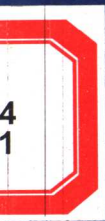
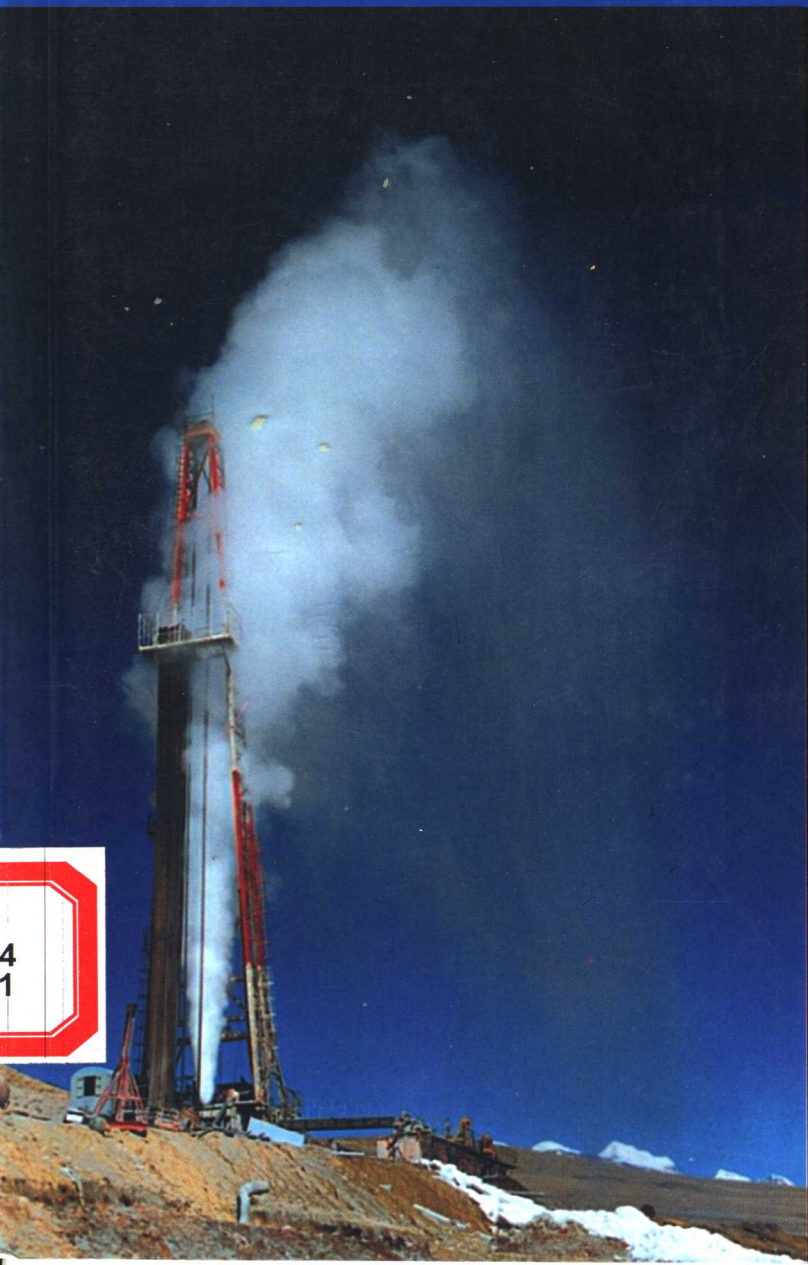


滇藏地热带

— 地热资源和典型地热系统

廖志杰 赵平等编著



科学出版社

滇藏地热带

——地热资源和典型地热系统

廖志杰 赵平 等编著

科学出版社

1999

内 容 简 介

全书共分三部分 12 章。第一部分比较全面地介绍了滇藏地热带的地质背景及地热资源的分布情况,对于 1 028 个有水化学资料的地热区,应用地球化学地热温度计估算出这些热田的热储温度,将它们分为高温、准高温、中温和低温 4 类地热系统,分别计算了它们的资源量,提出研究区内的地热是仅次于水力的能源资源。第二部分重点介绍了各具特色的 4 个典型地热系统:开发 20 余年的西藏羊八井热田,完成普查、详查和勘探的西藏羊易热田,与近代岩浆活动有关的云南腾冲热海热田和大气降水沿断裂带深循环而形成的云南瑞丽热田。第三部分对云南和西藏地热资源的开发和利用分别加以讨论。

本书内容丰富,资料翔实,集中了一批近年来的最新研究成果,是一部可供地质学和能源科研部门、大专院校、国土资源规划和开发部门参考的专业论著。

图书在版编目(CIP)数据

滇藏地热带——地热资源和典型地热系统/廖志杰等编著.北京:科学出版社,1999

ISBN 7-03-007718-0

I.滇… II.廖… III.①地热-研究-云南②地热-研究-西藏 IV.P314

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 25411 号

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号
邮政编码:100717

丽源印刷厂 印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1999 年 10 月第 一 版 开本:787×1092 1/16
1999 年 10 月第一次印刷 印张:10 1/4
印数:1—800 字数:227 000

