

计划类别： 省基础 research 计划（自然科学基金）

指南代码： GJ0404

项目受理号： SBK2019040647

江苏省科技计划项目申报书

(青年基金项目)

项目名称： 基于伴随状态法的线性台阵背景噪声和远震体波联合反演岩石圈精细结构研究及应用

项目类别： 无

承担单位： 河海大学

单位地址： 南京市鼓楼区西康路 1 号

项目负责人： 张超 电话： 15555462977

项目联系人： 张超 电话： 15555462977

主管部门： 河海大学

申报日期： 2019 年 02 月 26 日

江苏省科学技术厅

二〇一九年

填报说明

一、填写申报书前，请先查阅《江苏省基础 Research 计划》（自然科学基金）管理办法》及《关于组织申报 2019 年度省基础 Research 计划（自然科学基金）项目的通知》。申报书各项内容，要实事求是，逐条认真填写。表达要明确、严谨，字迹要清晰。外来语要同时用原文和中文表达。第一次出现的缩写词，须注出全称。

二、申报书用 A4 纸正反打印，纸质封面装订，禁用塑料封面，不得活页装订，一式两份，由所在单位审查签署意见后，报送江苏省科技计划项目受理服务中心。

三、电子申报书的内容必须与纸质申报书完全一样，否则视为无效申请。

江苏省科技计划（资金）项目 项目负责人科研诚信承诺书

本人在省科技计划（资金）项目申报、实施、验收等过程中，将严格遵守《江苏省科技计划项目相关责任主体信用管理办法》、江苏省科技计划项目管理辦法和专项资金管理办法等相关规定和要求，并作出如下承诺：

1. 如实填写项目申报材料、项目年度实施情况、总结报告、验收材料、科技报告、科学数据等，对上述材料的真实性、完整性、有效性和合法性负直接责任。

2. 恪守科研诚信，无抄袭或剽窃他人科研成果、捏造或篡改科研数据、侵犯他人知识产权、在职称简历和研究基础等方面提供虚假信息、违反科学伦理，以及其他科研不端行为；没有通过贿赂或变相贿赂、故意重复申报等不正当手段申报项目；督促项目组成员恪守科研诚信并履行相关承诺，保证项目组成员身份及业绩真实有效。

3. 按照项目合同约定组织、协调、推进项目实施，按期完成项目目标任务；依法依规使用项目经费，保证不发生套取、转移、挪用、贪污科研经费等行为。

4. 在项目实施中，因科研活动实际需要，项目负责人可以在项目总预算不变的情况下自主调整直接费用相关科目的经费支出，自主调整科研团队，在不降低研究目标的前提

下自主调整研究方案和技术路线，报项目承担单位办理调剂手续、备案。对于项目合同约定的主要研究目标或关键考核指标发生变化的，以及其他严重影响项目实施的重大事项，及时报项目承担单位审核，由承担单位报主管部门和省科技厅。

5. 加强项目组成员在项目实施过程中的科研诚信管理，若发现科研不端行为，及时报告并积极配合相关部门调查处理。

若发生上述失信行为，本人将积极配合调查，并按照规定接受警告、通报批评、取消项目评审资格、撤销项目立项、阶段性或永久取消省科技计划项目和科技奖励申报资格等处理并记入不良科研信用记录，情节严重的按相关规定报送至省公共信用信息平台、列入社会信用记录、实施失信联合惩戒等，依法依规予以处理。

项目负责人（签字）：

_____年____月____日

江苏省科技计划（资金）项目 项目承担单位科研诚信承诺书

本单位在省科技计划（资金）项目申报、实施、验收等过程中，将严格遵守《江苏省科技计划项目相关责任主体信用管理办法》、江苏省科技计划项目管理办法和专项资金管理办法等相关规定和要求，并作出如下承诺：

1. 严格审核把关项目申报材料、项目年度实施情况、总结报告、验收材料、科技报告、科学数据等，对上述材料的真实性、完整性、有效性和合法性负主体责任。

2. 履行科研诚信管理责任，按照规定建立规范科研行为、调查处理科研不端行为的相关制度，与本单位项目组成员签订科研诚信承诺书，督促其恪守科研诚信并履行相关承诺，保证本单位项目组成员身份及业绩真实有效，无编报虚假预算、篡改单位财务数据、侵犯他人知识产权等科研不端行为；没有通过贿赂或变相贿赂、故意重复申报等不正当手段申报项目，严肃查处发现的科研不端行为。

3. 严格执行项目管理规定，按照项目合同约定推进项目实施，落实相关项目保障条件，完善经费管理内控制度和监督制约机制，加强对经费使用的监督和管理，保证经费专款专用，对项目经费实行单独核算，保证不发生套取、转移、挪用科研经费等行为。

4. 如发生项目负责人变更、承担单位变更、合同约定的主要研究目标或关键考核指标需要调整，以及其他严重影响项目实施等重大事项的，及时报主管部门和省科技厅。

若发生上述失信行为，本单位将积极配合调查，并按照规定接受警告、通报批评、取消项目评审资格、撤销项目立项、终止项目执行、追回已拨资金、阶段性或永久取消省科技计划项目和科技奖励申报资格等处理并记入不良信用记录，情节严重的按相关规定报送至省公共信用信息平台、列入社会信用记录、实施失信联合惩戒等，依法依规予以处理。

单位法人（签字）：

（公 章）

_____年____月____日

江苏省科技计划（资金）项目 项目主管部门科研诚信承诺书

本单位在省科技计划（资金）项目申报、实施、验收等过程中，将严格遵守《江苏省科技计划项目相关责任主体信用管理办法》、江苏省科技计划项目管理办法和专项资金管理办法等相关规定和要求，并作出如下承诺：

1. 本单位已切实履行审核责任，项目申报单位提交的申报资料完整齐全、真实有效，项目申报书附件清单中所列证明材料的完整性与项目信息表、项目申报书中内容一致，该单位无不良信用记录，项目负责人和申报单位符合申报资格要求；审核推荐项目过程中，无违规推荐、审核不严等行为。

2. 切实履行主管部门管理职责，及时协调划拨省科技计划项目经费，监督项目实施和经费使用，督促项目承担单位及负责人按期实施和完成项目。

3. 协助或接受委托做好项目检查、评估、验收和绩效评价等，协调项目的实施推进，及时向省科技厅报送项目实施情况和需解决的问题等。

4. 加强对项目承担单位重大事项变更报告的审核，并及时报省科技厅。

5. 做好项目执行情况和经费使用统计工作，积极配合省科技厅对项目承担单位及项目负责人进行信用评价。

若发生上述失信行为，本单位将积极配合调查，追究相关人员责任，并按照规定承担相关责任。

单位负责人（签字）：

（公 章）

_____年____月____日

备注：自主推荐申报的部省属本科院校，既要在项目承担单位科研诚信承诺书上签字盖章，也要在项目主管部门科研诚信承诺书上签字盖章。

审核推荐表

<p>承担单位</p>	<p>(请出具具体审核推荐意见)</p> <p>法人代表(签章)</p> <p>(公章)</p> <p>年 月 日</p>
<p>合作单位</p>	<p>(请出具具体审核推荐意见)</p> <p>法人代表(签章)</p> <p>(公章)</p> <p>年 月 日</p>
<p>主管部门 (市、县、国家或省高新区 科技局、省有关厅局)</p>	<p>(请出具具体审核推荐意见)</p> <p>(公章)</p> <p>年 月 日</p>

备注：1、审核推荐表及承诺书的签章、公章及日期须完整齐全，请认真核对。

2、自主推荐申报的部省属本科院校，既要在承担单位栏目签字盖章，也要在主管部门栏目签字盖章。

一、立项依据和研究内容（4000-8000 字）

1、项目的立项依据

（研究意义、国内外研究现状及发展动态分析，需结合科学研究发展趋势来论述科学意义；或结合国民经济和社会发展中迫切需要解决的关键科技问题来论述其应用前景。附主要参考文献目录）

岩石圈作为地球最表面的圈层，是自然灾害（如地震、火山、海啸等）孕育、发生的主要场所，是人类获取各类矿产资源（如石油、天然气、煤等）的重要场所，也是地球科学研究中的焦点内容（陈凌等，2007）。因此获得精细的岩石圈结构对深入认识其内部动力学机制，地质演化过程及成矿作用至关重要。地震层析成像技术（Seismic Tomography）是探究地壳和地幔结构最有效手段之一，半个世纪以来，科研人员发展了一系列成像方法来研究岩石圈的结构和性质，对其内部的物质组成和构造有了一定的认识，但仍期望获取更精细的岩石圈结构和动力学信息（童平，2012）。得益于计算机水平及数值正演算法的发展与进步，基于伴随状态法（Adjoint-state Method）的地震层析成像成为了新一代高分辨率成像方法，并在最近二十年得到快速发展（Chen et al., 2017）。而实际应用中，3-D 伴随层析成像需要庞大的计算和存储资源，使得这项技术的应用受到限制。相对而言，2-D 反演在计算效率上更具优势。同时，近年来国内外布设了大量的密集线性地震台阵，如中国华北克拉通地区高密度的固定台和流动台阵（朱日祥等，2012；王坤等，2018），日本岛的 Hi-net 地震台网（Liu & Zhao, 2018）以及美国南加州 SCEDC 地震台网（Wang et al., 2018）等。利用线性台阵记录的不同类型波形数据间的互补性，基于伴随状态法理论发展高效率且高分辨率的联合反演方法，获得台阵下方岩石圈精细结构，这是本研究的根本目的。

