

2-7 地热系统模型

2-7 地热系统模型

2-7-1 地质构造

(i) 羊八井广域地质构造和地热构造

西藏地热地质大队、「喜马拉雅-青藏高原深部探测(INDEPTH)」及其它调查研究,对包括羊八井在内的广域地质构造进行过探讨。吴珍汉等(2003)著的「青藏高原腹地的地壳变形与构造地貌形成演化过程」一书中对这些成果进行了总结。在此,引用这些内容,对羊八井周边的广域地质构造给予概述。

以下引用了吴珍汉等(2003)在第四章第三节的内容:「四,当雄-羊八井,盆地-山地构造地形的发展过程」。

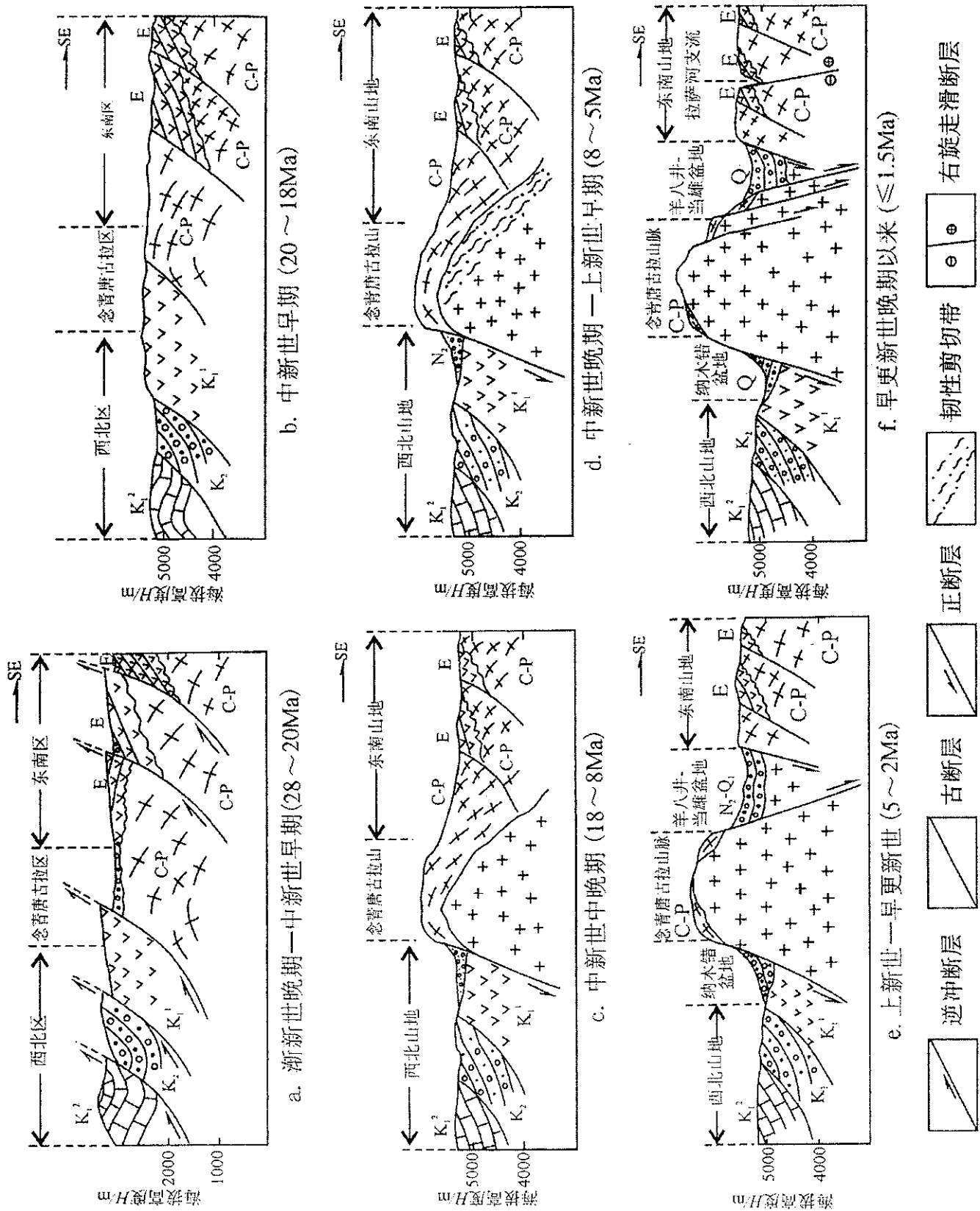
「综合各种观测资料,认为测区构造地貌演化经历了28~20Ma、20~18Ma、18~8Ma、8~5Ma、5~2Ma、1.5~0Ma多个不同阶段,逐步形成现今中部盆地-山相间的构造地貌格局。

