

地热田地球化学勘查

朱炳球 朱立新 史长义 余慧 著

地质出版社

(京)新登字 085 号

内 容 简 介

我国地热资源丰富,类型多样,为研究热田地球化学特征提供了有利条件。作者根据 10 年来的科学研究成果,在 20 多个热田的大量实际资料基础上,论述了热田周围的微量元素特点及其分布,对比了不同类型热田的地球化学特征,提出了高温热田上的元素分带模式,系统介绍了估算热储温度的地球化学温标,讨论了用放射性和气体测量揭示热田构造的方法,探讨了同位素地球化学在热田勘查中的应用,介绍了热田勘查的地球化学方法和应用实例,最后综合了地热田的评价标志。本书理论联系实际,内容丰富全面,附图 83 张、表 69 个。

本书可供广大生产、科研单位的地质人员和地质院校的有关专业师生参考。

地 热 田 地 球 化 学 勘 查

朱立新 余慧 著

*

责任编辑:李云浮

地质出版社出版发行

(北京和平里)

北京地质印刷厂印刷

(北京海淀区学院路 29 号)

新华书店总店科技发行所经销

*

开本: 787×1092¹/₁₆ 印张: 10.75 字数: 252000

1992 年 7 月北京第一版·1992 年 7 月北京第一次印刷

印数: 1—650 册 定价: 7.30 元

ISBN 7-116-01032-7/P·880

序

地热是一种巨大而重要的地下热能资源。它作为一种新的能源,具有分布广、成本低、易于开采、可直接利用、无环境污染等许多优点,对之进行充分研究和开发利用,对我国社会主义经济建设有着十分重要的意义,同时也有助于对水热成矿作用的深入的、本质的认识。

同世界上某些地热资源开发先进的国家相比,我国在这一领域则起步较晚,有关研究工作尚较薄弱。地热地球化学研究尤其如此。

实践表明,地球化学勘查方法对地热研究至为重要。不仅在地热的最初普查阶段,而且在整个勘探阶段,以至后来的生产开发阶段,它都是不可缺少的有效手段。但是地热化探的研究,远逊于金属矿和油气藏等化探的研究。

因此,我国化探学科带头人谢学锦教授早就指出我国化探工作的不足和面临的地热化探的迫切研究任务。在谢先生的关心、支持和帮助指导下,地矿部物化探研究所便率先组织本书的作者们自1981年起有计划地深入我国重要的地热田现场实际,开展了系统的地热化探研究。十年来在对为数众多的热田,通过详细的野外调查和室内研究,在取得丰富的第一性资料基础上,经科学的总结而写成了本书。

本书是一本地球化学的理论方法应用于地热资源勘查的专著。它完整系统地阐述了地热化探的有关基本知识和各种常用的地热化探方法以及最新研究成果。本专著是作者们在多年科学研究的基础上,参阅了国内外大量的最新文献写成的。它的问世,乃是我国地热化探研究新进展的反映。它可谓集地热化探之大成,集地热地球化学理论和具体化探方法于一体,对科研、教学和生产人员均有重要的参考价值。

需要强调指出的是,在90年代可能出现低温地球化学研究高潮和重视开放体系成矿理论研究的新趋势。各类地热田乃是天然的水热体系的宏大实验室,通过对其深入的地球化学和成矿作用研究,可以获取成矿元素和矿化剂元素等在不同性质热液中的溶解度、迁移形式、搬运和沉淀条件,从而可为人们对低温成矿条件的理解,提供不可缺少的实验基础。从这一意义上来说,《地热田地球化学勘查》一书,也是对将出现的新学科生长前沿,做一些积极的准备。《地热田地球化学勘查》在我国是这方面的第一本专著,祝愿它的出版将会更好地促进我国地热地球化学及其开发利用事业的发展。

刘英俊

1991.8.4,

前 言

勘查地球化学,在我国从 50 年代开始,已经有了很大的发展,其应用领域迅速扩大。地热田的地球化学勘查(简称地热化探),就是勘查地球化学向地热领域的扩展。

地热资源是赋存于地球内部的一种巨大能源。它作为一种新的能源,受到世界各国的普遍重视。在能源日趋紧张的形势下,开发利用地热资源,对缓和我国能源的紧缺,发展工农业生产具有重要的意义。

在我国,地热田的地球化学研究,不仅起步较晚,而且,相对来说较为薄弱。在 70 年代以前主要使用水化学方法,70 年代以来,多种地球化学勘查方法相继发展起来。作者从 1981 年开始,系统开展了地热田的地球化学勘查方法 and 应用研究,为该领域做些添砖加瓦的工作。本书除参阅了国内外有关的研究资料外,主要是根据作者近十年来的实践,积 20 多个热田上所取得的资料,加以整理、系统总结。作者试图将热田勘查中各种散见的地球化学资料汇集起来,以提高我们对水热成矿作用的认识,并为开放体系的成矿作用和低温条件下的成矿作用研究提供基础。

本书是集体工作的成果,许多同志为此付出了艰辛的劳动,如翟军校、王公远,还有伍宗华、金仰芬、古平等、孙忠军、黄宏库等同志。谢学锦(教授)、邵跃(高级工程师)对开展地热化探研究起了决策作用,并对尔后的研究工作给予了关怀和支持。在研究工作中得到了所领导的关心和支持。在本书写作过程中,得到了南京大学刘英俊教授的热情鼓励和指导,他详细地审阅了书稿,提出了许多宝贵的意见。在野外地质工作期间,得到了有关省局和同行们的大力支持。本书图件由黄裕芳、白秀荣、王晟兰等同志清绘。

