

DOI: 10.16788/j.hddz.32-1865/P.2024.08.008

引文格式: 张进, 张北航, 赵磊, 赵衡, 曲军峰, 张义平, 王振义, 杨亚琦. 2025. 基底卷入型构造: 特征、样式、机制与形成环境[J]. 华东地质, 46(3): 293-313. (ZHANG J, ZHANG B H, ZHAO L, ZHAO H, QU J F, ZHANG Y P, WANG Z Y, YANG Y Q. 2025. Basement-involved structures: characteristics, styles, mechanism and tectonic settings[J]. East China Geology, 46(3): 293-313.)

基底卷入型构造: 特征、样式、机制与形成环境

张进¹, 张北航², 赵磊¹, 赵衡¹, 曲军峰¹, 张义平³, 王振义⁴, 杨亚琦⁵

(1. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 2. 中国科学院西北生态环境资源研究院, 甘肃兰州 730000; 3. 中国地质科学院, 北京 100037; 4. 中国地质调查局呼和浩特自然资源综合调查中心, 内蒙古呼和浩特 010010; 5. 贵州大学资源与环境工程学院喀斯特地质资源与环境教育部重点实验室, 贵州贵阳 550025)

摘要: 基底卷入型构造是厚皮构造的主要类型之一, 该类型构造发育于多种构造环境中, 并非仅仅局限在活动大陆边缘地区, 部分发育在远离活动大陆边缘的内陆地区, 还涉及到造山带的形成、前陆盆地的破碎、高原的形成以及克拉通的变形等。基底卷入型构造中, 基底与盖层变形既有联系又存在明显区别。一般而言, 盖层厚度、基底先存构造、应力场方向以及基底与盖层的流变学差异等是控制基底卷入型构造的重要因素。目前, 有关基底卷入型构造的动力来源, 尤其是深处内陆地区的变形动力机制还尚不清楚, 大洋板块低角度俯冲被认为是导致应力远距离传递的主要途径。中国大陆在中、新生代经历了多期次的构造-热事件, 有发育基底卷入型构造的先决条件, 在华北中部、准噶尔盆地以及青藏高原北部等地区均发现了典型的基底卷入型构造, 它们的形成代表着不同的大陆地壳变形状态, 既有高原形成过程中的变形, 也有克拉通的缩短变形, 还有代表着造山带前陆地区逐渐破碎化的过程。我国基底卷入型构造的研究尚未得到足够的重视, 还缺少对这些变形在大陆变形过程中意义的深刻认识。我国华南地区中生代也经历了显著的大陆变形, 然而区别于华北地区, 华南地区基底卷入型构造的报道和研究更少, 这可能是未来的研究方向之一。

关键词: 基底卷入型构造; 变形特征; 形成机制; 造山带; 厚皮构造

中图分类号: P542

文献标识码: A

文章编号: 2096-1871(2025)03-293-21

基底卷入型构造是指基底参与到盖层褶皱变形过程中的一种构造, 而基底多为宏观上各向同性的深变质岩或深成岩。一些具有层状构造的变质岩(如片岩等), 虽然也属于基底的范畴, 但在涉及基底卷入型构造的讨论中, 较早的研究认为其不能作为基底对待(Stearns, 1978)。厚皮构造则多指由切穿基底的断层活动而形成并且涉及结晶基底的区域性变形构造, 广泛分布在造山带及其前陆的隆起上(Rodgers, 1987)。可以看出, 结晶基

底以及变形的区域性是评判是否属于厚皮构造的重要条件。因此, 基底卷入型构造属于厚皮构造。与厚皮构造对应的是薄皮构造, 其基底没有卷入变形, 基底变形与盖层变形呈显著的不协调关系。基底卷入型构造中, 基底与盖层截然不同的变形方式与机制、基底隆起无规律性的分布以及多解的动力学背景等因素, 一直吸引着不同地区的构造地质学家的长期关注, 而如何解释距离板缘千米以上的板内基底卷入型构造的形成机制, 也成

* 收稿日期: 2024-08-22 修订日期: 2024-11-12 责任编辑: 石磊

基金项目: 中国地质科学院基本科研业务费专项“中亚造山带中段晚古生代韧性剪切系统构造特征与剪切带型金矿的形成与保存(编号: JKYZD202309)”、国家自然科学基金“中亚造山带中段(北山)俯冲-增生结构与造山带变形: 三维大地电磁探测与韧性剪切变形的联合约束(编号: U2344215)”和中国地质调查局“天山—兴安中段关键地区成矿系统与找矿预测(编号: DD20240075)”“北山—阿拉善关键构造带专题地质调查(编号: DD20221646)”“西藏阿索地区增生杂岩分布区1:5万区域地质调查(编号: DD20250102604)”项目联合资助。

第一作者简介: 张进, 1973年生, 男, 研究员, 博士, 主要从事基础地质调查与造山带变形研究工作。Email: zhangjinem@sina.com.

为板块构造理论的重要内容之一(Berg, 1962; Brown, 1988; Coney, 1972; Davis, 1978; English and Johnston, 2004; Li and Li, 2007; Mitra and Mount, 1998; Rodgers, 1987; Stearns, 1978; Weil and Yonkee, 2023; Yonkee and Weil, 2015; Zhang et al., 2021a)。

典型基底卷入型构造的研究主要集中在北美西部的 Laramide 造山带和南美西部的 Central Andes 造山带,目前已经建立起了板缘作用与板内变形的关系,同时也有学者提出了不同基底卷入型构造的模型(Brown, 1988; Davis, 1978; Erslev, 1993; Horton et al., 2022; Jordan and Allmendinger, 1986; Schmidt et al., 1993; Stearns, 1978; Stone, 1993; Tindall and Davis, 1999; Yeck et al., 2014; Yin, 1994)。基于北美西部 Laramide 造山带的研究,基底卷入型构造的形成机制,早期多认为是垂直运动所导致(Stearns, 1978),但目前多认为是水平挤压引起的(Yin, 1994)。然而,在其变形机制以及构造背景等问题上还没有定论,如基底卷入型褶皱形成过程中,控制不同构造样式的原因(Brown, 1988)、基底与盖层之间是否耦合(Cook, 1978)、基底与盖层的变形是否一致(Mitra and Mount, 1998)、基底早期结构构造的作用(Davis, 1978; Yin, 1994; Yonkee and Weil, 2015)、变形是一次形成还是多次形成(Wise and Obi, 1992)以及构造形成的动力(Bird, 1988; English and Johnston, 2004)等。

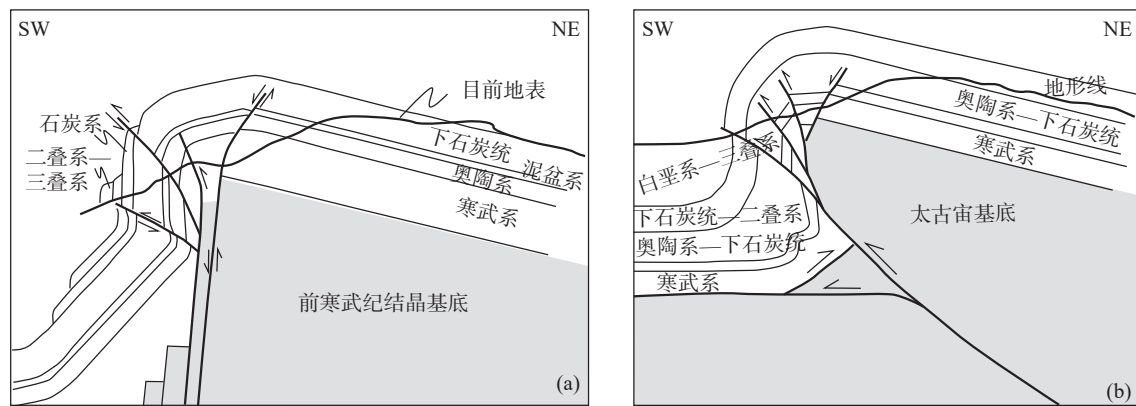
我国大陆以多阶段的构造-热事件叠加而著称(Dong et al., 2015),尤其是中、新生代以来陆内构造变形异常发育,而与“华北克拉通破坏”相关的研究成为近年来不同领域关注和讨论的热点之一,“早白垩世华北克拉通经历了强烈的伸展”已经成为共识(Wang et al., 2011; Wu et al., 2019; 朱日祥等, 2012)。此外,也有少量研究注意到了白垩纪之前华北克拉通也经历过明显的构造缩短作用,如克拉通西缘的贺兰山—狼山(Darby and Ritts, 2002; Zhang et al., 2014)、北缘的阴山—燕山的逆冲推覆(Davis et al., 1998)以及中部的吕梁山地区(Clinkscales and Kapp, 2019; Zhang et al., 2021b, 2022; Zhao et al., 2020; 刘光勋等, 1985; 张北航等, 2020; 张岳桥等, 2007)。在这些缩短构造中,尤其以吕梁山最为特殊,该地区出露了比较典型的基底卷入型构造,但一直没有引起关注,目前对其变形机制、背景和时代也有不同的认识

(Zhang et al., 2020, 2021b; Zhao et al., 2020; 张北航等, 2020; 张兆琪, 2011)。基底卷入型构造的研究在我国尚属薄弱,虽然已经在华北等地区有一定的报道,而华南地区相关的构造研究更加稀少,尽管早前在雪峰山(Faure et al., 2016; 颜丹平等, 2008, 2018; 杨付领, 2015)以及南盘江地区有过相关研究(Yang et al., 2021),然而在其他地区的报道总体上很零散,华南地区大面积范围内主要还是以薄皮构造为特征,同时也不排除有基底卷入型的构造形成。因此,加强这方面的研究工作有助于理解华南中生代的变形环境和条件,也有利于分析对比华北和华南同期变形差异的控制因素。本文简单介绍了基底卷入型构造的基本特征、样式和形成机制,在此基础上,阐述了目前我国一些基底卷入型构造的主要分布区、特征以及今后可能的研究方向。

1 基底卷入型构造的特征与样式

目前,基底卷入型构造的研究主要集中在北美西部和南美西部,并经历了约 150 年的研究,而对该类型构造的认识也是逐渐深入的。就基底卷入型构造的样式和特征而言,不同时期的野外描述也不同,例如 Stearns(1978)和 Erslev(2005)针对同一个 Rattlesnake 背斜的认识就有明显的差别(图 1),原因是 Stearns(1978)的剖面是不可平衡的。目前,一般认为这些构造的盖层变形往往以褶皱为主,在剖面上多数褶皱前翼较为陡立,甚至是倒转的,而褶皱核部盖层的变形不显著,多表现为比较宽缓的背斜,这类似于箱状背斜的一翼,而上覆地层中经常发育一些与基底断层性质相反的正断层。相反,基底的变形则复杂多样,且主要集中在一个断层(带)上(Mitra and Mount, 1998)或者相互平行的多个断层上(Spang and Evans, 1988),这些断层在顶端一般形成变形集中的三角区域,即 Trishear 模型(Erslev, 1991)。当然,由于基底中存在着前期的面状构造(片理或片麻理),在合适的产状和应力条件下,基底会发生类似盖层的弯滑作用(Davis, 1978; Schmidt et al., 1993),但这不属于典型的基底卷入型构造(Stearns, 1978)。

虽然厚皮构造中基底的变形主要以断层为主,



(a).Stearns(1978)模型; (b).Erslev(1986)模型

图1 北美西部 Laramide 造山带 Rattlesnake 背斜基底断层与上覆地层中断层关系的不同解释模型

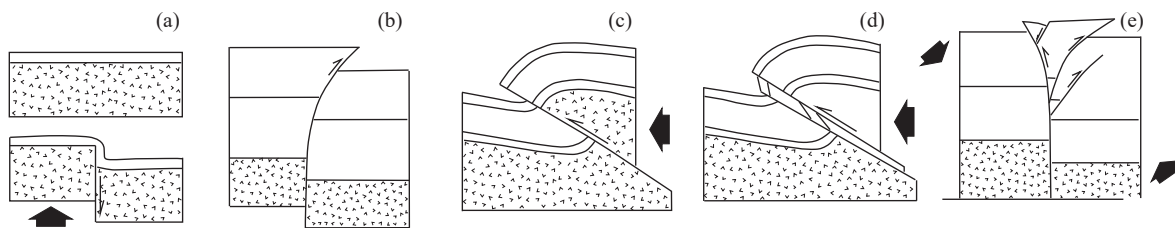
Fig. 1 Different interpretation models on the relationship between Rattlesnake anticlinal basement fault and the fault in overlying strata in the Laramide orogenic belt, the western North America

但是不同的学者对于断层的活动也有着不同的认识, 针对北美西部的 Laramide 型基底卷入型褶皱, 已提出至少 5 种基底断层活动形式(图 2): ①被动褶皱 Drape fold(Spang and Evans, 1988); ②仰冲断层 Upthrust fault(Stearns, 1978); ③逆冲隆起 Thrust uplift(Berg, 1962); ④褶皱逆冲 Fold thrust(Stone, 1993); ⑤扭动隆起 Wrench uplift(Tindall and Davis, 1999)。

