www.cagsbulletin.com

西藏古堆地热田水热蚀变类型、分布特征及 对勘探方向的启示

蒙晖仁^{1,2)}, 曹 锐^{1,2,3)*}, 陈德凡¹⁾, 阿旺加措⁴⁾, 罗文行⁵⁾, 蔡永强¹⁾, 闫一铭¹⁾

1)成都理工大学地球科学学院,四川成都 610059;
2)成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室,四川成都 610059;
3)成都理工大学自然资源部构造成矿成藏重点实验室,四川成都 610059;
4)西藏大学理学院,西藏拉萨 850000;
5)长江设计集团有限公司地热综合利用工程研究中心,湖北武汉 430010

摘 要:水热蚀变与泉华作为地热流体水-岩反应和化学沉积的产物,其相关研究可为水热活动发展史、恢 复地热流体古温度及水岩反应过程等方面研究提供重要信息。古堆地热田位于错那一沃卡裂谷中部,是继 羊八井地热田之后我国大陆最具发电潜力的非火山岩型高温地热田之一,极具开发潜力。为了解古堆地热 田泉华和水热蚀变的类型、分布特征及判断有利的勘探方向,本文在野外地热地质调查的基础上,结合室内 镜下鉴定和扫描电镜分析等工作,识别出绿泥石化、硅化、高岭石化和碳酸盐化等水热蚀变类型。研究发 现,古堆地热田水热蚀变呈现出从蚀变中心向外由酸性蚀变过渡为弱酸性-中性蚀变的分带模式,蚀变中心 常由强烈蚀变的硅化带或高岭石带组成;水热蚀变分布受断裂构造的控制,蚀变在断裂交汇处最为强烈, 蚀变中心常沿着断裂延伸;根据水热蚀变的分布及蚀变强度,初步判断布雄朗古和杀嘎朗嘎的渗透性相对 较好且热储温度高,具有较好的开发前景。在泉华沉积方面,古堆地热田西区主要为钙华区,东区为钙华和 硅华叠加区;结合青藏高原动力学背景,认为古堆地热田水热发展史与陆陆碰撞的隆升过程及错那一沃卡 裂谷活动密切相关且存在明显的耦合关系。

关键词: 古堆; 水热蚀变; 蚀变分带; 泉华 中图分类号: P314 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2022.100802

Types, Distribution Characteristics, and Exploration Direction of Hydrothermal Alteration in Gudui Geothermal Field, Tibet

MENG Hui-ren^{1, 2)}, CAO Rui^{1, 2, 3)*}, CHEN De-fan¹⁾, NGAWANG Gyatso⁴⁾, LUO Wen-xing⁵⁾, CAI Yong-qiang¹⁾, YAN Yi-ming¹⁾

1) College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059; 2) State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology,

Chengdu, Sichuan 610059;

3) Key Laboratory of Tectonic Controls on Mineralization and Hydrocarbon Accumulation of Ministry of Natural Resources,

Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059; 4) College of Science, Tibet University, Lhasa, Tibet 850000;

5) Geothermal Comprehensive Utilization Engineering Research Center of Changjiang Design Group Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430010

收稿日期: 2022-05-28; 改回日期: 2022-09-26; 网络首发日期: 2022-10-10。责任编辑: 张改侠。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

本文由第二次青藏高原综合科学考察研究(编号: 2019QZKK0804)、国家自然科学基金项目(编号: U21A2015)、西藏自治区重点研发计 划项目(编号: XZ202101ZY0014G)及中国石化科研项目(编号: P21083)联合资助。

第一作者简介:蒙晖仁, 男, 1998年生。博士研究生。主要从事地热地质研究。通讯地址: 610059, 成都市成华区二仙桥东三路1号。 E-mail: 303142383@qq.com。

^{*}通讯作者: 曹锐, 男, 1984年生。博士, 副教授, 博士生导师。主要从事地热地质学及构造地质学等方面的研究。通讯地址: 610059, 成都市成华区二仙桥东三路1号。E-mail: rcao2007cug@qq.com。

Abstract: As the results of water-rock interaction and geothermal fluid chemical deposition, the hydrothermal alteration and sinter can provide important information to research on hydrothermal activity history, geothermal fluid temperature, and water-rock interaction process. The Gudui geothermal field, located in the central Cone–Oiga rift, is a shallow buried high-temperature geothermal field with the greatest power generation potential in China after Yangbajing geothermal field, and has great development potential. In order to analyze the type and distribution characteristics of sinter and hydrothermal alteration, favorable exploration direction in Gudui geothermal field, and the coupling relationship between hydrothermal deposition and regional tectonic; based on geothermal geological investigation, microscopic identification, and scanning electron microscope analysis, identified hydrothermal alterations such as chloritization, silicification, kaolinization, and carbonation. The hydrothermal alteration in Gudui geothermal field exhibits obvious hydrothermal alteration zonation, which extends from acidic alteration to weak acidic-neutral alteration, and the alteration center is mainly composed of extensively altered silicification or kaolinization zones. The distribution of hydrothermal alteration is controlled by fault, and the alteration center, which is mainly located in the junctions of faults, extends along the faults. The distribution and intensity of hydrothermal alteration implies that the Buxionglanggu and Shagalangga have enormous resource potential. Therefore, geothermal exploration in Gudui geothermal field should focus on the Bushonglanggu and Shagalanga. In terms of hydrothermal deposition, the west area of Gudui geothermal field is dominated by travertine, and the east area is dominated by travertine and geyserite. Furthermore, combined with the dynamic background of Qinghai-Tibet Plateau, an obvious coupling relationship exists between hydrothermal history and the uplift of Qinghai-Tibet Plateau during continent-continent collision and the activity of the Cone-Oiga rift. Key words: Gudui; hydrothermal alteration; alteration zonation; sinter