由于时间短促,作者水平有限,加之地热化探中的许多问题本来尚需进一步深入研究探讨,因此本书缺点错误在所难免,恳请读者给予批评指正。

著 者

1991.11,

目 录

第一章 绪论	1
一、地热资源分布概况.....	1
二、地热田的类型.....	4
三、地热田的地质控制因素.....	5
四、地热资源的利用.....	7
五、热田（或热泉）与成矿关系.....	8
六、地热田地球化学勘查发展简史.....	13
第二章 热田周围介质中元素的分布	16
一、土壤中的微量元素.....	16
二、岩石中的微量元素.....	18
三、蚀变岩石中的微量元素.....	19
四、水系沉积物中的微量元素.....	21
五、热泉沉淀物中的微量元素.....	22
第三章 汞量测量方法	25
一、汞的地球化学特性.....	25
二、热田中汞的来源.....	26
三、汞量测量方法.....	27
四、汞量测量在热田勘查中的作用.....	29
五、热田中汞的存在形式.....	35
第四章 常规化探方法	37
一、元素分析方法及质量要求.....	37
二、热田周围土壤中的指示元素及其分布特征.....	38
三、土壤中某些微量元素间的相互关系.....	47
四、不同类型热田微量元素的对比.....	51
五、高温热田周围微量元素的分带特征.....	53
六、岩石测量的效果.....	53
七、水系沉积物测量的效果.....	58
第五章 水化学方法	61
一、热水的地球化学.....	61
二、热水中元素含量与温度的关系.....	77
三、热水型和蒸汽型地热田的特征.....	77
四、水化学方法在热田勘查中的应用.....	79
第六章 地热地球化学温标法	83
一、确定热储温度的方法.....	83

二、常用的各种地球化学温标·····	84
三、混合模型中热水温度及冷水份额估算·····	91
四、地球化学温标在热田勘查中的应用·····	95
第七章 放射性及气体测量方法·····	99
一、 α 卡法·····	100
二、钋法·····	102
三、地面伽马测量·····	105
四、氦气测量·····	107
五、壤中气汞测量·····	111
六、二氧化碳气体测量·····	112
第八章 热田同位素地球化学方法·····	114
一、氢、氧、碳、硫同位素及其丰度·····	114
二、判断地下热水的补给来源·····	115
三、判断热田的热源性质·····	118
四、评价深部热储的温度·····	123
五、推测地下热水的年龄·····	126
第九章 热田勘查的应用实例·····	130
一、羊八井热田·····	130
二、羊应乡热田·····	138
三、那曲镇热田·····	140
四、热海热田·····	141
五、漳州热田·····	143
六、陕西地区及汤峪热田·····	145
七、小汤山热田·····	148
第十章 地热田的评价标志·····	152
一、构造环境标志·····	152
二、地表显示标志·····	152
三、地球化学标志·····	153
四、同位素地球化学标志·····	154
参考文献·····	155
英文摘要·····	163

第一章 绪 论

一、地热资源分布概况

我国蕴藏着丰富的地热资源,目前已发现水温在 25°C 以上的水点(包括温泉、钻孔及矿坑热水) 2600 处以上(黄尚瑶,1986)。这些热水点遍及全国 31 个省、市、自治区。我国已经进行和正在进行勘探的地热田(本书中称为热田)有 30 多个。

我国温泉出露最多的省区是西藏自治区、云南省、台湾省、广东省和福建省,温泉数约占全国温泉总数的二分之一以上(图 1-1)。其次是辽宁、山东、江西、湖南、湖北、四川等省,每省温泉数都在 50 处以上。我国温泉分布的明显特点是呈现出藏滇、台湾、东南沿海及滇川四个温泉密集带(黄尚瑶,1986)。

(1) 高温地热资源的分布

我国高温地热田主要分布在西藏、滇西及台湾地区,呈现出两条沿板块边界展布的高温温泉密集带,目前被划分为两个地热带——藏滇地热带及台湾地热带(黄尚瑶,1986)。藏滇地热带又称喜马拉雅地热带(佟伟等,1978,1981)。藏滇地热带及台湾地热带分别构成环球地热带——地中海—喜马拉雅缝合线型地热带及西太平洋岛弧型地热亚带的重要组成部分(图 1-2),是我国开发利用高温地热田的远景地区。

① 藏滇地热带,位于印度、欧亚两大板块的边界。著名的雅鲁藏布江深断裂带,为大陆板块碰撞的接合带,也称为地缝合线,在我国境内长达 2000 km。在其南部发育有我国最新的蛇绿岩带(年龄 12Ma),说明已深达上地幔。据推断,从白垩纪开始至始新世,印度板块北移和亚洲板块的地壳开始接触并全面碰撞,引起了上部地壳的大规模断裂作用和岩浆作用,从而形成地壳重熔区,为藏滇地热带提供了良好的通道和强大的热源,使该地热带成为我国大陆地热活动最为强烈的一个带。在该带内,目前在西藏已发现水热活动区 600 余处,对其中 350 余处已经做过初步调查(佟伟等,1981)。在水热活动区,水热活动十分强烈,类型俱全,见有大量热泉、沸泉、喷泉、喷气孔、水热爆炸穴等,水热蚀变及泉华沉积也很发育。西藏水热区的海拔多在 4000m 以上,水温在 $86-94^{\circ}\text{C}$ 的水热区有 100 余处,其水温已超过当地沸点。正在开发的羊八井地热田,在 974m 深的地热钻孔中获得了 202°C 的高温热水。正在勘探的羊应乡地热田,在 330m 深处打出了 201.67°C 的高温热水。这两个高温热田位于该地热带中段,为著名的湿蒸汽型地热田。

② 台湾地热带,位于太平洋板块与欧亚板块的边界,为西太平洋岛弧型地热亚带的一部分。在著名的台湾大纵谷深断裂带内,蛇绿岩带发育,说明断裂已深入到上地幔。岛上地壳活动,在第四纪火山活动强烈,地震频繁,是我国东南部海岛地热活动最强烈的一个带。水热活动区有 100 余处, 100°C 以上的有 6 处。台湾岛北端北投附近大屯火山群共有 13 个地热区,水热活动尤为强烈,有大量热泉、沸泉和喷气孔,其中一喷气孔温度可高达 120°C 。地热勘探结果,在 1005m 深的地热钻孔中获得了 294°C 的高温蒸汽。在宜兰西