地震层析成像可追溯到本世纪七十年代中期，由 Aki 和 Lee（1976）率先提出并应到区域尺度的结构成像。受到计算条件的限制，初期的地震层析成像研究大多建立在射线理论基础上：即假设地震波是无限高频的，称为走时层析成像方法（Traveltime Tomography）。由于未考虑地震波的有限频特征，走时层析成像对精细速度结构的分辨能力受到很大程度上的限制，也决定了成像分辨率的上限（Liu & Gu, 2012）。为了提高射线理论走时层析成像的分辨率，Dahlen 等（2000）提出了有限频层析成像方法（Finite-frequency Tomography）。这种方法充分考虑了地震波传播过程中的有限频率特征，相对于走时层析成像，其分辨率得到了极大的提升（Hung et al., 2004）。然而，尽管有限频理论能提高成像分辨

率, 但实际结果表明, 增加地震波射线覆盖密度是提高成像分辨率更为直接有效的方式 (黄雪源, 2016)。

随着计算机运算和存储能力的提升, 使用谱元法 (Spectral Element Method, 简写为SEM) 等正演工具通过求解声波 (或弹性波) 方程来模拟实际地球模型中地震波的传播过程已经变成了现实 (Komatitsch et al., 2004)。相比于求解射线方程, 数值求解全波方程来模拟地震波的传播可以提供更加完整、准确的地震数据, 有利于地震层析成像方法获得更高分辨率的地球内部结构 (童平, 2012)。因此, 基于全波方程数值模拟的波形层析成像得到发展, 被认为是最有潜力的新一代成像方法 (Liu & Gu, 2012)。目前通常有两种实现形式: 一种是散射积分法 (Scattering-integral Method), 通过计算和存储每个数据泛函的 Fréchet 导数来求解反演问题 (Zhao et al., 2005; Chen et al., 2007); 另一种是伴随状态法, 通过从接收点处反传波场的形式对地下结构成像 (Tarantola, 1984), 称为伴随层析成像 (Adjoint Tomography)。其中基于波形走时的伴随层析成像方法 (Tromp et al., 2005) 在天然地震结构成像中应用最为广泛。它介于走时层析成像和全波形反演之间, 既克服了射线理论的高频近似假设, 又降低了全波形反演过程中非线性化程度。这种方法在区域结构和全球结构成像中得到成功应用 (Tape et al., 2009; Chen et al., 2017; Zhu et al., 2017; Bozdağ et al., 2016; Fichtner et al., 2018; Tao et al., 2018)。

除了天然地震数据, 伴随状态法也应用到背景噪声数据。Chen 等 (2014) 首次提出背景噪声伴随层析成像方法, 通过迭代方式极小化模拟格林函数 (SGFs) 与经验格林函数 (EGFs) 之间的频率相关走时残差, 从而直接反演地下3-D横波速度结构。该方法应用到青藏高原南部与四川盆地边缘地区, 获得了深度上10-40公里的地壳及上地幔横波速度结构, 反映出该地区存在低速异常的3-D空间布局。Liu 等 (2017) 通过同样的方法构建了中国东北地区的地壳及上地幔高分辨率的3-D横波速度结构。Zhu (2018) 和 Wang 等 (2018) 先后将背景噪声伴随层析成像应用到美国北德克萨斯和俄克拉荷马州以及南加州区域地壳结构成像。同时, 散射积分法也发展了背景噪声波形层析成像方法, 并应用到 Cascades 和美国东北边缘地区 (Gao & Shen, 2014; Gao, 2018; Yang et al., 2018)。

在获得高精度3-D速度结构的同时, 不能忽略的是3-D伴随层析成像方法庞大的计算消耗和用时 (Bozdağ et al., 2016)。相对而言, 2-D成像方法对计算资源需求更低, 并且便于程序的测试和维护。在过去的二三十年内, 2-D全波形反演

方法在工业界的发展较为成熟 (Virieux & Operto, 2009; Wu et al., 2014), 但在天然地震学中的应用还处于探索阶段。随着全球数字地震台网的不断建设, 越来越多的密集线性台阵完成布设, 尤其是在中国华北克拉通地区 (朱日祥等, 2011; 房立华等, 2013; Lei et al., 2012; Zheng et al., 2017)。图1展示了该区域内的4条线性台阵。基于线性台阵波形数据的伴随层析成像方法随之也开始得到发展。Tong 等 (2014) 发展了2-D频率波数域-谱元 (FK-SEM) 混合方法模拟高频的远震体波并开展了伴随层析成像研究, 该方法在区域场外使用FK算子计算1-D介质的平面波响应, 在区域场内再使用谱元法模拟远震体波在2-D复杂介质中的传播, 因此在保持高效计算效率的同时还能精确地捕捉到线性台站下方非均匀结构体对远震体波的影响。Zhang 等 (2018) 提出了基于线性台阵背景噪声伴随层析成像方法, 并成功应用到中国地震局地球物理所在华北地区布设的一条线性台阵实际成像工作 (图1中Line-1测线, 包含49个地震台)。和传统的背景噪声成像结果相比, 该方法获得的模型分辨率得到明显提升, 同时只消耗196个CPU核线程, 显示出计算的高效性。

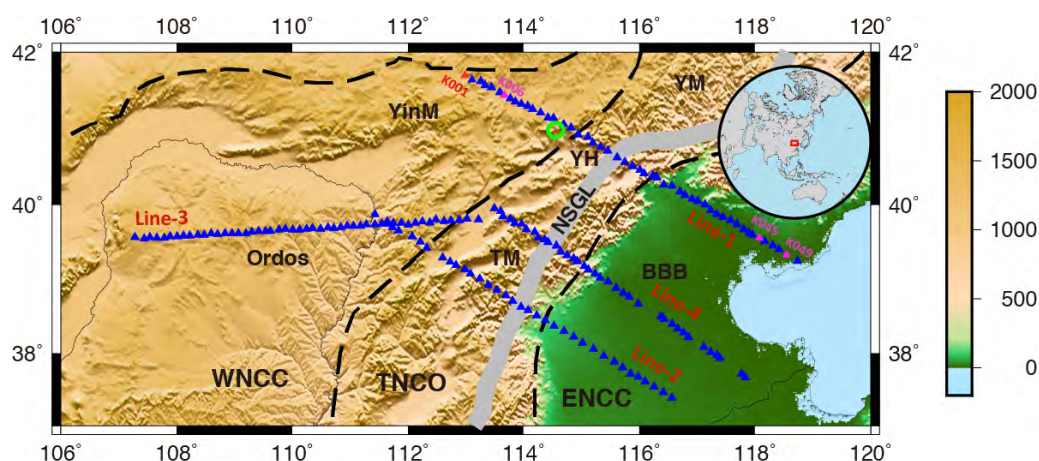


图1 华北地区的4条密集线性台阵分布图, 其中 Line-1 和 Line-2 属于华北科学地震台阵, Line-3 和 Line-4 属于华北地区地球内部结构探测计划。ENCC: 华北克拉通东部; TNCO: 中部造山带; ENCC: 华北克拉通西部; YinM: 阴山; YanM: 燕山; TM: 太行山; YH: 延庆-怀来盆地; BBB: 渤海湾盆地; Ordos: 鄂尔多斯盆地。

然而, 由于数据的频率成分以及对速度结构敏感性的差异, 仅仅利用背景噪声或者远震体波单一数据开展伴随层析成像存在明显的不足 (刘成林等, 2018), 具体表现为: 背景噪声数据提取出的主要信号为面波, 频率成分较低, 只能获得平滑的横波速度结构, 无法有效的约束速度间断面形态。远震体波频率较高, 能