①渐新世晚期~中新世初期(28~20Ma),冈底斯-拉萨地块发生强烈挤压缩短地壳增厚事件,形成冈底斯逆冲推覆构造(GTS)与旁多逆冲推覆构造,纳木错构造带也发生逆冲构造运动,导致古近级林子宗组及下伏地层发生区域性褶皱变形和早期岩石地槽的构造隆升;强烈的区域构造挤压导致断块山和压陷盆地相间分布,形成起伏不平的地貌景观(图2-7-1a)。在挤压缩短增厚过程中,由于重力均衡效应地表海拔高度逐渐增大。

②中新世早期(20~18Ma),由于长期强烈挤压,地壳发生巨量缩短,形成双倍地壳;双倍地壳经重力均衡导致地表隆生到海拔4500~5500m高度,测区进入地壳挤压缩短增厚期后构造地貌发展阶段,区域构造活动性相对较弱,剥蚀夷平居主导地位,逐级形成缓起伏高原面或高原剥夷面(图2-7-1b)。区域构造环境发生自挤压短缩向伸展走滑的重大转换。同时增厚地壳在17~20km深度形成局部熔融体,并在局部熔融体顶部分异和汇集花岗质岩浆。

③中新世中晚期(18~8Ma),地壳转化为区域性伸展构造环境,在上地壳下部(13~20km)继续发生大规模局部熔融、导致巨量花岗质岩浆沿念青唐古拉发生被动侵位和结晶成岩。在岩浆浮力作用下,念青唐古拉山脉开始缓慢隆升,东、西两侧旁多山地和纳木错地块相对下降(图2-7-1c)。

④中新世末期(约8~5Ma),在念青唐古拉地块与东南部羊八井-当雄-旁多地块之间,发生区域性拆离滑脱事件,形成念青唐古拉山东部NE向展布的大型低角度韧性剪



出处：吴珍汉·叶培盛·胡道功等(2003)

图 2-7-1 西藏当雄羊八井地区构造地貌形成过程模式图

切带(NSZ), 导致念青唐古拉山 NW 方向的掀斜和旁多山地向 ES 方向拆离滑脱运动(图 2-7-1 d)。

⑤上新世—早更新世(5~2Ma), 在念青唐古拉山东侧发生裂陷, 随着念青唐古拉山脉快速隆升, 两侧地块发生快速裂陷, 逐步形成羊八井—当雄裂陷谷地, 发育当雄、宁中、拉多岗、羊八井裂陷盆地, 形成北东—北北东向盆—山构造地貌。在羊八井—当雄盆地两侧即盆地与山脉之间, 形成 NE 走向的高角度边界正断层; 晚期高角度边界脆性断层切割早期低角度糜棱岩带, 形成内部相对平坦的盆地面; 同期在西北部形成纳木错西岸山地开始隆升, 纳木错盆地开始裂陷, 形成念青唐古拉西缘边界正断层(图 2-7-1 e)。

⑥早更新世晚期以来($\leq 1.5\text{Ma}$), 羊八井—当雄地堑伸展断层活动和盆地裂陷加剧; 盆地面海拔高度进一步降低, 裂陷中心盆地面平均海拔高度降低至约 4400m; 同期形成古仁拉—羊八井、车玛千拉—旁多、申错—曲古等 NW 向走滑断层, 并沿 NW 向走滑断裂带逐步形成古仁曲、藏布曲、拉萨河上流旁多支流与羊八井峡谷、乌鲁龙峡谷、曲古—九子拉峡谷及多级河流阶地等构造地貌(图 2-7-1 f)。晚更新世—完新世在西北部形成纳木错盆地与面积 10 万 km² 的古大湖, 古大湖在逐步退缩过程中形成最高达 139m 的多级湖积阶地。

第四纪中晚期断裂活动、河流侵蚀与风化剥蚀加剧了不同山地主夷平面或山顶面的裂解和分异, 逐步形成盆地—山相间分布的构造地貌格局, 崎岖陡峭的山岳地貌景观和规律性展布的沟谷、水系网络; 沿现代河发育 2~6 级河流阶地, 河流侵蚀加剧, 在旁多山地和念青唐古拉山形成深切峡谷, 最终塑造出现今颇具特色的地貌环境。】

