



青藏高原深部地球物理探测70年

滕吉文^{1,2,3}, 杨顶辉^{4*}, 田小波^{1,5}, 徐涛^{1,5}, 陈赞¹, 白志明¹, 梁晓峰¹, 张晰¹, 吴晶¹, 刘有山¹

1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 岩石圈演化国家重点实验室, 北京 100029;

2. 吉林大学地球探测科学与技术学院, 长春 130026;

3. 中国科学院大学, 北京 100049;

4. 清华大学数学科学系, 北京 100084;

5. 中国科学院青藏高原地球科学卓越创新中心, 北京 100101

* 通讯作者, E-mail: ydh@mail.tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2019-06-13; 收修改稿日期: 2019-08-22; 接受日期: 2019-09-04; 网络版发表日期: 2019-09-27

国家自然科学基金项目(批准号: U1839206)资助

摘要 青藏高原是全球海拔最高、规模最大、时代最新的陆-陆碰撞造山带。几十个百万年以来高原隆升、喜马拉雅山系崛起是地球演化史上最为壮观的构造事件之一。青藏高原壳幔结构和深部过程备受国内外地球科学家关注。近七十年来的地球物理研究与探索表明: (1) 青藏高原地壳巨厚, 岩石圈较薄; (2) 壳内存在软弱层, 但厚度和联通性有限; (3) 高原下地壳及Moho面广泛发育叠瓦状反射特征, 存在明显的脆性变形; (4) 喜马拉雅和拉萨块体南部存在双Moho现象/迹象; (5) 印度大陆岩石圈向高原下方俯冲的形态存在显著的东西向差异; (6) 高原主体上地幔各向异性以NEE向为主; (7) 青藏高原布格重力异常四周高、中间低, 异常场边界与地形梯度变化密切相关; (8) 高原内部磁异常较弱, 周边地区较强, 其分界与区域构造边界基本一致; (9) 青藏高原水热活动强烈, 大地热流值高, 主要来自加厚地壳的贡献。但是, 有关青藏高原深部过程, 诸如是否存在中/下地壳流、印度与欧亚大陆岩石圈的俯冲模式等重大科学问题目前仍存在争议。青藏高原地球物理和动力学研究是一个复杂的系统工程, 以科学问题为导向, 结合国家重大需求, 在关键区域组织实施综合地球物理探测, 可望在地质领域取得创新与突破。

关键词 青藏高原, 陆-陆碰撞, 深部地球物理探测, 壳幔结构, 大陆动力学

1 引言

青藏高原是目前地球上海拔最高、规模最大和时代最新的陆-陆碰撞造山带, 也是全球范围内壳幔结构最复杂、相互作用最活跃的带域之一(图1)。印度-亚洲大陆碰撞、喜马拉雅弧形山系的崛起和青藏高原的隆

升是新生代以来全球最为壮观的地球动力学事件, 形成了极其复杂的壳幔结构。特殊的大陆内部动力系统驱动高原地壳横向缩短达上千公里(Yi等, 2011), 增厚达70~80km (Teng等, 1981a, 2013; Zhang等, 2011a), 平均海拔超过4000m, 被誉为地球“第三极”, 并与地球南极和北极并列(Achache等, 1984; Dewey等, 1989)。青藏

中文引用格式: 滕吉文, 杨顶辉, 田小波, 徐涛, 陈赞, 白志明, 梁晓峰, 张晰, 吴晶, 刘有山. 2019. 青藏高原深部地球物理探测70年. 中国科学: 地球科学, 49: 1546-1564, doi: 10.1360/SSTe-2019-0132

英文引用格式: Teng J, Yang D, Tian X, Xu T, Chen Y, Bai Z, Liang X, Zhang X, Wu J, Liu Y. 2019. Geophysical investigation progresses of the Qinghai-Tibetan Plateau in the past 70 years (in Chinese). *Scientia Sinica Terrae*, 49: 1546-1564, <https://doi.org/10.1360/SSTe-2019-0132>

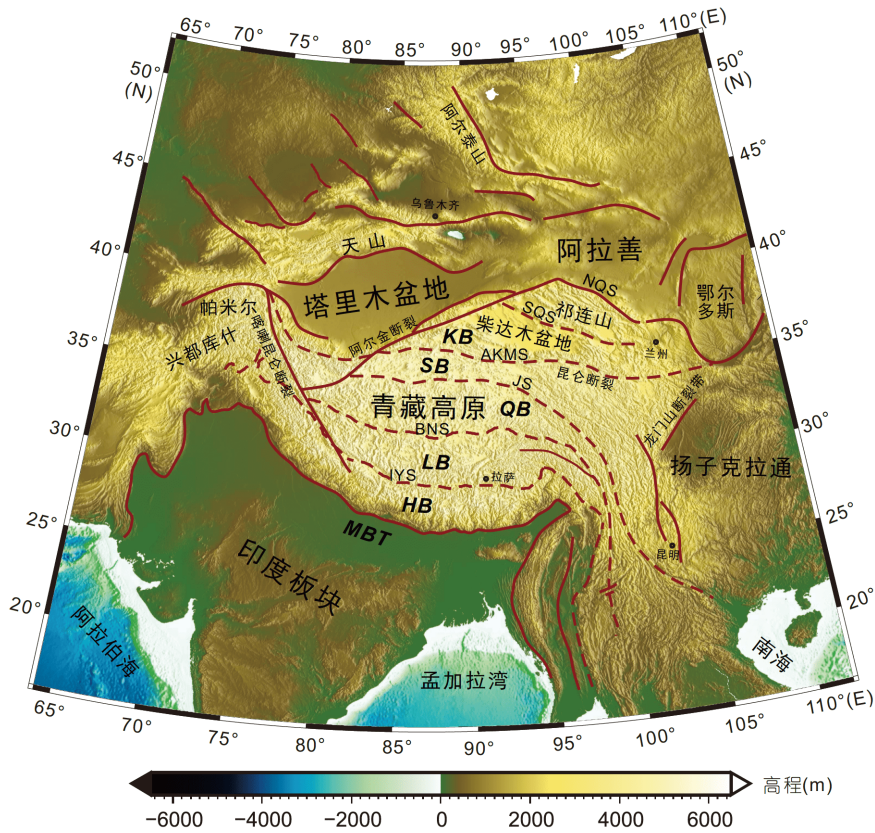


图1 青藏高原及邻区地质构造轮廓展布图

修改自Zhang等(2011a). MBT, 主边界逆冲断裂; IYS, 雅鲁藏布江缝合带; BNS, 班公-怒江缝合带; JS, 金沙江缝合带; AKMS, 阿尼玛卿-昆仑-慕孜塔格缝合带; SQS, 南祁连缝合带; NQS, 北祁连缝合带; HB, 喜马拉雅块体; LB, 拉萨块体; QB, 羌塘块体; SB, 松潘-甘孜块体; KB, 昆仑-柴达木块体

高原特有的重力场(Zhou等, 1981; Tang等, 1981)、地磁场(潘作枢等, 1981; Fei等, 1981)、电磁感应场(Chen G M等, 1981)、地热场(Wei等, 1981, Liao, 1981)及壳幔结构, 使之成为探索大陆内部变形、资源富集机制和地球层圈相互作用的最佳“天然实验室”, 也为研究大陆内部成山、成盆、成矿、成灾等深层过程与动力学响应提供了一个理解、发现和创新的科学园地。

从早期西方探险家到青藏高原的地质旅行, 到20世纪30年代在藏南地区的地质考察, 至今已近两个世纪。而系统地组织和开展青藏高原的地球物理观测和深部过程研究则始于1975年, 即中国科学院青藏高原综合科学考察队地球物理分队进藏开展综合地球物理观测。基于综合科学考察获得的第一批多学科研究成果, 1980年迎来了“青藏高原科学讨论会”在北京的召开。改革开放的大门开启了系列探测计划和国际合作项目的实施, 极大地丰富了青藏高原地球深部构造与

动力过程的研究, 获得了一批又一批新成果、新发现。

值此中华人民共和国成立七十周年之际, 回眸半个多世纪以来青藏高原地球物理研究的历程和所取得的成果, 总结存在争议和尚需深化研究的科学问题, 对于进一步揭示青藏高原的奥秘和引领未来科学研究是大有裨益的。但需要说明的是, 由于青藏高原地球物理探测成果十分丰富, 本文难以一一介绍, 尚需学界同仁多多谅解。

2 青藏高原地球物理学研究的发展历程

地球物理学是二十世纪中叶前后发展起来的一门交叉学科, 是探索和揭示地球内部结构和动力学过程的必要手段。通过地震波场、重力场、地磁场、电磁感应场、地热、以及放射性特征等数据采集和反演成像, 可以获得地球内部物理性质的认识。

2.1 走进地球物理学研究的“处女地”

新中国成立伊始, 社会主义建设事业千头万绪、百废待兴。中国科学院地球物理研究所成立后, 于1956年先后在西藏拉萨建立了地震台、地磁台、气象观测站。1958年在青海柴达木盆地开展了国内首次深地震反射探测, 揭开了利用现代地球物理探测方法研究我国大陆深部结构和动力学过程的序幕(曾融生等, 1961a, 1961b, 1965; 曾融生和阚荣举, 1961; 滕吉文等, 1973; 滕吉文, 1974)。这仅仅触及了青藏高原的最北缘, 而真正进入青藏高原腹地则是近二十年之后。

(i) 第一批地球物理数据的获得

1972年, 中国科学院在周恩来总理关于加强基础理论研究的指示下, 在甘肃省兰州市召开了“珠穆朗玛峰学术研讨会”, 并讨论和制定了《中国科学院青藏高原1973~1980年综合科学考察规划》。该规划的中心任务是: “阐明高原地质发展历史及隆升原因, 分析高原隆起后对自然环境和人类活动的影响, 研究自然条件与自然资源的特点及其利用改造的方向和途径。”中国科学院青藏高原综合科学考察队于1973年成立, 拉开了中国历史上对青藏高原进行大规模综合科学考察的序幕, 随后于1974年组成了地球物理考察分队, 并于1975年5月进藏开展工作。

中国科学院青藏高原综合科学考察队地球物理分队包括重力组、地磁组、大地电磁组、古地磁组、地热组、天然地震组和人工源地震探测组。天然地震组在林芝、亚东、察隅建立起4个地震台, 并在东构造结和当雄地区布设了小台网, 进行天然地震观测; 古地磁组在雅鲁藏布江南、北地带采集了大量岩石标本; 地热组进行地面水热活动的调查; 重力组和大地电磁组开展了长剖面测量; 人工源地震组利用湖水下大当量(5~15t TNT)爆炸进行了亚东-当雄近600km的长剖面观测, 成功获得了地下深达100km的壳幔结构信息。这是我国科技人员在青藏高原腹地采集的第一批宝贵的地球物理数据。青藏高原综合科学考察队回京后, 受到方毅副总理等国家领导人的接见, 并在1978年全国科学大会上受到国务院嘉奖。

(ii) 首批地球物理数据和成果引起国内外地球学界的高度关注

1980年5月25~31日, “青藏高原科学讨论会”在北京京西宾馆召开, 并由方毅副总理和中国科学院副院

长钱三强主持。参加这次国际学术会议的有180位中国科学家和来自法、美、英、俄、加、日、瑞、意、澳、印等18个国家的77位国外科学家。会议期间代表们受到邓小平同志的接见, 并合影留念。在这次国际会议上, 我国地球物理学家有两个大会报告, 即“Characteristics of geophysical fields and plate tectonics of the Qinghai-Xizang Plateau and its neighboring regions”(Teng等, 1981b)和“The distribution of earthquake foci and plate tectonics in the Qinghai-Xizang Plateau and its vicinity”(环文林等, 1980)。在地球物理分会场上, 我国科学家共做了31个学术报告(包括高原地热调查的10个报告; Liu, 1981)。此后, 陆续在国内外学术期刊上发表了系列论文(滕吉文等, 1985; 滕吉文, 2007; 潘裕生等, 1998)。该批成果(滕吉文, 2007; 孙鸿烈等, 2010; 马丽华, 2018)获得了世界各国科学家们的高度评价, 他们希望能与中国科学家合作, 早日进入青藏高原开展实地调查研究。

2.2 首个青藏高原地学国际合作项目

以“青藏高原科学讨论会”为契机, 我国开启了第一次与西方国家开展青藏高原地学研究的合作。法国外交部代表法方向中国外交部提出合作建议, 法方具体执行单位是法国科研中心(CNRS), 由著名地球化学家阿莱格格(Allègre C J)教授担任首席科学家。经过几轮会谈, 时任副总理兼国家科委主任方毅代表中国政府与法方正式签署了合作协议, 项目名称为中法“喜马拉雅地质构造与地壳上地幔的形成演化”, 执行时间是1980~1982年, 中方项目负责人为李廷栋教授。中法合作地球物理研究的主要内容包括宽角反射/折射地震探测、大地热流测量、古地磁和大地电磁测深及天然地震台站观测。在藏南和藏北分别进行了东西走向的人工源宽角反射/折射地震探测, 即普莫雍错-佩枯错剖面(1981年)、色林错-雅安多剖面(1982年)和一条近南北走向的萨马达-那曲剖面。完成了8个大地电磁测深点的观测, 记录的最长周期为1000s; 在湖中和陆上完成了21个点的大地热流测量, 又一次获得了青藏高原不同地域的第一手地球物理观测数据。

2.3 “亚东-格尔木”地学大断面

在中法合作研究基础上, 受国际岩石圈计划(ILP)的推动, 我国于1986~1989年开启了地学大断面的研

究, 其中包括“亚东-格尔木”大断面. 在地矿部和国家自然科学基金委的联合资助下, 中国地质科学院、中国科学院地球物理研究所和地质研究所、长春地质学院等共同沿亚东-格尔木进行了剖面长达1400km的综合研究(主要包括地质构造和综合地球物理探测), 依据国际编图规范编制了亚东-格尔木地学断面图, 并被国际地学大断面协调委员会推荐为国际GGT断面的样本(吴功建等, 1991)

2.4 首次宽频带流动地震观测(SinoUS91-92)

1991年4月至1992年7月, 中国国家地震局地球物理研究所与美国纽约州立大学Binghamton分校合作, 沿拉萨-格尔木青藏公路沿线及高原内部布设了11个流动观测站, 在青藏高原实施了首次宽频带流动台阵探测. 实验进行了为期1年的野外观测, 受当时存储设备等硬件限制, 采取了触发式记录方式. 利用观测资料开展了接收函数等早期试验研究(朱露培等, 1992; 丁志峰等, 1992; Owens等, 1993), 为后期大规模的宽频带流动地震观测积累了宝贵经验.

