

《地球物理学报》录用通知

刘奎;李宗星;施小斌;魏小洁;任白强;杨小秋;彭博同志:

您的来稿《柴达木盆地东部晚海西-印支期剥蚀量与隆升历史?多种古温标与沉积学证据的制约》(稿号:M0566)已通过有关专家审阅,拟在《地球物理学报》发表。

特此证明!



柴达木盆地东部晚海西-印支期剥蚀量与隆升历史 ——多种古温标与沉积学证据的制约

刘奎^{1,2}, 李宗星^{3*}, 施小斌¹, 魏小洁³, 任自强^{1,2}, 杨小秋¹, 彭博³

1 中国科学院边缘海与大洋地质重点实验室, 南海海洋研究所 广州 510301;

2 中国科学院大学 北京 100049;

3 中国地质科学院地质力学研究所北京 100081.

摘要 柴达木盆地东部周缘造山带内保存有较完整的晚古生代-早中生代沉积记录, 但盆地内至今仍未发现二叠系-三叠系。为探讨柴东地区二叠纪-三叠纪有无沉积及隆升历史等关键地质问题, 本文首先利用古温标法恢复晚海西-印支期剥蚀量, 随后, 通过物源分析法获得印支期柴东北缘隆升的沉积学证据。结果表明, 印支运动前, 柴东地区残留石炭系顶界面埋深普遍超过 2500 m, 晚海西-印支期剥蚀量为 2100~4300 m, 剥蚀量从南往北逐渐减小。柴东地区曾沉积了 2000~3000 m 的二叠系-三叠系, 随后被整体剥蚀。晚二叠世以来, 随着古特提斯洋往北俯冲, 盆地周缘开始隆升。早三叠世柴东北缘经历了一次快速隆升, 先期的多套沉积地层与结晶基底被迅速剥蚀并为宗务隆南缘的隆务河群砾岩沉积提供物源。中三叠世海水往北和往东退出研究区。晚三叠世, 松潘-甘孜地体强烈碰撞挤压使得东昆仑-柴达木地体下地壳显著缩短和增厚, 柴东地区被整体抬升, 并且形成了南高北低的古地貌格局, 在古气候与水系作用下, 二叠系-三叠系与部分石炭系被全部剥蚀并搬运至宗务隆、南祁连及松潘-甘孜一带。

关键词 二叠系-三叠系; 晚海西-印支期; 剥蚀量; 隆升; 柴达木盆地东部

Late Hercynian-Indosinian denudation and uplift history in the eastern Qaidam Basin: constraints from multiple thermometric indicators and sedimentary evidences.

LIU Kui^{1,2}, LI Zong-Xing^{3*}, SHI Xiao-Bin¹, WEI Xiao-Jie³, REN Zi-Qiang^{1,2}, YANG Xiao-Qiu¹, PENG Bo³

1 Key Laboratory of Ocean and Marginal Sea Geology, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China

2 University of Chinese Academy of science, Beijing 100049, China

3 Institutes of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China

Abstract It is a puzzle that Permian-Triassic sediments, which have been widely distributed in the surrounding mountain belts, are not yet found in the eastern Qaidam Basin. In order to figure out whether there was sedimentation and how the uplift history it was, we firstly applied the thermometric indicators method to recover Late Hercynian-Indosinian denudation. Some sedimentary evidences with relation to Indosinian uplift in the northern margin of eastern Qaidam Basin were also acquired by using provenance analysis. The results show that the top interface of residual Carboniferous of the eastern Qaidam Basin had been buried under 2500m before Indosinian, and late Hercynian-Indosinian denudation reached up to 2100-4300 m, which was characterized by a decrease from southern to northern part of the eastern Qaidam Basin. So there is an undeniable fact that the eastern Qaidam Basin once deposited Permian-Triassic with a thickness of 2000-3000 m, followed by a complete denudation. In respond to northward subduction of the Paleo-Tethys Ocean, northern and southern margins of the eastern Qaidam Basin began to uplift since late Permian. An early Triassic rapid uplift in the northern margin of eastern Qaidam Basin led to significant denudation of previous sediments and crystalline basement, with adequate supplies of gravel provenance for lower Triassic Longwuhe formation in the southern

Zongwulong. Then, seawater totally retreated from north and east directions of the study area in middle Triassic. Late Triassic continental collision between the Songpan-Ganzi terrane and East Kunlun-Qaidam terrane caused significant contraction and thickening of lower crust in the East Kunlun-Qaidam, as well as strong surface uplift in the eastern Qaidam Basin, thus resulting in a north tilting paleogeomorphology. Under the promotion of paleo-climates and drainages, Permian-Triassic and partial Carboniferous were entirely eroded and transported to the Zongwulong, Southern Qilian and Songpan-Ganzi.

Keywords Permian-Triassic; Late Hercynian-Indosinian; Denudation; Uplift; Eastern Qaidam Basin

基金项目 国家自然科学基金项目 (41772272; 41702124). 中国地质调查局地质调查项目 (1212011120964) 资助.

作者简介 刘奎, 男, 1991 年, 硕士, 研究方向为构造-热年代学与盆地分析. E-mail: 783431324@qq.com

*通讯作者 李宗星, 男, 1982 年, 博士, 副研究员, 研究方向为盆地地温场、构造-热演化. E-mail: lizongxing@cags.ac.cn

1. 引言

柴达木盆地位于青藏高原东北缘, 属典型的多期次叠合盆地, 其周缘被一系列巨大的多旋回造山带所限定(图 1), 北接祁连山, 西邻阿尔金山, 南为东昆仑山(Yin and Harrison, 2003; 陈宣华, 2010)。区域地质及油气勘探结果表明, 柴达木盆地东部(简称柴东地区)至今仍未发现二叠系-三叠系, 盆地内仅存留了部分石炭系被动大陆边缘沉积, 而周缘造山带却保存有较完整的晚古生代-早中生代沉积记录(青海省地质矿产局, 1978; 李瑞保等, 2012; 2015; 彭渊, 2015; 程荣等, 2016)。针对这一地质现象, 部分学者认为柴东地区二叠纪-三叠纪(299~201 Ma)一直处于沉积间断(辛后田等, 2006; 代坤等, 2016), 但石炭系埋藏史恢复结果却暗示盆地内可能沉积了一定厚度的二叠系-三叠系(李宗星等, 2017)。根据石灰沟上石炭统锆石裂变径迹组份年龄结果, 柴东地区曾经历了 254~199 Ma 的显著构造-热事件(李宗星等, 2015), 该期构造-热事件响应于晚海西-印支运动(263~195 Ma)对盆地的挤压抬升作用, 研究区遭受了不同程度的剥蚀。石炭系烃源岩有机质成熟度普遍已经达到成熟-高成熟演化阶段(R_o : 0.86%~1.39%), 部分甚至达到了过成熟演化阶段(R_o : 2.44%~2.76%)(段宏亮等, 2006), 因此, 柴东地区石炭系必定经历过较高的古地温或较大的古埋深。已有热年代学信息表明石灰沟上石炭统在印支运动之前(>252 Ma)已经具有较大的古埋深, 并且经历了一次高地温, 使得样品中的锆石裂变径迹全部退火, 这也进一步增加了研究区存在二叠系沉积的可能性, 而且这种可能性与古特提斯洋于中泥盆世末-二叠纪处于持续扩张, 直到晚二叠世(~263 Ma)才开始往北俯冲的大地构造背景具有较好的一致性(Jian et al., 2009; Huang et al., 2014; Chen et al., 2015; 刘占庆等, 2011)。但由于研究区大面积被新生界所覆盖, 前中生界并未广泛出露, 加之地理条件较恶劣, 至今仍未见到针对柴东地区二叠纪-三叠纪有无沉积等关键地质问题的报道。如果有二叠系-三叠系, 沉积了多厚, 为什么会被整体抬升剥蚀? 这一特殊地质现象是否反映了该时期盆地与周缘造山带的耦合关系呢?

目前, 国内外学者已提出多种剥蚀量恢复方法, 其中, 古温标法因其记录古温度等信息的可靠性, 而被广泛应用于沉积盆地热史与剥蚀量恢复及造山带隆升的研究(Reiners et al., 2006; Shi et al., 2011; 胡圣标等, 1999; 邱楠生等, 2009)。此外, 沉积盆地与造山带通常存在耦合响应关系, 造山带的隆升往往会造盆地内沉积相、沉积物源的显著变化。因而, 物源分析不仅能用来确定源区位置及母岩性质等, 还可进一步揭示造山带的隆升及演化过程

(Allen et al., 2013)。近年来,随着“柴达木盆地古生代油气资源调查评价”的持续进行,相关单位对柴东地区石炭系岩性岩相、残留厚度及烃源岩有机质成熟度等开展了大量工作(马寅生等, 2012; 孙娇鹏等, 2014; 程荣等, 2016; 魏小洁等, 2018),也为本研究奠定了坚实的地质基础。因此,我们首先对比分析了印支运动在柴东地区形成的不整合面发育特征,并以石炭系、侏罗系烃源岩 R_o 及 AFT、ZHe、 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 等古温标数据为基础,采用古温标法恢复晚海西-印支期剥蚀量。随后,我们对宗务隆构造带南缘下三叠统隆务河群的碎屑岩段开展物源分析,从中获得与印支期柴东北缘隆升相关的沉积学证据。在此基础上,初步探讨了柴东地区二叠纪-三叠纪的隆升剥蚀历史。本文通过对晚海西-印支期剥蚀量的恢复,首先将建立对柴东地区二叠系-三叠系沉积厚度的初步认识,同时结合盆地及周缘造山带的隆升历史,将为二叠纪-三叠纪沉积-构造演化分析提供重要依据,对认识古特提斯洋演化和协助区域油气勘探也具有一定的科学意义。

2. 地质背景

柴东地区是指格尔木-绿梁山以东、鄂拉山以西的区域,北界以宗务隆构造带与祁连山相接,南界为东昆仑山,受区域断裂的控制,盆地内形成了“三凹两隆”的构造格局(图 2)。柴东地区前中生界主要发育海相沉积,而侏罗纪以来均为陆相沉积地层。

石炭纪,柴东地区整体处于古特提斯洋持续扩张体制下的被动大陆边缘环境(陈宣华, 2010; 牛永斌等, 2010; 孙娇鹏等, 2014)。石炭系自下而上依次发育下石炭统穿山沟组、城墙沟组与怀头他拉组,和上石炭统克鲁克组与扎布萨尕秀组(图 3),早石炭世发育泥晶灰岩、含生屑灰岩夹泥岩等广阔台地相沉积,晚石炭世的沉积环境开始变为海陆过渡相,泥岩、砂岩和灰岩频繁交替出现(魏小洁等, 2018)。柴东地区至今仍未揭示二叠系-三叠系,东昆仑及宗务隆地区二叠系-中三叠统均以海相灰岩与海陆过渡相碎屑岩建造为主,其中,宗务隆南缘的下三叠统隆务河群发育有大套的砾岩、砂岩等,至晚三叠世,印支运动将其全部转为陆相沉积环境(李瑞保等, 2012; 彭渊, 2015),柴东地区也普遍发现侏罗系底部的不整合(图 3)。早-中侏罗世,沿盆地北缘山前带与霍布逊凹陷北缘发育一些规模不一、分隔性较强的断陷湖盆,晚侏罗-早白垩世湖盆范围扩展至全盆地,晚燕山运动再次导致研究区隆升并遭受剥蚀(李军亮等, 2016)。新生代以来,柴达木盆地逐步发展成为青藏高原内部最大的山间盆地,柴东地区沉积了厚度 $>4\text{ km}$ 的新生界,晚喜山运动进一步将先期沉积的多套地层甚至结晶基底挤压抬升剥蚀进而形成了现今的格局(Yin et al., 2008)。

