

中国地质科学院

水文地质工程地质研究所 所 刊

第 2 号

地质出版社

中国地质科学院

水文地质工程地质研究所
所 刊

第 2 号

地质出版社

目 录

西藏羊八井地热资源评价.....	羊八井地热专题研究组 (1)
利用遥控航模进行水土流失定量分析试验研究	
.....	利用遥控航模进行水土流失定量分析研究组 (53)
冀中拗陷地下水成生史与油(气)田形成之间的规律性研究	
.....	汪蕴璞 王焕夫 王翠霞 赵国红 (85)
常州市地面沉降区粘性土的工程地质性质	
.....	凌泽民 阎世骏 郑茵 石秀峰 (121)
论黄河冲积平原中、上部的地质—地理背景和区域性土壤改良水文地质条件	
.....	石长青 董玉良 (151)
SWY—1型遥测水位仪的研制.....	王君为 荆恩春 (177)

中国地质科学院
水文地质工程地质研究所所刊
第 2 号

责任编辑: 张新兴 殷正宙

地质出版社出版

(北京西四)

地质出版社印刷厂印刷

(北京海淀区学院路29号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

开本: $787 \times 1092^{1/16}$ 印张: 12 字数: 2890,000

1986年11月 北京第一版·1986年11月 北京第一次印刷

印数: 1—1,930 册 定价: 2.70 元

统一书号: 13038·新267

BULLETIN OF THE INSTITUTE OF HYDRO- GEOLOGY AND ENGINEERING GEOLOGY OF THE CHINESE ACADEMY OF GEOLOGICAL SCIENCES

No.2

CONTENTS

An Assessment of Geothermal Resources in Yangbajing, Xizang (Tibet)	
..... <i>Research Group of Geothermics of Yangbajing</i>	(51)
Application of Remote Model Airplane Method to Quantitative	
Estimation of Soil Erosion process	
..... <i>Group of "Monographic Study"</i>	(76)
A Research of the Laws between Formational History of Groundwater and	
Geneses of Oil-Gas Field in Jizhong Depression..... <i>Wang Yunpu et al.</i>	(119)
Engineering Geological Properties of Cohesive Soil in the Area of Land	
Subsidence in Changzhou City..... <i>Ling Zemin et al.</i>	(147)
Geologic-geographical Background and Hydrogeological Conditions for Regional	
Melioration in the Middle and Upper Parts of Huanghe Alluvial Plain	
..... <i>Shi Changqing et al.</i>	(175)
The Design and Manufacture of the Remote Water Level Recorder	
SWY-1..... <i>Wang Junwei et al.</i>	(188)

Geological Publishing House
(Xisi, Beijing)

Institute of Hydrogeology
and Engineering Geology
(Zhengding County, Hebei province)

西藏羊八井地热资源评价

AN ASSESSMENT OF GEOTHERMAL RESOURCES IN YANGBAJING, XIZANG (TIBET)

羊八井地热专题研究组^①

一. 羊八井盆地的现代水热活动

羊八井热田地表见到的水热活动主要有：沸泉、硫质喷气、自然硫、低温热液矿物——辰砂、辉锑矿、雄黄、黄铁矿等的析出及围岩蚀变——次生石英岩化、高岭土化。我们在实际资料基础上提出，这些水热活动可以统一归结为：地壳表层一股直径约 6km, 富含酸性气体的高温热流体的垂直上涌；形成这股热流体上涌的深部地质背景是大陆裂谷作用。根据这一模式，我们指出羊八井热田浅层热储和基岩热储的最佳开采位置，并初步论证盆地内可能存在与羊八井热田相似的其它共生热田。

一、区域地质特征

主要从地面地质，物探重、磁、电测量，孢粉和重矿物分析结果，阐述地区的地质特征。

(一) 概 述

如果以地表水系作标志，羊八井盆地范围北起青藏公路153道班拿多拉，南到吉达果（图6），谷地面积约 600km²。盆地发育在念青唐古拉山系东南麓北东走向的区域性深大断裂上，航磁资料（费鼎等，1981）表明，该断裂是藏北、藏南基底的物性界线，该线西北，地壳刚性较大；该线东南刚性较小。地质单元划分上亦是一条重要界线，至少从中生代以来，两侧的岩浆活动，变质作用和沉积作用都有显著区别。同时亦是一条地震带和温泉密集带，从桑雄到谢通门超过当地沸点的温泉有七处，羊八井是其中之一。

本区最老的地层为前泥盆纪（？）片麻岩系，其最新变质作用年龄（当雄花岗片麻岩样）为 22.1Ma。片麻岩之上分布石灰—二叠纪一套浅变质岩，其上不整合覆盖了白垩系，上白垩统为陆相火山碎屑建造，在盆地周边广泛出露。第三系是以一套安山岩为主的火山

① 本文由姚足金（第〈一〉部分）、张锡根、安可士（第〈二〉部分）、郑灼华（第〈三〉部分）编写。参加本专题作的还有烟献军、胡循森、何世春。专题负责人安可士、姚足金。

岩系,分布在局部小山包上。岩浆岩主要为花岗岩,羊八井岩体年龄61—68Ma,雪古拉岩体37Ma。第四纪以来地面未见火山活动。

羊八井热田地区,盆地基底主要为花岗岩,其上直接覆盖第四系。盆地中的第四系主要为冰碛和冰水成因系列,在山麓能见到多层叠置洪积扇,在谷地为由冰水砂砾组成的平原和若干零星散布的冰碛砾石台地,地热电厂和大部分生产井都位于全新世冰碛砾石组成的台地上。流经热田的藏布曲河时代很新,流水堆积仅限于河床两侧。大致沿青藏公路流经羊八井区政府附近的雪古曲河,在早期发育了规模较大、形态完整的冲积锥横拱在热田东北。盆地中第四系厚度一般为300m,最厚可达500m。

羊八井热水的基本化学类型和盆地中许多其它温泉类似,为矿化度不高(1.5g/L)微碱性(pH7—8)氯化钠型水,微量组份中硼、锂含量较高,气体组份中CO₂、H₂S和H₂含量较高。

