

提名国家自然科学奖项目公示

项目名称	青藏高原前缘深部构造和陆-陆碰撞深部响应
提名单位	教育部
项目简介： <p>该项目属于地球科学领域。印度-欧亚大陆新生代陆-陆碰撞在我国西部形成青藏高原及其前缘强烈陆内变形和盆山构造格局以及地震活动。该陆-陆碰撞前缘（青藏高原前缘）是研究我国陆内弥散变形动力学及其资源环境响应关键地区。团队在国家自然科学基金和中国地震科学台阵探测计划（ChinArray）等课题支持下，自2000年起，围绕陆-陆碰撞前缘构造区深部构造及陆-陆碰撞深部响应等关键科学问题，探索岩石圈热-流变学结构，开展地震学、地热学和大地构造学科交叉的综合研究，取得了以下三方面的重要科学发现：</p> <ol style="list-style-type: none">1. 揭示了陆-陆碰撞前缘地壳上地幔结构多尺度不均一性<p>揭示了陆-陆碰撞前缘深部结构的多尺度横向差异性：发现青藏高原东部中下地壳低速异常广泛分布，而在高原东南缘及东北缘呈条带状分布，为地壳流的存在提供了地震学证据；青藏高原东部上地幔地震波速较低，鄂尔多斯和四川盆地波速较高，而秦岭造山带和高原东南缘上地幔顶部存在明显低速异常，刻画了克拉通和造山带不同深度上的结构差异；从地震学、地热学和流变学角度系统论证了青藏高原相邻的四川、塔里木和鄂尔多斯块体的刚性属性。</p>2. 确证了陆-陆碰撞前缘深部变形和地幔流动过程<p>从区域和局部尺度上揭示了青藏高原前缘的地震各向异性和地幔流动过程。发现青藏高原东北缘各向异性快波方向与造山带走向一致，揭示了壳幔耦合的垂向连贯变形；秦岭造山带之下软流圈各向异性明显，指示其向东流动。青藏高原东南缘各向异性快波方向在四川盆地西南缘发生明显变化：从北部近NS向变为南部EW向，刻画了青藏高原东部地幔物质环绕四川盆地西南缘流动的过程。</p>3. 阐明了陆-陆碰撞作用下青藏高原前缘的深部响应机制<p>阐明了西部陆-陆碰撞背景下，造山带和克拉通岩石圈软、硬相间的流变格局控制了中西部地幔差异流动和浅部陆内弥散变形响应机制。证实了陆-陆碰撞驱动的青</p>	

藏高原前缘深部地幔物质流动受到刚性的四川和鄂尔多斯块体阻挡而改变流向；发现了地幔流动已对扬子克拉通西南缘造成明显侵蚀破坏，甚至形成火山活动。提出塔里木、四川和鄂尔多斯块体边缘在深部岩石圈热-流变结构不均一性和区域挤压应力作用下易于变形，形成山脉和板内地震活动带。

本项目已发表 SCI 论文 59 篇（含 [Nature Index 论文 15 篇](#)），其中 8 篇代表作被 Nature 子刊、Earth-Science Reviews、Earth and Planetary Science Letters、Journal of Geophysical Research 和 Geophysical Research Letters 等期刊引用 361 次。项目揭示了西部陆-陆碰撞前缘深部结构和动力学过程，深化了对地球深部和地表过程相互作用规律的认识，提升了我国在陆内弥散变形研究领域的影响力。成果得到中国科学院院士曾融生、汪集旻、石耀霖、金振民、郑永飞、高锐和徐义刚等专家团队的认可和引用。项目所在单位受邀成为美国地震学研究联合会（IRIS）国际会员。项目带动了一批优秀青年人才的成长，项目组成员先后入选中组部“青年千人”、德国洪堡学者、教育部新世纪优秀人才，荣获傅承义青年科技奖和刘光鼎地球物理青年科技奖。研究成果曾两次获得教育部自然科学一等奖（2004/2018）。

客观评价:

本项目在 **Earth and Planetary Science Letters (EPSL)**、**Journal of Geophysical Research (JGR)**和 **Geophysical Research Letters (GRL)**等地球物理国际一流期刊上发表 SCI 论文 59 篇 (含 **Nature Index 论文 15 篇**)，8 篇代表性论文被 **Nature** 子刊、**Earth-Science Reviews**、**EPSL**、**JGR** 和 **GRL** 等期刊引用 361 次 (**附件 3**)。成果受到国内外相关同行的关注、评价与引用。

1. **关于“陆-陆碰撞前缘地壳上地幔结构多尺度不均一性”的客观评价:** 本项目揭示出的青藏高原东缘及邻区深部结构特征为相关研究提供重要的深部地球物理资料,引起了同行广泛关注与引用。其中,关于青藏高原东北缘壳内低速层的研究成果 (**代表性论文1**) 自2015年发表以来,已被**Nature Communications**、**JGR**、**EPSL**、**GRL**、**Tectonics**等在内的国际一流专业期刊多次正面引用。GRL主编、美国普渡大学 Lucy M. Flesch教授2018年在**Nature Communications** (IF=12.353) 论文中讨论印度-欧亚大陆碰撞带的三维地球动力学过程时就利用了 Bao et al. (**代表性论文1**) 给出的地壳速度模型构建几何模型(We combine observations of mid-to-lower crustal low-velocity zones from receiver function analyses^{49,55,58-61}, joint analyses of receiver functions and Rayleigh wave dispersion^{57,62,63}(Bao et al., 2015) ...) (**附件2-他人引用1**)。英国剑桥大学 Bullard 地球物理实验室 Keith Priestley 教授2015年在**JGR** (IF=3.482) 发表的关于青藏和喜马拉雅地区地壳结构的文章中多处援引 Bao et al (**代表性论文1**) 提出的青藏东南缘中地壳低速层的成果 (**附件2-他人引用2**)。中国科学院院士、著名地球物理学家高锐教授团队近年来在**EPSL** (IF=4.581) 上发表的相关文章中也多处引用 Bao et al (**代表性论文2**) 给出的青藏高原东北缘祁连山之下的壳内低速层认识 (**附件2-他人引用3**)。中国地震局地球物理研究所丁志峰、吴庆举团队在**JGR** (IF=3.482) 上撰文讨论青藏东南缘上地幔结构时全文**10**余处大幅度援引 Huang et al (**代表性论文3**) 的结果来验证他们基于接收函数给出的图景及扬子克拉通底下的深部高速异常和软流圈通道层等认识 (**附件2-他人引用4**)。

2. **关于“陆-陆碰撞前缘深部变形和地幔流动过程”的客观评价:** 本项目获得的中国大陆地区(区域尺度)和青藏高原东缘及邻区(局部尺度)的地震各向异性为探索地球深部动力学过程提供了关键信息,成果被同行广为引用。其中,发表在 **EPSL** (2011) 上关于中国大陆地区地震各向异性成果 (**代表性论文 6**) 目前已被 **JGR**、**GRL**、**EPSL**、**GJI**、**Tectonophysics** 和 **BSSA** 等期刊多次正面引用。美国知名地震学家、密苏里科技大学 Stephen Gao 教授 (GSA Fellow) 和 Kelly Liu 教授 (GSA Fellow, JGR 副主编) 课题组最近在 **Geochemistry, Geophysics, Geosystems** (2016) 上发表的关于天山地区地震各向异性研究中大幅度引用 Huang et al (**代表性论文 6**) 提出的天山地区地震各向异性的岩石圈起源来解释该区复杂的变形模式 (A comprehensive

SWS analysis beneath China including the Tian Shan was **carried out** by **Huang et al.(2011)**....., Upon observing the consistency of XKS fast orientations within the Tian Shan and the regional trend of orogenic belts and active regional faults, **Huang et al.(2011)** **proposed a lithospheric origin** for the observed anisotropy.) (见附件 2-他人引用 5)。