恢复更多精细的结构，同时对速度间断面形态能起很好的约束，但远震体波伴随层析成像对初始模型高度依赖，反演存在强烈的非唯一性 (Liu et al., 2017)。联合两种数据能够优势互补、有效弥补单一数据反演出现的问题，提高成像结果的可靠性，是获得岩石圈精细结构的有效方法。其中，基于射线理论的面波和体波联合反演方法已发展二十余年，并得到广泛应用 (Fang et al., 2016; Golos et al., 2018; Guo et al., 2018)。基于类似的思想，面波频散和体波接收函数联合反演方法也得到了发展 (Julia et al., 2000; 刘启元等, 2010; Li et al., 2017)，并应用于中国大陆岩石圈 (Chen & Niu, 2016) 及区域尺度的3-D横波速度结构的构建 (Bao et al., 2015; Li et al., 2017; 郑晨等, 2018)。但这种方法大多基于单点下方的1-D模型假设，其分辨率会受到一定的限制；另外最终的3-D模型通常由单点反演获得的1-D模型通过插值产生，准确性有待提高。如前文所述，伴随层析成像方法可以直接映射地下介质的速度结构，能克服以上缺陷，提高成像的分辨率。因此，发展基于伴随状态法的背景噪声和远震体波联合反演方法很有必要。首先，两类数据能够照明地下不同深度的区域，具有高度互补性：背景噪声对浅层横波速度敏感性较高，可以约束岩石圈中上地壳波速结构；远震体波从岩石圈底部近垂直入射，可以约束下地壳及上地幔波速结构。其次，面波频率较低，能提供较平滑的背景速度，降低伴随层析成像对初始模型的高度依赖；而远震体波的频率成分较高，能恢复精细的结构，提高成像的分辨率，同时对速度间断面也起很好的约束。值得注意的是，尚无工作利用这两种数据的互补性，在伴随层析成像框架下，开展线性台阵背景噪声和远震体波联合反演方法的研究。这是本研究期待解决的最本质的问题和难题。

另外，要实现以上联合伴随层析成像方法的应用，需解决以下难题：首先，需要校正 3-D 实际观测数据因采用 2-D 反演造成的误差，包括：(1) 实际应用中某些远震事件或台站可能出现偏离线性台阵的情况，这种几何上的偏离会产生对应的波形相位偏差，最终代入到反演中，影响成像质量。(2) 台站记录到的实际数据通常认为在 3-D 空间中由点源激发产生，而计算理论数据时使用的是 2-D 正演算法，由线源激发产生 (图 2)。点源和线源激发将造成地震波形振幅和相位的差异 (Forbriger et al., 2014)。其次，如何利用两种数据的互补性选择合适的反演策略，降低反演的非线性化程度，对成像结果加以有力的约束，需要进行更深入的研究。

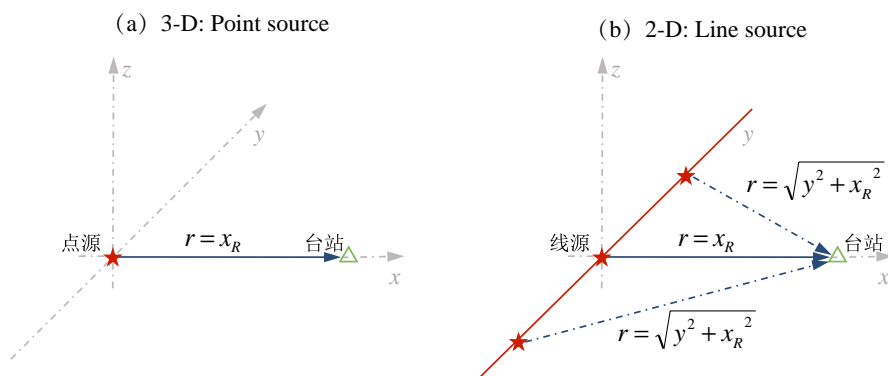


图2 点源和线源激发示意图 (a) 3-D 空间点源激发，波场传播过程中按球面扩散；(b) 2-D 空间线源激发：可认为是沿垂直 2-D 剖面方向无限连续点源的叠加效应，波场传播过程中按柱状扩散。

针对以上科学问题，本项目拟发展基于伴随状态法的线性台阵背景噪声和远震体波联合反演方法，利用两类数据的互补性，高效、精准地约束台阵下方不同深度的横波速度结构及Moho面形态。并以华北克拉通地区为例，开展实际数据联合伴随层析成像获得岩石圈精细结构。首先分别推导背景噪声和远震体波对速度及界面敏感核，构建联合反演目标函数。发展波形互相关相位校正技术，校正部分偏离线性台阵的远震事件或台站造成的相位偏差。发展3-D/2-D数据转换方法，校正因点源和线源激发造成的波形振幅和相位差异。根据两类数据的特点，提出“两步法”反演策略，降低反演的非唯一性。最后利用华北克拉通地区的线性台阵实际数据进行成像。本研究有望提供一种更为高效精准的线性台阵成像方法，搭建联合伴随层析成像理论框架，提升岩石圈成像分辨率，并为后续其它类型波形数据的引入提供思路和方法。同时，获得华北克拉通岩石圈精细结构，为更深入认识该区域地质构造和演化过程提供精准模型。

附主要参考文献：

- 陈凌, 朱日祥, 王涛, 2007, 大陆岩石圈研究进展, 地学前缘, 14(2), 58-75.
- 房立华, 吴建平, 王未来等, 2013, 华北地区勒夫波噪声层析成像研究, 地球物理学报, 56(7), 2268-2279.
- 黄雪源, 2016, 基于波动方程的地震层析成像应用研究, 博士学位论文, 清华大学.
- 刘成林, 陈浩朋, 谢军, 2018, 面波频散与体波接收函数联合反演研究回顾及展望, 地球物理学进展, 33(2), 0479-0488.
- 刘启元, 李昱, 陈九辉等, 2010, 基于贝叶斯理论的接收函数与环境噪声联合反演, 地球物理学报, 53(11), 2603-2612.

- 童平, 2012, 地震层析成像方法及其应用研究, 博士学位论文, 清华大学.
- 王坤, 赵亮, 徐小兵等, 2018, 华北克拉通非均匀破坏的动力学原因: 来自地震学和地球动力学的约束, 中国科学:地球科学, 48, 536-548.
- 徐小兵, 赵亮, 王坤等, 2018, 华北克拉通地区有限频体波层析成像——克拉通破坏的空间非均匀性, 中国科学:地球科学, 48, 1223-1247.
- 张超, 2018, 基于线性台阵背景噪声与体波波形伴随成像方法研究及应用, 博士学位论文, 中国科学技术大学.
- 郑晨, 丁志峰, 宋晓东, 2018, 面波频散与接收函数联合反演南北地震带北段壳幔速度结构, 地球物理学报, 61(4), 1211-1224.
- 朱日祥, 陈凌, 吴福元等, 2011, 华北克拉通破坏的时间、范围与机制, 中国科学:地球科学, 41, 583 ~ 592.
- 朱日祥, 徐义刚, 朱光等, 2012, 华北克拉通破坏, 中国科学:地球科学, 42, 1135-1159.
- Aki, K., & Lee, W., 1976, Determination of three-dimensional velocity anomalies under a seismic array using first P arrival times from local earthquakes: 1. A homogeneous initial model, *Journal of Geophysical research*, 81(23), 4381-4399.
- Bao, X., Sun, X., Xu, M., et al., 2015, Two crustal low-velocity channels beneath SE Tibet revealed by joint inversion of Rayleigh wave dispersion and receiver functions, *Earth and Planetary Science Letters*, 415, 16-24.
- Bozdağ, E., Peter, D., Lefebvre, M., et al., 2016, Global adjoint tomography: first-generation model, *Geophysical Journal International*, 207, 1739-1766.
- Brocher, T. M., 2005, Empirical relations between elastic wave speeds and density in the Earth's crust, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 95, 2081-2092.
- Chen, M., Niu, F., Tromp, J., et al., 2017, Lithospheric foundering and underthrusting imaged beneath Tibet, *Nature communications*, 8, 15659.
- Chen, P., Zhao, L., Jordan, T., 2007, Full 3D tomography for the crustal structure of the Los Angeles region, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 97(4), 1094-1120.
- Chen, Y., & Niu, F., 2016, Joint inversion of receiver functions and surface waves with enhanced preconditioning on densely distributed CNDN stations: Crustal and upper mantle structure beneath China, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(2), 743-766.
- Dahlen, F. A., Hung, S. H., Nolet, G., 2000, Fréchet kernels for finite-frequency traveltimes-I.Theory, *Geophysical Journal International*, 141(1), 157-174.
- Fang, H., Zhang, H., Yao, H., et al., 2016, A new algorithm for three-dimensional joint inversion of body wave and surface wave data and its application to the Southern California plate boundary region, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(5), 3557-3569.
- Fichtner, A., van Herwaarden, D., Villaseñor, A., et al., 2018, The Collaborative Seismic Earth Model: Generation 1, *Geophysical Research Letters*, 45(9), 4007-4016.
- Forbriger, T., Groos, L., Schäfer, M., 2014, Line-source simulation for shallow-seismic data-Part 1: Theoretical background, *Geophysical Journal International*, 198, 1387-1404.
- Gao, H., & Shen, Y., 2014, Upper mantle structure of the Cascades from full-wave ambient noise tomography: Evidence for 3D mantle upwelling in the back-arc, *Earth and Planetary Science Letters*, 390, 222-233.
- Gao H., 2018, Three-dimensional variations of the slab geometry correlate with earthquake distributions at the Cascadia subduction system, *Nature Communications*, 9(1), 1204.
- Golos, E., Fang, H., Yao, H., et al., 2018, Shear-wave tomography beneath the United States using a joint inversion of surface and body waves, *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*,

123 (6), 5169-5189.