(二) 水热活动发育的地质时代

我们选定三个地点的天然剖面采集孢粉样和重砂样,进行气候地层划分和重砂矿物研究,建立了本区第四系地层剖面(图1)。从地层研究可知:1.盆地底部没有发现第三纪沉积地层,基岩上的最老地层为下更新统,其分布范围局限,盆地内广泛分布的是中更新统及其以后地层。2.硫磺矿第四纪地层完全可与附近天然剖面和热田钻孔岩屑对比,由于附近剖面中不存在火山沉积,因此排除了硫磺矿蚀变第四系岩石具有火山凝灰结构的可能。3.以植被景观为标志,第四纪气候(热量、水份)经历了下列演变:寒冷阴湿(Q₁)→?→干凉草原(Q₂)→寒冻荒漠→灌丛草甸→干凉草原(Q₃)→干凉草原转暖→(全新世)。

由景观演变可知,自中更新世起,气候日趋干旱,因此最大的冰期可能出现在中更新世,随着大气水份减少,冰川规模渐趋缩小,但直到全新世,本区谷地仍有冰川流动。我们在一火山岩基岩鼓丘和一花岗岩质大漂砾上,找到方向都为NE28°的大片冰川擦痕和压坑,而这两者相距7km,中间还隔着一一条藏布曲河。

在温泉附近硅华胶结的砂砾岩表面,我们找到冰川擦痕和磨光面;在全新世冰碛台地上部找到碳酸钙成份的泉华碎块;在王日错自然陡壁剖面上的上更新统和中更新统砾、砂堆积中,找到几粒鲜红色的雄黄矿物,因为它很易风化破碎,不可能远途搬运,而附近老地层中并无这类矿物,因此确定为与碎屑物质同时沉积的温泉成因的矿物碎屑。这样,本区水热活动的地质时代可确定为:自中更新世以来,经上更新世、全新世一直延续至今。

(三) 水热活动区地质结构特征

我们在盆地两侧边缘,从东北端拿多拉一带,到硫磺矿、王日错、中尼公路40 km路碑山口等地,在基岩山体与第四纪盆地接界部位,断续见到许多上盘向盆地内下滑的张性断裂,涉及的地层主要有第三纪安山岩和中更新世、上更新世砂砾石层,这类断层延伸不远,断距一般为几米;但在盆地两侧基岩山体中见到许多规模巨大的挤压性结构面,如羊八井转运站后沟,糜棱花岗岩宽达百米,中尼公路39km处,雪古拉岩体中的糜棱岩宽达140 m,念青唐古拉山前大断裂上发育的压溶性硅质岩,宽500—2000m,青藏公路边,七弄朵至白穷一线亦见白垩纪凝灰岩被压溶成厚300m、长6km的硅质岩带。

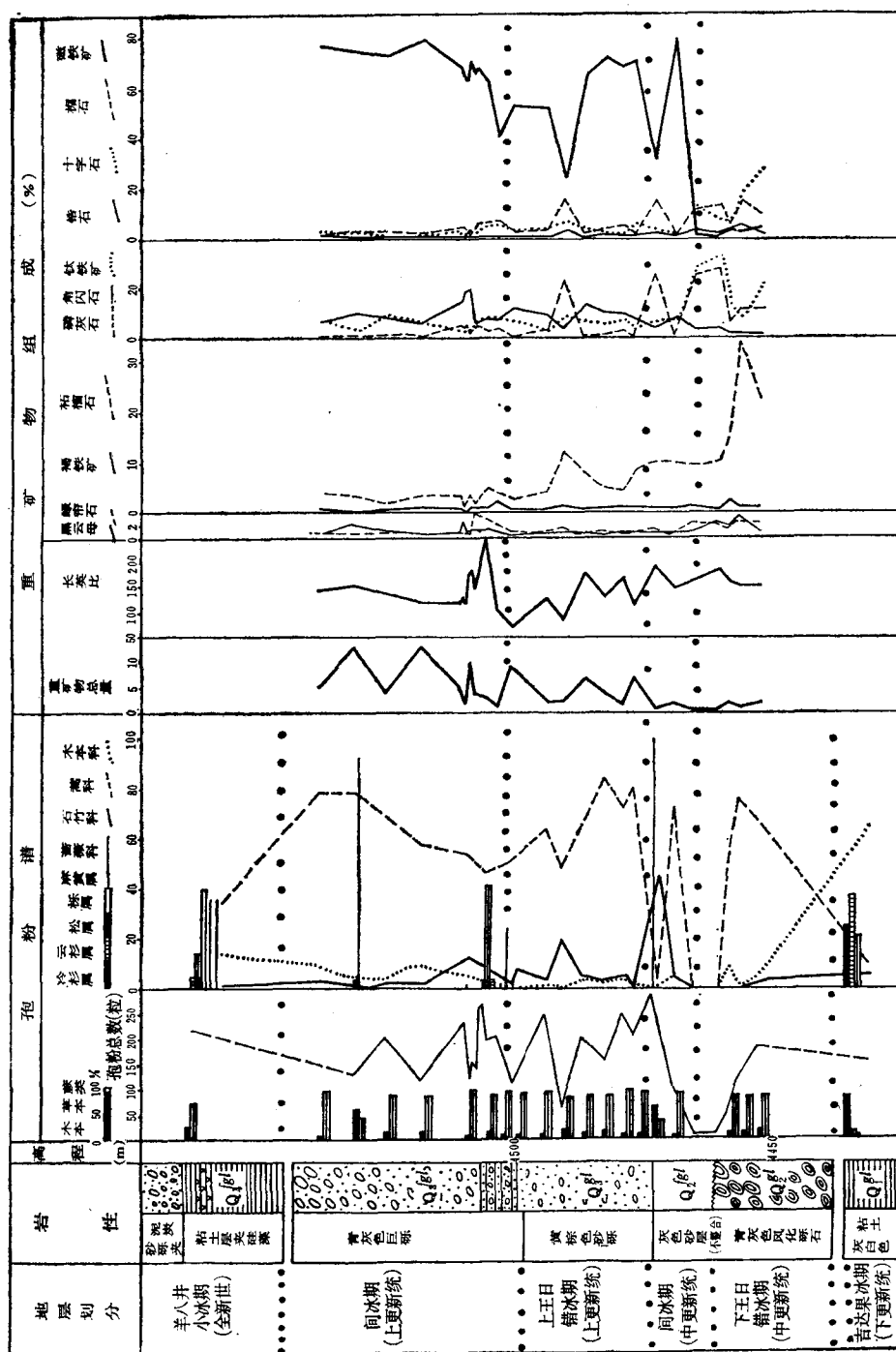


图 1 羊八井盆地第四纪地层划分
Fig. 1 Stratigraphic division on Quaternary System at Yangbajing basin