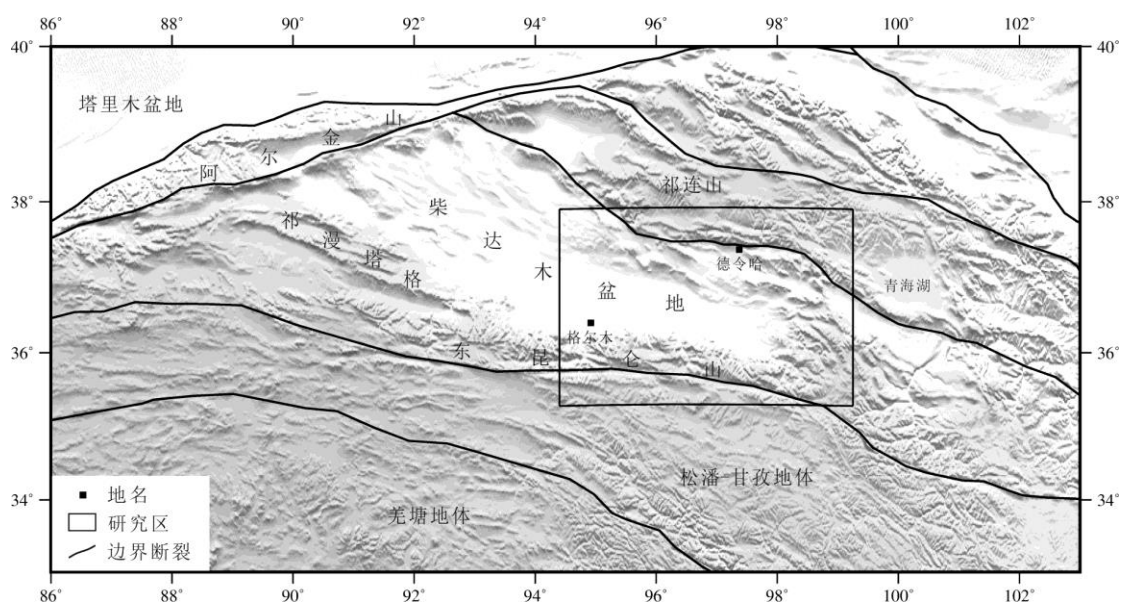


图 1 柴达木盆地大地构造及研究区位置图。

Fig.1 Tectonic map of the Qaidam Basin and location of the study area.

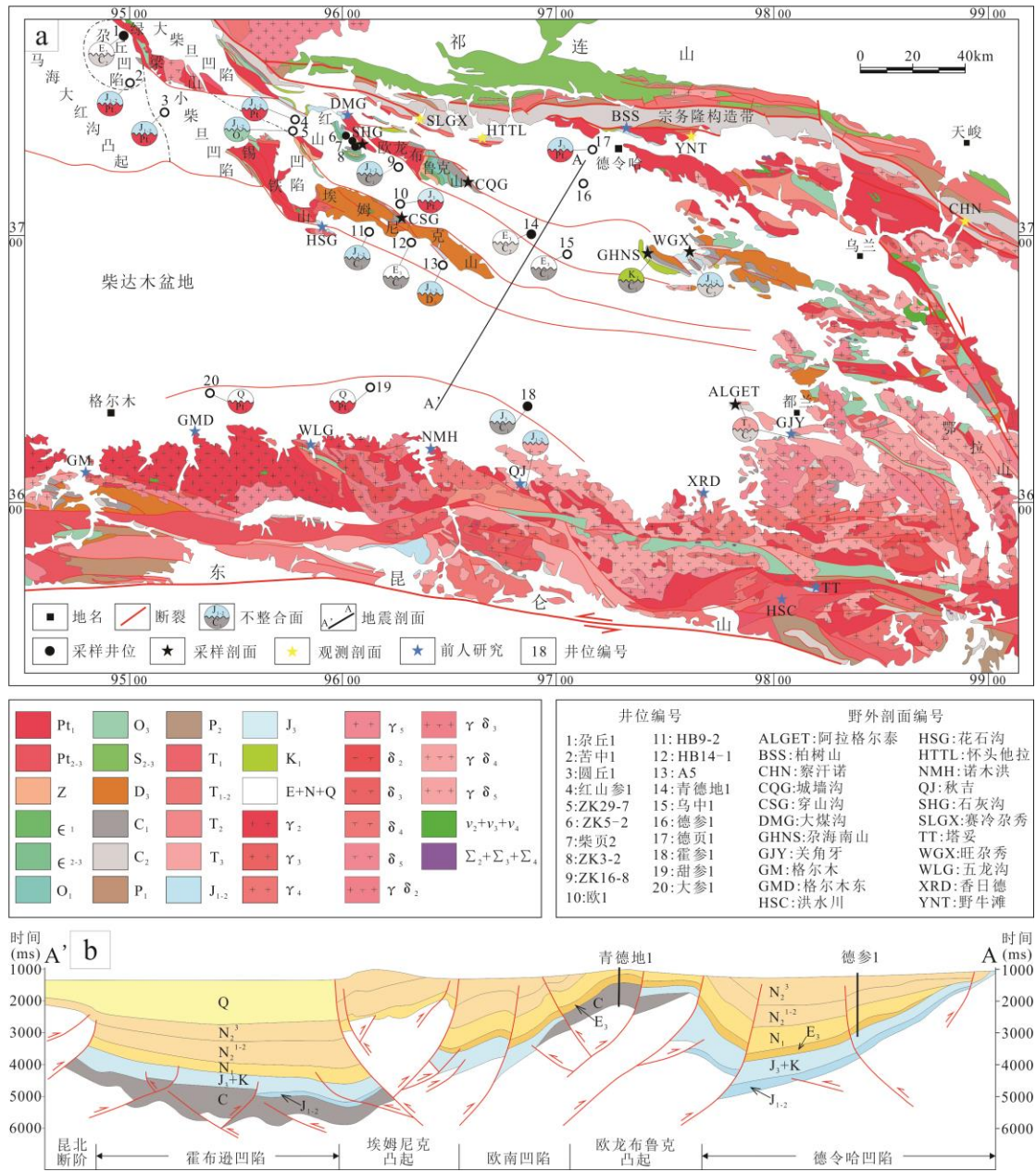


图 2a 柴达木盆地东部及周缘造山带区域地质图、钻井与野外剖面位置、主要不整合面发育特征 (改自 1:500000 柴达木盆地地质图)。图 2b 北东向 AA'地震剖面图 (程荣等, 2016)。

Fig.2a Regional geological map of the eastern Qaidam Basin and its surrounding mountain belts, locations of wells and profiles, characteristics of prominent unconformities (Modified from 1:500000 geological map of the Qaidam Basin). Fig.2b NE-trending seismic section along the AA' line in Fig 2a (Cheng et al., 2016).

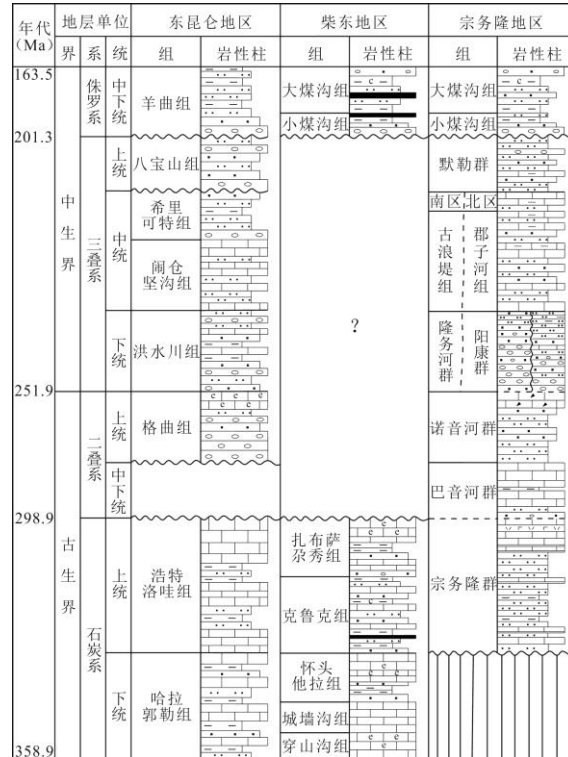


图3 东昆仑地区-柴东地区-宗务隆地区石炭系-侏罗系地层综合柱状图(改自李瑞保等, 2012; 彭渊, 2015; 李宗星等, 2017)。

Fig.3 Integrated Carboniferous-Jurassic stratigraphy in the East Kunlun, eastern Qaidam Basin and Zongwulong (Modified from Li et al., 2012; Peng et al., 2015; Li et al., 2017).

3. 方法与数据

3.1 古温标法

古温标法恢复剥蚀量主要依据古温标 (Ro、AFT、ZHe、 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 等) 能够记录样品经历的古温度信息, 而地层的受热温度与埋深和地温梯度有关 (Reiners et al., 2006; 田云涛等, 2011; 袁玉松等, 2014)。

有机质成熟度 (Ro) 大小主要受控于地层中有机质的埋藏温度和时间, 由于温度在其中起着决定性作用, 所以 Ro 与剥蚀量或地层埋深是通过最高古温度来关联的 (胡圣标等, 1999)。利用 Ro 恢复沉积盆地某一期不整合面之上的剥蚀量时, 首先应明确该构造层达到最高古地温的时限要早于对应不整合面的形成时间。随后, 将单井或剖面不同深度的石炭系烃源岩样品 Ro 数据转换为其经历的最高古地温, 并拟合得到当时的古地温梯度。将 Ro 数据转换为最高古地温的动力学模型采用 Sweeny 和 Burnham (1990) 提出的 Easy%Ro 平行化学反应模型。最后根据古纬度, 假定一个古地表温度, 利用得到的古地温梯度便可恢复不整合面之上剥蚀量, 详见图 (4) 与公式 (1):

$$D = (T_{peak} - T_s) / (dT/dz) \quad (1)$$

式中 D 为剥蚀量, km; T_{peak} 为不整合面处最高古地温, $^{\circ}\text{C}$; T_s 为古地表温度, $^{\circ}\text{C}$; (dT/dz) 为达到最高古地温时的古地温梯度, $^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 。

热年代学不仅可以反映古温度信息, 还可以详细记载样品冷却至封闭温度之下的年龄。由于不同的热年代学系统具有不同的封闭温度区间, 可以系统地揭示样品从高温到中温、再到低温的整个冷却历史 (Reiners et al., 2004; 2006), 即同一样品 (同一点位) 的不同热年代学数据能够反映样品冷却至不同封闭温度之下所产生的温度降低量 (ΔT), 那么, 假定一个

古地温梯度，便可估算出某个阶段由构造抬升而产生的剥蚀量（图 4）。

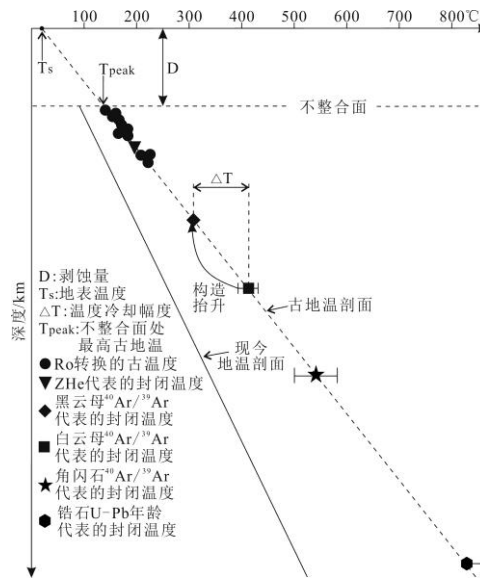


图 4 古温标法计算不整合面之上剥蚀量原理示意图（改自袁玉松等，2014）。

不同热年代学系统的封闭温度区间(Closure Temperature): 锆石(Zircon) U-Pb: $>800^{\circ}\text{C}$; 角闪石(Hornblende) $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$: $540\pm 40^{\circ}\text{C}$; 白云母(Muscovite) $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$: $410\pm 20^{\circ}\text{C}$; 黑云母(Biotite) $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$: $310\pm 20^{\circ}\text{C}$; 钾长石(K-feldspar) $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$: $350\sim 150^{\circ}\text{C}$; ZHe: $180\pm 20^{\circ}\text{C}$; AFT: $110\pm 15^{\circ}\text{C}$; AHe: $75\pm 7^{\circ}\text{C}$ (Harrison et al., 1985; 2009; 2015; Wolf et al., 1996; Cherniak et al., 2001; Reiners et al., 2004)。

Fig.4 Schematic diagram showing thermometric indicator method to calculate denudation above the unconformity (Modified from Yuan et al., 2014).