早期的研究倾向于认为是垂直运动造成了北美西部的基底卷入型构造(Stearns, 1978), 但越来越多的研究则揭示主要的构造应力来自板块边缘, 大洋板块低角度的俯冲可以将应力传递到板块内部, 从而导致了板块内部的变形(Yonkee and Weil, 2015)。早期研究认为北美西部厚皮构造的逆冲断层倾角很大, 甚至直立(Stearns, 1978)。在上述不同模型中, 观点①和②主要倾向于基底发生垂向运动, 后 3 种观点则认为构造是由基底水平运动造成的, 这也得到了近年来地球物理勘探研究结果的证实, 这些地表高陡的逆冲断层向下至 20~

30 km 深度即变成近水平方向(Brown, 1988; Stone, 1993)。因此, 水平应力造成 Laramide 厚皮构造形成的观点成为主要的共识(Yin, 1994; Yonkee and Weil, 2015)。

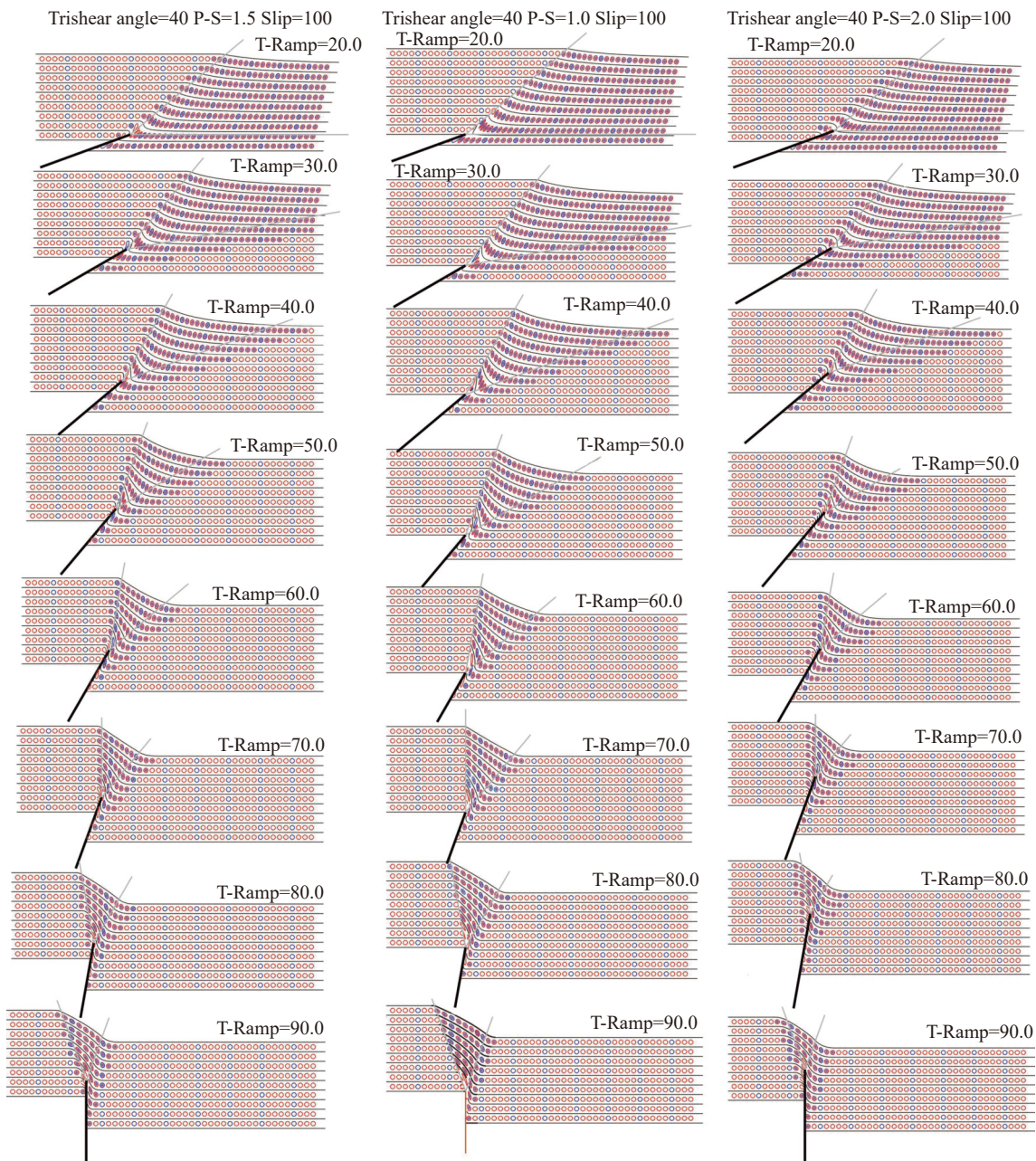
基底断层的产状、扩展以及位移量等因素强烈影响着上覆地层的变形, 通过三角剪切模型模拟可以看出, 断层的倾角是最为重要的控制因素(图 3)。在断层位移量一定的情况下, 断层倾角越大, 上覆地层变形的范围越小, 变形越集中在断层之上的很小的区域内; 相反, 断层倾角越缓, 其影响的地层变形范围越大, 但是盖层中的变形相对而言变形程度变小。在断层倾角一致的情况下, 断层位移量越大, 盖层受影响而变形的范围也越大。需要说明的是, 在基底卷入型构造中, 在受影响的盖层中经常会出现与基底断层性质完全相反的情况, 但是其断层的走向是一致的(图 1)。在早期的研究中, 就是这些正断层产生的假象造成了不同学者对基底卷入型构造成因机理的错误解释。



(a).被动褶皱; (b).仰冲断层; (c).逆冲隆起; (d).褶皱逆冲; (e).扭动隆起

图2 基底卷入型构造断层活动方式(Brown, 1988)

Fig. 2 Different styles of basement-involved structures(Brown, 1988)



P-S.传播与滑动量比率; T-Ramp. 断坡倾角; Trishear angle.三角剪切角; Slip.滑动量

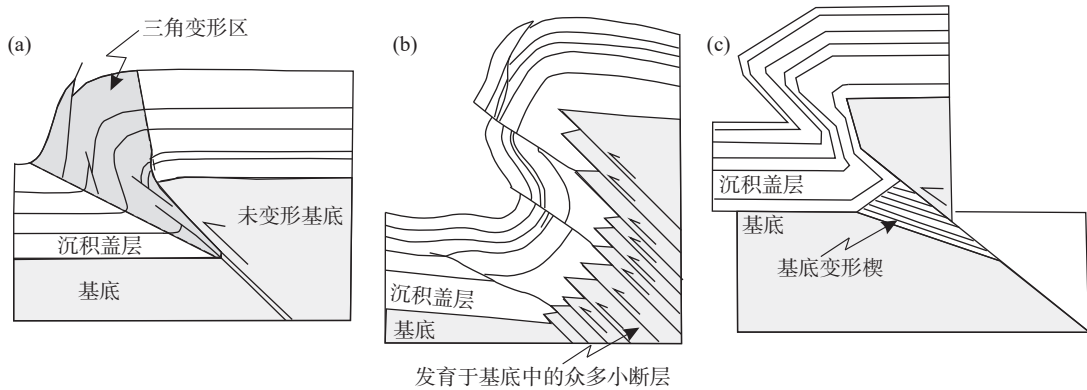
图3 不同倾角的基底断层造成的上覆地层不同的变形程度与范围

Fig. 3 Different deformative degrees and ranges of overlying strata caused by basement faults with different dip angles

2 形成机制

基底卷入型构造的形成机制已成为构造领域长期讨论的问题之一,并有多本论文集涉及这方面的研究。从运动学角度来看,目前已经总结出2个大类:①基底变形主要表现为不同样式的断层活动,而上覆地层则以褶皱为特征(图4)(Cook, 1988; Mitra and Mount, 1998; Spang and Evans,

1988);②类似盖层的弯滑作用(Chase et al., 1993; Schmidt et al., 1993)或者褶皱(García and Davis, 2004),当然该类并不属于严格意义上的基底卷入型构造(Stearns, 1978)。当基底以断层形式活动时,主要表现为碎裂岩化作用(Cook, 1988; Mitra and Frost, 1981)和早期面状组构的再活动(García and Davis, 2004; Huntoon, 1993; Marshak et al., 2000; Stone, 2002)。



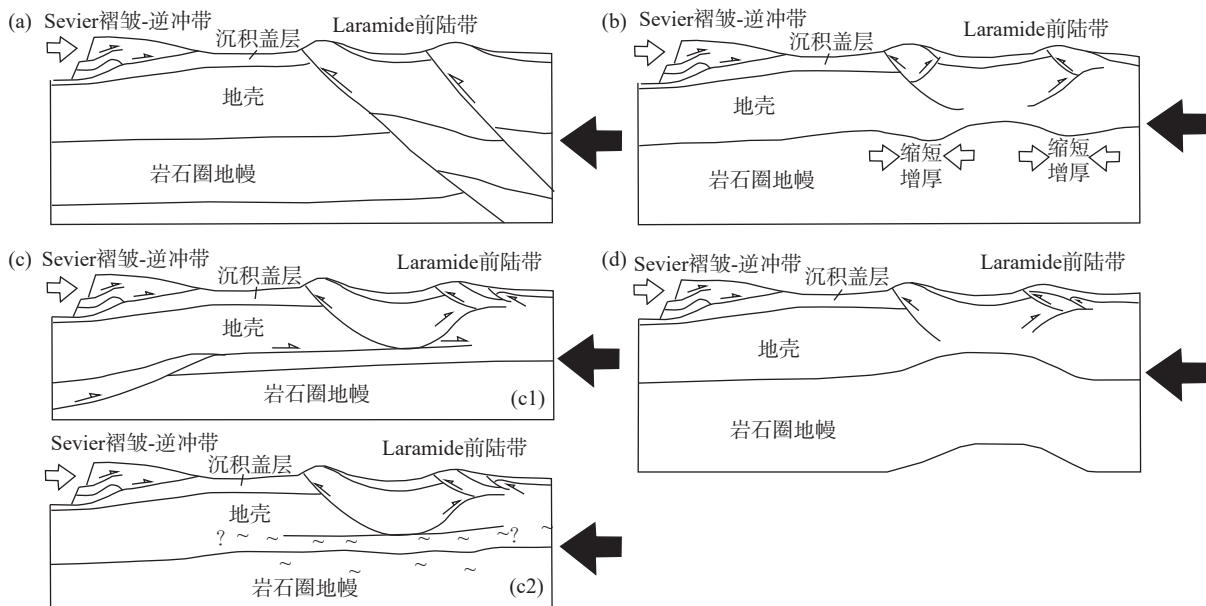
(a) 基底主断层活动, 盖层在断层三角区内褶皱变形; (b) 基底变形主要表现为一系列小断层活动; (c) 基底变形以具有一定宽度的变形带(楔)为特征, 而盖层则以褶皱为主

图4 与基底断裂活动有关的卷入型褶皱的形成机制(据 Mitra and Mount, 1998 修改)

Fig. 4 Formation mechanism of basement-involved folds related to the activity of basement faults (after Mitra and Mount, 1998)

动力学方面, 前人主要基于北美 Laramide 厚皮构造提出了一系列模型(图 5), 主要包括: ①岩石圈断层(McQueen and Beaumont, 1989); ②岩石圈纯剪增厚(Egan and Urquhart, 1993); ③地壳拆离(Erslev, 1993; McQuarrie and Chase, 2000); ④岩石圈纵弯作用(Tikoff et al., 2022)。随着深部地球物理探测技

术的发展, 目前已经确定, 控制着 Laramide 基底卷入型构造的断层没有切割莫霍面, 莫霍面也没有相应弯曲, 因此岩石圈断层模型和纯剪模型已经被否定, 而其他 2 个模型都有可取之处, 但是多数研究倾向于控制基底卷入型构造的断层在下地壳滑脱的观点(Erslev, 1993; Weil and Yonkee, 2023)。



(a) 岩石圈断层模型; (b) 纯剪增厚模型; (c) 地壳拆离模型; (d) 岩石圈纵弯模型

图5 北美西部 Laramide 造山带形成的动力模型(据 Weil and Yonkee, 2023 修改)

Fig. 5 Dynamic mechanism of Laramide orogenic belt in the western North America(after Weil and Yonkee, 2023)

3 构造背景

对基底卷入型构造形成的动力来源一直存在着不同认识, 包括北美西部 Laramide 造山带在内

的多数厚皮构造往往发育在陆内或板内, 造成这些变形的动力来自何处成为一个关键的问题。由于多数研究来自北美西部以及南美西部, 主要的模型也都来自这两个地区。这两个地区的共同特

点是靠近活动大陆边缘,因此多数的研究认为基底卷入型构造与俯冲或者碰撞有密切的关系,与板块之间的相互作用有关(Bird, 1988; Dickinson and Snyder, 1978),但是不同学者的具体解释方案并不相同。就北美西部而言,存在以下几种不同的认识:①随着海洋板块向东俯冲,沿 Cordillera 逆冲褶皱带形成的背冲构造(Price, 1981);②Laramide 造山带的变形通过地壳中的一个区域性滑脱层与板块边缘相连,与地体碰撞有关(Oldow et al., 1990);③大洋板块沿着上覆板块的底边界进行低角度俯冲,从而在上覆板块中形成水平应力(图6)(Bird, 1988; Yonkee and Weil, 2015);④北美西部一系列的外来地体向北拼贴,并与北美板块发生碰撞,导致了 Laramide 造山带的形成(Maxson and Tikoff, 1996);⑤由于 Laramide 西侧 Sevier 造山带的垮塌,造成了东侧 Laramide 地区的挤压。目前,越来越多的研究倾向于主要作用力来自大洋板块向东的平板俯冲或低角度俯冲(Weil and Yonkee, 2023; Yonkee and Weil, 2015)。