在念青唐古拉山麓大断裂通过的嘎罗棍巴等地,可以见到规模巨大的压溶硅质岩,但同时以张性断裂三角面与盆地相接,沿该带见到多处规模很小的硫质喷气孔,正在产出自

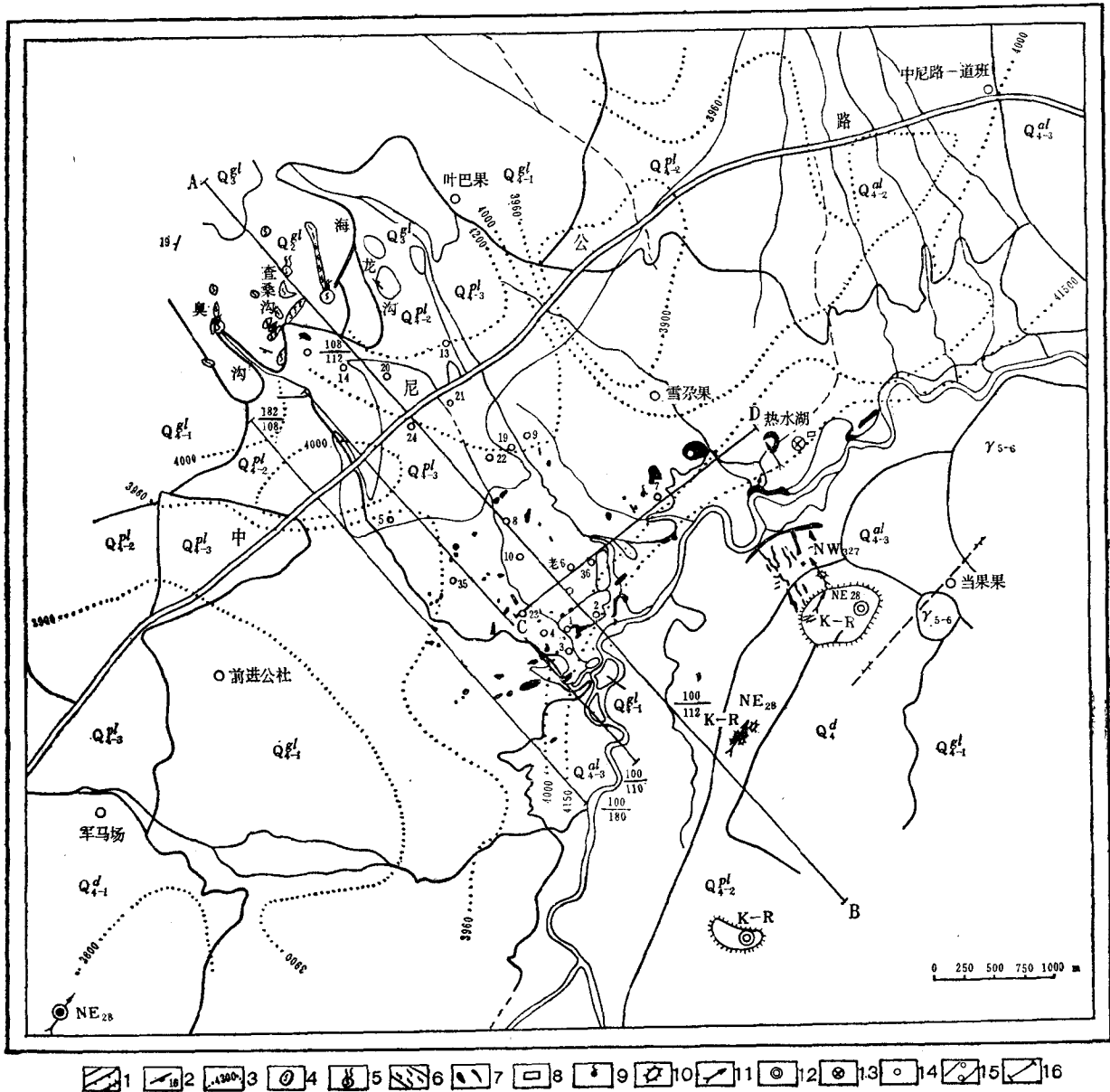


图 2 羊八井热田地质略图

Fig. 2 Schematic map of geology in Yangbajing geothermal field

- 1—断层: 正断层, 逆断层; 2—地层产状; 3—基岩面等高线; 4—硫华; 5—喷硫气孔; 6—硅化蚀变; 7—泉华及泉胶砂岩; 8—古碳酸泉点; 9—温泉; 10—鼓丘及羊背石; 11—冰溜条痕; 12—漂砾; 13—石器地点; 14—钻孔编号; 15—地质横型剖面线; 16—电测深剖面

然硫和发生叶腊石蚀变。联系到盆地所见张性断裂时代都很新,使我们得出下列认识:第四纪(很可能中更新世)以来,念青唐古拉山前大断裂带的力学性质由原来的压性转变为张性;愈近盆地中心,带有重力调整性质的张性断裂愈发育。在硫磺矿、王日错一带,从中、上更新统显示的层理可知,这些张性断块呈现向山区方向挠起,视倾角为 4° 和 7° 。

我们根据电测深成果参考钻孔资料编制了基岩面等高线图(图2)。从图可知:1.整个基岩槽地的东北部已收敛闭合,槽地两头下陷,中间隆起,隆起幅度最大可达百余米。2.“隆起”的整体呈北西走向,西北部与硫磺矿地区相接,是由起伏不等的小块拼成,大致可以3960m高程线圈定。3.根据重、磁异常解释的中尼公路北侧附近的“基性岩柱体”(?),它位于该隆起的闭合的4000m高程处;羊八井热田全部地热显示,亦都发育在这隆起断块体上,在这范围外的钻孔,水温都接近正常地下水。

