

doi: 10.12029/gc20180403

刘健, 史杰, 姚鑫, 李钦, 常志勇. 2018. 帕米尔高原东北缘活动构造对塔什库尔干盆地地热控制作用[J]. 中国地质, 45(4): 681-692.

Liu Jian, Shi Jie, Yao Xin, Li Qin, Chang Zhiyong. 2018. The control of neo-tectonic activity over geothermal resource in the Taxkorgan Basin on the northeastern margin of the Pamir[J]. Geology in China, 45(4): 681-692(in Chinese with English abstract).

帕米尔高原东北缘活动构造对塔什库尔干盆地地热控制作用

刘健¹ 史杰² 姚鑫¹ 李钦¹ 常志勇²

(1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081; 2. 新疆地质矿产局第二水文调查大队, 新疆 昌吉 831100)

摘要: 帕米尔东北缘位于青藏高原西北部, 是新构造运动最强烈的地区之一。受控于公格尔拉张断裂作用的塔什库尔干盆地, 活动构造强烈, 高的大地热流值和丰富的地下水, 使其具备地热资源形成的地质构造和水文条件。基于塔什库尔干盆地北部的曲曼地区地质构造、湖相地层年代学调查研究, 该地区发育晚更新世的 NNE 向 f_1 和 f_2 正断层以及第四纪沉积物之下存在隐伏的近 EW 向的断层 f_3 。这 3 条断层是塔什库尔干断裂在不同构造演化时期形成的次级断层。结合 EH-4 电磁成像和钻孔及抽水试验等资料表明 NNE 向 f_1 和 f_2 正断层是地热系统的导水通道, 而近 EW 向 f_3 断层为导热通道。该地区地热模式是大地热流为热源-地下水深循环逐渐加热-构造控水和控热。

关键词: 帕米尔东北缘; 塔什库尔干盆地; 地热资源; 导水通道

中图分类号: P546; P314.1 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2018)04-0681-13

The control of neo-tectonic activity over geothermal resource in the Taxkorgan Basin on the northeastern margin of the Pamir

LIU Jian¹, SHI Jie², YAO Xin¹, Li Qin¹, CHANG Zhiyong²

(1. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China; 2. No. 2 Hydrogeological Investigation Party, Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Resources, Changji 831100, Xinjiang, China)

Abstract: The northeastern Pamir on the northwest margin of the Tibetan Plateau is one of the regions with strong neotectonic movement. Located in the northeastern Pamir, the Taxkorgan basin is controlled by regional Kongur tensile faulting. The strong neotectonism, high terrestrial heat and abundant underground water of the basin constitute the regional tectonic and hydrogeological conditions for geothermal resources. Tectonic investigation in Quman area of northern Taxkorgan basin indicates the NNE-striking normal faults of f_1 and f_2 were active in late Quaternary whereas the subtle EW-striking fault of f_3 , whose nature was different in different structural stages, was developed only below the Quaternary sediments. These faults are the secondary fractures of Tashkorgan fault formed in different tectonic episodes. Based on the data of geological structure, age model of the section of the lacustrine deposits, EH-4 electromagnetic image and drilling, the authors hold that the NNE-striking normal

收稿日期: 2017-04-25; 改回日期: 2017-09-10

基金项目: 中国地质调查项目(12120114001401 和 DD20160060)资助。

作者简介: 刘健, 男, 1970 年生, 教授级高级工程师, 构造地质学专业; E-mail: jianliu686@163.com。

faults were conduit-pipe and EW-striking thrust fault was heat conduction pathway. The atmospheric precipitation from the surrounding areas of the basin was heated by convection heating along the intersection of the different striking faults. The geothermal model involves heat source from terrestrial heat flow, gradually heating of deep circulated underground water and tectonic control of water and heat.

Key words: northeastern Pamir; Taxkorgan basin; geothermal resources; tectonic control of underground water and heat

About the first author: LIU Jian, male, born in 1970, senior engineer, majors in structural geology; E-mail: jianliu686@163.com.

Fund support: Supported by China Geological Survey Program(No. 12120114001401 and DD20160060).

1 引 言

青藏高原的构造变形是当前国际地学界研究的热点与前缘。65~45 Ma以来,印度地体与欧亚大陆碰撞产生的构造变形是驱动青藏高原崛起的主要动力,帕米尔构造结(西构造结)是印度板块向欧亚大陆碰撞的两个突出支点之一,是活动构造运动和地震活动最强烈的地区之一。晚新生代帕米尔向塔里木盆地方向推覆了近300 km(Burtman et al., 1993; Thomas et al., 1994),其前缘的小块体不断拼接、变形以至旋转,形成了现今的帕米尔。

近年来国内外地质学者对该地区地行了活动构造(Fu et al., 2010; Chevalier et al., 2011, 2015, 2016)、韧性剪切带及其变形年代学(李海兵等, 2007)、区域热年代学(Sobel et al., 2013; Thiede et al., 2013)、构造地貌(刘栋梁等, 2011)和地震地质(陈杰等, 2016)等方面的研究。研究表明,第四纪以来,帕米尔内部构造挤压变形微弱,而受近EW拉张的公格尔拉张系的构造活动较强(Robinson et al., 2007, 2009; Chevalier et al., 2011, 2015, 2016; 陈杰等, 2011, 2016; 李文巧等, 2011)。自晚新生代以来,公格尔拉张系构造活动至今(Chevalier et al., 2016),在断层上盘不仅形成了断陷盆地,而且错断了前新生代和下地壳岩石,可能延伸到上地幔(刘栋梁等, 2011)。重力异常反演的地球物理资料显示印度/亚洲碰撞已汇聚于帕米尔高原下(Kumar et al., 2005; Tiwari et al., 2009),该地区上地壳厚度减薄,热流背景值高(Hu et al., 2000)。高的热流背景有利于地热的形成(庞忠和等, 2011),地热资源常常赋存在特定构造部位(张森琦等, 2008)。来自大气降水的地下水是否有可能通过公格尔拉张系的正断层与深部的热源进行热交换,形成地热资源,有何成因联系,赋存规律等,目前尚不清楚。

经过数年的地热地质工作,在塔什库尔干盆地(塔县盆地)的曲曼地热田内陆续钻凿了孔口水温在50~150℃的地热地质勘探井数眼。由于没有理清活动构造与地热关系,目前多数地热井施工存在一定的盲目性和风险性,制约着地热资源的开发利用进程。本文基于塔什库尔干盆地北部的曲曼地区地质构造调查、湖相地层年代学研究,以及地热钻孔和可控源变频大地电磁测量(EH-4)等资料,探讨该地区活动构造对塔县盆地地热的控制作用。

2 地质构造及水文特征

2.1 地质构造特征

西构造结是印度板块向中亚大陆碰撞的两个突出点之一。是中国大陆受印度板块构造挤压作用最强烈的地区之一(陈杰等, 2011)。西构造结现今构造变形以前缘地壳缩短和走滑、构造结内部拉张为特征,形成一系列向N凸出的弧形活动构造带(陈杰等, 2016),中国境内包括主帕米尔逆断裂带(MPT)一喀什—叶城右旋走滑转换带(KYTS)和帕米尔前缘推覆系(PFT),以及喀喇昆仑右旋走滑断裂带、公格尔拉张系(图1)。这些构造带的强烈活动,在构造结内部形成了一系列雄伟的弧形山系和拉张盆地;在构造结前缘形成了强烈沉陷的、新生代沉积厚逾万米的新生代盆地(Fu et al., 2010; 陈杰等, 2016)。同时,这些活动构造带控制着7级以上强震的发生(陈杰等, 2016)。

第四纪以来,帕米尔内部逆冲断层活动性很弱,其变形受东部250 km长的公格尔山拉张系所控制(Robinson et al., 2004, 2007; 陈杰等, 2011, 2016)。公格尔拉张系总体走向NW-SE,倾向W,倾角20°~45°。断裂下盘的片岩和片麻岩构成了最高峰公格尔山和慕士塔格山;上盘,在北部由古生代片岩、微变质硬砂岩和三叠纪花岗岩侵入体构

