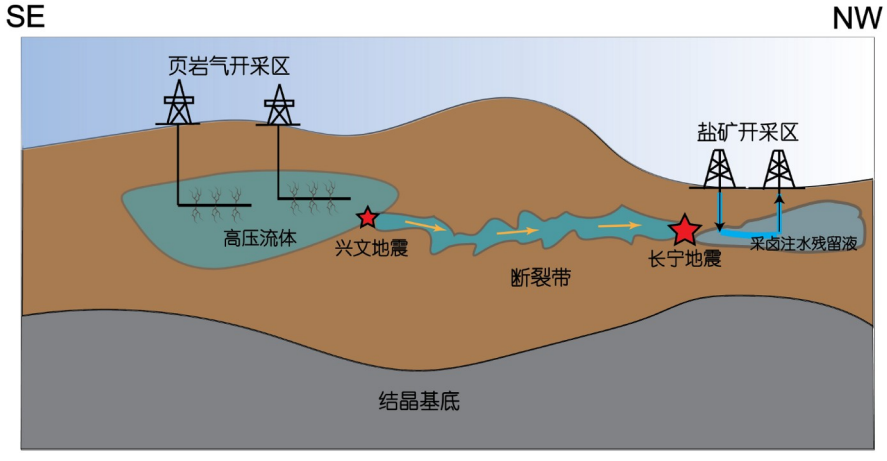


图 13　兴文地震对长宁地震的触发作用机制示意图

流体沿兴文地震形成的长距离通道运移, 传递孔隙压力, 进而促使长宁地震发生

体超压超过10MPa. 以上研究表明, 主震及部分余震均有流体的作用, 且流体压力均高于盐矿注水的压力范围, 说明长宁地震由采盐注水单一因素引起的可能性较小. 尽管本文不能定量分析采盐注水对长宁地震的影响, 但基于地表抬升的时空吻合性以及震源区的流体超压现象, 本文倾向于认为兴文地震对长宁震区的孕震背景产生了一定的影响.

6 结论

本文基于长宁地区密集流动地震台站的近震波形数据, 考虑更多人工经验目视挑选了大量且高质量的P波和S波初动到时, 采用基于FMM射线追踪和阻尼LSQR算法的近震走时层析成像方法, 反演获得了该区域地壳浅层三维速度结构. 检测板测试结果显示, 速度结构的水平分辨率可达0.02°, 垂直分辨率可达0.4km. 本次研究主要得到以下两点认识:

(1) 此次研究获得了较前人更精细的速度结构, 结果显示长宁地区浅层的速度结构不均一性较强. 总体上, 速度结构与新老地层有一定的对应关系, 但在工业开采层位附近存在与新老地层不对应的局部速度异常. 如在注采压力较高的页岩气开采区, P波和S波速度均偏低, 在注采压力偏低的盐矿开采区, P波速度偏低, S波却表现为高速, 两个开采区速度结构的差异可能与不同的注采压力有关.

(2) 成像结果发现兴文震区和长宁震区间存在连续的P波低速异常带, 结合前人给出的相关证据, 本文推测该低速条带可能是兴文地震打开的连通两个震区的流体通道. 长宁地震除受到盐矿注水的影响外, 还可能受到了与页岩气开采相关的深部流体运移的影响.

致谢 感谢责任编委和两位匿名审稿专家的宝贵意见与建议, 这些意见极大提升了本文的质量. 本文图件采用GMT绘制, 所构建的三维速度结构模型已上传至Zenodo平台, 可通过链接(https://zenodo.org/records/15679160)下载获取.

参考文献

陈弘. 2022. 基于三维MT资料的四川长宁地震窗深部电性结构研究. 硕士学位论文. 武汉: 长江大学

戴坤, 郑勇, 郭汝梦, 徐建桥. 2023. 2019年长宁地震序列的震源性质: 来自流体的影响. 中国科学: 地球科学, 53: 1328–1341

公子龙, 李智武, 李金玺, 罗超, 童旭, 张毫生, 黄瑞广, 刘傲东. 2023. 川南长宁地区构造变形特征及演化过程. 成都理工大学学报(自然科学版), 50: 257–267

何登发, 鲁人齐, 黄涵宇, 王晓山, 姜华, 张伟康. 2019. 长宁页岩气开发区地震的构造地质背景. 石油勘探与开发, 46: 993–1006

雷兴林, 苏金蓉, 王志伟. 2020. 四川盆地南部持续增长的地震活动及其与工业注水活动的关联. 中国科学: 地球科学, 50: 1505–1532

缪思钰, 张海江, 古宁, 李俊伦, 谭玉阳, 华思博, 张勇. 2024. 基于地震和InSAR联合反演2018年M_L5.7兴文地震破裂过程. 地震地质, 46: 397

任勇, 钱斌, 张剑, 卓智川, 乔琳. 2015. 长宁地区龙马溪组页岩气工厂化压裂实践与认识. 石油钻采工艺, 37: 96–99

孙权, 裴顺平, 苏金蓉, 刘雁冰, 薛晓添, 李佳蔚, 李磊, 左洪. 2021. 2019年6月17日四川长宁M_S6.0地震震源区三维速度结构. 地球物理学报, 64: 36–53