(ii) 羊八井地区的地质构造

(1) 地质层序

羊八井地热田的地层从下到上大致分为: 念青唐古拉群, 花岗岩类, 下第三系以及第四纪沉积物。

1) 念青唐古拉群

念青唐古拉群分布在羊八井地热田西北方的念青唐古拉山脉。念青唐古拉群是由前震旦系的片麻岩、结晶片岩以及花岗岩等组成。

2) 花岗岩类

花岗岩类是由燕山期花岗岩、喜山期花岗岩、花岗斑岩等组成。燕山期花岗岩

是在燕山期（白垩纪）侵入的岩体，分布于地热田东南部。喜山期花岗岩是在喜山期（从白垩期到第三纪）侵入的岩体，分布于地热田西北部。花岗斑岩被确认分布于 CJZK3001 井深度 814~1,350 m 和 ZK4002 井深度 489~616m 的区间范围内，并且侵入到花岗岩体中，但是侵入时期不明确。

3) 下第三系

下第三系是由各种火山喷出物形成，出露于念青唐古拉山脉东南山麓（地热田的西北部）和藏布曲右岸的唐山山脉西部山麓。很多羊八井地热田的钻井已确认分布在下第三系。在地热田西北部与喜山期花岗岩呈不整合覆盖接触，在地热田东南部与燕山期花岗岩呈不整合覆盖接触。

4) 第四纪沉积物

第四纪沉积物主要是由砾、砂、泥等组成的冰河沉积物。冰河沉积物的粒径差异较大，属于砾构成的无层理岩相。由于砾没被淘汰，有的表面仍留有擦痕。

(2) 断裂构造

羊八井地区的低角度念青唐古拉韧性剪切带(NSZ)和高角度正断层群是形成地热储层的重要断裂构造。

1) 念青唐古拉韧性剪切带(NSZ)

根据 INDEPTH 的地震波解析，在羊八井地下 1,000~1,500m 附近，存在北东走向、向南东约 30 度倾斜的折射波速度构造急变面。该急变面在剪切带具有正断层的性质，被命名为「念青唐古拉韧性剪切带 (NSZ)」。NSZ 的厚度认为有数公里。羊八井地区的 CJZK3001、ZK4001、ZK4002 及 ZK352 井出现的糜棱岩分布区与 NSZ 相当，而 NSZ 的深度和倾斜度与该地区深部热储层的深度、倾斜度基本一致（图 2-7-2）。但是，NSZ 是在 8~5 Ma 前的韧性剪切带中形成的糜棱岩，而不是脆性的破坏，所以仅此很难成为形成热储层的裂隙群。另一方面，羊八井地区分布着多数从 5 Ma 到现在活动的高角度正断层。可能 NSZ 上面的易滑动部分与高角度正断层交叉部位发育的裂隙群是形成深部热储层的原因。而且，推断该高角度正断层到达的更深部位是来自于深部热源附近地热流体的上升通道。

2) 根据地表调查查明的断层

根据地表调查查明的断层有 10 条 (F1~F10) (图 2-7-3 (1)、(2))。断层分 3 个系统 (NNE-SSW 系, NE-SW 系, N-S 系~NNW-SSE 系)，且都穿过第四系。沿着这些断层，根据喷气、变质带的有无，热水蚀变的程度等来评价地热流体的流动