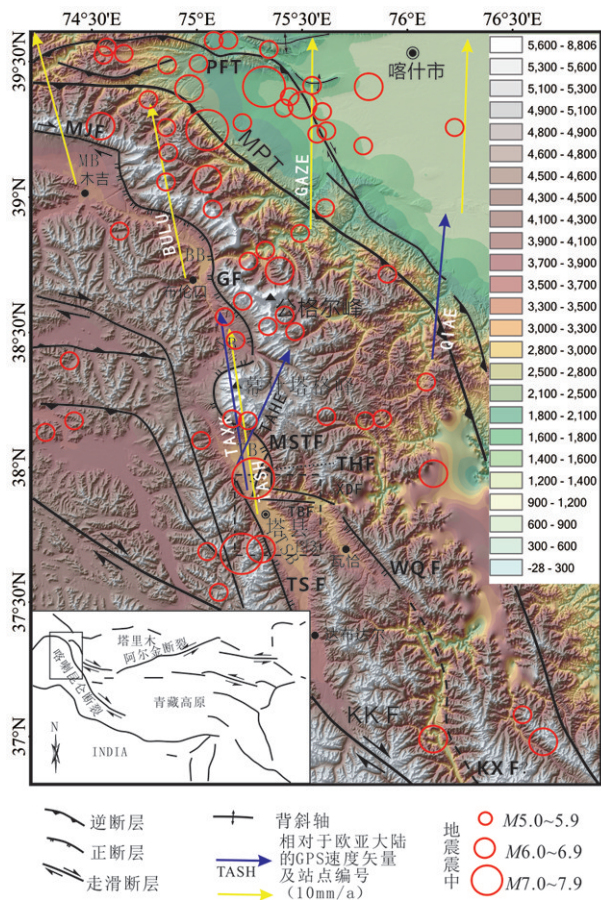


图1 帕米尔东北缘及其邻区地理位置DEM阴影解译图 (据陈杰等, 2011, 2016; 略作修改)

GF—公格爾拉張系; KKF—喀喇崑崙走滑斷裂; KXF—喀拉喀什斷裂; MPT—主帕米爾逆沖斷裂; PFT—帕米爾前緣褶皺-逆沖斷層帶; MJF—木吉斷層; MSTF—慕士塔格斷裂; THF—塔合曼正斷層; TSF—塔什庫爾干正斷層; XDF—辛迪斷層; TBF—圖巴什斷層; MB—木吉盆地; BB—布倫口盆地; SB—蘇巴什盆地; TB—塔合曼盆地; TSB—塔什庫爾干盆地; GPS速度矢量藍箭頭數據來自 Yang 等(2008), 黃箭頭數據來自 Zubovich 等(2010); 紅色圈代表地震震中

Fig.1 DEM Shadow interpretation chart of Pamir northeast edge and adjacent areas (modified from Chen Jie et al., 2011, 2016)

GF—Kongur tensile faulting; KKF—Karakorum strike-slip fault; KXF: Kara kashgar fault; MPT—Pamir thrust faults; PFT—Pamir fold-thrust fault zone; MJF—Muji fault; MSTF—Mushitage normal fault; THF—Taheman normal fault; TSF—Taxkorgan normal fault; XDF—Xindi fault; TBF—Tubashi fault; MB—Muji basin; BB—Bulunkou basin; SB—Subashi basin; TB—Taheman basin; TSB—Taxkorgan country basin; Blue GPS vectors data from Yang et al., 2008, Yellow GPS vectors data after Zubovich et al., 2010; Red circle represents earthquake epicenter

成,在慕士塔格山以南則被始新世和中新世花崗岩所侵入(Robinson et al., 2004, 2007; 陈杰等, 2011, 2016)。其拉張作用起始于7~8 Ma以前(Robinson et al., 2004, 2007),全新世尚在活動(陈杰等, 2011, 2016; 李文巧等, 2011; Chevalier et al., 2016)。拉張作用下,在公格爾山拉張系的斷裂上盤自北向南發育了5個斷陷盆地,分別為木吉盆地、布倫口盆地、蘇巴什盆地、塔合曼盆地和塔縣盆地(图1)(陈杰等, 2011)。公格爾山拉張系的東西拉張量总体上北大南小,在最北端的木吉盆地約為30 km,而在塔縣盆地 < 3 km(Robinson et al., 2007)。

木吉斷層是公格爾山拉張系最北端的轉換斷層,沿昆蓋山南麓山前展布(图1),長約100 km,走向NWW,近直立,以右旋走滑為主,兼具正斷作用。斷層沿線發育壯觀的斷層三角面,多處可見被右旋斷錯的沖溝水系及冰磧地貌(Robinson et al., 2004; 陈杰等, 2011; Chevalier et al., 2011),是一條全新世活動的斷層帶(陈杰等, 2011)。木吉斷層在其東端與昆蓋山南麓斷裂近正交(图1)。

慕士塔格正斷層向南終止于塔什庫爾干河。沿着塔什庫爾干河分布着近東西向,南傾的辛迪斷層(XDF),斷層性質為正斷層。與該斷層近平行的是圖巴什斷層(TBF),斷層向北傾的特征,其性質為逆斷層,圖巴什斷層向西與塔什庫爾干斷裂斜交,為塔什庫爾干斷裂的伴生斷層(图1)。這兩條近東西向的斷層是中新世早、中期,慕士塔格山地體的隆升剝蝕作用中形成的(Robinson et al., 2007)。

塔什庫爾干斷層是塔縣盆地的西界斷裂,走向N-NNW,向東陡傾,長約75 km(图1)。斷層下盤為塔什庫爾干鹼性雜岩苦子干和卡日巴生岩體,主要為正長岩、正長花崗岩和黑雲母二長花崗岩,SHRIMP U-Pb 鉛石法測定侵位年齡為11 Ma(柯珊等, 2008; 羅照華等, 2003)。斷層上盤為塔縣盆地和塔合曼盆地第四紀沉積物、中生代三疊紀至侏羅紀沉積岩及早古生代片岩、片麻岩等。在與塔合曼正斷層交匯處以北,塔什庫爾干斷層沿塔合曼盆地西南緣的緩坡展布,由數條不連續的長5~10 km的斷層陡坎組成,斷層切割了全新世以來堆積的殘坡積物,表明全新世尚在活動(李文巧等, 2011)。

塔什库尔干断裂最南端与喀喇昆仑断裂斜交。喀喇昆仑断裂是帕米尔—喀喇昆仑山与青藏高原的分界断裂。主要表现为右走滑运动,大体上以N142°E走向展布,在帕米尔高原从木吉、布伦口、塔什库尔干至红其拉甫一带(图1)。早期深部的喀喇昆仑韧性剪切带分布在后期活动的喀喇昆仑断裂的西南侧,它们共同组成了具有右旋走滑活动的喀喇昆仑断裂带(李海兵等,2007,2008)。沿喀喇昆仑断裂温泉的线形分布,表明沿断裂带存在着较强的热液作用(李海兵等,2007)。公格尔拉张系是喀喇昆仑断裂重要的分支断裂(李海兵等,2008;Chevalier et al., 2016)。

2.2 湖相地层的形成时代

2.2.1 样品采集

在塔县盆地北部曲曼村附近出露晚第四纪湖相地层(图2),李文巧等(2011)认为可能是在冰盛期山谷河流出口被堵塞时形成的。该湖相地层呈NE-SW向分布,长约3 km,北宽南窄,最宽可达1 km左右。湖相地层与下覆的早古生代变质岩呈角度不整合接触,湖相地层产状近水平,在曲曼村以北,湖相地层的层序保存相对完整,最厚可达约5.9 m。在曲曼村附近,湖相地层剥蚀严重,湖相地层之间多被基岩分割,厚度变化较大,最厚处2~3 m。该套湖相地层主要是以黏土、黏土质粉砂和粉砂组成。在湖相地层中部见有含贝壳和炭屑的薄层,采集了AMS¹⁴C样品,送至美国BETA实验室进行有机碳测年;在顶部的细沙中采集光释光样品^①。

2.2.2 AMS¹⁴C测试结果

根据表1中AMS¹⁴C年龄数据,首先获得了样品间的湖相地层沉积速率。运用线性外推的计算方法,可获得湖相地层形成的大致时代。根据推算湖相地层沉积的起始年龄约为55 cal. ka B.P.,光释光数据表明湖泊结束沉积时代约为23 ka^①(图3)。