- Guo, Z., Wang, K., Yang, Y., et al., 2018, The origin and mantle dynamics of quaternary intraplate volcanism in Northeast China from joint inversion of surface wave and body wave, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123.
- Hung, S. H., Shen, Y., Chiao, L. Y., 2004, Imaging seismic velocity structure beneath the Iceland hot spot: A finite frequency approach, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 109(B8), 08305.
- Julià, J., Ammon, C., Herrmann R., et al., 2000, Joint inversion of receiver function and surface wave dispersion observations, *Geophysical Journal International*, 143(1), 99-112.
- Komatitsch, D., Liu, Q., Tromp, J., et al., 2004, Simulations of ground motion in the Los Angeles Basin based upon the Spectral-Element Method, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 94, 187-206.
- Lei, J., 2012, Upper-mantle tomography and dynamics beneath the North China Craton, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 117, B06313.
- Li, J., Song, X., Zhu, L., et al., 2017, Joint inversion of surface wave dispersions and receiver functions with P velocity constraints: Application to Southeastern Tibet, *Journal Geophysical Research: Solid Earth*, 122, 7291-7310.
- Li, Y., Wang, X., Zhang, R., et al., 2017, Crustal structure across the NE Tibetan Plateau and Ordos Block from the joint inversion of receiver functions and Rayleigh-wave dispersions, *Tectonophysics*, 705, 33-41.
- Liu, Q., & Gu, Y., 2012, Seismic imaging: From classical to adjoint tomography, *Tectonophysics*, 556-567, 31-66.
- Liu, S., Yang, D., Dong, X., et al., 2017, Element-by-element parallel spectral-element methods for 3-D teleseismic wave modeling, *Solid Earth*, 8, 969-986.
- Liu, Y., Niu, F., Chen, M., et al., 2017, 3-D crustal and uppermost mantle structure beneath NE China revealed by ambient noise adjoint tomography, *Earth and Planetary Science Letters*, 461, 20-29.
- Tao, K., Grand, S., Niu, F., 2018, Seismic Structure of the Upper Mantle Beneath Eastern Asia From Full Waveform Seismic Tomography, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 19, 2732-2763.
- Tape, C., Liu, Q., Maggi, A., et al., 2009, Adjoint tomography of the southern California crust, *Science*, 325, 988-992.
- Tarantola, A., & Valette, B., 1982, Generalized nonlinear inverse problems solved using the least squares criterion, *Rev. Geophys. Space Phys*, 20(2), 219-232.
- Tong, P., Chen, C. W., Komatitsch, D., et al., 2014, High-resolution seismic array imaging based on an SEM-FK hybrid method, *Geophysical Journal International*, 197, 369-395.
- Tromp, J., Tape, C., Liu, Q., 2005, Seismic tomography, adjoint methods, time reversal and banana-doughnut kernels, *Geophysical Journal International*, 160(1), 195-216.
- Virieux, J., & Operto, S., 2009, An overview of full-waveform inversion in exploration geophysics, *Geophysics*, 74(6), WCC1-WCC26.
- Wang, K., Yang, Y., Basini, P., et al., 2018, Refined crustal and uppermost mantle structure of southern California by ambient noise adjoint tomography, *Geophysical Journal International*, 215, 844-863.
- Wu, R., Luo, J., Wu, B., 2014, Seismic envelope inversion and modulation signal model, *Geophysics*, 79(3), WA13-WA24.
- Yang, X., & Gao, H., 2018, Full-wave seismic tomography in the northeastern United States: New insights into the uplift mechanism of the Adirondack Mountains, *Geophysical Research Letters*, 45.

- Yuan, X., Ni, J., Kind, R., et al., 1997, Lithospheric and upper mantle structure of southern Tibet from a seismological passive source experiment, *Journal of Geophysical Research*, 102(B12), 27,491-27,500.
- Zhang, C., Yao, H., Liu, Q., et al., 2018, Linear Array Ambient Noise Adjoint Tomography Reveals Intense Crust Mantle Interactions in North China Craton, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(1), 368-383.
- Zhao, L., Jordan, T., Olsen, K., et al., 2005, Fréchet kernels for imaging regional earth structure based on three-dimensional reference models, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 95(6), 2066-2080.
- Zheng, T. Y., Duan, Y., Xu, W., et al., 2017, A seismic model for crustal structure in North China Craton, *Earth Planet. Phys.*, 1, 26–34.
- Zhu, H., 2018, Crustal wave speed structure of North Texas and Oklahoma based on ambient noise cross-correlation functions and adjoint tomography, *Geophysical Journal International*, 214, 716-730.
- Zhu, H., Komatitsch, D., Tromp, J., 2017, Radial anisotropy of the North American upper mantle based on adjoint tomography with USArray, *Geophysical Journal International*, 211, 349-377.

2、项目的研究内容、研究目标和拟解决的关键科学问题

（此部分为重点阐述内容）

2.1 研究内容

本项目在已有的研究和认识基础上，拟从以下四个方面内容开展研究：

（1）发展基于线性台阵背景噪声和远震体波联合伴随层析成像方法

基于伴随状态法理论，开展高效并精确的线性台阵波形数据的成像方法研究。在此理论下，充分的利用背景噪声和远震体波两种数据的互补性：首先背景噪声对浅层地壳速度敏感性较高，可以约束中上地壳的横波速度结构；远震体波从上地幔底部近垂直入射到岩石圈，可以约束下地壳及上地幔横波速度结构。其次面波成分频率较低，能提供较平滑的背景速度，减小波形反演中的非线性化程度；而远震体波的频率成分较高，能恢复更多精细的结构，同时对速度间断面能起很好的约束。本项目拟将两种数据进行有机的结合，发展背景噪声和远震体波联合伴随层析成像方法共同约束线性台阵下方不同尺度和深度的岩石圈波速结构及速度间断面信息。

（2）校正因远震事件或台站偏离线性台阵造成的波形相位偏差

实际观测的地震波在 3-D 介质中进行传播，通常认为由点源激发产生，而本项目采用 2-D 正演算子模拟获得的理论波形，可以认为由线源激发产生。点源激发的波场传播过程中按球面扩散，而线源激发的波场传播过程中按柱状扩散，导致实际波形和理论波形在相位和振幅上存在差异。本项目拟发展 3-D/2-D 数据转换方法，在反演之前对观测数据进行相位和振幅修正。

（3）校正因点源和线源激发造成的波形振幅和相位差异

本项目涉及的正反演理论均建立在线性台阵（2-D）基础上，远震事件偏离线性台阵会造成转换波（如 P_s 波）路径偏离线性台阵所在剖面，导致台阵接收到该事件激发产生的远震体波 P_s 震相包含了因几何偏离造成的相位偏差。同样的，如果台站偏离线性台阵，使用该台站作为虚拟源和其它台站互相关获得的经验格林函数（EGFs）中也引入了相位偏差，最终代入到反演中，影响成像质量。本项目拟发展精准的相位校正技术，在反演之前准确计算因几何偏离引起的波形相位偏差，并对实际观测数据进行修正。

（4）确定优化反演策略，进行实际数据联合伴随层析成像

伴随层析成像强烈的非线性导致其对初始模型具有较高的依赖度。在初始模型不够接近真实模型的情况下，模型在反演过程中可能会沿着错误的梯度方向进行更新，最终陷入局部极小值。本项目拟根据两种数据各自的特点以及对速度结构的敏感性差异，开展分步反演策略研究。最后利用华北地区线性台阵实际数据进行联合伴随层析成像，在验证反演方法的有效性和模型分辨率的同时，获得台阵下方高精度岩石圈结构以及地震学认识。

2.2 研究目标

发展一套具有高效计算能力并基于线性台阵背景噪声和远震体波联合伴随层析成像方法，搭建伴随状态法理论下的联合反演框架。并将方法应用于华北地区密集线性台阵，利用背景噪声和远震体波数据的高度互补性，约束台阵下方不同深度的横波速度结构以及Moho面形态，获得华北克拉通岩石圈精细结构。