青藏高原腹地藏南地区位于地中海—喜马拉雅 地热带,是中国大陆地区地热活动最强烈的地区之 一。前人对青藏高原地热资源的水文地球化学特征、 成因机制及资源评价等方面开展了系统的研究, 取 得了丰硕的研究成果(赵平等, 1998; Tetsuya et al., 1999; 多吉, 2003; Wang et al., 2017; Weinert et al., 2020; Wang et al., 2020; Weinert et al., 2021; Elenga et al., 2021; 曹锐等, 2022; 唐显春等, 2023), 但目前对 地热田相关水热蚀变及泉华的报道相对较少。而泉 华和水热蚀变作为地热流体化学沉淀和水-岩反应的 产物,其相关研究可为地热田水热发展史、恢复地热 田的古温度及水-岩相互作用过程等方面研究提供重 要信息,是地热田勘探重要的辅助手段(Browne, 1970; Inoue et al., 2009)。部分蚀变矿物, 如绿泥石等 可恢复其蚀变温度,探讨地热田温度的演化趋势 (Paolo, 2020)。而泉华的沉积不仅受地热流体的影响, 其同位素组成以及部分微量元素比值也会受到气候 因素的影响;同时,由于泉华的沉积速率大,能够成 为青藏高原隆升及其气候演化研究的高分辨率载体 (李振清, 2002; Wang et al., 2017; Wang et al., 2022)。

古堆地热田地处错那一沃卡裂谷中段,是继羊 八井地热田之后我国最具发电潜力的非火山岩型高 温地热田之一,更为重要的是,其水热活动强烈,蚀 变类型多样且覆盖面积大,是研究藏南地区地热田 泉华和水热蚀变典型的对象。此外,目前对古堆地热 田进行的研究相对较少,且多集中于地热地质特征 和水文地球化学等方面(刘昭等,2017; Wang et al., 2020),其水热蚀变的类型、分布特征以及水热活动 发展史仍不清楚。因此,本文从泉华与水热蚀变着手, 在分析古堆地热田水热蚀变的类型、分布特征以及 蚀变强度的基础上,讨论水热蚀变与断裂构造及地 热田渗透性等方面的关系。同时,将泉华沉积与青藏 高原隆升背景相联系,进一步阐明古堆地热田的水 热蚀变分带模式,判断研究区有利的资源潜力区, 以期为研究古堆地热田的水热发展史及其与青藏高 原隆升过程之间的耦合关系提供参考。

1 地质背景

1.1 大地构造背景

古堆地热田位于特提斯—喜马拉雅构造带中近 南北向展布的错那—沃卡裂谷带(图 1)。错那—沃卡 裂谷带是青藏高原南部近南北向裂谷带最东端的一 条,区内地震活动与断裂具有良好的耦合关系,第 四纪以来仍具有较强的活动性(吴中海,2008a;Zeng et al., 2021)。该裂谷带主要由三个半地堑式断陷盆地 组成,从北到南依次为沃卡地堑、邛多江地堑和错那 —拿日雍错地堑(薛帅等,2022)。错那—沃卡裂谷带 的地热活动强烈,沿着裂谷出露着多个中高温地热 田,古堆地热田为其中最具开发潜力的地热田之一, 属于浅埋高温地热田,是地中海—喜马拉雅地热带 中非火山型地热系统(热源与年轻浅成侵入岩或壳内 局部熔融体相关,缺少近代火山岩)的典型代表。

1.2 地热地质特征

古堆地热田地势南高北低,海拔 4400~5430 m, 位于错那—拿日雍错地堑带北部与隆子—哲古断错 带的交汇处。错那—拿日雍错地堑为半地堑式断陷



图 1 青藏高原地质简图(修改自 Wu et al., 2011) Fig. 1 Geological sketch map of Qinghai-Tibet Plateau (modified from Wu et al., 2011)



盆地,形成于近 5 Ma 以来青藏高原发生东西向的 伸展作用,主干断层位于盆地西侧,第四纪活动性 较强,地震活动沿着裂谷带呈南北向分布,1986 年 发生 M7.5级错那地震(吴中海等,2008b)。古堆地热 田内出露的地层主要为三叠系涅如组、侏罗系日当 组、陆热组以及第四系冲洪积物和泉华堆积物,早 白垩世闪长岩、晚白垩世辉绿岩侵入于南部和中部; 发育近东西向、北东向和北西向三组断裂(图 2)。古 堆地热田的热储主要为下侏罗统日当组碳质板岩、 中下侏罗统陆热组泥质岩,盖层主要为碳质板岩和 泥质岩,热源可能为上地壳的局部熔融体。区内水 热活动地表显示类型多样,温泉、沸泉、喷泉、钙 华、硅华、围岩蚀变等均有出露(图 3)。

古堆地热田可分为五个地热显示区,自西向东 为:日若显示区、布雄朗古显示区、茶卡显示区、 杀嘎朗嘎显示区以及巴布得密显示区。日若显示区 位于地热田的西部, F₃断裂与 F₆断裂交汇处,距离 最近的布雄朗古显示区约4km,水热活动强度、蚀 变类型和蚀变强度均相较于东边四区偏弱。布雄朗 古地热显示区、茶卡地热显示区、杀嘎朗嘎地热显 示区以及巴布得密地热显示区密集的分布在 F₃断 裂附近及其与北西向断裂的交汇处,蚀变类型多样, 水热活动强度和蚀变强度均较强烈。已有研究表明, 这四个地热显示区同属于一个水热系统,地热流体 以 Cl-Na、Cl·HCO₃-Na 型水为主(佟伟等, 2000)。因此,本文将古堆地热田分为东区和西区,东区包括 布雄朗古显示区、茶卡显示区、杀嘎朗嘎显示区和 巴布得密显示区,西区仅有日若显示区。