2.3 地质水文特征

塔县盆地位于新疆塔什库尔干塔吉克自治县,是喀喇昆仑、帕米尔高原和青藏高原交汇地带,总体上呈NNW向展布的狭长谷地,在盆地中第四纪地层主要以晚第四纪以来发育的冲、洪积物,冰碛物和湖相沉积物为主。塔县盆地为一相对封闭的承压自流水盆地,地下热水主要分布于承压自流水盆地的中部。赋存于各热储中的地下热水主要来

源于裸露在盆地周边的第四系松散岩类孔隙水、山区基岩裂隙水及断层脉状水的侧向补给。其中,基岩裂隙水主要分布于塔什库尔干河谷两侧山区,受大气降水的入渗补给,由高向低、由河谷两侧山区向河谷中径流,以侧向径流、泉水等形式排泄。基岩裂隙水富水性一般,单泉流量2.9~13.1 L/s,水质较好。第四系松散岩类孔隙水主要分布于塔什库尔干河谷及其西侧的冲洪积扇区,含水层岩性以卵砾石、砂砾石、粗砂、细砂等为主,含水层厚度在50~400 m,由北向南由小变大。地下水位埋深较小区域分布在该盆地的东侧及南北两侧,埋深一般3~20 m。第四系松散岩类孔隙水富水性相对较强,其富水性由河谷向河谷两侧由强变弱。除个别地段(在断裂带附近,经深部循环沿断裂带上升补给浅部地下水)外,地下水水质较好。塔县盆地主要是受两侧山区侧向径流补给和大气降水、融雪水、河水等入渗补给,由两侧向河谷、由南向北径流,以及泉水、蒸发等方式排泄。据观测孔监测资料显示,在枯水期,随着高山融雪水和降雨的逐渐减少,地下水的补给量也呈下降趋势。而且,分布在NNE向断层上钻孔中水位具有近同步升降特征^②。

3 塔县盆地活动构造

塔县盆地西侧受喀喇昆仑断裂和塔什库尔干断裂控制,北东侧受慕士塔格断裂控制(图1,图2)(Robinson et al., 2007;李文巧等,2011)。

通过在塔县盆地北侧的曲曼地区野外构造地质调查,笔者识别出在第四纪湖相地层中发育3条断层(图2)。其中曲曼地热田中主要发育断层 f_1 和 f_2 ,断层 f_1 走向约30°,西倾,倾角70°~81°,该断层切割整个湖相地层,向NNE方向延伸至塔什库尔干河附近的居民区,向SSW方向延伸至曲曼村,湖相地层中发育的 f_1 断层向下延伸至湖相地层下覆的古生代片岩、片麻岩中,断层破碎带宽约20 cm(图4c),明显宽于湖相地层中发育的断层破碎带,表明在湖相地层沉积之前,该正断层就已开始发育; f_2 走向与 f_1 基本一致,但是倾向相反,东南倾,倾角65°, f_2 断层向NNE方向延伸,其末端未通过近南北向发育的辛迪正断层(图2)。研究区内 f_1 和 f_2 断层均切穿了全新世发育的冲洪积物,两条断层上盘相对下盘均向下滑动,为正断层(图4a、b)。由于两条正断层相距不远,而且倾向相反(图2),推测两断层在深部相

连。另外,通过对盆地西部边缘地质调查,在曲曼村以西的古生代片麻岩、片岩中发育北倾,倾角约44°,走向近东西向的断层 f_1 ,断层破碎带宽为7~8 m。该断层上下盘牵引构造表明其具两期不同构造活动性质的特征,早期为逆冲性质,晚期为正断性质(图4d)。该断层沿走向向东延伸与图巴什断层(TBF)能够很好对应,推测断层 f_1 为图巴什断层西延部分。沿着该断层走向追踪,未见有错断更新世以来的地层,表明其活动时间应该早于更新世地层的沉积时间。

4 塔县盆地EH-4电磁成像

鉴于塔县盆地第四纪覆盖严重,有必要对第四纪沉积物之下的隐伏断层进行调查,寻找未知可能含热构造,以确定控热构造和导热构造之间关系等。选用具有高分辨率特征的EH-4电磁成像系统在曲曼地区开展电磁测深工作(<1000 m),其测线布置原则是测线方向尽量垂直于已知导热构造走向方向。实际测量时选定测线方向近EW,测线间距250~300 m,单条测线长度为2000 m,测量点距为50 m。

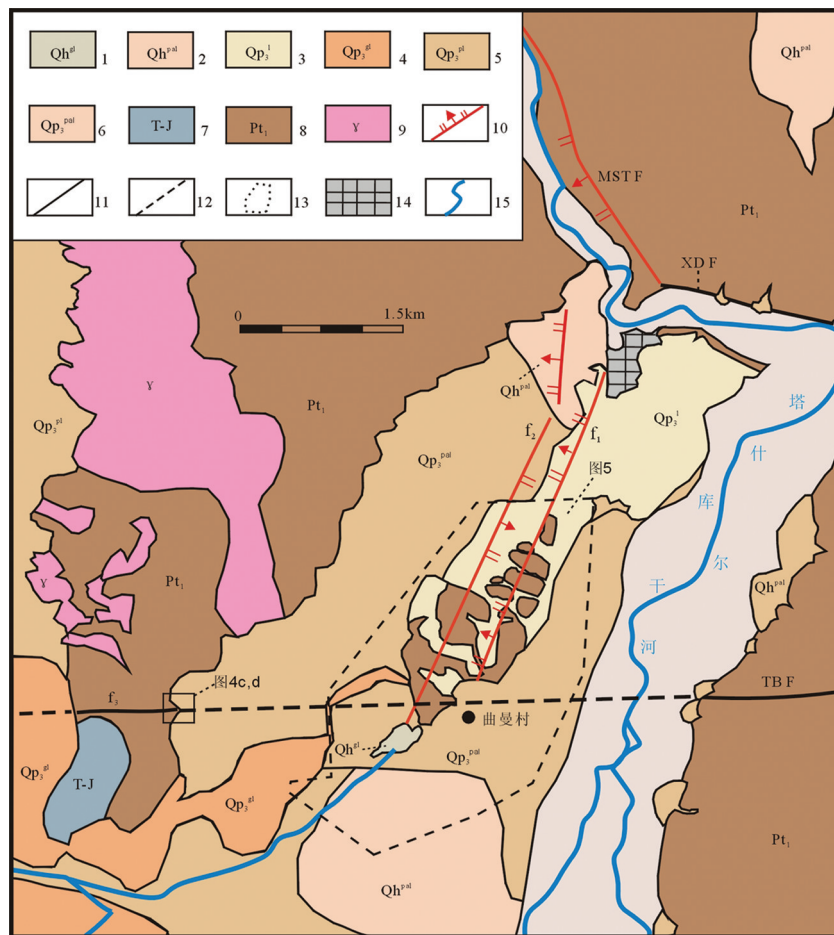


图2 塔县盆地北部曲曼地区地质构造图

(据塔什库尔干地区1:25万区域地质调查图及报告(2004)和笔者野外地质调查资料)

1—全新世冰碛物;2—全新世冲洪积物;3—更新世湖相沉积物;4—更新世冰碛物;5—更新世坡积物;6—更新世冲洪积物;7—三叠纪—侏罗纪沉积物;8—早古生代变质岩;9—花岗岩体;10—正断层;11—更新世以来已经停止活动的断裂;12—隐伏断裂;13—EH4电磁成像区;14—居民区;15—河流;MSTF—公格拉张系南段的慕士塔格正断层;XDF—辛迪断裂;TBF—图巴什断裂

Fig.2 Geological structural map of Quman region in northern Taxkorgan basin

(after 1:250,000 Regional Geological Map and Report of Tashikuergan, 2004 and the authors' field work)

1—Holocene-moraine; 2—Holocene diluvium; 3—Pleistocene lacustrine sediments; 4—Pleistocene glacial till; 5—Pleistocene vicious accumulated filth; 6—Pleistocene and diluvium; 7—Triassic - Jurassic sediment; 8—Early palaeozoic metamorphic rock; 9—Granitic pluton; 10—Normal fault; 11—Buried fault; 12—Residential area; MSTF—Muztagh Ata normal fault of south part of Kongur tensile faulting; XDF—Xindi fault; TBF—Tubashi fault

