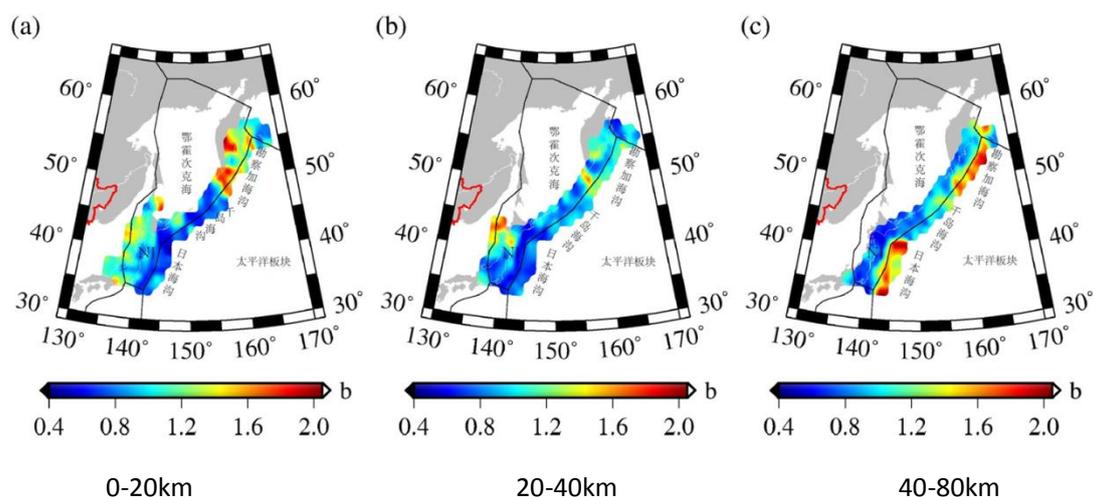


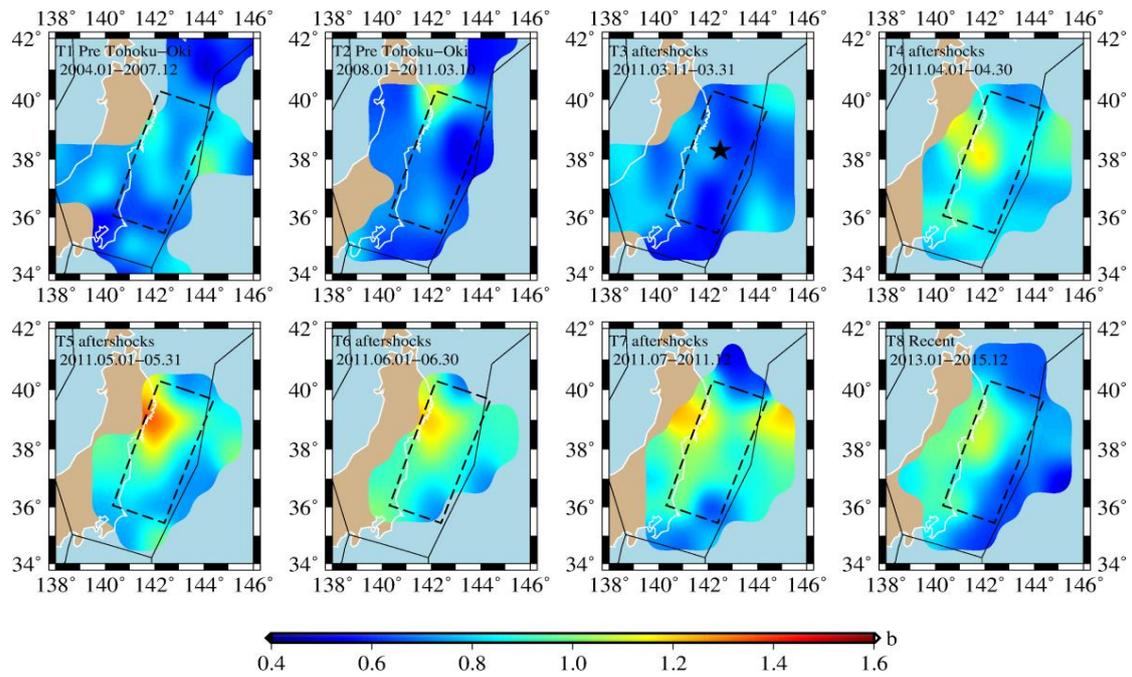
地球行星内部结构与动力学专题研讨会报告总结

2019年10月26-30日，2019年中国地球科学联合学术年会在北京国际会议中心举行。中国力学学会地球动力学专业委员会组织了地球行星内部结构与动力学专题研讨会，参加本专题讨论的专家和研究生超过100人，专题会议口头报告23个，张贴报告6个。以下为实验室参会人员口头报告及展板报告的总结。

利用 IRIS (Incorporated Research Institutions for Seismology) 提供的地震数据资料，研究了鄂霍次克微板块东部俯冲带地区 b 值的三维空间分布特征，并在此基础上研究了 b 值分布与区域应力场分布的关系。来自中国科学院大学计算地球动力学重点实验室的王少坡博士将地震活动性 b 值与俯冲带应力水平进行综合分析，给出了板块边界带 b 值的空间分布和时间演化，及其与板块边界带剪切应力的关系。在他的口头报告《白鹤滩水库蓄水对区域地震活动性影响的数值分析》中，俯冲带区域 b 值空间分布结果表明：在俯冲带浅部区域 (0-40km 深度范围)，勘察加地区所受剪切应力小于南部的千岛地区和北日本地区；而在深部区域 (40-80km 深度范围)，千岛地区弧前区域所受剪切应力小于其南部的日本地区和其北部的勘察加地区。日本海沟附近区域平均 b 值在大地震前后的时间变化揭示了该区域震间期、震前期和震后期的应力演化过程。