2 水热蚀变分布特征

2.1 水热蚀变总体分布特征

古堆地热田东区和西区的水热蚀变差异较大。 日若显示区的水热蚀变主要分布于近北东一南西 向 F₆断裂和近东西向 F₃断裂的交汇处,并沿着 F₆ 断裂延伸,受断裂构造控制。日若显示区以泉华沉 淀为主,主要出露钙华和少量硅华,主要的蚀变 类型为碳酸盐化;同时,也发现有部分硫华、盐霜 出露。

东区的水热蚀变主要沿着近东西向断裂和近南 北向断裂展布,尤其是两组断裂的交汇点,也受到断 裂的严格控制。东区水热蚀变类型丰富,蚀变强度大, 水热蚀变类型以交代、沉淀和充填为主,主要的蚀变 类型为高岭石化、绿泥石化以及硅化,并出露有较大 面积的钙华和硅华。东区的水热蚀变主要集中分布于 古堆的四个地热显示区中,其中布雄朗古和杀嘎朗嘎 上述的蚀变类型均有出露,巴布得密主要出露绿泥石 化、硅华和钙华;茶卡北部出露硅华,南部也发现有 钙华、盐华及绿泥石化的出露。



a一布雄朗古高岭石化围岩及古泉眼; b一布雄朗古钻井(约 15 分钟喷发一次,每次持续两分钟); c一日若热水沼泽; d一杀嘎朗嘎高温沸泉。 a-fossil spring point and kaolinite surrounding rock in Buxionglanggu; b-the borehole in Buxionglanggu (erupts once every 15 minutes

for two minutes); c-hot water swamp in Riruo; d-high-temperature boiling spring in Shagalangga.

图 3 古堆地热活动野外照片

Fig. 3 Field photos of geothermal activity in Gudui

总体来讲,东区的水热蚀变和水热活动强度均 要比西区大得多,从西区到东区,水热蚀变类型增 多,蚀变强度也在增大,出现以硅化、高岭石化等为 代表的酸性蚀变以及以绿泥石化为代表的高温蚀 变。从泉华类型来看,西区以钙华沉积为主,只有零 星出露的硅华,而东区则四个地热显示区均有较大 规模的钙华、硅华沉积。通常来讲,硅华主要分布于 水热活动强烈的高温热泉地区,而钙华多是中低温 地热活动的产物(李振清,2002),因此,从泉华类型 而言,东区相较于西区可能具有更大的资源潜力。

2.2 水热蚀变分带特征

古堆地热田水热蚀变十分发育,从日若到巴布 得密,分布着多个喷气孔、现代温泉以及古泉眼,而 每一个喷气孔、温泉以及古泉眼都代表了一个蚀变 中心。各个地热显示区的蚀变分带通常围绕着泉眼 分布,其蚀变分带的发育情况与泉眼的水热活动强 度密切相关, 而泉眼的分布又与断裂有关。因此, 古 堆地热田的各个地热显示区内部的蚀变分带呈现出 一定的分布规律,通常从蚀变中心由强酸性、酸性蚀 变的硅化或高岭石化, 向外过渡为弱酸性、中性蚀变 的绿泥石化。形成这种蚀变分带原因主要与流体通 道和流体性质密切相关。前人研究表明,古堆地热田 的地热流体主要由岩浆水混合大气降水而成(Wang et al., 2020)。岩浆出溶的流体通常具有相当强的酸性, 与花岗岩熔体平衡的热水溶液,其 pH 值通常可达到 1.4~2.2(Holland, 1972)。当这种强酸性的岩浆水沿着 运移通道上升并向外运移时,由于受到大气降水的 不断加入,同时与围岩发生反应,流体性质逐渐由 酸性变得偏碱性,同时使围岩蚀变呈现出由酸性蚀 变逐渐过渡为弱酸性-中性蚀变的趋势(Browne, 1978)。国内部分地热田的蚀变分带都大致反映了从 酸性蚀变岩到中性蚀变岩的分带模式, 如云南热海 地热田、西藏羊易地热田等(郑直等, 1987; 朱梅湘和 徐勇, 1992)。

古堆地热田各个地热显示区由于水热活动强度 以及泉眼分布的不同,水热蚀变在地表的分布特征 显示出较大的差异,杀嘎朗嘎和布雄朗古显示了较 好的蚀变分带特征,其余三个地热显示区的蚀变分 带现象较弱。古堆地热田各个地热显示区的蚀变分 带特征总结如下:

杀嘎朗嘎和布雄朗古地热显示区的水热蚀变强 度大,且蚀变分带明显,分别以钻孔 ZK301 和钻孔 ZK201 为蚀变中心;杀嘎朗嘎显示区向外依次出露 硅化、高岭石化、绿泥石化和未蚀变的围岩;布雄朗 古显示区则向外依次出露高岭石化、绿泥石化和未 蚀变的围岩。通常靠近蚀变中心高温沸泉的围岩受 到地热流体的淋滤交代作用, 硅化、高岭石化通常十 分强烈, 几乎全部由 SiO₂ 矿物或高岭石组成, 硅化 带向外逐渐过渡为高岭石化带以及绿泥石化带。杀 嘎朗嘎的绿泥石化相对于布雄朗古较弱, 原岩组分 基本都保留下来, 并发生轻微的重结晶作用, 绿泥 石主要沿着裂隙进行交代或者充填围岩, 远离裂隙 过渡为未蚀变的正常围岩; 布雄朗古则见有强烈蚀 变的绿泥石化围岩。