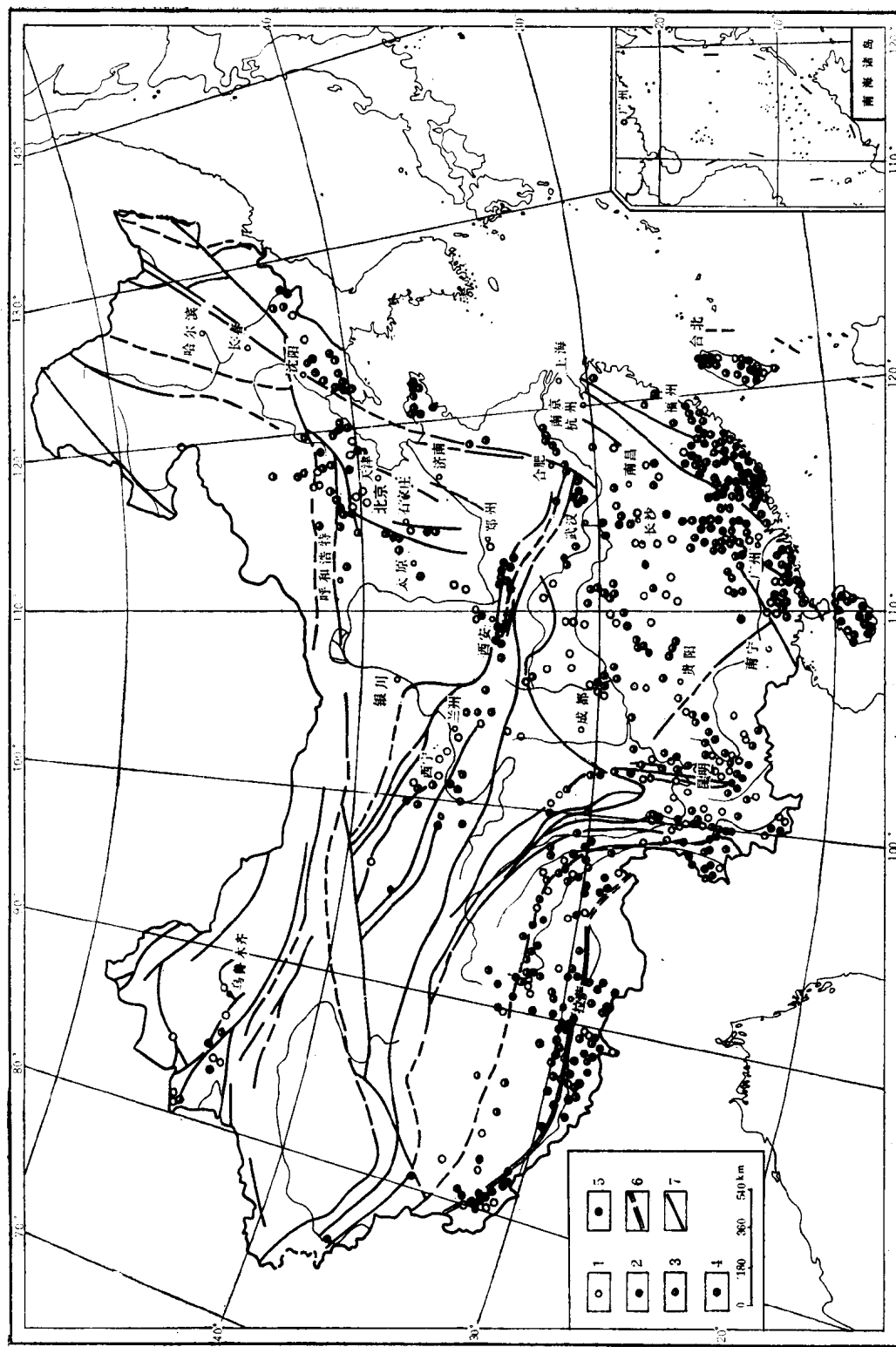


图 1-1 中国温泉分布略图 (据黄尚瑶, 1986)

1—25—40℃; 2—40—60℃; 3—60—80℃; 4—80—100℃; 5—100℃以上; 6—板块边界; 7—深断裂

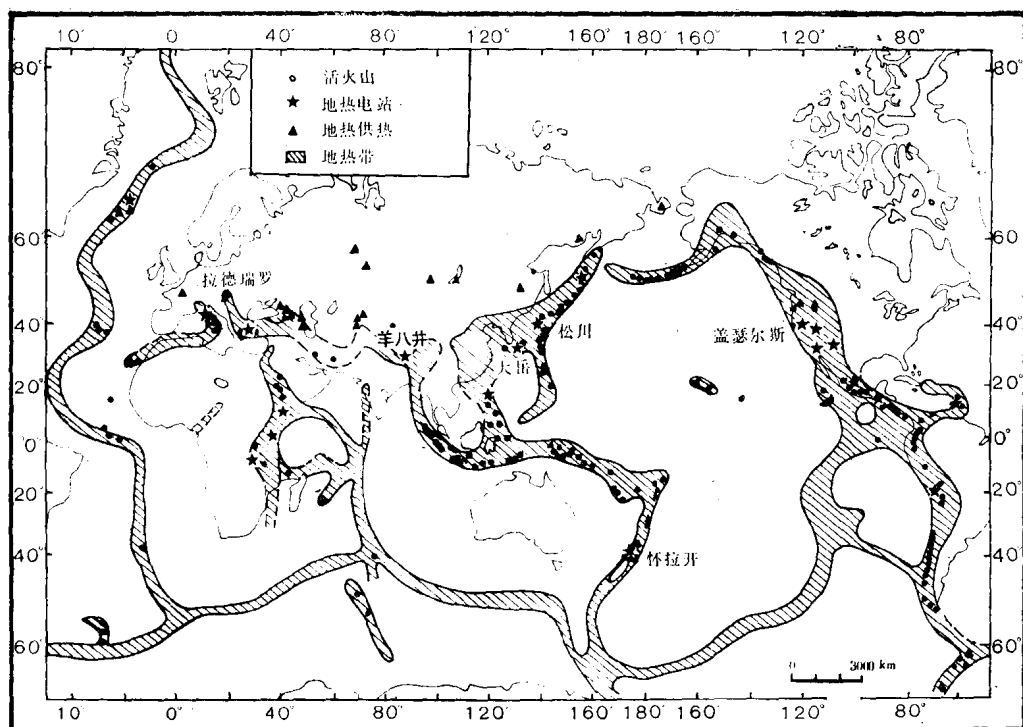


图 1—2 环球地热带分布图
(据佟伟, 1981)

南部的土场—清水地热区, 2000m深处热储的温度可达 226℃, 1977 年 10 月已建成一座 1500 kW 的地热试验电站 (黄尚瑶, 1986)。

(2) 低温地热资源的分布

我国低温地热资源广泛分布于板块内部中国大陆地壳隆起区和地壳沉降区 (黄尚瑶, 1986)。在板内地壳隆起区, 发育有不同地质时期形成的断裂带, 已经多期活动, 有的在晚近时期活动性仍比较强烈, 它们多数可成为地下水运动和上升的良好通道。大气降水渗入地壳深部经深循环在正常地温梯度下加热, 常在相对低洼的地方 (山前或山间盆地、滨海盆地, 多在河谷底部), 沿活动性断裂涌出地表形成温泉。根据地壳隆起区温泉的密集程度, 目前可划分出两个低温地热带, 即东南沿海地热带及滇川地热带 (黄尚瑶, 1986)。

