西藏羊八井地热田水热蚀变的 时空演化特征



Vol. 68 No. 1

Jan . . 2022

geojournals.cn/georev

胡志华^{1,2)},高洪雷^{1,2)},万汉平^{1,2)},张松^{1,2)},郝伟林^{1,2)},吴儒杰^{1,2)} 1)核工业北京地质研究院,北京,100029; 2)中核集团地热勘查技术研究中心,北京,100029

内容提要:西藏亚东—谷露裂谷中—北段的羊八井地热田是我国著名的高温地热田,研究其水热蚀变的时空演 化有助于更好地认识藏南地热的发育特征。通过对羊八井地热田及其水热蚀变岩开展地表调查、显微特征与 X 衍 射分析等工作,总结了其主要蚀变类型特征,划分出黄褐色蚀变中心带、灰白色中强蚀变带、灰白色中等蚀变带和浅 灰白色弱蚀变带 4 个不同的水热蚀变带,并区分出红褐色—黄褐色蚀变期、灰白色蚀变期和淡黄色—灰色蚀变期共 3 期蚀变。研究结果揭示,羊八井地热田高温地热活动中心—直在北区硫磺沟区域,其水热蚀变活动主要受亚东— 谷露裂谷内部的活动断裂构造控制,并与断裂构造活动具同步性;地热水的排泄方式早期为沿北东向断裂构造直接 排泄,晚期为经浅层第四系径流后再排泄,由直接排泄向间接排泄转变;中高温地热水的排泄区由北区硫磺沟地区 向南区藏布曲迁移。根据研究结果推断,硫磺沟区域的北东向断裂与北西向断裂交汇区可作为羊八井热田北区深 部地热勘查的主要方向。

关键词:羊八井地热田;水热蚀变;蚀变分带;活动断裂;亚东--谷露裂谷

西藏地区是我国高温地热活动的主要集中分布 区,其高温地热资源占我国高温地热资源的80% (孙红丽等,2015)。西藏地热活动严格受近南北向 裂谷的边界断裂控制(韩同林等,1990; Wang Xiao et al.,2018; Su Jinbao et al.,2020)。西藏羊八井地热 田是我国著名的高温地热田(廖志杰和赵平,1999; 多吉.2003).处于藏南近南北向的亚东—谷露裂谷 中北段(吴中海等,2006),其地热活动受羊八井盆 地的边界断裂控制(吴中海等,2006)。前人对羊八 井地热田开展了深入的研究,在地热地质、构造特 征、水文地球化学特征、热储模型、资源评价、水热蚀 变等方面取得了丰硕的成果(多吉等^{●❷❸};穆铎, 1980;康文华等,1985;朱梅湘和徐勇,1989;郑灼华, 1983;杨期隆和辛奎德,1991;杨期隆,1994;多吉, 2003: 孟宪刚等, 2006; Guo Qinghai et al., 2007; 吕苑 苑等,2012;Yuan Jianfei et al.,2014),其中水热蚀变 特征在上述各方面研究中都有涉及,但对羊八井地 热田水热蚀变的活动期次和空间演化特征研究较薄 弱。水热蚀变是地热田水热活动的遗迹,也受到断 裂构造的控制,其空间分布和分带特征是控热构造、 热水排泄区和热储空间分布的表现,其时空演化特 征是控热断裂构造活动的结果。羊八井地热田的水 热蚀变规模大、类型多,水热蚀变具有明显的分带性 (朱梅湘等,1989),是中高温地热田水热蚀变研究 的典型代表。同时,羊八井地热田处于藏南亚东--谷露裂谷中---北段(吴中海等,2006),是藏南高温 地热活动的典型实例。羊八井地热田水热蚀变时空 演化特征如何?水热蚀变的时空演化与活动断裂构 造的关系如何?依据水热蚀变时空演化特征,其深 部热储的勘查方向在哪?本文在前人研究成果的基 础上,通过对羊八井地热田开展地表地质调查、显微 镜观察、X 射线衍射分析等工作,对羊八井地热田水 热蚀变的分带特征、空间分布和期次进行研究,旨在 阐明地热田水热蚀变的时空演化特征,阐明水热蚀 变与控热构造关系,指出深部热储的勘查方向。

1 地质背景

注:本文为中核集团集中研发项目"地热勘查开发利用关键技术研究[编号:中核科发(2019)419号]的成果。

收稿日期:2021-07-27;改回日期:2021-12-08;网络首发:2021-12-20;责任编辑:章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2021.12.105

作者简介:胡志华,男,1986年生,高级工程师,主要从事地热资源勘查与研究、铀矿地质研究工作;邮箱:huzhihua2005@126.com。

1.1 大地构造背景

羊八井地热田位于西藏自治区拉萨市当雄县羊 八井镇,是地中海—喜马拉雅地热带中的大陆非火 山型高温热田之一(多吉,2003)。热田位于青藏高 原念青唐古拉山东南麓的羊八井断陷盆地内(杨期 隆和辛奎德,1991),同时也处于近南北向展布的亚 东—谷露裂谷系的中—北部(吴中海等,2006)(图 1)。亚东—谷露裂陷是新生代时期青藏高原岩石 圈伸展拉张作用形成的规模最大、延伸最长的裂陷 (廖志杰和赵平,1999;Liu Qisheng et al.,2004),也 是高温地热活动强烈的地段。沿裂谷分布有系列地 热田,羊八井地热田即是其中的典型热田之一。

1.2 区域活动断裂带特征

念青唐古拉东南麓活动断裂带控制了当雄—羊 八井断陷盆地的形成演化(孟宪刚等,2006),控制 了包括羊八井地热田在内的地热活动和空间展布 (吴中海等,2006;李明礼,2018)。

念青唐古拉山东南麓断裂带由低角度韧性剪切 带和高角度活动断层构成(吴章明等,1990;吴章 明,1992)。低角度韧性剪切带为在念青唐古拉花 岗岩岩体东部发育的糜棱岩带,宽1000~4500 m,呈 北东走向,倾向东南,倾角 24°~30°,为当雄—羊八 井地堑的伸展滑脱型低角度韧性剪切带,其开始发 生伸展韧性剪切变形时代为 8.29±0.21 Ma(吴珍汉 等,2004,2005),主变形时代为 8~5 Ma(Harrison et al.,1995)。

在1.5~2.0 Ma 期间,北东向高角度正断层活 动并切割了早期北东向低角度韧性剪切带,阶梯状 分布的 F₁, F₂, F₃ 三条次级断裂是断裂带从山前向 盆地逐渐迁移过程中逐渐形成的(吴中海等, 2006)。念青唐古拉山南东麓高角度活动断层是正 断层和走滑断裂组合而成的张扭性变形带(吴中海 等,2006),早期具左旋压扭性质,现今为张剪性质, 其性质转变时代为早更新世或早更新世晚期(吴章 明等,1990)。该断层主要发育于第四纪冰积物中, 局部断层切割基岩,冰积物最老年代为中更新世 (吴中海等,2006)。自晚第四纪以来断裂带曾多次 活动,达6~7次之多(吴章明等,1990)。中更新世 以来北东向断裂带向盆地方向迁移,在700~500ka BP、350~220 ka BP、140 ka BP 和 70~50 ka BP 发 生重要的活动(吴中海等,2006)。在中晚更新世(0 ~1.4 Ma),北西向断层发生活动,大部分为右旋走 滑断裂,切割北东向断裂(吴珍汉等,2002)。

1.3 羊八井地热田地质特征

羊八井地热田位于羊八井盆地中北部。羊八井 盆地是 8±3 Ma 以来区域发生 EW 向伸展变形的产 物(Harrison et al., 1995; Pan and Kidd, 1992; 吴中海 等, 2006)。盆地中堆积的地层主要为中更新统冰



图 1 西藏活动构造系与地热分布图(杜少平等♥)