2.5 喜马拉雅和青藏高原深剖面研究(INDEPTH)计划

经过6年酝酿, 中、美、德三国于1991年发起了新一轮的青藏高原国际合作研究计划, 名称是“喜马拉雅和青藏高原深剖面研究”(International deep profiling of Tibet and the Himalayans, 简称INDEPTH). 针对的主要科学问题是“青藏高原和喜马拉雅的形成及演化机制与过程”, 手段包括近垂直反射地震、宽角反射/折射地震、天然地震台阵观测、大地电磁测深及重磁场观测等, 并于1992年正式开展野外试验工作. 该合作研究计划共分为四期实施, 即INDEPTH-I(1992~1994)、INDEPTH-II(1996~1998)、INDEPTH-III(1998~2001)、INDEPTH-IV(2005~2016). 该计划前后历时20多年, 取得了一批颇有影响的研究成果.

2.6 其他大型深部探测计划

除SinoUS91-92和INDEPTH外, 在青藏高原开展了诸多中外合作宽频带流动台阵观测, 如HIMNT(2001~2002)、West Kunlun(2001)、Hi-CLIMB(2002~2005)、Namcha Barwa(2003~2004)、MIT-China(2003~2004)、NETS(2008~2010)、West Tibet

(2007~2011)等.

近10年来, 我国先后启动了多个国家级/部门级深部探测计划, 主要包括深部探测技术与实验研究专项(SinoProbe, 2008~2014)、中国地震科学台阵探测(ChinaArray, 2010~2015)、中国科学院战略性科技先导专项(ANTILOPE, 2003~; SANDWICH, 2012~2016)和国家重点研发计划——深地资源勘查开采(2016~2020)等, 极大地促进了青藏高原及周边地区地球物理探测与深部过程研究.

3 青藏高原壳幔结构的地球物理探测成果

自20世纪50年代末在青海柴达木盆地开展人工源地震探测实验(曾融生等, 1960, 1961a; 曾融生和阚荣举, 1961; 滕吉文等, 1973; 滕吉文, 1974)以来, 国内外学者先后在青藏高原内陆及其周缘开展了宽角反射/折射地震探测、近垂直反射地震探测、宽频带流动地震台阵、大地电磁测深等多手段地球物理探测, 围绕高原壳幔结构开展高分辨反射成像、接收函数成像、体波和面波层析成像、各向异性研究及电性结构反演等, 其成果为开展青藏高原构造演化、强震孕育机理、资源富集机制等研究提供了重要科学依据. 由于篇幅所限, 以下仅简略介绍几种主要地球物理方法在青藏高原壳幔结构探测领域取得的代表性成果.

3.1 宽角反射/折射地震探测

如图2及表1所示, 据不完全统计, 自20世纪70年代以来在青藏高原腹地及其周边完成的典型宽角反射/折射地震探测剖面合计约24条, 累计长度达15000km左右.

基于系列宽角反射/折射地震探测剖面的开展, 滕吉文等(2012)提出了地壳和上地幔平均速度结构分层模型(图3), 还有诸多青藏高原的壳幔结构特征被揭示:

(1) 青藏高原腹地地壳厚度可达75km左右(图4), 上地幔顶部纵波速度为 (8.10 ± 0.05) km/s, 呈现巨厚地壳与薄岩石圈的特征(Teng等, 1981a, 1981b, 1983, 1985, 1994);

(2) 青藏高原地壳结构在纵向及横向上均呈现显著的不均匀特征, 地壳厚度由腹地中央的 (70 ± 5) km向四周以不同的梯度变浅为55~65km, 雅鲁藏布江地带地壳厚度为70~75km(Teng等, 1981a, 1981b, 2013);

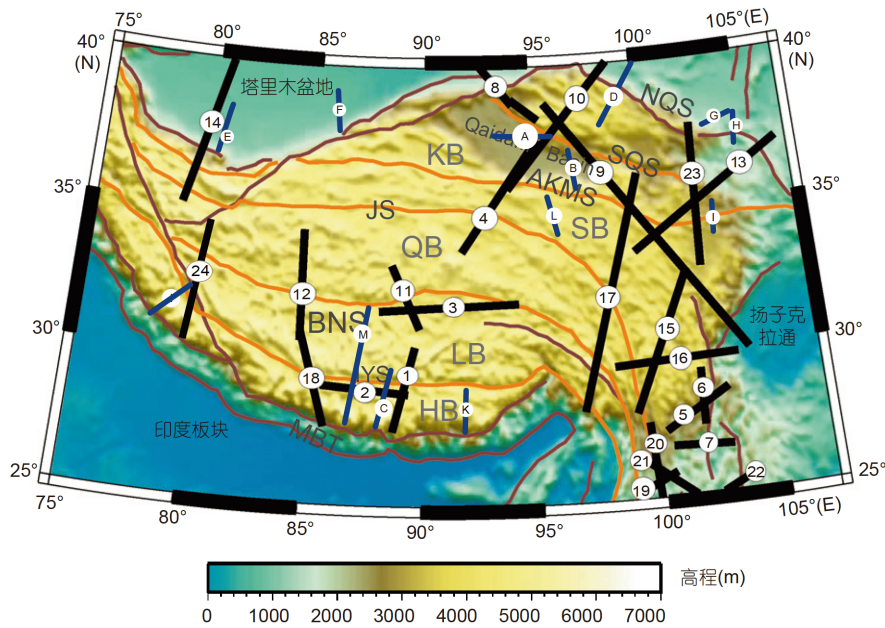


图2 青藏高原宽角反射/折射(黑线)和近垂直反射地震探测剖面(蓝线)位置分布图

修改自Zhang等(2011a); 剖面信息见表1、2

表1 青藏高原主要宽角反射/折射地震探测剖面一览表(剖面位置见图2)

编号	剖面名称	执行部门	年份	资料来源
1	亚东-当雄	中国科学院	1975	Teng等, 1981a, 1983
2	佩枯错-普莫雍错	中法合作	1981	Teng等, 1983; 张中杰等, 2002; Zhang和Klemperer, 2010
3	色林错-雅安多	中法合作	1982	滕吉文等, 1985; Zhang和Klemperer, 2005
4	沱沱河-格尔木	国土资源部	1988	卢德源和王香泾, 1990; 李秋生等, 2004
5	盐源-马边	中国地震局	2005	王夫运等, 2008
6	拉蚌-长河坝	中国科学院	1984	崔作舟等, 1987; 滕吉文, 1994
7	丽江-者海	中国科学院	1984	熊绍柏等, 1993
8	阿勒泰-阿尔金	国土资源部	1988	王有学等, 2004
9	阿尔金-龙门山	国土资源部	1989	王有学等, 2005
10	格尔木-额济纳旗	国土资源部	1992	崔作舟等, 1995
11	帕里-达吉	中美合作	1998	Zhao等, 2001
12	措勤-三个湖	中国科学院	1994	熊绍柏和刘宏兵, 1997; 熊绍柏等, 1998
13	玛沁-靖边	中国地震局	1997	李松林等, 2002
14	西昆仑-塔里木	国土资源部	1995-2000	李秋生等, 2000
15	唐克-奔子栏	中国地震局	2000	Wang等, 2007
16	竹巴笼-资中	中国地震局	2000	Wang等, 2007
17	下察隅-共和	中国科学院	2001	张忠杰等(个人交流)
18	措勤-樟木	中国科学院	1994	刘宏兵等(个人交流)
19	遮放-宾川	中国地震局	1982	胡鸿翔等, 1986; Kan等, 1986; 白志明和王椿镛, 2004
20	思茅-中甸	中国地震局	2002	林中洋等, 1993; 张智等, 2006
21	洱源-江川	中国地震局	2002	Kan等, 1986
22	孟连-马龙	中国地震局	1982	胡鸿翔和李学清, 1994; 白志明和王椿镛, 2004; 张中杰等, 2005
23	马尔康-古浪	中国地震局	2004	张先康等, 2008
24	札达-泉水沟	中国科学院	2011	王晓等, 2015

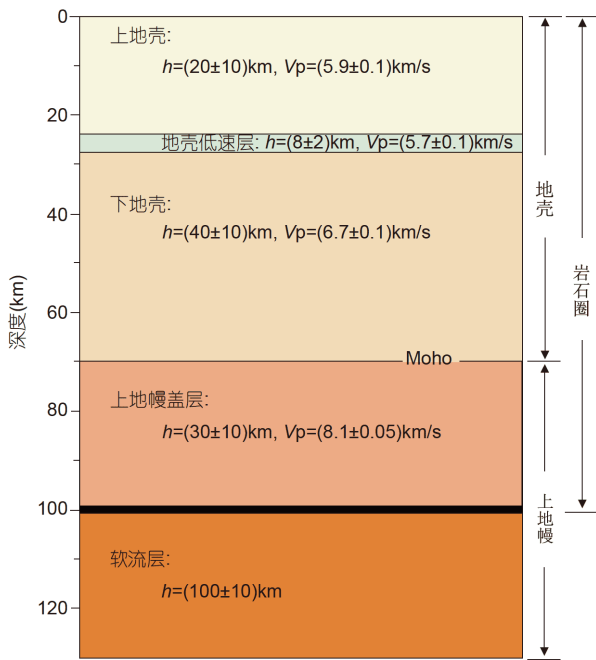


图3 青藏高原地壳与上地幔平均速度结构分层模型(修改自滕吉文等(2012))

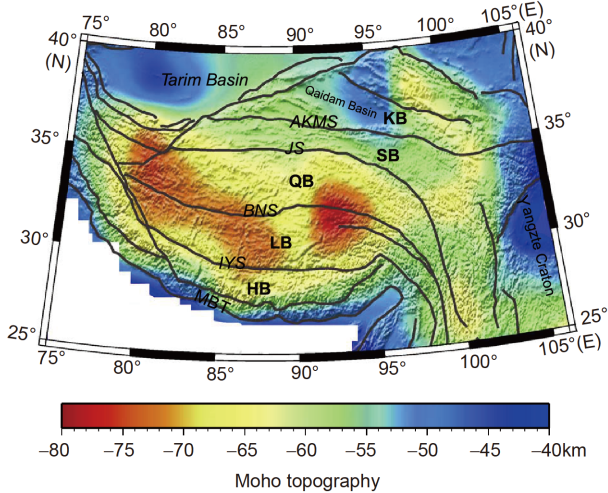


图4 由宽角反射/折射地震探测资料获得的青藏高原Moho面深度(修改自Zhang等(2011a))

(3) 高原中、上地壳存在低速层或局部低速区, 下地壳存在局部高速区, 呈高低速相间的层状结构(Hirn等, 1984a, 1984b; Teng等, 1985);

(4) 班公-怒江缝合带两侧Moho面出现错断, 向北抬升幅度约10km(熊绍柏等, 1998);

(5) 高原东北缘阿尼玛卿缝合带南侧的松潘-甘孜地体、青海贵德盆地及甘南碌曲附近均有厚达10km

左右的沉积盖层, 祁连地体下地壳存在纵波速度约6.4km/s的局部低速异常(Zhang等, 2011b; Zhang等, 2013; Liu等, 2006);

(6) 高原东缘的上地壳底部存在显著纵波速度低速层, 可能与以汶川地震为代表的区域重大地震孕育形成密切相关(Wang等, 2007);

(7) 高原东南缘莫霍界面总体形态由高原内部(中甸附近)的60km深度向南逐渐变浅至思茅附近约33km(阚荣举等, 1986, 林中洋等, 1993; 白志明和王椿镛, 2004; 王椿镛等, 2003; 王夫运等, 2014); 滇中块体下地壳存在显著高速异常体(徐涛等, 2014; Xu等, 2015); 攀西构造带为被动活化的古裂谷带(Teng, 1989), 该地区上地壳有高速火山岩分布, 地壳厚度为55km, 地壳内部低速层向西尖灭(Teng等, 1985; 熊绍柏等, 1993), 厚达9~14km(熊绍柏等, 1986; 尹周勋等, 1987; 滕吉文, 1994).