电法资料表明,隆起的基岩块中分布大量断裂,这些断裂可能是以北西向四条为主干北东向五条与之共轭。

我们曾根据地面地质判断:第四纪地层存在轴向 $NW320^{\circ}$ 的隆起变位,并指出其轴部位置在硫磺矿热沟至热田2号井一线。第四系北西轴向隆起,地热显示和基底隆起,这三者在分布上的一致性,可以推论:中更新世以来,随着盆地形成发生的断块隆起,出现了本区的水热活动。

二、现代水热活动

水热活动,在本文是指——由各种来源(大气降水、岩浆热液、变质水)组成的地热水,在成矿、成岩和蚀变等过程中的活动。

(一) 地面矿化现象

自然硫主要分布在中尼公路西北的硫磺矿地区,但在有些温泉泉华中亦能见到少量沉淀。辰砂、辉锑矿、黄铁矿和雄黄经常伴生存在,在喷硫气孔或某些沸泉附近及钻孔岩心中都有发现。这些无疑都是源自地热流体中的硫化氢和挥发性金属汞、砷、锑。

并不是任意浓度的硫化氢气体都能氧化成自然硫,只有硫蒸气达到一定逸度后,硫才得以析出,这要求流体具有较高的硫化氢分压;或者逸至地面附近后,有保持其较高分压力的条件。硫磺矿地区地下水位很深(80—120m),有足够厚的包气带供硫蒸气积聚。硫磺矿地区一些由第四纪松散砾石地层组成的小山包顶上,曾见到大片砾砂层其表层被硅质胶结,不少人认为这是过去温泉留下的泉胶砂砾岩,由之得出温泉已消失的推论,我们认为这是一种现在尚在进行中的次生石英岩化现象——上层滞水被硫化氢酸化,引起地表石英矿物呈溶解硅形式随地形流散,再凝聚析出,胶结了近碎石,有些长石矿物被强烈蚀变为高岭土,这些造成包气带自身在某种程度上的封闭性,使较高的硫化氢分压得以保持。

物探实验站^①对热田区土壤汞测量结果表明,汞量背景值为3—50ppb,异常平均强度为392ppb,平均衬度为7.8。汞量异常平面图象完全与上述“北西向基底隆起断块”范围

^①莫根生等,1983,西藏羊八井热田汞量测量研究报告《西藏地热能研究5》,西藏地热能研究所(未刊)

一致。最高异常($>450\text{ppb}$)分布范围与该隆起的轴部位置一致。他们对羊₈井、羊₉井蒸气样品测定结果,汞含量分别为 195 和 210mg/m^3 ,证明热流体中汞含量相当高。经热释测定表明:硫磺矿地区主要为硫化汞,并有少量氯化汞和极少量元素汞;中部地区主要为硫化汞及氯化汞;东南部的2号井一带主要为氯化汞;少量元素汞。壤中汞化学形态的变化,反映出浅层热水的埋深变化:由西北向东南愈来愈浅。这项汞测量结果,在定性意义上应该能代表其它挥发性金属(锑、砷)的矿化特点。

(二) 热流体与围岩的水热反应

1. 第四系热储蚀变重矿物组合

我们在分布于热田从西北到东南的下列钻孔中取岩屑样作重矿物鉴定统计:羊₂₀、羊₈、羊₆、羊₃、羊₄、羊₅、羊₇、羊₉、羊₁₃和羊₁₄,前四个孔取样间隔,基岩以上基本上为 20m ,一般都取到基岩面为止,每孔样品数量 $8-13$ 个不等。全部 10 个钻孔岩屑样共 86 个。

热田分布的全新世粉土、粘土层,在附近天然剖面中均已相变为其它粗碎屑,因此从矿物组成上,两者不宜对比,除此之外的其余地层都可对比。因为这些第四纪砂、砾,不管属于什么更小的地层单位,都是就近花岗岩、花岗片麻岩和白垩-第三纪中、酸性火山岩的一再搬运和堆积,可以宏观地把王日错剖面上的 26 个样品作为一套原岩样,热田 43 个样品作为受水热作用的另一套样,两相进行比较找出蚀变影响。两者差别如下。

(1) “原岩”的矿物种类单一,鉴定出的重矿物 17 种(图1);“热田”的复杂,为 28 种。

(2) “原岩”主要矿物为磁铁矿,约占总量的 70% ，“热田”的磁铁矿大大减少,增加了许多“原岩”没有的含铁矿物,形成全套含铁矿物系列,但含铁矿物总和,平均亦为总量的 70% 以上。

(3) 矿物增减情况如下。为了简化问题,我们不考虑区分开蚀变后新生的另一世代的同一种矿物。“原岩”中基本保持的矿物:黑云母、绿帘石、石榴石、褐铁矿;基本消失的矿物:磷灰石、角闪石、钛铁矿;数量减少的:磁铁矿、十字石、锆石、榍石;新增加的:黄铁矿、磁黄铁矿、方铁矿、菱铁矿、绿泥石、重晶石、方解石、磷钇矿。

(4) “原岩”重砂含量为 $1-13\%$;“热田”减少为 $0.1-5\%$ 。

上述四点之间存在内在的成因联系,可用水热蚀变统一解释。“原岩”中占重砂总量 70% 的磁铁矿,某一小部分保留,其大部分(约占总量的 40% 以上)分解形成铁的氧化物、氢氧化物、硫化物、碳酸盐和硅酸盐。“原岩”重砂含量的减少是因部分重矿物转化为粘土矿物、盐类和进入溶液。总起来说,以王日错剖面(图1)为代表的“原岩”,属于典型的花岗岩类矿物组合,沿剖面深度上的矿物组合变化,基本上反映了岩石风化作用的程度;以钻孔岩屑为代表的“热田”剖面,包含了许多低温热液矿物,沿剖面深度上的矿物组合变化,反映出水热蚀变过程。下面列出资料比较齐全的羊₂₀井剖面(图3)来讨论这一过程。

剖面上矿物组合变化出现两种情况,一者是:沿剖面全部深度上,某两矿物之间,在数量(以该矿物占重砂总量的百分数表示)上存在互为消长的关系;另一者是:某种矿物,在某些剖面的特定部位上含量高。