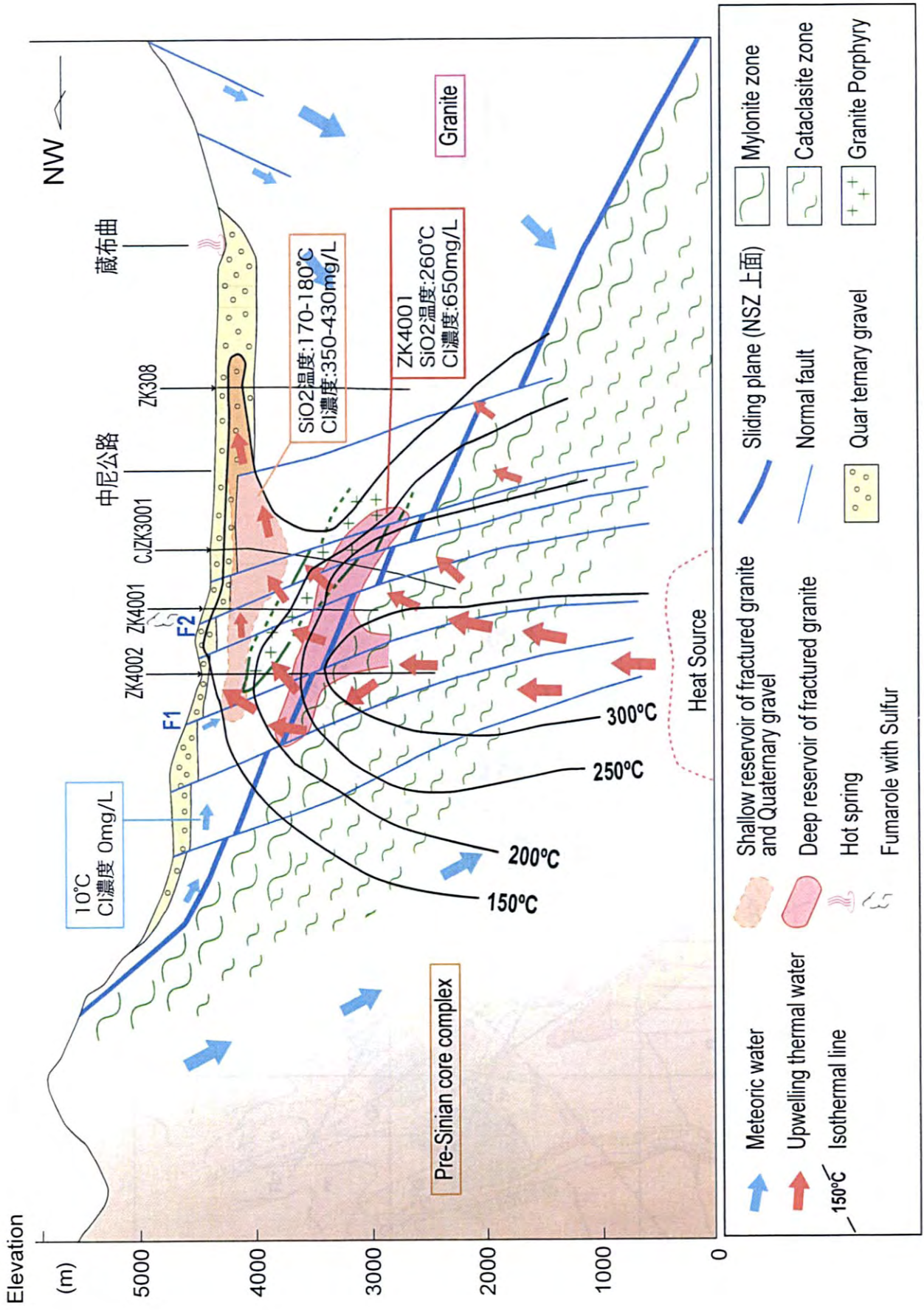


图 2-7-2 羊八井地热田水热系统概念模型图

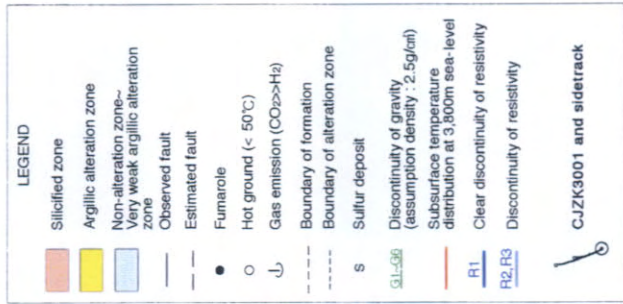