Fig. 1 Active tectonic system and geothermal distribution in Xizang(Tibet) (Du Shaoping et al. •)

碛层、上更新统冰碛层、全新统洪积层、冲积层和沼 泽堆积,以及上更新统硅化砾岩。其中中更新世以 来的冲洪积砾石层和冰川与冰水沉积物大面积出露 (吴中海等,2006)。基底由喜马拉雅早期花岗岩、 部分凝灰岩、念青唐古拉变质杂岩体和喜马拉雅晚 期花岗岩构造(多吉,2003)。

热田地势上具有北西高、南东低的特征,海拔位 于 4290~4500 m(廖志杰等,1999)。地热田以中尼 公路为界分为北区和南区(图 2)。热田内断裂构造 发育,主要为北东向、北西向断裂,局部近南北向断 裂。NE 向断裂构造为念青唐古拉山东南断裂带的 次级断裂,由山前至盆地呈阶梯状排列(多吉, 2003),错断中更新统冰碛层,断裂倾向东南,以正 断层为主,属张性活动断层(多吉,2003)。NW 向断 裂为左旋错断 NE 向断裂,其形成时代晚于 NE 向断 裂,臭沟断裂倾向南西,其余 NW 向断裂倾向北东, 为正断层,属张性活动断层(多吉,2003)。近 SN 向 断裂为次级张性裂隙带,以倾向东为主。

羊八井地热田热储主要有浅层热储和深层热储 (多吉,2003)。浅层热储为第四系层状孔隙型热 储,主要分布于南区,岩性为第四系冲洪积砂砾石 层、冰碛层、岩基顶部花岗岩风化壳(多吉,2003)。 深部热储为带状裂隙型热储,主要位于北区,岩性为 糜棱岩化花岗岩、花岗质糜棱岩和碎裂花岗岩(多 吉,2003;赵平等,2003)。

羊八井盆地的边界断裂在第四纪期间的活动非 常强烈,是高原内部一条强烈的地震活动带,并控制 着盆地中的地热活动(吴中海等,2006)。裂谷带地 热的热源具有地壳部分熔融体来源(Guo Qinghai et al.,2007;Yuan Jianfei et al.,2014;Wang Xiao et al., 2018)。

羊八井地热田地热活动具有多阶 段性,与区域地热活动一致。藏南地 热活动具有多阶段性,地热泉华年龄 范围为690~4 ka 与现代(郑绵平等, 1995;侯增谦等,2001;吴珍汉等, 2005;赵元艺等,2006a,2006b),主要 集中于500~470 ka,400~350 ka,270 ~200 ka 和150 ka 以来(李振清, 2014)。羊八井地热田的泉华年龄为 266±33 ka BP(侯增谦等,2001;李振 清,2002),155.58 ka BP,与区域地热 活动时间一致,存在多阶段性。

2 水热蚀变类型

羊八井地热田水热蚀变类型多,

主要有硅化、明矾石化、绿泥石化、碳酸盐化、黄铁矿 化、绿帘石化、自然硫以及黏土化(高岭石、伊利石、 蒙脱石、伊利石/蒙脱石混层、绿泥石)等(多吉 等^{● ● ●};多吉,2003;吕苑苑等,2012),并发育了与 之相关的、以沉淀胶结形式存在的硅华、钙华、硅质 和钙质胶结物等类型沉积物。其中不同类型的水热 蚀变特征如下:

硅化:指硅华和起胶结作用的硅质成分,主要由 蛋白石、玉髓、石英等矿物组成,以脉状、薄膜状、壳 层状充填在裂隙、空洞中,与来自热储富 SiO,成分 的热液有关(多吉等^{● ❷ ❸})。在北区 ZK4002 的高温 层段岩芯中普遍见硅质充填物沿裂隙面呈脉状产 出:地表第四系冰碛砂砾石层被热水中硅质充填或 交代而形成坚硬的岩层(多吉等[●])(图 3a),表现为 正地形。在钻孔中常以石英脉的形式出现。显微镜 下观察显示,微晶石英胶结原生石英颗粒、胶结岩屑 (图 3b),沿原生石英颗粒生长形成次生石英边(图 3c),也见呈微晶石英脉充填裂隙中。在南区,硅化 主要是热水中硅质交代、充填冰水沉积砂砾层而成, 以蛋白石为主、少量玉髓(康文华等,1985)。上述 特征表明,硅化是富硅地热水中的硅质交代围岩、析 出沉淀的结果,而不是酸性地热蒸汽作用下岩石中 的石英、硅残留所形成(后期存在酸性地热蒸汽与 硅化岩石反应),这就意味着硅化带是地热水从深 部排泄至地表的过程中所形成的,指示硅化带是地 热水的排泄区。这也就解释了硅化往往发育于水热 蚀变中心带,凡是硅化程度较高的层位或硅化带都 是高温热储层位或水热活动强烈地段(郑灼华,

表1 羊八井北区蚀变带 X 射线衍射矿物分析结果

Table 1 X-ray diffraction mineral analysis results of alteration zone

in the north of Yangbajing Geothermal Field

样号	岩性	主要矿物相
Y20-9	浅黄褐色强蚀变岩石	石英、钾长石、明矾石
Y20-15-1	灰黑色暗红色硅化赤铁矿化岩石	石英、黄铁矿、明矾石、黏土矿物
Y20-15-2	浅红色硅化赤铁矿化硅化岩石	石英、黄铁矿、明矾石、黏土矿物
Y20-15-3	弱浅红色硅化赤铁矿化岩石	石英、明矾石
Y20-15-4	灰白色强硅化高岭土化岩石	石英、明矾石
Y20-18-2	灰白色强硅化高岭土化岩石	石英、明矾石、黏土矿物
Y20-15-5	黄绿色—灰白色硅化岩石	石英、自然硫
Y20-23	淡黄色硫磺蚀变冰碛岩,原岩花	石革 白然菇
	岗岩角砾	17天、日 25 90



图 2 羊八井地热田地质简图 Fig. 2 Geological sketch of Yangbajing Geothermal Field



图 3 羊八井地热田主要蚀变类型特征:(a) 脉状硅化带(赏木沟西部,镜头向北东);(b) 微晶石英胶结大颗粒原生石英(Y20-15-1 正交偏光);(c)沿原生石英生长的次生石英边(Y20-4-2 背散射图);(d)叶片状绢云母与黏土共生(Y20-4-2); (e)钾长石强烈高岭土化(Y20-19-1);(f)中强黄铁矿化,自形五角十二面体(Y20-15-1);(g)半自形-自形黄铁矿集合体(Y20-15-2);(h)黑云母绿泥石化白云母化(Y20-7);(i)黑云母中强绿泥石化(Y20-7)

Fig. 3 Characteristics of main alteration types in Yangbajing Geothermal Field: (a) vein silicification zone (west of Shangmugou, lens to NE); (b) microcrystalline quartz cemented large particle primary quartz (Y20-15-1, orthogonal polarization); (c) secondary quartz edge growing along primary quartz (Y20-4-2, backscatter diagram); (d) leaf sericite coexists with clay (Y20-4-2); (e) potassium feldspar is strongly kaolinized (Y20-19-1); (f) medium strong pyritization, euhedral pentagonal dodecahedron (Y20-15-1); (g) subhedral euhedral pyrite aggregate (Y20-15-2); (h) biotite chloritization muscovitization (Y20-7); (i) biotite medium strong chloritization (Y20-7)

Q1—原生石英,Q2—次生石英,Q石英,Kln—高岭石化;Kfs—钾长石;Py—黄铁矿;Dol—白云母;Chl—绿泥石 Q1— primary quartz,Q2— secondary quartz,Q—quartz,Kln—Kaolinite;Kfs—potassium feldspar;Py— pyrite; Dol— muscovite;Chl— chlorite