目前,我国相关的研究还较为薄弱,就华北中部吕梁山基底卷入型构造的形成机制而言,现有的研究也认为其与古太平洋板块向西的低角度俯冲有关,即在中一晚侏罗世,古太平洋板块的低角度俯冲,导致了应力的远距离传递,引起了华北克拉通中部古元古代造山带中的薄弱带重新发生了活动,形成了基底卷入型的构造(Zhang et al., 2021b; Zhao et al., 2020)。进入白垩纪,随着古太

平洋板块俯冲角度的变大与回撤,华北克拉通开始裂解破坏,早期的厚皮构造亦被破坏。

准噶尔盆地基底卷入型构造的形成则可能与周缘造山带的晚古生代—中生代强烈变形有关(Hendrix et al., 1992; Zhang et al., 2022)。该盆地在这段时间内分别经历了近 EW 向和近 SN 向的作用,导致了基底内的薄弱带发生了活动,形成了准噶尔盆地的棋盘格状构造,类似于北美西部前陆盆地破碎化的过程(Horton et al., 2022)。

青藏高原北部基底卷入型构造的形成则与印度-欧亚大陆的碰撞有直接关系。在新生代,随着碰撞的开始,应力被远距离传递至祁连山地区(Yin et al., 2008),致使早期俯冲形成的超高压变质带重新活动,并形成了上覆的新生代地层褶皱。

可以看出,导致基底卷入型构造形成的构造环境多种多样,动力来源也多种多样,北美和南美西部基底卷入型构造的形成环境只是其中一种方式,我国多个地区发育的此类构造从不同角度都说明了只要有合适的应力场,基底中早期的薄弱带都有可能发生复活,形成相应的基底卷入型构造。

4 我国研究现状

4.1 华北中部

华北克拉通在早白垩世经历了强烈的伸展,

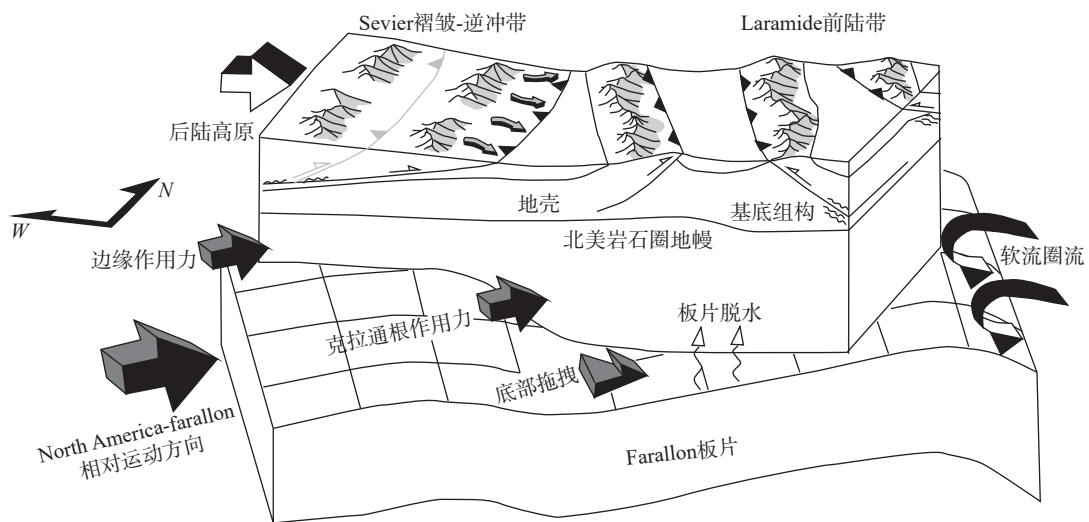


图6 北美西部 Laramide 造山带形成的应力传递模型(据 Weil and Yonkee, 2023 修改)

Fig. 6 Stress transfer for the formation of Laramide orogenic belt in the western North America(after Weil and Yonkee, 2023)

“华北克拉通破坏”相关的研究也成为近年来不同领域关注和研究的热点之一(Li et al., 2019; Lin and Wei, 2020; Wu et al., 2019; Zhu et al., 2017; 朱日祥等, 2011, 2012)。而在中、晚侏罗世华北克拉通也发生过明显的构造缩短作用,如贺兰山—狼山(Darby and Ritts, 2002, 2007; Faure et al., 2012; Zhang et al., 2014, 2022)、阴山—燕山(Davis et al., 1998; Li et al., 2016; Liu et al., 2007; 张长厚等, 2006; 赵越等, 2004)。而位于华北克拉通中部的吕梁山—太行山地区则形成了中国东部出露最为典型的基底卷入型构造(Zhang et al., 2020, 2022; Zhao et al., 2020)。

吕梁山是一个在晚侏罗世形成的陆内基底卷入型的褶皱系统(图7),该褶皱系统是在前寒武纪华北中部造山带基底上形成的,北宽南窄,走向上长约560 km,东西宽80~120 km。国外一般将这种基底卷入型的褶皱称为 monocline,我国通常翻译为“单斜构造”,也有部分学者认为就是挠曲(张兆琪等, 2011),但这与单斜的英文(homocline)有一定区别,我们在之前的工作中建议将其翻译成“单褶构造”(张北航等, 2020)。吕梁山北段为走向NNE的宽缓背斜,基底很少出露,在其东侧和核部发育不同走向的单褶构造(图7)。中段核部大片前寒武纪变质岩出露,两侧则分布着典型的近SN走向的单褶构造。南段为近SN向的以古生界为主的复式褶皱,西缘和南缘发育典型的近SN向和EW向的单褶构造,基底仅局部出露于核部。研究表明,吕梁山基底中早期面理(片麻理、片理、劈理以及节理)在后期的近EW向的挤压作用下可以再次活动(图7),造成了基底断层活动,并导致了上覆沉积地层的褶皱(图8),致使吕梁山不同地区的褶皱形成的古应力场方向总体一致,为SE(122°)—NW(302°)向挤压(图7, Zhang et al., 2020)。吕梁山褶皱的形成被归因于古太平洋板块在晚侏罗世向西的低角度俯冲,造成了华北克拉通的陆内变形(Zhang et al., 2020; Zhao et al., 2020)。

除吕梁山外,太行山西麓也发育大量的基底卷入型构造或者单褶构造(Zhang et al., 2020)。例如,在系舟山北缘,古元古代花岗岩自NW向SE逆冲于寒武系碎屑岩之上,并导致了寒武纪地层发生倒转,形成一个断层传播褶皱,断层上盘的褶

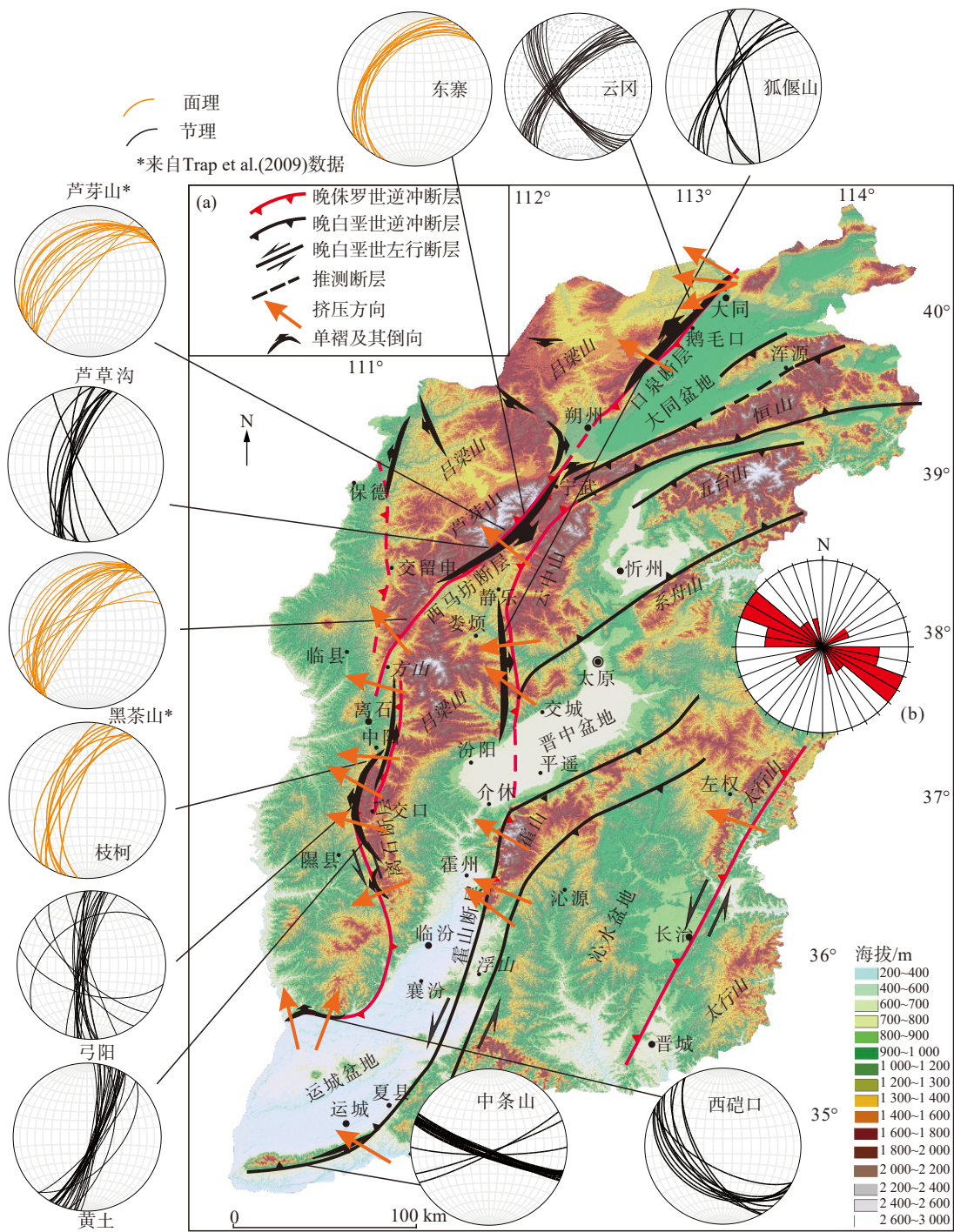
皱已经被剥蚀殆尽(图9)。在霍山地区,前寒武纪的基底花岗片麻岩成为基底卷入褶皱的核部,发育大量近EW向或近SN向的逆冲断层,这2组断层控制了霍山大型基底卷入型褶皱的发育(Zhang et al., 2020)。此外,在太行山断层沿线以及霍山西缘也发育一系列的“单褶”构造,虽然没有基底直接出露,但是其构造样式与典型基底卷入型构造中盖层的变形一致(Zhang et al., 2020)。

4.2 准噶尔盆地

准噶尔盆地位于中亚造山带西段,整体呈三角形,盆地及邻区被夹持于西伯利亚板块、哈萨克斯坦板块和塔里木板块之间。该区保存了大量关于古亚洲洋形成、发展和消亡过程的地质记录,对这些地质记录的研究是揭示中亚增生造山带造山过程和大陆生长方式的关键,近几十年来引起了国际地学界的广泛关注(Xiao et al., 2015)。已有研究表明,准噶尔盆地是由时代不同的造山带所围限的地区,而学界对盆地的基底目前有不同认识,多数学者认为该盆地基底主要为陆壳(Han et al., 1999),也有一部分学者认为盆地基底主体为大洋洋壳(Chen and Jahn, 2004)。由于盆地被广泛覆盖,盆地的基底问题仍然没有达成共识。

准噶尔盆地是一个具有长期演化、内部结构复杂等特征的盆地,其内部包含东部隆起、西部隆起、乌伦古坳陷、陆梁隆起、中央坳陷和北天山山前冲断带6个次级单元(图10)。而组成这些隆起的次级构造多数是受到基底逆冲断层控制的基底隆起(凸起)(图10)。虽然目前准噶尔盆地基底卷入型构造的研究还很薄弱,但是该盆地可能是我国基底卷入型褶皱最为典型的地区,盆地内部发育了很多不同方向的凸起构造和隆起,这些基底构造格局在晚古生代末期即已经确立,而这些凸起或者隆起在中、晚侏罗世又发生了明显的活动,从而导致了盖层的变形。

位于准噶尔盆地西缘的大侏罗沟提供了一个考察基底变形与后期变形的最为直接的例子。大侏罗沟基底的变形表现为一系列密集排列的陡倾逆冲断层,岩石破碎,断层面上擦痕发育(图11)。基底的变形通过密集的逆冲断层实现,而盖层变形则表现为褶皱。到了晚侏罗世,西准地区受到NW—SE向的挤压,基底密集发育的NW—SE走向逆冲断层转变为右行走滑断层(即大侏罗沟断