3.2 物源分析法

砾岩作为近源快速堆积的产物，可为盆地演化及造山带隆升分析提供较为完整的岩相信息（王成善等，2003）。查明砾岩的成分、结构及古流向等，是确定母岩性质和物源方向的基本方法。因此，我们对赛冷尕秀、怀头他拉北与察汗诺 3 个剖面产出的下三叠统隆务河群砾岩的砾石成分、粒度、磨圆等进行了详细观测，并统计了赛冷尕秀与察汗诺 2 个剖面的长轴与叠瓦状砾石所代表的古流向。此外，野马滩的隆务河群粉砂岩段中发育不对称波痕，我们亦对其进行了古流向测定。对本研究所测量的原始数据均运用 Stereonet 软件进行校正，并绘制玫瑰花图来反映每个点位早三叠世的古水流方向。

3.3 数据

本研究用于晚海西-印支期剥蚀量恢复的石炭系、侏罗系烃源岩 Ro 数据分别为 91 个(表 1)、30 个，总计 121 个，其中 94 个为本研究测试数据，测试单位为长江大学地球科学学院，27 个收集自己发表数据（于会娟等，2000；牛永斌等，2010；方朝刚等，2012）。采集自石灰沟 ZK2-1 钻孔（SHG01、SHG02、SHG03）及都兰阿拉格尔泰（DL0101、DL0102）的 5 个上石炭统的砂岩样品均用于锆石（U-Th）/He 年龄测试分析，单颗粒矿物挑选在廊坊地源矿物测试分选公司实验室完成，样品制备及年龄测试在加拿大 Dalhousie 大学地球科学学院（U-Th）/He 实验室完成，测试方法详见 Landry et al(2016)，每个样品均获得了 4~6 个可接受的单颗粒锆石（U-Th）/He 年龄，并且均具有 >2 个的重复性较好的单颗粒年龄（表 2）。其余热年代学数据均收集自己发表文章（Harris et al., 1988; Mock et al., 1999; Liu et al., 2005; Yuan et al., 2006; Dai et al., 2013; Duvall et al., 2013; Chen et al., 2015; Wang et al., 2016; 王国灿等，2007; 陈宣华等，2011）。通过野外剖面实测，本研究获得了 170 组古流向数据（赛冷尕秀 94 组、察汗诺 71 组、野马滩 5 组）。

4. 结果

4.1 不整合面发育特征

野外露头及钻井资料表明, 石灰沟以西的大柴旦-小柴旦-红山凹陷、马海大红沟凸起主要表现为中下侏罗统 ($J_{1,2}$) 直接不整合于古元古界达肯达坂群 (Pt_1dk) 之上, 局部不整合覆盖在寒武系-奥陶系之上, 仅尕丘凹陷有钻井钻遇克鲁克组 (C_2k) (图 2a)。石灰沟及以东广大区域的石炭系保存情况良好, 石炭系与侏罗系(白垩系)的不整合接触关系广泛发育(图 2a)。其中, 欧龙布鲁克凸起的旺尕秀为中下侏罗统 ($J_{1,2}$) 不整合于扎布萨尕秀组 (C_2zh) 之上, 尕海南山则出露下白垩统 (K_1) 与扎布萨尕秀组的不整合接触面, 石灰沟、城墙沟、青德地 1 及乌中 1 均为新生界不整合于石炭系之上, 即部分地区存在两期或三期不整合面叠加改造的情况。欧南凹陷的 ZK16-8 钻遇中下侏罗统与下石炭统 (C_1) 的不整合接触面, 欧 1 井则为上侏罗统 (J_3) 直接不整合于达肯达坂群之上。埃姆尼克凸起的 HB9-2 与 A5 分别钻遇下石炭统、上泥盆统 (D_3) 与中下侏罗统的不整合接触面。霍布逊凹陷的霍参 1 井揭示了上侏罗统与怀头他拉组 (C_{1h}) 的不整合接触关系, 仅都兰地区存在上三叠统陆相火山岩 (T_3) 不整合覆盖在上石炭统 (C_2) 之上的现象。盆地南缘的秋吉地区表现为中下侏罗统不整合覆盖在印支期岩体之上, 甜参 1 井与大参 1 井的第四系直接不整合于达肯达坂群之上。德令哈凹陷未有钻井揭示石炭系, 北缘山前带的德页 1 井钻遇了中下侏罗统与达肯达坂群的不整合接触面。不整合面发育特征表明, 印支运动对盆地边缘的挤压抬升作用强, 往盆地内逐渐减弱, 但盆地内亦有强烈隆升剥蚀区, 横向变化主要受差异挤压抬升的控制。

4.2 晚海西-印支期剥蚀量

4.2.1 最高古地温的时限

柴东地区已有钻井或野外剖面的石炭系烃源岩 Ro 平均值为 1.06%~2.59%, 侏罗系烃源岩 Ro 平均值为 0.47%~1.08%, 已有数据显示, 同一剖面或地区的石炭系烃源岩 Ro 平均值明显大于侏罗系 (图 5)。此外, 石灰沟上石炭统 ZFT 组分年龄存在 254.0~249.6 Ma 和 148.6~144.0 Ma 两个峰值(李宗星等, 2015), 而同一地层的 ZHe 加权平均年龄为 275.2~258.9 Ma, 都兰阿拉格尔泰上石炭统 ZHe 加权平均年龄为 238.1~225.4 Ma (表 2)。上述石炭系砂岩的 ZFT 及 ZHe 年龄均小于对应地层的沉积年龄, 表明锆石裂变径迹在中二叠世之前已经完全退火, 锆石中的 He 亦完全丢失, 晚海西-印支运动将其抬升冷却至封闭温度之下, 之后并未再次经历更高的古地温。因此, 我们认为柴东地区上述钻井与野外剖面的石炭系烃源岩在印支运动之前已达到最高古地温。

4.2.2 最高古地温、古地温梯度及古埋深

基于上述钻井与剖面的石炭系烃源岩达到最高古地温的时限, 我们利用“Easy%Ro”模型对石炭系烃源岩样品所经历的最高古地温进行了模拟计算, 并得到一系列最高古地温数据 (表 1)。柴东地区已有石炭系烃源岩样品所经历的最高古地温范围为 130~217°C, 其中, 石灰沟石炭系烃源岩样品经历的最高古地温 (ZK5-2: 165~182°C、柴页 2: 157~178°C、ZK3-2: 159~186°C) 普遍达到了锆石(U-Th)/He 的封闭温度区间 ($180 \pm 20^\circ\text{C}$), 即石炭系经历的最高古地温能够使锆石中的 He 在印支运动之前全部丢失。石炭系在达到最高古地温时普遍具有较高的古地温梯度, 为 37~43°C/km, 其中青德地 1 井与尕海南山所揭示的古地温梯度值高达 43°C/km, 石灰沟的平均古地温梯度为 40°C/km, 城墙沟为 39°C/km, 而此时, 尕丘 1 井与旺尕秀的古地温梯度较低, 分别为 38°C/km、37°C/km (表 3)。根据上述古温度及古地温梯度数据等, 计算并获得了不整合面处 (残留石炭系顶界面) 最高古地温 (T_{peak})。柴达木地块晚二叠世古纬度为 23~24° N (许伟等, 2011), 据此我们假定古地表温度 (T_s) 为 25°C, 那么柴东地区残留石炭系达到最高古地温时, 其顶界面的古埋深达到了 2500~3900 m (表 3), 其中, 柴页 2 井、青德地 1 井、尕海南山及旺尕秀的残留上石炭统扎布萨尕秀组顶界面埋深范围为 2500~3400 m, 仅都兰关角牙达到了 3900 m, 残留上石炭统克鲁克组顶界面埋深范围为 2600~3860 m。因此, 印支运动之前, 柴东地区残留石炭系普遍具有较大的

古埋深，并且已经超过 2500 m。此外，通过 Basin-Mod 盆地模拟软件建立单井地质模型，对上述结果进行了模拟检验，得出石炭系烃源岩成熟度的模拟结果与实测值吻合（图 6）。

表 1 柴东地区石炭系烃源岩样品深度、Ro 值及最高古地温数据表

Table 1. Samples depth, vitrinite reflectance (Ro) and maximum paleo-temperature data for Carboniferous source rocks in the eastern Qaidam Basin.

井位、剖面 名称	深度/m	Ro/%	最高古地温/°C	井位、剖面 名称	深度/m	Ro/%	最高古地温/°C
	1633	1.19	157		1507	2.19	197
	1670	1.18	156		1508	2.24	199
	1673	1.19	157	青德地 1*	1509	2.22	198
	1685	1.20	158		1509	2.27	200
尕丘 1*	1691	1.26	161		1509	2.18	197
	1699	1.28	162		1640	2.40	205
	1757	1.31	164		2016	1.60	180
	1763	1.26	161	霍参 1*	2080	2.19	198
	1799	1.33	165		2095	2.11	194
	93	1.32	165		174	1.30	164
	126	1.34	166		820	1.15	155
	147	1.49	175		840	1.17	156
	171	1.46	174		856	1.25	161
ZK5-2*	204	1.50	175	城墙沟*	925	1.39	170
	231	1.54	177		942	1.39	170
	262	1.57	178		1060	1.76	190
	292	1.65	182		1076	1.78	191
	338	1.48	174		1149	1.62	181
	655	1.16	157		245	1.61	171
	841	1.38	170		258	1.68	175
	903	1.49	175		263	1.64	174
	917	1.46	174		267	1.67	175
	934	1.46	174		389	1.78	180
	957	1.46	174		415	1.89	184
柴页 2*	979	1.44	173	尕海南山*	441	1.82	181
	999	1.39	170		442	1.81	181
	1011	1.53	177		455	1.88	184
	1022	1.46	174		463	1.98	188
	1027	1.52	176		465	1.95	187
	1035	1.48	175		465	1.85	182
	1047	1.54	178		645	0.92	136
	1051	1.46	174		1146	0.90	134
	43	1.3	164		1167	0.86	130
	70	1.2	159		1218	0.95	138
	165	1.4	171		1388	1.03	144
	206	1.6	180	旺尕秀*	1396	1.06	145
	282	1.2	159		1406	1.23	152
	282	1.6	180		1430	1.47	170
	307	1.7	186		1435	1.10	146
ZK3-2*	320	1.6	180		1476	1.14	148
	404	1.7	186	穿山沟*	458	2.24	199
	481	1.5	175		62	2.44	206
	523	1.7	186		136	2.50	208
	539	1.7	186	关角牙#	158	2.76	217
	543	1.63	182		164	2.68	214
	543	1.6	180				

注：*，代表数据为本研究新测试，#，代表数据收集自段宏亮等（2006）。

表 2 柴东地区上石炭统砂岩样品锆石(U-Th)/He 年龄分析数据。

Table 2 Zircon (U-Th)/He ages of upper-Carboniferous sandstone samples from the eastern Qaidam Basin.