1983;多吉等)。

明矾石化:主要见于羊八井北区臭沟、硫磺沟、 热沟等地,多呈浅紫色,常与硅化伴生,集中分布于 断裂附近和不同方向的裂隙面。北区蚀变岩石 X 射线衍射全岩分析结果显示,明矾石化在蚀变带中 较普遍发育(表1),主要分布于蚀变中心带和强蚀 变带中,常伴生有硅化、黄铁矿化和黏土化等。 黏土化:羊八井北区黏土化十分发育,分布面积 可达8 km² 以上,钻孔资料显示厚度可达700 m 以 上(多吉等^{●●})。黏土化蚀变往往沿断裂带成片、 成带分布。冰碛层中花岗岩砾石强烈蚀变,新生成 大量黏土矿物。显微镜观察(图3d、e)显示,原生矿 物钾长石强烈黏土化,黏土矿物与绢云母共生,黏土 充填于石英裂隙中。X 射线衍射黏土矿物分析显 示,黏土矿物主要为高岭石、伊利石,局部发育绿泥石、蒙脱石和伊利石/蒙脱石混层矿物(表2)。

黄铁矿化:在羊八井北区地表及钻孔中发育,黄 铁矿呈分散状和团块状、脉状集合体,主要为半自 形—自形晶,自形晶主要为五角十二面体(图 3f、 g)。

绿泥石化:主要见于地表及钻孔中,呈淡绿色及 暗绿色,钻孔岩芯中常呈细脉状产于岩石裂隙中。 羊八井地表蚀变样品显微镜观察显示,黑云母发生 较强的绿泥石化(图 3h、i)。

自然硫:自然硫为深部含硫气体上升至浅地表 分解而形成,长期的积累致使在硫磺沟地区形成了 硫磺矿,呈淡黄色,与硅化共(伴)生。在现代冒汽 孔附近一般都发育自然硫(表1),常见白色文石、盐 华。

3 水热蚀变分布特征

3.1 水热蚀变总体分布特征

羊八井地热田南、北区水热蚀变存在较大差异, 以北区最为发育,在南区主要为硅质、钙质胶结和硅 华、钙华(图4)。北区水热蚀变东起卢子曲,西止赏 木沟,海拔在4350~4600 m之间,蚀变区面积8 km²,地貌上呈正地形。蚀变地层主要为Q_{p2}冰碛层 (图6a、b、d、e、f),且出露于海拔较高部位,Q₃地层 未见蚀变,少量Q₄地层有水热蚀变(图6c)。南区 水热蚀变分布于强玛果、地热蔬菜大棚至雪尕果东 南范围内,海拔4300 m左右,局部硅质泉胶砂岩呈 丘状,发育的地层主要为全新统(Q4)洪积层、冲积

层和沼泽堆积(图2), 在钻孔中揭露到中更新 统硅质泉胶砾岩(郑灼 华,1983)。

北区水热蚀变主要 沿 NE、NW 及 SN 向断 裂构造展布,水热蚀变 呈北东、北西或近南北 向带状分布,受断裂构 造控制,尤以两组断裂 的交汇处为甚(康文华 等,1985)。硅化一般 分布在断裂带的中心部 位,自然硫和硫酸盐类 矿物分布在裂隙壁上及 其附近,向两侧过渡为 以黏土化为主的蚀变。南区由于断裂构造被隐伏, 其水热蚀变呈分散状,但总体具有呈 NE 向带状分 布的趋势,单个硅质泉胶砂砾岩呈陇状。

北区水热蚀变以交代、充填作用为主,主要蚀变 类型为硅化(华)、明矾石化、绿泥石化、碳酸盐化、 黄铁矿化、绿帘石化、自然硫和黏土化(高岭石、伊 利石、蒙脱石、伊利石/蒙脱石混层矿物)等;南区水 热蚀变以沉淀、胶结为主,主要蚀变类型为硅华、硅 质泉胶、钙质泉胶、钙华。从北区往南区,蚀变类型 由硅化(华)、高岭土化向硅质泉胶、钙质泉胶、钙华 蚀变演变(图4),在成分上具有硅质降低、钙质增高 的趋势(朱梅湘和徐勇,1989)。

3.2 水热蚀变的分带特征

3.2.1 水热蚀变分带

羊八井北区水热蚀变非常发育,水热蚀变分布 具有较好的分带性。由蚀变中心向围岩,将北区水 热蚀变带划分为:黄褐色蚀变中心带、灰白色中强蚀 变带、灰白色中等蚀变带、浅灰白色弱蚀变带和围 岩。

海龙沟构造蚀变带具有良好的蚀变分带(图 5),该蚀变带主要受北东向断裂控制。由蚀变中心 带向两侧可划分出 5 个蚀变带:蚀变中心带、灰白 色—浅黄褐色强蚀变带(灰白色强高岭土化带、中 强高岭土化带)、灰白色中等蚀变带、灰白色弱蚀变 带和正常围岩等 5 个带,宽达 300 m 左右。

3.2.2 蚀变带矿物组合

经显微镜观察、X 射线衍射全岩分析和黏土分析结果(表 2、表 3),以水热蚀变主要新生矿物为蚀

表 2 羊八井地热田蚀变岩石的黏土 X 射线衍射分析结果

 Table 2 Analysis results of clay X-ray diffraction of altered rocks

in rangoajing Geothermarriet

	岩性	蚀变分带	检测结果(%)					混层比 (%蒙脱石)	
样品号			蒙脱石	脱石混层	伊利石	高岭石	绿泥石	脱石混层	
Y20-4-1	黄褐色强褐铁矿化硅化冰碛岩	中心带	/	/	22	78	/	/	
Y20-8-1	灰色黄铁矿化硅化冰碛岩	中心带	/	/	60	31	9	/	
Y20-4-2	灰白色强硅化高岭土化冰碛岩	强蚀变带	/	/	9	91	/	/	
Y20-4-3	灰白色强高岭土化硅化冰碛岩	强蚀变带	/	/	15	85	/	/	
Y20-6	灰白色强硅化高岭土化冰碛岩	强蚀变带	/	/	35	65	/	/	
Y20-7	灰白色强硅化高岭土化冰碛岩	强蚀变带	/	/	18	82	/	/	
Y20-8-2	灰白色强硅化高岭土化冰碛岩	强蚀变带	/	/	25	75	/	/	
Y20-10	灰白色中等高岭土化冰碛岩	中等蚀变带	81	/	15	2	2	/	

变带矿物组合,总结羊八井北区水热蚀变带矿物组 合如下:

黄褐色蚀变中心带:黄铁矿、明矾石、微晶或粗

粒石英、高岭石、伊利石;

灰白色—浅黄褐色强蚀变带:明矾石、微晶或粗 粒石英、高岭石、伊利石;



图 4 羊八井地热田水热蚀变分布图

Fig. 4 Distribution of hydrothermal alteration in Yangbajing Geothermal Field

表 3 羊八井地热田蚀变岩石 X 射线衍射全岩分析结果(%)

Table 3 X-ray diffraction whole rock analysis results of altered rocks in Yangbajing Geothermal Field

	岩性	蚀变分带	矿物含量(%)							
样号			石英	钾长石	斜长石	自云石	针铁矿	黄铁矿	黏土矿物	
Y20-9	浅黄褐色强蚀变冰碛岩	中心带	主要物相:石英、钾长石、明矾石							
Y20-4-1	黄褐色强褐铁矿化硅化冰碛岩	中心带	47.2	/	/	/	29.7	/	23.1	
Y20-8-1	灰色黄铁矿化硅化冰碛岩	中心带	69.0	2.6	/	/	/	8.1	20.3	
Y20-4-2	灰白色强硅化高岭土化冰碛岩	强蚀变带	73.2	/	/	/	1	/	26.8	
Y20-4-3	灰白色强高岭土化硅化冰碛岩	强蚀变带	65.4	/	/	/	/	/	34.6	
Y20-6	灰白色强硅化高岭土化冰碛岩	强蚀变带	72.9	/	/	/	/	/	27.1	
Y20-7	灰白色强硅化高岭土化冰碛岩	强蚀变带	52.4	21.8	/	/	/	/	25.8	
Y20-8-2	灰白色强硅化高岭土化冰碛岩	强蚀变带	63.3	5.2	/	0.8	1	/	30.7	
Y20-10	灰白色中等高岭土化冰碛岩	中等蚀变带	44.2	21.2	15	/	1	/	19.6	
Y20-11	灰白色—紫红色弱高岭土化冰碛岩	弱蚀变带	52.3	21.3	/	/	/	/	26.4	