2.3 拟解决的关键科学问题

（1）背景噪声和远震体波联合伴随层析成像方法的理论推导，以及利用数据的互补性降低反演的非唯一性研究。

（2）线性台阵几何偏离波形相位校正技术和3-D/2-D数据转换方法的实现，保证2-D参数化假设下反演模型的可靠性。

3、拟采取的研究方案及可行性分析

（包括研究方法、技术路线、实验手段、关键技术等说明）

3.1 拟采用的研究方案

(1) 基于伴随状态法理论、Born 近似和格林函数，分别推导背景噪声和远震体波的敏感核，搭建联合伴随层析成像反演框架

① 背景噪声伴随层析成像

面波深度敏感核随周期变化，背景噪声伴随层析成像的目标函数 χ_s ，可以表示为多个周期频段面波数据的加权总和 (Zhang et al., 2018)，如下所示：

$$\chi_s(m) = \frac{1}{2N_c} \sum_{i=1}^{N_c} \frac{1}{M_i} \sum_{j=1}^{M_i} \int \left(\frac{\Delta T_j(\omega)}{\sigma_j(\omega)} \right)^2 d\omega$$

其中 N_c 表示面波周期频段个数， M_i 表示某个周期频段下波形走时残差测量总数， $\Delta T_j(\omega)$ 表示测量的走时残差， $\sigma_j(\omega)$ 表示测量误差。在伴随状态法中，目标函数的扰动量和纵波波速扰动量 $\delta \ln \alpha$ 、横波波速扰动量 $\delta \ln \beta$ 以及密度扰动量 $\delta \ln \rho$ 线性相关，表达式如下：

$$\delta \chi = \int (K_\rho \delta \ln \rho + K_\alpha \delta \ln \alpha + K_\beta \delta \ln \beta) d^2 x$$

其中 K_ρ 、 K_α 和 K_β 分别表示密度、纵波和横波速度的敏感核。面波对横波速度最为敏感，但短周期数据对浅部的纵波速度与密度也有一定的敏感性。本研究拟采用 Brochers (2005) 提出的经验关系式获得密度和纵波速度，可以推导出：

$$\delta \ln \alpha = \beta / \alpha \sum_n n \chi_n^{[\alpha]} \beta^{n-1} \delta \ln \beta = R_\alpha \delta \ln \beta$$

$$\delta \ln \rho = \alpha / \rho \sum_n n \chi_n^{[\rho]} \alpha^{n-1} \delta \ln \alpha = R_\rho \delta \ln \beta$$

$\chi_n^{[\alpha]}$ 和 $\chi_n^{[\rho]}$ 表示拟合多项式的系数，通过以上关系式可以得到：

$$\delta \chi_s = \int [(K_\rho^S R_\rho + K_\alpha^S R_\alpha + K_\beta^S) \delta \ln \beta] d^2 x$$

K_ρ^S 、 K_α^S 和 K_β^S 分别表示面波对密度、纵波速度和横波速度的 Fréchet 导数。可以看出最终构建的联合敏感核，既包含了横波速度的敏感核，同时也充分考虑了面波频散数据对纵波速度和密度的敏感性。

② 远震体波伴随层析成像

远震体波不具备面波的频散特性，对应的伴随层析成像目标函数不再考虑多个周期频段的加权总和，只考虑单个频率下的数据 (Tong et al., 2014)。远震体

波伴随层析成像的目标函数 χ_B 表达式如下：

$$\chi_B(m) = \frac{1}{2M_i} \sum_{j=1}^{M_i} \int \|w_i(t)[u(x_r^j, t; m) - d(x_r^j, t)]\|^2 dt$$

其中 M_i 表示该频率下的测量总数， $w_i(t)$ 表示波形走时差的测量窗口， u 和 d 分别表示模拟和观测远震体波。除了对密度、纵波速度和横波速度敏感外，远震体波还对速度间断面有很好的约束性，因此目标函数的扰动可以表示为：

$$\begin{aligned} \delta\chi = \int_S (K_\rho^B \delta \ln \rho + K_\alpha^B \delta \ln \alpha + K_\beta^B \delta \ln \beta) d^2x \\ + \int_\Gamma K_d^B \delta \ln d dx \end{aligned}$$

K_ρ^B ， K_α^B 和 K_β^B 分别表示远震体波对密度，纵波速度和横波速度的 Fréchet 导数， K_d^B 表示远震体波对速度间断面深度的 Fréchet 导数。

③ 背景噪声和远震体波联合伴随层析成像

根据以上推导可以看出，背景噪声和远震体波的目标函数与敏感核表达式保持了很好的相关性。因此在伴随状态法理论下，可以搭建联合反演框架。同时注意到，两者构建敏感核函数所使用的正演算子不同，其中面波基于谱元法，远震体波基于 FK-SEM 混合算法。本项目拟按图 3 所示的成像框架开展研究：首先通过伴随状态法分别产生两种数据的敏感核，然后进行加权建立联合的敏感核函数，最后通过 L-BFGS 等优化反演算法对速度结构及 Moho 界面进行迭代更新。基于以上思路，联合伴随层析成像的目标函数可以表示为：

$$\chi(m) = \omega_S \chi_S(m) + \omega_B \chi_B(m)$$

其中 $\chi_S(m)$ 和 $\chi_B(m)$ 分别对应背景噪声和远震体波伴随层析成像目标函数。相应的联合横波速度敏感核及 Moho 面深度敏感核表达如下：

$$g(\ln \beta) = \left. \frac{\partial \phi}{\partial \ln \beta} \right|_m = [\omega_S (K_\rho^S R_\rho + K_\alpha^S R_\alpha + K_\beta^S) + \omega_B K_\beta^B] \Big|_m$$

$$g(\ln d) = \left. \frac{\partial \phi}{\partial \ln d} \right|_m = K_d^B \Big|_m$$

ω_S 和 ω_B 为数据的权重系数 ($\omega_S + \omega_B = 1$)，用于调节背景噪声和远震体波的贡献占比。本项目拟通过贝叶斯反演理论来确定 ω_S 和 ω_B ，可以量化不同数据集的权重，从而避免人为的选择（刘启元等, 2010）。