其余三个显示区的围岩蚀变程度相对较弱。巴 布得密出露的水热蚀变类型有绿泥石化、硅华以及 钙华;茶卡出露的蚀变类型主要为硅华、钙华、盐华 以及绿泥石化(佟伟等,2000),均未见明显的蚀变分 带。日若主要出露钙华,以及少量的硅华和碳酸盐化, 钙华广泛出露于显示区中,硅华见于中部的2个温 度较高的温泉周围,碳酸盐化围岩见于显示区边缘; 表现出从显示区中部到边缘由硅华过渡为钙华和碳 酸盐化的趋势。

3 水热蚀变类型和矿物组合

水热蚀变是热田演化历史的见证。古堆地热田 水热蚀变强烈,蚀变类型多样,主要有硅化、高岭石 化、碳酸盐化、绿泥石化、褐铁矿化等类型,同时还 发育有一定面积的硅华和钙华(图 4)。

3.1 实验方法

泉华和蚀变围岩样品的岩石薄片鉴定使用 WMP-6880 偏光显微镜;扫描电镜分析和能谱分析 在成都理工大学地球科学学院扫描电镜实验室利用 热场发射扫描电子显微镜(型号: Nova Nano SEM 450)进行分析测试;样品镀膜采用 Quorum Q150R PLUS 系列全自动离子溅射镀膜仪(型号: Q150R ES Plus),工作电流 15 mA,喷镀时间 180 s。岩石薄片 鉴定结果以及扫描电镜分析和能谱分析结果见图 5 与图 6。

3.2 蚀变类型及其矿物组合

古堆地热田的主要蚀变矿物有绿泥石、方解石、 石英、蛋白石、高岭石以及少量不透明矿物,不同的 蚀变类型包含蚀变矿物组合有比较大的差别。

古堆地热田发育有蚀变十分强烈的绿泥石化围 岩,原岩主要为泥质岩、页岩、板岩以及凝灰岩,部 分第四纪砾石堆积层也见有绿泥石化发育。绿泥石 单偏光下呈淡绿色,内部常含有许多不透明的细小 金属矿物颗粒。绿泥石化围岩主要的蚀变矿物为绿 泥石、石英、蛋白石以及少量不透明矿物(图 5a)。高 岭石化围岩在部分地热显示区的分布面积比较大, 强烈蚀变的地层几乎完全由高岭石组成,使岩石严 重褪色,呈白色、灰白色,可形成明显的蚀坑; a



a—高岭石化; b—绿泥石化; c—硅化; d—钙华。 a-kaolinization; b-chloritization; c-silicification; d-travertine. 图 4 古堆地热田水热蚀变露头 Fig. 4 Photos of hydrothermal alteration outcrops



a—强烈蚀变的绿泥石化围岩; b—硅化围岩中的石英脉; c—纹层状的硅华; d—钙华中的方解石和硅藻化石; Q—石英; Chl—绿泥石; Cal—方解石; Chn—玉髓; Opl—蛋白石。 a-extensively altered chlorization; b-quartz vine of silicified rock; c-lamellar geyserite; d-calcite and diatom fossil in travertine; Q-quartz; Chl-chlorite; Cal-calcite; Chn-chalcedony; Opl-opal. 图 5 显微镜下照片

Fig. 5 Photomicrographs

163

其主要蚀变矿物为高岭石和石英(图 6a)。古堆地热田 地表出露的碳酸盐化围岩较少,多见于现代水热活 动区内。而钙华在古堆地热田却很常见,出露着日若 钙华、布雄朗古钙华等一些规模较大的钙华。受环 境和地热流体的影响,钙华的颜色变化较大,白色、 灰黄色、灰黑色的钙华均有发现;其主要矿物为方解 石,少量金红石和不透明矿物(图 5d,图 6b)。

硅化是指蚀变岩石以 SiO₂ 为主要矿物,并使原 岩 SiO₂ 含量大大增加的一种蚀变作用,也有部分学 者认为硅化也包括了硅华和起胶结作用的硅质成分 (朱梅湘,1985; 胡志华等,2022)。古堆地热田的硅化 围岩通常呈红褐色、灰色、灰白色等,比重较大,多 呈块状,孔洞发育,主要的蚀变矿物为石英、玉髓和 蛋白石(图 5b,图 6c,d)。硅华主要沿着温泉泉眼周围 分布,有一定的分布面积,主要矿物为石英、蛋白 石、玉髓和少量不透明矿物(图 5c)。

4 水热蚀变与断裂构造的空间关系

错那一沃卡裂谷带地热资源的分布受该裂谷带 的严格控制,沿着裂谷带内分布着许多中高温温泉, 古堆地热田便位于错那一沃卡裂谷带南部的错那一 拿日雍错地堑中。错那一拿日雍错地堑的主边界断 裂位于地堑的西侧,表现为半地堑型式。1806年,错 那一拿日雍错地堑发生了 M7.5 级的错那地震,表明 该裂谷带仍具有较强的活动性(吴中海等,2008a,b)。