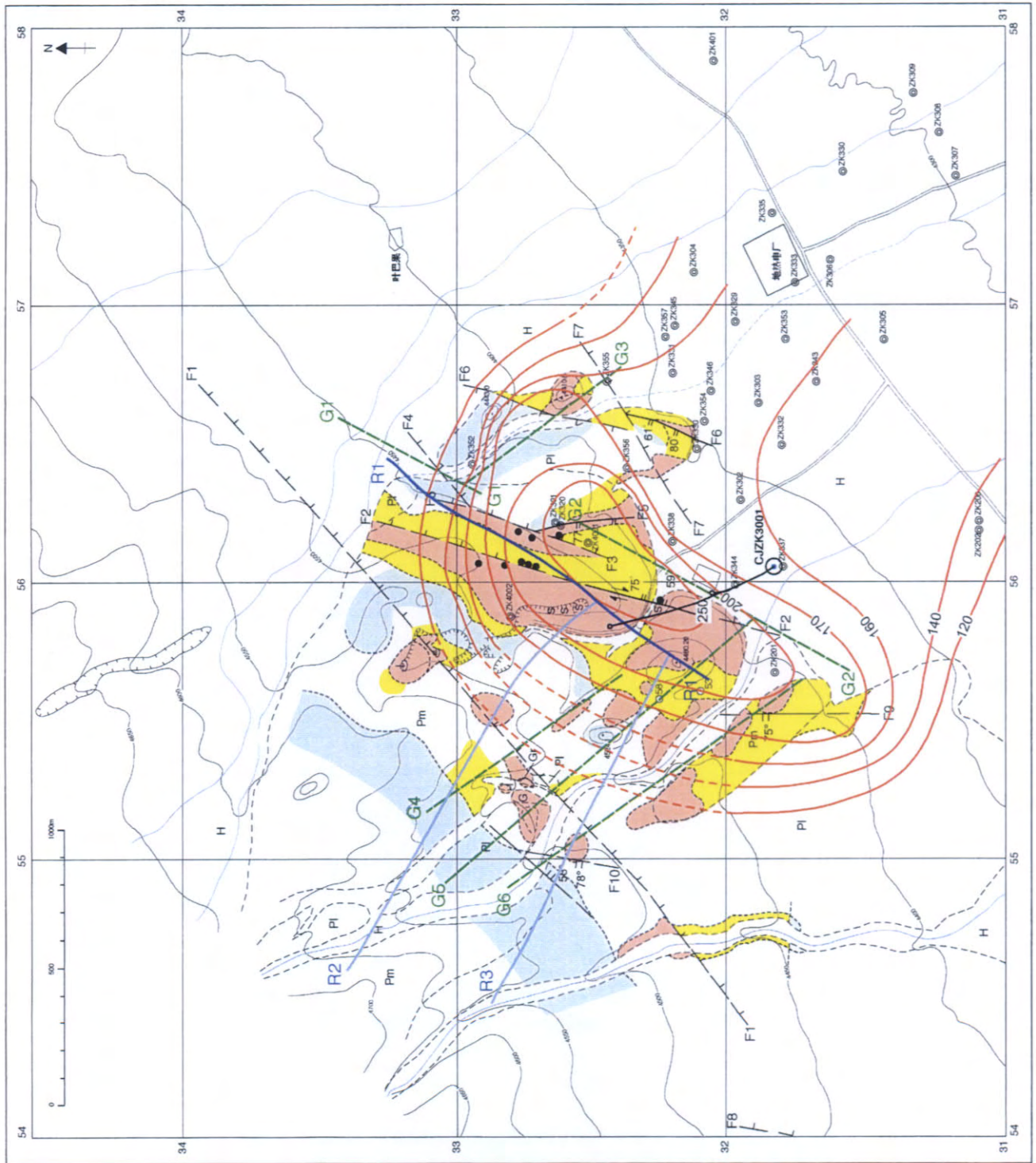


图 2-7-3 (1) 羊八井地热田调查综合图 (1)