灰白色中等蚀变带:蒙脱石、伊利石、高岭石、绿 泥石;

浅灰白色弱蚀变带:高岭石。

蚀变中心带中原岩矿物只残留石英,其他矿物 几乎全蚀变成高岭石、伊利石等黏土矿物;强蚀变带 残余石英、钾长石,大部分其他矿物蚀变成高岭石、 伊利石,局部见白云石;中等蚀变带、弱蚀变带残余 石英、钾长石、斜长石,黏土矿物含量也降低,以蒙脱 石、伊利石为主,少量高岭石、绿泥石。

4 水热蚀变期次

依据水热蚀变在各时期地层中的分布特征、沿 各时期断裂的展布特征和不同时期水热蚀变的空间 叠加关系,羊八井地热田北区水热蚀变总体可划分 为三个期次:①红褐色—黄褐色蚀变期,蚀变矿物主 要为:褐铁矿、赤铁矿、微晶或粗粒石英、高岭石、明 矾石;②灰白色蚀变期,蚀变矿物主要为:高岭石、明 矾石;②灰白色蚀变期,蚀变矿物主要为:高岭石、侧 矾石;②灰白色蚀变期,蚀变矿物主要为:高岭石、侧 (钙)质微脉(或薄膜)、灰白色高岭石、白色盐华。 与多吉等(1997)划分的中更新世、晚更新世和全新 世三期水热蚀变相对应。

4.1 水热蚀变在各时期地层中的分布特征

羊八井地热田水热蚀变主要分布于中更新统冰 碛层、全新统冲洪积层,而上更新统冰碛层水热蚀变 不发育。中更新统发育的水热蚀变主要是以黄褐色 硅化为主的蚀变和以灰白色黏土化为主的蚀变(图 6),以及现代正活动的淡黄色—灰色蚀变。在全新 统冲洪积层中,北区局部地区见到发育灰白色黏土 化蚀变,未见到以黄褐色硅化为主的蚀变;南区为硅 质、钙质泉胶砂岩和硅华、钙华,以及北区现代正活 动的淡黄色—灰色蚀变。中更新统中以黄褐色硅化 为主的蚀变是最早的水热蚀变,全新统的灰白色黏 土化蚀变和淡黄色—灰色蚀变为晚期蚀变。

4.2 水热蚀变沿各时期断裂的分布特征

在北区水热蚀变沿断裂构造分布的特征明显。 北东向断裂发育以黄褐色硅化为主的蚀变带,呈凸 起正地形(图 5),硅质交代、胶结断裂破碎带呈脉 状,在地表呈蘑菇状向断裂两侧交代、胶结中更新统 冰碛层。NW向断裂主要发育以灰白色黏土化为主 的水热蚀变,且水热蚀变发育于北东向断裂带的一 定距离内,并不是沿 NW 向断裂都发育黏土化蚀变 带。近 NS 向断裂主要发育现代淡黄色—灰色蚀 变,常叠加于黄褐色蚀变带上。由于 NW 向断裂晚 于 NE 向断裂,指示以黄褐色硅化为主的蚀变早于 以灰白色黏土化为主的蚀变,淡黄色—灰色蚀变为 现代正活动、最新的水热蚀变。

4.3 水热蚀变空间叠加关系

羊八井地热田的水热蚀变具有叠加现象,显示 具有三期水热蚀变。

在海龙沟山头上,灰白色强高岭土化硅化蚀变 叠加于早期黄褐色褐铁矿化硅化高岭土化蚀变带上 (图 6a),在灰白色强高岭土化硅化蚀变带中见残余 的早期脉状黄褐色褐铁矿(黄铁矿)强硅化花岗岩 (图 6b)。在硫磺沟中,第四系坡积沙土层与强高岭 土化中更新世冰碛岩界线清晰截然,指示高岭土化 早于第四系坡积沙土沉积层;在热沟中见到第四系 坡积沙土层中发育火焰状灰白色高岭土化,指示高



图 5 羊八井地热田海龙沟蚀变分带图(图 2 中的 A—B 剖面) Fig. 5 Alteration zoning map of Hailonggou in Yangbajing Geothermal Field



图 6 羊八井地热田蚀变期次划分:(a)灰白色高岭土化硅化蚀变叠加于早期黄褐色褐铁矿化硅化高岭土化带之上;(b) 灰白色高岭土化硅化叠加于早期黄褐色赤铁矿硅化高岭土化之上;(c)第四系坡积沙土层中发育最新期火焰状灰白色高 岭土化;(d)现代地热气泉,发育淡黄色硫磺、白色束状文石、灰白色高岭土化、硅化、盐华;(e)现代灰色蚀变叠加于早期 黄铁矿硅化带上;(f)早期黄铁矿硅化带裂隙中发育冒汽孔和灰色蚀变

Fig. 6 Division of alteration periods in Yangbajing Geothermal Field: (a) gray white kaolinization silicification alteration superimposed on the early yellowish brown ferritization silicified kaolinization zone; (b) gray white kaolinization silicification superimposed on early yellowish brown hematite silicification; (c) the latest flame gray white kaolinization is developed in the Quaternary deluvial sandy soil layer; (d) modern geothermal gas springs develop light yellow sulfur, white tufted aragonite, gray white kaolinization, silicification and salt bloom; (e) modern gray alteration superimposed on the early pyrite silicification zone; (f) steam holes and gray alteration are developed in the fissures of early pyrite silicified zone

岭土化晚于第四系坡积沙土层,应为现代地热活动 显示(图 6c);在臭沟口东侧见灰白色高岭土化硅化 蚀变带上叠加现代地热活动,发育淡黄色硫磺、白色 束状文石、灰白色高岭土化、硅化,见白色盐华,有 H₂S 气味(图 6d)。上述现象指示存在一期以灰白 色高岭土化为主的蚀变,晚于黄褐色硅化蚀变,早于

正活动的淡黄色—灰色蚀变。

在热沟北东侧(图 6e),在浅黄褐色强硅化带上 叠加后期淡黄色硫磺、灰色蚀变。硅化带总体走向 北东向,由多条产状 105°∠59°的硅化带斜列构造, 淡黄色、灰色蚀变带产状 75°∠30°、65°∠55°,灰色 蚀变带宽 1~1.5 m,近等间距分布。上述现象指示 浅黄褐色硅化蚀变早于淡黄色—灰色蚀变。

在热沟北东侧山顶,出露岩石为中更新统冰碛 层,发育两期蚀变(图 6f)。早期蚀变为浅黄褐色强 硅化、高岭土化,硅质胶结花岗岩角砾,角砾强高岭 土化,硅化带总体呈北东向展布。晚期灰色蚀变沿 硅化带上 110°∠68°、90°∠55°、80°∠60°等系列近 南北向裂隙发育,主要为灰色蚀变、白色盐华,伴有 冒热气、H,S 气味。

4.4 流体包裹体特征

前人对羊八井地热钻井岩芯开展了流体包裹体 研究,所测的均一温度高于实际测井温度 50~70℃, 推算的流体包裹体矿化度比热田所产流体矿化度高 约5倍(朱梅湘和徐勇,1989),显示存在至少两期 地热活动,早期地热流体温度、盐度明显高于现代地 热流体。