“互为消长”的矿物对:黄铁矿-赤铁矿、褐铁矿、磁铁矿;黄铁矿-绿帘石、石榴石、

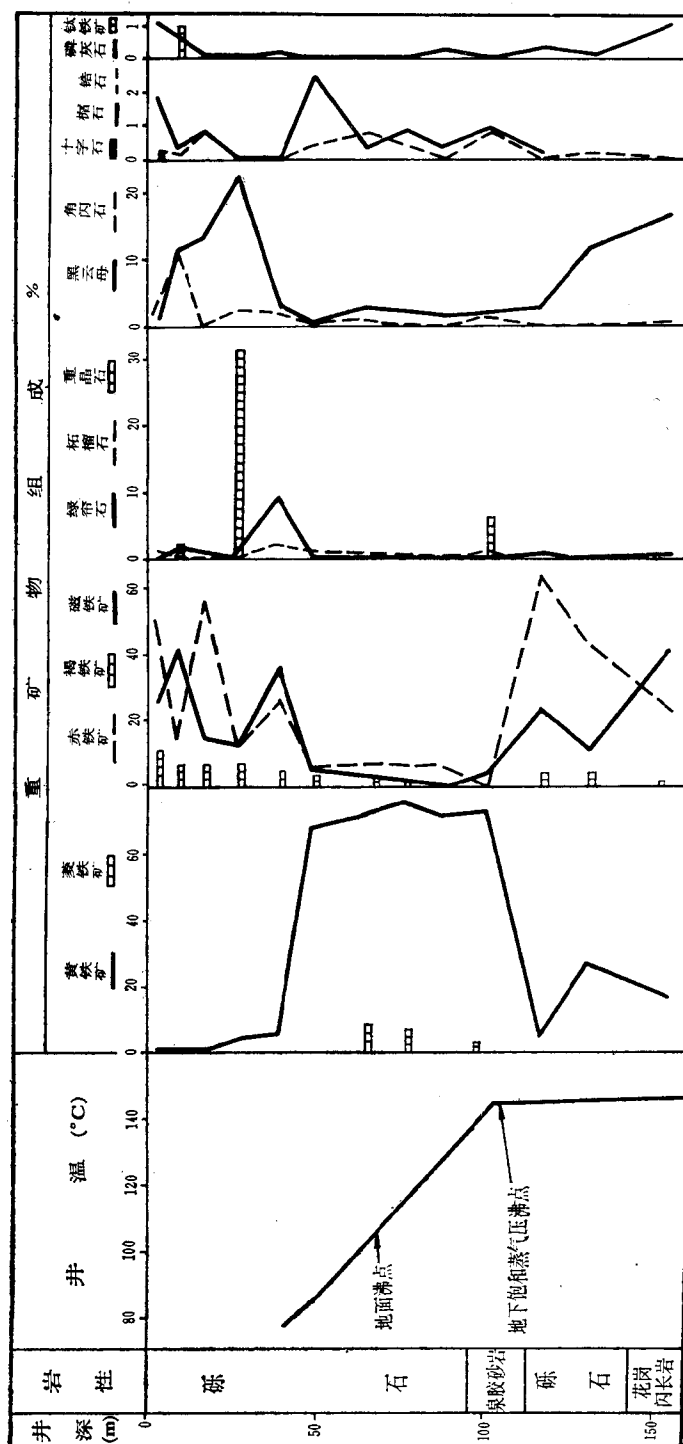


图 3 水热蚀变重矿物组成 (羊₂₀井)

(见于羊₆井)、黑云母(见于羊₈井、羊₂₀井)、重晶石(见于羊₈井)。方解石多的剖面,基本上不出现菱铁矿(羊₃井、羊₆井);方解石少的剖面出现菱铁矿(羊₂₀井)。

矿物在特定部位富集:方解石在剖面的上或下部富集(羊₃井、羊₆井、羊₈井),黑云母、角闪石在剖面大致40米以内富集(羊₂₀井、羊₆井、羊₈井)。

这些都可从反映矿物稳定场的pH-Eh图解中得出解释。在影响水热蚀变重矿物组合诸因素中,热流体气体:硫化氢、二氧化碳、氧这三个分压变量是起决定性作用,这从图3看得很清楚,在气体分压发生剧烈变动的位置上,蚀变矿物组合出现相应变化:羊₂₀井以黄铁矿为代表的低铁矿物系列和其它井剖面一样,剖面的上、下部含量少,中部多;以赤铁矿为代表的高铁矿物系列则与之相反,含量变化的这二个转折点,正与井温剖面的上、下二个沸点位置相对应,可以设想,当流体出现沸腾时,流体中的硫化氢大量上逸,致使沸点深度以浅的流体硫化氢分压增大。方解石在剖面的上、下部富集,是与该处二氧化碳分压和温度变化有关。黑云母、角闪石富集浅部,是流体中钾离子对矿物的影响所致。

在热田钻孔资料基础上,我们总结出热田蚀变矿物地球化学垂直分带(表1)。众所周知,地热钻探在一般情况下是没有明确的目的层的,如果我们在钻进过程中能对已钻进的地层温度高低,及时作出即使是定性的判断,对于指导进一步钻进都是十分有益的,我们提出,可以利用蚀变矿物的垂直分带来作这样的定性预测。我们是从工作方法意义上列出表1,并不认为表1的内容适用于各种地质环境。当然,对于没有产生蚀变自生矿物的地区,这方法是无意义的。

表1 羊八井浅层热储(第四系花岗岩质砂、砾层)水热蚀变重矿物垂直分带

地球化学环境 (实测温度)	地层温度	主 要 矿 物 组 合													硅石沉 淀部位
I 近地表重矿物非蚀 变带(<沸点)	86°														— + —
I 低温氧化带 (86—150℃)	140—160°														— + —
II 中温还原带 (150—170℃)	160—170°														
IV 中温氧化带 (170—120℃)	170—120°														+

* 部分剖面出现;虚线表示数量较少;+ 矿物出现部位示意。

2. 硅石沉淀

自然界纯二氧化硅的变种有:石英、玉髓、蛋白石、方英石、鳞石英和非晶质二氧化硅,为了便于讨论,我们忽略这些物相上的区别,都作为硅石来处理。根据热田全部(26个)钻孔资料,我们看到:

(1) 硅石沉淀在绝大部分钻孔中都出现二次和三次,每层厚度大致20m。

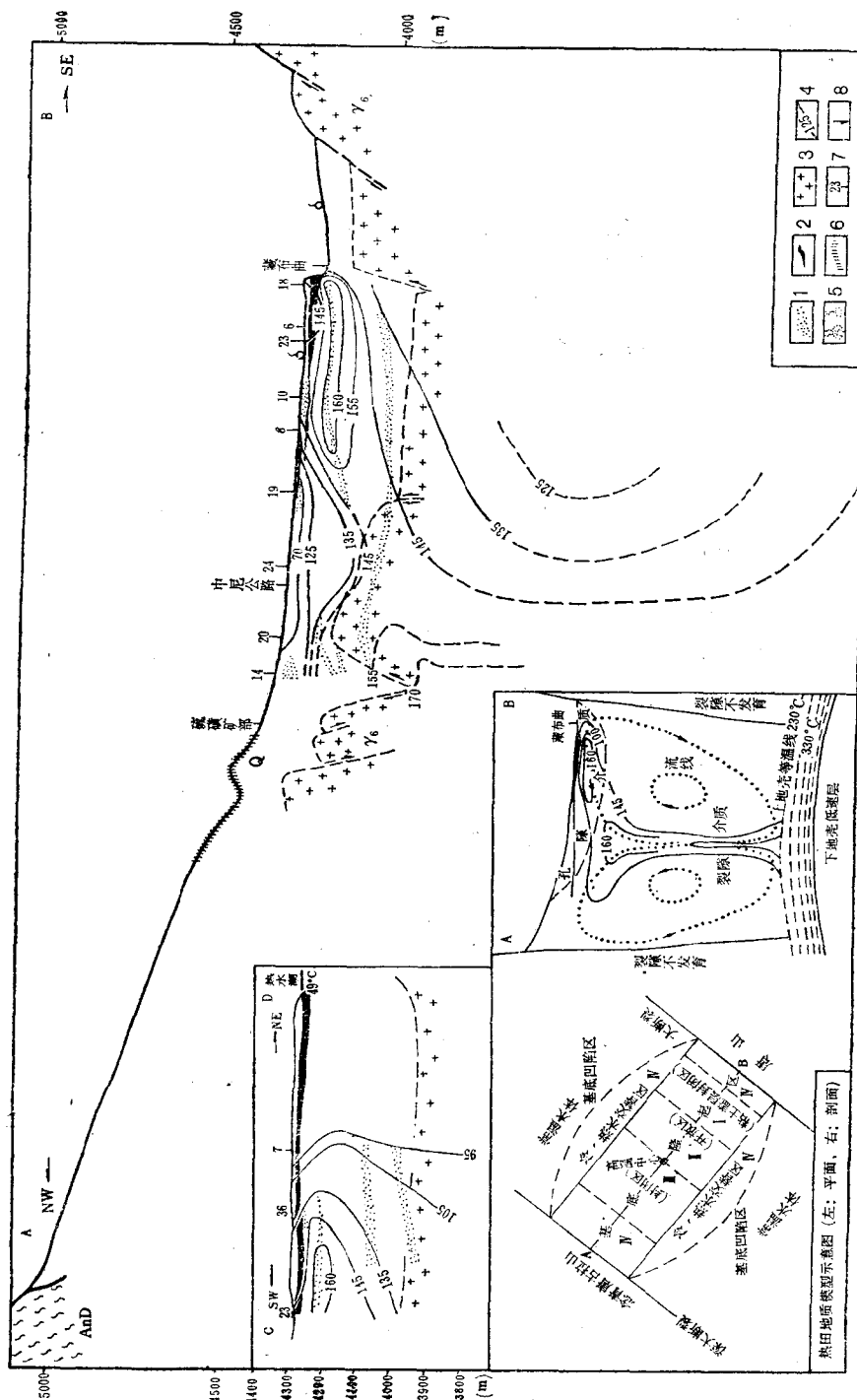


图4 羊八井热田地质模型(A-B, C-D剖面线位置见图2)

Fig.4 Geologic model of Yangbajing field

1—硅质沉淀；2—粘土盖层；3—花岗岩基底；4—热水等温线；5—剖面附近地面出露的喷硫气孔、冒气孔，
6—地面硫华；7—钻孔及编号；8—推测基底断裂方向

(2) 三次硅石沉淀的部位, 自下而上为: 距基岩面不远的浅层热储下部(有时为基岩面以下); 浅层热储之中、与饱和蒸汽压对应的“第一次沸腾”位置; 近地面、与地面沸点对应的“第二次沸腾”位置。

(3) 三“层”硅石, 在地下断续地成层分布, 以“上层”连续性最差, “中层”较好, 大致以8号孔为界(图4), 其北埋藏较深, 其南直到藏布曲河, 埋藏较浅, 应该说明, 这里提到硅石“成层”或“连续”分布, 指的是产状, 决不意味着该处沉积物的孔隙已全部被硅石充填。

从井内测温曲线与硅石沉淀位置比较可知, 热流体中发生的沸腾和降温, 引起溶液中正硅酸的过饱和从而发生沉淀, 或者更确切地说, 沸腾和降温, 破坏了溶液中正硅酸过饱和的准平衡态。对于“下层硅石”出现深度上, 井温曲线相应段并未显示出沸腾和明显的温度降, 我们认为这应从基岩中的热水与松散层中热水之间发生质量、能量交换中找出解释, 有关这点将在下面第三章中讨论。

热田地层结构——有无粘土盖层, 对浅层热储温度有明显影响, 这种影响反映在硅石沉淀上就是: 流体中发生沸腾的位置, 其埋深是深还是浅; 近地面的流体温度是否仍然很高, 以至于再次发生降温沉淀出硅石。可以羊8井为界(图4), 其北基本上无粘土盖层, 其南直到藏布曲河, 有厚数米至20多米的盖层, 从而使两区总体温度结构明显不同, 在有粘土盖层保温的地下, 热流体温度相对为高, 而且接近地面时的温度仍然较高, 由之, 往往发育三层硅石沉淀; 由于“高温体”埋深较浅, “中层”硅石沉淀位置较浅, 从而使热田内的整个硅石层显现出似乎是西北部深、东南部浅的形态。