① 东南沿海地热带, 位于太平洋板块与欧亚板块交接带以西中国大陆内侧, 包括江西东部、湖南南部、福建、广东及海南岛等地。这里没有现代火山作用, 但自中生代以来地壳运动强烈, 深断裂发育, 伴有大规模中酸性岩浆活动, 形成东南沿海火山岩带和大量的花岗岩, 广泛分布有北北东和北东东向的褶皱带以及与此相关的性质不同的深断裂。东南沿海地热带是我国低温温泉最为密集的地带, 集中分布的温泉就有 500 余处, 其中广东 250 处以上, 福建 150 余处。温泉水温大部介于 40—80℃ 之间, 也有少数在 80℃ 以上。温泉多沿断裂带及燕山期花岗岩体边缘分布。本带已进行勘探的地热田有: 广东丰顺邓屋 (93℃)、广东汕头东山湖 (102℃)、福州 (98℃) 及湖南灰汤 (92℃) 等。东南沿海地热带为我国开发低温热水资源的有利地区。

② 滇川地热带, 位于印度与欧亚两大板块交接带以东, 纵贯滇川南北, 沿南北向构造带展布。这里, 新构造运动强烈, 地震频繁。分布在该带的温泉共有 100 余处, 南段较

密集，温度多在 60℃ 以上，个别达 92℃，北段较稀疏，水温多在 60℃ 以下。

其它地区，如山东半岛、辽东半岛、河北山地、太行山、秦岭、天山北麓、四川盆地的东南部、柴达木盆地东部等，温泉分布也较集中，水温大部在 60℃ 以下，少数温泉区水温可达 80—90℃。

在中国大陆地壳沉降区，即在我国广泛发育的中新生代沉降盆地内，一般在断陷盆地的基底相对突起的地方，构造裂隙系统发育，深循环的地下水经加温后沿断裂通道上涌并富集于基岩顶面，形成热水的隐伏排泄源地或隐伏热储体；在地壳活动相对稳定、无重大构造破坏的拗陷盆地内，在正常地温梯度下加热的地下水，在透水岩层中运移上升，在不同深度上形成具有区域意义的呈大面积分布的含热水层，水温多接近岩温。我国华北、江汉、四川等盆地，随着油气田和地热田的开发，已相继获得热水及热卤水，其中以华北盆地潜力最大，目前揭露的 70—90℃ 以上的热水井已有 100 余处。据对油田测温资料分析，我国大型中新生代沉降盆地地温梯度的分布与温泉分布的规律性相类似，有从东向西递减的趋势。这与它们所处的大陆构造部位、地壳现今活动性等有关。目前认为，在板块内部地壳沉降区内，地温梯度相对较高（一般接近或高于地壳平均梯度）的地区，是我国开发利用中低温地热田的有利地区。

二、地热田的类型

地热田或地热区是指现代地壳内占有—定空间位置、产于有利的地质构造、具有一定物理特性（温度、压力、相态）和特殊化学组成的地下热水和蒸汽大量富集的地区，是目前钻探技术可及深度上可供经济开发利用的地段（黄尚瑶等，1986）。地热田按其是否含有天然流体（水、汽）分为水热型和干热型地热田，其中又可分为若干亚型（表 1—1）（沈照理，1986）。

表 1—1 地 热 田 类 型

基本类型	亚 型	主 要 特 征
水热型 地热田	热水型	以含热水为主，受水的连续压力所控制的对流循环系统
	蒸汽型	以含蒸汽为主，受蒸汽的连续压力所控制的对流循环系统
	地压型 (热水-甲烷-地压型)	埋藏于封闭自流盆地中的高压热水系统，含有三种可利用的能量 (热能、甲烷-化学能和高压机械能)
干热型 地热田	干热岩型 岩浆型	近代岩浆侵入体或现代火山及岩浆活动区的干热岩石，地壳深部干热岩石 熔融或半熔融岩浆、火山熔岩

（据沈照理，1986）

在目前技术经济条件下，被广泛开发利用的是含有天然流体的水热型地热田，由于流体的对流循环，便于对来自地下的热能进行能量转换或直接利用。干热型地热田是不含热流体（水、汽）的干热岩石（或熔融、半熔融状岩浆、火山熔岩），其热量来自传导热流，或为岩浆岩体本身的余热形成的热田，直接开发利用尚有困难，目前尚处于试验研究阶段。

三、地热田的地质控制因素

(1) 地热田的分布与板块构造的关系

在漫长的地球发展史中，地球表面（包括洋底）分成了若干块体，这些块体之间经常发生相对的、规模不等的位移和错动，规模大的可以移动几千公里甚至一万多公里。这些经常处在相互运动之中的地球表面的若干块体，就称为板块。

大量研究成果表明，世界范围内地热田的分布具有明显的规律性。即：高温地热田都集中分布在相对比较狭窄的地壳活动地带，这一活动地带目前已被公认为全球板块的边界（见图 1—2）；而低温地热田则广泛分布于板块内部。但在板块内部一些存在热点、热柱的地方，也可能分布有高温地热田，如美国的夏威夷群岛。由此可见，地热田的分布严格受板块构造控制（黄尚瑶，1986）。

按板块构造学说，地热带首先被划分为板缘（或板间）地热带及板内地热带两大类。板缘或板间是地球岩石圈板块之间狭窄的最活动的地带。板缘地热带是指沿板块边界展布的相对比较狭窄但延伸可达数千公里的高温地热带。板缘地热带因具有全球规模而且首尾相接，故常常被称为环球地热带（图 1—2）。板内通常是构造活动相对稳定的地带。板内地热带一般是指广泛分布于板块内部地壳隆起区（褶皱山系、山间盆地）及地壳沉降区（主要是大型中新代沉积盆地）规模相对较小的低温地热带。

板缘地热带属火山型。在板内存在热点、热柱的地方，也分布有少数火山型高温地热带。在这些地方的地壳浅部，存在着强大的火山或岩浆热源，可以观测到高热流及高强度的区域地热异常区，地表水热活动强烈，高温地热资源（150℃以上）丰富，地热田温度普遍高于当地沸点，多数高达 200—300℃。地表水热显示主要有热泉、沸泉、喷泉、沸泥塘、喷气孔、水热蚀变以及硫华、硅华等。