综合上述地层、断裂构造、蚀变叠加关系、流体 包裹体等研究成果,羊八井地热田发育三期水热活 动是比较可靠的,早期发育以黄褐色硅化为主的蚀 变,伴有赤铁矿(黄铁矿)化、高岭土化和绿泥石化; 中期以灰白色高岭土化为主的蚀变,伴有硅化;晚期 为现代地热形成的淡黄色硫磺、白色盐华和灰色蚀 变。

5 讨论

5.1 水热蚀变与断裂构造空间关系

亚东—谷露地区的地热资源在空间上的分布主 要受亚东—谷露活动构造带中的断陷带所控制(韩 同林等,1990)。地热活动强度与现今活动构造表 现的强度、断陷带的力学性质及所处构造部位有关 (韩同林等,1990)。

亚东—谷露裂谷系至少存在两期构造应力场, 中新世早期—上新世晚期的近东西向挤压应力场, 上新世晚期—第四纪的近南北向挤压应力场(石剑 岳,2015)。羊八井盆地为亚东—谷露裂谷中的次 级半地堑,其主边界断裂位于盆地的西北侧(吴中 海等,2006)。地热田发育于主边界断裂带的上盘 (吴中海等,2006)。热田北区的北东向、北西向、近 南北向次级断裂、裂隙带控制了地热水通道和水热 蚀变的分布。

北区水热蚀变严格受断裂构造控制,黄褐色硅 化带沿北东向、北北东向断裂构造呈条带状分布,在 断裂上、下盘都发育,近似对称发育。早期灰白色高 岭土化蚀变带分布于黄褐色硅化带中及其外围,总 体展布特征与黄褐色硅化带一致。早期以黄褐色硅 化为主的水热蚀变受北东向断裂构造控制。

中期灰白色高岭土化带分布于北东向断裂带与 北西向断裂交汇区域,其走向与北西向断裂构造一 致,分布于北西向断裂上下盘呈近似对称分布,远离 北西向断裂蚀变强度由强减弱,同时远离北东向断 裂带其蚀变强度总体减弱,该期灰白色高岭土化并 不是沿北西向断裂连续、一直发育的,指示中期高岭 土化蚀变受北西向、北东向断裂联合控制。

晚期淡黄色—灰色蚀变主要分布于北东向硅化 带的近南北向断裂、裂隙带上,指示淡黄色—灰色蚀 变具体展布受近南北向断裂和北东向断裂的联合控 制。

总之,水热蚀变与断裂构造具密切空间关系,具体表现为:①水热蚀变受断裂构造控制,按照羊八井地热田北区不同方向系构造,可以划分出若干相对独立的构造—蚀变分带;②水热蚀变在不同方向构造叠合部位活动最为强烈。早期以硅化高岭土化为主的蚀变受北东向断裂控制,中期以高岭土化为主的蚀变受北东向断裂和北西向断裂联合控制,晚期 正活动的以硫磺、灰色蚀变为主的水热蚀变受北东向、北西向和近南北向断裂联合控制。

5.2 水热蚀变与断裂构造活动的时间关系

羊八井地热田水热蚀变在空间上严格受断裂构 造控制,即地热活动受断裂构造活动控制,指示两者 存在密切的时间关系。

前人羊八井地热田泉华测年结果显示,其地热 活动至少存在三期:266±33 ka BP(侯增谦等, 2001),155.58 ka BP(吴中海,2004)和全新统至今。 与水热蚀变在中更新统冰碛层(678~593 ka BP、 315~112 ka BP(吴中海,2004))发育,上更新统冰 碛层(72~25 ka BP(吴中海,2004))不发育,全新统 冲洪积地层(10 ka BP 以来)发育的水热蚀变分布 特征相符。

羊八井盆地断层年龄有 676.32 ka BP、244.29 ka BP、59±31 ka BP、54±16 ka BP(吴中海,2004), 分为三期:676.32 ka BP、244.29 ka BP、59~54 ka BP。念青唐古拉山东南麓断裂带中更新世以来,断裂活动划分为:700~500 ka BP、350~220 ka BP、140 ka BP、70~50 ka BP、全新世等 5 个阶段(吴中海, 2004)。羊八井地热田水热蚀变年龄与第二阶段、第三阶段、第五阶段断裂活动同步。

5.3 水热蚀变的时空演化特征

热泉流体受到高原隆升所伴随的张裂事件控制 (侯增谦等,2001)。水热蚀变与盆地构造活动、盆 地演化具有密切的时空、成因联系。

前人对亚东--谷露裂谷带开始裂陷的时代的大 量测年结果(Coleman et al., 1995; Harrison et al., 1995;陈文寄等, 1996; Stockli et al. 2002; Dewane et al,2006; Maheo et al.,2007; 吴中海等,2006) 显示, 羊八井盆地最晚在8 Ma开始伸展裂陷,以低角度韧 性剪切带发育为特征;700 ka BP 以来,以高角度正 断层活动为主,在盆地西北形成由 F₁、F₂、F₃等三条 呈阶梯状排列的次级断裂构成的念青唐古拉山东南 麓断裂带。F₁断层构成念青唐古拉山与当雄羊八 井盆地分界线(吴珍汉等,2002),是其中的主断裂 (吴中海,2004),包含4~5条呈阶梯状平行分布的 次级断层。F₁断裂经历了2期活动,在中更新世之 前,断层活动控制了盆地早期的发育;中更新世以 来,F,断裂活动控制了中更新统冰碛层的分布,是 山前高冰碛或冰水台地的边界,形成时间为700~ 500 ka BP 以来(吴中海等, 2006), 最近一次强烈活 动在 59~48 ka BP 左右(吴中海等, 2006), 累积垂 直断距达 490 m(吴中海, 2004)。F, 断裂分布于叶 巴果一带,北东30°走向,在向盆地迁移时形成阶梯 状断裂结构。F、断裂构成盆地中低洼的沼泽湿地 的边界,分布于雪尕果--军马场,北东走向,其最近 一次强烈活动时间为 244 ka BP(吴中海等, 2006), 在羊井学附近垂直断距40~60 m,错断中更新统冰 碛层,未错动晚更新世以来地层(吴中海,2004)。 晚更新世以来,F1 断裂活动速率增加,F2、F3 断裂的 垂直活动性逐渐减弱。

羊八井盆地不仅断裂构造由山前向盆地迁移, 而且地层发生强烈的差异隆升---剥蚀作用,形成由 山前至盆地呈阶梯状排列的台地。随着断裂构造的 多期次活动,热田北区与南区海拔高差逐渐增加。 水热蚀变的时空演化大致可划分为四个阶段(图 7):① 在 350~220 ka BP 断裂强烈活动期间,早期 高温地热水沿 F₁ 断裂、F₂ 断裂的破碎带上升,由于 南区、北区无明显高差,地热水直接从 F₁、F, 断裂破 碎带排泄出地表,在中更新统冰碛层中形成系列北 东向展布的、蘑菇状的黄褐色硅化蚀变带(图 6a)。 ② 140 ka BP 断裂活动强烈时,念青唐古拉山与盆 地存在一定的高差,浅部大气降水顺北西向断裂快 速补给到北区,热储温度有所降低,发育中期灰白色 黏土化蚀变,并叠加于早期黄褐色硅化蚀变带上,在 中更新统冰碛层中形成北西向展布、受北东向断裂 控制的灰白色高岭土化蚀变带。③ 随着 70~50 ka BP 期间断裂强烈活动,山脉继续抬升,上更新统冰 碛层形成,地热水在北区沿北东向断裂、北西向断裂 从深部上升后并不直接排泄,而是经北西向断裂、中 更新统地层向南区径流、在南区低洼地区和藏布曲 排泄形成泉华、泉胶砂砾岩,北区上更新统不发育水 热蚀变。④ 自全新统以来,北区强烈抬升,部分中 更新统地层剥蚀出露地表,北东向断裂一直为地热 蒸汽的上升流区,在北东向断裂与北西向断裂、近南 北向裂隙交汇区域发育现代地热显示,高温地热水 从北东向断裂深部上升至浅地表后,沿北西向断裂、 第四纪地层向南区径流,在南区全新统薄弱带、藏布 曲排泄形成泉华、泉胶砂砾岩,北区部分全新统地层 发育灰白色高岭土化蚀变。