国家杰出青年基金获得者、中国科学院地质与地球物理研究所赵亮研究员课题组大幅度正面引用 Huang et al (代表性论文 7) 提出的印度—欧亚大陆碰撞作用引起软流圈流动的动力学模式来解释华北克拉通西部地震各向异性特征 (at the southern boundary of the NCC, our shear wave splitting results and previous results (Figure 7 **Huang et al. (2008)**) show that the NW– SE and E–W trending fast directions are subparallel to the trends of the Qilianshan Orogen and Qinling - Dabie Orogen. This **suggests** that the seismic anisotropy of the southern boundary is possibly the result generated by the India - Eurasia collision (e.g., **Huang et al., 2008**)) (见附件 2-他人引用 6)。

3. **关于“陆-陆碰撞作用下青藏高原前缘的深部响应机制”的客观评价：**项目提出的印度—欧亚大陆碰撞背景下造山带和克拉通不同岩石圈之间的软、硬相间格局控制了中西部深部地幔差异流动和浅部陆内弥散变形响应机制已被国内外同行用于解释青藏高原周缘观测到的各种地球物理现象。国际热流委员会 (IHFC) 主席、美国密歇根大学 Shaopeng Huang 教授 2012 年在 *Nature climate Change* (IF=19.181) 撰文探讨中国地热能资源潜力时，直接引用 Huang et al (代表性论文 6) 的研究结果来佐证中国大陆东部地区因深部活跃的岩浆侵入和火山活动而具有丰富的热源 (Geological and geophysical studies **show** that the region has been undergoing active magma intrusion and volcanism for millions of years (**Huang et al., 2011**)) (见附件 2-他人引用 7)。美国知名地震学家、西北大学教授 Seth Stein 教授 (AGU Macelwane Medal 和 EGU Mueller Medal 双料得主、欧洲科学院外籍院士) 和 Missouri 大学 Mian Liu 教授 (GSA Fellow, Tectonophysics 前主编、中组部千人计划) 于 2016 年应邀在 *Earth-Science Reviews* (IF=7.491) 联合撰写陆内地震研究进展的综述论文时引用了 **Bao et al** (代表性论文 4) 的结果来解释鄂尔多斯块体周缘的陆内地震孕育机制 (附件 2-他人引用 8)。

代表性论文专著目录:

1. Two crustal low-velocity channels beneath SE Tibet revealed by joint inversion of Rayleigh wave dispersion and receiver functions/*Earth and Planetary Science Letters*/ Bao X.W., Sun X.X., Xu M.J., Eaton D.W., Song X.D., Wang L.S., Ding Z.F., Mi N., Li H., Yu D., Huang Z.C., Wang P./ 2015 年 415 卷 16 - 24 页, doi: 10.1016/j.epsl.2015.01.020/2015-04-01
2. Crust and upper mantle structure of the North China Craton and the NE Tibetan Plateau and its tectonic implications/*Earth and Planetary Science Letters*/ Bao X.W., Song X.D., Xu M.J., Wang L.S., Sun X.X., Mi N., Yu D.Y., Li H./ 2013 年 369 卷 129 - 137 页, doi: 10.1016/j.epsl.2013.03.015/2013-05
3. Mantle structure and dynamics beneath SE Tibet revealed by new seismic images/*Earth and Planetary Science Letters*/ Huang Z.C., Wang P., Xu M.J., Wang L.S., Ding Z.F., Wu Y., Xu M.J., Mi N., Yu D.Y., Li H./ 2015 年 411 卷 100 - 111 页, doi: 10.1016/j.epsl.2014.11.040/2015-02-01
4. Lithospheric structure of the Ordos Block and its boundary areas inferred from Rayleigh wave dispersion/*Tectonophysics*/ Bao X.W., Xu M. J., Wang L. S., Mi N., Yu D. Y., Li H./ 2011 年 499 卷 1-4 期 132-141 页, doi: 10.1016/j.tecto.2011.01.002/2011-03-02
5. Thermal-rheological structure of the lithosphere beneath north flank of Tarim basin, Western China: Implications for geodynamics/*Science in China Series D-Earth Sciences*/ Liu S.W., Wang L.S., Li C., Li H., Han Y.B., Jia C.Z., Wei G.Q. /2004 年 47 卷 7 期 659-672 页/2004-07-15
6. Seismic anisotropy and mantle dynamics beneath China/ *Earth and Planetary Science Letters*/ Huang Z.C., Wang L. S., Zhao D. P., Mi N., Xu M. J./ 2011 年 306 卷(1-2)期 105-117 页, doi: 10.1016/j.epsl.2011.03.038/2011-06-01
7. Shear wave splitting in the southern margin of the Ordos Block, north China/*Geophysical Research Letters* / Huang Z. C., Xu M. J., Wang L. S., Mi N., Yu D. Y., Li H./ 2008 年 35 卷 19 期 L19301, doi:10.1029/2008GL035188/2008-10-01
8. P wave tomography and anisotropy beneath Southeast Asia: Insight into mantle dynamics/ *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*/ Huang Z.C., Zhao D.P., and Wang L.S./ 2015 年 120 卷 7 期 5154 - 5174 页, doi: 10.1002/2015JB012098/2015-07-21