(a)赤平投影图展示基底岩石中主要面理或者节理的产状；(b)山西地区所有同期古应力方向玫瑰花统计图

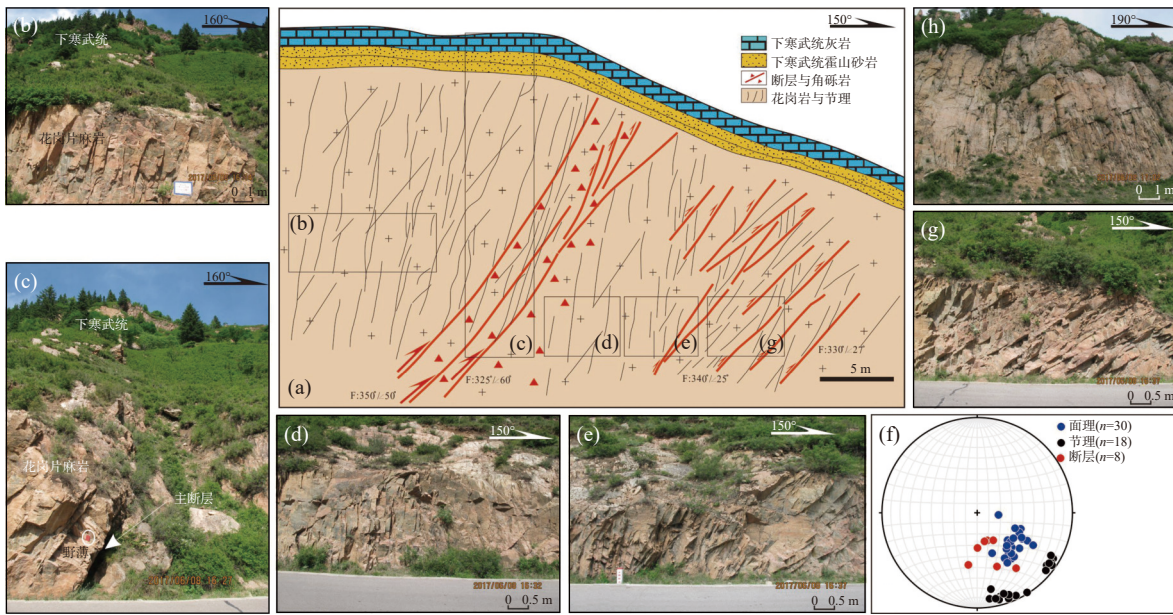
图7 华北克拉通中部中生代基底卷入型构造特征与分布图

Fig. 7 Characteristics and distribution of Mesozoic basement-involved structures in the central North China Craton

层),因此可以确定是早期的基底构造控制了晚期的走滑构造,这个特征在准噶尔盆地腹地变形中很常见。

与大侏罗沟石炭系变形相似的实例在准噶尔盆地中广泛存在,尤其是在各个凸起与凹陷的过

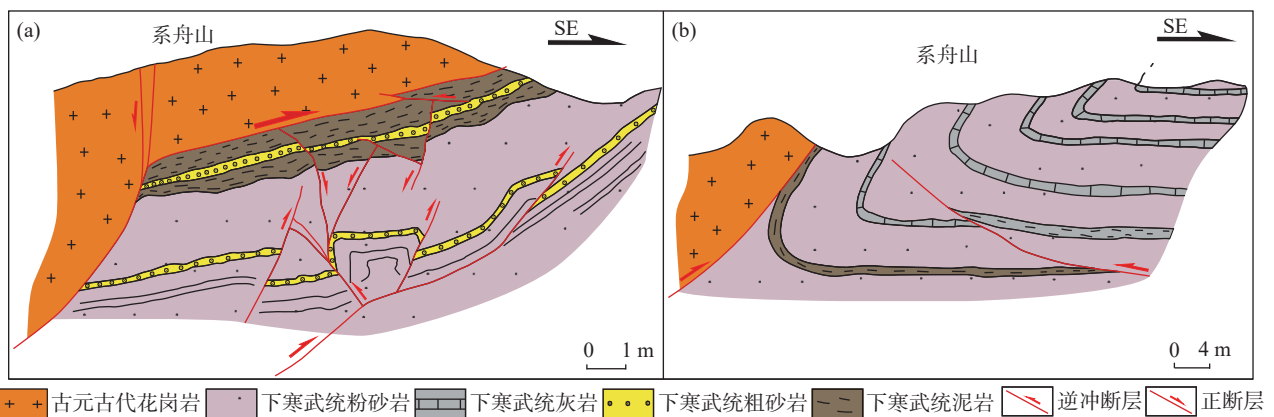
渡地区(图12)。基底的变形在剖面上表现为密集的逆冲断层,大多数断层未切穿基底之上的地层,剖面上构成典型的基底卷入型褶皱(图12)。这些断层属于盆地基底或深部的断层,它们往往形成时间较早,多数在晚石炭世—早二叠世或者晚二



(a) 东寨剖面图; (b) 断层上盘基底花岗岩中的节理; (c) 基底主断层; (d) 断层下盘基底花岗岩中的节理; (e) 断层与节理关系图; (f) 基底中面理、节理和断层赤平投影图; (g) 断层与节理关系图; (h) 断层下盘远离断层的花岗岩与节理

图 8 吕梁山东缘东寨基底卷入型构造

Fig. 8 Basement-involved structure in Dongzhai, eastern margin of Lüliangshan



(a) 逆冲断层与下盘变形; (b) 逆冲断层下盘倒转褶皱

图 9 系舟山北缘逆冲断层

Fig. 9 Thrust fault of northern margin of Xizhoushan

叠世期间。基底中的断层活动造成了上覆地层的褶皱, 断层的位移被盖层的褶皱所吸收。然而, 也有少量断层向上延伸到侏罗系, 它们往往发育单一, 向上断距逐渐减小, 而且多数情况下, 上部呈现花状, 指示了这些断层为走滑断层, 它们往往利用了早期基底逆冲断层, 这与大侏罗沟断层的活动基本一致。

在莫索湾凸起周缘同样发育控制该凸起的基底或者深部断层, 这些断层存在不同的走向, 因而

在不同地区, 边界断层在后期(中、晚侏罗世)表现出不同的性质。在南北向剖面上, 莫索湾凸起和其西侧盆 1 井西凹陷的过渡区域, 早期断层为密集排列的逆冲断层(图 13), 形成了典型的基底卷入型褶皱, 正是这些断层和褶皱作用导致了莫索湾凸起的形成。这些断裂都是在晚古生代之之前形成的(图 13), 晚期的断层则在这些深部断层基础上, 向上延伸到中—上侏罗统, 剖面上同样表现为花状, 暗示了其走滑性质。而这些断层走向与

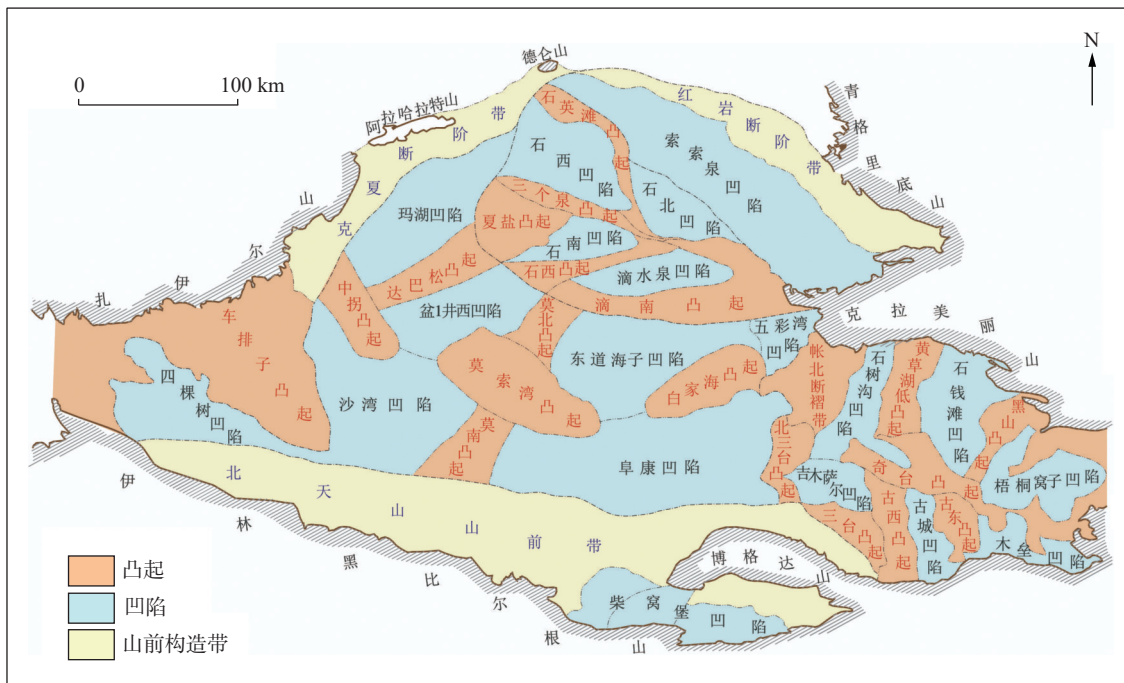


图10 准噶尔盆地构造单元划分图(据何登发等, 2018 修改)

Fig. 10 Division of tectonic units in the Junggar Basin(modified from He et al.,2018)



图11 西准噶尔大侏罗沟石炭系变形图

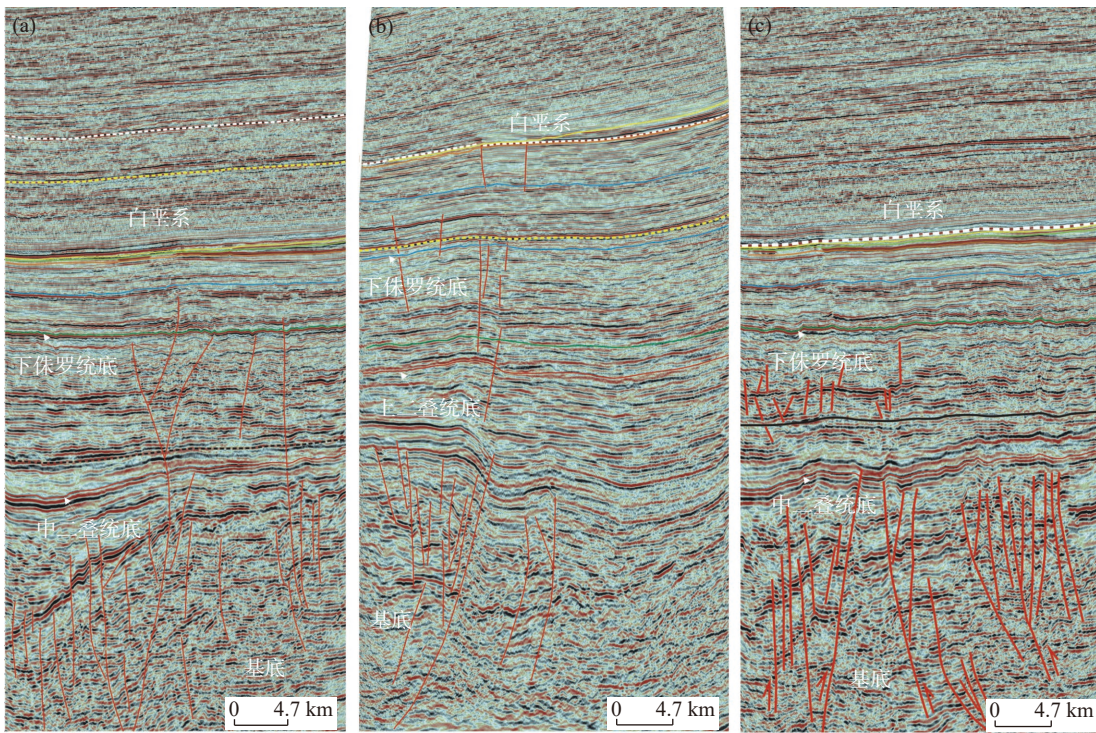
Fig. 11 Deformation of Carboniferous strata in the Dazhulugou, western Junggar Basin

NW—SE 向主压应力之间的角度一般 <math>< 45^\circ</math>, 因此走滑分量占主要地位, 剖面上也可以看出深部断层两盘的垂直位移非常小。

在准噶尔盆地的北部, 地貌上发育 1 条近 EW 向的谷地, 被称为“吉拉沟”, 该谷地在卫星影像以及地貌上都比较明显(图 14)。吉拉沟西段开阔, 东段狭窄并封闭, 东西长约 120 km, 南北宽约 3 km, 沟的中部宽约 10 km, 最深处可达 160 m 以上(赵瑞斌等, 1995), 总体上沟谷北高南低。吉拉沟的北部为水平分布的晚白垩世—古近纪河湖相泥岩和砂泥岩, 地貌为戈壁荒漠, 沟的南部为准噶尔盆地腹地的古尔班通古特沙漠。吉拉沟的北