羊八井水热蚀变作用与断裂构造活动具同步 性,水热蚀变具有阶段性,各阶段蚀变沿断裂构造形 成相对独立的构造蚀变带。浅灰色—淡黄色蚀变是 深部含 H₂S、CO₂等还原性气体作用于浅地表的结 果,是深源高温流体的组成成分,该蚀变带分布于北 东向断裂与北西向断裂交汇区域,持续活动至今,是 深源高温地热排泄通道的标志之一(多吉等[®])。北 区硫磺沟区域常见到到三期水热蚀变叠加,是羊八 井地热田地热活动中心(杨期隆和辛奎德,1991), 该区为深源高温流体上升流区,也是早期地热水排 泄区域,致使多期次的水热蚀变叠加发育;中高温地 热水的排泄区随着构造活动、盆地的演化由北区硫 磺沟区域向南区迁移;中高温地热水的排泄方式由 北区断裂构造直接排泄向经第四纪地层径流再排泄 的间接排泄方式转变。

羊八井地热田水热蚀变时空演化特征反映了热 田高温地热活动主要集中于硫磺沟区域,深源高温 地热水主要受北东向断裂控制,北西向断裂为导水 构造、为地热活动提供充足的浅部水。羊八井地热 田深部热水的主要通道为北东向断裂与北西向断裂 交汇区域的破碎带。深部热储定位于北东向断裂与 北西向断裂的交汇区域。因此,羊八井地热田深部 高温地热勘查方向是北区硫磺沟区域,重点目标是 受北东向断裂和北西向断裂交汇区控制的深部热 储。

6 结论

(1)羊八井地热田水热蚀变类型复杂多样,水 热蚀变具有分带性和多阶段性,由中心向两侧划分 为黄褐色蚀变中心带、灰白色中强蚀变带、灰白色中 等蚀变带、浅灰白色弱蚀变带和围岩。总体划分为 三期:早期黄褐色—灰白色蚀变期,蚀变矿物主要



12

为:黄铁矿(褐铁矿、赤铁矿)、微晶或粗粒石英、高 岭石、明矾石、伊利石;中期灰白色蚀变期,蚀变矿物 主要为:高岭石、伊利石、微晶或粗粒石英或硅化;晚 期淡黄色—灰色蚀变期,蚀变矿物主要为:淡黄色硫 磺、白色束状文石、灰色硅(钙)质微脉(或薄膜)、灰 白色高岭石、白色盐华。

(2)羊八井热田各阶段水热蚀变受断裂构造控制,水热蚀变活动与断裂构造活动具同步性。早期 黄褐色—灰白色蚀变带沿北东向断裂展布,中期灰 白色蚀变带沿北西向断裂、北东向断裂展布,晚期灰 色—淡黄色蚀变带沿北东向断裂、北西向断裂交汇 部位分布。高温地热活动中心—直在北区硫磺沟区 域。

(3)水热蚀变具有时空演化特征。中高温地热水的排泄方式由北区断裂构造直接排泄向东南区经浅层第四系径流再排泄的方式转变;中高温地热水的排泄区随着构造活动、盆地的演化由北区硫磺沟区域向南区藏布曲迁移。北区北东向断裂与北西向断裂交汇区域是高温热水的主要通道,同时也控制了深部热储的空间定位。热田深部高温地热主要勘查方向是北区硫磺沟区域北东向断裂与北西向断裂交汇区域控制的深部热储。

致谢:本文在野外调查和采样过程中得到西藏 地热地质大队荣峰研究员、西藏国网羊八井发电公 司王华彬工程师的指导与协助,分析测试得到核工 业北京地质研究院分析测试中心李婷高级工程师的 帮助,在撰写过程中得到西藏地热地质大队胡先才 研究员的指导,论文评审专家提出了非常宝贵的意 见,作者向他们表示衷心的感谢。

注释 / Notes

- 多吉,张登全,梁廷立,陈琳,谭庆元,杜少平. 1995. 西藏自治区 当雄县羊八井地热田北区深部地热资源普查报告. 西藏地勘局 地热地质大队.
- Duoji, Zhang Dengquan, Liang Tingli, Chen Lin, Tan Qingyuan, Du Shaoping. 1995. General survey report on deep geothermal resources in the north area of Yangbajing Geothermal field, Dangxiong County, Tibet Autonomous Region. Geothermal geology brigade of Tibet Geological Exploration Bureau.
- ② 多吉,梁廷立,颜吉林,谢鄂军,范小平.1996. 西藏自治区当雄县 羊八井地热田北区深部资源开发性勘探 ZK4001 勘查地质报告. 西藏地勘局地热地质大队.
- Duoji, Liang Tingli, Yan Jilin, Xie ejun, fan Xiaoping. 1996. Exploration geological report of ZK4001 deep resource development exploration in the north area of Yangbajing Geothermal field, Dangxiong County, Tibet Autonomous Region. Geothermal geology brigade of Tibet Geological Exploration Bureau.
- 8 多吉,谭庆元,赵平,徐创禄,范小平.1997. 西藏自治区当雄县羊

八井热田深部高温热储形成机制研究报告.西藏地勘局地热地 质大队.

- Duoji, Tan Qingyuan, Zhao Ping, Xu chuanglu, fan Xiaoping. 1997. Research Report on the formation mechanism of deep high temperature thermal reservoir in Yangbajing thermal field, Dangxiong County, Tibet Autonomous Region. Geothermal geology brigade of Tibet Geological Exploration Bureau.
- 杜少平,索朗扎西,罗松群培,谢鄂军,尼玛卓嘎,雷涵,次珍,次仁 罗布. 2011. 西藏地热资源现状评价与区划报告. 西藏地勘局地 热地质大队.
- Du Shaoping, Solangzaxi, Luo songqunpei, Xie ejun, NIMA Zhuoga, Lei Han, CiZhen, CIREN rob. 2011. Report on Evaluation and zoning of geothermal resources in Tibet. Geothermal geology brigade of Tibet Geological Exploration Bureau.

参考文献 / References

(The literature whose publishing year followed by a "&" is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a

- "#" is in Chinese without English abstract)
- 陈文寄,郝杰,周新华,万京林,孙敏. 1999. 冈底斯岩带结晶后的热 演化史及其构造含义. 中国科学:D辑,29(1):9~15.
- 陈文寄,李齐,周新华,尹安,哈里森 T M. 1996. 西藏高原南部两次 快速冷却事件的构造含义. 地震地质,18(2):109~115.
- 多吉. 2003. 典型高温地热系统——羊八井热田基本特征. 中国工程 科学, 5(1):42~47.
- 韩同林,郑英龙,唐哲明. 1990. 青藏高原亚东—格尔木一带的活动 构造及其与经济建设的关系.中国地质科学院院报,(21):129~ 138.
- 侯增谦,李振清,曲晓明,高永丰,华力臣,正绵平,李胜荣,袁万明. 2011. 0.5 Ma 以来的青藏高原隆升过程——来自冈底斯带热水 活动的证据.中国科学(D辑),31(增刊):27~33.
- 康文华,李德禄,白嘉启.1985.西藏羊八井热田地热地质.中国地质 科学院地质力学研究所所刊,(6):17~79.
- 李明礼. 2018. 西藏典型理疗地热矿泉的成因及功效研究. 导师: 多 吉. 成都理工大学博士学位论文: 1~135.
- 李振清,2002. 青藏高原碰撞造山过程中的现代热水活动. 导师: 侯 增谦. 中国地质科学院博士学位论文: 1~89.
- 廖志杰,赵平. 1999. 滇藏地热带——地热资源和典型地热系统. 北京:科学出版社: 61~85.
- 刘琦胜,吴珍汉,胡道功,叶培盛,江万,王彦斌,张汉成. 2003. 念青 唐古拉花岗岩锆石离子探针 U-Pb 同位素测年. 科学通报,48 (20):2170~2175.
- 吕苑苑,赵平,许荣华,谢烈文. 2012. 西藏羊八井地热田硼同位素 地球化学特征初步研究.地质科学,47(1):251~264.
- 孟宪刚, 邵兆刚, 白嘉启, 朱大岗, 余佳, 韩建恩, 孟庆伟, 吕荣平. 2006. 西藏羊八井—林周地区水热成矿系统与模拟. 地质力学 学报, 12(3):329~337.
- 穆铎.1980. 羊八井地热田地下热赋存与地质构造的关系.水文地质 工程地质,1(3):13~14.
- 秦进生. 2003. 西藏羊易地热田的水热蚀变及地热地质意义. 太原理 工大学学报,34(2):161~165.
- 石剑岳. 2015.亚东—羊八井裂谷系构造地貌特征及第四纪活动性研究.导师:张绪.中国地质大学(北京)硕士学位论文:1~56.
- 孙红丽,马峰,蔺文静,刘昭,王贵玲,男达瓦. 2015. 西藏高温地热田 地球化学特征及地热温标应用. 地质科技情报,34(3):171~ 177.