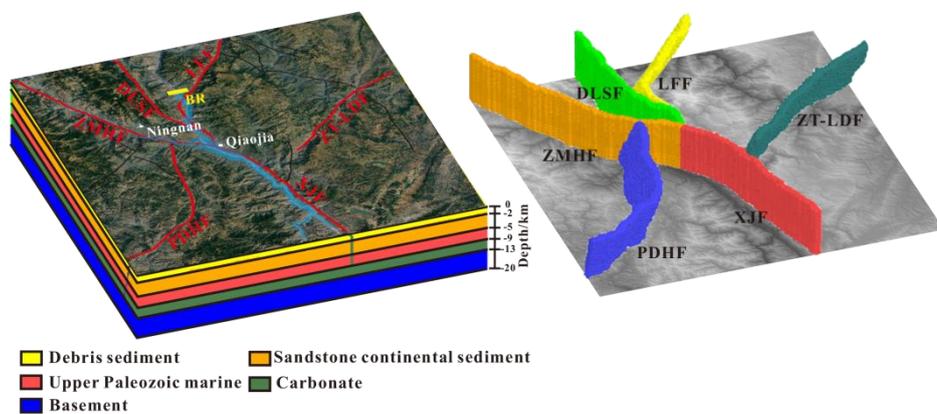
各层的 b 值分布



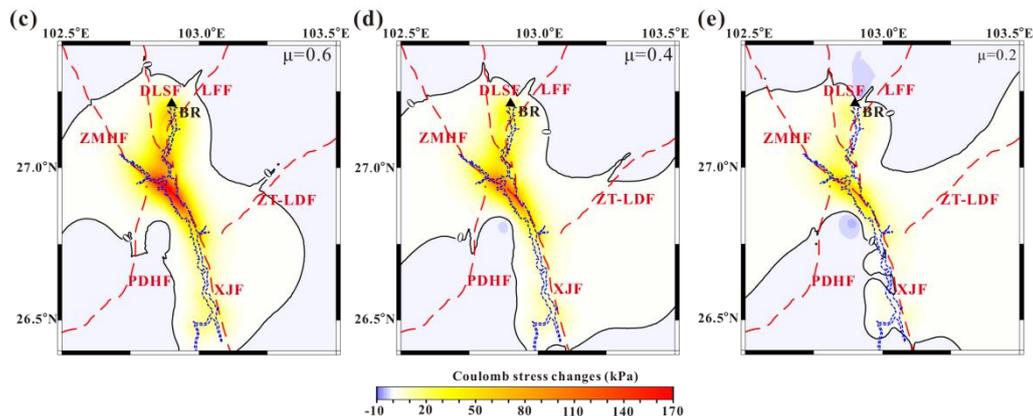
日本东部地区不同时段 b 值分布

利用高质量的重复地震的研究证实了穿透地球内核的震相随着时间发生传播时间和波形的变化。然而，此现象的解释仍存在争议。它被普遍解释为由内核的旋转使得内核内部的横向速度梯度的发生位移导致，但也有一些研究反对内核的旋转。因为这些研究得到的旋转速率在不同的路径上不能吻合，因而更倾向于用内核边界的局部变化来解释内核震相的时间变化。来自北京大学的宋晓东博士仔细分析了最新的高质量的重复地震数据库。在他的口头报告《非稳定的内核旋转》中，根据以下观测提出内核的非稳态并且缓慢的超速旋转。（1）不同路径上的内核旋转速率不一致并不能排除内核的旋转，因为内核的横向的精细速度结构当前并没有很好的解决，从而导致旋转速率的计算误差很大。（2）我们认为内核的旋转是解释随时间变化的内核震相的必不可少的环节，因为这些信号大多都来自于内核的内部而非边界。内核边界的局部变化的关键证据，也就是随时间变化的反射震相 (PKiKP)，很可能被先到达的透射震相 (PKIKP) 的尾波干扰。（3）我们新发现的沿着秘鲁智利海沟的重复地震群被哈萨克斯坦的台站接收时也会显示出内核透射震相的变化。但推算出内核的旋转速率仅为每年 0.06 度左右。原因是它们经过北大西洋下面的内核存在一块很小但是很陡的横向速度梯度。（4）内核的旋转似乎在约 2005 年到 2009 年开始停止了，因为我们并未发现最近十年的重复地震的内核震相有明显的变化。

60年代，随着经济的发展，世界各国均在修建大型-中大型水库，先后发生了一些震级较大的水库地震，水库蓄水对地震活动性的影响也越来越受到人们的关注。而白鹤滩水库作为目前国内在建的最大水库，其正常蓄水水位 825m，总库容可达 206.27 亿 m^3 ，蓄水后库区主要沿小江断裂带北段展布，存在诱发地震的潜在危险。白鹤滩水库作为国内坝址地形、地质条件极为复杂的高坝大库容水库之一，由于尚未竣工，对该水库的相关研究主要从工程角度分析其蓄水前大坝稳定性及周边地质情况，而没有对蓄水所引起的区域地震活动性影响进行定量分析。来自中国科学院大学计算地球动力学重点实验室的窦甜甜博士基于孔隙弹性耦合理论，搭建了含地形的高分辨率地质模型，定量研究了白鹤滩水库蓄水对区域地震活动性的影响。在她张贴的海报《白鹤滩水库蓄水对区域地震活动性影响的数值分析》中，给出了水库蓄水引起的位移场、应力场、断层上库仑应力的变化结果，结合库区相关地质构造背景及国内外典型水库地震案例，认为蓄水后会引起 5 公里左右范围内的微震活动，也不排除发生较大地震的可能性。



白鹤滩水库计算模型

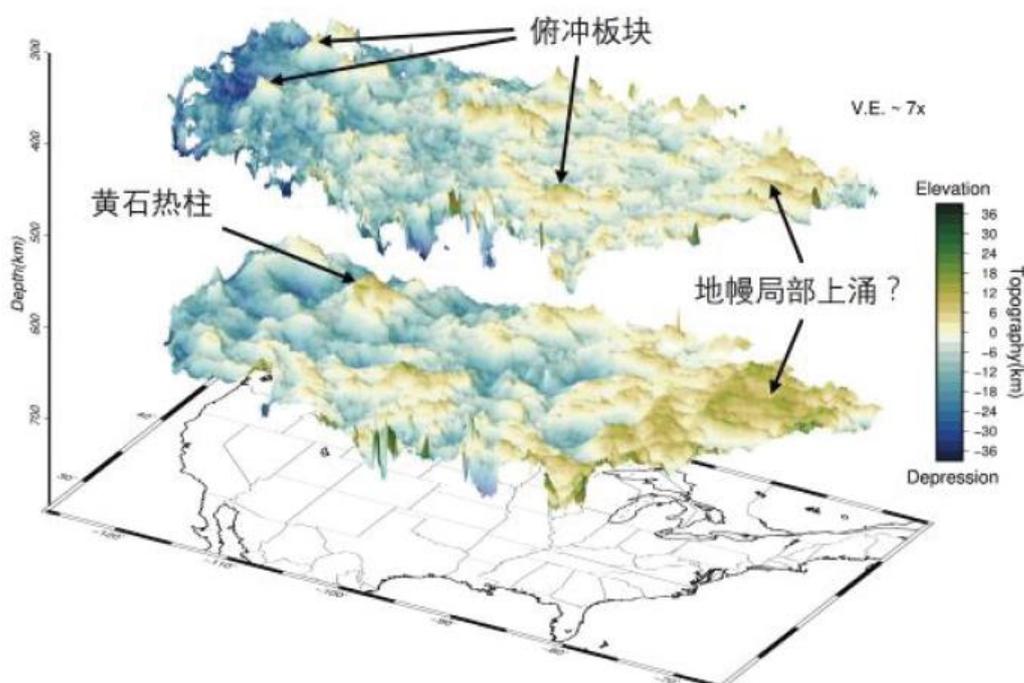


不同摩擦系数 μ 下库伦应力 (ΔCFS) 变化结果

板块动力学是地球动力学的一个重要研究课题。经典的板块构造理论将岩石圈板块在地球表面的运动看作刚体的定点转动。应用刚体转动动力学原理研究板块问题是一种基本的方法。来自中国科学院大学计算地球动力学重点实验室的俞霄同学采用由岩石圈结构模型给出的板块几何与密度特征计算其转动惯量，与板块绝对运动角速度乘积可以得到板块的角动量。在他的口头报告《板底剪切阻力约束下板块边界驱动力的识别与计算》中，采用经典的俯冲带热结构模型[1]结合板片几何和运动参数可以计算负浮力大小。经典的俯冲板片拐角流模型给出了板片受到的抬升力和地幔阻力。由垂直于板片方向的力矩平衡估算板片周围地幔的粘度，进而由平行于板片方向的力平衡计算板片净拉力的大小。采用全球大洋岩石圈的年龄分布可以大致计算全球各条洋中脊上的推力大小。计算结果表明，西太平洋和印度洋俯冲带上的力大约是大洋中脊推力的 2 倍，东太平洋俯冲带上的力与洋脊推力相当，这一结果符合全球俯冲带的实际特征。板片拉力与洋脊推力为板块运动提供了主要的驱动力。

地幔过渡带中的不连续面（上界面 410 公里不连续面，中部 520 公里不连续面，下边界 660 公里不连续面）的三维起伏结构因其潜在的对地幔物质组分，热力学状态，以及全地幔对流模式的有力约束成为了研究人员们颇感兴趣的方向。来自新墨西哥大学地球与行星科学学院的张涵同学利用 USArray 在过去十余年收集到的数据以及一套新发展的接收函数偏移成像方法所得到的北美下方的不

连续面的三维起伏结构，并试图将观测结果与前人的结论进行对比讨论。在他的口头报告《利用地震体波方法约束地幔过渡带中不连续面的三维起伏结构》中，呈现一个基于深地震源区转换波推测 410 公里不连续面的局部起伏的实例，并讨论该结果的观测意义及方法的其他潜在用处。总的来说，观测结果部分地支持了地幔过渡带不连续面的相变成因，并可以通过结合矿物物理的实验结果对该深度范围的地幔温度提供一定的约束。但是仍有部分观测事实无法被单一的相变体系所解释，表明了地幔局部区域可能存在的在水平方向上的组分不均一性。