板内地热带属非火山型。这里，无火山或岩浆热源，在地壳浅部，可观测到接近或稍高于地壳平均值的热流值和区域地热正常区，有的地方可见低强度的局部地热异常现象。在板内，无论是隆起区或沉降区，在构造破碎带或一些自流盆地内，都赋存有丰富的中低温地热资源（150℃以下），地热田温度一般都低于当地沸点，多介于 60—90℃之间。

(2) 地热田与断裂构造的关系

地热田与断裂构造密切有关。断裂在地热活动中，无论是对于岩浆向上侵位或喷出，或是对于水热流体的对流循环，至少起着通道的作用。

地热异常带受活动性构造带的控制（康文华，1989）。如西藏地区，东西向的雅鲁藏布—冈底斯地热异常带、奇林湖—那曲地热异常带分别受西藏高原区域东西向构造带之藏南带、藏中带控制；扎林湖—纳木湖—念青唐古拉弧形地热异常带受扎—纳—念青弧形构造带制约。地热异常带的水热活动强度，主要取决于它所依附的构造带活动性强弱。西藏地区，从北往南，越向南构造时代越年轻，活动性具有越强烈的趋势。地热异常带的水热活动也同样有越向南越强烈的趋势。奇林湖—那曲东西向地热异常带水热活动较弱，而雅鲁藏布—冈底斯东西向地热异常带水热活动强烈。

川西和云南地区的地热资源的分布与地质构造关系研究（韩宗珊，1989）表明，区内主要构造体系的展布、构造体系的复合以及晚近时期活动的断裂带，严格控制着地热田的

分布。川滇南北向构造体系、歹字型构造体系、山字型构造体系和北东向构造体系都控制着热水带，而南北向构造与北西向构造的复合，北西、北东、南北向构造的复合，南北向构造与山字型脊柱的复合都控制着热水区。

广东研究了断裂构造对地下热水的控制作用（朱长生，1989），总结了三级构造控制热泉的模式：一级构造为穿越一省或数省的深大断裂，控制了热泉的分布，热泉多沿新华夏系断裂呈串珠状分布；二级构造是一级构造的复合构造或次级构造，往往控制一处或数处热泉出露；三级构造是小断裂及节理裂隙，控制了泉穴的出露。以丰顺县的丰良热泉为例，海丰一大埔断裂带是它的一级构造，二级构造是地热区的F₂断裂，三级构造即为小断裂或节理裂隙。

地下热水经深循环对流作用沿断裂通道将深部热能传递到地表，热水的温度和水量与断裂的性质、规模、近期活动性和深度等有关。如果断裂深、规模大，地热区热水温度就高，水量也大。我国东南沿海一带温泉最高温度可达97—98℃，据推算，热水循环深度应在2—3 km以上。断裂如果很深（如基底断裂、地壳断裂或岩石圈断裂），又具有良好的导热条件，可成为地幔物质对流上升的通道。如果是浅成断裂，对地热的意义一般就不太大。断裂的活动，尤其是近期活动，对地热的形成起着重要作用。因在一定的温度、压力条件下，热水可从围岩中溶解出大量的矿物质，在热水上升途中当温度、压力条件改变时，这些矿物质又重新沉淀出来。这些沉淀物是热水通道的自封闭剂。如果是现在没有活动的老构造，在发生自封闭现象的温泉区，通道早被堵塞，温泉也就随之消失。如果有构造的新活动，老通道被堵，新通道不断产生，这样，热水的上涌通道就会畅通。

（3）地热田的热源问题

地热田的热源问题，和地球内部的热源问题一样，是个极其复杂的问题。地球内部的热源问题是理论地热学研究的一个重要内容。

据研究认为，西藏高原水热活动的热源来自壳内岩浆活动（佟伟等，1981）。我国滇西腾冲及其邻区现代水热活动与火山和岩浆活动的关系，也早就受到人们的注意。在本世纪初叶，Brown（1913）就说过：“对腾冲地区地质的任何叙述，如果不考虑所发现的众多温泉，都将是完整的，这些热泉代表第三纪时期（很可能在第三纪以后还有）的强烈火山活动的期后显示”。章鸿钊（1934）认为，腾冲附近的温泉“为火山活动衰歇后一种现象”（廖志杰，1989）。

目前认为，板缘地热区的热源是来自未冷凝的火山物质及近期侵入的岩浆体，作为高温地热带形成所必备的热源条件。而板内地热区，除个别情况外，一般无火山或岩浆热源，主要来自地下水的深循环在正常地温梯度下由地壳内部获得的热量。虽然在不同的地质历史时期，板内曾发生过多期岩浆活动，但是，岩浆活动在形成地热区中所起的作用大小，主要取决于岩体侵入的地质时代，当然，岩体规模、埋深和盖层保温条件也起着一定的作用。但目前已获得公认的事实是，中新世（新第三纪早期）到第四纪以来的岩浆侵入和喷发对地热区的形成才具有现实意义，而中新世以前的岩浆侵入和喷发作用带出的热量业已消失殆尽。地球内部的主要热源放射性衰变热能否成为地热区的直接热源呢？这是个值得讨论的问题，就目前见到的现象来看，放射性强的地下水水温并不高，而放射性弱的地下水水温反而高，说明放射性衰变热虽然是地球内部的重要热源，形成地球内部的增温，但不足以形成高温热源体，作为地热区的直接热源。

据现有资料,我国有 600 多座火山,其中多数是死火山,少数是第四纪火山。与近代火山热源有关的地热区主要分布在滇西及台湾。东北著名的火山五大连池的老黑山、火烧山和长白山的白头山,都分别于 1719、1720—1721 和 1597、1702 年两次喷发(黄尚瑶, 1986),但五大连池仅分布有略高于当地年平均气温的碳酸水,未发现明显的热异常。长白山的白头山天池附近虽有大量温泉出露,最高水温达到 82℃,但也没有见到火山温泉区所特有的喷泉、沸泉、喷气等现象。海南岛的一些第四纪火山区,地表也未发现明显的热异常,地下水为冷水。