2022 年

- 吴章明,曹忠权,申屠炳明,邓起东. 1990. 念青唐古拉山南东麓断 层的初步研究. 地震研究,13(1):40~50.
- 吴章明. 1992. 西藏高原震中分布与活动断层. 地震研究,15(2):210 ~218(英文,附中文摘要)
- 吴珍汉,江万,吴中海,张淑坤. 2002a. 青藏高原腹地典型盆—山构造形成时代. 地球学报,23(4):289~294.
- 吴珍汉,胡道功,刘崎胜,夏浩东,鄢犀利. 2002. 西藏当雄地区构造 地貌及形成演化过程. 地球学报,23(5):423~428.
- 吴珍汉,孟宪刚,胡道功,江万,叶培盛,朱大岗,刘琦胜,杨欣德,邵兆 刚,吴中海.2004. 当雄县幅地质调查成果及主要进展.地质通 报,23(5~6);484~491.
- 吴珍汉,胡道功,刘崎胜,叶培胜,吴中海. 2005. 念青唐古拉花岗岩 热演化历史和山脉隆升过程的年代学分析. 地球学报,26(6): 505~512.
- 吴中海. 2004. 西藏当雄一羊八井盆地及邻区第四纪地质演化与活动断裂研究. 导师:周显强. 中国地质科学院博士学位论文:1~193.
- 吴中海,赵希涛,吴珍汉,江万,胡道功. 2006. 西藏当雄—羊八井盆 地的第四纪地质与断裂活动研究. 地质力学学报,12(3):305~ 315.
- 杨期隆,辛奎德. 1991. 西藏羊八井地热田简介. 地质论评, 37(3): 283~287.
- 杨期隆. 1994. 西藏羊八井地热田侧向舌型系统.水文地质工程地 质,04(14):48~51.
- 赵平,多吉,谢鄂军,金建. 2003.中国典型高温热田热水的锶同位素 研究. 岩石学报,19(3):569~576.
- 郑灼华. 1983. 西藏羊八井地热田热储资源评价. 地球科学——武 汉地质学院学报,20:146~160.
- 朱梅湘,徐勇. 1989. 西藏羊八井地热田水热蚀变. 地质科学,24(2): 162~175.
- Chen Wenji, Li Qi, Zhou Xinhua, Yin An, Harrison T M. 1996&. The tectonic implication of two rapid cooling events on the sourthern Xizang(Tibet) plateau. Seismology and Geology, 18(2):109 ~ 115.
- Chen Wenji, Hao Jie, Zhou Xinhua, Wan Jinglin, Sun Min. 1999 **#**. Thermal evolution of Gangdise rock belt after crystallization and its tectonic implication. Science in China(Series D), 29(1):9~15.
- Coleman M E and Hodges K V. 1995. Evidence for Tibetan plateau uplift before 14m. y. ago from a new minimum age for east—west extension. Nature, 374:39~41.
- Dewaneet T J, Stockli D, Taylor M, Lee J, Ding L. 2006. Structure , kinematics, and timing of rifting in Tangra Yum Co rift, south central Tibet. Geophysical Research Abstracts, Vol. 8, 09061.
- Duo Ji. 2002&. The basic characteristics of the Yangbajing Geothermal field——A typical high temperature geothermal system. Engineering Science, 5(1):42~47.
- Guo Qinghai, Wang Yanxin, Liu Wei. 2007. Major hydrogeochemical processes in two reservoirs of the Yangbajing geothermal field, Tibet, China. Journal of Volcanology & Geothermal Research, 166(3):255 ~268.
- Han Tonglin, Zheng Yinglong, Tang Zheming. 1990&. The active tectonics along Yadong—Golmud, Qinghai—Xizang Plateau and its relationship to social constructions. Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences, (21):129~138.
- Harrison T M, Copeland P, Kidd W S F, Oscar L M. 1995. Activation of the Nyainqentanghla shear zone: Implications for uplift of the southern Tibetan Plateau. Tectonics, 14(3):658~676.
- Hou Zengqian, Li Zhenqing, Qu Xiaoming, Gao Yongfeng, Hua Lichen,

Zheng Mianping, Li Shengrong, Yuan Wanming. 2011 **#**. Uplift process of Qinghai—Xizang Plateau since 0. 5 Ma——Evidence from hydrothermal activity in Gangdise belt. Science in China (Series D), 31(Supp.):27~33.

- Kang Wenhua, Li Delu, Bai Jiaqi. 1985&. Geothermal geology of the Yangbajing geothermal field in Tibet. Bulletin of the Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, (6): 17~ 79.
- Li Mingli. 2018&. Genesis and Efficacy of the Typical Therapy Geothermal Mineral Springs, Tibet. Tutor: Duo Ji. Doctoral dissertation of Chengdu University of Technology: 1~135.
- Li Zhenqing. 2002&. Present Hydrothermal Activities during Collisional Orogenics of the Tibetan Plateau. Tutor: Hou Zengqian. Doctoral dissertation of Chinese Academy of Geological Sciences: 1~89.
- Liao Zhijie, Zhao Ping. 1999#. Tropical geothermal resources and typical geothermal systems in Yunnan— Tibet. Beijing: Science Press: 61 ~95.
- Liu Qisheng, Wu Zhenhan, Hu Daogong, Ye Peisheng, Jiang Wan, Wang Yanbin, Zhang Hancheng. 2003#. Zircon ion probe U-Pb isotopic dating of Nianqing Tanggula granite. Scientific Bulletin, 48(20): 2170~2175.
- Liu Qisheng, Wu Zhenhan, Hu Daogong, Ye Peisheng, Jiang Wan, Wang Yanbin and Zhang Hancheng. 2004. SHRIMP U-Pb zircon dating on Nyainqentanglha granite in central Lhasa block. Chinese Science Bulletin, 49(1):76~82.
- Lü Yuanyuan, Zhao Ping, Xu Ronghua, Xie Liewen. 2012&. Geochemical study on boron isotope in the Yangbajing geothermal field, Tibet. Geosciences, 47(1):251~264.
- Maheo G, Leloup P H, Valli F, et al. 2007. Post 4 Ma initiation of normal faulting in southern Tibet. Earth and Planetary Science Letters, 256: 233~243.
- Meng Xiangang, Shao Zhaogang, Bai Jiaqi, Zhu Dagang, Yu Jia, Han Jian'en, Meng Qingwei, Lü Rongping. 2006&. Hydrothermal oreforming system in the Tangbajain—Lhunzhuub area, Tibet, and its numerical simulation. Journal of Geomechanics, 12(3):329~337.
- Mu Duo. 1980 #. Relationship between underground heat storage and geological structure in Yangbajing Geothermal field. Hydrogeology and Engineering Geology, 1(3):13~14.
- Pan Y, Kidd W S F. 1992. Nyainqentanglha shear zone; A late Miocene extensional detachment in the southern Tibetan Plateau. Geology, 20(9):775~778.
- Qin Jinsheng. 2003&. Hydrothermal alteration and evalution in Yangyi Geothermal Field. Journal of Taiyuan University of Technology, 34 (2):161~165.
- Shi Jianyue. 2015&. Yadong—Yangbajing Rift System Tectonic Landform Characteristics and Study on the Quaternary. Tutor: Zhang Xu. Master's thesis of China University of Geosciences (Beijing): 1~56.
- Stockliet D, Taylor M, Yin A, et al. 2002. Late Miocene—Pliocene inception of E—W extension in Tibet as evidenced by apatite (U— Th)/He data. GSA MEET. 34:411.
- Su Jinbao, Tan Hongbing, Chen Xi. 2020. The groundwater deep circulation and large-scale geothermal deposition in response to the extension of the Yadong—Gulu rift, South Tibet, China. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 395, 106836:1~18.
- Sun Hongli, Ma Feng, Lin Wenjing, Liu Zhao, Wang Guiling, Nan Dawa. 2015&. Geochemical characteristics and geothermometer application in high temperature geothermal field in Tibet. Geological Science