易桂喜, 龙锋, 梁明剑, 赵敏, 王思维, 宫悦, 乔慧珍, 苏金蓉. 2019. 2019年6月17日四川长宁M_S6.0地震序列震源机制解与发震构造分析. 地球物理学报, 62: 3432–3447

张风雪, 吴庆举, 李永华, 张瑞青, 潘佳铁. 2010. FMM射线追踪方法在地震学正演和反演中的应用. 地球物理学进展, 25: 1197–1205

张风雪, 李昱, 陈汐平. 2025. 浅析震源位置准确度及其影响因素. 地球与行星物理论评, 56: 182–192

Anyiam U O, Zhang H, Tan Y, Qian J, Gao L, Liu Y, Zuo K, Zhao C. 2023. Enhanced 3D velocity structure, seismicity relocation and basement characterization of Changning shale gas and salt mining regions in southern Sichuan basin. Front Earth Sci, 10: 1082122

Anyiam U O, Qian J, Tan Y, Zhang H. 2024. Comprehensive seismic evidence for the inducing mechanism of extremely shallow 2019 Changning M_S6.0 earthquake by solution salt mining, Sichuan Basin, China. Geology, 52: 441–446

Brown M R M, Ge S. 2018. Distinguishing fluid flow path from pore pressure diffusion for induced seismicity. Bull Seismol Soc Am, 108: 3684–3686

Chen C, Holland A A. 2016. PhasePApy: A robust pure Python package for automatic identification of seismic phases. Seismol Res Lett, 87: 1384–1396

Chen J S, Wang C. 2009. Rising springs along the Silk Road. Geology, 37: 243–246

Chen J S, Li L, Wang J Y, Barry D A, Sheng X F, Gu W Z, Zhao X, Chen L. 2004. Groundwater maintains dune landscape. Nature, 432: 459–460

Chen S, Zhu Y, Qin Y, Wang H, Liu H, Fang J. 2014. Reservoir evaluation of the Lower Silurian Longmaxi Formation shale gas in