硅石沉淀, 是热储地球化学中的一个重要问题, 有很大的理论和实践意义, 例如, 硅石层分布的“连续性”或“断续性”问题, 涉及热储内部是否“分层”, 热田今后是否会自封闭; 生产井的排放, 引起热储内部压力、温度变化, 是否会促进硅石在热储某些部位进一步沉淀等等。应该说我们只是发现这问题, 还没有研究这问题。

(三) 热田温度场和自由对流传热模式

由于地层和钻井流体的影响, 井温很少能直接代表地层温度, 钻井过程中的干扰因素可以由间隔一定时间后的稳态测温来排除; 流体动力学和地层结构的影响, 会改变井温曲线的形态, 有时歪曲地层的真实温度, 需结合有关资料进行具体分析, 从定性意义上加以排除。综合热田现有26口井的全部井温曲线后发现, 主要有下列四类干扰因素: (1) 含水层上部的流体流入下部, 使某深度以下的井温曲线温度降低, 甚至不变, 如羊14井, 这可以钻进时出现“井漏”加以辨别。(2) 井中发生闪蒸, 放出大量汽化热, 使闪蒸点以上井温比实际温度明显偏大, 这可用实测井温曲线和与实测井压相应的“沸点曲线”比较来找出, 如羊13井。附加汽化热总是发生在一定的深度, 这也就是所以若干高温井的最高温度都出现在深度150m左右的原因。(3) 地层中存在热导系数相对低的粘土隔热层, 使该层的井温曲线斜率有较大变化, 该层埋深接近地面时, 则使井温曲线“上段”近于垂直线, 而不是通常的斜线; 如出现在层间, 则相应段的曲线形态呈现“水平增温段”。前者如羊1井, 后者如羊20井, (4) 由于流体非垂向运动, 形成井温曲线的负梯度, 考虑了这四种干扰因素后, 综合全部井温曲线得出比较真实的热田温度场结构(图4)。

我们在地质测绘及钻探、物探资料基础上编制了横贯盆地的剖面图 A-B、C-D；并用镶嵌图示意表示出其平面特征和形成机理（图4）。

热田自西北而东南，平面上分三段：以硫磺矿为代表的喷硫蚀变段（Ⅲ）；无盖层的开放段（Ⅱ）和羊八井至藏布曲河有粘土盖层段（Ⅰ）。Ⅱ段和Ⅰ段地下为完全不同的温度结构，Ⅱ段地下温度分布为单调地向地面变低，Ⅰ段地下，在埋深80m左右有一40m厚的高温水体（水温160℃），水体呈扁平透镜体，由此向上、下两个方向温度递减，“高温水体”西北端，因无盖层保温而变薄消失，东南端因与藏布曲河“冷水体”相接而封闭。剖面埋深200m以下，Ⅰ段和Ⅱ段又有另一种区别，Ⅰ段200m以下以较大的负梯度减温，Ⅱ段负梯度相对较小。据19号孔资料，在800m以深又转为正梯度。从剖面A-B可以看出，热田基本上止于藏布曲河西岸，按等温线外推可知，向唐山方向，温度逐渐降低，地面虽然还会出现一些温泉、甚至沸泉，但即使打钻，孔内最高温度也不会超过140℃。

从剖面C-D可以看出，160℃高温透镜体的东侧已经闭合，如果按两侧形态对称考虑，估计其全部宽度可能为1km。“热水体”与“常温水体”的界面为近乎垂线，估计应出现在热水湖之东，热水湖水温49℃，如果按等梯度外推，高温水体（160℃）与常温水体（按10℃计）之间的“过渡带”宽度约为2.5km。热水湖从其“泉胶砂岩”的硅华出现和湖盆形态来看，曾是一个壮观的间歇喷泉，但热水湖现在的温度，从模型剖面C-D来看，是与整个热田温度结构协调一致的。根据“对称”的设想，23号孔以西地区可以有大量温泉甚至沸泉出露，但地下温度估计是与剖面C-D上的相似。

如果把开放段的“散热效应”造成的浅层降温影响在想像中予以消除，综合上面二个剖面就可以看出，整个热田的温度等值线，描绘出“半个蘑菇”的形态：一个垂直的高温中心，一个几乎水平的高温透镜体与之相连。

如果把现在尚在喷硫的念青唐古拉深大断裂带的位置，作为横过谷地的水热活动的西北界，把藏布曲河东、唐山下的大断裂作为东南界，取这段水平距的中点位置，那么它正好落在硫磺矿矿部附近，根据井温曲线结合视电阻率等值线剖面资料，我们推测高温中心点可能位于矿部西南约250m附近处。

可以把已知的半边温度场结构，对称地推广到未知的另外半边。硫磺矿以西，地形相对较高，第四系相对较薄，推测采坑山沟下的基岩埋深可能为140m，考虑到地形高，岩石蚀变剧烈，渗透性差，因此该地段的水热活动不可能与中尼公路以东地段相似，但温度场结构特征可以类比。硫磺矿区地下确有流体沸腾迹象，我们在地面成带分布的砾石层硅化岩组成的孤立山头上，见到白色水汽从硅化岩空洞中逸出，逸出口温度66℃，周围无蚀变、无盐华、高程为4510m，高出就近藏布曲河面约170m之巨。

从流体力学实验研究可知(Elder, 1965)，这种蘑菇形图式，是流体在一定的热源、冷源温度梯度控制下发生自由对流的结果。从他们进行的实验中，我们得出三点重要启示：（1）只要热源、冷源保持不变，流体的蘑菇形温度结构亦保持不变，不发生进一步的均一化。（2）实验用的热源为一块温度均匀的加热板，但在该板几何中心的上方均匀介质中，会出现垂直该加热板的高温中心。（3）加热板与上方介质之间没有质量交流，是加热板的能量驱动其上介质中的流体发生自由对流。

以上主要是根据热田温度场形态特征，作出热田水热活动中有关流体运动机理——自

由对流及对流体空间分布的讨论, 下面进一步讨论流体来源、热源和深部地质作用。

三、深部机制

有关水热活动的深部机制, 我们提出双重对流系统和裂谷作用。最后并讨论了能反映深部过程时、空尺度的二个具体问题: 共生热田的存在; 地质过程中水热活动地点的变换。

(一) 双重对流系统

在这里指的是地壳中存在二个叠置的流体对流系统, 位于上面的是大致5km以内埋深的地下水系统; 位于下面的是岩浆热液系统(图5)。岩浆热液系统有其自身特定的化学、物理和动力学特性, 这里我们不予涉及, 对上覆的地下水系统来说, 它是能源和一部分物质源。我们主要讨论地下水系统。