侧较南侧普遍高 50~100 m, 两侧的地层倾向相反(图 14), 北侧地层倾向北, 倾角约 10° ; 南侧地层倾向南, 倾角较大, 一般为 $15^\circ\sim 25^\circ$ (赵瑞斌等, 1995)。从地层的分布可以看出, 吉拉沟位于一个相对比较开阔的背斜核部地区。

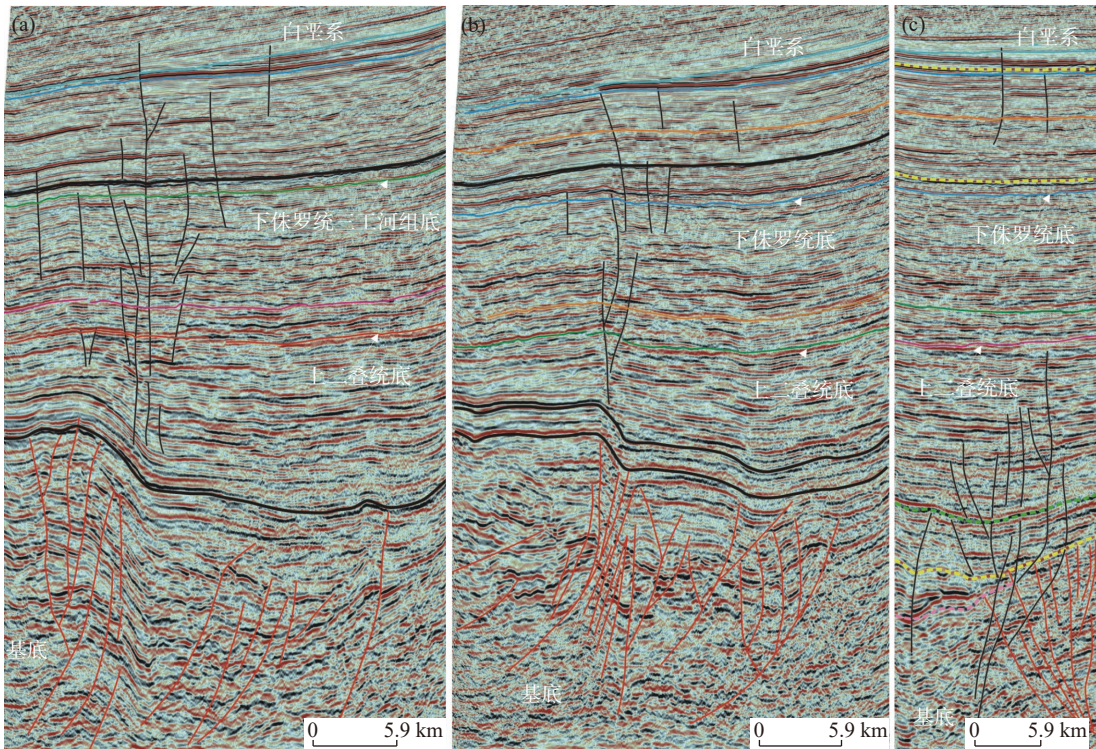
吉拉沟及其背斜的发育是受深部因素控制的, 已有的资料显示, 吉拉沟位于准噶尔盆地北部 NW 走向的乌伦古坳陷与陆梁隆起之间的边界附近, 该边界前身可能是古俯冲带, 最终在晚古生代期间沿着该俯冲带, 以陆梁隆起为代表的岛弧系统与北侧的乌伦古地体碰撞(Li et al., 2015)。在地震剖面上, 控制陆梁隆起和乌伦古坳陷边界的是喀拉萨依断层(图 15), 该断层倾向 NE, 倾角高陡, 并切割了前三叠纪的基底岩石, 而且还向上依次切过三叠系、侏罗系以及白垩系, 导致断层上盘的上覆沉积地层发育断层传播褶皱, 在近地表形成了背斜构造。喀拉萨依断层南侧的陆梁隆起是盆地东侧卡拉麦里造山带向盆地内的自然延伸, 构成隆起的主要为前石炭纪的基底岩石, 上覆沉积主要为石炭系—二叠系、三叠系、侏罗系、白垩系以及新生代地层。晚白垩世末期, 由于受到来自南方特提斯构造域的影响, 陆梁隆起再次由南向北抬升, 以吉拉沟为代表的背斜构造就此形成。



(a).trace2140 测线; (b).line3159 测线; (c).trace1740 测线

图12 准噶尔盆地(莫西庄—永进地区)地震剖面图

Fig. 12 Interpretation of seismic profiles in Moxizhuan—Yongjing region, central Junggar Basin



(a).Line2830 测线; (b).Line3305 测线; (c).Line4463 测线

图13 莫索湾凸起西部地震剖面图

Fig. 13 Interpretation of seismic profiles in the western Mosuowan Hump

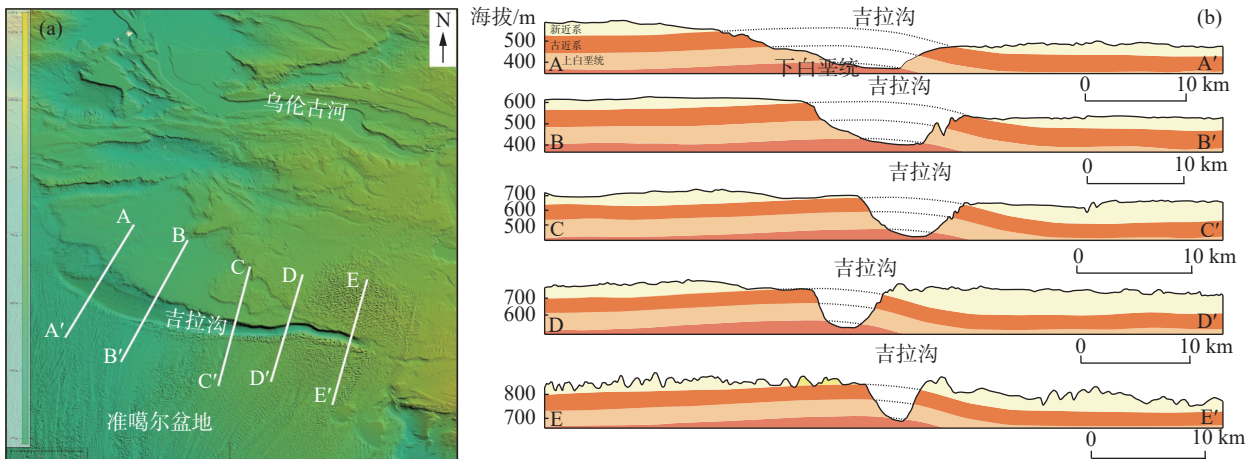


图14 准噶尔盆地北部吉拉沟地区 DEM 影像(a)及其横穿吉拉沟的近 SN 向地形剖面图(b)

Fig. 14 DEM image (a) of Jilagou area in the northern Junggar Basin and its nearly SN-trending topographic profiles (b)

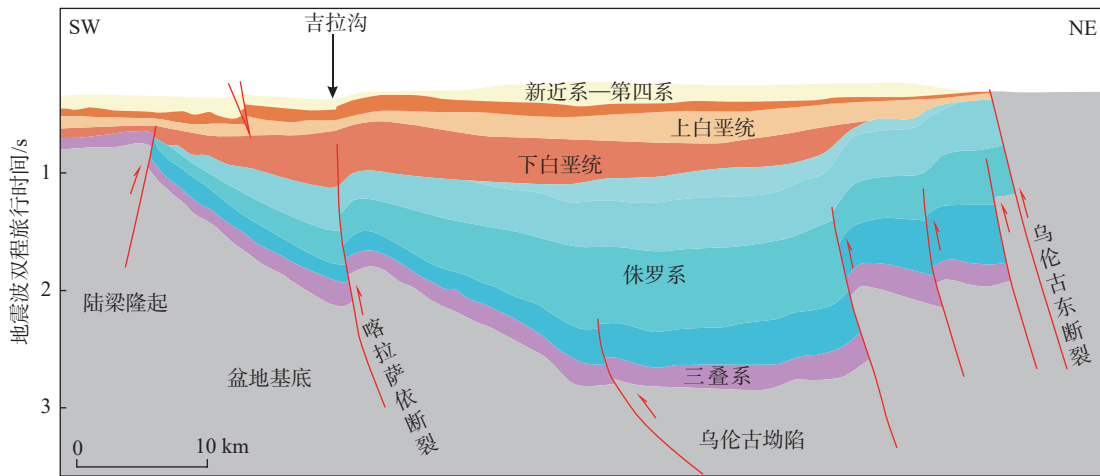


图15 准噶尔盆地经过吉拉沟近 SN 向地震剖面解释图(99SN8)

Fig. 15 Nearly SN-trending seismic profile across the Jilagou in the Junggar Basin (99SN8)

喀拉萨依断层北侧的乌伦古坳陷以石炭系为基底,上覆地层主要为上三叠统、侏罗系、白垩系和新生界(图 15)。与陆梁隆起不同,乌伦古坳陷仅经历了中生代的强烈构造事件,在三叠纪和侏罗纪发育逆冲断层。喀拉萨依断层两侧的构造单元在中生代依旧活动频繁,以近 SN 向缩短为主;它是涉及基底的逆冲断层,向上则控制了沉积地层的褶皱,显示出了典型的基底卷入型构造的特征(图 15)。因此,吉拉沟代表了一个非常典型的基底卷入型的单褶构造,它不仅反映了准噶尔盆地内部变形的重要特点,而且也是有深部地球物理约束的单褶构造。

通过上述几个例子可以看出,准噶尔盆地及其周缘地区发育典型的基底卷入型构造。事实上,

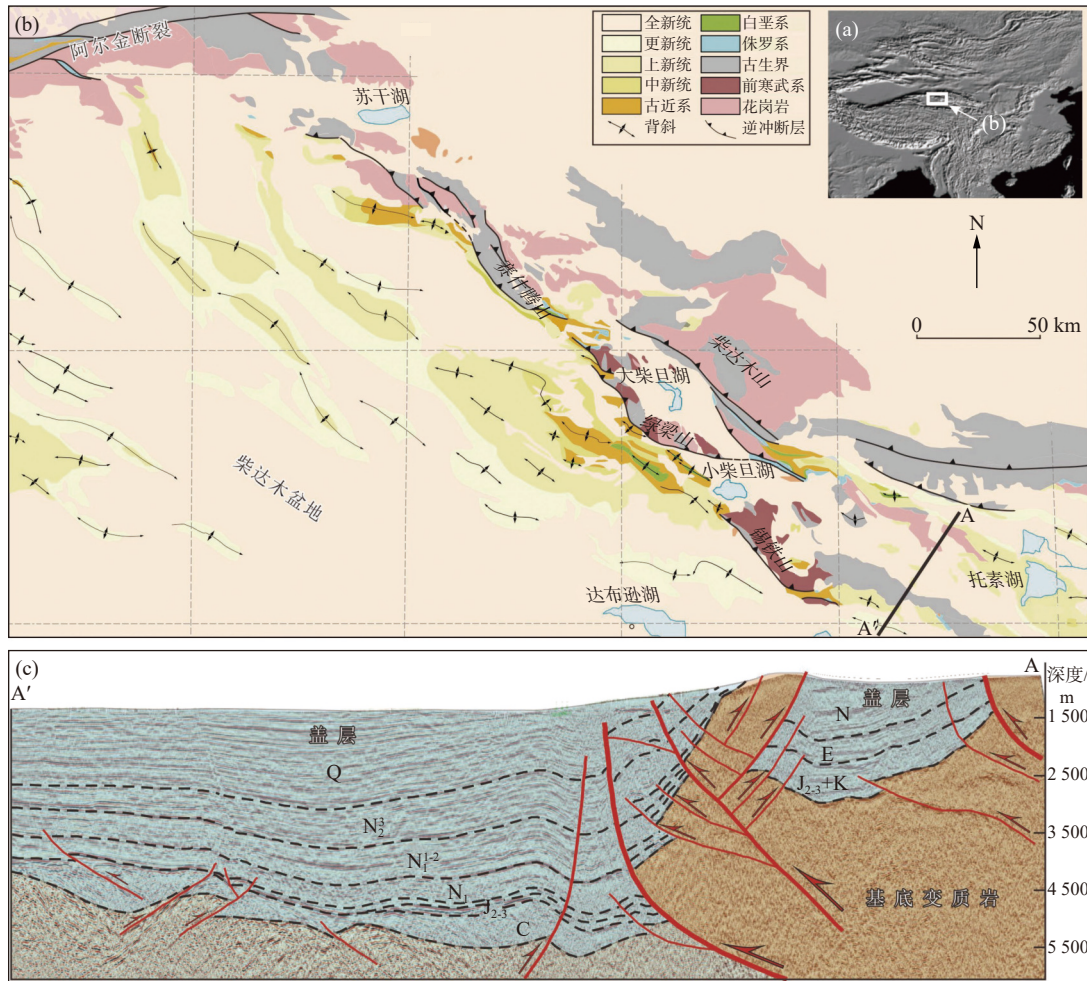
在中—晚侏罗世,准噶尔盆地腹部的几个凸起(隆起)(图 10)都具有不同程度的变形,控制这些凸起或隆起的基底构造(断裂)重新发生了活动。但是,由于中—晚侏罗世时影响盆地的主应力场在不同地区是不同的,因而造成不同凸起变形的表现可能并不完全一样,不同的凸起可能发生不同程度和不同方向的旋转。而控制不同凸起的边界断层,也因为其与主压应力场方向的不同而表现出不同的活动性质,既有以逆冲为主的再次活动,也有以走滑为主的后期活动,因而造就了整个准噶尔盆地腹地复杂的断层活动图像,而准噶尔盆地的这一特征也属于典型的破碎前陆盆地的典型特征之一(Horton et al., 2022)。