and Technology Information, 34(3):171~177.

- Wang Xiao, Wang Guiling, Lu Chuan, Gan Haonan, Liu Zhao. 2018. Evolution of deep parent fluids of geothermal fields in the Nimu— Nagchu geothermal belt, Tibet, China. Geothermics, 71:118~131.
- Wu Zhangming, Cao Zhongquan, Shentu Bingming, Deng Qidong. 1990&. Preliminary research on the Nianqingtanggula mountain southeastern pediment fault. Journal of Seismologigal Research, 13(1):40~50.
- Wu Zhangming. 1992. Distribution of seismicity and active faults in Tibetan plateau. Journal of Seismologigal Research, 15(2):210~ 218 (in English with Chines abstract)
- Wu Zhenhan, Jiang Wan, Wu Zhonghai, Zhang Shukun. 2002a&. Dating of typical basin and range tectonics in central Tibetan Plateau. Acta Geoscientia Sinica, 23(4):289~294.
- Wu Zhenhan, Hu Daogong, Liu Qisheng, Xia Haodong, Yan Xili. 2002&. The formation and evolution of tectonic landform of Damxumg area in central Tibetan plateau. Acta Geoscientia Sinica, 23 (5): 423 ~ 428.
- Wu Zhenhan, Meng Xiangang, Hu Daogong, Jiang Wan, Ye Peisheng, Zhu Dagang, Liu Qisheng, Yang Xinde, Shao Zhaogang, Wu Zhonghai. 2004&. New results and major progress in regional geological survey of Damxung county sheet. Geological Bbulletin of China, 23(5~6):484~491.
- Wu Zhenhan, Hu Daogong, Liu Qisheng, Ye Peisheng, Wu Zhonghai. 2005&. Chronological analysis of thermal evolution of granit and the uplift process of the Nyainqentanglha range in central Tibet . Acta Geoscientia Sinica, 26(6):505~512.
- Wu Zhonghai. 2004 &. Quaternary Geology and Active Faults in the

Damxung—Yangbajing Basin and Adjacent Area, Central Tibet . Tutor: Zhou Xianqiang. Doctoral Dissertation of Chinese Academy of Geological Sciences: 1~193.

- Wu Zhonghai, Zhao Xitao, Wu Zhenhan, Jiang Wan, Hu Daogong. 2006&. Quaternary geology and faulting in the Damxung— Yangbajing basin, southern Tibet. Journal of Geomechanics, 12 (3):305~315.
- Yang Qilong, Xin Kuide. 1991&. A brief introduction to the geothermal system of Yangbajing Geothermal Field . Geological Review, 37 (3):283~287.
- Yang Qilong. 1994&. Lateral tongue system of Yangbajing Geothermal Field in Tibet. Hydrogeology and Engineering Geology, 4(14):48 ~51.
- Yuan Jianfei, Guo Qinghai, Wang Yanxin. 2014. Geochemical behaviors of boron and its isotopes in aqueous environment of the Yangbajing and Yangyi geothermal fields, Tibet, China. J. Geochem. Explor., 140:11~22.
- Zhao Ping, Duo Ji, Xie Ejun, Jin Jian. 2003&. Strontium isotope data for thermal waters in selected high-temperature geothermal fields, China. Acta Petrologica Sinica, 19(3):569~576.
- Zheng Zhuohua. 1983&. The assessment of the geothermal resources in Yangbajing field of Xizang. Earth Science—Journal of Wuhan College of Geology, 20:146~160.
- Zhu Meixiang, Xu Yong. 1989&. Hydrothermal alteration in the Yangbajing geothermal field, Tibet. Scientia Geologica Sinica, (2): 162~175.

Temporal and spatial evolution of hydrothermal alteration in the Yangbajing Geothermal Field, Xizang(Tibet)

HU Zhihua^{1,2)}, GAO Honglei^{1,2)}, WAN Hanping^{1,2)}, ZHANG Song^{1,2)}, HAO Weilin^{1,2)}, WU Rujie^{1,2)}

1) Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing, 100029;

2) CNNC Geothermal Exploration Tecnology Center, Beijing, 100029

Abstract: Yangbajing Geothermal Field, located in the northern part of Yadong-Gulu Rift in Xizang(Tibet) is a famous high-temperature geothermal field in China. To better understand the development geothermal characteristics in the south Tibet, it is essential to study the temporal and spatial evolution of hydrothermal alteration. Based on the surface investigation, microscopic observations and X-ray diffraction analysis of the Yangbajing Geothermal Field and its hydrothermal altered rocks, the major alteration types and characteristics are summarized. The authors subdivided four different hydrothermal alteration zones; yellowish-brown center zone, gravish-white intensely altered zone, gravish-white medium altered zone and light-gravish weakly altered zone. There are three stages of alteration; the reddish-brown to yellowish-brown alteration stage, grayish-white alteration stage and light yellowish-gray alteration stage. The results show that the high-temperature geothermal activity center of Yangbajing Geothermal Field has always been in the sulfur valley of the north area, and its hydrothermal alteration activity is mainly controlled by the active fault in Yadong-Gulu rift, and is also synchronous with the fault activity. In the early stage, the geothermal water is directly discharged along the NE-trending faults, whereas in the late stage, it is discharged after runoff through the shallow Quaternary stratum, resulting in shifting from direct discharge to indirect discharge. The discharge area of medium-high temperature geothermal water migrated from the northern sulfur valley to the Zangbuqu area in the south. According to the results, we concluded that the intersection of NE-trending faults and NW-trending faults in the Liuhuanggou area can be regared as the main target

for deep geothermal exploration in the north part of Yangbajing Geothermal Field.

Keywords: Yangbajing Geothermal Field; hydrothermal alteration; alteration zoning; active fault; Yadong-Gulu rift

Acknowledgements: This study was financially supported by "Research on Key Technologies of Geothermal Exploration", which was CNNC centralized R & D project

First author: HU Zhihua, male, born in 1986, senior engineer, graduated from Beijing Research Institute of Uranium Geology in 2011, majoring in mineral survey and exploration, is mainly engaged in geothermal resources exploration and research and uranium geology research. Email: huzhihua2005@126.com

Manuscript received on: 2021-07-27; Accepted on: 2021-12-08; Network published on: 2021-12-20

Doi: 10. 16509/j. georeview. 2021. 12. 105

Edited by: ZHANG Yuxu