古堆地热田内断裂构造非常发育,发育着近东西 向、北东向和北西向三组断裂,将古堆地热田切割成 棋盘状。早期的近东西向断裂多为逆断层,具有阻水 性质,晚期的北东向和北西向次级断裂多为张性断裂, 可能是地热流体的主要通道。古堆地热田的温泉主要 发育于近东西向断裂与北东向、北西向断裂交汇处, 特别是断裂交汇处北西向张性断裂的上盘(图 7)。



Fig. 6 X-ray energy spectrometric analysis of alteration samples

164

东区除杀嘎朗嘎显示区沿着近东西向断裂延伸 外,其余三个地热显示区均分布于北西向断裂的上 盘,并沿着断裂走向延伸;日若显示区则主要分布 于北东向走滑断层与近东西向逆断层交汇的一盘, 并沿着北东向走滑断层延伸。因此, 古堆地热田的水 热活动受到近东西向、北东向、北西向三组断裂的 控制, 断裂的交汇处往往是水热活动最为强烈的区 域。同时,水热活动与水热蚀变之间存在着非常紧密 的关系, 断裂及其所构建的裂隙系统不仅控制了古 堆地热田地热水通道的分布, 也控制了古堆地热田 水热蚀变的分布,水热活动最强烈的区域往往也是 水热蚀变最强烈、最发育的地区。因此,古堆地热田 的水热蚀变通常以断裂或断裂交汇处为蚀变中心, 不同的水热蚀变类型常围绕着沿断裂分布的泉眼为 蚀变中心呈环带状分布,如布雄朗古地热显示区; 或以东西向断裂上出露的温泉为中心,水热蚀变类 型在断裂两侧呈对称出露,如杀嘎朗嘎显示区。但无 论是布雄朗古还是杀嘎朗嘎,从蚀变中心向外均呈 现出由酸性蚀变岩过渡为弱酸性-中性蚀变岩的的趋 势。

总体来讲,古堆地热田的水热蚀变受到断裂构 造的控制,两者在空间上具有密切的关联性。地热田 内的断裂构造将古堆地热田划分成棋盘状,并可将 古堆地热田的水热蚀变划分成五个不同的蚀变区, 断裂构造交汇处通常是水热蚀变最为强烈的区域。

5 水热蚀变分布与地热田渗透性的空间关系

水热蚀变矿物的形成不仅与温度有关, 岩石初 始组分、压力、渗透性、流体组成等因素对蚀变矿 物的形成也有重要的影响,因此,热液蚀变矿物也 常用于地热勘探,以评估地热系统的物理和化学条 件,如温度、岩石渗透性和流体酸度等(Browne, 1970)。古堆地热田主要出露的岩性为日当组粉砂质 绢云板岩夹变质粉砂岩、碳质板岩,以及晚白垩世的 辉绿岩脉,岩性整体变化不大,其蚀变类型和蚀变 强度主要受控于水热活动强度以及地热流体性质。 古堆地热田发育着多条断裂,两组断裂的交汇处可 能使得地层产生更好的渗透性。断层内部通常都充 填着一定厚度的构造破碎物,并且其上下盘都有一 定范围的影响破碎区,因此,断层带可成为一个低 强度、透水性大以及抗水性差的软弱带,作为浅部地 下水和深部地下水连接的通道,也可成为深部地下 水系统补给和排泄的区域(Manaka et al., 2020)。因此, 断裂所构建的裂隙系统为地热流体的活动及其与围 岩的反应和蚀变矿物的形成提供了更广阔的空间, 对蚀变矿物的形成和分布也起着重要的作用。国内 外均有相关的研究表明, 高岭石化、硅化、明矾石化、 冰长石化等蚀变类型对地热田的渗透性都有一定的 指示作用(Browne, 1978)。

古堆地热田内发育有一定面积的硅化带和高岭 石化,硅化主要发育于杀嘎朗嘎显示区,布雄朗古 显示区也见有部分的硅化围岩出露;高岭石化主要 发育于布雄朗古显示区和杀嘎朗嘎显示区,这两种 蚀变类型都构成了他们各自的蚀变中心。高岭石的 形成与温度有关,渗透性对高岭石的形成也有一定 的影响,一般来说,渗透性强、温度高的区域,高岭 石化相对发育;渗透性差、温度低的区域,高岭石化 就较不发育(陈传焰, 1987);云南热海地热田



Fig. 7 Distribution of hydrothermal alteration in Gudui geothermal field

发育大量的高岭石化,通常与断裂构造和疏松多孔 的含铝岩石有关(郑直等,1987)。硅化带的形成是地 热流体沿裂缝与围岩的相互作用,围岩受到偏酸性 的地热流体强烈的淋滤和交代,将原岩其他组分淋 滤带走,剩下最为稳定的二氧化硅形成二氧化硅矿 物(硅化带),硅化带的发育也是活跃地热田渗透性 的良好指标(Browne,1978)。因此,古堆地热田中这 两种蚀变类型的出现,一方面反应了布雄朗古显示 区和杀嘎朗嘎显示区的地热流体的温度较高,流体 偏酸性;另一方面也反应了这两个地热显示区的裂 隙系统也更为发育,渗透性更强。钻井资料也显示, 这两个显示区的温度相对较高,特别是杀嘎朗嘎 ZK302 井深 400 m,在 360 m 深度,温度达到了 204 ℃。