样品编号	U (ppm)	Th (ppm)	¹⁴⁷ S (ppm)	[eU] (ppm)	He (nmol/g)	Mass (μg)	Ft*	Raw age (Ma)	Age (Ma)	±σ
DL0101-1	104.9	155.2	0.8	140.6	925.4	6.60	0.77	181.06	235.6	14.13
DL0101-2	138.3	179.5	0.0	179.6	578.4	3.36	0.71	174.01	245.9	14.76
DL0101-3	305.9	158.2	0.7	342.3	1039.5	3.37	0.71	164.22	229.8	13.79
DL0101-4	171.5	182.8	0.0	213.6	1164.5	5.52	0.74	179.54	241.0	14.46
采样位置	36°21'40.96", 97°54'45.30"(3106m)							加权平均年龄	238.1±28.6 Ma	
DL0102-1	205.1	83.0	0.6	224.2	849.2	4.23	0.76	163.37	216.3	12.98
DL0102-2	43.7	109.3	1.0	68.9	164.9	3.41	0.72	127.84	176.9	10.61
DL0102-3	300.7	124.9	0.0	329.4	1179.5	4.00	0.74	163.23	219.6	13.17
DL0102-4	72.4	71.4	0.0	88.8	279.8	3.06	0.72	187.20	259.7	15.58
DL0102-5	79.0	59.2	0.1	92.6	537.9	6.43	0.78	164.71	212.0	12.72
DL0102-6	91.5	65.5	0.0	106.6	663.0	5.52	0.76	204.41	267.7	16.06
采样位置:	36°21'38.93", 97°54'39.53"(3093m)							加权平均年龄	225.4±33.4 Ma	
SHG01-1	95.6	70.2	1.7	111.7	676.6	5.33	0.75	206.19	275.8	16.55
SHG01-2	75.2	50.4	0.1	86.8	872.7	7.91	0.79	230.21	290.1	17.41
SHG01-3	87.4	61.9	0.0	101.6	1330.5	11.01	0.81	215.83	267.3	16.04
SHG01-4	80.3	53.6	1.5	92.6	594.3	5.65	0.77	206.21	267.5	16.05
采样位置	37°25'05.74", 96°04'24.54"(3424m)							加权平均年龄	275.2±33.0 Ma	
SHG02-1	455.2	103.8	5.8	479.1	5346.1	9.78	0.81	207.41	257.0	15.42
SHG02-2	240.8	82.4	2.1	259.8	1262.9	4.19	0.74	210.69	283.3	17.00
SHG02-3	161.8	118.1	0.7	189.0	1190.4	5.86	0.77	195.47	254.0	15.24
SHG02-4	203.6	150.1	0.4	238.2	2365.0	8.58	0.79	209.96	264.9	15.89
SHG02-5	398.0	158.2	0.1	434.4	4153.0	7.51	0.78	230.84	295.4	17.72
采样位置:	37°25'05.74", 96°04'24.54"(3378m)							加权平均年龄	264.8±35.8 Ma	
SHG03-1	440.1	218.9	6.2	490.6	2918.7	6.17	0.77	175.71	229.3	13.76
SHG03-2	64.7	85.0	0.0	84.3	735.6	7.76	0.79	203.89	259.6	15.58
SHG03-3	84.1	59.9	0.0	97.8	477.5	4.64	0.75	191.32	254.2	15.25
SHG03-4	95.3	99.1	0.0	118.1	488.5	3.73	0.73	201.02	275.4	16.53
SHG03-5	93.0	77.3	0.0	110.8	311.9	2.64	0.70	193.55	275.9	16.55
采样位置:	37°25'05.74", 96°04'24.54"(3212m)							加权平均年龄	258.9±38.4 Ma	

注: [eU]=U+0.235 × Th ppm (Flowers et al.,2007); Ft* 代表 α-ejection 校正(Farley, 2002); 运用 Isoplot V3.25 (Ludwig, 1991)计算的置信水平达到 95%的加权平均年龄。

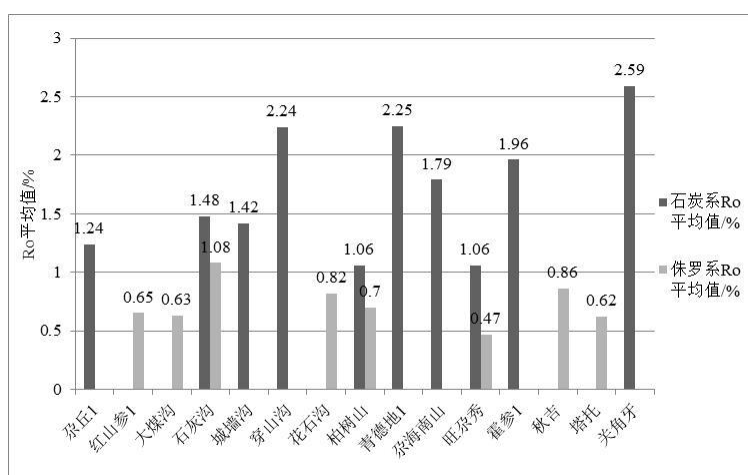


图 5 柴东地区石炭系与侏罗系烃源岩 Ro 平均值对比图

Fig.5 Average vitrinite reflectance (Ro) value of Carboniferous and Jurassic in the eastern Qaidam Basin.

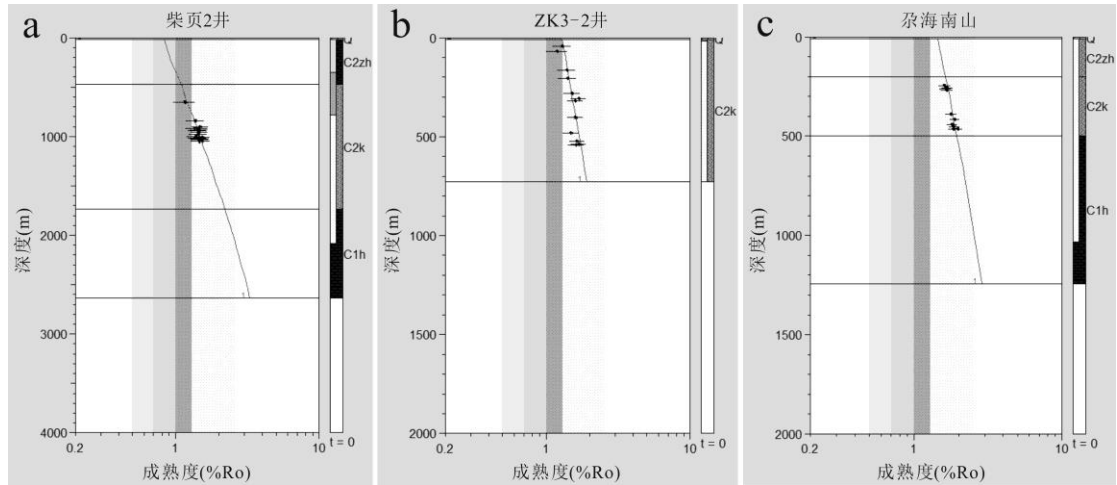


图 6 柴东地区典型钻井及剖面的石炭系烃源岩熟度模拟值与实测值拟合结果。

Fig. 6 Fitting results of the maturity value of simulation and measurement for the Carboniferous source rocks of typical wells and profiles in the eastern Qaidam Basin.

4. 2. 3 晚海西-印支期剥蚀量

针对研究区两期或三期不整合面叠加的区域,本文利用热年代学及地震数据(李宗星等, 2017),初步估算并扣除了燕山运动和喜山运动对石灰沟、城墙沟及青德地 1 井等的石炭系所产生的剥蚀量。随后,获得了基于石炭系烃源岩 R_o 而恢复的剥蚀量,结果表明(表 3):柴东北缘晚海西-印支期剥蚀量变化范围为 2100~3700 m,其中,石灰沟与城墙沟为 2100~2300 m,旺尕秀为 2500 m,青德地 1 井与尕海南山为 2900 m,尕丘 1 井为 3100 m,仅穿山沟一带达到了 3700 m。柴东南缘仅获得了霍参 1 井和关角牙两个控制点的剥蚀量,分别为 3700 m、3900 m。

此外,古生代以来的热史恢复结果表明,整个柴东南缘-东昆仑北缘晚二叠世-三叠纪经历了快速冷却抬升过程(图 7、8)。其中,都兰阿拉格尔泰上石炭统 ZHe 加权平均年龄为 238.1~225.4 Ma,即样品于中三叠世末已抬升冷却至 ZHe 封闭温度($180 \pm 20^\circ\text{C}$)之下,晚三叠世被快速剥露至近地表,如果假定当时的古地温梯度为 $43^\circ\text{C}/\text{km}$,阿拉格尔泰晚三叠世剥蚀量为 3600 m(表 4)。诺木洪、五龙沟与格尔木东早古生代侵入岩体及古元古界结晶基底的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ (白云母、黑云母、钾长石)年龄与 ZHe 年龄(242~212 Ma)均记录了三叠纪的快速冷却事件,其冷却幅度(ΔT)达到了 $175\sim 192^\circ\text{C}$,如果假定 $45^\circ\text{C}/\text{km}$ 的古地温梯度,晚海西-印支期剥蚀量变化范围为 3900~4300 m。香日德早三叠世(~ 251 Ma)侵入岩体于晚三叠世末已被抬升冷却至 400°C 以下,即使假定 $50^\circ\text{C}/\text{km}$ 的古地温梯度,其印支期剥蚀量仍超过了 8000 m,而格尔木晚二叠世侵入岩在整个三叠纪的冷却幅度超过 600°C ,这也使得印支期剥蚀量达到了惊人的 12000 m(表 4)。考虑到香日德和格尔木两个点的剥蚀量太大,且位于盆地边界处,本研究在对晚海西-印支期剥蚀量进行分析时,暂不讨论这两个点。

综上,可以得出柴东地区晚海西-印支期剥蚀量为 2100~4300 m,剥蚀量总体由盆地南缘往北缘逐渐减小,柴东南缘的剥蚀量为 3600~4300 m,往柴东北缘逐渐减小到 2100~3100 m,仅穿山沟一带达到了 3700 m,剥蚀量横向变化仍较大。

表 3 残留石炭系及现今埋深、古地温梯度、不整合面处最高古地温及古埋深、晚海西-印支期剥蚀量表

Table.3 Results of residual Carboniferous and its present-day depth, and paleo-geothermal gradients, maximum paleo-temperature and burial depth of unconformity before Indosinian, Late Hercynian-Indosinian denudation.

井位、剖面 名称	残留石炭系 及现今埋深 (m)	古地温 梯度 ($^\circ\text{C}/\text{km}$)	不整合面处 最高古地温 ($^\circ\text{C}$)	不整合面 古埋深 (m)	晚海西-印支期 剥蚀量 (m)
-------------	-----------------------	---	--	--------------------	-----------------------

尕丘 1*	C ₂ k (1290~1908)	38	143	3100	3100
ZK5-2***	C ₂ k (52~504)	42	164	3300	2300
柴页 2***	C ₂ zh~C ₁ h (20~2500)	40	135	2700	2100
ZK3-2***	C ₂ k (10~718)	39	154	3300	2100
青德地 1**	C ₂ zh~C ₁ h (904~3012)	43	171	3400	2900
霍参 1*	C ₁ h (1876~2150)	43	184	3700	3700
城墙沟**	C ₂ k~C ₁ c (0~1580)	39	128	2600	2200
尕海南山**	C ₂ zh~C ₁ h (0~1217)	43	165	3300	2900
旺尕秀*	C ₂ zh~C ₂ k (640~1623)	37	118	2500	2500
穿山沟*	C ₁ c~C ₁ ch (0~523)	43	184	3700	3700
关角牙*	C ₂ zh (0~274)	45	201	3900	3900

注：柴页 2***，代表三期不整合面叠加，剥蚀量计算误差为±300m；青德地 1**，代表两期不整合面叠加，剥蚀量计算误差为±200m；旺尕秀*，代表印支运动形成的不整合面，剥蚀量计算误差为±100m。

表 4 柴东南缘-东昆仑北缘晚二叠世-三叠纪冷却历史、古地温梯度（假定）及剥蚀量表

Table.4 Late Permian-Triassic cooling history, assumed paleo-geothermal gradients and denudation in the southern margin of eastern Qaidam Basin-northern part of East Kunlun.