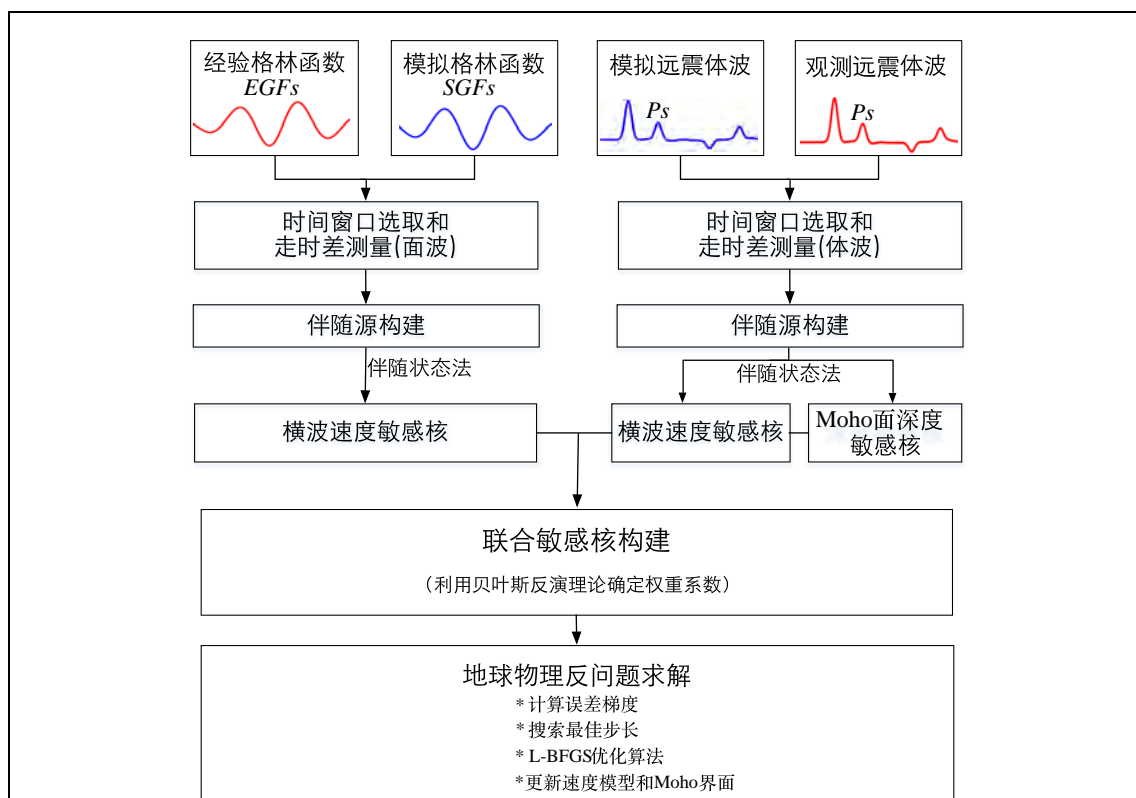


图3 背景噪声和远震体波联合伴随层析成像框架图

(2) 发展波形互相关相位校正技术, 对偏离线性台阵的远震事件和台站造成的相位误差进行校正

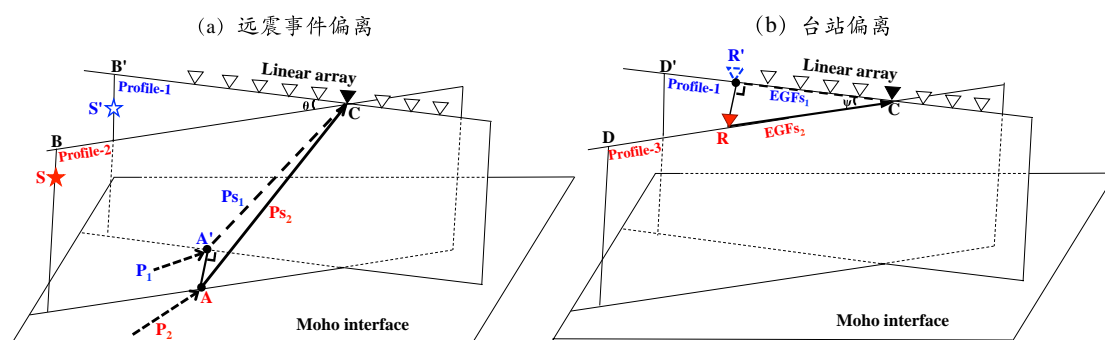


图4 远震事件或台站偏离线性台阵示意图

如图4(a)所示, 存在一远震事件 S 以角度 θ 偏离线性台阵所在剖面 profile-1。它在 Moho 面上产生的 P_s 转换波, 被地表 C 处的台站接收 (事件 S 和台站 C 所在剖面标记为 profile-2), A 点为转换点。可以看出由于远震事件偏离了线性台阵, 转换点不再位于 profile-1 内。假设地下结构为 2.5-D 模型, 可以将转换点 A 垂直投影到 profile-1 剖面, 新的转换点为 A' 。 AC 和 $A'C$ 分别表示实际观测和模拟的 P_s 转换波传播路径 (标记为 Ps_1 和 Ps_2)。由于路径差异造成的 P_s 波相位偏

差，定义为： $\Delta T_{Ps} = T(Ps_2) - T(Ps_1)$ 。

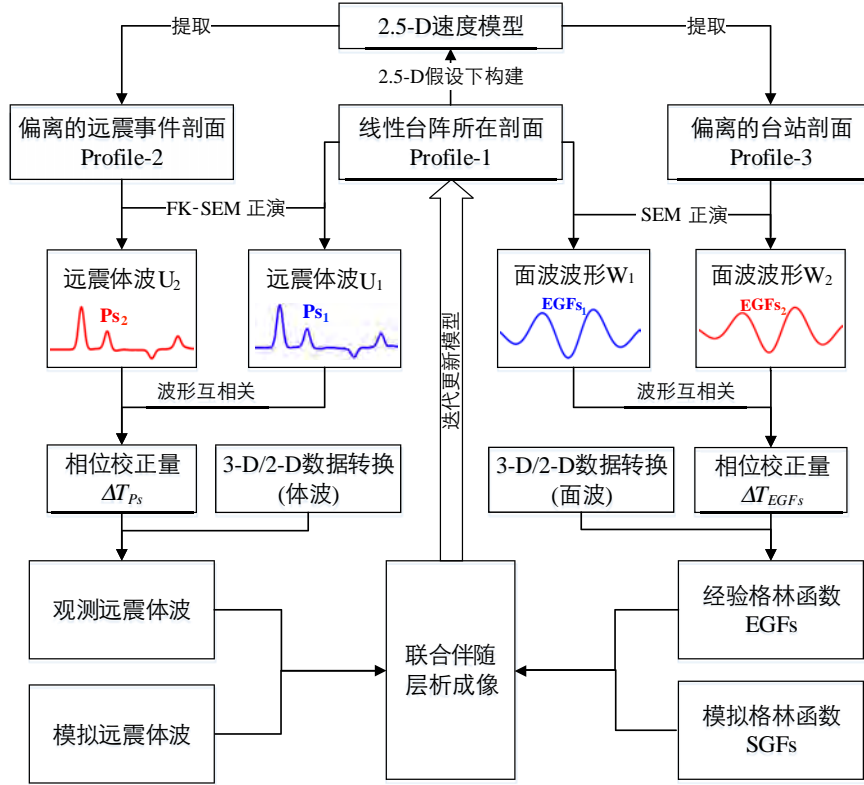


图 5 波形互相关相位校正流程图

本研究拟通过波形互相关技术准确求取 ΔT_{Ps} ，具体做法如图 5 所示：(1) 首先通过远震事件和台站的位置从 2.5-D 模型（通过 profile-1 构建获得）切取出 profile-2 速度剖面，同时获得实际 Ps 波的射线参数 p 。(2) 然后将实际的转换点 A 垂直投影得到新的转换点 A'，计算校正后的 Ps 波射线参数 p' 。(3) 随后分别基于 profile-2 和 profile-1 的 2-D 模型，使用射线参数 p 和 p' 进行正演模拟获得远震体波 U_1 和 U_2 ，在包含 Ps 震相的时间窗口 w 内通过波形互相关求取 ΔT_{Ps} 。

$$C(\tau) = \int_0^T w(t)U_1(t)U_2(t - \tau) dx$$

(4) 最后按照 ΔT_{Ps} 对实际观测远震体波数据进行相位修正。和传统的体波接收函数动校正技术（Yuan et al., 2007）比较，该方法的优势在于：(1) 不再采用台站下方的 1-D 层状模型，而是基于 2-D 模型；(2) 相比于射线理论，基于波形理论求取相位偏差量更加准确。

和远震事件类似，偏离线性台阵的台站造成的经验格林函数相位差定义为 $\Delta T_{EGFs} = T(EGFs_2) - T(EGFs_1)$ ，采用同样的方法进行求取并对观测波形进行相

位修正。另外，随着 profile-1 模型的更新，获得的相位校正量会更加准确。

（3）发展分别适用于背景噪声和远震体波的 3-D/2-D 数据转换方法，校正因点源和线源激发造成的波形振幅和相位差异

本研究拟针对背景噪声和远震体波两种不同类型数据，分别使用改进的直达波变换法（Modified Direct-wave Transformation, Zhang et al., 2018）和单一速度变换法（Single-velocity Transformation, Forbriger et al., 2014），对观测的 3-D 背景噪声和远震体波分别进行相位和振幅的校正。具体做法如下：

为了校正因点源和线源激发造成的波形振幅和相位差异，前人在声波方程中分别引入 3-D 和 2-D 格林函数，推导出远场假设下的 3-D/2-D 波形转换因子（Forbriger et al., 2014），获得了频率域中 3-D 与 2-D 波形之间的关系式。如下：

$$\lim_{r \rightarrow \infty} G_k^{2D}(\omega) \approx G_k^{3D}(\omega) \cdot \sqrt{\frac{2\pi r}{k}} \cdot e^{i\pi/4} = G_k^{3D}(\omega) \cdot \sqrt{2rv_{ph}} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{\omega}} e^{i\pi/4}$$

前者为振幅补偿项，后者为相位补偿项。其中 k 表示波数， v_{ph} 为相速度， ω 表示角频率， r 表示台站到震源的距离。傅立叶反变换可获得在时间域的表达式：

$$G^{2D}(t) = \sqrt{2rv_{ph}} \left(\frac{U(t)}{\sqrt{t}} * G^{3D}(t) \right)$$

针对相位补偿项，拟在时间域将 3-D 波形和 $1/\sqrt{t}$ 进行卷积（相当于做 45 度的相位移动）。对于振幅补偿项，体波和面波的相速度存在差异。其中体波的相速度固定，因此振幅补偿项表达如下：

$$F_{amp} = \sqrt{2rv_{ph}}$$

面波具有频散特性，相速度随周期变化，可以将相速度用传播距离和时间来表示，即 $v_{ph} = r/t$ 。因此面波振幅补偿项表达如下：

$$F_{amp} = r \sqrt{2/t}$$

（4）提出“两步法”伴随层析成像反演策略，降低反演的非唯一性

本研究拟根据背景噪声和远震体波两种数据各自的特点和结构敏感性，提出“两步法”分步反演策略，利用华北地区线性台阵实际数据进行联合伴随层析成像：第一步，单独使用背景噪声数据进行伴随层析成像。考虑到面波频散特性，

我们同时反演多个周期频段数据来约束不同深度的波速结构，面波成分频率偏低可提供较平滑的横波速度结构，作为下一步的初始模型。第二步，加入远震体波数据进行联合伴随层析成像，约束更为精细的横波速度结构，提高成像的分辨率的同时，对速度间断面也进行较好的约束。此时，面波仍然采用和第一步同样的反演形式，而远震体波进一步采用从低频到高频的多尺度成像方法，权重系数由贝叶斯反演理论确定，具体流程参考图 6。通过以上分步反演策略，不仅可以获得稳定可靠的岩石圈精细结构，同时能降低远震体波对初始模型的强烈依赖性，减小反演的非线性化程度。