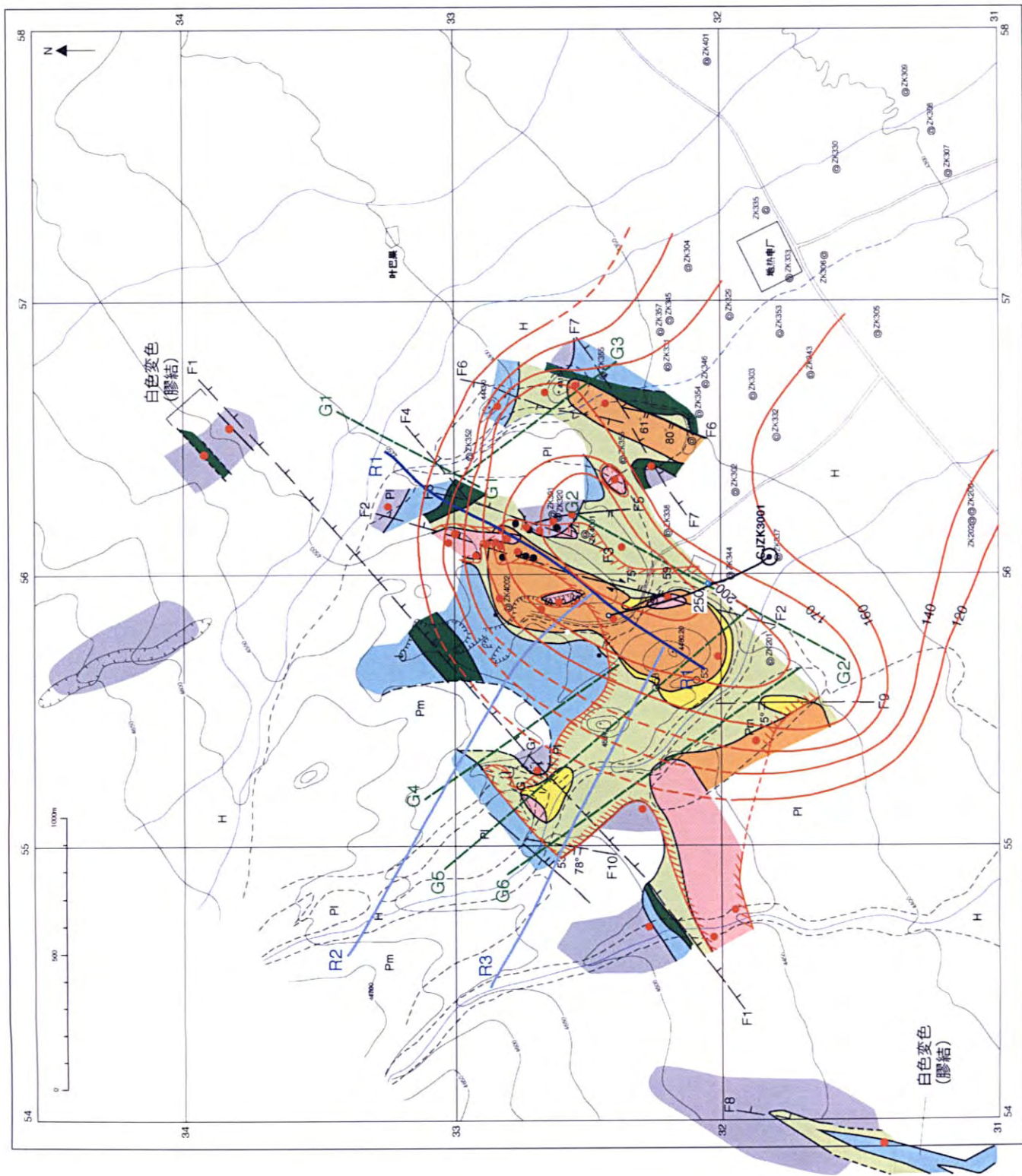


图 2-7-3 (2) 羊八井地热田调查综合图 (2)

程度。F2 被评价为热水流动活跃的断层，其西北侧的透水性可能比较高。

3) 用物理探测法推测断层

断层 F2 显示有电阻率结构及重力结构。通过 MT 探测的二维解析可以确定，硫黄村附近显著的 NNE-SSW 系电阻率不连续线反映了断层 F2 的存在（图 2-7-3 (1), (2)）。推断这种电阻率不连续线从地表附近一直延伸到深度 1700 m 的地方，并且形成了西北侧高电阻率区域和东南侧低电阻率区域的分界线。根据重力探测的结果发现，硫黄村附近 NNE-SSW 方向的重力不连续线也显示了断层 F2 的存在。对于断层 F6，由于沿 F6 有硅化带和明矾石带分布，说明地热流体有可能沿 F6 流动（图 2-7-3 (1)、(2)）。

2-7-2 热源

根据 INDEPTH 的共通中间点反射法地震探测等的调查结果，羊八井地区地下 14~18km 的深度为存在的部分熔融体的顶部（图 2-7-4）。熔融体的岩浆是热源的根源。羊八井地热田热源的观点分为以下 2 种：

- ①假定地下 14km 处熔融体温度是 700℃，从该深度往上到地下 6 km 左右，热通过热传导传递后，在地下 6 km 深处的温度变为大约 300℃。在地下 6 km 以上，流体发生对流，即使在地下约 2 km 处温度也几乎为 300℃。
- ②从地下 14~18km 的深度岩浆局部上升，在羊八井地下 6 km 左右的地方形成岩浆房，现在存在的是冷却、凝结了的 400℃左右的高温岩体。这便是羊八井的直接热源，在此热源的上部发生热水对流。