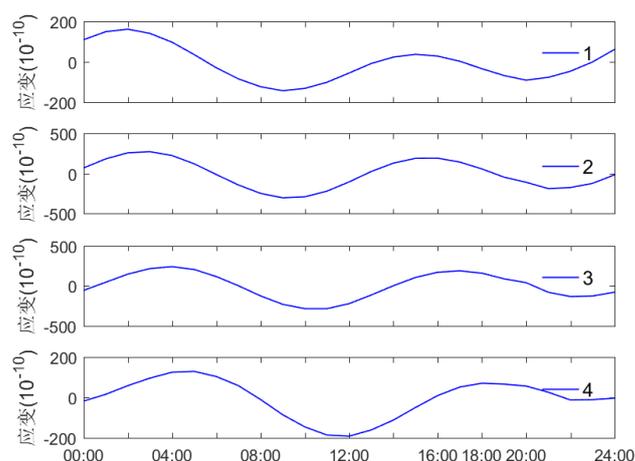
利用 USArray 接收函数数据偏移得到的 410 公里和 660 公里不连续面的三维起伏结构

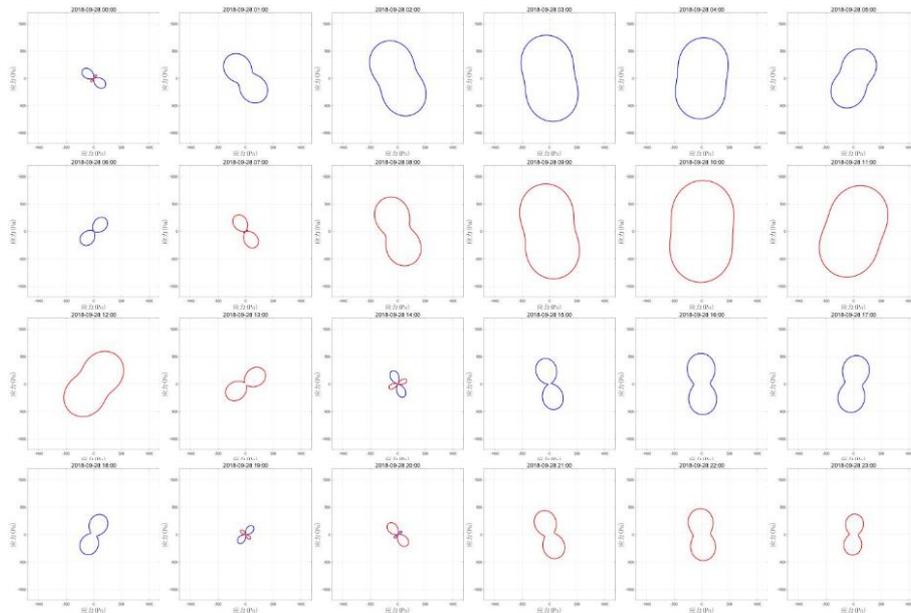
地球对月球的潮汐差应力远小于深源月震发生所需的差应力，不足以成为主导深源月震发生的原因，但可能起到触发作用。对于处于一定应力临近破坏状态下的岩石，如果潮汐应力变化使其莫尔圆与岩石破裂线之间位置发生相对变化，就可能会触发月震。但是什么地质过程才能够在地质时期长时间提供载荷、造成弹性能量积累，并以月震形式释放积累的弹性能量？根据已有研究推测，由于月球冷却收缩造成的热应力很可能是主要控制因素或控制因素之一。来自中国科学院大学计算地球动力学重点实验室的陶莎同学对于深源月震处潮汐应力和热应

力进行了定量分析。在她的口头报告《深源月震机理理论研究——震源热应力场与潮汐应力场分析》中，基于观测数据，应用有限元方法，建立百万网格三维分层月球模型，通过并行算法，对月球潮汐应变场、应力场及热应力进行模拟，综合以上结果，绘制了 65 个深源月震震源位置处的潮汐应力场、热应力场；讨论二者的综合作用，分析月球冷却收缩导致的热应力在深源月震中的作用。此外，还初步探讨了深源月震的不对称性和丛集性原因，为未来对于月球内部结构进行三维非球对称数值模拟的深入研究提供基础。

天山是世界上最活跃，最年轻的陆内造山带之一。一般认为天山造山带形成于古生代多个块体的聚合，之后受到强烈的剥蚀和夷平。由于印度-欧亚板块碰撞的远程效应，天山新生代开始复活，经历强烈的隆升和变形作用，但现今关于天山再活化的动力学过程还不十分清楚。目前，不同学者基于地球物理资料，提出地幔物质上涌和南侧塔里木盆地、北侧哈萨克地体向天山方向的双向俯冲等观点，用于解释天山的快速隆升。但由于方法局限性，数据分布等原因，哈萨克块体向天山方向的俯冲特征和地壳精细结构仍存在较大不确定性(Omuralieva et al., 2009)，需进一步深入研究。来自浙江大学地球科学学院的张秉峰同学采用接收函数共转换点叠加方法(CCP) 6)和改进后的地壳厚度/波速比搜索方法(H-k-c)，利用研究区域 53 个地震台站的 P 波数据，对南起塔里木盆地西北缘，横贯天山山脉，北至哈萨克地体东南缘的测线下方的地壳结构特征进行研究。在他的口头报告《接收函数方法研究天山造山带中段地壳结构》中，CCP 成像结果显示，北天山下方 30-50 km 深度处存在两个明显的高速间断面，分别对应天山和哈萨克块体的 Moho 面，反映了哈萨克块体向天山方向的俯冲，俯冲前缘达到位于山脉中部的纳伦盆地北缘；南天山下方 Moho 面呈上凹形态，最大深度约 70 km。H-k-c 结果显示，天山地区平均地壳厚度约 54.0 km，平均波速比约为 1.76，最大地壳厚度结果（70.1 km）位于南天山下方，Moho 深度和地表地形起伏近似正相关。H-k-c 和 CCP 成像获得的 Moho 面深度结果吻合较好。

地震预报不能仅仅停留在经验预报，而要发展物理预报，物理预报涉及的关键物理量之一是地应力。分量式钻孔应变观测仪是直接测量地应力变化的主要仪器，如今在我国已投入广泛使用，但绝大多数文献中，仅仅是对观测结果画曲线、找异常、试图从前兆预报地震。对于钻孔应变仪反映的应力状态变化，以及应力场变化与地震活动性的关系这样更深层次的问题，却少见基于实际观测资料的讨论。来自中国科学院大学计算地球动力学重点实验室的李富珍博士通过张贴报告展示了《中国四分量钻孔应变观测数据的可视化研究》的研究内容，通过采用地应力变化量直观形象表达的方法-正应力花瓣法，对钻孔应变仪的长期记录、固体潮记录和地震事件记录，进行了形象的可视化分析。通过结合地图将此技术扩展到全国地震台站，搭建全国范围的应力花瓣可视化平台，有望像气象学中的云图一样，提供全国地应力台站不同时间地应力变化情况的直观动态显示，有利于地震物理预报的探索。