表1 新疆塔县湖相地层碳屑的AMS¹⁴C测年结果Table 1 AMS¹⁴C dating results of carbon deposits in the lacustrine strata of Taxian County, Xinjiang

样品编号	取样深度/cm	测试材料	测试结果(¹⁴ C ka B.P.)	校正年龄 (Cal ka B.P.)
TXBH17-1	28	贝壳	40.08±0.48	40.36±0.48
TXBH17-2	34	碳屑	42.57±0.63	42.61±0.63

注:表中AMS¹⁴C的¹⁴C年龄使用CALIB5.0.1(Stuiver et al., 2005)转换为日历年龄;>26 ka的¹⁴C年龄使用Bard的经验公式计算为日历年龄(Bard et al., 1998)。

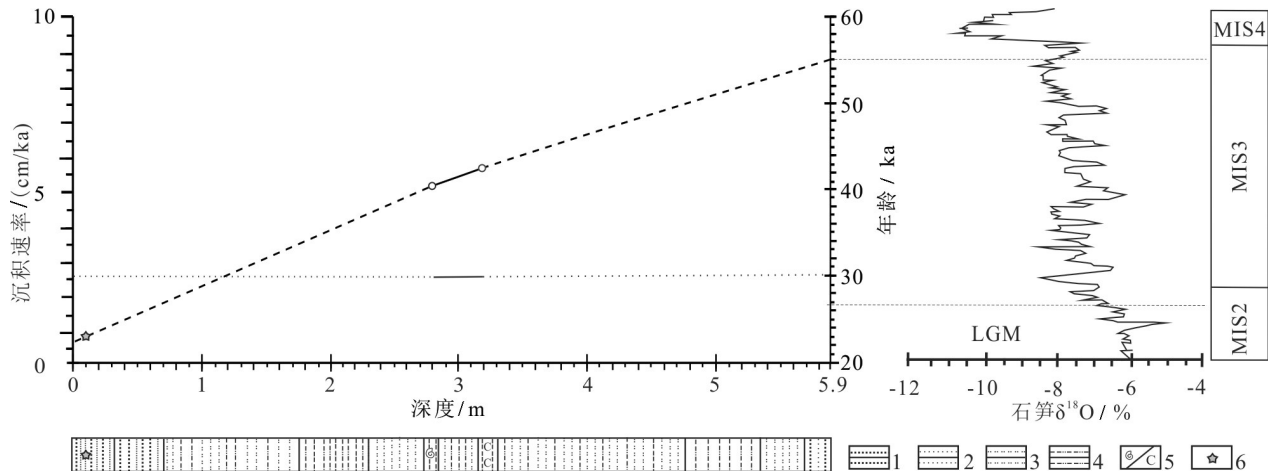


图3 塔县盆地湖相沉积物深度-年龄转换模式和沉积速率图

(石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 数据据 Wang et al., 2008)

LGM—末次冰盛期(26~19 Cal ka B.P.); 1—中砂; 2—细砂; 3—粉砂; 4—粉砂质黏土;
5—贝壳化石和碳屑的取样位置; 6—光释光取样及年龄位置

Fig.3 Age model of the studied section of the lacustrine deposits in the Taxian basin

(stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ data after Wang et al., 2008)

LGM: Last Glacial Maximum (26 - 19 Cal ka B.P.); 1 - Medium sand; 2 - Fine sand; 3 - Silt; 4 - Silty clay; 5 - Sampling point of fossil seashells and carbon bits; 6 - Sampling and age point for optical stimulation

鉴于塔县盆地第四纪覆盖严重,有必要对第四纪沉积物之下的隐伏断层进行调查,寻找未知可能含热构造,以确定控热构造和导热构造之间关系等。EH-4系统属于部分可控源的大地电磁测深仪,其方法原理是利用宇宙中的太阳风等入射到地球上的天然电磁场信号作为激发场源,又称一次场。该一次场是平面电磁波,垂直入射到大地介质中。大地介质中将会产生感应电磁场,此感应电磁场与一次场是同频率的。在均匀和水平层状介质情况下,波阻抗是电场和磁场的水平分量的比值(梁永东等,2010)。一般来说,足够的电性差异或者说在足够高的高阻中找足够低的低阻是获得尽可能精确分辨率的前提;即便是得到了足够的分辨率,EH4大地电磁还是不能够精确确定类似于断层宽度这样一类问题,而有赖于协同其他物探方法共同确定(梁永东等,2010;董晨等,2007)。

研究者们选用具有高分辨率特征的EH-4电磁成像系统在曲曼地区开展电磁测深工作(<1000 m),其测线布置原则是测线方向尽量垂直于已知导热构造走向方向。实际测量时选定测线方向近EW,测线间距250~300 m,单条测线长度为2000 m,测量点距为50 m。

从岩性特征分析来看,早古生代片麻岩表现为高阻特征,一般大于1000 $\Omega \cdot \text{m}$;而砂岩、泥岩表现为低阻特征,一般小于500 $\Omega \cdot \text{m}$;第四纪松散砂-黏土为20~100 $\Omega \cdot \text{m}$ (李富等,2012;金旺林等,2012),热液以及以液态形式存在于深部地热源的电阻率表现为超低阻,一般小于10 $\Omega \cdot \text{m}$ (李富等,2012)。

为了进一步了解研究区构造特征,选取50 m、300 m、500 m和800 m不同深度EH-4视电阻率反演平面图(图5)。图5a显示深度50 m处,北部出现

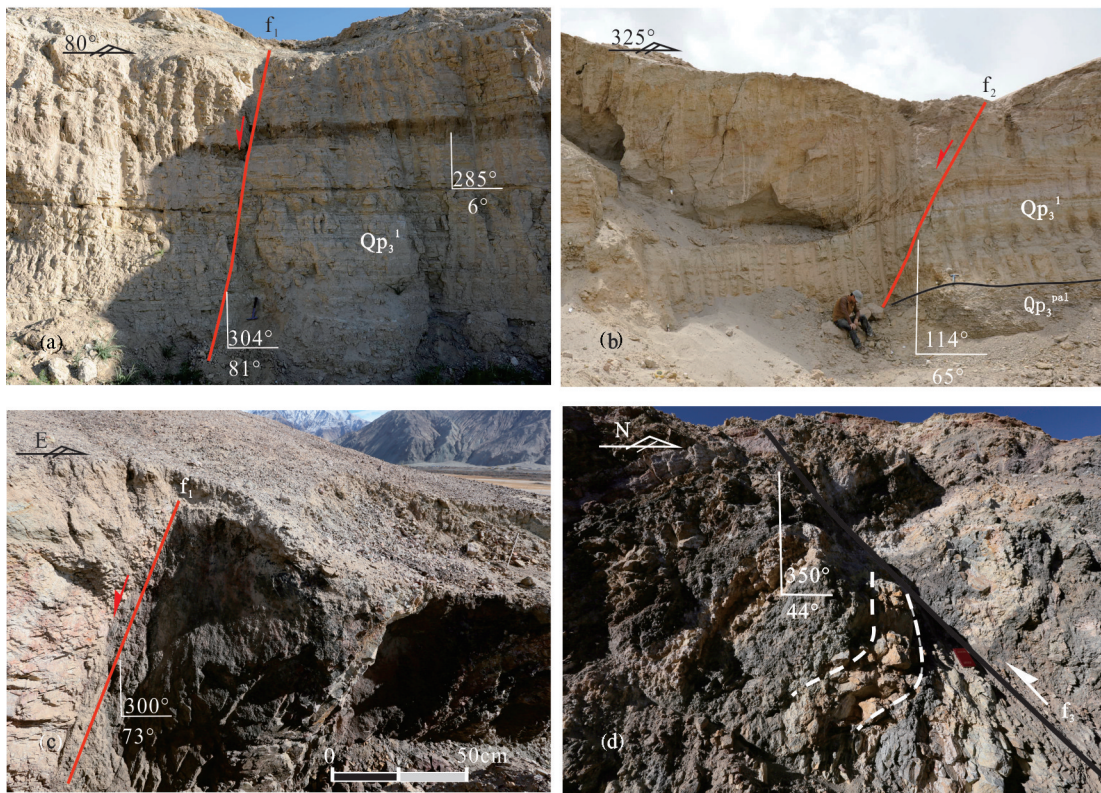


图4 塔县盆地北部曲曼地热田断裂特征

a—湖相地层中发育的 f_1 正断层;b—湖相地地下伏基岩中发育的 f_2 正断层;c—湖相地地下伏基岩中发育的 f_1 正断层;d— f_3 断层的逆冲特征(断裂位置及地层代号见图2所示)