巴布得密和茶卡地热显示区均未见有硅化和高 岭石化的发育, 主要以钙华硅化沉积为主, 部分地 区出露绿泥石化。巴布得密绿泥石化围岩出露于显 示区的北部, 原岩主要为粉砂质页岩, 蚀变程度较 低, 仅沿着围岩中发育的少量裂隙交代或充填, 可 能反应了巴布得密水热活动较弱,渗透性较差。而茶 卡的温泉出露较少, 但见有大片古泉华沉积, 绿泥 石化围岩则出露于该显示区南部的侵入岩体中,反 映了茶卡显示区可能曾有更为强烈的水热活动,但 目前水热活动较弱。日若显示区出露少量的碳酸盐 化围岩,多呈脉状、网脉状充填于围岩裂隙中;同时, 野外调查时发现, 日若显示区的围岩中发育着大量 裂隙,并发育较多泉眼,可能暗示日若显示区围岩 具有较好的渗透性。而在日若没有发现硅化、高岭 石化以及绿泥石化,可能是由于日若显示区的水热 活动强度相对于东边的四个显示区要弱的原因。

布雄朗古、杀嘎朗嘎显示区分布的硅化、高岭 石化围岩可能指示这两个显示区有较好的渗透性, 同时也反映了更强烈的水热活动;日若显示区分布 的碳酸盐化围岩以及裂隙发育的未蚀变围岩表明该 显示区渗透性也较好,但水热活动较弱;而茶卡和 巴布得密显示区渗透性可能较差。

6 泉华沉积与高原隆升的耦合关系

古堆地区经历了多期构造运动,区内断裂极其 发育,其在地热流体的迁移中起着重要的作用 (Sibson, 1996):一方面,三组不同方向的断裂将古 堆地热田切割成棋盘状,控制了古堆地热田水热蚀 变的分布;另一方面,地热流体沿着张性裂隙上升 过程中与围岩发生水-岩反应,地热流体逐渐由酸性 转变为弱酸性-中性,同时围岩也发生了不同类型的 蚀变,从而形成古堆地热田由酸性蚀变逐渐过渡为



图 8 古堆地热田水热蚀变概念模式图 Fig. 8 Conceptual model of hydrothermal alteration in Gudui geothermal field

弱酸-中性蚀变的分带模式(图 8)。地热流体排泄到地 表后,由于温度、压力降低、挥发分溢出等因素的影 响,二氧化硅或碳酸钙过饱和沉淀出来形成古堆地 热田大规模的泉华。青藏高原腹地藏南地区温泉多 与高原的隆升、南北向裂谷系统的发育有关,因此, 地热田中大规模、多期次的泉华与青藏高原不同阶 段的构造运动存在明显的耦合关系。

前人研究表明, 青藏高原大部分的泉华大多是 近1 Ma 以来形成的(李振清, 2002; 赵元艺等, 2006; Wang et al., 2016, 2017)。古堆地热田泉华可分为四 期, 第一期和第三期的泉华年龄分别为(70.6±13)万 年和(23.6±3.7)万年, 而(23.6±3.7)万年后还有一期泉 华沉积延续至今(李振清, 2002)。近1 Ma 以来, 昆黄 运动(1.1 Ma 至 0.6 Ma)和共和运动(150 Ka 延续至今) 使青藏高原发生了两次快速的隆升, 错那一沃卡裂 谷的活动速率也表现出末次盛冰期以来明显加大的 特征(刘志杰和孙永军, 2007; 吴中海等, 2008a), 而 古堆地热田在本次快速隆升过程中,发生了不同期 次的水热活动。

7 结论

(1)古堆地热田的水热蚀变类型多样,蚀变强度 大,主要的蚀变类型为绿泥石化、高岭石化、硅化、 碳酸盐化,泉华沉积则以钙华和硅华为主。西区的水 热蚀变类型主要为碳酸盐化,同时有大面积钙华及 少量硅华的沉积;东区的水热蚀变主要为绿泥石化、 高岭石化、硅化,同时出现大面积的钙华及硅华沉 积。部分地热显示区的水热蚀变存在明显的分带性, 呈现出从蚀变中心向外由硅化带过渡到高岭石化带 和绿泥石化带的趋势。

(2)古堆地热田的水热蚀变分布受到断裂构造的 控制,地热显示区多沿着断裂或断裂的交汇处分布。 水热蚀变的分布和蚀变强度表明, 布雄朗古显示区 和杀嘎朗嘎显示区可能是古堆地热田中最具资源潜 力的区域。

(3)古堆地热田的水热活动与青藏高原陆陆碰撞 过程密切相关,几次大规模的水热活动都与青藏高 原快速隆升和错那一沃卡裂谷的活动存在明显的耦 合关系。

Acknowledgements:

This study was supported by the Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research Program (STEP) (No. 2019QZKK0804), National Natural Science Foundation of China (No. U21A2015), Key Research & Development Program of Tibet (No. XZ202101ZY0014G), and Sinopec (No. P21083).

参考文献:

- 曹锐,多吉,李玉彬,蒙晖仁,蔡永强. 2022. 我国中深层地热 资源赋存特征、发展现状及展望[J]. 工程科学学报,44(10): 1623-1631.
- 陈传焰. 1987. 福州地热田的水热蚀变[J]. 福建地质, 6(3): 163-185.
- 多吉. 2003. 典型高温地热系统——羊八井热田基本特征[J]. 中国工程科学, 5(1): 42-47.
- 胡志华,高洪雷,万汉平,张松,郝伟林,吴儒杰.2022.西藏羊 八井地热田水热蚀变的时空演化特征[J].地质论评,68(1): 359-374.
- 李振清. 2002. 青藏高原碰撞造山过程中的现代热水活动[D]. 北京: 中国地质科学院.
- 刘昭, 陈康, 男达瓦. 2017. 西藏古堆地热田地下热水水化学特征[J]. 地质论评, 63(S1): 353-354.
- 刘志杰, 孙永军. 2007. 青藏高原隆升与黄河形成演化[J]. 地理 与地理信息科学, 23(1): 79-82, 91.
- 唐显春,王贵玲,张代磊,马岩. 2023. 青藏高原东北缘活动构造与共和盆地高温热异常形成机制[J]. 地球学报,44(1):7-20.
- 佟伟, 廖志杰, 刘时彬, 张知非, 由懋正, 章铭陶. 2000. 西藏温 泉志[M]. 北京: 科学出版社.
- 吴中海,张永双,胡道功,赵希涛,叶培盛.2008a. 藏南错那-沃 卡裂谷的第四纪正断层作用及其特征[J]. 地震地质,30(1): 144-160.
- 吴中海,张永双,胡道功,赵希涛,叶培盛. 2008b. 西藏错那-拿日雍错地堑的第四纪正断层作用及其形成机制探讨[J]. 第四纪研究, 28(2): 232-242.
- 薛帅, 卢占武, 李文辉, 王光文, 王海燕, 梁宏达. 2022. 青藏高 原错那-沃卡裂谷中部电性结构及其动力学意义[J]. 地学前 缘, 29(2): 393-401.
- 赵平, 多吉, 梁廷立, 金建, 张海政. 1998. 西藏羊八井地热田 气体地球化学特征[J]. 科学通报, 43(7): 691-696.
- 赵元艺, 聂凤军, 侯增谦, 李振清, 赵希涛, 马志邦. 2006. 西藏 搭格架热泉型铯矿床同位素特征及形成过程[J]. 矿床地质, 25(5): 613-619.
- 郑直, 吕达人, 周国平. 1987. 云南腾冲地热区高岭土的形成和 蚀变矿物组合特征[J]. 中国地质科学院矿床地质研究所所

刊, (2): 1-7.

- 朱梅湘,徐勇. 1992. 羊易地热田的水热蚀变及其热田演化[C]// 中国西藏高温地热开发利用国际研讨会论文选: 125-133.
- 朱梅湘. 1985. 云南省腾冲县热海热田水热蚀变岩石中的粘土 矿物[J]. 中国科学 B 辑, (12): 1130-1138.

References:

- BROWNE P R L. 1970. Hydrothermal Alteration as an Aid in Investigating Geothermal Fields[J]. Geothermics, 2(1): 564-570.
- BROWNE P R L. 1978. Hydrothermal alteration in active geothermal fields[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 6(1): 229-248.
- CHEN Chuan-yan. 1987. The hydrothermal alteration of Fuzhou geothermal field[J]. Geology of Fujian, 6(3): 163-185(in Chinese with English abstract).
- CAO Rui, DOR Ji, LI Yu-bin, MENG Hui-ren, CAI Yong-qiang. 2022. Occurrence characteristics, development status, and propect of deep high-temperature geothermal resources in China[J]. Chinese Journal of Engineering, 44(10): 1623-1631(in Chinese with English abstract).
- DOR Ji. 2003. The basic characteristics of the Yangbajing geothermal field—A typical high temperature geothermal system[J]. Engineering Science, 5(1): 42-47(in Chinese with English abstract).
- ELENGA H I, TAN Hong-bing, SU Jin-bao, YANG Jun-ying. 2021. Origin of the enrichment of B and alkali metal elements in the geothermal water in the Tibetan Plateau: Evidence from B and Sr isotopes[J]. Geochemistry, 81(3): 125797.
- HOLLAND H D. 1972. Granites, solutions, and base metal deposits[J]. Economic Geology, 67(3): 281-301.
- HU Zhi-hua, GAO Hong-lei, WAN Han-ping, ZHANG Song, HAO Wei-lin, WU Ru-jie. 2022. Temporal and spatial evolution of hydrothermal alteration in the Yangbajing Geothermal Field, Xizang(Tibet)[J]. Geological Review, 68(1): 359-374(in Chinese with English abstract).
- INOUE A, MEUNIER A, PATRIER-MAS P, RIGAULT C, BEAUFORT D, VIEILLARD P. 2009. Application of chemical geothermometry to low-temperature trioctahedral chlorites[J]. Clays and Clay Minerals, 57(3): 371-382.
- LI Zhen-qing. 2002. Present hydrothermal activities during collisional orogenics of the Tibetan Plateau[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences(in Chinese with English abstract).
- LIU Zhao, CHEN Kang, NAN Da-wa. 2017. Hydrochemical characteristics of geothermal water in Gudui, Xizang(Tibet)[J]. Geological Review, 63(S1): 353-354(in Chinese).
- LIU Zhi-jie, SUN Yong-jun. 2007. Uplift of the Qinghai-Tibet Plateau and formation, evolution of the Yellow River[J]. Geography and Geo-Information Science, 23(1): 79-82, 91(in Chinese with English abstract).
- MANAKA M, SHIMIZU T, TAKEDA M. 2020. Comparison of rock outcrop permeability with increasing distance from the Rokko fault zone[J]. Engineering Geology, 271: 105591.
- PAOLO F. 2020. Clay minerals in hydrothermal systems[J]. Minerals, 10(10): 919.