剖面名称	时间 (Ma)	温度路径 (°C)	古地温梯度 (°C/km)	剥蚀量 (m)
阿拉格尔泰*	238~210	210~55	43	3600
香日德***	251~195	800~400	50	8000 [#]
诺木洪**	263~195	440~248	45	4300
五龙沟**	263~195	440~250	45	4200
格尔木东**	263~195	340~165	45	3900
格尔木***	257~195	800~200	50	12000 [#]

注：阿拉格尔泰*，剥蚀量计算误差为±200m。诺木洪**，剥蚀量计算误差为±400m。香日德***，剥蚀量计算误差为±2000m；8000[#]代表剥蚀量异常高值，本研究暂不作分析讨论。

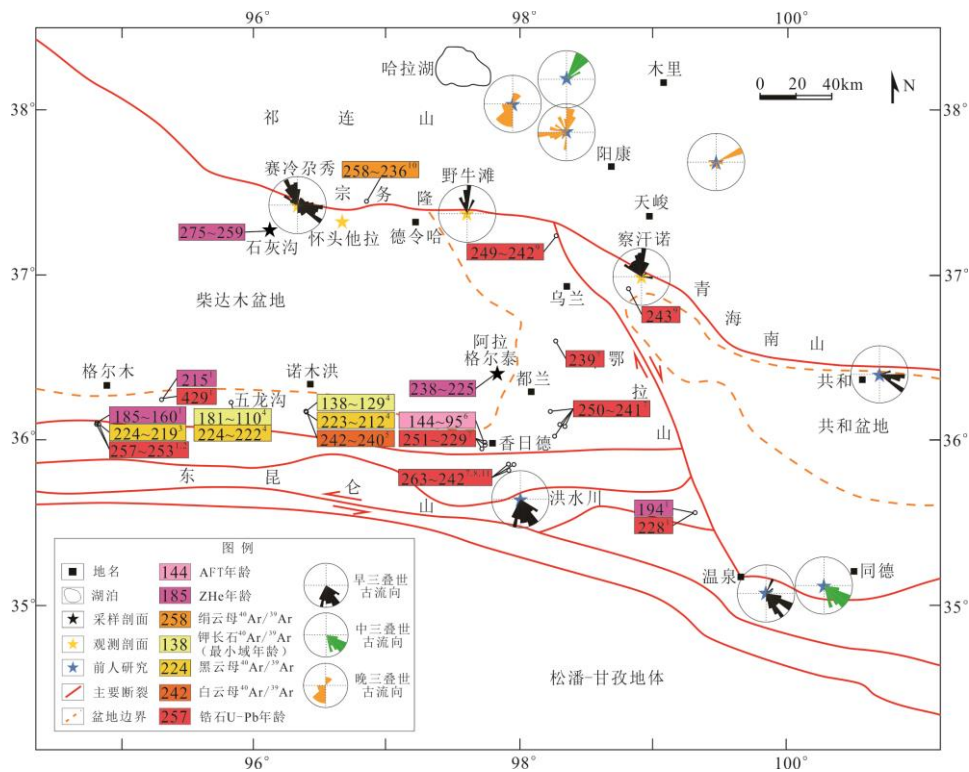


图 7 柴东地区及周缘三叠纪古流向与古生代-中生代热年代学年龄数据分布图。已发表的三叠纪古流向数据来自：1) 闫臻等 (2008)，2) 张立军 (2015)，3) 王苏里等 (2016)。热年代学数据来自：1) Dai et al.(2013)，2) Harris et al.(1988)，3) Mock et al.(1999)，4) Wang et al.(2016)，5) Liu et al.(2005)，6) 王国灿等 (2007)，7) Chen et al.(2015)，8) Liu et al.(2004)，9) 彭渊等 (2016)，10) 彭渊 (2015)，11) Xiong et al. (2012)。

Fig.7 Triassic paleo-currents and Paleozoic-Mesozoic thermochronology data in the eastern Qaidam Basin and its surrounding regions.

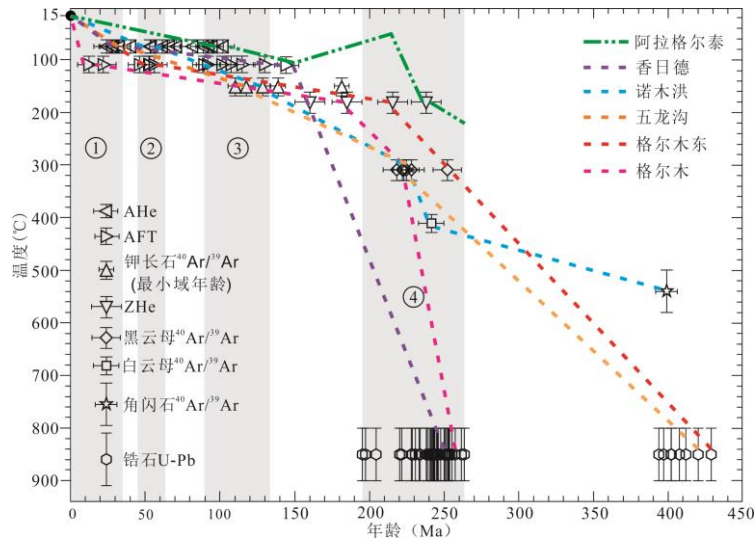


图 8 柴东南缘-东昆仑北缘古生代以来的冷却历史；①为晚喜山期，②为早喜山期，③为晚燕山期，④为晚海西-印支期。

Fig.8 Cooling history since Paleozoic in the southern margin of eastern Qaidam Basin-northern part of East Kunlun. ①: Late Himalayan; ②: Early Himalayan; ③: Late Yanshanian; ④: Late Hercynian-Indosinian.

4.3 印支期柴东北缘隆升的沉积学证据

宗务隆构造带南缘产出一套以砾岩、砂岩为主的碎屑岩建造，西段沿赛冷尕秀-怀头他拉北一带分布，中段仅野马滩有出露，东段出露于察汗诺。区域上，该套碎屑岩的下界不整合于古元古界达肯达坂群或石炭系之上，或与达肯达坂群呈断层接触，上界与石炭系呈断层接触（图 2a）。本套地层的灰岩砾石中产有蜓类、腕足等化石，经鉴定多为奥陶系、二叠系灰岩砾石，野马滩与察汗诺的粉砂岩中均产出早三叠世的菊石，此外，前人还在怀头他拉北砾岩所夹页岩中采到孢粉样，其时代属于早、中三叠世，而怀头他拉北中三叠统为海相沉积，据此，青海省地质矿产局（1978）将该套地层的时代定为早三叠世（252~247 Ma），并命名为隆务河群。

赛冷尕秀-怀头他拉北一带，隆务河群底部以滨海相的砂砾岩与泥岩不整合于达肯达坂群之上，砂砾岩中斜层理发育，往上开始出现多套厚层砾岩夹砂岩，砾石成分复杂多变，下部以灰岩砾石为主，往上突变为片麻岩、花岗岩及石英岩砾石等，灰岩成分明显减少，砾径范围为 2~20 cm，总体呈现出向上变粗的趋势，磨圆往上亦逐渐变好（图 9）。野马滩未发现砾岩沉积，该区隆务河群分为下段灰岩段和上段碎屑岩段，碎屑岩段以长石砂岩、粉砂岩与粉砂质板岩互层为主，砂岩中发育不对称波痕。往东至察汗诺，本研究所观察到的隆务河群均为厚层砾岩，砾石成分复杂，有花岗岩、石英岩、灰岩及中基性火山岩等，砾石大小不一，砾径范围为 1~30 cm，砾径往上变粗，砾石多呈椭圆或扁圆状，长轴砾石的定向排列较好，可见叠瓦状排列，磨圆度也较好，为次圆-圆状。上述砾岩在宗务隆南缘的发育厚度较大，超过 575.5 m（青海省地质矿产局，1978），根据岩性组合判断其沉积于冲积扇和辫状河环境，为近物源快速堆积的产物。

根据长轴或叠瓦状砾石、不对称波痕所代表的古流向统计结果，早三叠世，宗务隆构造带南缘的古水流方向以北北西、北及北北东向为主，仅赛冷尕秀存在一部分往东的古水流（图 7）。因此，宗务隆南缘的隆务河群沉积时，其物源主要来自南侧的柴东北缘，柴东北缘古元古界达肯达坂群、奥陶系、石炭系与二叠系均可为砾岩提供物源。隆务河群物源分析结果初步证实了柴东北缘西段与东段于早三叠世处于快速隆升阶段，而中段的隆升幅度很小。



图9 宗务隆构造带南线下三叠统隆务河群野外照片及岩性特征。砾石成分：̳-花岗岩；gn-片麻岩；mg-混合岩；ls-灰岩；qz-石英岩；ss-砂岩。

Fig.9 Field pictures and lithological characteristics of lower Triassic Longwuhe formation in the southern part of Zongwulong tectonic belt. Gravel components: ̳-granite; gn-gneiss; mg- migmatite; ls-limestone; qz-quartz; ss-sandstone.

5. 讨论

5.1 二叠系-三叠系沉积厚度

柴东地区至今仍未揭示二叠系-三叠系，是未沉积，还是先沉积后被整体剥蚀？残留石炭系古埋深及晚海西-印支期剥蚀量恢复结果表明，残留的上石炭统扎布萨尕秀组顶界面在印支运动之前已经被埋深至 2500~3900 m。石炭纪，柴东地区整体处于古特提斯洋北缘的被动大陆边缘环境（陈宣华，2010），露头、钻井及地震资料所揭示的残余石炭系厚度最大值为 3200 m（程荣等，2016），如果没有二叠系-三叠系沉积，即使参考石炭纪最大沉积速率（139 m/Ma），晚石炭世末的 9 Ma 内很难沉积厚度超过 2500 m 的地层。此外，盆地南侧的古特提斯洋于早-中二叠世仍处于持续扩张过程之中，直到晚二叠世才开始往北俯冲（图 10a-b）。晚石炭世宗务隆构造带为陆内裂陷槽（彭渊，2015），该构造带还广泛出露志留系、石炭系与下二叠统的不整合接触面，早二叠世宗务隆构造带为稳定的台地相沉积环境，这种由晚石炭世陆内裂陷到早二叠世区域稳定沉降的转换可能代表了张裂型盆地两个不同的演化阶段，即裂陷阶段与裂后热沉降阶段。在研究区整体处于稳定沉降的大地构造背景之下，且全球海平面处于缓慢上升但幅度较小的情况下（Miller et al., 2005），柴东地区必定沉积了一定厚度的中下二叠统，这也得到了石灰沟上石炭统克鲁克组 ZHe 年龄（275.2~258.9 Ma）的佐证。鉴于柴东南缘于晚二叠末才开始隆升，柴东北缘于早三叠世亦才开始快速隆起，局部地区仍可能沉积了一定厚度的上二叠统-下三叠统。因此，柴东地区曾沉积了 2000~3000 m 的二叠系-三叠系，后被整体抬升剥蚀。

5.2 晚海西-印支期隆升历史

柴东地区晚海西-印支期剥蚀量普遍超过 2100 m, 最高可达 4300 m, 晚海西-印支运动将先期沉积的 2000~3000 m 二叠系-三叠系, 甚至部分石炭系抬升剥蚀。非常值得我们关注的是, 如此厚的地层是怎样被整体抬升剥蚀, 被剥蚀的物质又去了哪里? 我们从构造地质学、热年代学及沉积学角度, 同时结合剥蚀量恢复结果, 初步探索了柴东地区晚海西-印支期的隆升剥蚀历史。