3.2 近垂直反射地震探测

除20世纪50年代首次在青藏高原北缘柴达木盆地开展近垂直反射地震探测外(曾融生等, 1961a, 1961b; 曾融生和阚荣举, 1961), 20世纪90年代以来基于国际地学合作INDEPTH等系列项目(Zhao等, 1993)及SinoProbe(2008~2014)的支撑, 在青藏高原腹地及周缘先后完成一系列近垂直反射地震探测剖面, 总长度达1500km左右(表2), 包括: 高原西北部与塔里木盆地相接部位的两条剖面(高锐等, 2001; Zhao等, 2006)、西南部跨雅江缝合带的两条剖面(Gao等, 2016)、沿日喀则-申扎-双湖一线开展的系列剖面(Zhao和Morgan, 1987; Zhao等, 1993, 2001; Gao等, 2013a, 2013b; Lu等, 2013, 2015; Guo等, 2017; 卢占武等, 2016;)及东北缘的多条剖面(Karplus等, 2008; Guo等, 2013, 2015, 2018; 高锐等, 2001, 2006)等。

通过这些近垂直反射地震探测工作, 获得了以下代表性成果:

(1) 发现喜马拉雅下方存在隐伏的大型逆冲拆离带(主喜马拉雅逆冲断裂MHT), 推测是印度地壳俯冲和折返的分界面(Zhao等, 1993; 赵文津, 2012);

(2) 显示雅鲁藏布江缝合带的深反射地震Moho界面深度在70~75km, 横过雅鲁藏布江缝合带并不存在前人认为的10~20km Moho错断(Gao等, 2016);

(3) 证实了班公-怒江缝合带附近, 拉萨块体和羌

表 2 青藏高原主要近垂直反射地震剖面一览表(剖面位置见图2)

编号	剖面名称	执行部门	年份	资料来源
A	鱼卡-甘森	中国科学院	1958	曾融生等, 1961a, 1961b; 滕吉文, 1974
B	格尔木-大柴旦	中国科学院	1958	曾融生等, 1961b; 滕吉文, 1974
C	帕里-羊八井	INDEPTH	1992	Zhao等, 1993
D	吊大板-花海	INDEPTH	1993	吴宣志等, 1995
E	西昆仑-塔里木	中国地质科学院	1998	高锐等, 2000
F	阿尔金-塔里木	中国地质科学院	1999	高锐等, 2001
G	靖远-新庄集	中国地震局	2008	张先康等(个人交流)
H	同心-新庄集	中国地震局	2008	张先康等(个人交流)
I	合作-唐克	国土资源部	2004	高锐等, 2006
J	西南缘剖面段	SinoProbe	2011	Gao等, 2016
K	南缘短剖面	SinoProbe	2011	Guo等, 2017
L	北缘短剖面	INDEPTH IV	2008	Karplus等, 2011
M	色林错-双湖	国土资源部	2009	Gao等, 2013a; Lu等, 2015; 卢占武等, 2016

塘块体的Moho界面存在5~10km的错断(南深北浅)(Gao等, 2013b);

(4) 青藏高原东北缘下地壳及Moho面广泛发育叠瓦状反射特征, 意味着下地壳存在明显的脆性变形(Wang等, 2011); 青藏高原中部跨班公-怒江缝合带, Moho界面深度从75减至69km左右, 存在约6km深度差异(Gao等, 2013a).

(5) 高原北缘与塔里木盆地之间存在分别以30°~40°相向对冲(Gao等, 2000).

3.3 宽频带地震探测

20世纪80年代以来中外学者在青藏高原及其周缘先后开展了大量天然地震观测, 利用所布设宽频带流动(图5)及固定台网采集获得的数据开展壳幔结构研究, 取得了如下代表性成果.

3.3.1 接收函数成像及虚拟震源测深

(1) INDEPTH-II剖面接收函数反演结果显示: 拉萨块体南部中地壳存在显著的低速层, 可能意味着该区存在中地壳部分熔融(Kind等, 1996; Nelson等, 1996);

(2) 喜马拉雅及拉萨块体(深度60~70km)存在“双莫霍”(Doublet)现象, 其成因可能与下地壳部分榴辉岩化有关(Kind等, 2002; Nábělek等, 2009; Singh等, 2010; Xu等, 2015, 2017; Zhang等, 2014b);

(3) Hi-CLIMB剖面显示: MHT从尼泊尔下方较浅

深度延伸到藏南下地壳深度, 由此推测印度地壳可能沿MHT向北到达31°N附近(Nábělek等, 2009);

(4) S波接收函数成像显示: 高原西部印度大陆岩石圈近水平俯冲、中部和东部俯冲角度向东逐渐增大(Zhao等, 2010; Zhao等, 2011);

(5) 虚拟震源地震测深结果显示: 拉萨地体南部地壳厚度约75km, 而高原中部羌塘地体下方地壳厚度仅60km左右(Tseng等, 2009), 在亚东-谷露裂谷附近, Moho面存在约10km的东西向错断(Tian等, 2015);

(6) 接收函数结果显示: 青藏高原北缘发现高原与柴达木块体之间存在10~15km的Moho错断(Zhu和Helmberger, 1998; Vergne等, 2002; Shi等, 2009);

(7) 龙门山、东昆仑等大型边界断裂两侧地壳结构和性质存在显著差异, 表明大型断裂带在高原生长与扩展过程中起到了重要的控制和协调作用(Zhang等, 2009; Zhang和Klemperer, 2010; Liu等, 2014; Xu等, 2014; Wu等, 2017, 2018; Deng等, 2015, 2019; Liu等, 2017; Wang等, 2018).

3.3.2 地震层析成像

(1) Zhou和Murphy (2005)在高原西部发现印度岩石圈近水平向北俯冲, 直接与塔里木岩石圈相遇;

(2) Li等(2008)的体波走时成像结果显示: 印度岩石圈向北俯冲的距离由高原的西部向东部逐渐变小, 而俯冲角度逐渐增大;

(3) Liang等(2016)利用更多中南部台站记录的远

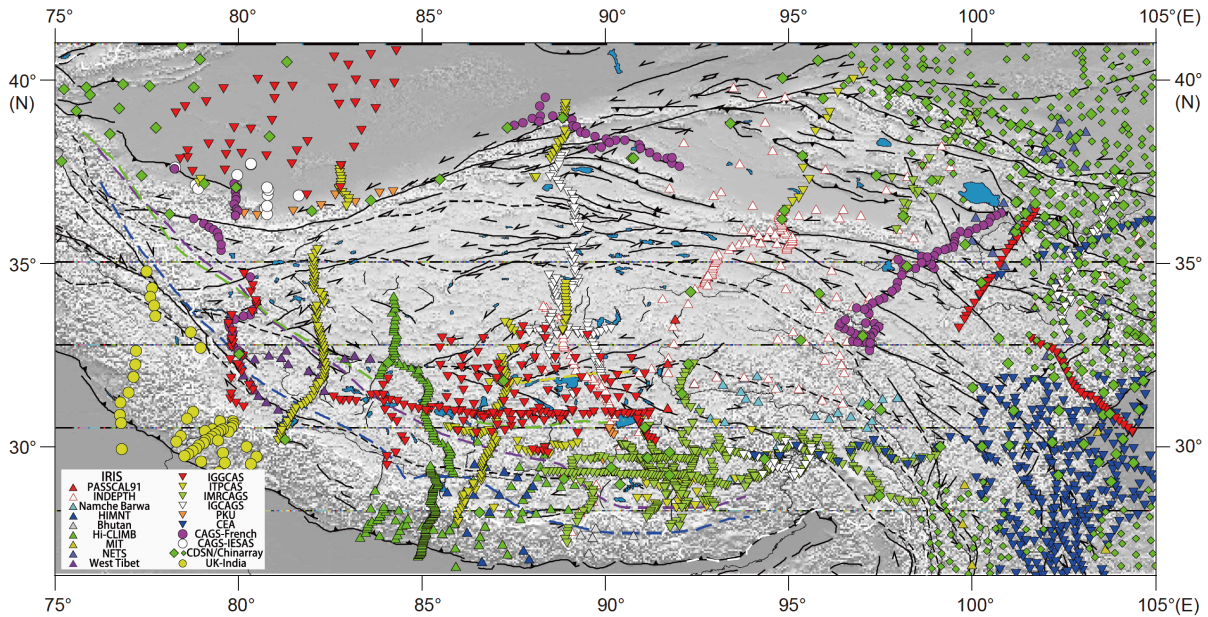


图5 青藏高原宽频带地震探测流动台站位置图
1992~2018年的不完全统计结果

震波形数据,开展体波走时成像研究,结果显示:印度岩石圈在拉萨块体下方高角度俯冲,并在南北向裂谷系下方存在与板片撕裂(Chen等, 2015)有关的“板片窗”。热的软流圈物质沿板片窗上涌,可能促进了裂谷的发育(Tian等, 2015);

(4) Chen等(2017)通过全波形反演获得了青藏高原上地幔的大尺度速度结构图像,认为增厚的高原岩石圈在中新生代发生了拆沉,目前近水平俯冲的印度大陆岩石圈已到达金沙江缝合带附近;

(5) 面波层析成像研究结果(图6)显示青藏高原岩石圈厚度分布是不均匀的:腹地较薄为120km左右,周边较厚可达150km左右,而高原外围可达170~180km(如印度、尼泊尔),形成了高原岩石圈腹地薄、周边厚的格局(Chen等, 2010; Zhang X等, 2014; Zhang Z等, 2014a);

(6) 噪声成像研究结果(Yao等, 2008; Liu等, 2014; Yang等, 2012; Bao等, 2015)显示中地壳低速层在青藏高原广泛发育,但连通性差,不同块体低速层深度差异明显;

(7) Pn波和Sn波成像研究(Liang和Song, 2006; McNamara等, 1995; Li和Song, 2018)显示:北羌塘和松潘-甘孜地体上地幔顶部地震波速度低、衰减强烈,南北向裂谷下方上地幔顶部Pn波速度低;

(8) 利用地方地震台站的数据进行了三维速度结构成像研究,P波速度随深度变化特征表明地壳内部发生了大规模层间拆离和水平剪切(杨文采等, 2019).

3.3.3 上地幔各向异性

(1) 多条南北向宽频带地震台阵剖面和部分区域台网资料的地幔各向异性分析结果表明(McNamara等, 1994; Sandvol等, 1997; Huang等, 2000; Chen等, 2010; Zhao等, 2014),雅江缝合带附近及其南部地区SKS分裂时差很小或不存在分裂现象,而拉萨地块北部和羌塘地区分裂时差较大.一般认为该特征与印度岩石圈俯冲形态和向北俯冲距离有关(图7);

(2) 基于青藏高原中部宽频带地震台阵(TIBET-31N和SANDWICH)资料的地幔各向异性分析结果(Chen等, 2015; Wu等, 2019),揭示了横波分裂参数及SKS到时的东西向变化特征:青藏高原主体上地幔各向异性以NEE向为主、印度岩石圈俯冲形态和俯冲距离存在系统的东西向变化,自东向西俯冲角度变缓、俯冲距离变远,不同运动方式之间通过板片撕裂得到协调(图7);

(3) 远震SKS分裂快波方向在东南缘26°N附近发生急剧变化,北侧为近南北向,而南侧转变为近东西向(Wang等, 2008; 常利军等, 2015; Huang等, 2015);

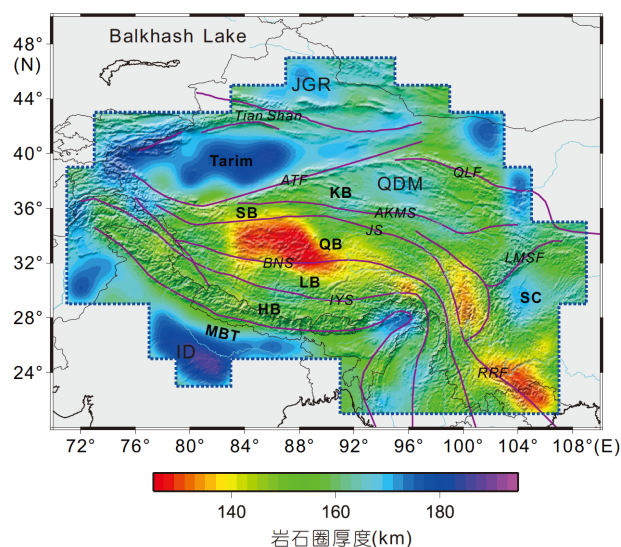


图6 青藏高原岩石圈厚度(修改自Zhang等(2014))

(4) 远震SKS分裂特征表明高原地震各向异性存在分层特性(Gao和Liu, 2009; Wu C等, 2015; Wu J等, 2015).