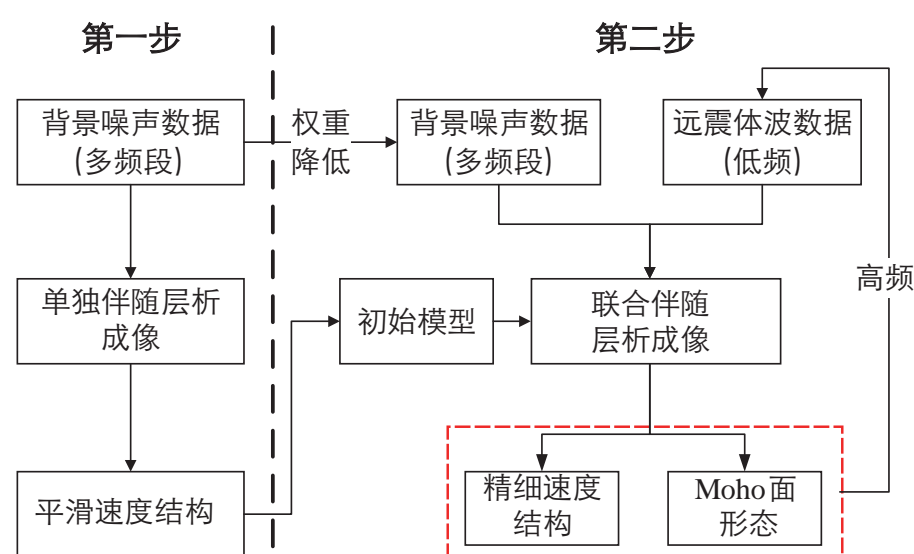


图 6 “两步法”伴随层析成像反演流程图

3.2 可行性分析

(1) 核心技术的可行性

本项目的开展建立在目前地震学中已经成熟的伴随层析成像理论基础上。申请人已经分别独立开展过背景噪声和远震体波的伴随层析成像工作，其中涉及的敏感核构建以及反演方法原理相同，因此构建联合反演框架不存在本质的困难；“两步法”反演策略，利用两类数据的互补性即能降低反演中的非线性化程度，其原理较为简单，实施起来难度不大；波形互相关相位校正技术和3-D/2-D数据转换方法的提出均为前人研究基础上进行的完善，并在研究方案中给出了详细的实施方案。因此本项目在核心技术上来看是可行的。

(2) 实际数据的可获取性

申请人博士期间所在的中国科学技术大学地球和空间科学学院与中国地震台网中心、中国地震局地球物理所、中国地震局地震预测研究所及中国科学院地质与地球物理研究所等单位合作密切。合作单位在华北克拉通地区布设了大量的密集线性台阵，具有丰富的背景噪声和远震体波数据，拟通过这些数据进行联合伴随层析成像。目前支撑本研究所需的波形数据资料已经收集完毕。

（3）前期研究基础和已完成工作

申请人博士阶段一直从事地震波传播及波形成像方法理论和应用研究。其中，提出了基于线性密集台阵背景噪声波形伴随层析成像方法，并成功应用于华北地区实际数据中，相关成果已发表于高质量国际学术期刊 **JGR: solid earth** 上（[Zhang et al., 2018](#)）。同时开展过基于SEM-FK混合方法的远震体波正演模拟及反演工作，相关成果发表在个人博士论文中（[张超, 2018](#)），前期工作已为本项目的开展奠定了坚实基础。

（4）实验条件的可行性

本项目的开展很大程度上依赖于计算平台。申请人所在单位具有良好的并行计算平台（详情见后面工作条件部分），这些是本项目的理论研究和实际数据应用可顺利开展的重要保障。

综上所述，本项目的开展是申请人前期基于线性台阵波形数据伴随层析成像方向的延伸和拓展，具有良好的研究连贯性和可行性。

4、本项目的特色与创新之处

针对地震学中“基于波动方程的地震层析成像”这一关键问题，本项目致力于发展一种基于密集线性台阵数据的联合伴随层析成像方法，特色和创新点如下：

（1）提出基于密集线性台阵背景噪声和远震体波联合伴随层析成像方法，搭建联合反演的框架，这是本项目的创新点；

（2）发展波形互相关相位校正技术及分别适用于背景噪声和远震体波的3-D/2-D转换方法，校正3-D实际观测数据因采用2-D反演所造成的误差；

（3）提出“两步法”伴随层析成像反演策略，利用两种数据的互补性减少反演的非唯一性，获得一套反演稳定、可靠的成像理论。

5、年度研究计划及预期研究成果

5.1 年度研究计划

(1) 第一年度 (2020.01-2020.12)

发展基于线性台阵背景噪声和远震体波联合伴随层析成像方法，搭建联合反演框架；利用谱元法和FK-SEM混合算法分别开展2-D区域地震面波及远震体波场模拟研究，通过伴随状态法产生相应的敏感核函数；进行理论合成数据测试以及模型分辨率测试，同时对成像结果的可靠性进行验证。参加国内学术会议3人次、学术交流考察1人次。

(2) 第二年度 (2021.01-2021.12)

实现事件或台站偏离线性台阵校正方法的算法及代码编写；开展3-D/2-D波形数据转换方法的研究，进行理论合成数据测试；实现“两步法”反演策略，整合反演程序以及数据处理程序，为后续实际数据应用奠定基础。参加地球科学联合年会3人次、国内学术交流考察2人次、国际学术交流1人次、拟撰写1篇论文。

(3) 第三年度 (2022.01-2022.12)

处理华北克拉通线性台阵背景噪声和远震体波数据，开展华北地区线性台阵下方岩石圈高精度成像；对成像结果的分辨率进行讨论，结合地质、地球化学和地球物理方面对结果进行解释和讨论；对研究成果进行整理，撰写结题报告，完成结题工作。参加国内学术会议3人次、国际学术会议1人次、拟撰写1-2篇论文。

5.2 预期研究成果

- (1) 给出基于线性台阵背景噪声和远震体波联合伴随层析成像理论和方法；
- (2) 获得波形互相关相位校正技术和3-D/2-D数据转换方法；
- (3) 获得华北克拉通地区线性台阵下方岩石圈高精度成像结果；
- (4) 编写高质量高效率成像软件，实现程序共享供科学研究。

以上研究成果拟以学术论文形式发表于高水平的国内外学术刊物，SCI 论文 2-3 篇，指导或联合培养硕士生 2-3 名。

二、研究基础和工作条件

1、研究基础

（与本项目相关的研究工作积累和已取得的研究工作成绩）

（1）申请人博士毕业于中国科学技术大学固体地球物理专业，在导师姚华建教授的指导下对地震层析成像方法进行了深入研究。曾获得国家公派留学资助先后前往多伦多大学和南洋理工大学，跟随刘沁雅教授和童平教授从事地震波正演模拟及波形成像研究，对该领域相关理论、技术和前沿科学问题都有深入了解和掌握。申请人曾参与国家自然科学基金面上项目“华北地区3-D精细地壳速度模型的构建及强地面运动特征的研究”（批准号：41574034，2016/01-2019/12）。依托该项目，申请人在伴随层析成像、背景噪声与远震波形的数据处理以及后期的相关解释工作积累了丰富的经验。

（2）申请人在攻读博士学位期间分别独立开展过背景噪声和远震体波伴随层析成像研究，取得的成果有：

背景噪声数据方面：首次提出了基于线性台阵背景噪声伴随层析成像方法，并应用到华北克拉通地区的一条密集线性台阵背景噪声数据，获得了台阵下方高分辨率横波速度结构。成像结果在前人研究基础上显示出新的速度异常体，包括位于中部造山带下地壳中的低速异常体以及异常体下方Moho面的不连续。相关方法和研究成果发表在《JGR: solid earth》上。

远震体波数据及联合反演方面：利用FK-SEM混合算法开展了远震体波正演模拟及合成数据反演测试，在申请人博士论文最后一章有详细描述。联合伴随层析成像方法的程序已初步编写，简单的方法测试及对比结果见图7。

申请人近两年发表的与本研究直接相关的论文包括：SCI论文1篇，国际性会议论文3篇。

- [1] **Chao Zhang[#]**, Huajian Yao^{*}, Qinya Liu, Ping Zhang, Yanhua O. Yuan, Jikun Feng, Lihua Fang, Linear Array Ambient Noise Adjoint Tomography Reveals Intense Crust-Mantle Interactions in North China Craton, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2018, 123: 368~383. [\[SCI 二区\]](#)
- [2] **Chao Zhang^{**}**, Huajian Yao, Qinya Liu, Yanhua O. Yuan, Ping Zhang, Jikun Feng, Lihua Fang, Ambient noise adjoint tomography for a Linear array in North China, AGU

Fall Meeting, 2017.