固体潮汐记录曲线和应力花瓣图

地表温度变化及其相应产生的热应力会引起多种地质效应。例如，地表岩石的风化、冻土层的变化等。并且，地表温度变化和热应力也会影响隧道或钻孔内的地形变、倾斜、应力等地球物理观测。据此，定量分析地表温度变化在近地表产生热应力变化及其相关影响因素是一个重要科学问题。在均匀半无限空间中，地表温度的周期性变化对地下温度分布的影响可视为二维瞬态温度热传导问题，可以通过解析解获得。但是，当地形起伏时，虽然谷底地下温度的变化与半无限空间情况下影响深度没有大的区别，但是对热应力的影响却可以达到大得多的深度。来自中国科学院大学计算地球动力学重点实验室的张君策同学通过张贴报告展示了《起伏地形对地表温度变化引起的热应力影响的数值分析》的研究内容，建立不同地形起伏条件下的热-应力耦合场模型进行有限元数值模拟试验。得出地表起伏会导致热应力影响深度远大于温度影响深度。在钻孔应力测量、隧洞内应变和地倾斜测量中，这种地形起伏对热应力变化影响会造成记录的年变化。因此，在分析这些物理量的长期变化时，这种效应必须去除。同时，在未来建设新的台站时，选址设计时也应该考虑这种效应。

青藏高原地幔转换带结构对于理解该区深部地球动力学过程有重要意义，但是其地幔转换带结构仍存在一定的不确定性。来自浙江大学地球科学学院的吴颖

凯同学在他的口头报告《青藏高原西部地幔转换带结构及其意义》中，利用 Hi-climb 项目布设在青藏高原西部（85° E 附近）南北向排列的 183 个台站在 2002 年 8 月到 2005 年 9 月记录的远震数据，通过接收函数方法研究高原西部地幔转换带结构。通过选取体波震级大于 5.5 级，震中距在 30-95° 之间，信噪比较高的 839 个地震事件，采用时域迭代反褶积的方法计算远震 P 波径向接收函数，并对接收函数进行共转换点叠加。共转换点叠加结果显示，青藏高原西部区域，d410 和 d660 界面均呈现出南浅北深的现象，其中藏南 d410 和 d660 界面深度分别小于 410 km 和 660 km，而藏北则分别大于 410 km 和 660 km。藏北 d410 和 d660 界面比藏南深 20-30 km，但是，由于 d410 和 d660 具有相同的变化趋势，藏南藏北地幔转换带厚度大致保持不变，表明印度板块向北俯冲或高原岩石圈拆沉可能未进入地幔转换带。同时，d410 和 d660 界面 20-30 km 的深度差，表明藏北上地幔比藏南上地幔温度高 175-255 K。

现阶段针对中部太平洋和非洲下方的下地幔大尺度低速体 (LLSVP) 已有大量研究，特别对非洲 LLSVP 的结构有较好了解。然而由于关键射线路径缺失，我们对中部太平洋 LLSVP 的具体结构和形态的了解仍然有限。来自中国科学技术大学的孙道远教授在他的口头报告《中太平洋下地幔大尺度低速体北部边界的精细结构》中，主要利用 USArray 在阿拉斯加的台阵记录到斐济-汤加地区的地震的波形数据，对中部太平洋 LLSVP 的北边界进行了精细成像。我们发现不同位置上的地震的 S 波走时呈现剧烈变化。其中对于最南边的地震，从 80° 到 87° S 波的到时相对于 PREM 变慢了 6-7s。而对于最北边的地震，其走时变化幅度只有 ~2s。通过拟合 S 波的走时跳变，发现在中部太平洋 LLSVP 的北边界，从南到北其高度由 720 千米升高到 920 千米，其 S 波波速异常从 LLSVP 顶部的 -1% 逐渐变化到核幔边界上 300 千米的 -4%。考虑对同样区域采样的近东西方向路径上的 S 波的变化，我们认为中部太平洋 LLSVP 的北边界呈现一个北倾的结构，显示了 LLSVP 边界存在的强烈动力学效应。同时，在震中距 80° 左右出现的 ~10s 的 ScS-S 走时残差也表明该区域存在超低速体 (ULVZ)。为拟合观测到的波形数据，需要 LLSVP 的边缘存在一个直径 900 千米，高度 50 千米，S 波

波速异常为-10%的 ULVZ。

自 1969 年阿波罗计划在月球表面布设月震仪以来，开启了人类对月球内部结构的直接观测。然而月球一维结构（即圈层）仍未有定论，其中月核结构，包括其大小及是否具有液态外核都是非常不确定的，而这些信息是了解月球磁场与其演化历史的重要基础。尽管受限于月震仪的频宽限制、仪器采样与月震分布，对于是否观测到稳定的低频模态信号仍存疑，但月震低频模态信号（1-10mHz）却是直接且有效约束月核结构的关键手段。低频模态除了受结构影响，自身的重力、球体的椭率与旋转效应也不能被忽略。来自中国科学技术大学的杨欣颖，在他的口头报告《低频月震信号的理论计》中，基于模态理论及微扰理论，在考虑上述的效应下，理论上计算月震低频模态信号。针对不同月核模型，发现具有液态外核的(球型模)模态频率比全是固态核模型要低。此外，通过不同模型和不同震源（深源月震和陨石撞击）下的低频理论月震图，亦评估低频信号被记录到所需要的最低仪器灵敏度，为后续登月计划甚宽频地震仪的设计和布设提供指导。

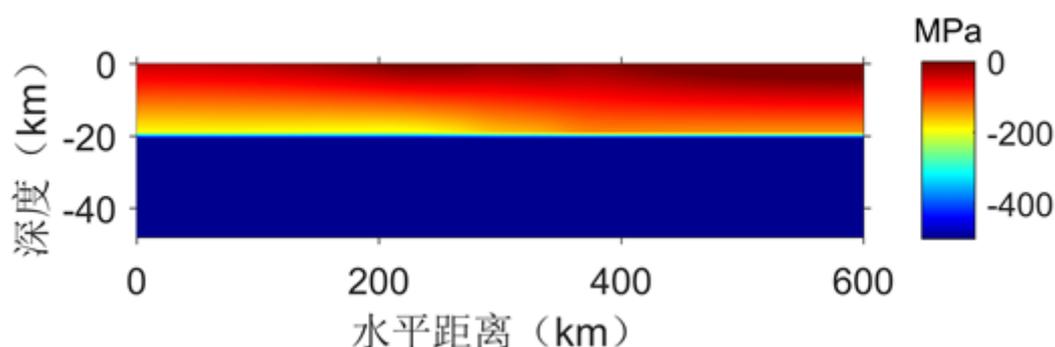
接收函数 H-k 叠加方法利用莫霍面上产生的转换波和多次波震相，可有效地探测台站下方该间断面的深度，不少研究者应用该方法研究了中国东部的地壳结构，而传统的接收函数 H-k 叠加方法用在沉积盆地区误差较大，难以直接应用。中国东部人口稠密经济发达，有很多中大型城市位于沉积盆地区内，盆地区由于存在较厚的沉积层对地震波有放大作用，研究盆地区的精细结构对于防震减灾、城市安全具有重要意义。同时，中国东部的盆地内具有丰富的油气资源，了解盆地结构也能为资源勘探提供参考。来自中国地质大学（北京）的张毅同学，针对 H-k 叠加方法在盆地区误差较大的问题，提出了改进的迭代 H-k 方法。在他的口头报告《应用改进的迭代 H-k 叠加方法研究中国东部盆地区的沉积层及地壳结构》中，采用该方法研究中国东部沉积盆地区沉积层及下方的地壳结构，得到了更精确的结果。得到了整个中国东部的沉积层及地壳结构，对整体结构变化有了更全面的认识。