4.3 柴达木盆地北缘

青藏高原的隆升和扩展一直是国内外研究的热点(Yin et al., 2008), 其北缘的变形包括了祁连山以及阿尔金断裂的活动。在这个变形系统中, 基底卷入型构造也起到了重要作用, 包括柴达木北缘的变形系统和拉脊山以北地区(Zhang and Cunningham, 2013)。柴达木盆地位于青藏高原东北部, 是高原内部最大的中、新生代沉积盆地。在柴达木盆地北缘, 早古生代大洋闭合形成的碰撞造山带在新生代重新活动形成巨大的柴北缘逆冲断层系, 是该地区最显著的构造特征(图 16)。柴北缘逆冲断层系总体呈 NW—SE 走向, 延伸约 500 km, 主要包括北宗务隆山断层带、赛什腾山逆冲断层带、鱼卡—绿梁山断层带、锡铁山断层带

和欧龙布鲁克—牦牛山断层带。沿着这些断层带, 一系列前寒武纪变质岩、早古生代变火山岩及超高压变质榴辉岩向南逆冲于新生代地层之上, 同时新生代地层也发生了强烈的褶皱, 共同组成了柴北缘基底卷入型褶皱变形带(图 16)。

早期对柴北缘基底卷入型褶皱变形的研究, 主要集中于变形性质和变形样式的定性描述上, 认为该地区在新生代为前陆冲断带, 发育逆冲断层(Chen et al., 1999; Tang et al., 2002; Wang and Coward, 1990; 戴俊生和曹代勇, 2000; 胡受权等, 2001; 汤济广, 2007)。Yin et al. (2008)综合野外和地震剖面资料, 系统性地分析了柴北缘新生代的变形特征, 认为该构造带以冲断变形为主, 并且变形具有穿时性, 从 NW 向 SE 逐渐传播。随着该地



(a). 研究区索引图; (b). 地质图; (c). 地震剖面; C. 石炭系; $J_{2,3}$. 中上侏罗统; K. 白垩系; E. 古近系; N. 新近系; N_1 . 中新世下油砂山组; N_1^{1-2} . 上新世上油砂山组; N_2^3 . 上新世狮子沟组; Q. 第四系

图 16 柴达木盆地北缘地质图

Fig. 16 Geology of northern margin of Qaidam Basin

区油气勘探的深入,大量地球物理资料揭示出了构造带深部的一些结构特征。在大部分地震反射剖面中,柴北缘基底卷入型褶皱的主控断层在深部表现出正花状构造样式(陈思远等, 2020; 王步清等, 2005; 魏国齐等, 2005; 肖安成等, 2006),同时,在断层邻近的褶皱深部,也同样发育具花状构造的断层(Mao et al., 2016),指示了柴北缘基底卷入型褶皱变形带具有缩短兼走滑的性质。而关于走滑性质,有学者判断其具有左行走滑分量(王根厚等, 2001; 吴珍汉等, 2009),也有学者认为其以右行走滑为主(Mao et al., 2016; 陈思远等, 2020; 王步清等, 2005; 肖安成等, 2006)。柴北缘褶皱的空间雁列式排列特征,表明该构造带受到右行走滑的控制(Mao et al., 2016),而野外工作也在主断层面上识别出了明显的右行走滑现象。

柴北缘基底卷入型褶皱中的基底主要为前寒武纪变质岩(黑云斜长片麻岩、混合岩化片麻岩、大理岩等)和早古生代变火山岩(绿泥石片岩、片理化玄武安山岩),在绿梁山和锡铁山地区,还发育超高压变质的榴辉岩和蛇绿混杂岩(图 17)(张建新等, 2007),呈带状或透镜状展布于片麻岩

之中。这些基底岩石中发育高角度陡倾的片理、片麻理和糜棱面理,面理产状与山前断层近平行或小角度相交。这些基底岩石是以何种方式参与到柴北缘基底卷入型褶皱变形过程中的,目前还没有详细的研究。笔者前期的野外工作,在基底岩石中识别出了一些高角度断层,断层与岩石中先存的面理几近平行,这可能是基底卷入型褶皱形成过程中基底的主要变形样式。前人通过构造地质学研究,并结合地震反射剖面,从大尺度上已经限定了柴北缘整体变形样式,其年代学、盖层的褶皱变形和逆冲变形向盆地内部的传播等方面也有很深入的探讨(Yin et al., 2008),但是作为基底卷入型褶皱这一构造体系而言,基底以何种方式发生变形、基底先存构造对后期变形有何影响、盖层的褶皱样式与基底变形之间有何运动学联系以及基底和盖层在变形过程中的耦合方式等问题,还缺少详细的构造解析工作。这在一定程度上限制了对青藏高原东北部新生代构造变形特征、演化过程以及地壳加厚方式等方面的理解,进而影响了对青藏高原形成过程的认识。



图 17 锡铁山南缘逆冲断层

Fig. 17 Thrust fault along the southern margin of Xitieshan

4.4 华南地区

相对于我国的华北、西北以及青藏地区,华南地区的基底卷入型构造的研究更为薄弱,目前,很少有非常典型的基底卷入型构造的报道。相反,薄皮逆冲推覆构造在中、下扬子边缘则非常发育,成为华南地区中生代变形的主要特征之一。这也与同期华北克拉通的变形形成了鲜明的对比,华北克拉通中部此时形成了以吕梁山为代表的厚皮构造(如前所述)。这个差异是由多方面因素控制的,如参与变形的地层厚度差异以及基底的性质等。中生代,华南地区经历了古太平洋板块的低

角度俯冲(Li and Li, 2007),具备基底卷入型褶皱发育的重要条件(Horton et al., 2022),因此推测也应发育基底卷入型构造。前人曾报道位于雪峰山西侧的“古丈背斜”,可能就是一个基底卷入型构造,但目前还没有更为详细的解析报道(杨付领, 2015)。目前,雪峰山地区厚皮构造的研究相对较多(Faure et al., 2016; 颜丹平等, 2008, 2018; 杨付领, 2015),南盘江地区也有过相关的报道(Yang et al., 2021),但这些基底卷入型构造中的基底多为浅变质的碎屑岩,与 Laramide 类似的基底变形较为少见。华南地区发育很多侵入岩,一些核部

为侵入岩占据的背斜也有可能属于基底卷入型构造,但还需要开展更多的工作来证实。

5 结论

(1)基底卷入型构造是厚皮构造的重要类型,具有独特的基底与盖层变形,两者之间既有联系又存在明显区别。该类型构造的形成与多种因素有关,主要控制因素包括:盖层厚度、基底先存构造、应力场方向以及基底与盖层的流变学差异等等。基底卷入型构造研究是认识大陆变形的方向,该类型构造发育于多种构造环境中,部分发育在远离活动大陆边缘的内陆地区,因此涉及到板块俯冲角度与应力传递、造山带的形成与扩展、高原的形成与盆地的变形以及克拉通的变形等多个方面。

(2)中国大陆中、新生代经历了多期次的构造-热事件,华北中部、准噶尔盆地以及青藏高原北部等地区均发现了典型的基底卷入型构造,它们的形成机制与环境代表着不同重要的大陆地壳变形状态,既有高原形成与扩展过程中的变形,也有克拉通的缩短变形,还有代表着造山带前陆地区逐渐破碎化的变形过程。

(3)我国华南地区中生代也经历了显著的大陆变形,然而与华北地区相比,华南地区基底卷入型构造的报道和研究很少。目前我国基底卷入型构造的研究还未得到足够的重视,还缺少对这些变形在大陆变形过程中意义的深刻认识,有关基底卷入型构造的动力来源,尤其是深处内陆地区的变形动力机制问题还不清楚,还需要将来进行更多的工作。

致谢:感谢匿名审稿人对本文提出的建设性意见;感谢《华东地质》陈志洪执行主编的邀稿,笔者根据多年在不同地区的工作经历,形成了一些粗浅认识,还有很多不成熟的地方。我国是一个基底卷入型构造非常发育的国家,但相关工作却尚未充分开展,希望能够通过本文,引起相关的学者关注。

References

BERG R R. 1962. Mountain flank thrusting in Rocky Moun-

tain foreland, Wyoming and Colorado[J]. *AAPG Bulletin*, 46(11): 2019-2032.

BIRD P. 1988. Formation of the rocky mountains, western United States: a continuum computer model[J]. *Science*, 239(4847): 1501-1507.

BROWN W G. 1988. Deformational style of Laramide uplifts in the Wyoming foreland[M]//SCHMIDT C J, PERRY JR W R. Interaction of the rocky mountain foreland and the cordilleran thrust belt. Boulder: Geological Society of America, 1-25.

CHASE R B, SCHMIDT C J, GENOVESE P W. 1993. Influence of Precambrian rock compositions and fabrics on the development of rocky mountain foreland folds[M]//SCHMIDT C J, CHASE B R, ERSLEV E A. Laramide basement deformation in the rocky mountain foreland of the western United States. Boulder: Geological Society of America, 45-72.

CHEN W P, CHEN C Y, NÁBELEK J L. 1999. Present-day deformation of the Qaidam basin with implications for intra-continental tectonics[J]. *Tectonophysics*, 305(1-3): 165-181.

CHEN B, JAHN B M. 2004. Genesis of post-collisional granitoids and basement nature of the Junggar Terrane, NW China: Nd-Sr isotope and trace element evidence[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23(5): 691-703.

CHEN S Y, ZHANG Y S, WU L, ZHANG J Y, WANG L Q, XIAO A C, SHEN Y. 2020. Cenozoic structural deformation in the Yuqia—Jiulongshan region, northern Qaidam Basin, China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 47(1): 110-119 (in Chinese with English abstract).

CLINKSCALES C, KAPP P. 2019. Structural style and kinematics of the Taihang—Luliangshan fold belt, North China: implications for the Yanshanian orogeny[J]. *Lithosphere*, 11(6): 767-783.

CONEY P J. 1972. Cordilleran tectonics and North America plate motion[J]. *American Journal of Science*, 272(7): 603-628.

COOK D G. 1988. Balancing basement-cored folds of the Rocky Mountain foreland[M]//SCHMIDT C J, PERRY JR W R. Interaction of the rocky mountain foreland and the cordilleran thrust belt. Boulder: Geological Society of America, 53-64.

COOK R A. 1978. A relationship between strike-slip faults and the process of drape folding of layered rocks[M]//MATTHEWS III V. Boulder: Laramide folding associated with basement block faulting in the western United States. Boulder: Geological Society of America, 197-214.