the southern Sichuan Basin of China. Mar Pet Geol, 57: 619–630
Chen Y, Zhang H, Miao Y, Zhang Y, Liu Q. 2017. Back azimuth constrained double-difference seismic location and tomography for downhole microseismic monitoring. Phys Earth Planet Inter, 264: 35–46
Chiarabba C, De Gori P, Cattaneo M, Spallarossa D, Segou M. 2018. Faults geometry and the role of fluids in the 2016–2017 Central Italy seismic sequence. Geophys Res Lett, 45: 6963–6971
Ellsworth W L. 2013. Injection-induced earthquakes. Science, 341: 1225942
Galloway E, Hauck T, Corlett H, Pană D, Schultz R. 2018. Faults and associated karst collapse suggest conduits for fluid flow that influence hydraulic fracturing-induced seismicity. Proc Natl Acad Sci USA, 115: E10003
Gomberg J S, Shedlock K M, Roecker S W. 1990. The effect of S-wave arrival times on the accuracy of hypocenter estimation. Bull Seismol Soc Am, 80: 1605–1628
Improta L, Bagh S, De Gori P, Valoroso L, Pastori M, Piccinini D, Chiarabba C, Anselmi M, Buttinelli M. 2017. Reservoir structure and wastewater-induced seismicity at the Val d'Agri Oilfield (Italy) shown by three-dimensional V_P and V_P/V_S local earthquake tomography. J Geophys Res-Solid Earth, 122: 9050–9082
Jia D, Wei G, Chen Z, Li B, Zeng Q, Yang G. 2006. Longmen Shan fold-thrust belt and its relation to the western Sichuan Basin in central China: New insights from hydrocarbon exploration. AAPG Bull, 90: 1425–1447
Jia K, Zhou S, Zhuang J, Jiang C, Guo Y, Gao Z, Gao S, Ogata Y, Song X. 2020. Nonstationary background seismicity rate and evolution of stress changes in the Changning salt mining and shale-gas hydraulic fracturing region, Sichuan Basin, China. Seismol Res Lett, 91: 2170–2181
Kuster G T, Toksöz M N. 1974. Velocity and attenuation of seismic waves in two-phase media: Part I. Theoretical formulations. Geophysics, 39: 587–606
Lei X, Huang D, Su J, Jiang G, Wang X, Wang H, Guo X, Fu H. 2017. Fault reactivation and earthquakes with magnitudes of up to M_W4.7 induced by shale-gas hydraulic fracturing in Sichuan Basin, China. Sci Rep, 7: 7971
Lei X L, Wang Z W, Su J R. 2019a. Possible link between long-term and short-term water injections and earthquakes in salt mine and shale gas site in Changning, south Sichuan Basin, China. Earth Planet Phys, 3: 510–525
Lei X, Wang Z, Su J. 2019b. The December 2018 M_L5.7 and January 2019 M_L5.3 Earthquakes in South Sichuan basin induced by shale gas hydraulic fracturing. Seismol Res Lett, 90: 1099–1110
Li J, Xu J, Zhang H, Yang W, Tan Y, Zhang F, Meng L, Zang Y, Miao S, Guo C, Li Z, Lu R, Sun J. 2023. High seismic velocity structures control moderate to strong induced earthquake behaviors by shale gas development. Commun Earth Environ, 4: 188
Liu J, Zahradník J. 2020. The 2019 M_W5.7 Changning earthquake, Sichuan Basin, China: A shallow doublet with different faulting styles. Geophys Res Lett, 47: e2019GL085408
Liu Q, Zhou M, Tian X, Qiu Y, Shen Z, Wang Q, Wang C. 2023. High-resolution Shear-wave velocity structure of the 2019 M_S6.0 Changning earthquake region and its implication for induced seismicity. Seismol Res Lett, 94: 1392–1404
Long F, Zhang Z W, Qi Y P, Liang M J, Ruan X, Wu W W, Jiang G M, Zhou L Q. 2020. Three dimensional velocity structure and accurate earthquake location in Changning-Gongxian area of southeast Sichuan. Earth Planet Phys, 4: 1–15
Meng L, McGarr A, Zhou L, Zang Y. 2019. An investigation of seismicity induced by hydraulic fracturing in the Sichuan Basin of China based on data from a temporary seismic network. Bull Seismol Soc Am, 109: 348–357
Paige C C, Saunders M A. 1982a. LSQR: An algorithm for sparse linear equations and sparse least squares. ACM Trans Math Softw, 8: 43–71
Paige C C, Saunders M A. 1982b. Algorithm 583: LSQR: Sparse linear equations and least squares problems. ACM Trans Math Softw, 8: 195–209
Schultz R, Skoumal R J, Brudzinski M R, Eaton D, Baptie B, Ellsworth W. 2020. Hydraulic fracturing-induced seismicity. Rev Geophys, 58: e695
Sethian J A. 1996. A fast marching level set method for monotonically advancing fronts. Proc Natl Acad Sci USA, 93: 1591–1595
Sethian J A, Popovici A M. 1999. 3-D traveltime computation using the fast marching method. Geophysics, 64: 516–523
Shearer P M. 1988. Cracked media, Poisson's ratio and the structure of the upper oceanic crust. Geophys J Int, 92: 357–362
Takei Y. 2002. Effect of pore geometry on V_P/V_S: From equilibrium geometry to crack. J Geophys Res, 107, doi: 10.1029/2001JB000522
Tan Y, Hu J, Zhang H, Chen Y, Qian J, Wang Q, Zha H, Tang P, Nie Z. 2020. Hydraulic fracturing induced seismicity in the southern Sichuan Basin due to fluid diffusion inferred from seismic and injection data analysis. Geophys Res Lett, 47: e2019GL084885
Tan Y, Qian J, Hu J, Zhang H, Xing H, Li J, Xu J, Yang W, Gu N, Miao S. 2023. Tomographic evidences for hydraulic fracturing induced seismicity in the Changning shale gas field, southern Sichuan Basin, China. Earth Planet Sci Lett, 605: 118021
Tian W, Wu Q, Dai K, Guo R, Yao Z, Qiang Z, Deng F. 2024. Seismological evidence for the existence of long-distance hydro-

logical channel and its implication for fluid overpressure in southern Sichuan, China. Geophys Res Lett, 51: e2023GL107167

Wang S, Jiang G, Weingarten M, Niu Y. 2020. InSAR evidence indicates a link between fluid injection for salt mining and the 2019 Changning (China) earthquake sequence. Geophys Res Lett, 47: e2020GL087603

Wang S, Jiang G, Lei X, Barbour A J, Tan X, Xu C, Xu X. 2022. Three M_W≥4.7 earthquakes within the Changning (China) shale gas field ruptured shallow faults intersecting with hydraulic fracturing wells. J Geophys Res-Solid Earth, 127: e2021JB022946

Wang Z, Fukao Y, Miyakawa A, Hasegawa A, Takei Y. 2019. Crustal extension and graben formation by fault slip-associated pore opening, Kyushu, Japan. J Geophys Res-Solid Earth, 124: 4879–4894

Wang Z, Wang J, Yang X. 2020. The role of fluids in the 2008 M_S8.0 Wenchuan Earthquake, China. J Geophys Res-Solid Earth, 126: e2020JB019959

Zhang B, Lei J, Zhang G. 2020. Seismic evidence for influences of deep fluids on the 2019 Changning M_S6.0 earthquake, Sichuan basin, SW China. J Asian Earth Sci, 200: 104492

Zhang F, Hu L, Li Y. 2023. TIMCPOT: Tcl/Tk interface for measuring crustal phase-onset time. Seismol Res Lett, 94: 2040–2049

Zhao Y, Zhang M, Duan Y, Lei X, Liu Q. 2023. Seismogenic structures and earthquake mechanisms in the Changning area, China: Insights from seismicity and tomography. Tectonophysics, 869: 230086

Zuo K, Zhao C, Zhang H. 2020. 3D crustal structure and seismicity characteristics of Changning-Xingwen area in the southwestern Sichuan basin, China. Bull Seismol Soc Am, 110: 2154–2167

(责任编委: 姚华建)