3.4 大地电磁测深

自20世纪七十年代(Chen G M等, 1981)以来, 在青藏高原相继开展了大量大地电磁测深工作, 获得了以下代表性成果:

(1) INDEPTH大地电磁探测结果显示: 喜马拉雅上地壳存在向南变浅的低阻层, 拉萨块体上地壳存在低阻层, 羌塘块体上地幔以高电导率为特征(Chen等, 1996; Wei等, 2001; Unsworth等, 2005);

(2) 藏南中下地壳广泛分布低阻层, 东西向延伸超过1000km, 推测该区中下地壳发生部分熔融(Wei等, 2010);

(3) Bai等(2010)的研究显示在青藏高原东构造结周缘存在两条巨大的中下地壳低阻异常带, 认为对应两条中下地壳弱物质流。

(4) 电性结构成像结果显示高原下方软流圈顶部埋深相对较浅(郭新峰等, 1990; 孔祥儒等, 1996, 1998; 谭捍东等, 1997; Unsworth等, 2005).

3.5 地震活动特征

青藏高原是中国现代构造活动和地震活动最强烈

的地区, 也是全球最典型的陆内地震带. 高原内部与周边地带无论是地震活动强度、震源深度, 还是断层面解和应力场展布, 都极不均匀. 青藏高原周边为强地震($M \geq 8$)带, 高原内部主要为浅源地震, 而东西构造结构处为中源地震(邓起东等, 2014). Teng等(1987)对1950年墨脱发生的一次8.5级地震与其周边300~500km范围内发生的8次7级以上大地震进行了活动性讨论.

自1900年以来青藏高原经历了3次地震活动丛集高潮, 即1920~1937年海原-古浪地震系列, 1947~1976年察隅-当雄地震系列和1995年至今昆仑-汶川地震系列(邓起东等, 2014). 各地震系列都有其主体活动区, 最新的昆仑-汶川地震系列的主体活动区为巴颜喀喇断块(邓起东等, 2014; 滕吉文等, 2017). 近20年来发生的大地震有2001年昆仑山口西 $M_s 8.1$ 级地震、2008年 $M_s 8.0$ 级汶川地震、2014年玉树 $M_s 7.3$ 级地震、2015年尼泊尔 $M_s 8.1$ 级地震等.

三类典型地震在青藏高原均有发生. 其中, 走滑型地震主要发生于高原周缘, 如阿尔金、海原、昆仑、鲜水河-小江等大型走滑断裂系, 以及高原内部喀喇昆仑、嘉黎、共轭走滑等诸多走滑断裂系; 逆冲型地震主要发生于喜马拉雅山前、东北缘和龙门山; 正断型(东西向拉张)地震主要发生在高原南部和北部海拔较高地区(Molnar, 1988; 张培震等, 2013). 在深度上, 地震主要集中在分布于上地壳(Liang等, 2008; Langin等, 2003; Zhu等, 2017), 但在喜马拉雅中段和雅鲁藏布江缝合带附近及西昆仑地区, 存在莫霍面下方地幔顶部的地震(Chen W P等, 1981; Molnar和Chen, 1983; Chen和Yang, 2004; Zhu和Helmberger, 1996); 兴都库什、帕米尔及印缅造山带发育中深源地震, 可能与板块俯冲导致的变形和相变有关(Le Dain等, 1984; Dasgupta等, 2003; Sippl等, 2013; Schurr等, 2014; Li等, 2018).

4 青藏高原地球物理场特征

4.1 重力场

青藏高原重力场呈四周高、中间低的态势, 异常场边界与地形梯度变化密切相关, 高原内部最低异常值达-590mGal, 异常形态复杂(Teng等, 1981a, 1981b; Zhou等, 1981; 祝恒宾等, 1985; 孟令顺和高锐, 1992; 张健和石耀霖, 2002; 滕吉文等, 2006, 2015; 张燕等,

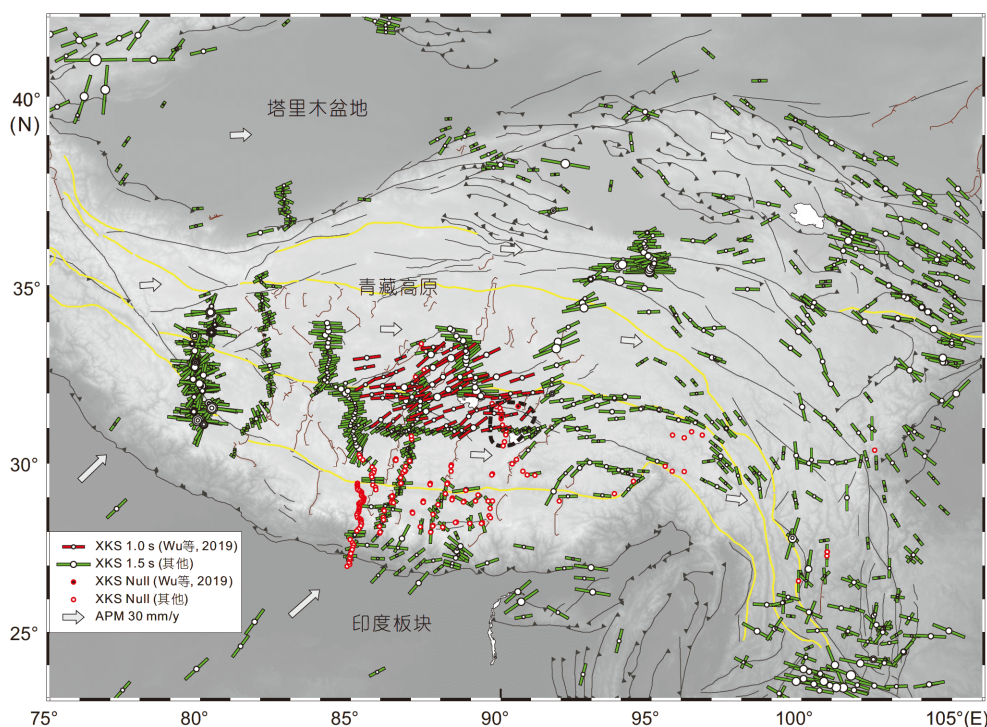


图7 青藏高原远震剪切波分裂结果
修改自Wu等(2019)

2013; 杨文采等, 2015):

(1) 拉萨块体重力异常以近东西走向为主, 具有南北分带特点, 冈底斯低异常特征突出, 明显低于拉萨块体中部和北部;

(2) 羌塘和松潘甘孜块体重力异常形态略显复杂, 以大范围的低值为主, 是高原重力异常最低区域;

(3) 重力异常由高原边界向周缘迅速升高, 但东缘以宽缓的方式向华北和扬子克拉通高值区过渡;

(4) 加德满都-珠穆朗玛峰-雅鲁藏布江地带重力未达均衡; 东构造结重力场具有特殊图像特征。

4.2 地磁场

自20世纪80年代以来, 我国在青藏高原地区进行了多轮航磁测量。磁测结果显示, 磁异常分布特征与区域构造特征基本一致; 高原腹地为负磁异常; 高原边缘以及各地体边界磁异常强度大, 形态多呈近东西向的条带状/线状(安振昌等, 1989, 1992; 张先和赵丽, 2003; 贺日政等, 2007; 熊盛青等, 2007)。

康国发等(2011)根据地面、航空、海洋和卫星磁测资料构建了新一代高阶地磁场模型, 认为青藏高原

地区磁异常均较弱, 周边地区磁异常较强, 并且其分界线与岩石圈区域构造边界基本一致; 高原腹地磁异常走向与区域构造方向一致: 在中西部为东西走向, 在西南部和东部为弧状, 在东南部则为南北走向。喜马拉雅、龙门山、大巴山脉和帕米尔高原等大型造山带区域, 显示强的负磁异常带特征, 但垂直梯度变化相对平缓。东、西构造结地区还形成了强的负异常焦点, 并且东构造结磁异常强度比西构造结强度更大。

4.3 大地热流

青藏高原是东亚地热最为活动的地区之一, 以强烈的水热活动和大地热流值为特征。

高原地区水热活动类型多样, 水热爆炸、间歇喷泉、喷气孔、冒气穴、硫化气孔、喷泉、沸泉、热泉、温泉、硫酸泉、热水湖、热水塘、热水河、热水沼泽、各种泉华等应有尽有, 其中以羊八井、玛宗错热田最为著名(佟伟等, 1981; Tong和Zhang, 1981; Liao, 1981; Wei等, 1981)。

喜马拉雅大地热流值为 $87.9\sim 100.1\text{mW/m}^2$, 拉萨块体为 $61.3\sim 140.0\text{mW/m}^2$, 羌塘块体为 $43.0\sim 98.5\text{mW/m}^2$ 。

m^2 , 松潘-甘孜块体为 $36.0\sim 94.7\text{mW}/\text{m}^2$ (沈显杰等, 1983, 1992; 魏斯禹等, 1981). 大地热流值分布特征显示高原南部为高值, 而岩石圈较薄的藏北为低值, 说明大地热流的主要来源不是上地幔, 而是由于增厚地壳引起的放射性富集层厚度增加, 以及由于地壳增厚伴随的高原抬升-剥蚀作用而引起的等温面变浅等.

He同位素比值研究(Hoke等, 2000)显示, 亚东-谷露断裂带的大地热流来源于上地幔, 结合构造活动特征, 认为亚东-谷露断裂带为一条现代活动的大陆裂谷带(Zhang等, 2013; 滕吉文等, 2019). 高原西部多条近南北向张性断裂带的构造属性尚有待深化研究.

尽管采用不同地球物理观测手段和方法研究(地震、重力、电磁和大地热流等)青藏高原壳幔结构和动力学机制方面取得了重要进展, 但不同方法所得结果存在较大差异. 例如在青藏高原东南缘, 大地电磁测深结果(Bai等, 2010)与地震学观测结果(Bao等, 2015)发现了存在低速/高导异常, 并认为是中下地壳流的证据, 但是低速/高导异常的空间位置和分布范围存在差异, 且异常为局部化特征, 空间连通性差(Yang等, 2012; Yao等, 2008; Li等, 2014).

5 青藏高原深部结构研究中的两个重要争议

基于宽角反/折射、近垂直反射地震探测、天然地震接收函数和噪声成像研究获得了青藏高原Moho面深度和起伏形态, 以及具有巨厚地壳、拉萨块体南部存在双层Moho、壳内存在软弱层等结构特征的基本认识(Nelson等, 1996; Kind等, 2002; Nábělek等, 2009; Zhang等, 2011a, 2014b; Teng等, 2013; Schulte-Pelkum等, 2005; Gao等, 2016); 利用S波接收函数、地震层析成像以及各向异性研究表明, 从东到西印度岩石圈以不同角度俯冲到青藏高原下方、形成板片撕裂, 向北俯冲距离存在空间变化等等(例如Li等, 2008; Chen等, 2015; Liang等, 2016; Wu等, 2019). 但是, 采用不同手段和方法对青藏高原深部过程的研究仍存在较大争议.

5.1 青藏高原深部是否存在中/下地壳流

青藏高原地壳流模型是由美国科学家基于地质构造观测和流变学数值模拟提出来的(Clark和Royden,

2000; Royden等, 1997). 青藏高原是否存在中/下地壳流, 地球科学界存在支持和反对两种观点:

(1) 存在地壳流. 在地球物理观测中, 认为存在中/下地壳流的主要依据来自部分天然地震反演成像、大地电磁测深的结果(Yang等, 2012; Liu等, 2014; Harris, 2007; Klemperer, 2006; Bai等, 2010; Zhao等, 2012), 即中/下地壳在局部地区存在P波或S波的低速或低电阻率特征, 而其上、下与周边均为高速或高阻介质.

(2) 不存在地壳流. 认为不存在中/下地壳流的主要依据来自近垂直反射地震探测、宽角反射/折射探测和接收函数成像结果, 即高原内部多条大型走滑断裂延伸于下地壳, 甚至切穿地壳(高锐等, 2011; Guo等, 2013; Zhang等, 2014b), 地壳被一系列不同产状的断裂所切割(滕吉文等, 2012), 低速层厚度与地壳厚度之间不存在明显相关性(Jia等, 2014); 地震成像和大地电磁测深揭示的地壳低速层/高衰减层/高导层呈局部分布特征, 连通性差(Yang等, 2012; Yao等, 2008; Li等, 2014), 无法大范围流动, 该软弱层可能在地壳变形中仅起到滑脱作用, 不能以部分天然地震和大地电磁测深显示的局部异常及其不连续展布的图像特征来勾画或厘定中下地壳全域的物质流动(滕吉文等, 2012).

5.2 印度次大陆和欧亚大陆岩石圈俯冲模式

印度次大陆北缘(喜马拉雅造山带)、青藏高原南缘乃是印度与欧亚大陆碰撞的前缘地带. 半个世纪以来, 基于高原内部构造活动、火山岩分布时空特征及不同地球物理方法的探测结果(滕吉文等, 1981; 潘作枢等, 1981; Tilmann等, 2003; Gao等, 2016), 相继提出了印度岩石圈板片北向平俯冲、板片后撤、陡俯冲, 以及欧亚大陆岩石圈南向俯冲等多种模式.