DAI J S, CAO D Y. 2000. The type and distribution of struc-

- tural style in Qaidam Basin[J]. *Northwest Geoscience*, 21(2): 57-63 (in Chinese with English abstract).
- DARBY B J, RITTS B D. 2002. Mesozoic contractional deformation in the middle of the Asian tectonic collage: the intraplate western Ordos fold-thrust belt, China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 205(1-2): 13-24.
- DARBY B J, RITTS B D. 2007. Mesozoic structural architecture of the Lang Shan, North-Central China: intraplate contraction, extension, and synorogenic sedimentation[J]. *Journal of Structural Geology*, 29(12): 2006-2016.
- DAVIS G H. 1978. Monocline fold pattern of the Colorado Plateau[M]//MATTHEWS III V. Laramide folding associated with basement block faulting in the western United States. Boulder: Geological Society of America, 215-234.
- DAVIS G A, WANG C, ZHENG Y D, ZHANG J J, ZHANG C H, GEHRELS G E. 1998. The enigmatic Yinshan fold-and-thrust belt of Northern China: new views on its intraplate contractional styles[J]. *Geology*, 26(1): 43-46.
- DICKINSON W R, SNYDER W S. 1978. Plate tectonics of the Laramide orogeny[M]//MATTHEWS III V. Laramide folding associated with basement block faulting in the western United States. Boulder: Geological Society of America, 355-366.
- DONG S W, ZHANG Y Q, ZHANG F Q, CUI J J, CHEN X H, ZHANG S H, MIAO L C, LI J H, SHI W, LI Z H, HUANG S Q, LI H L. 2015. Late Jurassic—Early Cretaceous continental convergence and intracontinental orogenesis in East Asia: a synthesis of the Yanshan Revolution[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 114(Pt 4): 750-770.
- EGAN S S, URQUHART J M. 1993. Numerical modelling of lithosphere shortening: application to the Laramide orogenic province, western USA[J]. *Tectonophysics*, 221(3-4): 385-411.
- ENGLISH J M, JOHNSTON S T. 2004. The Laramide orogeny: what were the driving forces?[J]. *International Geology Review*, 46(9): 833-838.
- ERSLEV E A. 1986. Basement balancing of Rocky Mountain foreland uplifts[J]. *Geology*, 14(3): 259-262.
- ERSLEV E A. 1991. Trishear fault-propagation folding[J]. *Geology*, 19(6): 617-620.
- ERSLEV E A. 1993. Thrust, back-thrusts, and detachment of Rocky Mountain foreland arches[M]//SCHMIDT C J, CHASE B R, ERSLEV E A. Laramide basement deformation in the rocky mountain foreland of the western United States. Boulder: Geological Society of America, 339-358.
- ERSLEV E A. 2005. 2D Laramide geometries and kinematics of the Rocky Mountains, western U. S. A[M]//KALSTROM K E, KELLER G R. The rocky mountain region: an evolving lithosphere: tectonics, geochemistry, and geophysics. Washington: American Geophysical Union, 7-20.
- FAURE M, LIN W, CHEN Y. 2012. Is the Jurassic (Yanshanian) intraplate tectonics of North China due to westward indentation of the North China block?[J]. *Terra Nova*, 24(6): 456-466.
- FAURE M, LIN W, CHU Y, LEPVRIER C. 2016. Triassic tectonics of the southern margin of the South China Block[J]. *Comptes Rendus Geoscience*, 348(1): 5-14.
- GARCÍA P E, DAVIS G H. 2004. Evidence and mechanisms for folding of granite, Sierra de Hualfin basement-cored uplift, northwest Argentina[J]. *AAPG Bulletin*, 88(9): 1255-1276.
- HAN B F, HE G Q, WANG S G. 1999. Postcollisional mantle-derived magmatism, underplating and implications for basement of the Junggar Basin[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 42(2): 113-119.
- HE D F, ZHANG L, WU S T, LI D, ZHEN Y. 2018. Tectonic evolution stages and features of the Junggar Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 39(5): 845-861 (in Chinese with English abstract).
- HENDRIX M S, GRAHAM S A, CARROLL A R, SOBEL E R, MCKNIGHT C L, SCHULEIN B J, WANG Z X. 1992. Sedimentary record and climatic implications of recurrent deformation in the Tian Shan: evidence from Mesozoic strata of the North Tarim, South Junggar, and Turpan Basins, Northwest China[J]. *GSA Bulletin*, 104(1): 53-79.
- HORTON B K, CAPALDI T N, MACKAMAN-LOFLAND C, PEREZ N D, BUSH M A, FUENTES F, CONSTENIUS K N. 2022. Broken foreland basins and the influence of subduction dynamics, tectonic inheritance, and mechanical triggers[J]. *Earth-Science Reviews*, 234: 104193.
- HU S Q, GUO W P, CAO Y J, HUANG J X, MU Z H. 2001. Tectonic framework and structure evolution of Mesozoic and Cenozoic in northern margin of Qaidam Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 22(1): 13-16 (in Chinese with English abstract).
- HUNTOON P W. 1993. Influence of inherited Precambrian basement structure on the localization and form of Laramide monoclines, Grand Canyon, Arizona[M]//SCHMIDT C J, CHASE B R, ERSLEV E A. Laramide basement deformation in the rocky mountain foreland of the western United States. Boulder: Geological Society of America, 243-256.
- JORDAN T E, ALLMENDINGER R W. 1986. The sierras Pampeanas of Argentina: a modern analogue of rocky mountain foreland deformation[J]. *American Journal of Science*, 286(10): 737-764.

- LI D, HE D F, MA D L, TANG Y, KONG Y H, TANG J Y. 2015. Carboniferous—Permian tectonic framework and its later modifications to the area from eastern Kazakhstan to southern Altai: insights from the Zaysan-Jimunai Basin evolution[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 113(Pt 1): 16-35.
- LI Z X, LI X H. 2007. Formation of the 1 300-km-wide intra-continental orogen and postorogenic magmatic province in Mesozoic South China: a flat-slab subduction model[J]. *Geology*, 35(2): 179-182.
- LI S Z, SUO Y H, LI X Y, ZHOU J, SANTOSH M, WANG P C, WANG G Z, GUO L L, YU S Y, LAN H Y, DAI L M, ZHOU Z Z, CAO X Z, ZHU J J, LIU B, JIANG S H, WANG G, ZHANG G W. 2019. Mesozoic tectono-magmatic response in the East Asian ocean-continent connection zone to subduction of the paleo-Pacific Plate[J]. *Earth-Science Reviews*, 192: 91-137.
- LI C M, ZHANG C H, COPE T D, LIN Y. 2016. Out-of-sequence thrusting in polycyclic thrust belts: an example from the Mesozoic Yanshan belt, North China Craton[J]. *Tectonics*, 35(9): 2082-2116.
- LIN W, WEI W. 2020. Late Mesozoic extensional tectonics in the North China Craton and its adjacent regions: a review and synthesis[J]. *International Geology Review*, 62(7-8): 811-839.
- LIU G X. 1985. Compressional tectonic zones on the Linfen—Weihe Graben margin and its geological significance[J]. *Collection of Structural Geology*, (4): 61-70 (in Chinese).
- LIU S F, ZHANG J F, HONG S Y, RITTS B D. 2007. Early Mesozoic basin development and its response to thrusting in the Yanshan fold-and-thrust belt, China[J]. *International Geology Review*, 49(11): 1025-1049.
- MAO L G, XIAO A C, ZHANG H W, WU Z K, WANG L Q, SHEN Y, WU L. 2016. Structural deformation pattern within the NW Qaidam Basin in the Cenozoic era and its tectonic implications[J]. *Tectonophysics*, 687: 78-93.
- MARSHAK S, KARLSTROM K, TIMMONS J M. 2000. Inversion of Proterozoic extensional faults: an explanation for the pattern of Laramide and Ancestral Rockies intracratonic deformation, United States[J]. *Geology*, 28(8): 735-738.
- MAXSON J, TIKOFF B. 1996. Hit-and-run collision model for the Laramide Orogeny, western United States[J]. *Geology*, 24(11): 968-972.
- MCQUARRIE N, CHASE C G. 2000. Raising the Colorado plateau[J]. *Geology*, 28(1): 91-94.
- MCQUEEN H W S, BEAUMONT C. 1989. Mechanical models of tilted block basins[M]//PRICE R A. Origin and evolution of sedimentary basins and their energy and mineral resources. Washington: American Geophysical Union, 65-71.
- MITRA G, FROST B. 1981. Mechanisms of deformation within Laramide and Precambrian deformation zones in basement rocks of the Wind River Mountains[J]. *Rocky Mountain Geology*, 19(2): 161-173.
- MITRA S, MOUNT V S. 1998. Foreland basement-involved structures[J]. *AAPG Bulletin*, 82(1): 70-109.
- OLDOW J S, BALLY A W, AVÉ LALLEMANT H G. 1990. Transpression, orogenic float, and lithospheric balance[J]. *Geology*, 18(10): 991-994.
- PRICE R A. 1981. The Cordilleran foreland thrust and fold belt in the southern Canadian Rocky Mountains[M]//MCCLAY K R, PRICE N J. Thrust and nappe tectonics. London: Geological Society, Special Publication, 427-448.
- RODGERS J. 1987. Chains of basement uplifts within cratons marginal to orogenic belts[J]. *American Journal of Science*, 287(7): 661-692.
- SCHMIDT C J, GENOVESE P W, CHASE R B. 1993. Role of basement fabric and cover-rock lithology on the geometry and kinematics of twelve folds in the Rocky Mountain foreland[M]//SCHMIDT C J, CHASE B R, ERSLEV E A. Laramide basement deformation in the rocky mountain foreland of the western United States. Boulder: Geological Society of America, 1-44.
- SPANG J H, EVANS J P. 1988. Geometrical and mechanical constraints on basement-involved thrusts in the Rocky Mountain foreland province[M]//SCHMIDT C J, PERRY JR W R. Interaction of the rocky mountain foreland and the cordilleran thrust belt. Boulder: Geological Society of America, 41-51.
- STEARNS D W. 1978. Faulting and forced folding in the Rocky Mountains foreland[M]//MATTHEWS III V. Laramide folding associated with basement block faulting in the western United States. Boulder: Geological Society of America, 1-38.
- STONE D S. 1993. Basement-involved thrust-generated folds as seismically imaged in the subsurface of the central Rocky Mountain foreland[M]//SCHMIDT C J, CHASE B R, ERSLEV E A. Laramide basement deformation in the rocky mountain foreland of the western United States. Boulder: Geological Society of America, 271-318.
- STONE D S. 2002. Morphology of the Casper Mountain uplift and related, subsidiary structures, central Wyoming: implications for Laramide kinematics, dynamics, and crustal inheritance[J]. *AAPG Bulletin*, 86(8): 1417-1440.
- TANG J G. 2007. Tectonic evolution and its control for hydro-

- carbon accumulation of Mesozoic—Cenozoic multicycle superimposed reformation basin in the west of northern Qaidam Basin[D]. Wuhan: China University of Geosciences (in Chinese with English abstract).
- TANG L J, JIN Z J, DAI J S, ZHANG M L, ZHANG B S. 2002. Regional fault systems of Qaidam Basin and adjacent orogenic belts[J]. *Earth Science*, 27(6): 676-682.
- TIKOFF B, SIDDOWAY C, SOKOUTIS D, WILLING-SHOFFER E. 2022. The lithospheric folding model applied to the Bighorn uplift during the Laramide orogeny[M]// CRADDOCK J P, MALONE D H, FOREMAN B Z, KONSTANTINOU A. Tectonic evolution of the Sevier—Laramide hinterland, thrust belt, and foreland, and postorogenic slab rollback (180~20 Ma). Boulder: Geological Society of America, 221-239.
- TINDALL S E, DAVIS G H. 1999. Monocline development by oblique-slip fault-propagation folding: the East Kaibab monocline, Colorado Plateau, Utah[J]. *Journal of Structural Geology*, 21(10): 1303-1320.
- WANG Q M, COWARD M P. 1990. The Chaidam Basin (NW China): formation and hydrocarbon potential[J]. *Journal of Petroleum Geology*, 13(1): 93-112.
- WANG G H, RAN S M, LI M. 2001. The characteristics of Neogene Sertengshan—Xietieshan oblique thrust fault in the northern margin of Qaidam Basin[J]. *Journal of Geomechanics*, 7(3): 224-230 (in Chinese with English abstract).
- WANG B Q, XIAO A C, CHENG X G, HE G Y, CHEN H L, YANG S F. 2005. Geometry and kinematics of Cenozoic right-lateral strike-slip thrust structural belt in the north margin of the Qaidam Basin[J]. *Journal of Zhejiang University (Science Edition)*, 32(2): 225-230 (in Chinese with English abstract).
- WANG T, ZHENG Y D, ZHANG J J, ZENG L S, DONSKAYA T, GUO L, LI J B. 2011. Pattern and kinematic polarity of late Mesozoic extension in continental NE Asia: perspectives from metamorphic core complexes[J]. *Tectonics*, 30(6): TC6007.
- WEI G Q, LI B L, XIAO A C, CHEN H L, YANG S F. 2005. Strike-thrust structures and petroleum exploration in northern Qaidam Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 12(4): 397-402 (in Chinese with English abstract).
- WEIL A B, YONKEE A. 2023. The Laramide orogeny: current understanding of the structural style, timing, and spatial distribution of the classic foreland thick-skinned tectonic system[M]//WHITMEYER S J, WILLIAMS M L, KELLETT D A, TIKOFF B. Boulder: Laurentia: turning points in the evolution of a continent. Geological Society of America, 707-771.
- WISE D U, OBI C M. 1992. Laramide basement deformation in an evolving stress field, Bighorn Mountain front, Five Springs area, Wyoming[J]. *AAPG Bulletin*, 76(10): 1586-1600.
- WU Z H, HU D G, WU Z H, YE P S, ZHOU C J. 2009. Quaternary sinistral-slip thrusting in north margin of Qaidam Basin[J]. *Quaternary Sciences*, 29(3): 599-607 (in Chinese with English abstract).
- WU F Y, YANG J H, XU Y G, WILDE S A, WALKER R J. 2019. Destruction of the North China Craton in the Mesozoic[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 47: 173-195.
- XIAO W J, WINDLEY B F, SUN S, LI J L, HUANG B C, HAN C M, YUAN C, SUN M, CHEN H L. 2015. A tale of amalgamation of three permo-triassic collage systems in central Asia: oроclines, sutures, and terminal accretion[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 43: 477-507.
- XIAO A C, YANG S F, CHEN X G, DANG Y Q, CHEN X L, CHEN Y Z, WANG L. 2006. Right-lateral strike-slip thrust system and its dynamics along the northern margin of Qaidam Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 27(4): 482-487,494 (in Chinese with English abstract).
- YAN D P, JIN Z L, ZHANG W C, LIU S F. 2008. Rock mechanical characteristics of the multi-layer detachment fault system and their controls on the structural deformation style of the Sichuan—Chongqing—Hunan—Hubei thin-skinned belt, South China[J]. *Geological Bulletin of China*, 27(10): 1687-1697 (in Chinese with English abstract).
- YAN D P, QIU L, CHEN F, LI L, ZHAO L, YANG W X, ZHANG Y X. 2018. Structural style and kinematics of the Mesozoic Xuefengshan intraplate orogenic belt, South China Block[J]. *Earth Science Frontiers*, 25(1): 1-13 (in Chinese with English abstract).
- YANG F L. 2015. On the Mesozoic tectonic deformation characteristics of the craton in eastern China—a case study from the central Sino-Korean and eastern Upper Yangtze region[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- YANG W X, YAN D P, QIU L, WELLS M L, DONG J M, GAO T, ZHANG Z, MU H X, WANG X W, WANG F Y. 2021. Formation and forward propagation of the Indosinian foreland fold-thrust belt and Nanpanjiang foreland basin in SW China[J]. *Tectonics*, 40(4): e2020TC006552.
- YECK W L, SHEEHAN A F, ANDERSON M L, ERSLEV E A, MILLER K C, SIDDOWAY C S. 2014. Structure of the Bighorn Mountain region, Wyoming, from teleseismic re-