强震震前(preseismic)动力学过程的研究对于地震预测具有十分重要的意义,但由于观测资料的限制,目前对强震前孕震区力学状态及其演化过程的认识还非常有限。2011 年日本东北 Mw9.0 特大地震(Tohoku-Oki)发生在 GPS 观测台站最为密集的地区,为研究特大地震震间(interseismic)与震前的变形状态提供了难得的机会。来自中国地震局地壳应力研究所的朱守彪研究员,利用日本东北大地震之前连续的 GPS 观测资料,分别计算震间与震前的速度场与变形场。在他的口头报告《2011 年日本东北大地震(Mw=9.0)震间与震前变形场特征及其对地震预报的启示》中,发现日本东北地区(Tohoku)震前的应变状态与震间的有很大的不同,震间的变形主要受到太平洋板块向日本海沟北西西向的俯冲挤压作用所控制,其主压应变以近东西向压缩为主,日本东北地区的运动方向与太平洋板块的运动方向大体一致。但是,临近地震前(震前)日本东北地区的运动方向发生了很大变化,震前 30 天的连续 GPS 观测结果显示,速度场的优势方向经常变换,间歇性地出现与太平洋板块运动方向相反的情况。这意味着震前孕震区的力学状态发生了很大的改变。这种变化可能与震前破裂成核或慢滑移及慢地震等过程有关,这些过程将加速或促进大地震的发生,从而为大地震的发生准备了力学条件。值得特别强调的是,这些现象都是可以通过直接观测能够发现的大地震之前的异常现象。由此可见,加密 GPS 站点进行连续观测,寻找震前变形异常区以及探索异常的物理机制对于地震预测预报有重要的科学意义。

流变性是地球介质的重要特征,直接影响了地球介质在不同的时空尺度的变形和动力学过程,是地球自由振荡、地震孕育、发生及震后调整、冰后回弹、地壳变形、造山运动、深浅物质耦合等方面研究的重要理论基础。来自中国科学院大学地球与行星科学学院的胡才博教授。在他的口头报告《四种常见黏弹性流变模型的理论推导、有限元实现及其地学应用》中,系统开展了四种常见的黏弹性流变模型的理论推导、有限元程序实现及其地学应用的研究工作。详细推导了以上四种常见黏弹性流变模型的一维、二维、三维本构关系,以及对用的有限元方法的离散格式,强调了二维本构与一维、三维本构之间的联系和区别。通过对应

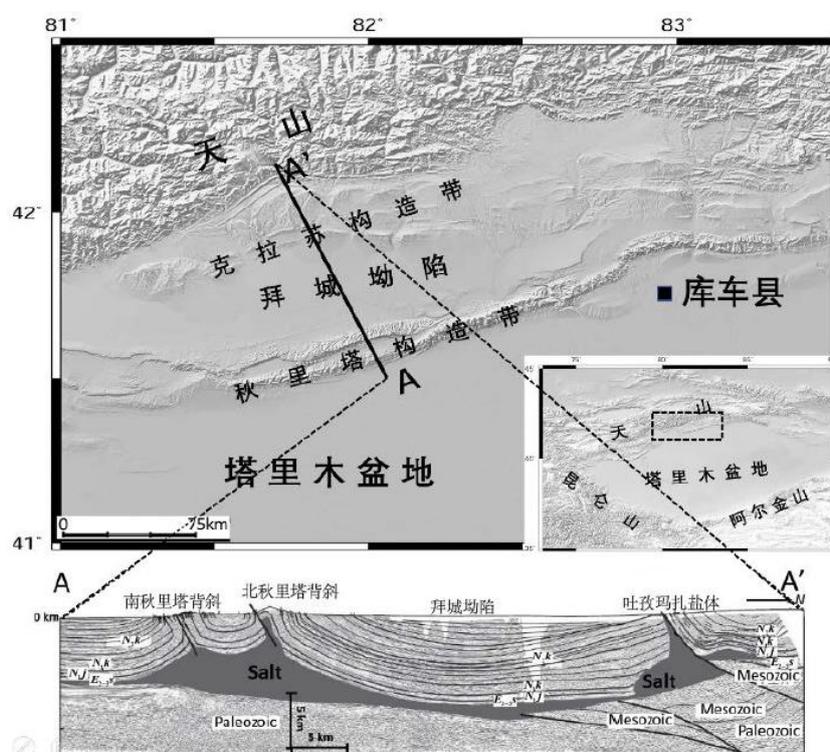
原理，针对以上四种不同的黏弹性流变模型，分别推导了几个典型的力学问题的解析解。在此基础上，自主开发了四种模型的黏弹性有限元程序，并通过解析解验证了黏弹性有限元程序的正确性。最后，还自主研发了弹性、黏弹性不同线性元件任意组合之下的黏弹性有限元程序。该程序可以很方便地考虑地球介质的分层不均匀性和横向不均匀性，可以同时考虑重力和构造加载对黏弹性松弛过程的影响，可以比较不同黏弹性流变模型的地球动力学过程的差异性。最后，本研究利用自主研发的黏弹性有限元程序研究了挪威北海北部地区自 1.1Ma 以来的冰后回弹曲线。结果表明，不同的流变模型模拟得到的地表抬升曲线有一定的差异性，其中 Maxwell 黏弹性模型与实际观测曲线有较好的一致性。本研究对于建立统一的地球介质流变模型具有一定的理论意义。

全球变暖导致气温升高，冰川融化，海平面上涨。由此引发了一系列地质现象，由于地球介质的粘弹性，在冰川载荷减小后，地面发成冰后回弹的现象。来自中国科学院大学计算地球动力学重点实验室的孟秋同学利用自主开发的平面应力黏弹性有限元程序对挪威北海地区冰川消融引起的地表冰后回弹问题进行了模拟与讨论。在他的报告《利用 Maxwell 黏弹性有限元模型研究冰后回弹》中，研究了冰川消融对地应力的影响，并讨论了其跟古今地震活动性的联系，对利用黏弹性模型研究冰后回弹和地震孕育问题有着重要的作用。



冰后回弹应力模拟

在盐盆地系统，盐体周围的应力及孔隙流体压力扰动对油气资源的运移、集、储存、勘探与开发都非常重要。特别是在盐构造周围或穿过盐构造钻井时，如果对这种应力及孔隙流体压力扰动没有清楚的认识，常常会导致许多工程问题造成巨大经济损失及重大工程事故。中国科学院大学的王明文在他的报告《数值模拟盐体几何起伏导致的应力扰动:以库车坳陷克拉苏西剖面盐构造为例》中，使用有限元方法设计了三个凸起-凹陷相互组合的双层盐模型，并计算了其周围的应力扰动，结果表明盐体几何形状与其周围沉积物中的应力扰动有很大关系。报告中提到的结论为盐盆地系统盐体周围应力扰动的预测提供了一定的科学依据，也帮助认识和理解盐盆地系统的孔隙流体压力。



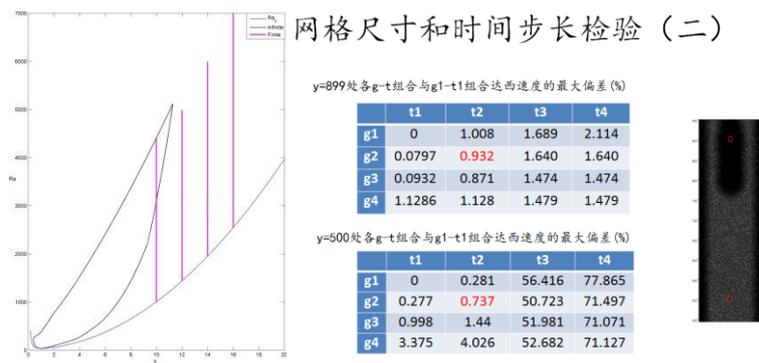
塔里木盆地北缘库车坳陷主要地质构造及库车坳陷克拉苏以西地震剖面

地壳和地幔中的固体岩石具有显著的粘弹性性质，即在低温和快速变化的载荷作用下变形由可逆的弹性应变占主导，而在高温和缓慢变化的载荷作用下变形以不可逆的粘性流动为主。弹性岩石圈的定义以及弹性岩石圈厚度的确定是地球动力学研究的中心课题。事实上，弹性岩石圈并没有一个截然的下界面。弹性岩石圈的一种定义方法是借助于岩石的粘弹性松弛时间（粘度与弹性模量之比）。