2-7-3 地下温度分布

羊八井地区钻了很多浅部井，浅部的温度分布较明确。海拔在 3,800m 的高温区域从硫黄村西北地区经 ZK4001、ZK320 井，向 NE-SW 方向延伸 1.5km 左右。中心地区的温度在 250℃以上，断层 F2 所在的地区温度最高（图 2-7-3 (1)、(2)）。根据温度分布情况，高温地热流体上升地域推测为沿断层 F2 向 NNE-SSW 方向或 NE-SW 方向延伸的地区。

本地区的深部井有 ZK308 (1,726.41m)、ZK4001 (1,459.09m)、ZK4002 (2,006.8m) 和 CJZK3001 (2,254.5m)。除 ZK308 井在南部地区，其它均是在北部地区进行的钻探。本地区实测到的最高温度是位于最北的 ZK4002 井，其温度为 329.8℃（深度 1,850m）。ZK4002 井显示了在深度大约 1,000m 以下为 300℃以上的高温。ZK4001 井和 CJZK3001 井的温度均没

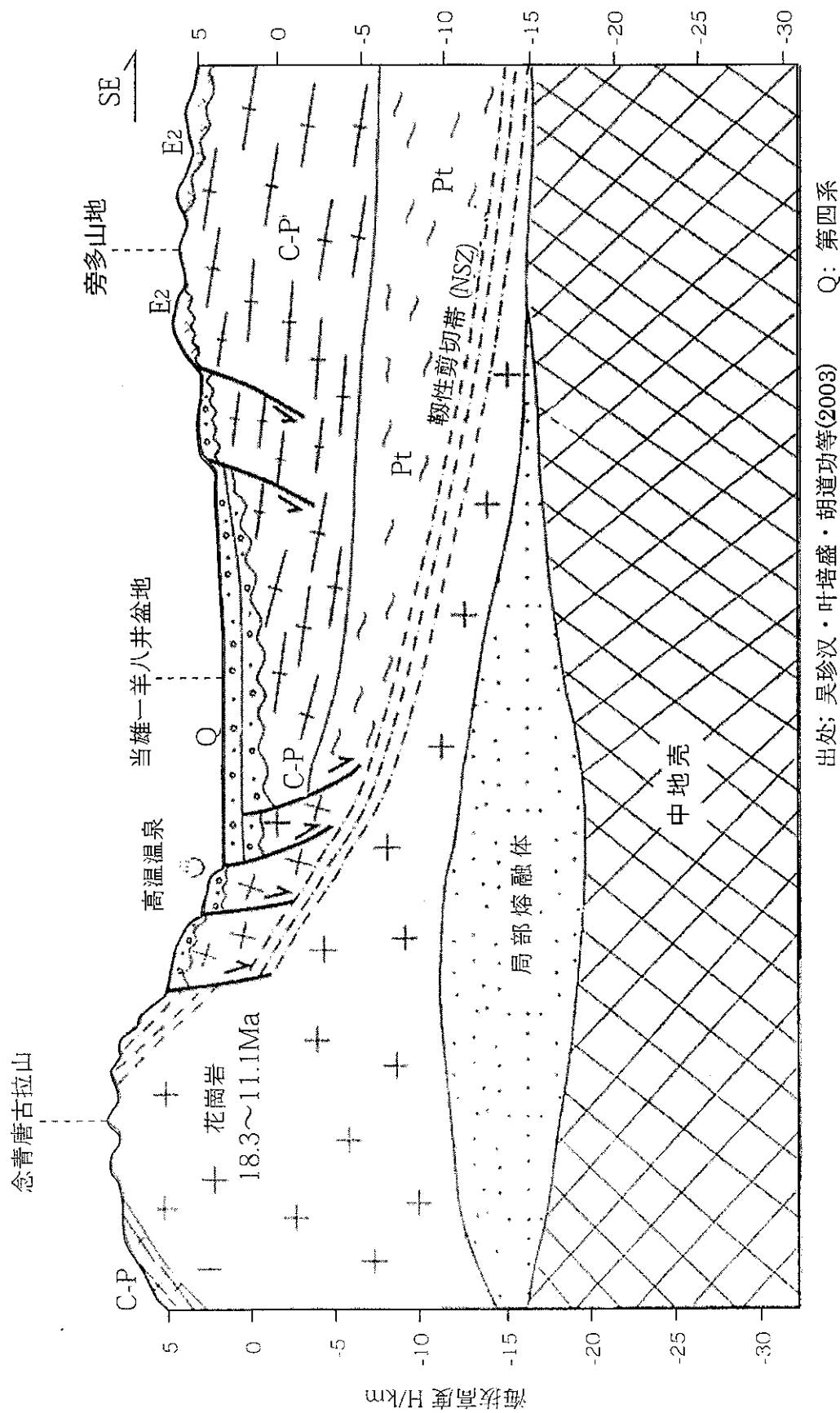


图 2-7-4 当雄羊八井盆地活动断裂构造模式图

出处: 吴珍汉·叶培盛·胡道功等(2003)

Q: 第四系
E2: 始新统
C-P: 石炭-二叠系
Pt: 元古代

达到 300℃，最高温度分别为 251.02℃（深度 1,125m）和 270.87℃（深度 1,404m）。以上两井与 ZK4002 井的距离大约有 400m，仅在 ZK4002 井的深部为 300℃以上的高温区域。另一方面，位于最南面的 ZK308 井在深部 1,700m 处的温度很低，在 150℃以下。这显示了羊八井地区主要流体上升区域在北部（图 2-7-2）。

2-7-4 地球化学模型

在羊八井地热热储层中，深部地热流体的性质与浅部的有所不同。深部热水处于高温状态下，Cl 浓度较高，是从深部直接上升的流体。浅部热水则是由深部热水与地表水（或是地表附近滞留的温泉水）混合而形成的。综上所述（图 2-7-2），羊八井地区的地热热水是从羊八井周边地区渗透到地下深部的河川水和雨水被深部热源加热后形成的深部热水。深部热水沿着与羊八井北部地下深处的高倾角正断层相伴的高渗透率带上升，在 NSZ 上部易滑动部位与高倾角正断层相交结的深度 1,000~1,300m 附近低角度扩展形成了深部热储层。深部热水从深部热储层又继续沿着高倾角的正断层上升，在上升途中与从周边流入的地表水或温泉水混合形成了浅部热水。浅部热水沿着地貌和流体的受压方向，在浅部形成了由北部向南部流动的浅部热储层。