晚二叠世以来 (~263 Ma), 随着古特提斯洋开始往东昆仑-柴达木地体之下俯冲, 东昆仑弧广泛发育, 下二叠统格曲组底部的复成分砾岩角度不整合于上石炭统浩特洛哇组之上 (Xiong et al., 2012; Chen et al., 2015; 李瑞保等, 2012), 是东昆仑地区初始隆升的沉积构造响应 (图 10b)。宗务隆构造带内曾报道了 258~236 Ma 的变玄武岩中绢云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄, 代表早期板块往南俯冲消减的变质作用年龄 (彭渊, 2015)。石灰沟上石炭统 ZHe (275.2~258.9 Ma) 与 ZFT (254.0~249.6 Ma) 年龄也记录了晚二叠世以来柴东北缘的冷却事件。但是, 该构造带内的上二叠统诺音河群仍以灰岩与砂岩沉积为主, 并未出现近源的粗碎屑沉积, 仅砂岩比例较下二叠统增加, 因此, 晚二叠世柴东北缘可能处于早期缓慢隆升阶段。早三叠世, 由于宗务隆洋往南俯冲强度的横向差异或俯冲角度的改变, 柴东北缘西段与东段开始快速隆升, 先期的多套沉积地层与结晶基底被迅速剥蚀, 并为宗务隆构造带南缘的隆务河群砾岩沉积提供丰富的碎屑物源, 而柴东北缘中段的隆升幅度很小, 很可能作为后期物质向北搬运的潜在运输通道 (图 10c)。研究区东部的共和盆地发育弧后盆地, 根据隆务河群的沉积环境及古流向可知, 早三叠世应为西高东低的古地理格局 (张立军, 2016)。

中三叠世, 周缘构造带的活动强度总体趋于稳定, 东昆仑及宗务隆南缘均发育浅海陆棚-台地相沉积体系 (青海省地质矿产局, 1978; 陈伟男等, 2015), 此时早三叠世柴东北缘快速隆起区可能已经被夷平。郡子河群上部为细碎屑岩夹灰岩沉积, 灰岩中产大量菊石与瓣鳃, 可能反映了中三叠世晚期海水已经开始退出宗务隆构造带 (青海省地质矿产局, 1978)。前人在鄂拉山西北坡的上三叠统陆相火山岩底部采到菊石和瓣鳃类化石, 经鉴定均为中三叠世分子, 此外共和盆地西部也由早期的三角洲相过度到陆相湖泊相 (王连根等, 1984; 张立军, 2016)。因此, DL0101 样品的 ZHe (~238.1 Ma) 年龄很可能代表了中三叠世柴东地区由海相向陆相的全面转换。考虑到古特提斯洋北向俯冲碰撞具有西早东晚的特征, 柴西地区此时已经成为隆起区 (陈宣华, 2010; Li et al., 2013), 东昆仑弧亦阻隔了柴东地区与古特提斯洋的联通, 因此, 中三叠世海水很可能往北和往东退出研究区 (图 10d)。

晚三叠世, 松潘-甘孜地体与东昆仑-柴达木地体开始了强烈的陆 (弧) 陆碰撞, 在南北向挤压应力作用下, 东昆仑地区发生强烈隆升, 区域上上三叠统八宝山组与下伏不同时代地层存在明显的角度不整合 (Dai et al., 2013; Chen et al., 2015; 李瑞保等, 2012), 黑云母与钾长石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ (224-214 Ma)、ZHe (225~194 Ma) 年龄也记录了这一时期的快速冷却事件 (图 7、8)。与此同时, 松潘-甘孜地体持续的北向推挤促使东昆仑-柴达木地体的下地壳显著缩短和增厚 (Xia et al., 2014), 而研究区上地壳可能并未发生强烈褶皱缩短, 这与 Yin 等 (2008) 提出的柴东地区新生代地壳缩短模式类似。受此影响, 整个柴东地区被迅速抬升, 地貌上形成了南高北低的古地理格局, 加之当时处于热带环境, 古气候作用下使得盆地内弱固结的上二叠统-下三叠统率先被大面积剥蚀, 这些物质沿着南北向水系被迅速搬运至宗务隆及南祁连地区。持续抬高的盆地南缘进一步加剧了河流的下切深度, 充足的降雨携带着大量被剥蚀的物质往北运输 (图 10e)。都兰地区晚三叠世早-中期的剥蚀量就达到 3600 m 以上, 剥蚀速率普遍超过 120 m/Ma。盆地中部的绿梁山-埃姆尼克山持续往霍布逊凹陷之上逆冲, 整个埃姆尼克凸起及欧南凹陷部分区域的剥蚀量超过 3700 m, 石炭系已所剩无几, 但霍布逊凹陷北部却保存有 800~2800 m 的石炭系 (程荣等, 2016)。柴东北缘的剥蚀量较小, 普遍为 2100~2900 m, 仅杂丘 1 井剥蚀量达到了 3100 m。晚海西-印支期剥蚀量变化特征与

当时的构造背景、古地貌及水系配置等均呈现出较好的相关性。晚三叠世南祁连地区发育陆相挤压拗陷盆地，哈拉湖东南部以北东向古水流为主（图 7），上三叠统阿塔寺组的碎屑锆石 U-Pb 年龄存在 290~250 Ma 的年龄组分，滚圆状与次棱角状的锆石均有，指示其物源有来自东昆仑或宗务隆构造带并经过长距离搬运（吴龙，2013；王苏里等，2016）。现今宗务隆构造带北缘仍保存着 630~1991 m 的上三叠统，哈拉湖地区达到了 4073 m，哈拉湖拗陷上三叠统嘎勒得寺组的烃源岩成熟度于晚三叠世末已经达到了 1.37%，在如此短的时间内达到如此高的成熟度必定经历了快速埋深（吕苗等，2013）。晚三叠世松潘-甘孜地体沉积了巨厚的深海-半深海相复理石建造，白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 与碎屑锆石 U-Pb 年龄对比结果表明柴北缘-祁连山也曾作为物源区为松潘-甘孜北缘的复理石沉积提供物源（Enkelmann et al., 2007）。综上，我们认为柴东地区晚海西-印支期被剥蚀的物质一部分往北输送至宗务隆及南祁连地区，另一部分往南东经共和盆地搬运至松潘-甘孜地体。

印支运动末期，在区域弱伸展应力背景下，早侏罗世柴北缘开始产生断块活动，柴东地区发育了以红山凹陷为中心的断陷湖盆（图 10f），中侏罗世湖盆范围逐渐扩大到德令哈凹陷和霍布逊凹陷北部，而此时欧龙布鲁克凸起与霍布逊凹陷南部仍为隆起区，大煤沟剖面中下侏罗统的物源分析结果也证实其物缘区主要为南边的欧龙布鲁克地块与东昆仑地区（Yu et al., 2017；李军亮等，2016），即早中侏罗世柴东地区继承了晚三叠世南高北低的古地貌格局。

6. 结论

（1）柴东地区已有石炭系烃源岩样品于印支运动之前已经达到最高古地温，最高古地温范围为 130~217℃，石炭系在达到最高古地温时普遍具有较高的古地温梯度，为 37~43℃/km。假定古地表温度为 25℃，柴东地区残留石炭系顶界面埋深在印支运动之前已经达到了 2500~3900 m。古温标法恢复的晚海西-印支期剥蚀量范围为 2100~4300 m，柴东南缘为 3600~4300 m，往柴东北缘逐渐减小到 2100~3100 m，仅穿山沟一带达到了 3700 m。

（2）石炭纪-早中二叠世，柴东地区一直处于古特提斯洋持续扩张体制下的被动大陆边缘环境，直到晚二叠世才逐渐开始隆升，区域大地构造背景及晚海西-印支期剥蚀量恢复结果均证实柴东地区曾沉积了 2000~3000 m 的二叠系-三叠系，后被整体剥蚀。

（3）晚二叠世以来，随着古特提斯洋往北俯冲消减，东昆仑及盆地周缘开始隆升。早三叠世，柴东北缘西段与东段经历了一次快速隆升，先期的多套沉积地层与结晶基底被迅速剥蚀并为宗务隆南缘的隆务河群砾岩沉积提供物源，而柴东北缘中段的隆升幅度很小。中三叠世海水往北和往东退出研究区。晚三叠世，松潘-甘孜地体强烈碰撞挤压使得东昆仑-柴达木地体下地壳显著缩短和增厚，柴东地区上地壳可能并未强烈褶皱缩短，而是被整体抬升，地貌上形成了南高北低的古地理格局，在古气候及水系作用下，二叠系-三叠系与部分石炭系被迅速剥蚀，其中一部分物质往北输送至宗务隆及南祁连地区，另一部分往南东搬运至松潘-甘孜地体。

致谢 感谢两位审稿专家的宝贵意见与编辑部老师的支持，感谢中国科学院地质与地球物理研究所胡迪博士、胡杰博士对最高古地温计算提供的帮助，野外地质考察期间，段忠孝师傅始终安全地将我们送至目的地，在此一并致谢！

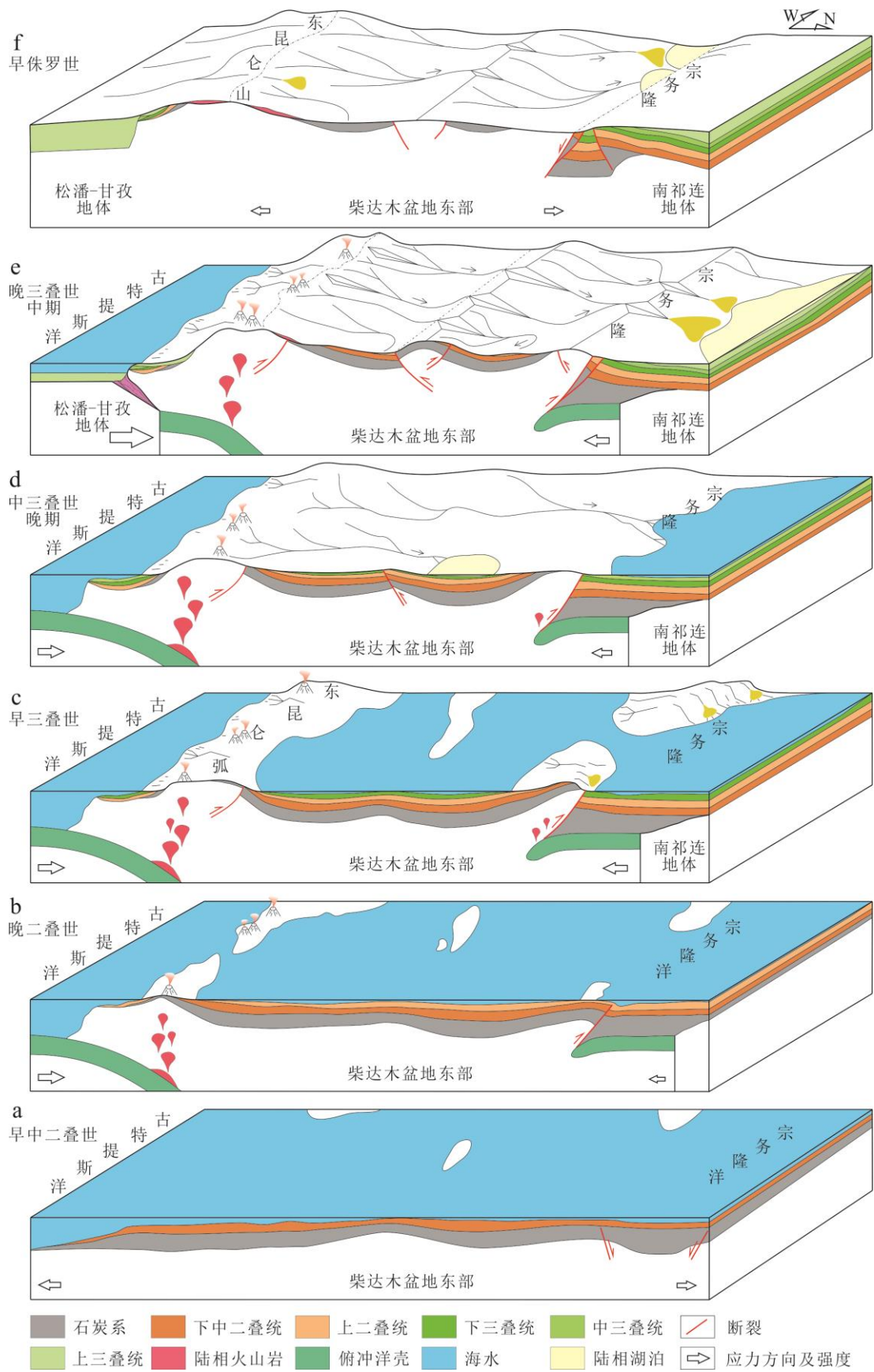


图 10 柴东地区及周缘二叠纪-三叠纪隆升剥蚀过程。

Fig.10 Permian-Triassic uplift and denudation in the eastern Qaidam Basin and its surrounding regions.