(1) 印度岩石圈板片北向陡俯冲模式. 这是目前青藏高原研究中有关印度岩石圈北向俯冲模式的主流观点. INDEPTH-III剖面的远震体波走时成像结果显示: 上地幔高速异常体抵达班公怒江缝合带下方(Tilmann等, 2003). 然而, 新近的远震体波走时成像结果显示(Liang等, 2016): 除了上述地幔高速体之外, 在拉萨块体下方还存在一个更大规模的高速异常体, 以陡角度从雅江缝合带延伸到班公怒江缝合带附近. 由此推测, 印度岩石圈曾经近水平俯冲到班公怒江缝合带, 并发生断离及后撤(roll-back), 而班公-怒江缝合带下方的上地幔高速异常为断离残留的印度板片.

(2) 印度岩石圈板片俯冲模式. 印度岩石圈俯冲模式首先由Zhou和Murphy (2005)基于远震体波走时成像结果提出. 该观点近来在高原西部得到较多研究结果的支持, 包括远震体波走时成像(Li等, 2008; Zhao等, 2013)、S波接收函数成像(Zhao等, 2010), 即在高原西部印度大陆岩石圈近水平俯冲, 其前缘与塔里木岩石圈相遇. 高原中部和东部的多数研究认为印度岩石圈是陡俯冲, 但基于面波群速度成像结果(Priestley等, 2006; Zhang等, 2014b)以及Chen等(2017)基于全波形反演结果认为, 印度岩石圈在高原下方近水平(或低角度)俯冲.

(3) 印度与欧亚大陆岩石圈相向俯冲. Tapponnier等(2001)认为青藏高原所有缝合带都伴随着深俯冲和走滑(块体东向挤出). 除了在雅鲁藏布江缝合带处印度岩石圈是向北俯冲, 其余的缝合带(班公-怒江缝合带、金沙江缝合带、昆仑断裂带)都是北侧的板片向南俯冲, 但至今多数南向俯冲未被地球物理观测所证实. 基于P波接收函数成像结果, 认为欧亚岩石圈沿东昆仑断裂向南俯冲到班公-怒江缝合带北侧(Kosarev等, 1999; Zhao等, 2011).

导致以上科学问题存在争议的原因很多. 青藏高原整体探测程度低及观测密度不足, 以及不同地球物理方法的基本原理、空间分辨率和所使用数据尺度等存在较大差异, 所得图像特征不一致等, 这些都是导致对青藏高原深部过程认识产生分歧的原因.

6 结语

作为地球第三极, 青藏高原的形成演化不仅塑造了东亚地形地貌和新生代构造格局, 而且对全球气候和生态系统产生了深刻影响. 青藏高原地球物理和动力学研究是一个巨型复杂系统工程, 尽管取得了诸多重要研究进展, 但同时也存在很多重大争议, 从而要求我们对发生在高原内部与周边的诸多地球科学事件, 不能孤立地看待、认识和理解, 必须作为相互制约、相互作用的有机链条系统地集成分析研究. 只有通过综合地球物理观测(重、磁、震、电等)、模型-数据双驱动的智能联合成像, 并与动力学模拟、地质观察相结合等等, 才能解决前述两大科学问题的争论, 获得逼近于青藏高原真实演化过程的认识.

青藏高原地球物理学研究在地球系统科学理论创

新和高原可持续协调发展等方面大有可为. 以重要地球科学问题为导向, 并结合矿产资源开发、自然灾害防治、生态环境保护等国家重大需求, 开展方法研究、理论创新及仪器设备研发, 在关键区域组织实施综合地球物理探测, 可望促进青藏高原地学研究的创新与突破.

致谢 两位匿名审稿专家和编委提出了有帮助的修改建议, 使得文章质量得以明显提高, 在此表示感谢.

参考文献

- 安振昌, 马石庄, 谭东海. 1992. 中国及邻近地区卫星磁异常的球冠谱和分析. 地球物理学报, 35(增刊): 188–197
- 安振昌, 任国泰, 薛小桢, 王居易, 徐元芳, 王世元. 1989. 青藏高原及珠穆朗玛峰地区的地磁场. 见: 中国科学院地球物理研究所论文摘要集(1985). 北京: 中国科学院地球物理研究所
- 白志明, 王椿镛. 2004. 云南遮放-宾川和孟连-马龙宽角地震剖面的层析成像研究. 地球物理学报, 47: 257–267
- 常利军, 丁志峰, 王椿镛. 2015. 南北构造带南段上地幔各向异性特征. 地球物理学报, 58: 4052–4067
- 崔作舟, 李秋生, 吴朝东, 尹周勋, 刘宏兵. 1995. 格尔木-额济纳旗地学断面的地壳结构与深部构造. 地球物理学报, 38(增刊II): 15–18
- 崔作舟, 卢德源, 陈纪平, 张之英, 黄立言. 1987. 攀西地区的深部地壳结构与构造. 地球物理学报, 30: 566–580
- 邓起东, 程绍平, 马冀, 杜鹏. 2014. 青藏高原地震活动特征及当前地震活动形势. 地球物理学报, 57: 2025–2042
- 丁志峰, 曾融生, 吴大铭. 1992. 青藏高原的Pn波速度和Moho界面的起伏. 地震学报, 14(增刊), 592–599
- 高锐, 黄东定, 卢德源, 钱桂, 李英庚, 匡朝阳, 李秋生, 李朋武, 冯如进, 管焯. 2000. 横过西昆仑造山带与塔里木盆地结合带的深地震反射剖面. 科学通报, 45: 1874–1879
- 高锐, 马永生, 李秋生, 朱铎, 张季生, 王海燕, 李鹏武, 卢占武, 管焯. 2006. 松潘地块与西秦岭造山带下地壳的性质和关系——深地震反射剖面的揭露. 地质通报, 25: 1361–1367
- 高锐, 王海燕, 王成善, 尹安, 张玉修, 李秋生, 郭彤楼, 李文辉. 2011. 青藏高原东北缘岩石圈缩短变形——深地震反射剖面再处理提供的证据. 地球学报, 32: 513–520
- 高锐, 肖序常, 刘训, 管焯, 李秋生, 卢德源, 李朋武. 2001. 新疆地学断面深地震反射剖面揭示的西昆仑——塔里木结合带岩石圈细结构. 地球学报, 22: 547–552
- 郭新峰, 张元丑, 程庆云, 高锐, 潘渝. 1990. 青藏高原亚东——格尔木地学断面岩石圈电性研究. 地球学报, 11: 191–202
- 胡鸿翔, 陆涵行, 王椿镛, 何正勤, 朱良保, 颜其中, 樊跃新, 张国庆,

- 邓英娥. 1986. 云南地区地壳结构的爆破地震研究. 地球物理学报, 29: 133-144
- 胡鸿翔, 李学清. 1994. 云南地区孟连-思茅-马龙剖面的基底速度系结构. 见: 陈运泰, 等, 主编. 中国固体地球物理学进展. 北京: 海洋出版社. 100-106
- 贺日政, 高锐, 郑洪伟. 2007. 隐伏在青藏高原中部的东西走向断裂的航磁异常场特征及其意义. 地球物理学报, 37: 1002-1008
- 环文林, 汪素云, 时振梁, 鄢家全. 1980. 青藏高原震源分布与板块运动. 地球物理学报, 23: 269-280
- 阚荣举, 林中洋. 1986. 云南地壳上地幔构造的初步研究. 中国地震, 2: 50-61
- 康国发, 高国明, 白春华, 韶丹, 冯丽丽. 2011. 青藏高原及邻区的地壳磁异常特征与区域构造. 中国科学: 地球科学, 41: 1577-1585
- 孔祥儒, 马晓冰, 于晟, 李宗舜. 1998. 青藏高原电性结构研究. 见: 潘裕生, 主编. 青藏高原岩石圈结构演化和动力学. 广州: 广东科技出版社. 67-93
- 孔祥儒, 熊绍柏, 王谦身. 1996. 青藏高原西部综合地球物理与岩石圈结构研究. 中国科学D辑: 地球科学, 26: 308-315
- 李松林, 张先康, 张成科, 赵金仁, 成双喜. 2002. 玛沁-兰州-靖边地震深剖面地壳速度结构的初步研究. 地球物理学报, 45: 200-217
- 李秋生, 卢德源, 高锐. 2000. 横跨西昆仑-塔里木接触带的爆炸地震探测. 中国科学D辑: 地球科学, 30(增刊): 16-21
- 李秋生, 彭苏萍, 高锐. 2004. 青藏高原莫霍面的研究进展. 地质论评, 50: 598-612
- 林中洋, 胡鸿翔, 张文彬, 章惠芬, 何正勤, 林真明, 邱陶兴. 1993. 滇西地区地壳上地幔速度结构特征的研究. 地震学报, 15: 424-440
- 卢德源, 王香泾. 1990. 青藏高原北部沱沱河-格尔木地区的地壳结构和深部作用过程. 地球学报, 11: 227-237
- 卢占武, 高锐, 李洪强, 李文辉, 熊小松, 徐泰然. 2016. 深反射地震数据揭示的拉萨地体北部到羌塘地体南部地壳厚度的变化. 中国地质, 43: 1679-1687
- 马丽华. 2018. 西藏光芒. 北京: 北京十月文艺出版社
- 孟令顺, 高锐. 1992. 青藏高原重力测量与岩石圈构造. 北京: 地质出版社
- 潘裕生, 孔祥儒, 钟大赅. 1998. 青藏高原岩石圈结构演化和动力学. 广州: 广东科技出版社
- 潘作枢, 滕吉文, 申江胜, 王孝沛. 1981. 雅鲁藏布江一带的航磁异常特征及地壳构造. 石油物探, 2: 78-91
- 沈显杰, 康文华, 李德禄, 白嘉启, 魏红兵, 邓肖粤, Francheteau J, Jaupart C, Lossouarn H. 1983. 青藏高原的热流测量. 科学通报, 28: 876-877
- 沈显杰, 张文仁, 杨淑贞, 管炸, 金旭, 张菊明, 汪辑安, 沈继英, 张容燕. 1992. 西藏热流和地体构造热演化. 地质专报. 北京: 地质出版社. 1-94
- 孙鸿烈等口述/温瑾整理. 2010. 青藏高原科考访谈录: 1973-1992. 长沙: 湖南教育出版社
- 谭捍东, 陈乐寿, 魏文博, 邓明, 胡建德, 金胜. 1997. 从 INDEPTH-MT 结果探讨雅鲁藏布江缝合带的电性结构. 现代地质, 11: 375-378
- 滕吉文, 阚荣举, 刘道洪, 曾融生. 1973. 柴达木东盆地的基岩首波和反射波. 地球物理学报, 16: 62-70
- 滕吉文. 1974. 柴达木东盆地的深层地震反射波和地壳构造. 地球物理学报, 17: 122-135
- 滕吉文, 熊绍柏, 孙克忠. 1981. 青藏高原当雄-亚东地带地壳与上地幔结构和速度分布的爆炸地震研究. 地球物理学报, 24: 155-170
- 滕吉文, 尹周勋, 熊绍柏. 1985. 青藏高原北部地区色林错-蓬错-那曲-索县地带地壳结构与速度分布. 地球物理学报, 28(增刊 I): 28-43
- 滕吉文. 1994. 康滇构造带岩石圈物理与动力学. 北京: 科学出版社
- 滕吉文, 尹周勋, 刘宏兵, 张中杰, 胡家富, 孙克忠, 魏计春. 1994. 青藏高原岩石层三维和二维结构与大陆动力学. 地球物理学报, 37: 117-130
- 滕吉文, 王谦身, 王光杰, 徐亚, 张雪梅. 2006. 喜马拉雅“东构造结”地区的特异重力场与深部地壳结构. 49: 1045-1052
- 滕吉文. 2007. 青藏高原地球物理研究的第一批重大成果和对几个重要科学问题的认识与思考. 见: 中国地球物理学会, 主编. 辉煌的历程——中国地球物理学会60年. 北京: 地震出版社
- 滕吉文, 阮小敏, 张永谦, 胡国泽, 闫亚芬. 2012. 青藏高原地壳与上地幔成层速度结构与深部层间物质的运移轨迹. 岩石学报, 28: 4077-4100
- 滕吉文, 司芎, 王谦身, 张永谦, 杨辉. 2015. 青藏高原地球科学研究中的核心问题与理念的厘定. 地球物理学报, 58: 103-124
- 滕吉文, 马学英, 张雪梅, 刘有山, 皮娇龙. 2017. 2015年尼泊尔 $M_s8.1$ 大地震孕育的深层过程与发生的动力学响应. 地球物理学报, 60: 123-141
- 滕吉文, 宋鹏汉, 刘有山, 张雪梅, 马学英, 闫亚芬. 2019. 青藏高原“亚东-东巧-葫芦湖”大陆裂谷带形成的深层动力过程. 地球物理学报, 62: 3321-3339
- 佟伟, 章铭陶, 张知非, 廖志杰, 由懋正, 朱梅湘, 过帼颖, 刘时彬. 1981. 西藏地热. 北京: 科学出版社
- 王椿镛, 韩渭宾, 吴建平, 楼海, 白志明. 2003. 松潘-甘孜造山带地壳速度结构. 地震学报, 25: 229-241
- 王夫运, 段永红, 杨卓欣, 张成科, 赵金仁, 张建狮, 张先康, 刘启元, 朱艾澜, 徐锡伟, 刘宝峰. 2008. 川西盐源-马边地震带上地壳速度结构和活动断裂研究——高分辨率地震折射实验结果. 中国科学D辑: 地球科学, 38: 611-621
- 王夫运, 潘素珍, 刘兰, 刘宝峰, 张建狮, 邓晓果, 马策军, 张彩军. 2014. 玉溪-临沧剖面宽角地震探测——红河断裂带及滇南地壳结构研究. 地球物理学报, 57: 3247-3258
- 王晓, 周小鹏, 张新彦, 白志明, 滕吉文. 2015. 上地壳纵横波速度结构相关反演成像方法. 地球物理学报, 58: 3553-3570
- 王有学, 韩果花, 姜枚, 袁学诚, Mooney W D, Coleman R G. 2004. 阿尔泰-阿尔金地学断面地壳结构. 地球物理学报, 47: 240-249