根据松弛时间定义的弹性岩石圈厚度在原理上无懈可击,但由于地下岩石的粘度无法精确测量,并不能实际应用于具体区域的弹性岩石圈厚度确定。在地球动力学研究中,弹性岩石圈厚度通常由弹性板弯曲分析反推,即通过以弹性薄板在静岩恢复力(浮力)作用下弯曲的解析解拟合实测岩石圈弯曲导致的地形(如岛链、海沟的外缘隆起位置)来反演岩石圈的抗弯刚度进而确定弹性岩石圈等效厚度。这样得到的弹性岩石圈厚度与根据松弛时间定义的弹性岩石圈厚度是否一致并没有经过严格的检验。来自中国科学院大学地球与行星科学学院的王世民教授,利用变粘度可压缩粘弹性有限元模型定量研究岩石圈在表面垂向载荷作用下弯曲的粘弹性松弛问题。在他的口头报告《岩石圈粘弹性松弛及其对弹性岩石圈厚度影响》中,展示了其研究结果。模拟结果显示,外缘隆起位置具有先向弯曲中心运动而后向弯曲外侧移动的特点,反向运动发生在载荷作用约 9 Ma 后。与基于松弛时间定义的弹性岩石圈厚度相比,基于弹性板弯曲解由外缘隆起位置约束弹性岩石圈厚度的方法仅在载荷作用后 0.2-5.0 Ma 的时间段内能够给出较为合理的结果。

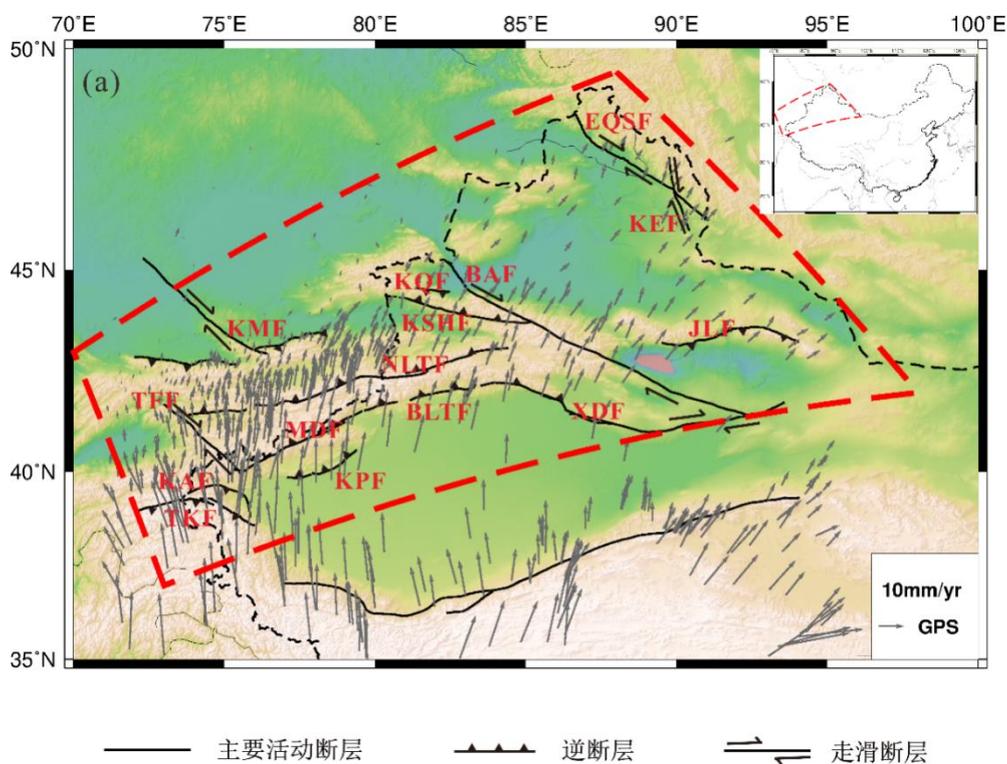
内核的热历史和地磁场的演化、地核结构的起源、核幔耦合以及核的物理性质密切相关,因此是地球物理需要研究的重要问题之一。在 1000km 量级的大尺度上,内核是近乎球对称的一维结构,但更加细致的地震学结构表明内核结构的复杂性。尽管内核是否存在热对流一直存在较大的争议,但弱热流的可能性将会给予内核复杂的地震学结构赋予更丰富的解释。基于此问题,来自中国科学院大学地球与行星科学学院的余洪政同学建立了一个基本模型:在大尺度上内核区域温度场服从热传导方程,同时内边界保持绝热,外边界温度等于相应压力下的凝固点。在他的口头报告《内核的扩张及其热演化》中,通过数理方程求解出内核随时间演化的一维温度瞬态剖面。并对该剖面进行线性稳定性分析,判断出内核扩张过程中发生对流的位置和时间。当对流发生以后,通过球谐展开的方法将对流方程转化成关于级数系数的非线性方程组。由于对流方程的强非线性,相应得到的系数方程组也具有强非线性。利用对流刚发生的临界点附近得到的弱对流近似解作初值进行迭代,不断计算内核扩张的热演化过程。

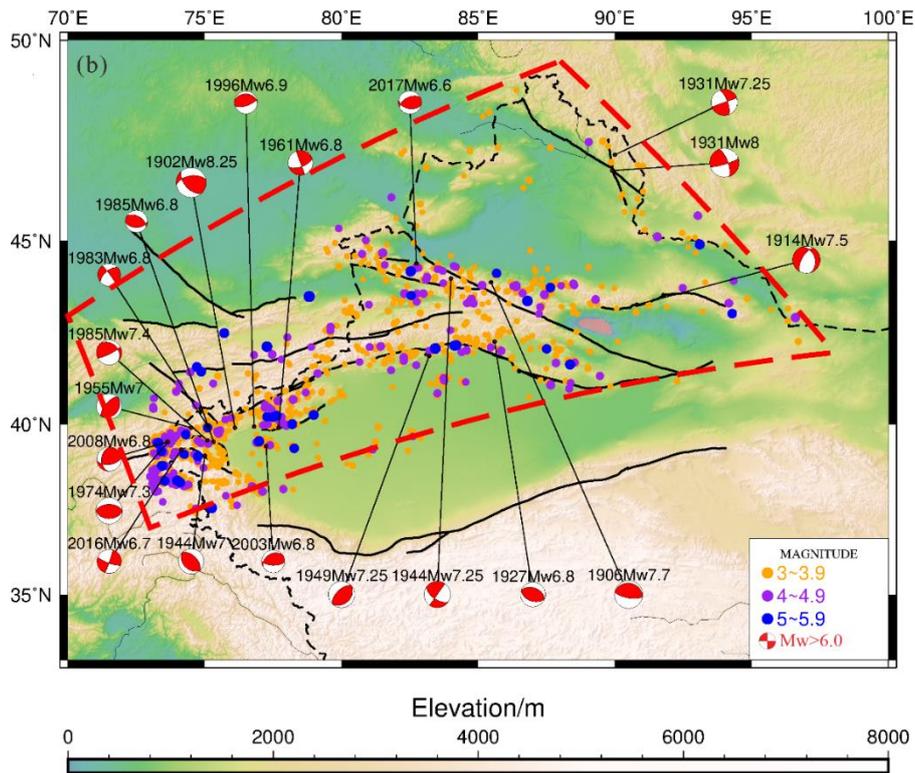
当前，地热发电受到各国政府和科学家们的广泛关注。通过在储层中构建封闭的管道，使进入发电机组的传热流体与储层物理隔绝，可以实现清洁、高效地开发地热能。单井式封闭系统的采热效率有限，而多用于家庭式的小型地热系统；多井 U 型封闭式地热系统的采热效率更高，适合于地热发电。前人对多井 U 型封闭式地热系统的研究着重在封闭管道内部传热流体的种类、注入流量，以及管道半径和长度对采热的影响，而将储层中的传热过程视为传导。由于传导方式的传热效率低，为了在生产井处获得足够高温度的传热流体，需要封闭系统的水平井足够长。增加水平井的长度将大大增加建设的成本，不利于对地热能的开发利用。众所周知，对流的传热效率远远高于传导的传热效率，为此，他们设想在具有自然对流发育的高渗透储层中使用多井 U 型封闭式地热系统。