四、地热资源的利用

地热资源是一种综合性有用矿产。它作为一种新能源,具有分布广、成本低、易于开采、可直接利用等优点,如能充分开发利用,可节省大量的煤炭和石油,对加速我国现代化建设,对工农业生产和人民生活都有重要意义。

地热资源的利用,包括两个方面:发电和非发电(也就是直接利用)。据世界各地利用地热的经验表明,高温地热资源(150℃以上)主要用于发电,地热发电后排出的热水可供直接利用;中低温地热资源(150℃以下)则以直接利用为主。

世界各国对地热资源的开发与利用已有悠久的历史。数千年前,我们的祖先就开始利用热泉和热矿泉洗浴和治病。据考证,早在公元前二百多年前,秦始皇就在陕西骊山华清池温泉内洗澡了,实际上可能还要早一些(黄尚瑶等, 1986)。对温泉的利用在史书上历代文人都有记载,但那时只限于洗浴和治病,随着人类社会的发展,对地热资源的开发和利用越来越广泛了。1812 年意大利人就 from 拉德瑞罗的喷气孔中提取硼酸(王伟礼^①, 1978)。1904 年在意大利的拉德瑞罗建立了世界第一座利用天然蒸气发电的试验电站,1913 年建成了一座 250 千瓦的地热电站,这标志着人类利用地热发电的开端。到目前为止,世界上利用地热资源发电的国家已有 10 多个,包括日本、冰岛、美国、意大利、前苏联、菲律宾、新西兰、墨西哥、萨尔瓦多、中国、匈牙利、法国、捷克和罗马尼亚等国家。新西兰、日本、美国分别于 1958、1961 和 1960 年建成了地热发电站。近年来,世界范围都在集中发展清洁而廉价的能源,地热作为一种新能源,引起了世界上广泛的重视。为此,地热发电正在以很快的速度增长。据统计,1961 年世界地热发电总装机容量为 42 万千瓦,1970 年上升到 67.5 万千瓦,九年内平均每年增长 5.4%,与世界电力生产的增长率相近,1975 年世界上约有 131 万千瓦的地热电站在运转中,1970—1975 年平均每年增长 14%。美国自 1960 年建立第一个小型地热电站以后,地热发电增长十分迅速,到 1980 年,发电能力已达 92.6 万千瓦,到 1983 年 6 月,全国发电量已达 128.37 万千瓦,跃居世界首位。我国自 1970 年广东丰顺建成 86 千瓦的第一座(除台湾省以外)地热发电站以来,先后在河北省怀来、湖南省灰汤以及西藏羊八井等地建设了一批地热发电站,目前西藏羊八井是我国最大的地热电站,装机容量已达 2.5 万千瓦,开始利用 150℃以上的地下热水用于发电。

地热资源的直接利用可应用于工农业、牧业、副业、渔业、医疗卫生及旅游业等各个方

^① 王伟礼,世界各国地热勘探和开发状况,水文所科技情报室,1978,29 页

面。如我国北京、天津等地利用地下热水采暖已有一定规模；天津等地将地下热水用于轻纺工业，如纺织、印染、缫丝、工业锅炉、烤革、木材加工、造纸、干燥、制冷、空调、蔬菜脱水加工等已取得明显的经济效益；湖北英山县利用地下热水繁育良种、养鱼、孵化及饲养畜禽；西藏羊八井热田的地下热水用于地热温室，种植各种新鲜蔬菜；我国广东、福建等地利用地下热水养鱼、栽培白木耳等。许多温泉出露的地区既是疗养区又是游览区，现代医学已为我们揭示了温泉的奥秘。我国的温泉疗养院已达 100 余所。可以说地热利用大有可为，应大力组织发展。

五、热田（或热泉）与成矿关系

1. 热泉与成矿关系

近年来，通过对现代地热系统和热泉环境中贵金属矿床的研究，越来越多地证明贵金属矿化作用与地热活动有成因联系(D. E. White, 1955)。A. Koga对日本Beppu地区 27个温泉中 Au、Ag 进行了广泛调查，他指出，热泉沉淀物大多数都含金，最高达 56.5×10^{-9} 。孙培基介绍了近年来世界上许多地区发现的与地热、温泉活动有关的大型金矿床，指出美国、日本、菲律宾、多米尼加和巴布亚·新几内亚均发现了这种与地热活动有关的金矿床^①。美国将这些新的金矿类型称之为热泉型金矿。Weissberg(1969, 1970)描述了新西兰沿陶波火山带东缘从地下热水中沉淀出来的桔红色非晶质硫化物及蛋白石似的氧化硅，含 Au、Ag 达矿石级品位。Seward(1982)在论述新西兰近代热液系统及金的矿化作用时指出，这些现代沉淀着 Au 的地热系统与卡林型浅成低温热液金矿床非常相似。美国内华达州的汽艇泉地热田，是当今世界上活动地热系统之一，该热田上 Au 的含量达 10.3×10^{-6} 。美国的麦克劳林金矿被认为是一个地热泉的残留体，矿石最高品位与硅质泉华、二氧化硅物质沉淀有密切关系。日本大分县发现一热泉含 Au 高达 238 g/t，被称为喷金的热泉。巴布亚·新几内亚的利希尔金矿和波格拉金矿区，那里的温泉、地热活动正在形成金矿床。利希尔岛的火山口中白色的硅华、黄色的硫华到处可见，皮球大小的卤水气泡在泥浆中翻滚，利希尔金矿就在脚下，热卤水中含 Au 高达 5g/t，金矿正在形成之中。菲律宾的阿库潘和安塔莫凯矿山是两大巨型金矿，储量达 350 t，平均品位 4.6 g/t，是环太平洋矿带最大金矿之一。据研究认为，金矿的形成与地热循环系统有关，该处地表有温泉活动，在离矿体 3 km 处有水温达 90℃ 的温泉，在矿床深部的含金石英脉及其平行的裂隙中流出的热水温度为 60—90℃。热泉沉淀物有碳酸盐、铁的氧化物、非晶质硅及二氧化碳、硫化氢气体等。多米尼加的老村庄金矿床是环太平洋带的大型金银矿。经研究认为，该矿与新西兰怀拉开金矿成因相似，同属地热系统在地表沉积金和银，在地下深处沉淀了 Zn、Cu，属于热泉成因的。