- 王有学, Mooney W D, 韩果花, 袁学诚, 姜枚. 2005. 台湾-阿尔泰地学断面阿尔金-龙门山剖面的地壳纵波速度结构. *地球物理学报*, 48: 98–106
- 魏斯禹, 滕吉文, 杨秉平, 胡忠义. 1981. 西藏高原地热活动、温泉分布与地球物理场特征. *西北地震学报*, 3: 17–25
- 吴功建, 高锐, 余钦范, 程庆云, 孟令顺, 董学斌, 崔作舟, 尹周勋, 沈显杰, 周姚秀等. 1991. 青藏高原“亚东-格尔木地学断面”综合地球物理调查与研究. *地球物理学报*, 34: 552–562
- 吴宣志, 吴春玲, 卢杰, 吴杰. 1995. 利用深地震反射剖面研究北祁连-河西走廊地壳细结构. *地球物理学报*, 38(增刊II): 29–35
- 熊绍柏, 滕吉文, 尹周勋, 赖明惠, 黄一平. 1986. 攀西构造带南部地壳与上地幔结构的爆炸地震研究. *地球物理学报*, 29: 235–244
- 熊绍柏, 郑晔, 尹周勋, 曾晓猷, 全幼黎, 孙克忠. 1993. 丽江-攀枝花-者海地带二维地壳结构及其构造意义. *地球物理学报*, 36: 436–444
- 熊绍柏, 刘宏兵. 1997. 青藏高原西部的地壳结构. *科学通报*, 42: 1309–1312
- 熊绍柏, 刘宏兵, 于桂生. 1998. 青藏高原岩石圈结构与构造的人工地震探测研究. 见: 潘裕生, 主编. 青藏高原岩石圈结构演化和动力学. 广州: 广东科技出版社. 1–35
- 熊盛青, 周伏洪, 姚正煦, 薛典军. 2007. 青藏高原中西部航磁概查. *物探与化探*, 31: 404–407
- 徐涛, 张明辉, 田小波, 郑勇, 白志明, 武澄珑, 张忠杰, 滕吉文. 2014. 丽江-清镇剖面上地壳速度结构及其与鲁甸 $M_w 6.5$ 级地震孕震环境的关系. *地球物理学报*, 57: 3069–3079
- 杨文采, 孙艳云, 于常青. 2015. 青藏高原地壳密度变形带及构造分区. *地球物理学报*, 58: 4115–4128
- 杨文采, 瞿辰, 任浩然, 黄联捷, 胥颐, 于常青. 2019. 青藏高原地壳地震纵波速度的层析成像. *地质论评*, 65: 2–14
- 尹周勋, 滕吉文, 熊绍柏. 1987. 渡口及其邻近地区地壳浅层结构的研究. *地球物理学报*, 30: 22–30
- 曾融生, 阚荣举, 何传大, 李彭年. 1960. 柴达木盆地低频地震探测结晶基底的工作方法. *地球物理学报*, 9: 155–168
- 曾融生, 何传大, 阚荣举. 1961a. 柴达木盆地低频地震探测的“迴折”波和多次波. *地球物理学报*, 10: 39–53
- 曾融生, 阚荣举, 何传大. 1961b. 柴达木盆地低频地震探测的基岩首波和大角度反射波. *地球物理学报*, 10: 54–66
- 曾融生, 阚荣举. 1961. 柴达木盆地西部地壳深界面的反射波. *地球物理学报*, 10: 120–125
- 曾融生, 滕吉文, 阚荣举, 张家茹. 1965. 我国西北地区地壳中的高速夹层. *地球物理学报*, 14: 94–106
- 张健, 石耀霖. 2002. 青藏高原隆升及伸展变形中的重力位能. *地球物理学报*, 45: 226–232
- 张培震, 邓起东, 张竹琪, 李海兵. 2013. 中国大陆的活动断裂、地震灾害及其动力过程. *中国科学: 地球科学*, 43: 1607–1620
- 张先, 赵丽. 2003. 青藏高原航磁异常及居里面研究. *大地测量与地球动力学*, 23: 14–20
- 张先康, 嘉世旭, 赵金仁. 2008. 西秦岭-东昆仑及邻近地区地壳结构——深地震宽角反射/折射剖面结果. *地球物理学报*, 51: 439–450
- 张燕, 程顺有, 赵炳坤, 董云鹏, 韩革命, 张明华, 杨亚斌, 崔丽艳. 2013. 青藏高原构造结构特点: 新重力异常成果的启示. *地球物理学报*, 56: 1369–1380
- 张智, 赵兵, 张晰, 刘财. 2006. 云南思茅-中甸地震剖面的地壳结构. *地球物理学报*, 49: 1377–1384
- 张中杰, 滕吉文, 杨立强, 李英康. 2002. 藏南地壳速度结构与地壳物质东西向“逃逸”——以佩枯错-普莫雍错宽角反射剖面为例. *中国科学D辑: 地球科学*, 32: 793–798
- 张中杰, 白志明, 王椿镛, 滕吉文, 吕庆田, 李继亮, 刘一峰, 刘振宽. 2005. 三江地区地壳结构及动力学意义: 云南遮放-宾川地震反射/折射剖面的启示. *中国科学D辑: 地球科学*, 35: 314–319
- 赵文津. 2012. 青藏高原深剖面研究20年回顾与展望——INDEPTH项目20周年纪念会文集. 北京: 地质出版社
- 祝恒宾, 周文虎, 武立高. 1985. 喜马拉雅地区的均衡重力异常与地震活动性. *地震学报*, 7: 74–79
- 朱露培, 曾融生, 吴大铭. 1992. 利用宽频带远震体波波研究青藏高原地壳上地幔速度结构的初步成果. *地震学报*, 14: 580–591
- Achache J, Courtillot V, Xiu Z Y. 1984. Paleogeographic and tectonic evolution of southern Tibet since middle Cretaceous time: New paleomagnetic data and synthesis. *J Geophys Res*, 89: 10311–10339
- Bai D, Unsworth M J, Meju M A, Ma X, Teng J, Kong X, Sun Y, Sun J, Wang L, Jiang C, Zhao C, Xiao P, Liu M. 2010. Crustal deformation of the eastern Tibetan plateau revealed by magnetotelluric imaging. *Nat Geosci*, 3: 358–362
- Bao X, Song X, Li J. 2015. High-resolution lithospheric structure beneath Mainland China from ambient noise and earthquake surface-wave tomography. *Earth Planet Sci Lett*, 417: 132–141
- Chen G M, Ren A H, Li Z S, Shi Y J, Li H Z, Yang Z W, Huang B M. 1981. Amagnetotelluric study on the earth's crust and upper mantle at Nagqu and Pagri, Xizang Plateau. In: Liu D S, ed. Geological and Ecological Studies of Qinghai-Xizang Plateau (Vol.1). Beijing: Science Press. 771–782
- Chen J, Huang B, Sun L. 2010. New constraints to the onset of the India-Asia collision: paleomagnetic reconnaissance on the Linzi-zong Group in the Lhasa Block, China. *Tectonophysics*, 489: 189–209
- Chen L, Booker J R, Jones A G, Wu N, Unsworth M J, Wei W, Tan H. 1996. Electrically conductive crust in Southern Tibet from INDEPTH Magnetotelluric surveying. *Science*, 274: 1694–1696
- Chen M, Niu F, Tromp J, Lenardic A, Lee C T A, Cao W, Ribeiro J. 2017. Lithospheric foundering and underthrusting imaged beneath Tibet. *Nat Commun*, 8: 15659

- Chen W P, Yang Z. 2004. Earthquakes beneath the Himalayas and Tibet: Evidence for strong lithospheric mantle. *Science*, 304: 1949–1952
- Chen W P, Nábělek J L, Fitch T J, Molnar P. 1981. An intermediate depth earthquake beneath Tibet: Source characteristics of the event of September 14, 1976. *J Geophys Res*, 86: 2863–2876
- Chen Y, Badal J, Hu J. 2010. Love and rayleigh wave tomography of the Qinghai-Tibet Plateau and surrounding areas. *Pure Appl Geophys*, 167: 1171–1203
- Chen Y, Li W, Yuan X, Badal J, Teng J. 2015. Tearing of the Indian lithospheric slab beneath southern Tibet revealed by SKS-wave splitting measurements. *Earth Planet Sci Lett*, 413: 13–24
- Clark M K, Royden L H. 2000. Topographic ooze: Building the eastern margin of Tibet by lower crustal flow. *Geology*, 28: 703–706
- Dasgupta S, Mukhopadhyay M, Bhattacharya A, Jana T K. 2003. The geometry of the Burmese-Andaman subducting lithosphere. *J Seismol*, 7: 155–174
- Deng Y, Shen W, Xu T, Ritzwoller M H. 2015. Crustal layering in northeastern Tibet: A case study based on joint inversion of receiver functions and surface wave dispersion. *Geophys J Int*, 203: 692–706
- Deng Y, Li J, Song X, Li H, Xu T. 2019. The lithospheric-scale deformation in NE Tibet from joint inversion of receiver function and surface wave dispersion. *Terr Atmos Ocean Sci*, 30: 127–137
- Dewey J, Cande S, Iii Pitman W C. 1989. Tectonic evolution of the India/Eurasia Collision Zone. *Eclogae Geol Helv*, 82: 717–734
- Fei D, Cheng S X, Hao C R. 1981. On the structural feature in the central part of Xizang and obduction of the Indian plate. In: Liu D S, ed. *Geological and Ecological Studies of Qinghai-Xizang Plateau (Vol.1)*. Beijing: Science Press. 747–756
- Gao R, Huang D, Lu D, Qian G, Li Y, Kuang C, Li Q, Li P, Feng R, Guan Y. 2000. Deep seismic reflection profile across the juncture zone between the Tarim basin and the west Kunlun mountains. *Chin Sci Bull*, 45: 2281–2286
- Gao R, Chen C, Lu Z, Brown L D, Xiong X, Li W, Deng G. 2013a. New constraints on crustal structure and Moho topography in Central Tibet revealed by SinoProbe deep seismic reflection profiling. *Tectonophysics*, 606: 160–170
- Gao R, Hou H, Cai X, Knapp J H, He R, Liu J, Xiong X, Guan Y, Li W, Zeng L, Roecker S W. 2013b. Fine crustal structure beneath the junction of the southwest Tian Shan and Tarim Basin, NW China. *Lithosphere*, 5: 382–392
- Gao R, Lu Z, Klemperer S L, Wang H, Dong S, Li W, Li H. 2016. Crustal-scale duplexing beneath the Yarlung Zangbo suture in the western Himalaya. *Nat Geosci*, 9: 555–560
- Gao S S, Liu K H. 2009. Significant seismic anisotropy beneath the southern Lhasa Terrane, Tibetan Plateau. *Geochem Geophys Geosyst*, 10: Q02008
- Guo X, Gao R, Randy Keller G, Xu X, Wang H, Li W. 2013. Imaging the crustal structure beneath the eastern Tibetan Plateau and implications for the uplift of the Longmen Shan range. *Earth Planet Sci Lett*, 379: 72–80
- Guo X, Gao R, Wang H, Li W, Keller G, Xu X, Li H, Encarnacion J. 2015. Crustal architecture beneath the Tibet-Ordos transition zone, NE Tibet, and the implications for plateau expansion. *Geophys Res Lett*, 42: 10631–10639
- Guo X, Li W, Gao R, Xu X, Li H, Huang X, Ye Z, Lu Z, Klemperer S L. 2017. Nonuniform subduction of the Indian crust beneath the Himalayas. *Sci Rep*, 7: 12497
- Guo X, Gao R, Zhao J, Xu X, Lu Z, Klemperer S L, Liu H. 2018. Deep-seated lithospheric geometry in revealing collapse of the Tibetan Plateau. *Earth Sci Rev*, 185: 751–762
- Harris N. 2007. Channel flow and the Himalayan-Tibetan orogen: A critical review. *J Geological Soc*, 164: 511–523
- Hirn A, Lepine J C, Jobert G, Sapin M, Wittlinger G, Zhong Xin X, En Yuan G, Xiang Jing W, Ji Wen T, Shao Bai X, Pandey M R, Tater J M. 1984a. Crustal structure and variability of the Himalayan border of Tibet. *Nature*, 307: 23–25
- Hirn A, Necessian A, Sapin M, Jobert G, Xin X Z, Yuan G E, Yuan L D, Wen T J. 1984b. Lhasa block and bordering sutures—A continuation of a 500-km Moho traverse through Tibet. *Nature*, 307: 25–27
- Hoke L, Lamb S, Hilton D R, Poreda R J. 2000. Southern limit of mantle-derived geothermal helium emissions in Tibet: Implications for lithospheric structure. *Earth Planet Sci Lett*, 180: 297–308
- Huang W C, Ni J F, Tilmann F, Nelson D, Guo J, Zhao W, Mechie J, Kind R, Saul J, Rapine R, Hearn T M. 2000. Seismic polarization anisotropy beneath the central Tibetan Plateau. *J Geophys Res*, 105: 27979–27989
- Huang Z, Wang L, Xu M, Ding Z, Wu Y, Wang P, Mi N, Yu D, Li H. 2015. Teleseismic shear-wave splitting in SE Tibet: Insight into complex crust and upper-mantle deformation. *Earth Planet Sci Lett*, 432: 354–362
- Jia S X, Liu B J, Xu Z F, Liu Z, Feng S Y, Zhang J S, Lin J Y, Tian X F, Liu Q X, Guo W B. 2014. The crustal structures of the central Longmenshan along and its margins as related to the seismotectonics of the 2008 Wenchuan Earthquake. *Sci China Earth Sci*, 57: 777–790
- Kan R J, Hu H X, Zeng R S, Mooney W D, McEvelly T V. 1986. Crustal structure of Yunnan Province, People's Republic of China, from seismic refraction profiles. *Science*, 234: 433–437
- Karplus M, Klemperer S, Wenjin Z, Zhenhan W, Danian S, Heping S, Brown L, Chen C, Mechie J, Kind R, Tilmann F, Makovsky Y,