- [3] 张超^{#*}, 姚华建, 刘沁雅, 袁艳华, 张萍, 冯吉坤, 房立华, 基于线性台阵波形反演的背景噪声互相关函数二维结构成像方法研究及应用, 第4届中国地球科学联合学术年会, 2017. [优秀论文]
- [4] Huajian Yao, **Chao Zhang**, Ting Lei., Qinya Liu, Linear Array Ambient Noise Adjoint Tomography with Phases and Amplitude Ratios: Methodology and Application, AOGS Annual meeting, 2018.

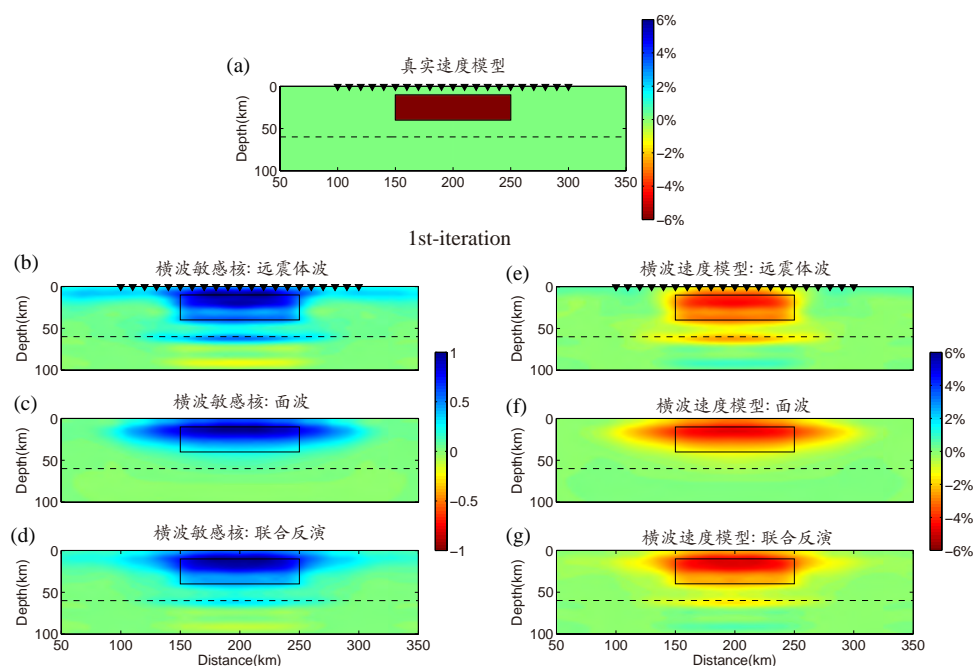


图 7 联合反演程序测试及方法对比, 仅进行一次迭代。(a)真实模型 (模拟华北地区地壳中存在 6% 低速异常体的情况); (b)-(d)分别表示远震体波, 面波及联合反演获得的横波敏感核; (e)-(g)分别表示利用这些敏感核函数所更新得到的横波速度模型。

(3) 申请人基于线性台阵伴随层析成像方法的程序代码及结果均上传实现共享 (见https://github.com/ustcchaozhang/2DNoise_Adjoint_tomography), 目前该研究工作已经获得多伦多大学, 南方科技大学及中国地震局地球物理所等国内外同行的认可, 并达成合作意向。本项目拟在此平台下继续搭建联合反演框架, 实现程序共享以供科学研究和合作。

2、工作条件

（包括已具备的实验条件，尚缺少的实验条件和拟解决的途径）

申请人与中国科学技术大学、中国科学院地质与地球物理研究所、中国地震局地球物理所及中国地震局地震预测研究所等单位合作密切。这些单位在华北克拉通地区布设了大量的密集线性台阵，积累了丰富的波形数据。申请人将充分利用这些数据开展相关研究及应用。

申请人所在单位河海大学海洋学院，拥有一套 CPU-GPU 并行集群：共 32 个计算节点，每个节点包含 2 个 CPUs（型号为：Intel Xeon E5-2630，10 核线程，2.20 G 主频），可为本项目提供中小规模成像计算平台。同时，河海大学依托水文水资源与水利工程科学国家重点实验室，拥有大型高性能计算平台，可满足本项目大规模伴随层析成像方法的基本计算需求。

以上涉及的实验条件均已到位，尚缺少一台小型台式工作站，用于方法的理论测试及后期数据处理，拟用本项目的设备购置费进行购买。

3、个人简介

（包括申请人的教育经历和工作经历，在国内外学术组织、刊物及国际性学术会议任职情况，近期已发表与本项目有关的主要论著目录和获得学术奖励情况，正在承担、参加或完成的科研项目情况等）

（1）申请人简介，包括受教育经历(从大学本科开始)和研究工作经历

申请人

张超，河海大学，海洋学院，讲师

教育经历

2012.09–2018.06，中国科学技术大学，地球物理学，硕博连读，

导师：姚华建教授、张捷教授

2008.09–2012.06，中国地质大学（武汉），地球物理学，学士

科研与学术工作经历

2018.10-至今，河海大学，海洋学院，讲师

2016.01-2017.01，多伦多大学，地球科学学院，联合培养博士

(2) 在国内外学术组织、刊物及国际性学术会议任职情况

无

(3) 近期已发表与本项目有关的代表性论著：按照以下顺序列出全部已经公开发表的论著目录：①近 5 年内发表的 3 篇代表性论著；②近 5 年内发表的其他论著；③5 年以外的代表性论著。上述论著目录均应按年份降序排列，要详细列出所有作者、论著题目、期刊名称或出版社名称、年、卷（期）、起止页码等。

① 近 5 年内发表的 3 篇代表性论著

1. **Chao Zhang[#]**, Huajian Yao^{*}, Qinya Liu, Ping Zhang, Yanhua O. Yuan, Jikun Feng, Lihua Fang, Linear Array Ambient Noise Adjoint Tomography Reveals Intense Crust-Mantle Interactions in North China Craton, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2018, 123: 368~383.
2. **Chao Zhang^{#*}**, Huajian Yao, Qinya Liu, Yanhua O. Yuan, Ping Zhang, Jikun Feng, Lihua Fang, Ambient noise adjoint tomography for a Linear array in North China, AGU Fall Meeting, 2017.
3. **Chao Zhang[#]**, Jie Zhang^{*}, 2D seismic residual statics derived from refraction interferometry, Journal of Applied Geophysics, 2016, 130: 145~152.

② 近 5 年内发表的其他论著

4. Huajian Yao, **Chao Zhang**, Ting Lei., Qinya Liu, Linear Array Ambient Noise Adjoint Tomography with Phases and Amplitude Ratios: Methodology and Application, AOGS Annual meeting, 2018.
5. **张超^{#*}**, 姚华建, 刘沁雅, 袁艳华, 张萍, 冯吉坤, 房立华, 基于线性台阵波形反演的背景噪声互相关函数二维结构成像方法研究及应用, 第 4 届中国地球科学联合学术年会, 2017. (优秀论文)

6. **Chao Zhang^{**}**, Jie Zhang, Refraction interferometry for residual statics solutions, Annual International meeting, 2014, SEG Expanded Abstracts, 2045-2049.

(4) 论著之外的代表性研究成果：包括学术奖励、会议特邀学术报告、授权发明专利等，其中学术奖励须列出全部获奖人员、获奖项目名称、奖励机构、奖励类别、奖励等级、颁奖年份，会议特邀学术报告须列出报告人、报告名称、会议名称、会议地址、会议时间，授权发明专利须列出全部发明人、专利名称、授权时间、国别、专利号。按照以下顺序列出论著之外的代表性研究成果：①近5年内发表的5项代表性成果；②近5年内发表的其他成果；③5年以外的代表性成果。上述内容均按年份降序排列。

无

(5) 正在承担、参加或完成的科研项目情况，要注明项目的名称和编号、经费额度、起止年月以及进展状态等

1. 中央高校基本科研业务费，2019B00714，基于线性地震台阵数据的波形反演方法研究及应用，2019/01-2020/01，10万，在研，主持

2. 国家自然科学基金面上项目，41574034，华北地区三维精细地壳速度模型的构建及强地面运动特征的研究，2016/01—2019/12，70万元，在研，参与

三、相关附件材料

1、项目申请人博士学位证书复印件或副高及以上专业技术职称复印件；

2、身份证复印件；

3、项目申请人正式在编证明，包括 2019 年 1 月份工资、公积金及养老、医疗、失业保险金等材料；

4、近期已发表与本项目有关的主要论著扫描件（不超过 3 篇）；

5、论著之外的代表性研究成果证明文件扫描件（不超过 5 项）；

6、其他相关附件材料。

说明：

1、各申报单位根据实际情况提供以上附件材料，并填写《项目附件审查表》，学位、职称、身份证复印件、在编证明等材料（附件 1、2、3 项无需上传系统），报主管部门审查；

2、论著、科技奖励、专利、会议报告等证明材料须作为附件上传。（如果篇幅过大，可以只提供封面、摘要、目录、版权页等扫描件）。