V. F. Hollister(1985)提出浅成低温热液贵金属矿床的成矿模式是：“浅成低温热液矿床是在近地表环境中的古热泉系统中形成的(图 1—3, 1—4)。具有工业意义的贵金属矿床，一般系在古热泉表面以下 100—1000m 深处形成的。出于评价和勘探矿床的目的，热泉系统可分为六个明显的部分，即：泉华、硅帽、交代矿（在碳酸盐岩中）(图 1—4)、

① 孙培基，国外寻找浅成低温热液金矿成就巨大，中国地质报，1989.4.24

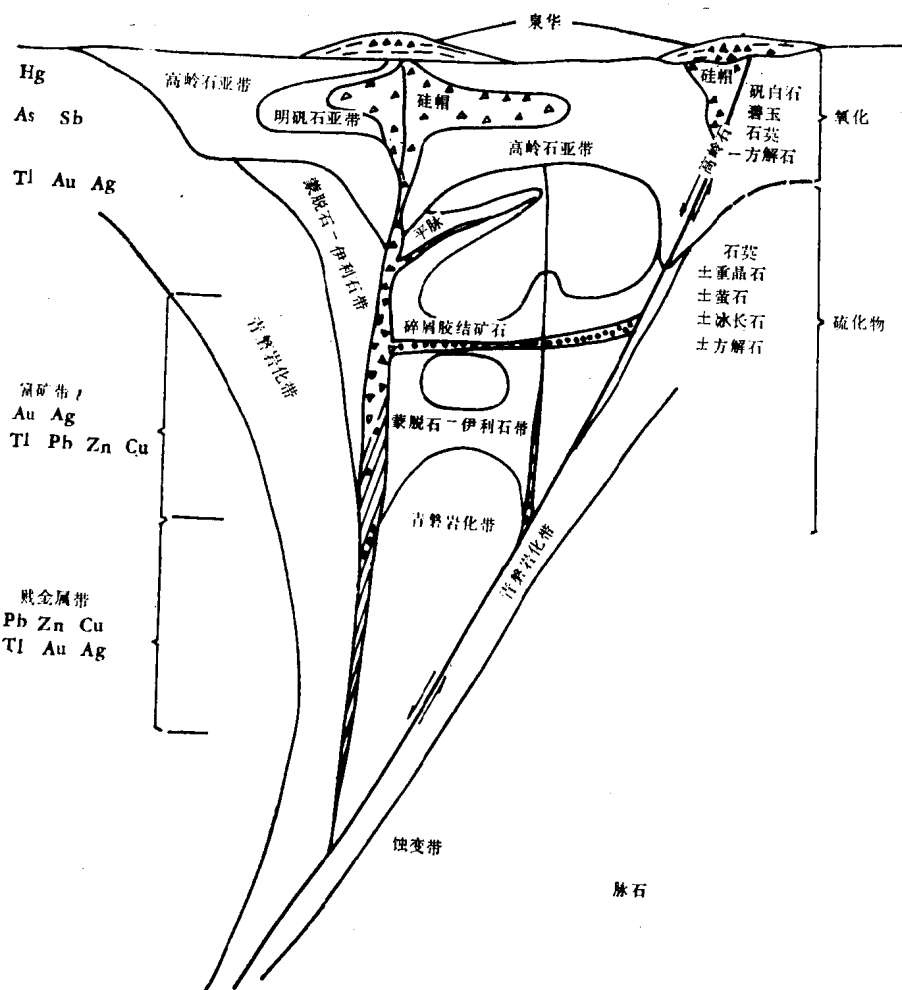


图 1—3 火山岩中的浅成低温热液矿床模式图

(据 V. F. Hollister, 1988)

该模式包括下列几部分：泉华、硅帽、富矿带、贱金属带和碎屑胶结矿。贵金属可赋存于硅帽（如内华达州的朗德山、迪韦德和波里艾利斯）；产于富矿带（如科罗拉多州的克里普尔溪、内华达州的科姆斯托克、红山的埃斯梅拉达、墨西哥的帕丘卡）；在贱金属带中（如科罗拉多州的锡尔弗顿）。缓倾斜矿脉可产于任一带中。碎屑胶结矿是某些现代热泉系统的地热库，常见于许多地区，如科罗拉多州的克里德、内华达州的达拉布萨和亚利桑那州的特朗什。在硅帽中可发现简单硫化物的辉铋矿、雄黄和辉银矿以及氧化物，自然金和自然银；

银的硫酸盐是大多数富矿带的特征矿物，银金矿、自然银和银硫化物，可与硫酸盐一起产于富矿带内

角砾状和网脉状富矿体、岩屑胶结的层状矿（图 1—3）和贱金属矿。上述每一部分也都是古热泉的一部分。在热泉水中矿物的沉淀作用，取决于含水层的孔隙度、与热泉反应的岩石的化学成分和物理性质。”该模式反映了 80 年代成矿理论上的新进展，是浅成低温热液贵金属矿床成矿模式的完善。Hollister 指出，泉华是在深部的成矿作用和地表通道形成的过程中，于热泉的表部间歇沉淀而形成的。它是热泉沉淀的富硅残余物。在泉华中，偶尔见有经济意义的金、银、锑、铀和汞的沉淀，如果在泉华中出现了金或银，则在硅帽以下的深处可能发现有开采价值的金或银矿。一般情况下，在矿床之上的泉华，常常有汞、铀、锑和锑的某些矿物组合。