- Meissner R. 2008. Northeast Tibetan crustal structure from INDEPTH IV controlled-source seismic data. *Himalayan J Sci*, 5: 76–77
- Karplus M S, Zhao W, Klemperer S L, Wu Z, Mechie J, Shi D, Brown L D, Chen C. 2011. Injection of Tibetan crust beneath the south Qaidam Basin: Evidence from INDEPTH IV wide-angle seismic data. *J Geophys Res*, 116: B07301
- Kind R, Ni J, Zhao W, Wu J, Yuan X, Zhao L, Sandvol E, Reese C, Nabelek J, Hearn T. 1996. Evidence from earthquake data for a partially molten crustal layer in southern Tibet. *Science*, 274: 1692–1694
- Kind R, Yuan X, Saul J, Nelson D, Sobolev S V, Mechie J, Zhao W, Kosarev G, Ni J, Achauer U, Jiang M. 2002. Seismic images of crust and upper mantle beneath Tibet: Evidence for Eurasian plate subduction. *Science*, 298: 1219–1221
- Klemperer S L. 2006. Crustal flow in Tibet: Geophysical evidence for the physical state of Tibetan lithosphere, and inferred patterns of active flow. *Geol Soc London Spec Publ*, 268: 39–70
- Kosarev G, Kind R, Sobolev S V, Yuan X, Hanka W, Oreshin S. 1999. Seismic evidence for a detached Indian lithospheric mantle beneath Tibet. *Science*, 283: 1306–1309
- Langin W R, Brown L D, Sandvol E A. 2003. Seismicity of central Tibet from Project INDEPTH III seismic recordings. *Bull Seismol Soc Am*, 93: 2146–2159
- Le Dain A Y, Tapponnier P, Molnar P. 1984. Active faulting and tectonics of Burma and surrounding regions. *J Geophys Res*, 89: 453–472
- Li C, van der Hilst R D, Meltzer A S, Engdahl E R. 2008. Subduction of the Indian lithosphere beneath the Tibetan Plateau and Burma. *Earth Planet Sci Lett*, 274: 157–168
- Li H, Shen Y, Huang Z, Li X, Gong M, Shi D, Sandvol E, Li A. 2014. The distribution of the mid-to-lower crustal low-velocity zone beneath the northeastern Tibetan Plateau revealed from ambient noise tomography. *J Geophys Res Solid Earth*, 119: 1954–1970
- Li J, Song X. 2018. Tearing of Indian mantle lithosphere from high-resolution seismic images and its implications for lithosphere coupling in southern Tibet. *Proc Natl Acad Sci USA*, 115: 8296–8300
- Li W, Chen Y, Yuan X, Schurr B, Mechie J, Oimahmadov I, Fu B. 2018. Continental lithospheric subduction and intermediate-depth seismicity: Constraints from S-wave velocity structures in the Pamir and Hindu Kush. *Earth Planet Sci Lett*, 482: 478–489
- Liang C, Song X. 2006. A low velocity belt beneath northern and eastern Tibetan Plateau from Pn tomography. *Geophys Res Lett*, 33: L22306
- Liang X, Zhou S, Chen Y J, Jin G, Xiao L, Liu P, Fu Y, Tang Y, Lou X, Ning J. 2008. Earthquake distribution in southern Tibet and its tectonic implications. *J Geophys Res*, 113: B12409
- Liang X, Chen Y, Tian X, Chen Y J, Ni J, Gallegos A, Klemperer S L, Wang M, Xu T, Sun C, Si S, Lan H, Teng J. 2016. 3D imaging of subducting and fragmenting Indian continental lithosphere beneath southern and central Tibet using body-wave finite-frequency tomography. *Earth Planet Sci Lett*, 443: 162–175
- Liao Z. 1981. The Setting of geothermal activities in Xizang and discussion on the heat source. In: Liu D S, ed. *Geological and Ecological Studies of Qinghai-Xizang Plateau*. Beijing: Science Press. 925–930
- Liu D S. 1981. *Geological and Ecological Studies of Qinghai-Xizang Plateau (Vol. 1&2)*. Beijing: Science Press
- Liu M, Mooney W D, Li S, Okaya N, Detweiler S. 2006. Crustal structure of the northeastern margin of the Tibetan plateau from the Songpan-Ganzi terrane to the Ordos basin. *Tectonophysics*, 420: 253–266
- Liu Q Y, van der Hilst R D, Li Y, Yao H J, Chen J H, Guo B, Qi S H, Wang J, Huang H, Li S C. 2014. Eastward expansion of the Tibetan Plateau by crustal flow and strain partitioning across faults. *Nat Geosci*, 7: 361–365
- Liu Z, Tian X, Gao R, Wang G, Wu Z, Zhou B, Tan P, Nie S, Yu G, Zhu G, Xu X. 2017. New images of the crustal structure beneath eastern Tibet from a high-density seismic array. *Earth Planet Sci Lett*, 480: 33–41
- Lu Z, Gao R, Li Y, Xue A, Li Q, Wang H, Kuang C, Xiong X. 2013. The upper crustal structure of the Qiangtang Basin revealed by seismic reflection data. *Tectonophysics*, 606: 171–177
- Lu Z, Gao R, Li H, Li W, Kuang C, Xiong X. 2015. Large explosive shot gathers along the Sinoprobe deep seismic reflection profile and Moho depth beneath the Qiangtang Terrane in central Tibet. *Episodes*, 38: 169–178
- McNamara D E, Owens T J, Silver P G, Wu F T. 1994. Shear wave anisotropy beneath the Tibetan Plateau. *J Geophys Res*, 99: 13655–13665
- McNamara D E, Owens T J, Walter W R. 1995. Observations of regional phase propagation across the Tibetan Plateau. *J Geophys Res*, 100: 22215–22229
- Molnar P, Chen W P. 1983. Focal depths and fault plane solutions of earthquakes under the Tibetan Plateau. *J Geophys Res*, 88: 1180–1196
- Molnar P. 1988. A review of geophysical constraints on the deep structure of the Tibetan Plateau, the Himalaya and the Karakoram, and their tectonic implications. *Philos Trans R Soc A-Math Phys Eng Sci*, 326: 33–88
- Nábělek J, Hetényi G, Vergne J, Sapkota S, Kafle B, Jiang M, Su H,

- Chen J, Huang B S, Huang B S. 2009. Underplating in the Himalaya-Tibet collision zone revealed by the Hi-CLIMB experiment. *Science*, 325: 1371–1374
- Nelson K D, Zhao W, Brown L D, Kuo J, Che J, Liu X, Klemperer S L, Makovsky Y, Meissner R, Mechie J, Kind R, Wenzel F, Ni J, Nabelek J, Leshou C, Tan H, Wei W, Jones A G, Booker J, Unsworth M, Kidd W S F, Hauck M, Alsdorf D, Ross A, Cogan M, Wu C, Sandvol E, Edwards M. 1996. Partially molten middle crust beneath southern Tibet: Synthesis of project INDEPTH results. *Science*, 274: 1684–1688
- Owens T J, Randall G E, Wu F T, Zeng R. 1993. PASSCAL instrument performance during the Tibetan Plateau passive seismic experiment. *Bull Seismol Soc Am*, 83: 1959–1970
- Priestley K, Debayle E, McKenzie D, Piliidou S. 2006. Upper mantle structure of eastern Asia from multimode surface waveform tomography. *J Geophys Res*, 111: B10304
- Schulte-Pelkum V, Monsalve G, Sheehan A, Pandey M R, Sapkota S, Bilham R, Wu F. 2005. Imaging the Indian subcontinent beneath the Himalaya. *Nature*, 435: 1222–1225
- Royden , Burchfiel , King , Wang , Chen , Shen , Liu . 1997. Surface deformation and lower crustal flow in eastern Tibet. *Science*, 276: 788–790
- Sandvol E, Ni J, Kind R, Zhao W. 1997. Seismic anisotropy beneath the southern Himalayas-Tibet collision zone. *J Geophys Res*, 102: 17813–17823
- Schurr B, Ratschbacher L, Sippl C, Gloaguen R, Yuan X, Mechie J. 2014. Seismotectonics of the Pamir. *Tectonics*, 33: 1501–1518
- Shi D, Shen Y, Zhao W, Li A. 2009. Seismic evidence for a Moho offset and south-directed thrust at the easternmost Qaidam-Kunlun boundary in the Northeast Tibetan plateau. *Earth Planet Sci Lett*, 288: 329–334
- Singh A, Kumar M R, Raju P S. 2010. Seismic structure of the underthrusting Indian crust in Sikkim Himalaya. *Tectonics*, 29: TC6021
- Sippl C, Schurr B, Yuan X, Mechie J, Schneider F M, Gadoev M, Orunbaev S, Oimahmadov I, Haberland C, Abdybachaev U, Minaev V, Negmatullaev S, Radjabov N. 2013. Geometry of the Pamir-Hindu Kush intermediate-depth earthquake zone from local seismic data. *J Geophys Res-Solid Earth*, 118: 1438–1457
- Tang B, Liu Y, Zhang L, Zhou W, Wang Q. 1981. Isostatic gravity anomalies in the central portion of the Himalayas. In: Liu D S, ed. Geological and Ecological Studies of Qinghai-Xizang Plateau (Vol.1). Beijing: Science Press. 683–689
- Tapponnier P, Zhiqin X, Roger F, Meyer B, Arnaud N, Wittlinger G, Jingsui Y. 2001. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet plateau. *Science*, 294: 1671–1677
- Teng J W, Xiong S B, Sun K Z, Yin Z X, Yao H, Chen L F, Mu T, Lai M H, Chu W M, Yuan S D. 1981a. Explosion seismological study for velocity distribution and structure of the crust and upper mantle from Damxung to Yadong of the Xizang Plateau. In: Liu D S, ed. Geological and Ecological studies of Qinghai-Xizang Plateau (Vol.1). Beijing: Science Press: 691–709
- Teng J W, Wang S Z, Yao Z X. 1981b. Characteristics of the geophysical fields and plate tectonics of the Qinghai-Xizang Plateau and its neighboring regions. In: Liu D S, ed. Geological and Ecological studies of Qinghai-Xizang Plateau (Vol.1). Beijing: Science Press. 633–650
- Teng J W, Sun K Z, Xiong S B, Yin Z X, Yao H, Chen L F. 1983. Deep seismic reflection waves and structure of the crust from Dangxung to Yadong on the Xizang Plateau (Tibet). *Phys Earth Planet Inter*, 31: 293–306
- Teng J, Xiong S, Yin Z, Xu Z, Wang X, Lu D. 1985. Structure of the crust and upper mantle pattern and velocity distributional characteristics in the northern Himalayan mountain region. *J Phys Earth*, 33: 157–171
- Teng J, Wei S, Sun K, Xue C. 1987. The characteristics of the seismic activity in the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau of China. *Tectonophysics*, 134: 129–144
- Teng J W. 1989. Geophysical criteria for “Resuscitating” of the Panxi ancient rift tectonic zone. *Sci China-Ser B*, 32: 117–128, doi: 10.1360/yb1989-32-1-117
- Teng J W, Yin Z X, Sun K Z. 1994. The lithosphere structure and deep internal processes of Xizang Plateau in China. Processings of International Symposium on the Karakorum and Kunlun Mountains. 72–88
- Teng J, Zhang Z, Zhang X, Wang C, Gao R, Yang B, Qiao Y, Deng Y. 2013. Investigation of the Moho discontinuity beneath the Chinese mainland using deep seismic sounding profiles. *Tectonophysics*, 609: 202–216
- Tian X, Chen Y, Tseng T L, Klemperer S L, Thybo H, Liu Z, Xu T, Liang X, Bai Z, Zhang X, Si S, Sun C, Lan H, Wang E, Teng J. 2015. Weakly coupled lithospheric extension in southern Tibet. *Earth Planet Sci Lett*, 430: 171–177
- Tilmann F, Ni J, Ni J. 2003. Seismic imaging of the downwelling Indian lithosphere beneath central Tibet. *Science*, 300: 1424–1427
- Tong W, Zhang J. 1981. Characteristics of geothermal activities in Xizang Plateau and their controlling influence on Plateau’s tectonic model. In: Liu D S, ed. Geological and Ecological Studies of Qinghai-Xizang Plateau. 841–846
- Tseng T L, Chen W P, Nowack R L. 2009. Northward thinning of Tibetan crust revealed by virtual seismic profiles. *Geophys Res Lett*, 36: L24304