- ceiver function analysis: implications for the kinematics of Laramide shortening[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119(9): 7028-7042.
- YIN A. 1994. Mechanics of monoclinial systems in the Colorado Plateau during the Laramide orogeny[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 99(B11): 22043-22058.
- YIN A, DANG Y Q, ZHANG M, CHEN X H, MCRIVETTE M W. 2008. Cenozoic tectonic evolution of the Qaidam Basin and its surrounding regions (Part 3): structural geology, sedimentation, and regional tectonic reconstruction[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 120(7-8): 847-876.
- YONKEE W A, WEIL A B. 2015. Tectonic evolution of the Sevier and Laramide belts within the North American Cordillera orogenic system[J]. *Earth-Science Reviews*, 150: 531-593.
- ZHANG J, CUNNINGHAM D. 2013. Polyphase transpressional development of a NNE-striking basement-cored anticline in the Xining Basin, northeastern Qinghai—Tibetan Plateau[J]. *Geological Magazine*, 150(4): 626-638.
- ZHANG J, CUNNINGHAM D, QU J F, ZHANG B H, LI J Y, ZHAO H, NIU P F, HUI J, YUN L, ZHAO S, ZHENG R G, ZHANG Y P. 2022. Poly-phase structural evolution of the northeastern Alxa Block, China: constraining the Paleozoic—recent history of the southern Central Asian Orogenic belt[J]. *Gondwana Research*, 105: 25-50.
- ZHANG Y Q, DONG S W, ZHAO Y, ZHANG T. 2007. Jurassic tectonics of North China: a synthetic view[J]. *Acta Geologica Sinica*, 81(11): 1462-1480 (in Chinese with English abstract).
- ZHANG J, LI J Y, LI Y F, QI W H, ZHANG Y P. 2014. Mesozoic—Cenozoic multi-stage intraplate deformation events in the Langshan region and their tectonic implications[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 88(1): 78-102.
- ZHANG J X, MENG F C, MATTINSON C G. 2007. Progress, controversies and challenge of studies on South Altyn Tagh-North Qaidam HP/UHP metamorphic belt[J]. *Geological Journal of China Universities*, 13(3): 526-545 (in Chinese with English abstract).
- ZHANG J, QU J F, ZHANG B H, ZHAO H, NIU P F, ZHAO S, HUI J, YUN L, NIE F J, WANG Y N. 2020. Mesozoic intraplate deformation of the central North China Craton: mechanism and tectonic setting[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 192: 104269.
- ZHANG Z Q, WANG Q, LIU C R. 2011. On uplift-flexural fold structure in Wujiayao of Ningwu in Shanxi[J]. *Journal of Geology*, 35(4): 349-353 (in Chinese with English abstract).
- ZHANG J, WANG Y N, QU J F, ZHANG B H, ZHAO H, YUN L, LI T Y, NIU P E, NIE F J, HUI J, ZHANG Y P. 2021a. Mesozoic intracontinental deformation of the Alxa Block in the middle part of Central Asian Orogenic Belt: a review[J]. *International Geology Review*, 63(12): 1490-1520.
- ZHANG J, WANG Y N, ZHANG B H, QU J F, LI J Y, LONG Y, NIU P F, ZHAO H, HUI J. 2021b. Tectonothermal events in the central North China Craton since the Mesozoic and their tectonic implications: constraints from low-temperature thermochronology[J]. *Tectonophysics*, 804: 228769.
- ZHANG C H, ZHANG Y, LI H L, WU G G, WANG G H, XU D B, XIAO W F, DAI L. 2006. Late Mesozoic thrust tectonics framework in the western part of the Yanshan orogenic belt and the Western Hills of Beijing: characteristics and significance[J]. *Earth Science Frontiers*, 13(2): 165-183 (in Chinese with English abstract).
- ZHANG B H, ZHANG J, QU J F, ZHAO H, WANG Y N, LI J Y, NIU P F, ZHAO S, ZHENG R G, LI Y F, YUN Y, ZHANG Y P, HUI J. 2020. Lüliangshan: a Mesozoic basement involved fold system in the central North China Craton[J]. *Earth Science*, 46(7): 2423-2448 (in Chinese with English abstract).
- ZHAO R B, SONG L J, HU W H. 1995. On the tectonic origin of Jila Gully[J]. *Inland Earthquake*, 9(3): 260-265 (in Chinese with English abstract).
- ZHAO Y, XU G, ZHANG S H, YANG Z Y, ZHANG Y Q, HU J M. 2004. Yanshanian movement and conversion of tectonic regimes in East Asia[J]. *Earth Science Frontiers*, 11(3): 319-328 (in Chinese with English abstract).
- ZHAO H, ZHANG J, QU J F, ZHANG B H, YUN L, LI J Y, NIU P F, NIE F J. 2020. Nature of the eastern Boundary of the Mesozoic Ordos Basin and the formation of the Lüliangshan anticline[J]. *The Journal of Geology*, 128(2): 157-187.
- ZHU R X, CHEN L, WU F Y, LIU J L. 2011. Timing, scale and mechanism of the destruction of the North China Craton[J]. *Science China Earth Sciences*, 54(6): 789-797.
- ZHU R X, XU Y G, ZHU G, ZHANG H F, XIA Q K, ZHENG T Y. 2012. Destruction of the North China Craton[J]. *Science China Earth Sciences*, 55(10): 1565-1587.
- ZHU R X, ZHANG H F, ZHU G, MENG Q R, FAN H R, YANG J H, WU F Y, ZHANG Z Y, ZHENG T Y. 2017. Craton destruction and related resources[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 106(7): 2233-2257.

附中文参考文献

- 陈思远, 张永庶, 吴磊, 张军勇, 汪立群, 肖安成, 沈亚. 2020. 柴达木盆地北缘鱼卡—九龙山地区新生代构造变形特征[J]. *石油勘探与开发*, 47(1): 110-119.
- 戴俊生, 曹代勇. 2000. 柴达木盆地构造样式的类型和展布[J]. *西北地质科学*, 21(2): 57-63.
- 何登发, 张磊, 吴松涛, 李涤, 甄宇. 2018. 准噶尔盆地构造演化阶段及其特征[J]. *石油与天然气地质*, 39(5): 845-861.
- 胡受权, 郭文平, 曹运江, 黄继祥, 牟中海. 2001. 柴达木盆地北缘构造格局及在中、新生代的演化[J]. *新疆石油地质*, 22(1): 13-16.
- 刘光勋. 1985. 汾渭地堑边缘挤压构造带及其地质意义[J]. *构造地质论丛*, (4): 61-70.
- 汤济广. 2007. 柴达木北缘西段中、新生代多旋回叠加改造型盆地构造演化及对油气成藏的控制作用[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉).
- 王根厚, 冉书明, 李明. 2001. 柴达木盆地北缘赛什腾—锡铁山左行逆冲断裂及地质意义[J]. *地质力学学报*, 7(3): 224-230.
- 王步清, 肖安成, 程晓敢, 何光玉, 陈汉林, 杨树锋. 2005. 柴达木盆地北缘新生代右行走滑冲断构造带的几何学和运动学[J]. *浙江大学学报(理学版)*, 32(2): 225-230.
- 魏国齐, 李本亮, 肖安成, 陈汉林, 杨树锋. 2005. 柴达木盆地北缘走滑-冲断构造特征及其油气勘探思路[J]. *地学前缘*, 12(4): 397-402.
- 吴珍汉, 胡道功, 吴中海, 叶培盛, 周春景. 2009. 柴达木盆地北缘第四纪左旋斜冲推覆构造运动[J]. *第四纪研究*, 29(3): 599-607.
- 肖安成, 杨树锋, 程晓敢, 党玉琪, 陈新领, 陈元忠, 王亮. 2006. 柴达木盆地北缘的右行走滑冲断系统及其动力学[J]. *石油与天然气地质*, 27(4): 482-487, 494.
- 颜丹平, 金哲龙, 张维宸, 刘少峰. 2008. 川渝湘鄂薄皮构造带多层拆离滑脱系的岩石力学性质及其对构造变形样式的控制[J]. *地质通报*, 27(10): 1687-1697.
- 颜丹平, 邱亮, 陈峰, 李林, 赵磊, 杨文心, 张翼西. 2018. 华南地块雪峰山中生代板内造山带构造样式及其形成机制[J]. *地学前缘*, 25(1): 1-13.
- 杨付领. 2015. 中国东部克拉通中生代变形特征研究——以中朝中部、上扬子东部为例[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 张岳桥, 董树文, 赵越, 张田. 2007. 华北侏罗纪大地构造: 综评与新认识[J]. *地质学报*, 81(11): 1462-1480.
- 张建新, 孟繁聪, MATTINSON C G. 2007. 南阿尔金—柴北缘高压-超高压变质带研究进展、问题及挑战[J]. *高校地质学报*, 13(3): 526-545.
- 张兆琪, 王权, 刘成如. 2011. 山西宁武贾家窑隆起-挠褶构造研究[J]. *地质学刊*, 35(4): 349-353.
- 张长厚, 张勇, 李海龙, 吴淦国, 王根厚, 徐德斌, 肖伟峰, 戴凇. 2006. 燕山西段及北京西山晚中生代逆冲构造格局及其地质意义[J]. *地学前缘*, 13(2): 165-183.
- 张北航, 张进, 曲军峰, 赵衡, 王艳楠, 李锦轶, 牛鹏飞, 赵硕, 郑荣国, 李岩峰, 云龙, 张义平, 惠洁. 2020. 吕梁山——一个中生代 Laramide 型基底卷入褶皱系统[J]. *地球科学*, 46(7): 2423-2448.
- 赵瑞斌, 宋立军, 胡伟华. 1995. 试论吉拉沟的构造成因[J]. *内陆地震*, 9(3): 260-265.
- 赵越, 徐刚, 张拴宏, 杨振宇, 张岳桥, 胡健民. 2004. 燕山运动与东亚构造体制的转变[J]. *地学前缘*, 11(3): 319-328.
- 朱日祥, 陈凌, 吴福元, 刘俊来. 2011. 华北克拉通破坏的时间、范围与机制[J]. *中国科学: 地球科学*, 41(5): 583-592.
- 朱日祥, 徐义刚, 朱光, 张宏福, 夏群科, 郑天愉. 2012. 华北克拉通破坏[J]. *中国科学: 地球科学*, 42(8): 1135-1159.

Basement-involved structures: characteristics, styles, mechanism and tectonic settings

ZHANG Jin¹, ZHANG Beihang², ZHAO Lei¹, ZHAO Heng¹, QU Junfeng¹, ZHANG Yiping³,
WANG Zhenyi⁴, YANG Yaqi⁵

(1. *Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China*; 2. *Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, Gansu, China*; 3. *Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China*; 4. *Hohhot General Survey of Natural Resources Centre, China Geological Survey, Hohhot 010010, Inner Mongolia, China*; 5. *MOE Key Laboratory of Karst Georesources and Environment, College of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, Guizhou, China*)

Abstract: The basement-involved structure is predominant in the thick-skinned structure and developed in various tectonic settings, which is not constricted within the peripheral of the active continental margins but also involves the formation of orogenic belts, fragmentation of foreland basins, formation of plateaus, and deformation of cratons. Some of these structures are developed in intracontinental areas far away from active continental margins. There are both links and differences between basement deformation and caprocks deformation in the basement-involved structure, including the thickness of caprocks, pre-existing structures of basement, stress field, rheological differences between basement and caprocks, thickness of caprocks and so on. At present, the formation of basement-involved structures, especially the deformation mechanisms in intracontinental areas, are still unclear, low angle subduction of oceanic plates is considered to be the main pathway leading to long-distance stress transmission. During the Mesozoic and Cenozoic, the Chinese mainland has experienced multiple tectono-thermal events, which are prerequisites for the development of basement-involved structures. At present, typical basement-involved structures have been found in central North China Craton, the Junggar Basin, northern Qinghai-Tibetan Plateau and other regions. Their formation mechanism and setting represent different important continental crustal deformation, including the deformation in the process of plateau formation, the shortening deformation of craton, and the process of gradual fragmentation of foreland areas of orogenic belts. However, the study of basement-involved structures in China has not drawn enough attention, and there is also less profound understanding on the influence of these deformations in the process of continental deformation. Southern China has also undergone significant continental deformation during the Mesozoic. However, unlike Northern China, there are fewer reports and studies on basement-involved structures in Southern China, which may be one of the future research directions.

Key words: basement-involved structures; deformation characteristics; formation mechanism; orogenic belt; thick-skinned structures