在本次年会中，来自中国科学院大学地球与行星科学学院的张连平同学，在他的口头报告《自然对流在封闭式地热系统中的应用》中，从孔隙介质中自然对流的结构及其稳定性出发，集中展示了在具有自然对流发育的高渗透储层中多井 U 型封闭式地热系统水平井段的采热过程，以及储层中的换热过程，并系统地介绍了影响多井 U 型封闭式地热系统的水平井段采热的主要因素。他们的研究结果显示：在具有自然对流发育的储层中多井 U 型封闭式地热系统可以获得很好的采热效果，储层中水平井的井位、储层的渗透率和储层的高宽比对多井 U 型封闭式地热系统水平井段的采热有重要的影响。

新疆地区位于我国西北部，是我国主要的地震活动区，由于其复杂的地质背景和强烈的地震活动，引起了许多国内外学者的关注，成为当今地震问题的研究热点地区之一。来自中国科学院大学计算地球动力学重点实验室的王子韬同学建立了新疆地区二维弹性有限元模型，对新疆地区应变应力场变化与积累进行了模拟与研究。在她的报告《新疆北部地区孕震应力场特征及断裂带活动性数值分析》中，给出了新疆天山地区应力与应变场年变化量，得出了天山地区应变能积累速率，并对地震危险度进行了评估。对新疆地区地震活动性和地震序列的研究有十分重要的意义。





地幔过渡带处于上下地幔之间，是了解地幔温度结构、化学成分以及动力学过程的关键区域。地幔过渡带的上下边界为两个地震不连续界面,深度约为 410 公里和 660 公里左右。普遍认为,410 和 660 不连续面的存在与橄榄石矿物的相变有关: 410 对应橄榄石(olivine)到瓦兹利石(wadsleyite)的相变; 660 对应林伍德石(ringwoodite)到布里奇曼石(bridgemanite)和铁方镁石(ferropericlasite)的相变。在以往的研究中, 410 和 660 间断面的深度(或地幔过渡带厚度)被广泛用于推断地幔过渡带的温度结构。然而到目前为止,人们对地幔过渡带化学结构的认识仍然非常有限。在本次年会中,来自南方科技大学的俞春泉博士,在他的口头报告《利用反射地震学约束地幔过渡带温度结构和化学成分》中,采用基于曲波变换的地震台阵处理技术,显著提高了 SS 和 PP 前驱波的信噪比,并消除了干扰震相,从而可以在更大的距离范围内识别和测量前驱波。在此基础上,成功地提取了传统方法难以观测到的 P660P 信号。引入了振幅随震中距变化(AVO)的分析方法,有效约束了 410 和 660 间断面两侧弹性参数(包括速度和密度)的差异。结合矿物物理模拟结果,发现在全球范围内,410 和 660 的 PP 和 SS 前驱波的振幅趋势接近于 pyrolitic 地幔成分模型预测的结果。

ULVZs can provide important information of CMB compositions and dynamics. However, their distribution and characteristics are not well constrained. Doctor An Fan, who came from Guangzhou Institute of Geochemistry Chinese Academy of Sciences, use ScS precursor (SdS) and the postcursor (ScscS) phases recorded by USArray and various seismic networks in Africa to study the ULVZs near the northwest and southwest boundary of the Africa LLSVP. In his oral report < Distribution and Characteristics of ULVZs near the Boundary of the Africa LLSVP >, he use the Flip and Reverse Stacking (FRS) method (Zhao et al, 2017) to stack and enhance ULVZ reverberations (if any). Then we compare stacked waveforms with synthetics from different ULVZ models (S-wave velocity reduction, density perturbation, layer thickness) to obtain the best one. Our preliminary results show that ULVZs are located inside the Africa LLSVP, with thicknesses ranging from 10-15km, S wave velocity reductions of 20-30%, and density increases of 6-10%. At the same time, a thin highvelocity layer with thicknesses of 20-30 km, Vs increases of 3-4% and density increase is about 8%, is also detected outside the LLSVP in the northwest region, and there is clear D layer on the far west. The lateral change of different structure across the LLSVP may indicate interactions of the LLSVP with the ambient mantle, which gradually change the temperature/composition of the materials above the CMB, and result in different structures.

来自中国科学院地质与地球物理研究所的李娟同学，在她的张贴报告《西北太平洋和汤加俯冲地区深震特殊聚簇的特性及成因探究》中，对比研究了具有不同热参数、不同俯冲形态的西北太平洋俯冲地区和汤加俯冲地区的深震特殊聚簇的地震学特性和成因。利用单键群方法探测到两个特殊的深震聚簇 G1N 和 G1T。聚簇 G1N 位于地震空区下方，具有极低的 b 值 (~0.54)，完全不同于具有高 b 值 (~1.04) 的汤加俯冲地区聚簇 G1T。通过对聚簇地区板块形态、地震主应力轴、地震深度分布特征的分析，以及和汤加典型的板片折曲处地震活动性的对比，认为深震聚簇 G1N 附近的板块表现出板片折曲的特征，板块俯冲到地幔过渡带底

部受到下地幔的黏性阻力，板片局部向上凸起发生折曲，产生局部的拉张应力，叠加在俯冲造成的压缩构造背景上，应力状态发生改变，从而影响该深震聚簇的地震活动性。

Previous seismological studies have focused on the large - scale heterogeneity of the D'' layer beneath East Asia. Seismological tomography studies suggested that the high - velocity anomaly in the lowermost mantle beneath East Asia may be attributed to ancient subducted slabs. Doctor Baolong Zhang, who came from Institute of Geodesy and Geophysics Chinese Academy of Sciences, use high - frequency PcP precursors recorded at dense networks in China and Japan to constrain the small - scale heterogeneity in this region. In his oral report < Lowermost Mantle Beneath East Asia and Implication for Its Mineralogical Origin >, By forward modeling of the stacks of recorded PcP precursory signal, he find that the small - scale heterogeneity in the D'' layer beneath East Asia is characterized by a P wave velocity perturbation of 0.1 - 0.2% and a dominant length scale of 4 - 20 km (Zhang et al., 2019). Although the resolved length scale is similar to the dimension of the subducted oceanic crust, the weak velocity perturbation is difficult to explain by basaltic rock in the lowermost mantle. The subducted slab material near the CMB could have lower temperatures relative to the ambient mantle; thus, it may preferentially undergo transition from bridgmanite to pPv at a given pressure.

深震激发的小震中距核幔反射震相有利于局部地区下地幔衰减特征研究，这是由于此时射线近垂直入射，能较好的确定采样位置，且参考震相 p 或者 s 震源以上位置与核幔反射震相路径相似能较好地消除浅层衰减的影响。来自中国科学院测量与地球物理研究所的张宝龙博士，在他的张贴报告《基于小震中距核幔反射震相幅度信息的东北地区下地幔衰减特征研究》中，以中国东北地区为例，测量了高频段(~1Hz)垂向分量上 p 波与小震中距(<10°)ScP 震相，以及切向分

量上 s 波与 ScS 的幅度比。通过射线理论和 Axisem 数值方法进行了正演计算，校正了辐射花样、扩散系数、反射系数等因素对震相幅度信息的影响。之后，与实际观测对比拟合，给出了东北下地幔 Q_{α} 和 Q_{β} ，认为东北下地幔的温度较低，并结合前人研究结果和该区域的层析成像结果进行综合分析并讨论下地幔的状态。