- Unsworth M J, Jones A G, Wei W, Marquis G, Gokarn S G, Spratt J E, Bedrosian P, Booker J, Leshou C, Clarke G, Shenghui L, Chanhong L, Ming D, Sheng J, Solon K, Handong T, Ledo J, Roberts B, Roberts B. 2005. Crustal rheology of the Himalaya and Southern Tibet inferred from magnetotelluric data. *Nature*, 438: 78–81
- Vergne J, Wittlinger G, Hui Q, Tapponnier P, Poupinet G, Mei J, Herquel G, Paul A. 2002. Seismic evidence for stepwise thickening of the crust across the NE Tibetan plateau. *Earth Planet Sci Lett*, 203: 25–33
- Wang C, Gao R, Yin A, Wang H, Zhang Y, Guo T, Li Q, Li Y. 2011. A mid-crustal strain-transfer model for continental deformation: A new perspective from high-resolution deep seismic-reflection profiling across NE Tibet. *Earth Planet Sci Lett*, 306: 279–288
- Wang C Y, Han W B, Wu J P, Lou H, Chan W W. 2007. Crustal structure beneath the eastern margin of the Tibetan Plateau and its tectonic implications. *J Geophys Res*, 112: B07307
- Wang C Y, Flesch L M, Silver P G, Chang L J, Chan W W. 2008. Evidence for mechanically coupled lithosphere in central Asia and resulting implications. *Geology*, 36: 363–366
- Wang X, Chen L, Ai Y, Xu T, Jiang M, Ling Y, Gao Y. 2018. Crustal structure and deformation beneath eastern and northeastern Tibet revealed by P-wave receiver functions. *Earth Planet Sci Lett*, 497: 69–79
- Wei S, Teng J, Yang B, Hu Z. 1981. Distribution of geothermal activity and characteristics of geophysical fields on the Xizang plateau. In: Liu D S, ed. *Geological and Ecological Studies of Qinghai-Xizang Plateau*. 865–874
- Wei W, Unsworth M, Jones A, Booker J, Tan H, Nelson D, Chen L, Li S, Solon K, Bedrosian P, Jin S, Deng M, Ledo J, Kay D, Roberts B. 2001. Detection of widespread fluids in the Tibetan crust by magnetotelluric studies. *Science*, 292: 716–719
- Wei W B, Jin S, Ye G F, Deng M, Jing J E, Unsworth M, Jones A G. 2010. Conductivity structure and rheological property of lithosphere in Southern Tibet inferred from super-broadband magnetotelluric sounding. *Sci China Earth Sci*, 53: 189–202
- Wu C, Xu T, Badal J, Wu Z, Teng J. 2015. Seismic anisotropy across the Kunlun fault and their implications for northward transforming lithospheric deformation in northeastern Tibet. *Tectonophysics*, 659: 91–101
- Wu C, Tian X, Xu T, Liang X, Chen Y, Taylor M, Badal J, Bai Z, Duan Y, Yu G, Teng J. 2019. Deformation of crust and upper mantle in central Tibet caused by the northward subduction and slab tearing of the Indian lithosphere: New evidence based on shear wave splitting measurements. *Earth Planet Sci Lett*, 514: 75–83
- Wu J, Zhang Z J, Kong F S, Yang B B, Yu Y Q, Liu K H, Gao S S. 2015. Complex seismic anisotropy and its geodynamic implications. *Earth Planet Sci Lett*, 413: 167–175
- Wu Z, Xu T, Badal J, Yao H, Wu C, Teng J. 2017. Crustal shear-wave velocity structure of northeastern Tibet revealed by ambient seismic noise and receiver functions. *Gondwana Res*, 41: 400–410
- Wu Z, Xu T, Liang C, Wu C, Liu Z. 2018. Crustal shear wave velocity structure in the northeastern Tibet based on the Neighbourhood algorithm inversion of receiver functions. *Geophys J Int*, 212: 1920–1931
- Xu Q, Zhao J, Yuan X, Liu H, Pei S. 2015. Mapping crustal structure beneath southern Tibet: Seismic evidence for continental crustal underthrusting. *Gondwana Res*, 27: 1487–1493
- Xu Q, Zhao J, Yuan X, Liu H, Pei S. 2017. Detailed configuration of the underthrusting Indian lithosphere beneath western Tibet revealed by receiver function images. *J Geophys Res-Solid Earth*, 122: 8257–8269
- Xu T, Wu Z, Zhang Z, Tian X, Deng Y, Wu C, Teng J. 2014. Crustal structure across the Kunlun fault from passive source seismic profiling in east Tibet. *Tectonophysics*, 627: 98–107
- Xu T, Zhang Z J, Liu B F, Chen Y, Zhang M H, Tian X B, Xu Y G, Teng J W. 2015. Crustal velocity structure in the Emeishan Large Igneous Province and evidence of the Permian mantle plume activity. *Sci China Earth Sci*, 58: 1133–1147
- Yang Y, Ritzwoller M H, Zheng Y, Shen W, Levshin A L, Xie Z. 2012. A synoptic view of the distribution and connectivity of the mid-crustal low velocity zone beneath Tibet. *J Geophys Res*, 117: B04303
- Yao H, van der Hilst R D, de Hoop M V. 2008. Surface-wave array tomography in SE Tibet from ambient seismic noise and two-station analysis—I. Phase velocity maps. *Geophys J Int*, 166: 732–744
- Yi Z, Huang B, Chen J, Chen L, Wang H. 2011. Paleomagnetism of early Paleogene marine sediments in southern Tibet, China: Implications to onset of the India-Asia collision and size of Greater India. *Earth Planet Sci Lett*, 309: 153–165
- Zhang X, Teng J, Sun R, Romanelli F, Zhang Z, Panza G F. 2014. Structural model of the lithosphere-asthenosphere system beneath the Qinghai-Tibet Plateau and its adjacent areas. *Tectonophysics*, 634: 208–226
- Zhang Z, Klemperer S L. 2005. West-east variation in crustal thickness in northern Lhasa block, central Tibet, from deep seismic sounding data. *J Geophys Res*, 110: B09403
- Zhang Z, Klemperer S. 2010. Crustal structure of the Tethyan Himalaya, southern Tibet: new constraints from old wide-angle seismic data. *Geophys J Int*, 307: 1247–1260
- Zhang Z J, Deng Y F, Teng J W, Wang C Y, Gao R, Chen Y, Fan W M. 2011a. An overview of the crustal structure of the Tibetan plateau after 35 years of deep seismic soundings. *J Asian Earth Sci*, 40:

- 977–989
- Zhang Z, Klemperer S, Bai Z, Chen Y, Teng J. 2011b. Crustal structure of the Paleozoic Kunlun orogeny from an active-source seismic profile between Moba and Guide in East Tibet, China. *Gondwana Res*, 19: 994–1007
- Zhang Z, Bai Z, Klemperer S L, Tian X, Xu T, Chen Y, Teng J. 2013. Crustal structure across northeastern Tibet from wide-angle seismic profiling: Constraints on the Caledonian Qilian orogeny and its reactivation. *Tectonophysics*, 606: 140–159
- Zhang Z, Teng J, Romanelli F, Braitenberg C, Ding Z, Zhang X, Fang L, Zhang S, Wu J, Deng Y, Ma T, Sun R, Panza G F. 2014a. Geophysical constraints on the link between cratonization and orogeny: Evidence from the Tibetan Plateau and the North China Craton. *Earth Sci Rev*, 130: 1–48
- Zhang Z, Wang Y, Chen Y, Houseman G A, Tian X, Wang E, Teng J. 2009. Crustal structure across Longmenshan fault belt from passive source seismic profiling. *Geophys Res Lett*, 36: L17310
- Zhang Z, Wang Y, Houseman G A, Xu T, Wu Z, Yuan X, Chen Y, Tian X, Bai Z, Teng J. 2014b. The Moho beneath western Tibet: Shear zones and eclogitization in the lower crust. *Earth Planet Sci Lett*, 408: 370–377
- Zhao G, Unsworth M J, Zhan Y, Wang L, Chen X, Jones A G, Tang J, Xiao Q, Wang J, Cai J, Li T, Wang Y, Zhang J. 2012. Crustal structure and rheology of the Longmenshan and Wenchuan M_w 7.9 earthquake epicentral area from magnetotelluric data. *Geology*, 40: 1139–1142
- Zhao J, Mooney W D, Zhang X, Li Z, Jin Z, Okaya N. 2006. Crustal structure across the Altyn Tagh Range at the northern margin of the Tibetan Plateau and tectonic implications. *Earth Planet Sci Lett*, 241: 804–814
- Zhao J, Murodov D, Huang Y, Sun Y, Pei S, Liu H, Zhang H, Fu Y, Wang W, Cheng H, Tang W. 2014. Upper mantle deformation beneath central-southern Tibet revealed by shear wave splitting measurements. *Tectonophysics*, 627: 135–140
- Zhao J, Yuan X, Liu H, Kumar P, Pei S, Kind R, Zhang Z, Teng J, Ding L, Gao X, Xu Q, Wang W. 2010. The boundary between the Indian and Asian tectonic plates below Tibet. *Proc Natl Acad Sci USA*, 107: 11229–11233
- Zhao J, Jin Z, Mooney W D, Okaya N, Wang S, Gao X, Tang L, Pei S, Liu H, Xu Q. 2013. Crustal structure of the central Qaidam basin imaged by seismic wide-angle reflection/refraction profiling. *Tectonophysics*, 584: 174–190
- Zhao W L, Morgan W J. 1987. Injection of Indian crust into Tibetan lower crust: A two-dimensional finite element model study. *Tectonics*, 6: 489–504
- Zhao W, Mechie J, Brown L D, Guo J, Haines S, Hearn T, Klemperer S L, Ma Y S, Meissner R, Nelson K D, Ni J F, Pananont P, Rapine R, Ross A, Saul J. 2001. Crustal structure of central Tibet as derived from project INDEPTH wide-angle seismic data. *Geophys J Int*, 145: 486–498
- Zhao W, Kumar P, Mechie J, Kind R, Meissner R, Wu Z, Shi D, Su H, Xue G, Karplus M, Tilmann F. 2011. Tibetan plate overriding the Asian plate in central and northern Tibet. *Nat Geosci*, 4: 870–873
- Zhao W, Nelson K D, Che J, Quo J, Lu D, Wu C, Liu X. 1993. Deep seismic reflection evidence for continental underthrusting beneath southern Tibet. *Nature*, 366: 557–559
- Zhou H, Murphy M A. 2005. Tomographic evidence for wholesale underthrusting of India beneath the entire Tibetan plateau. *J Asian Earth Sci*, 25: 445–457
- Zhou W H, Yang Z S, Zhu H B, Wu L G. 1981. Characteristics of the gravity field and the crustal structure in the eastern and central regions of the Xizang plateau. In: Liu D S, ed. *Geological and Ecological Studies of Qinghai-Xizang Plateau (Vol. 1)*. 673–682. Beijing: Science Press
- Zhu G, Liang X, Tian X, Yang H, Wu C, Duan Y, Li W, Zhou B. 2017. Analysis of the seismicity in central Tibet based on the SANDWICH network and its tectonic implications. *Tectonophysics*, 702: 1–7
- Zhu L, Helmberger D V. 1996. Intermediate depth earthquakes beneath the India-Tibet collision zone. *Geophys Res Lett*, 23: 435–438
- Zhu L, Helmberger D V. 1998. Moho offset across the northern margin of the Tibetan Plateau. *Science*, 281: 1170–1172

(责任编辑: 陈凌)