References

- Allen P A, Allen J R. 2013. Basin analysis: principles and applications to petroleum play assessment[M]. Wiley-Blackwell.
- Chen Weinan. 2015. Geologic features, provenance analysis and structural evolution of Naocangjiangou formation at the southern slope of the East Kunlun(East Part)[D]. Chang'an University(in Chinese).
- Chen X. 2010. Coupling and tectonic evolution of the Qaidam Basin and its surrounding mountains[M]. Geological Press(in Chinese).
- Chen X H, McRivette M W, Li L, et al. 2011. Thermochronological evidence for multi-phase uplifting of the East Kunlun Mountains, northern Tibetan Plateau[J]. Geological Bulletin of China(in Chinese), 30(11):1647-1660.
- Chen X, Gehrels G, Yin A, et al. 2015. Geochemical and Nd-Sr-Pb-O isotopic constrains on Permo-Triassic magmatism in eastern Qaidam Basin, northern Qinghai-Tibetan plateau: Implications for the evolution of the Paleo-Tethys[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 114:674-692.
- Cherniak, D. J., and E. B. Watson. 2001. Pb diffusion in zircon[J]. Chem. Geol., 172(1-2):5-24.
- Cheng Rong, Xiao Yongjun, Lin Huixi, et al. 2016. A study of Carboniferous stratigraphic distribution and controlling factors in the eastern section of North Qaidam[J]. Earth Science Frontiers(in Chinese), 23(5):75-85.
- Dai J, Wang C, Hourigan J, et al. 2013. Multi-stage tectono-magmatic events of the Eastern Kunlun Range, northern Tibet: Insights from U-Pb geochronology and (U-Th)/He thermochronology[J]. Tectonophysics, 599(4):97-106.
- Dai Kun, Liu Chenglin, Xiao Dunqing, et al. 2016. The tectonic deformation and evolution of the Oulongbuluke area in Eastern Qaidam Basin[J]. Earth Science Frontiers(in Chinese), 23(5):33-44.
- Department of geology and mineral resources of the People's Republic of China. 1978. I. regional geology. No. 24, regional geology of Qinghai province [M]. Geological Press(in Chinese).
- Duan H L, Zhong J H, Wang Z K, et al. 2006. Evaluation of Carboniferous hydrocarbon source rocks in the eastern Qaidam Basin, China[J]. Geological Bulletin of China(in Chinese), 25(9):1135-1142.
- Duvall A R, Clark M K, Kirby E, et al. 2013. Low-temperature thermochronometry along the Kunlun and Haiyuan Faults, NE Tibetan Plateau: Evidence for kinematic change during late-stage orogenesis[J]. Tectonics, 32(5):1190-1211.
- Enkelmann E, Weislogel A, Ratschbacher L, et al. 2007. How was the Triassic Songpan-Ganzi basin filled? A provenance study[J]. Tectonics, 26(4):1-24.
- FANG Chaogang, LI Fengjie, MENG Lina et al. 2012. Evaluation of middle Jurassic hydrocarbon source rocks in Hongshan sag, northern Qaidam Basin[J]. Natural Gas Geosciences(in Chinese), 23(5):856-861.
- Farley K A. 2002. (U-Th)/He Dating: Techniques, Calibrations, and Applications[J]. Reviews in Mineralogy & Geochemistry, 47(1):819-844.
- Flowers R M, Shuster D L, Wernicke B P, et al. 2007. Radiation damage control on apatite (U-Th)/He dates from the Grand Canyon region, Colorado Plateau[J]. Geology, 35(5):447-450.
- Harris N B W, Xu R, Lewis C L, et al. 1988. Plutonic Rocks of the 1985 Tibet Geotraverse, Lhasa

- to Golmud[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 327(1594):145-168.
- Harrison T M. 1982. Diffusion of ^{40}Ar in hornblende[J]. *Contributions to Mineralogy & Petrology*, 78(3):324-331.
- Harrison T M, Cédrier J, Aikman A B, et al. 2009. Diffusion of ^{40}Ar in muscovite[J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 73(4):1039-1051.
- Harrison T M, Duncan I, McDougall I. 2015. Diffusion of ^{40}Ar in biotite: Temperature, pressure and compositional effects[J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 49(11):2461-2468.
- Hu Shengbiao, Wang Jiyang, Zhang Rongyan. 1999. Estimation of the amount of uplift and erosion across an unconformity using vitrinite reflectance data[J]. *Journal of petroleum exploration and development(in Chinese)*, 1999 (04): 42- 45.
- Huang H, Niu Y, Nowell G, et al. 2014. Geochemical constraints on the petrogenesis of granitoids in the East Kunlun Orogenic belt, northern Tibetan Plateau: Implications for continental crust growth through syn-collisional felsic magmatism[J]. *Chemical Geology*, 370(4):1-18.
- Jian P, Liu D, Kröner A, et al. 2009. Devonian to Permian plate tectonic cycle of the Paleo-Tethys Orogen in southwest China (II): Insights from zircon ages of ophiolites, arc/back-arc assemblages and within-plate igneous rocks and generation of the Emeishan CFB province[J]. *Lithos*, 113(3-4):767-784.
- Landry K R, Coutand I, Jr D M W, et al. 2016. Late Neogene tectonically driven crustal exhumation of the Sikkim Himalaya: Insights from inversion of multithermochronologic data[J]. *Tectonics*, 35(3):831-857.
- Li Junliang, Xiao Yongjun, Wang Dahua, et al. 2016. Distribution and controlling factors of remnant Middle-Lower Jurassic in the eastern Qaidam Basin[J]. *Earth Science Frontiers(in Chinese)*, 23(5):11-22.
- Li Ruibao, Pei Xianzhi, Li Zuochen, et al. 2012. Geological characteristics of late Paleozoic-Mesozoic unconformities and their response to some significant tectonic events in eastern part of Eastern Kunlun[J]. *Earth Science Frontiers(in Chinese)*, 19(5):244-254.
- Li R B, Pei X Z, Li Z C, et al. 2015. The depositional sequence and prototype basin for Lower Triassic Hongshuichuan Formation in the eastern segment of East Kunlun Mountains[J]. *Geological Bulletin of China(in Chinese)*, 34(12):2302-2314.
- Li W, Neubauer F, Liu Y, et al. 2013. Paleozoic evolution of the Qimantagh magmatic arcs, Eastern Kunlun Mountains: Constraints from zircon dating of granitoids and modern river sands[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 77(21):183-202.
- Li Z X, Gao J, Zheng Ce, et al. 2015. Present-day heat flow and tectono-thermal evolution since the late Paleozoic time of the Qaidam Basin[J]. *Chinese J. Geophys.(in Chinese)*, 58(10): 3687-3705.
- Li Zongxing, Qiu Nansheng, Ma Yinsheng, et al. 2017. The tectono-thermal evolution in the eastern Qaidam Basin, Northwest China since since the Paleozoic. *Earth Science Frontiers(in Chinese)*, 24(03):157-167.
- LIU Chengdong, MOXuanxue, LUOZhaohua, et al. 2004. Mixing events between the crust- and mantle-derived magmas in Eastern Kunlun: Evidence from zircon SHRIMP II chronology[J]. *Chinese Science Bulletin*, 49(8):828-828.
- Liu Y, Genser J, Neubauer F, et al. 2005. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ mineral ages from basement rocks in the Eastern Kunlun Mountains, NW China, and their tectonic implications[J]. *Tectonophysics*,

398(3):199-224.

- LIU Zhanqing, PEI Xianzhi, LI Ruibao, et al. 2011. LA-ICP-MS zircon U-Pb geochronology of the two suites of ophiolites at the Buqingshan area of the A'nyemaqen Orogenic belt in the southern margin of East Kunlun and its tectonic implication[J]. *Acta Geologica Sinica*(in Chinese), 85(2):185-194.
- Ludwig K R, Szabo B J, Moore J G, et al. 1991. Crustal subsidence rate off Hawaii determined from $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ages of drowned coral reefs[J]. *Geology*, 19(1991):171-174.
- Lv Miao, Wang Suli. 2013. Evaluation of argillaceous source rocks of upper Triassic Galedesi formation in the Halahu depression of southern Qilian basin[J]. *Western China Science and Technology*(in Chinese), 12(08):21-22.
- Ma Yin-sheng, Yin Cheng-ming, Liu Cheng-lin, et al. 2012. The progress of carboniferous oil and gas investigation and assessment in Qaidam Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*(in Chinese), 33(2):135-144.
- Miller K G, Komins M A, Browning J V, et al. 2005. The Phanerozoic record of global sea-level change[J]. *Science*, 310(5752):1293-1298.
- Mock C, Arnaud N O, Cantagrel J M. 1999. An early unroofing in northeastern Tibet? Constraints from $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ thermochronology on granitoids from the eastern Kunlun range (Qianghai, NW China)[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 171(1):107-122.
- Niu Yong-bin, Zhong Jian-hua, Duan Hong-liang, et al. 2010. Relationship between Carboniferous sedimentary facies and source rock in Qaidam Basin[J]. *ACTA SEDIMENTOLOGICA SINICA*(in Chinese), 28(1):140-149.
- Peng Yuan. 2015. The Late Hercynian-Indosinian structural characteristics of the Zongwulong tectonic belt in north Qaidam Basin[D]. Chinese Academy of Geological Sciences(in Chinese).
- Peng Yuan, Ma Yinsheng, Liu Chenglin, et al. 2016. Geological characteristics and tectonic significance of the Indosinian granodiorites from the Zongwulong tectonic belt in the north Qaidam[J]. *Earth Science Frontiers*(in Chinese), 23(2):206-221.
- Qiu N S, Peter Reiners, Mei Q H, et al. 2009. Application of the (U-Th)/He thermochronometry to the tectono-thermal evolution of sedimentary basin-A case history of Well KQ1 in the Tarim Basin[J]. *Chinese J. Geophys.*(in Chinese), 52(7):1825-1835.
- Reiners P W, Spell T L, Nicolescu S, et al. 2004. Zircon (U-Th)/He thermochronometry: He diffusion and comparisons with $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating[J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 68(8):1857-1887.
- Reiners P W, Brandon M T. 2006. Using thermochronology to understand orogenic erosion[J]. *Annual Review of Earth & Planetary Sciences*, 34(34):419-466.
- Shi X, Kohn B, Spencer S, et al. 2011. Cenozoic denudation history of southern Hainan Island, South China Sea: Constraints from low temperature thermochronology[J]. *Tectonophysics*, 504(1):100-115.
- Sun Jiaopeng, Chen Shiyue, Hu Zhongya, et al. 2014. Research on the mixed model and development characteristic of the clastic-carbonate diamictite facies in the northern Qaidam[J]. *Natural Gas Geoscience*(in Chinese), 25(10):1586-1593.
- Sweeney J J, Burnham A K. 1990. Evaluation of a simple model of vitrinite reflectance based on Chemical kinetics [J]. *Aapg Bulletin*, 74(10):1559-1570.
- Tian Yun-tao, Zhu Chuan-qing, Xu Ming, et al. 2011. Post-Early Cretaceous denudation history of