地幔间断面（如 410、660）特征可有效约束地幔化学组分和温度异常，对于地球动力学研究有重要的意义。PP 及其前驱波方法有全球采样的优点，其到时差及振幅比被广泛应用于地幔间断面起伏以及两侧介质阻抗的测定。在该方法中，为获得准确的测量结果，需要定量分析近地表以及地幔复杂结构导致的波形不确定性。对于地幔复杂结构导致的不确定性，前人进行了大量的研究，而近地表复杂结构的影响尚需进一步研究。来自南方科技大学地球与空间科学系的周勇博士，在他的口头报告《近地表复杂结构对 PP 及其前驱波到时差及振幅比的影响》中，基于广义反透射系数方法发展可快速准确模拟 PP 及其前驱波波形的 FAPPWF 算法。在通过理论和算例验证准确性后，定量研究海水深度以及地壳厚度对 PP 及其前驱波到时差及振幅比的影响。借助于 PREM 及 Crust1.0 模型，我们给出了考虑近地表复杂结构导致的全球 PP 及其前驱波到时差及振幅比异常。在该异常分布中，发现明显的海陆分布特征，可将其应用于 PP 及其前驱波方法中的近地表结构影响校正。

The diurnal tidal forces can excite a normal mode of the Earth's core, the free inner core nutation (FICN), which is characterized by a tilt of the rotation axis of the inner core with respect to the rotation axis of the outer core. The differential rotation between the inner core and the outer core induces fluid motions in the outer core and gives rise to Ohmic dissipation in the presence of the Earth's internal magnetic field. Nutation measurements can reflect such dissipation if it is sufficiently strong and thus can provide insights into the properties and dynamics of the Earth's core. Doctor Yufeng Lin, who came from Southern University of Science and Technology, perform a set of numerical calculations of the linear perturbations in the outer core induced by

the FICN at very low Ekman numbers (as small as 10^{-11}). Our numerical results show that the back-reaction of the magnetic field notably alters the structure and length scale of the perturbations induced by the FICN, and thus influences the Ohmic dissipation resulting from the perturbations. When the Ekman number is sufficiently small, Ohmic dissipation tends to be insensitive to the fluid viscosity and to the magnetic diffusivity, which allows us to estimate the Ohmic dissipation associated with the FICN without relying on an extrapolation. In contrast to the results of Buffett (2010), the estimated Ohmic dissipation based on our numerical calculations is too weak to account for the observed damping of the FICN mode. This also implies that nutation measurements cannot provide effective constraints on the strength of the magnetic field inside the Earth's outer core.

参会人员及现场照片

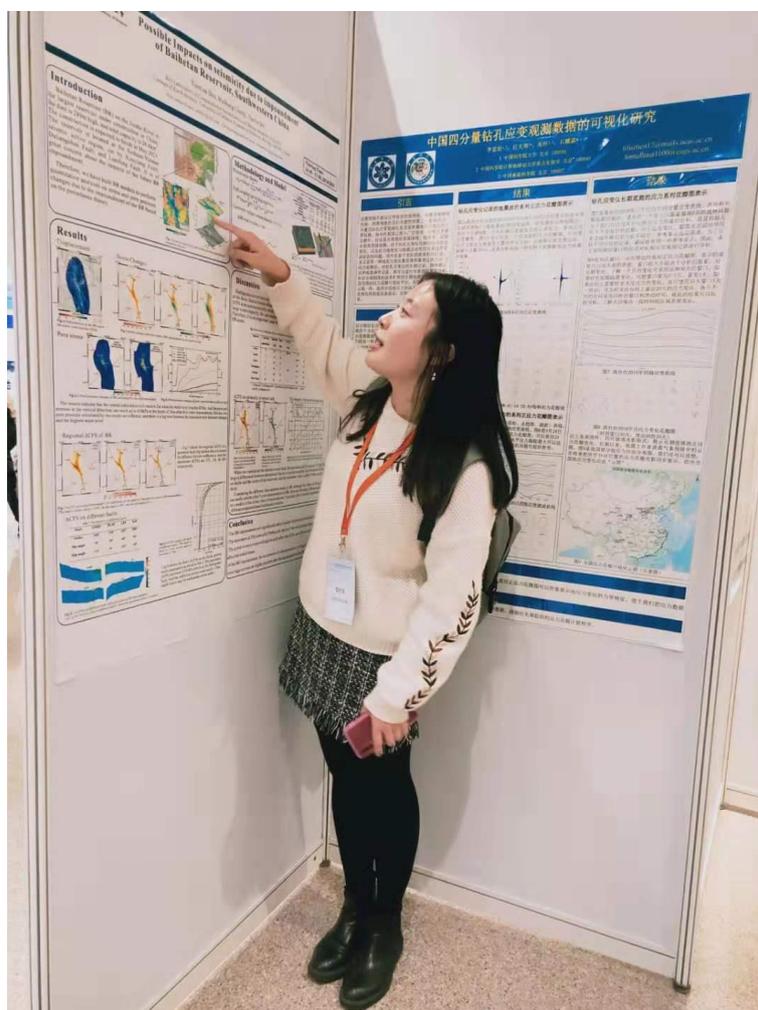
1. 王少坡博士的照片

来自中国科学院大学地球科学学院的王少坡博士在会上做了《鄂霍次克微板块东部俯冲带地区地震 b 值时空分布特征》的口头报告



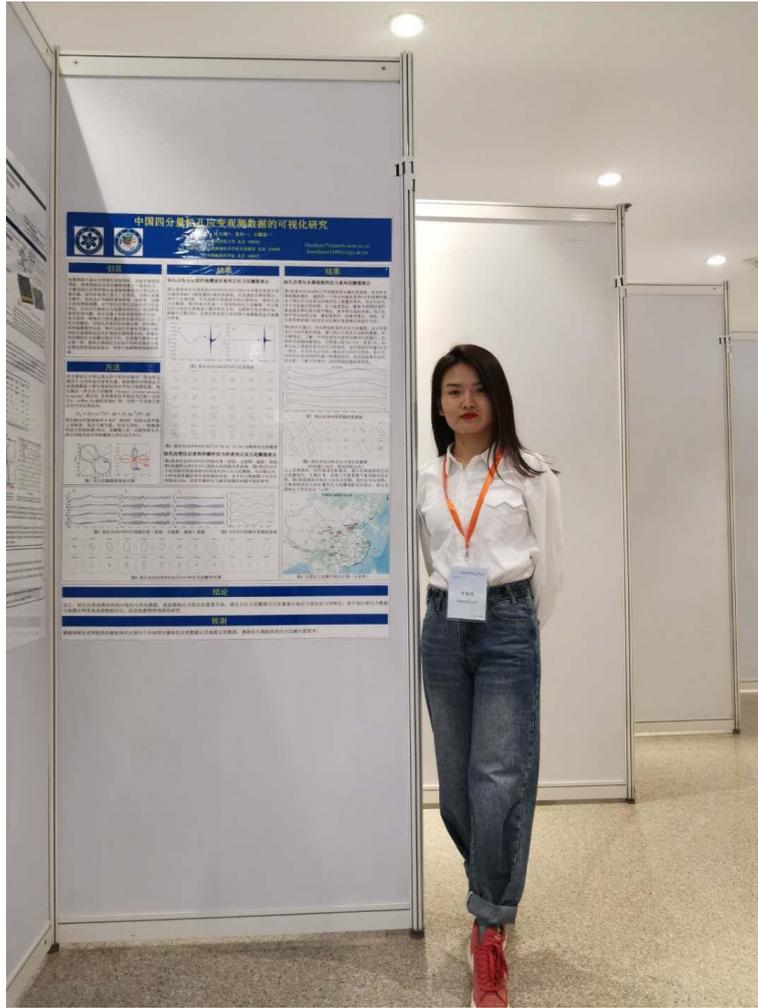
2. 窦甜甜博士的照片

来自中国科学院大学地球科学学院的窦甜甜博士在会上做了《白鹤滩水库蓄水对区域地震活动性影响的数值分析》的张贴报告



3. 李富珍博士的照片

来自中国科学院大学地球科学学院的李富珍博士在会上做了《中国四分量钻孔应变观测数据的可视化研究》的张贴报告



4. 王明文同学的照片

来自中国科学院大学地球科学学院的王明文同学在会上做了《数值模拟盐体几何起伏导致的应力扰动:以库车坳陷克拉苏西剖面盐构造为例》的口头报告