- SIBSON R H. 1996. Structural permeability of fluid-driven fault-fracture meshes[J]. Journal of Structural Geology, 18(8): 1031-1042.
- YOKOYAMA T, NAKAI S, WAKITA H. 1999. Helium and carbon isotopic compositions of hot spring gases in the Tibetan Plateau[J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 88(1-2): 99-107.
- TANG Xian-chun, WANG Gui-ling, ZHANG Dai-lei, MA Yan. 2023. Coupling Mechanism of Geothermal Accumulation and the Cenozoic Active Tectonics Evolution in Gonghe Basin, Northeastern Margin of the Tibetan Plateau[J]. Acta Geoscientica Sinica, 44(1): 7-20(in Chinese with English abstract).
- TONG Wei, LIAO Zhi-jie, LIU Shi-bin, ZHANG Zhi-fei, YOU Mao-zheng, ZHANG Ming-tao. 2000. Tibetan hot springs[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- WANG Chen-guang, ZHENG Mian-ping, ZHANG Xue-fei, XING En-yuan, ZHANG Jiang-yi, REN Jian-hong, LING Yuan. 2020. O, H, and Sr isotope evidence for origin and mixing processes of the Gudui geothermal system, Himalayas, China[J]. Geoscience Frontiers, 11(4): 1175-1187.
- WANG Si-qi. 2017. Hydrogeochemical processes and genesis machenism of high-temperature geothermal system in Gudui, Tibet[D]. Beijing: China University of Geosciences(in Chinese with English abstract).
- WANG Zhi-jun, MEYER M C, HOFFMANN D L. 2016. Sedimentology, petrography and early diagenesis of a travertine-colluvium succession from Chusang (southern Tibet)[J]. Sedimentary Geology, 342: 218-236.
- WANG Zhi-jun, MEYER M C, GLIGANIC L A, HOFFMANN D L, MAY J H. 2017. Timing of fluvial terrace formation and concomitant travertine deposition in the upper Sutlej River (Tirthapuri, southwestern Tibet) and paleoclimatic implications[J]. Quaternary Science Reviews, 169: 357-377.
- WANG Zhi-jun, YIN Jian-jun, CHENG Hai, NING You-feng, MEYER M C. 2022. Climatic controls on travertine deposition in southern Tibet during the late Quaternary[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 589: 110852.
- WEINERT S, BÄR K, SASS I. 2020. Thermophysical rock properties of the crystalline Gonghe Basin Complex (Northeastern Qinghai-Tibet-Plateau, China) basement rocks[J]. Environmental Earth Sciences, 79(3): 77.
- WEINERT S, BÄR K, SCHEUVENS D, SASS I. 2021. Radiogenic heat production of crystalline rocks in the Gonghe Basin Complex (northeastern Qinghai-Tibet plateau, China)[J]. Environmental Earth Sciences, 80(7): 270.
- WU Zhong-hai, YE Pei-sheng, BAROSH P J, WU Zhen-han. 2011. The October 6, 2008 Mw 6.3 magnitude Damxung earthquake,

Yadong-Gulu rift, Tibet, and implications for present-day crustal deformation within Tibet[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 40(4): 943-957.

- WU Zhong-hai, ZHANG Yong-shuang, HU Dao-gong, ZHAO Xi-tao, YE Pei-sheng. 2008b. Quaternary normal faulting and its dynamic mechanism of the Cona-Nariyong Co graben in south-eastern Tibet[J]. Quaternary Sciences, 28(2): 232-242(in Chinese with English abstract).
- WU Zhong-hai, ZHANG Yong-shuang, HU Dao-gong, ZHAO Xi-tao, YE Pei-sheng. 2008a. The Quaternary normal faulting of the Cona-Oiga rift[J]. Seismology and Geology, 30(1): 144-160(in Chinese with English abstract).
- XUE Shuai, LU Zhan-wu, LI Wen-hui, WANG Guang-wen, WANG Hai-yan, LIANG Hong-da. 2022. Electrical resistivity structure beneath the central Cona-Oiga rift, southern Tibet, and its implications for regional dynamics[J]. Earth Science Frontiers, 29(2): 393-401(in Chinese with English abstract).
- ZENG Ling-sen, GAO Li-e, XIE Ke-jia, JING Liu-zeng. 2021. Mid-Eocene high Sr/Y granites in the Northern Himalayan Gneiss Domes: Melting thickened lower continental crust[J]. Earth and Planetary Science Letters, 303(3-4): 251-266.
- ZHAO Ping, DOR Ji, LIANG Ting-li, JIN Jian, ZHANG Hai-zheng. 1998. Gas geochemical characteristics of Yangbajing Geothermal field, Tibet[J]. Chinese Science Bulletin, 43(7): 691-696(in Chinese).
- ZHAO Yuan-yi, NIE Feng-jun, HOU Zeng-qian, LI Zhen-qing, ZHAO Xi-tao, MA Zhi-bang. 2006. Isotope characteristics and formation process of hot spring type cesium deposit in Targejia, Tibet[J]. Mineral Deposits, 25(5): 613-619(in Chinese with English abstract).
- ZHENG Zhi, LÜ Da-ren, ZHOU Guo-ping. 1987. An investigation on the assemblage of geothermal alteration minerals and the formation of the Kaolin deposit in Tengchong geothermal area, Yunnan Province[J]. Bulletin of the Institute of Mineral Deposits Chinese Academy of Geological Sciences, (2): 1-7(in Chinese with English abstract).
- ZHU Mei-xiang, XU Yong. 1992. Hydrothermal alteration and evalution in the Yangyi geothermal field of Tibet, China[C]//Selected papers of the International Symposium on the development and utilization of high temperature geothermal energy in Tibet, China: 125-133(in Chinese with English abstract).
- ZHU Mei-xiang. 1985. Clay minerals in hydrothermal altered rocks in Rehai thermal field, Tengchong County, Yunnan Province[J]. Science in China Series B, (12): 1130-1138(in Chinese).