- the northeastern Sichuan basin: constraints from low temperature thermochronology profiles[J]. Chinese J. Geophys.(in Chinese), 54(3):807-816.
- Wang Chengshan, Li Xianghui. 2003. Analysis principles and methods of sedimentary basins[M]. Advanced Education Press(in Chinese).
- Wang F, Feng H, Shi W, et al. 2016. Relief history and denudation evolution of the northern Tibet margin: Constraints from $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and (U-Th)/He dating and implications for far-field effect of rising plateau[J]. Tectonophysics, 675:196-208.
- WANG Guocan, XIANG Shuyuan, WANG An, et al. 2007. Thermochronological constraint to the processes of the East Kunlun and adjacent areas in Mesozoic-Early Cenozoic[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences(in Chinese), 32(5):605-614.
- Wang Liangen. 1984. Terrestrial features and stratigraphic classification of ancient volcanic groups in Elashan, Qinghai province[J]. Northwestern Geology(in Chinese), 1984(03):3-11.
- Wang Suli, Zhou Lifa. 2016. Geochemistry characteristics and provenance rock of the upper Triassic Atasi formation detrital rocks in the southern Qilian Basin[J]. Geoscience(in Chinese), 30(01):87-96.
- Wei Xiao-jie, Ma Yin-sheng, Li Zong-xing, et al. 2018. High-frequency alternations and driving mechanisms of clastic-carbonate successions in the Upper Carboniferous, northern Qaidam Basin[J]. Journal of Paleogeography(in Chinese), 20(3):409-422.
- Wolf R A, Farley K A, Silver L T. 1996. Helium diffusion and low-temperature thermochronometry of apatite[J]. Geochimica Et Cosmochimica Acta, 60(21):4231-4240.
- Wu Long. 2013. The detrital-zircon U-Pb dating and provenance analysis for the Triassic sandstone in Qilian Shan, northeastern margin of the Tibetan Plateau[D]. China University of Geosciences(Beijing).
- Xia R, Wang C, Deng J, et al. 2014. Crustal thickening prior to 220 Ma in the East Kunlun Orogenic Belt: Insights from the Late Triassic granitoids in the Xiao-Nuomuhong pluton[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 93(1):193-210.
- Xin Hou-tian, Wang Hui-chu, Zhou Shi-jun. 2006. Geological events and tectonic evolution of the north margin of the Qaidam Basin[J]. Geological Survey and Research(in Chinese), 29(4):311-320.
- Xiong F H, Ma C Q, Liu B. 2012. The origin of mafic microgranular enclaves and their host granodiorites from East Kunlun, Northern Qinghai-Tibet Plateau: implications for magma mixing during subduction of Paleo-Tethyan lithosphere[J]. Mineralogy & Petrology, 104(3-4):211-224.
- Xu W, Sun ZM, Pei JL, et al. 2011. New Late Permian paleomagnetic results from Qaidam block and tectonic implications. Acta Petrologica Sinica(in Chinese), 27(11) : 3479-3486.
- Yan Z, Bian QT, OA. Korchagin, et al. 2008. Provenance of the Early Triassic Hongshuichuan formation in the southern margin of East Kunlun: constrains from detrital framework, heavy mineral and analysis and geochemistry[J]. Acta Petrologica Sinica(in Chinese), 24(5):1068-1078.
- Yin A, Harrison T M. 2003. Geologic Evolution of the Himalayan-Tibetan Orogen [J]. Annual Review of Earth & Planetary Sciences, 28(28):211-280.
- Yin A, Dang Y Q, Zhang M, et al. 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):847-876.

- Yu L, Xiao A, Wu L, et al. 2017. Provenance evolution of the Jurassic northern Qaidam Basin (West China) and its geological implications: evidence from detrital zircon geochronology[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 1-14.
- Yu Hu-juan, TUO Jin-cai, Liu Luo-fu, et al. 2000. Geochemical characteristics and evaluation on hydrocarbon generation potentials of source rocks in Jurassic eastern Qaidam Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*(in Chinese), 18(1):208-138.
- Yuan W, Dong J, Wang S, et al. 2006. Apatite fission track evidence for Neogene uplift in the eastern Kunlun Mountains, northern Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 27(6):847-856.
- Yuan Yu-song, Zheng Herong, Tu Wei. 2008. Methods of eroded strata thickness restoration in sedimentary basins. *Petroleum Geology & Experiment*(in Chinese), 30(6):636-642.
- Yuan Y S, Lin J H, Cheng X Y, et al. 2014. Yanshan-Himalayan denudation in western Hubei Eastern Chongqing area. *Chinese J. Geophys.*(in Chinese), 57(9):2878-2884.
- Zhang Lijun. 2015. Provenance analysis of Lower-Middle Triassic in Gonghe Basin, Qinghai[D]. China University of Geosciences(Beijing).

附中文参考文献

- 陈伟男. 2015. 东昆仑东段南坡闹仓坚沟组地质特征、物源属性与构造演化[D]. 长安大学.
- 陈宣华. 2010. 柴达木盆地及其周缘山系盆山耦合与构造演化[M]. 地质出版社.
- 陈宣华, Michael W.MCRIVETTE, 李丽等. 2011. 东昆仑造山带多期隆升历史的地质热年代学证据[J]. *地质通报*, 30(11):1647-1660.
- 程荣, 肖永军, 林会喜等. 2016. 柴达木盆地北缘东段石炭系残留分布及控制因素[J]. *地学前缘*, 23(5):75-85.
- 代昆, 刘成林, 肖敦清等. 2016. 柴达木盆地欧龙布鲁克地区构造演化研究[J]. *地学前缘*, 23(5):33-44.
- 段宏亮, 钟建华, 王志坤等. 2006. 柴达木盆地东部石炭系烃源岩评价[J]. *地质通报*, 25(9):1135-1142.
- 方朝刚, 李凤杰, 孟立娜等. 2012. 柴达木盆地北缘红山断陷中侏罗统烃源岩评价[J]. *天然气地球科学*, 23(5):856-861.
- 李军亮, 肖永军, 王大华等. 2016. 柴达木盆地东部侏罗纪原型盆地恢复[J]. *地学前缘*, 23(5):11-22.
- 李瑞保, 裴先治, 李佐臣等. 2012. 东昆仑东段晚古生代—中生代若干不整合面特征及其对重大构造事件的响应[J]. *地学前缘*, 19(5):244-254.
- 李瑞保, 裴先治, 李佐臣等. 2015. 东昆仑东段下三叠统洪水川组沉积序列与盆地构造原型恢复[J]. *地质通报*, 34(12):2302-2314.
- 李宗星, 高俊, 郑策等. 2015. 柴达木盆地现今大地热流与晚古生代以来构造-热演化[J]. *地球物理学报*, 58(10):3687-3705.
- 李宗星, 邱楠生, 马寅生等. 2017. 柴达木盆地东部古生代以来构造-热演化[J]. *地学前缘*, 24(3):157-167.
- 刘战庆, 裴先治, 李瑞保等. 2011. 东昆仑南缘阿尼玛卿构造带布青山地区两期蛇绿岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及其构造意义[J]. *地质学报*, 85(2):185-194.
- 胡圣标, 汪集暘, 张容燕. 1999. 利用镜质体反射率数据估算地层剥蚀厚度[J]. *石油勘探与开发*, 1999(04):42-45+6.
- 吕苗, 王苏里. 2013. 南祁连盆地哈拉湖坳陷上三叠统尕勒德寺组泥质岩类烃源岩评价[J]. *中国西部科技*, 12(08):21-22.

- 马寅生, 尹成明, 刘成林等. 2012. 柴达木盆地石炭系油气资源调查评价进展[J]. 地球学报, 33(2):135-144.
- 牛永斌, 钟建华, 段宏亮等. 2010. 柴达木盆地石炭系沉积相及其与烃源岩的关系[J]. 沉积学报, 28(1):140-149.
- 彭渊. 2015. 柴北缘宗务隆构造带海西晚期—印支期构造特征研究[D]. 中国地质科学院.
- 彭渊, 马寅生, 刘成林等. 2016. 柴北缘宗务隆构造带印支期花岗岩闪长岩地质特征及其构造意义[J]. 地学前缘, 23(2):206-221.
- 青海省地质矿产局. 1978. 中华人民共和国地质矿产部地质专报.一,区域地质.第24号,青海省区域地质志[M]. 地质出版社.
- 邱楠生, Peter, Reiners 等. 2009. (U-Th)/He 年龄在沉积盆地构造—热演化研究中的应用——以塔里木盆地 KQ1 井为例[J]. 地球物理学报, 52(7):1825-1835.
- 孙娇鹏, 陈世悦, 胡忠亚等. 2014. 柴东北缘古生代碎屑岩—碳酸盐岩混积相发育特征及组合模式研究[J]. 天然气地球科学, 25(10):1586-1593.
- 田云涛, 朱传庆, 徐明等. 2011. 晚白垩世以来川东北地区的剥蚀历史——多类低温热年代学数据综合剖面的制约[J]. 地球物理学报, 54(3):807-816.
- 王成善, 李祥辉. 2003. 沉积盆地分析原理与方法[M]. 高等教育出版社.
- 王国灿, 向树元, 王岸等. 2007. 东昆仑及相邻地区中生代—新生代早期构造过程的热年代学记录[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 32(5):605-614.
- 王连根. 1984. 青海鄂拉山地区古火山群陆相喷发特征及地层划分[J]. 西北地质, 1984(03):3-11.
- 王苏里, 周立发. 2016. 南祁连盆地上三叠统阿塔寺组碎屑岩地球化学特征及其源岩[J]. 现代地质, 30(01):87-96.
- 魏小洁, 马寅生, 李宗星等. 2018. 柴达木盆地北缘上石炭统碎屑岩——碳酸盐岩高频转换过程及驱动机制[J]. 古地理学报, 20(3):409-422.
- 吴龙. 2013. 青藏高原东北缘祁连山三叠系砂岩碎屑锆石 U-Pb 定年及物源分析[D]. 中国地质大学(北京).
- 辛后田, 王惠初, 周世军. 2006. 柴北缘的大地构造演化及其地质事件群[J]. 地质调查与研究, 29(4):311-320.
- 许伟, 孙知明, 裴军令等. 2011. 青藏高原北部柴达木块体晚二叠世古地磁结果及其构造意义[J]. 岩石学报, 27(11):3479-3486.
- 闫臻, 边千韬, Oleg A. Korchagin 等. 2008. 东昆仑南缘早三叠世洪水川组的源区特征:来自碎屑组成、重矿物和岩石地球化学的证据[J]. 岩石学报, 24(5):1068-1078.
- 于会娟, 妥进才, 刘洛夫等. 2000. 柴达木盆地东部地区侏罗系烃源岩地球化学特征及生烃潜力评价[J]. 沉积学报, 18(1):208-138.
- 袁玉松, 郑和荣, 涂伟. 2008. 沉积盆地剥蚀量恢复方法[J]. 石油实验地质, 30(6):636-642.
- 袁玉松, 林娟华, 程心阳等. 2014. 鄂西渝东地区晚燕山—喜马拉雅期剥蚀量[J]. 地球物理学报, 57(9):2878-2884.
- 岳远刚. 2014. 东昆仑南缘三叠系沉积特征及其对阿尼玛卿洋闭合时限的约束[D]. 西北大学.
- 张立军. 2015. 青海共和盆地下一中三叠统物源分析[D]. 中国地质大学(北京).