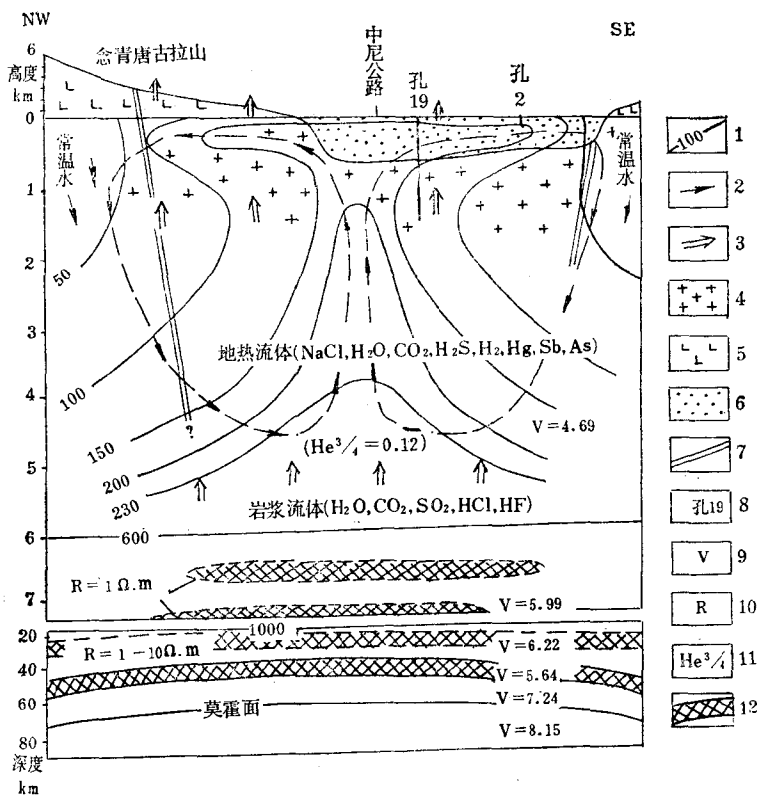


图5 羊八井盆地水热活动深部机制示意图

Fig.5 Schematic map showing deep mechanism of hydrothermal activity in Yangbajing basin

1—等温线; 2—地热流体环流; 3—岩浆流体流向; 4—花岗岩(r6); 5—片麻岩(前泥盆纪); 6—第四系松散堆积; 7—主要断层; 8—主要钻孔位置; 9—纵波波速km/s; 10—磁大地电流测深(Ω m); 11—气体氩同位素($\frac{\text{地热水 He}^3/\text{t}}{\text{大气 He}^3/\text{t}}$); 12—低速层、低阻体(假设的岩浆体)

羊八井热水氢氧同位素分析结果(郑淑惠等, 1982)表明: δD 约为 -150‰ ; $\delta^{18}O$ 为 -15‰ — -20‰ , 与该地大气降水组成十分接近, 另外, 与世界许多热田水的组成相比明显地偏轻, 这可用同位素分馏的高度效应来解释, 同时也就表明了羊八井热水就是当地的地下水。

我们对热田地面的自然硫、热水中的硫酸根离子采样测硫同位素组分, 分析结果整理成表(表2)。

表2 反映不同深度的样品中的硫同位素(^{34}S)含量

样 品	$\delta^{34}S\text{‰}$ (CD)	产 地
地面自然硫	-5.6	硫磺矿
	0.0	羊1井硫华
浅层热水 SO_4^{2-}	0.1	唐山冷泉(14°)
	2.6	酸性硫酸泉(42° , pH4.1)
	5.9	热水湖水(48°)
	7.2	藏布曲河心洲沸泉(90°)
深层热水 SO_4^{2-}	9.0	泉7(84°)
	9.3	泉31(50°)
	9.8	泉29(76°)
	9.3	羊5井(最高井温 141°)
	9.7	羊7井(最高井温 110°)
	10.6	羊9井(最高井温 160°)

注: 冶金工业部地质研究所分析

从表2可见: 地面样品的硫最轻, 以硫磺矿自然硫为最低值; 各种与地表水、浅层地下水关系密切的“浅层热水” $\delta^{34}S\text{‰}$ 值居中, 可能由于各种水混合比例不同而数据比较分散; 以钻孔热水为代表的“深层热水”的硫最重, 可能由于出于同一热储条件, 数据比较集中。这可用同位素分馏的动力效应来作解释, 在硫化氢气体上升过程中, 含轻同位素的分子比含重同位素的运动得快, 从而产生浅部富集轻硫, 深部富集重硫。另外可以得出结论: 横过整个谷地的深部, 都有相同性质的硫化氢喷气活动, 仅仅因为近地面水文条件不同, 或者表现为析出自然硫, 或者表现为以硫化物形式溶于热水, 也就是说, 从硫磺矿直到念青唐古拉山前大断裂的喷硫气活动, 与热田水热活动在深部是一个统一的地质过程。

用热水化学温标算得的热储温度为 $230^\circ C$, 按19号孔打到800m深度后的花岗岩中的增温率 $3^\circ C/hm$ 来计算, 大致地面下5km就可达到。由于如上面讨论过的硅石沉淀强烈, 硅温标计算所要求的前提并不能满足, 因此, 真实深度很可能小于5km。

羊八井地热异常的形成, 源自地下等温面($230^\circ C$)上隆, 它相当于一块“加热板”, 结果引起其上几公里深度内本来就存在的水体发生自由对流, 从而产生把深部热量带到浅层的结果。第四系储层中的地下水, 如果它的瑞利数(这是一无量纲的判别函数, 其值等于流体“浮力”除以“粘滞阻力”与“热扩散率”的乘积)超过一临界值后, 将发生垂直环流, 当松散沉积层底部的水上升到表面时, 由于该层渗透性好, 四周侧面的“冷”水和下面基岩的热水将会同时补充进来, 占满刚空出的空间, “冷”、热水在这里混合, 于是发生正硅酸