Fig.4 Geothermal field fracture characteristics of Quman in the north of Taxkorgan basin

a—Normal fault f_1 in lacustrine strata; b— Normal fault f_2 in basement rock under lacustrine strata; c—Normal fault f_1 in basement rock under lacustrine strata; d—The thrust fault f_3 (fault location and stratigraphic code as shown in Fig. 2)

近环形或“U”字形的小于 $8\sim 30 \Omega \cdot m$ 的低阻异常区,结合水文地质资料显示其水位埋深较浅,可能是富含地下水的补给通道,另外,在“U”字形的低阻异常区近东西方向上视电阻率明显低于两侧,这可能是由于浅部电性差异往往不够大,还与高频部分的频点密度及噪声干扰等因素有关(董晨等, 2007)。图 5b 中,高低阻异常体有较好的电性差异。300 m 深度的平面上明显出露一连串近 NNE 向低电阻异常区。将这些低阻异常圈定为地热富集区,低阻区 I 和 II 之间电阻率变化不明显,但是,根据野外地质调查,初步推断低阻区 II 可能是由断层 f_2 引起的,至于低阻区 I 是否也是由于断层引起的,地表并未见该断层的迹象,也许是在湖相地层沉积之前形成的断层,目前尚无资料加以确认。低阻区域 III 两侧均有明显的电阻率变化异常,与地表调查资料进行对比,推断该异常是由断层 f_1 引起

的。图 5c 中,除了 NNE 向 f_1 断层引起的低电阻异常区以外,还出现了近 EW 向的低电阻区,而且其两侧较为完整的高阻异常,根据野外地质调查资料显示,在第四纪湖相地层底部基岩中存在走向近 EW 向逆冲断层 f_3 ,推断造成这种电阻率差异的原因应该是由断层造成的(图 2,图 4d)。图 5c 中显示出 f_2 并没有切割到该深度。该图进一步显示由断层 f_3 引起的低电阻区 V 与由 f_1 断层引起的低电阻区 III 存在交汇。图 5d 上部 EW 向低电阻区 IV 的延伸相对图 5c 更加明显, NNE 向 f_1 断层引起的低电阻区 III 不如图 5b 和 5c 电阻率变化的显著,仅仅为串珠状的低阻异常,表明其在该深度连通性较差,造成这些低阻异常呈串珠状分布,进一步表明断层 f_1 构造活动在 800 m 深度所造成的岩石破碎能力较弱。图 5d 中部由断层 f_3 引起的近 EW 向低阻区也呈串珠状分布,而且不完整。图 5d 上部近 EW 向低阻区在该深

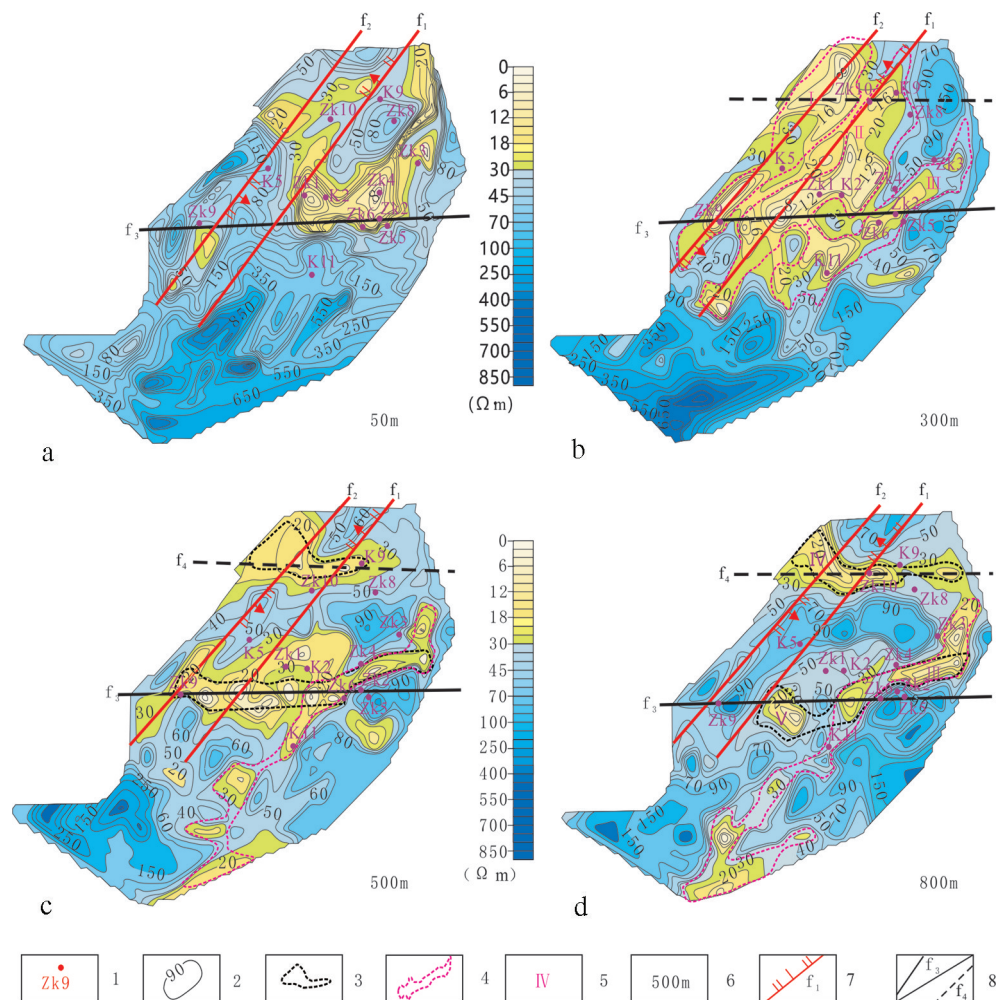


图5 EH-4不同测深反演平面图(测量范围见图2)

1—钻孔位置和编号;2—视电阻率($\Omega \cdot m$)等值线;3—老断层控制的地热范围;4—活动构造控制的地热范围;5—低阻区代号;6—500m深度的EH-4反演平面图;7—正断层;8—逆断层和推测逆断层

Fig.5 EH-4 different depths inversion floor plan (measuring range as shown in Fig.2)

1—Drill hole and its serial number;2—Apparent resistivity ($\Omega \cdot m$) contour;3—The old fault control of geothermal area;4—Range of geothermal active tectonic control;5—Low apparent resistivity zone;6—500 m depth inversion EH-4 floor plan;7—Normal fault;8—Thrust fault and blind thrust fault

度却表现的更加完整和连续,而且其两侧为较完整的高阻异常,推断其可能是由于隐伏断层 f_4 引起的(图5)。

5 讨论

5.1 塔县曲曼地区湖相地层的形成时代

MIS3期间,来自青藏高原上湖泊和孢粉记录表明,由于印度夏季风增强,其降水量比现在高40%~100%(Shi et al., 2001)。来自于塔里木盆地周边山脉的大气降水,通过河流的形势补给到塔里木盆地中,塔里木盆地MIS3阶段气候相对湿润,存在着大面积的湖相沉积(Yang et al., 2006, 2010, 2011),塔

里木盆地的光释光测年结果表明其在MIS3阶段存在广泛的湖相沉积(Yang et al., 2006)。塔里木盆地在MIS2时期气候逐渐变得干旱,特别是末次冰盛期(LGM, 26~19 Cal ka B.P.)时期气候寒冷干燥,冰川推进,冰雪融水显著减少,不利于湖泊的形成。塔里木盆地中古湖是在大约23 ka之后消亡(Yang et al., 2006)。曲曼地区的湖相地层顶部的光释光年龄数据同样限定了湖泊结束沉积时代约为23 cal. ka B.P.(图2)。另外,帕米尔西北部向北流的喷赤河(Panj)发育最老的河流阶地光释光年龄23~19 ka,对应于LGM时期,该时期不仅喷赤河的河流阶地是冰川推进时期形成的(Fuchs et al., 2014),而且在