主要完成人情况:

王良书, 排名第 1, 教授, 工作单位: 南京大学, 完成单位: 南京大学, 是该项目的组织、设计和主要实施者, 对发现点 1、2、3 均有主要贡献, 提出了陆-陆碰撞下青藏高原前缘的深部响应机制, 揭示了青藏高原前缘深部结构特征和深部变形流动过程, 提出了刚性克拉通块体在陆-陆碰撞过程中对陆内弥散变形的控制作用。是 8 篇代表性论文的合作者及代表性论文 5, 6, 7 的通讯作者。

黄周传, 排名第 2, 副教授, 工作单位: 南京大学, 完成单位: 南京大学, 项目主要参加者, 对科学发现 1, 2 和 3 有重要贡献, 发现中国东西部岩石圈变形存在巨大差异, 中国东部的变形主要集中于软流圈, 而中国西部的变形主要集中于岩石圈; 提出存在青藏高原东南缘至南中国海的软流圈物质流动, 该软流圈流可能造成了南中国海扩张停止。是代表作 3、6、7 和 8 的第一作者。

刘绍文, 排名第 3, 副教授, 工作单位: 南京大学, 完成单位: 南京大学, 项目主要参加者, 对科学发现 1 和 3 有重要贡献, 获得了中国主要克拉通块体的岩石圈热结构和流变学特征, 揭示了四川盆地岩石圈有效弹性厚度及各向异性, 论证了塔里木、四川和鄂尔多斯等块体的刚性属性; 揭示了岩石圈热一流变不均一性和构造继承性对陆内弥散变形的影响。是代表性论文 5 的第一作者。

徐鸣洁, 排名第 4, 教授, 工作单位: 南京大学, 完成单位: 南京大学, 是项目的组织者之一和主要参加者, 对科学发现 1 和 2 有重要贡献, 发现哀牢山-红河断裂带地壳上地幔结构和性质上存在明显横向不均一性和纵向分层特征, 下地壳存在低速, 且断裂带两侧 Moho 深度和低速层厚度明显不同, 壳幔边界的速度结构表现为速度递增的壳幔过渡带特征。代表性论文 1 的共同通讯作者, 代表性论文 2, 3, 4, 6 和 7 的合作者。

鲍学伟, 排名第 5, 研究员, 工作单位: 浙江大学, 完成单位: 南京大学, 项目主要参加者, 对科学发现 1 和 2 有重要贡献, 发现了华北克拉通西部具有高速克拉通根、青藏高原东南缘中下地壳条带状分布的低速层, 以及青藏高原东北缘祁连山西北部中地壳存在明显低速层, 论证了渭河-山西裂谷系岩石圈结构的这种不均匀性对整个裂谷系的多阶段演化有重要影响。代表性论文第 1、2 和 4 的第一作者。

完成人合作关系说明：

第 1 完成人负责组织实施了该项目的研究工作。项目五位完成人的完成单位均为南京大学，是长期合作研究的团队。其中，黄周传（第 2 完成人）、刘绍文（第 3 完成人）和鲍学伟（第 5 完成人）是王良书（第 1 完成人）或徐鸣洁（第 4 完成人）指导的博士生或博士后，他们参加了本项目中的自然科学基金重点基金、面上基金和地震行业专项等课题。