C. E. Nelson 和 D. L. Giles(1985) 在研究了热液喷发机制与热泉金矿床关系后提

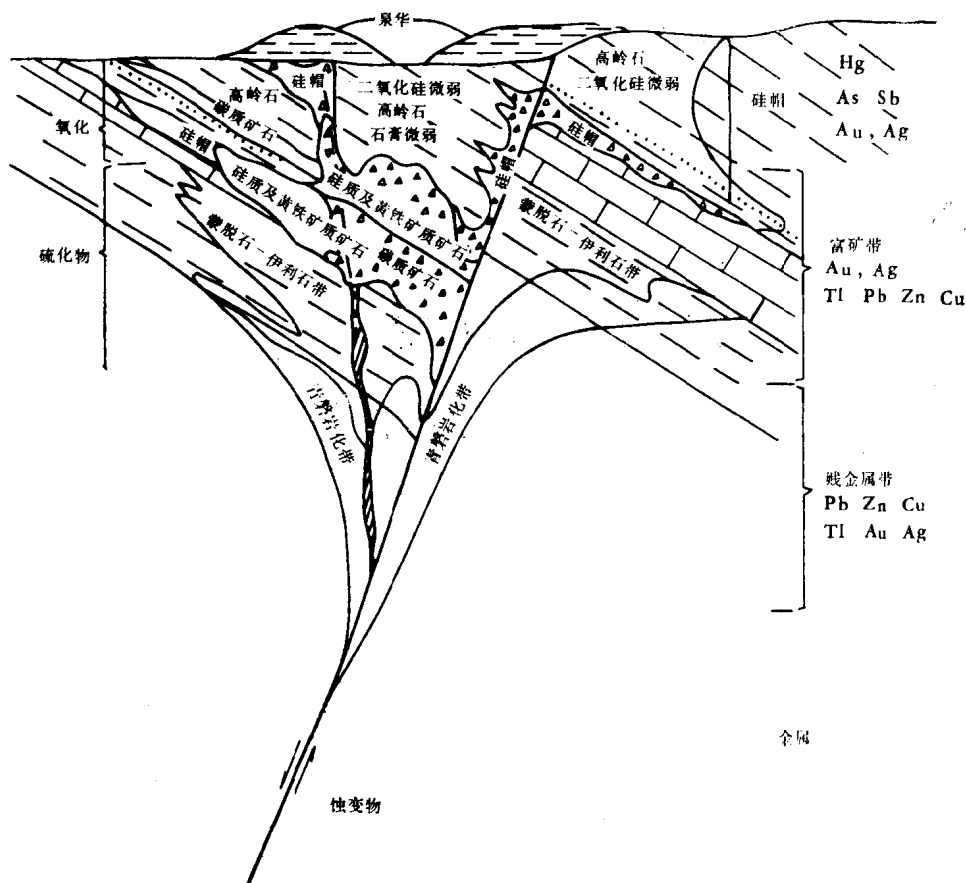


图 1—4 沉积岩中的浅成低温热液矿床模式图

(据 V. F. Hollister, 1988)

在沉积岩中，该模式包括下列几部分：泉华、硅帽、角砾岩、网状脉富矿带、贱金属带和交代矿。沉积岩中的石灰岩最易于被交代，硅帽中最常见的是富碧玉的物质，通常称作“碧玉”。与碧玉和石英共生的还有高岭石、石膏和弱硅化物。相当于火山岩内浅成低温热液系统中的富矿带内，其硫化物矿石可在许多地区分为硅质富黄铁矿矿石和碳质矿石，例如内华达州的卡林矿和桑塔费

出，贵金属的矿化机制是沸腾作用。近年来的研究表明，沸腾和贵金属沉淀有着空间和时间上的相关性（陈丰，1991）。矿化出现在比较窄的垂直范围内。金多半处于沸腾部位及其上方，而贱金属在其下方。金可能以气相运移，据推测，Au 以 AuAsS_2 形式存在，在近地表处再冷却进入液相，再氧化析出，这可以考虑为热泉中析出 Au 的机制。上升的热液与冷却的氧饱和地下水的混合可能也是金沉淀的机制。

最近有人提出金的表生成矿系统（陆元法^①，1991）。将地表和近地表环境中与表生水循环和金溶解沉淀循环有关的成矿作用归属为金的表生成矿系统，如产于古热泉系统的浅成低温热液贵金属矿床，现代的大陆和海洋环境中的地热金属矿化系统。矿液以低温压、低矿化度、低矿质浓度，成矿条件为非平衡过程为特征。成矿部位受氧化还原过程和界面控制。矿液或热液主要来自大气降水。生物和有机质对成矿起重要作用，如吸附和还原作用，聚金成粒作用，改变介质条件、间接促进金沉淀和粘连作用等。影响矿化的因素有，

① 陆元法，简论金的表生成矿系统和生物成矿作用，1991，3 页

化学的、物理的、还有生物和有机质的。

国外学者报道了许多热泉和地热钻孔中的金属含量，如表 1—2(H. L. Barnes, 1987) 所列。表中可见，As、Sb、Au、Ag、Hg、Tl 含量较高，其中 As、Sb 可高达 10% 以上，Au、Ag 达矿石级品位，同时还含有 Cu、Pb、Zn、Mn、Fe、Ga、Sn、Be 等微量元素。国外还发现了许多被称为富金属的地热系统。

表 1—2 地热井和地热泉沉淀物的金属含量 (10^{-6})

	As	Sb	Au	Ag	Hg	Tl	Cu	Pb	Zn	Mn	Fe	
新西兰 Broadlands												
Ohaki 池	400	10%	85	500	2000	630		25	70			
孔 2 消声器内	50	1000	50	2000	600?	150	2.5%	400	50	200	1000	Ga 700, Be 400, Sn 40, V 25
孔 2 消声器外	250	8%	65	200	200	1000						
孔 7	500	500	n. d.	100	250	250	500	50	500	250		Ga 150, Be 100 Sn 5, V 10
智利塔帝奥 227 泉	12%	1.5%	3	3	50	10		100	100	3000		
中国台湾省马祖 R-205 孔	500	500	n. d.	25	n. d.	2	500	较多	250	1000		Ni 500, Co 150, Mo 200, Ge 100, V 100, Sn 100
大西洋 II 深部红海 126 P-3 M	80		0.51	33		6	2000	380	1.25%	800	12.5%	Cd 63, Ni 40, Co 65, Mo 125, Ge 0.6
平均分析值			0.5	54			1.3%	0.1%	3.4%		29%	
新西兰岛 Rotokawa 孔 2	0.4%	30%	70	30	15	0.5%		50	100			
加利福尼亚索尔顿湖 W-768 (130 ± 20 °C)	0.1%	0.25%	n. d.	2.8%	n. d.	n. d.	较多	70	n. d.	3400	6 %	Ga 120, Be 370, Bi 90, Co 6
瓦达汽艇泉 硅质泥 准辉锑矿	600	4 % 2000	10 60	400 400	45	2000	2000	400	200			
东热区乌佐内 热区卡尔德拉	11.6%			30	6700		100		500		0.72%	Mo 30, Ge 40, Ba 7000, Sr 100
勘察加半岛新 西兰杯欧塔甫	30.15 %				4700		400				5.3%	Mo 200, Ge 100, Ba 200, Sr 300
香槟池	2 %	2 %	80	175	170	320		15	50			

(据 H. L. Barnes, 1987)

在玻利维亚发现了与近代热泉活动伴生的晚期锑矿化作用的 10 个例子。辉锑矿产在