达布达尔以南的冰川泥石流同样是该时期形成(Owen et al., 2012)。这表明 MIS2 时期,特别是 LGM 时期,帕米尔高原冰川发育,塔县曲曼地区湖泊在 23 ka 萎缩消亡是合理的。另外,切割该湖相地层的断层 f_1 和 f_2 的活动时间应该晚于湖泊沉积物的沉积时代,即晚于 23 ka。

5.2 塔县盆地地热的热源及控热构造的形成过程

西构造结持续的南北向挤压作用下,弱化的中、下地壳继续上涌形成中帕米尔片麻岩穹隆(Robinson et al., 2007)。塔什库尔干碱性杂岩在约 11 Ma 开始侵位,岩浆源深度至少 >50 km,表明帕米尔在约 11 Ma 前下地壳已加厚(柯珊等,2008)。而且在该时期帕米尔岩浆活动广泛而强烈,既有壳源岩浆又有幔源岩浆活动,碱性岩浆的侵位又导致了地壳升温和部分熔融,从而使整个岩石圈处于力学性质减弱状态,加速了帕米尔构造结的形成(罗照华等,2003)。该时期,近东西向的辛迪断层和图巴什断层是公格尔拉张系强烈构造隆升过程中形成的(Robinson et al., 2007)。公格尔拉张系不是一条单纯的正断层,在构造运动中兼右行走滑(Chevalier et al., 2016)。在走滑断裂末端常常伴生次级断层,这些次级断层在走滑断裂的挤压转换区内如果与褶皱轴向展布方向一致,则表现为逆冲性质,图巴什断裂与塔什库尔干断裂末端高角度斜交(图1)。因此,图巴什断层可能是塔什库尔干断裂右行走滑过程中产生的次级逆冲断层(图6)。

3~5 Ma,帕米尔东北缘的构造变形以径向逆冲为主,帕米尔内部公格尔拉张系继续东西向拉张,拉张量和速率由北向南减小(陈杰等,2011)。在南天山和西构造结双向俯冲的挤压作用下,在帕米尔东北缘,尤其是在靠近公格尔断裂附近,大量物质被垂向挤出,形成陡峻的高山(如公格尔山、慕士塔格山)。地球物理资料也显示,印度板块西构造结往北俯冲到喀喇昆仑地区(Kumar et al., 2005; Tiwari et al., 2009),利用重力异常反演获得印度/亚洲碰撞已汇聚于帕米尔高原下。板块碰撞的前缘可能汇聚至喀喇昆仑(Kumar et al., 2005)、帕米尔高原(Tiwari et al., 2009)。这将致使地幔物质上涌,进一步导致了该地区具有较高的大地热流背景,而且深大断裂发育,为深部热流上升提供了有利条件,公格尔拉张断裂错断了前新生代和下地壳岩

石,并可能延伸到上地幔(刘栋梁等,2011),为地下热源能够顺利传导至上地壳提供了良好的通道。

现今塔县盆地的 GPS 位移方向显示其与 f_1 和 f_2 断层存在明显交角。帕米尔高原地区的应力场在晚新生代期间不会有巨大的改变, f_1 和 f_2 断层性质表现为正断层,其走向与塔什库尔干断裂走向之间存在小角度夹角, f_1 和 f_2 断层也可能是塔什库尔干断裂右行走滑过程形成的分支断层(图6)。

5.3 塔县盆地的热储模型建立

水文地质资料显示,该地区地下水来自于盆地边缘两侧山区侧向径流补给和大气降水、融雪水、河水等入渗补给。地下水流沿着孔隙度较大的冲洪积物或构造裂隙从深部向盆地中心径流,在盆地的湖相砂泥岩之下基岩裂隙中形成承压含水层,然后以泉水、蒸发等方式排泄。庞忠和等(2011)对该地区地下水,河岸带泉水及两个钻孔地热水进行及水化学、同位素研究,结果表明曲曼地地热田中的地热水是与地下水混合所致,即洪积扇下存在导水断裂,热水沿断裂开启部位上涌进入第四系含水层,与地下水混合后,向扇缘的地下水溢出带排泄。

另外,活动断层和不同钻孔地热测温资料显示,NNE 向活动正断层 f_1 、 f_2 与 EW 向 f_3 断层交汇处孔口水温度超过 100℃ 以上,如钻孔 ZK10 和 ZK9。而远离断层交汇处的孔口水温明显下降,在 50℃ 左右,如钻孔 ZK3、K5 和 K11,并且具有离断层交汇处越远钻孔的孔口水温越低的趋势。这表明地下水在地下径流过程中,特别是在不同方向断裂的交汇部位,断层破碎带岩石贯通性良好,有利于地下水沿着这些部位向下渗入基岩深部,与下部热源进行热流交换,地下水循环深度越大,热储温度越高。钻孔抽水试验显示分布在 NNE 向活动正断层 f_1 、 f_2 的钻孔中水位具有近同步升降,这表明 NNE 向断层是相连通的,这也与 f_1 、 f_2 断层具有张性特征有关,表明这两条 f_1 、 f_2 正断层是导水通道。

塔县盆地,地下深处没有年轻浅成岩浆活动的岩浆房,也没有正在冷却中的大型岩基存在。但是,该地区热流背景很高,大地热流值为 150~350 mW/m²(Hu et al., 2000),除了西藏南部和台湾地区之外,中国其他地区的大地热流值均低于该值(Hu et al., 2000),其地热系统主要依靠偏高的区域大地热流量供热和维持。另外,近 EW 向 f_3 断层早期的

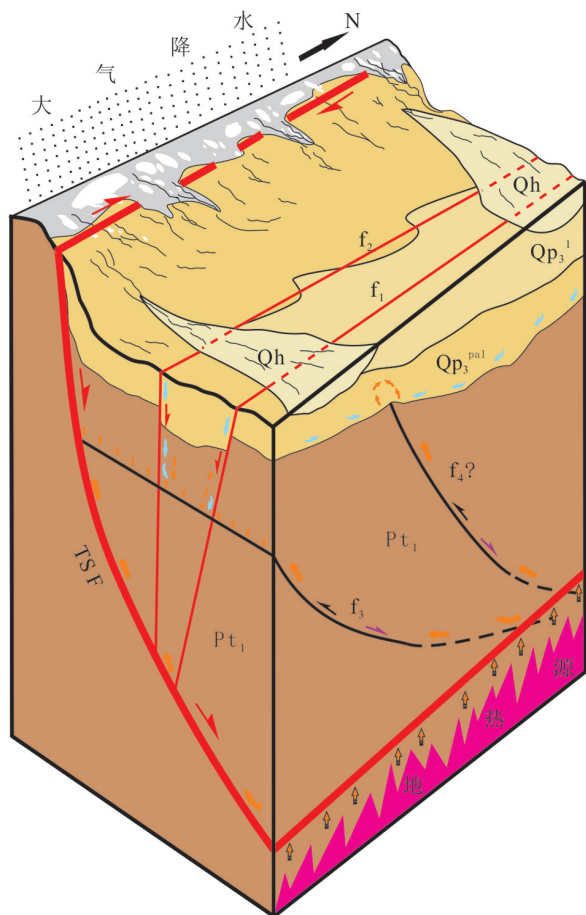


图6 塔县盆地地热储模型图(符号见图1和2所示)
Fig.6 Taxkorgan basin geothermal reservoir model diagram
(symbols as for Figs. 1 and 2)