2-7-5 地热系统概念模型

图 2-7-2 显示了本地区地热系统概念模型。

羊八井地热田位于沿念青唐古拉山脉南麓和唐山山脉北麓由伸展性断层形成的羊八井—当雄盆地。

地表附近分布着较薄的第四系砂砾层和下第三系火成岩类岩层，以下为花岗岩类地层。花岗岩地层中存在着大约 8~5Ma 时期形成的走向东北、向东南倾斜 30 度的念青唐古拉韧性剪切带（NSZ），北部的深部井贯穿了相当于 NSZ 的糜棱岩带。另一方面，在地表能观测到的高倾角正断层群伴随着附近的蚀变带和喷气，成为来自地下深部流体的通路。

在本地区地下 14~18km 深处存在着岩浆。另一方面，在 ZK4002 井深度 1,000m 以下为 300℃以上的高温区域（深度为 1,850m 时，温度最高达 329.8℃），在地壳浅部的某些地方可能有岩浆房形成。

在本地区由地下热源加热的高温流体从 ZK4002 井深部上升，在 NSZ 附近高透水性发育区域形成了 Cl 浓度为 650mg/l，硅岩温度为 260℃的深部热储层。而且，流体从 NSZ 和高倾角正断层群交叉部位上升，其中一部分与地表水混合形成了大规模的酸性蚀变带和硅华

等。在北部地区由于地表水和深部热水混合，形成了 Cl 浓度为 350-430mg/l，硅岩温度为 170-180℃的浅部热储层流体。浅部热储层流体向东南部方面流动形成了 150℃左右的浅部热储层。

2-7-6 地热数据库的建立和使用

羊八井地区从 20 世纪 70 年代到现在进行了各种调查，积累了许多调查数据。而且随着地热发电站的运行各种数据也非常多。但是这些数据只被整理为档案资料，在分析地热热储层结构和评价热储层时很难被利用，因此将来需要积累更多的数据。为此，本开发调查计划利用计算机建立了地热数据库，利用此数据库进行地热系统模型探讨和热储层评价工作。数据库软件是由日本的地热技术开发株式会社开发，使用了在日本也被广泛应用的 G★BASE。