构造性质为逆冲,其贯通性较差,这种半封闭的对流体系中却有利于地热异常的产生,地下热水在这类地热系统中的滞留时间可达 1 ka 或更长,这主要取决于水交替强度和地热系统的规模(张森琦等, 2008)。湖相地层以及其下伏的古生代变质岩本身的渗透性能较差,主要依靠裂隙及破碎带导水,在地形高差制约和相应的水力压差作用下形成地下水环流系统(图6),这种热水环流系统属受迫对流,有别于高温水热系统由温差所致的自由对流(汪集咏, 1996; White et al., 1986)。因此,塔县盆地热储主要是近 EW 向 f_3 断层裂隙,热源来自于深部地壳。23 ka 以来发育的 NNE 向正断层,具有良好的贯通性,来自盆地两侧山区侧向径流补给和大气降水、融雪水、河水等入渗补给的地下水沿着 NNE 向活动断层 f_1 、 f_2 正断层破碎带下渗,在与近 EW 向

控热断层 f_3 交汇处,以扩散的方式进行热传导和对流,形成了塔县盆地特有的热交换过程(图6)。塔县盆地地热资源是由 f_1 、 f_2 正断层控水, f_3 正断层控热。这些构造形成是与该地区特定的区域地质构造背景和演化密不可分的。

6 结 论

(1)塔县盆地北部塔合曼盆地中发育一套湖相地层,该套地层形成时间大约为 55 ka,结束于约为 23 ka。该湖泊的消亡是末次冰盛期,帕米尔高原冰川推进,河流水流量减少造成的。

(2)塔合曼地热田东北部发育 NNE 向 f_1 和 f_2 的正断层,也是地热系统的导水通道;第四纪沉积物之下存在近 EW 向 f_3 断层,是导热构造。这 3 条断层可能是塔什库尔干断裂不同构造演化时期,形成的具有不同构造活动性质的断层。

(3)深循环加热的地下水沿着 f_3 断层的构造通道上涌和富集,形成隐伏热异常。来自大气降水的地下水沿着 f_1 和 f_2 正断层流入与 f_3 断层交汇热异常处进行对流、加热。该地区地热模式是大地热流为热源—地下水深循环逐渐加热—构造控水和控热。

致谢:感谢审稿专家和编辑部老师对本文提出的宝贵建议。

注释

① 中国地质科学院地质力学研究所. 2016. 中巴经济廊带主要活动断层与重大工程地质问题调查报告.

② 新疆地矿局第二水文地质工程地质大队. 2016. 新疆喀什地区塔什库尔干县城地区地热地质勘查报告.

References

- Bard E, Arnold M, Hamelin B. 1998. Radiocarbon calibration by means of mass spectrometric $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ and ^{14}C ages of corals: An updated database including samples from Barbados, Mururoa and Tahiti=La calibration au radiocarbone au moyen de la spectrométrie de masse $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ [J]. Radiocarbon.
- Burtman V S, Molnar P. 1993. Geological and geophysical evidence for deep subduction of continental crust beneath the Pamir[J]. Special Paper of the Geological Society of America, 281(2): 248–251.
- Chevalier M L, Li Haibing, Pan Jiawei, Pei Junling, Wu Fuyao, Xu Wei, Sun Zhiming, Liu Dongliang. 2011. Fast slip-rate along the northern end of the Karakorum fault system, western Tibet[J]. Geophys. Res. Lett., 38. 38 L22309.

- Chevaliera M L, Pan Jiawei, Li Haibing, Liu Dongliang and Wang Meng. 2015. Quantification of both normal and right-lateral late Quaternary activity along the Kongur Shan extensional system, Chinese Pamir [J]. *Terra Nova*, 27(5): 379–391.
- Chevaliera M L, Leloup P H, Li Haibing. 2016. Comment on “No late Quaternary strike-slip motion along the northern Karakoram fault” published by Robinson et al. in *EPSL*, 2015[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 443: 216–219.
- Chen Jie, Li Tao, Sun Jianbao, Fang Lihua, Yao Yuan, Li Yuehua, Wang Haoran, Fu Bo. 2016. Coseismic surface ruptures and seismogenic muji fault of the 25 November 2016 Arketao Mw6.6 earthquake in northern Pamir[J]. *Seismology and Geology*, 38(4): 1160–1174 (in Chinese with English abstract).
- Chen Jie, Li Tao, Li Wenqiao, Yuan Zhaode. 2011. Late Cenozoic and present tectonic Deformation in the Pamir Salient, northwestern China[J]. *Seismology and Geology*, 33(2): 241–259 (in Chinese with English abstract).
- Dong Chen, Zhang Jizhen. 2008. Application and effect of EH4 magnetotelluric technology[J]. *Railway Construction Technology (Supp.)*, 529–543 (in Chinese).
- Fuchs M C, Gloaguen R, Krbetschek M, Szulc A. 2014. Rates of river incision across the main tectonic units of the Pamir identified using optically stimulated luminescence dating of fluvial terraces[J]. *Geomorphology* 216:79–92.
- Fu Bihong, Ninomiya Y, Guo Jianming. 2010. Slip partitioning in the northeast Pamir–Tianshan convergence zone[J]. *Tectonophysics*, 483: 344–364.
- Hu Shengbiao, He Lijuan, Wang Jiyang. 2000. Heat flow in the continental area of China: A new data set[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 179(2): 407–419.
- Jin Wanglin, Li Shixiang. 2012. The effect of EH4 method in bauxite deposit prospecting[J]. *Mineral Exploration*, 41(7):112–116.
- Ke Shan, Luo Zhaohua, Mo Xuanxue, Zhang Wenhui, Liang Tao, Zhan Huaming. 2008. The geochronology of Taxkorgan alkali complex, Pamir syntax[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(2):315–324 (in Chinese with English abstract).
- Kumar P, Yuan X, Kind R, G Kosarev. 2005. The lithosphere–asthenosphere boundary in the Tien Shan–Karakoram region from S receiver functions: Evidence for continental subduction[J]. *Geophysical Research Letters*, 32(32): L07305.
- Li Fu, Li Hua, Yang Jian. 2012. EH4 conductivity imaging system used in geological surveys in the southwest area[J]. *Metal Mine*, 41 (7):112–116.
- Li Haibing, J. Van der Woerd, Sun Zhiming, Meriaux A–S, Tapponnier P, Ryerson F J , Si Jialiang, Pan Jiawei. 2008. Late Quaternary left-slip rate and large earthquake recurrence time along the Kangxiwa (or Karakax) segment of the Altyn tagh fault, northern Tibet[J]. *Quaternary Research*, 28(2):197–213 (in Chinese with English abstract).
- Li Haibing, Valli F, Liu Dunyi, Xu Zhiqin, Yang Jingsui, Arnaud N, Tapponnier P, Lacassin R, Chen Songyong, Qi Xuexiang. 2007. The formation age of Karakoram fault: The age restriction of the zircon SHRIMP U–Pb[J]. *Chinese Science Bulletin*, 52(4): 438–447 (in Chinese).
- Li Wenqiao, Chen Jie, Yuan Zhaode, Huang Mingda, Li Tao, Yu Song, Yang Xiaodong. 2011. Coseismic surface ruptures of multi segments and Seismogenic fault of the Tashkorgan earthquake in Pamir, 1895[J]. *Seismology and Geology*, 33(2):260–276 (in Chinese with English abstract).
- Liang Yongdon, Liu Yanhua, Fan Shaoyun, Wang Zhichen, Cheng Jianwen. 2010. Application of EH–4 electromagnetic sounding to the survey of fault structure in uranium district[J]. *Uranium Geology*, 26(3):166–171.
- Liu Dongliang, Li Haibing, Pan Jiawei, Chevalier Marie–Luce, Pei Junling, Sun Zhiming, Si Jialiang, Xu Wei. 2011. Morphotectonic study from the northeastern margin of the Pamir to the West Kunlun range and its tectonic implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, (11):3499–3512 (in Chinese with English abstract).
- Luo Zhaohua, Mo Xuanxue, Ke Shan. 2003. Ages of Taxkorgan alkaline intrusive complex and their geological implications[J]. *Geology of Xinjiang*, 21(1):46–50 (in Chinese with English abstract).
- Owen L A, Chen Jie, Hedrick K A, Caffee M W, Robinson A C, Schoenbohm L M, Yuan Zhaode, Li Wenqiao, Imrecke D B, Liu Jinfeng. 2012. Quaternary glaciation of the Tashkur–gan Valley, Southeast Pamir[J]. *Quaternary Science Reviews*, 47: 56–72.
- Pang Zhonghe, Yang Fengtian, Yuan Lijuan, Li Yiman. 2011. Geothermal display and predication of the thermal storage temperature in Taxian basin, Xinjiang[J]. *Geological Review*, 57(1): 86–88 (in Chinese with English abstract).
- Robinson A C, Yin An, Manning C E, Harrison T M, Zhang Shuanhong, Wang Xiaofeng. 2004. Tectonic evolution of the northeastern Pamir: Constraints from the northern portion of the Cenozoic Kongur Shan extensional system, western China [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 116(7): 953–974.
- Robinson A C, Yin An, Manning C E, T Mark Harrison, Zhang Shuanhong, Wang Xiaofeng. 2007. Cenozoic evolution of the eastern Pamir: Implications for strain–accommodation mechanisms at the western end of the Himalayan–Tibetan orogeny [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 119(7): 882–896.
- Robinson A C, 2009. Geologic offsets across the northern Karakoram fault: im–plications for its role and terrane correlations in the western Himalayan–Tibetan orogeny [J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 279:123–130.
- Shi Yafeng, Ge Yu, Liu Xiaodong, Li Bingyuan, Yao Tandong. 2001. Reconstruction of the 30–40 ka bp, enhanced Indian monsoon climate based on geological records from the Tibetan Plateau[J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 169(1/2): 69–83.

- Sobel E R, Chen Jie, Schoenbohm L M, Thiede R, Stockli D F, Sudo M, Strecker M R. 2013. Oceanic– style subduction controls late Cenozoic deformation of the Northern Pamir orogeny[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 363: 204–21.
- Stuiver M, Reimer P J, Reimer R. CALIB 5.0.2 [WWW program and documentation][J]. 2005.
- Henan Geological Survey. 2004. Tashikuergan1:250,000 Regional Geological Mapping and Report, 1–327.
- Tiwari V, Rajasekhar R and Mishra D. 2009. Gravity anomaly, lithospheric structure and seismicity of Wertern Himalayan Syntaxis[J]. *Journal of Seismology*, 13(3): 363–370.
- Thiede R C, Ehlers T A. 2013. Large spatial and temporal variations in Himalayan denudation[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 371–372: 278–293.
- Thomas J C, Chauvin A, Gapais D, M L Bazhenov, H Perroud, P R Cobbold, V S Burtman. 1994. Paleomagnetic evidence for Cenozoic block rotations in the Tadjik depression (Central Asia) [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 99(B8): 15141–15160.
- Wang Jiyang. 1996. Low– medium temperature geothermal system of convective type[J]. *Earth Science Frontiers*, (3):96– 100 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yongjin, Cheng Hai, Edwards R L, Kong Xinggong, Shao Xiaohua, Chen Shitao, Wu Jiangyin, Jiang Xiouyang, Wang Xianfeng, An Zhisheng. 2008. Millennial– and orbital– scale changes in the East Asian monsoon over the past 224,000 years[J]. *Nature*, 451(7182): 1090–1093.
- White D E, 1986. Subsurface waters of different origins. Extended Abstracts of Fifth International Symposium on Water– Rock Interaction[J]. National Energy Authority of Iceland, Reykjavik, 629–632.
- Yang Shaomin, Li Jie, Wang Qi. 2008. The deformation pattern and fault rate in the Tianshan Mountains inferred from GPS observation [J]. *Science in China(Ser.D)*, 51: 1064–1080.
- Yang Xiaoping, Preusser F, Radtke U. 2006. Late Quaternary environmental changes in the Taklamakan Desert, western China, inferred from OSL– dated lacustrine and eolian deposits[J]. *Quaternary Science Reviews* 25, 923–932.
- Yang Xiaoping, Scuderi L. 2010. Hydrological and climatic changes in deserts of China since the Late Pleistocene[J]. *Quaternary Research* 73, 1–9.
- Yang Xiaoping, Scuderi L, Paillou P, Liu Ziting, Li Hongwei, Ren Xiaozong. 2011. Quaternary environmental changes in the drylands of China – A critical review[J]. *Quaternary Science Reviews*, 30, 3219–3233.
- Zhang Senqi, Li Changhui, Sun Wangyong, Xu Weilin, Xin Yuanhong, Shi Weidong, Wang Zhanchang, Fan Yonggui. 2008. Construction of the conceptual model of thermal reservoir structure of the Xining basin, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 27(1):126–136(in Chinese with English abstract).
- Zubovich A, Wang Xiaoqiang, Scherba Y G, Schelochkov G G, Reilinger R, Reigber C, Mosienko O, Molnar P, Michajljow W, Makarov V, Li Jie, Kuzikov S, Herring T A, Hamburger M W, Hager B H, Dang Yamin, Bragin V D, Beisenbaev R T. 2010. GPS velocity field for the Tien Shan and surrounding regions[J]. *Tectonics*, 29: TC6014. doi: 10.1029/2010TC002772.

附中文参考文献

- 陈杰, 李涛, 孙建宝, 房立华, 姚远, 李跃华, 王浩然, 付博. 2016. 2016年11月25日新疆阿克陶M_w 6.6地震发震构造与地表破裂[J]. *地震地质*, 38(4): 1160–1174.
- 陈杰, 李涛, 李文巧, 袁兆德. 2011. 帕米尔构造结及邻区的晚新生代构造与现今变形[J]. *地震地质*, 2011, 33(2):241–259.
- 董晨, 张吉振. 2008. EH4大地电磁技术的适用及应用效果[J]. *铁道建路技术*, (增刊): 529–543.
- 李富, 李华, 杨剑. EH4电导率成像系统在西南地区地质调查中的应用[J]. *金属矿山*, 2012, 41(7):112–116.
- 李海兵, Valli F, 刘敦一, 许志琴, 杨经绥, Arnaud N, Tapponnier P, Lacassin R, 陈松永, 戚学祥. 2007. 喀喇昆仑断裂的形成时代: 锆石 SHRIMP U–Pb 年龄的制约[J]. *科学通报*, 52(4):1089–1100.
- 李海兵, J Van der Woerd, 孙知明, A S Meriaux P, Tapponnier F J, Ryerson, 司家亮, 潘家伟. 2008. 阿尔金断裂带康西瓦段晚第四纪以来的左旋滑移速率及其大地震复发周期的探讨[J]. *第四纪研究*, 28(2):197–213.
- 李文巧, 陈杰, 袁兆德, 黄明达, 李涛, 余松, 杨晓东. 2011. 帕米尔高原1895年塔什库尔干地震地表多段同震破裂与发震构造[J]. *地震地质*, 33(2):260–276.
- 梁永东, 刘艳华, 范少云, 王志成, 成剑文. 2010. EH—4电磁测深法在铀矿区断裂构造勘查中的应用[J]. *铀矿地质*, 26(3): 166–171.
- 刘栋梁, 李海兵, 潘家伟, CHEVALIER Marie–Luce, 裴军令, 孙知明, 司家亮, 许伟. 2011. 帕米尔东北缘–西昆仑的构造地貌及其构造意义[J]. *岩石学报*, (11):3499–3512.
- 罗照华, 莫宣学, 柯珊. 2003. 塔什库尔干碱性杂岩体形成时代及其地质意义[J]. *新疆地质*, 21(1): 46–50.
- 金旺林, 李士祥. 2012. 用EH4寻找铝土矿的效果研究[J]. *矿产勘查*, 2012, 03(1):82–85.
- 柯珊, 罗照华, 莫宣学, 张文会, 梁涛, 詹华明. 2008. 帕米尔构造结塔什库尔干碱性杂岩同位素年代学研究[J]. *岩石学报*, 2008, 24(2): 315–324.
- 庞忠和, 杨峰田, 袁利娟, 李义曼. 2011. 新疆塔县盆地地热显示与热储温度预测[J]. *地质论评*, 57(1):86–88.
- 塔什库尔干地区1:25万区域地质图及报告, 2004. 河南地质调查局, 1–327.
- 汪集咏. 1996. 中低温对流型地热系统[J]. *地学前缘*, (3): 96–100.
- 张森琦, 李长辉, 孙王勇, 许伟林, 辛元红, 石维栋, 王占昌, 范永贵. 2008. 西宁盆地热储构造概念模型的建立[J]. *地质通报*, 27(1): 126–136.