定价:25.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(环伟))

作者简介



廖志杰,广西桂林人,1935年2月出生。北京大学地质学系教授,中国地质大学兼职教授。1955年考入北京大学地质地理系构造地质专业,1960年毕业后留校为研究生,1964年2月毕业并留校任教师。1970年始从事地热资源的开发与研究。1973年起开始在腾冲进行地热考察。1975年至1985年参加中国科学院组织的青藏高原综合科学考察队,从事西藏、川西和滇西的地热资源调查。是《西藏地热》、《腾冲地热》、《横断山区温泉志》和《西藏温泉志》等几本专著的主要撰稿人之一,在国内外期刊和会议文集发表的主笔论文100余篇。还有科普读物和译作若干。在横断山区所做的地热资源考察与研究曾获得国家教委科学技术进步二等奖(第二完成人)。



赵平,江苏镇江人,1963年12月出生,1986年7月毕业于中国科学技术大学地球与空间科学系地球化学专业,同年进入中国科学院地质研究所继续深造,先后获得硕士和博士学位。1992年留所工作,1995年担任副研究员,1998年破格聘为研究员。曾在意大利国际地热研究所和冰岛国家能源局进行短期研修,现任国际地热协会信息交流委员会委员、中国能源研究会地热专业委员会委员、中国地质学会数学地质专业委员会副主任兼秘书长。近几年主要从事地热地质研究,数次赴西藏和云南进行野外考察和采样,在气体地球化学、同位素地球化学、水-岩相互作用、热田监测和资源评价等方面做过工作,已发表学术论文30篇,获中国科学院自然科学三等奖和原地质矿产部勘查三等奖各一次。

前 言

《滇藏地热带——地热资源和典型地热系统》是“八五”期间国家重点科技攻关项目的研究成果之一,课题原来名称为“地热发电选点及万千瓦级地热电站基地论证”。书中羊八井热田一章是重新撰写的,为国家自然科学基金委员会资助项目“地热系统气体地球化学的研究及应用”(批准号:49402039)和“西藏羊八井、羊易热田流体成因、流体作用及热田模型”(批准号:49672168)的部分研究成果。

在我国大陆地区,高温地热资源主要分布在西藏、云南西部和四川西部。在那里,有记录的温泉总数超过1700个,可以观察到喷汽孔、冒汽地面、沸泉、沸喷泉、水热爆炸和间歇喷泉等高温地热景观。这些温泉在喜马拉雅山北麓沿雅鲁藏布江呈带状密集分布,向东扩展至川西高原,沿横断山脉向南延伸到云南西部,本书将这条温泉密集带定义为“滇藏地热带”。根据带内温泉的地球化学研究,许多温泉区的热储温度都超过了150℃,能满足地热发电对流体热焓值的要求,因此,地热发电选址,特别是万千瓦级地热电站基地的选择,非在此带不可。

人类对于温泉这一地球内热外释现象的认识可上溯到数千年前,即便在山重水复、古代属于蛮荒之地的青藏高原和横断山脉,最早报道温泉的文献也可追溯到东晋时代,当时常璩在《华阳国志》中首先报道了川西安宁河谷的喜德红妈温泉。此后,北魏的《水经注》和唐代的《元和郡县志》也有相应的记载。滇西地区有关温泉的文献初见于明朝中叶,明朝代宗景泰二年(公元1451年),江西庐陵人陈文任云南右布政使,纂修《景泰云南图经金腾两指挥使司志》,报道了腾冲的马邑村、大洞村、罗左冲村和缅甸村等地的4个温泉。明朝世宗嘉靖年间(公元1522~1566年),川人杨慎贬戍云南永昌(今云南保山地区),将昌宁的鸡飞温泉与滇东的安宁温泉做了对比。继之,万历年间所修的《浪穹县志略》描述了著名的洱源县九气台温泉。对云南温泉记叙最翔实的当属明末徐宏祖,他在《徐霞客游记》中记录了云南的19处温泉,其中以对硫磺塘(即今热海热田的一角)的记叙最为精彩。西藏温泉的报道是否见诸于古代的藏文文献,作者因不懂藏文而无从知晓。目前所知,对西藏温泉最早的汉文记载见于唐代的《法苑珠林》,其中《王玄策行传》云“吐蕃国西南有一涌泉,平地涌出,激水高五六尺,甚热,煮肉即熟,气上冲天,像似气雾”(转引自《四库全书》)。王玄策为唐太宗的右率府长史,曾三次出使印度,这段话无疑是他途经吐蕃时对地热景观的生动描述。关于西藏温泉的西文记载则见于公元1816年,W. Moorcroft曾提及在玛旁雍错旅行时见到湖西北角有温泉,即今安迦河道内的齐吾贡巴。到了19世纪下半叶,前往西藏探险的西方人逐渐增多,有关温泉的报道相应增加。公元1871~1872年,T. G. Montgomerie训练的班自达们自日喀则出发,经南木林县翻越念青唐古拉山到达纳木错西岸,向北再绕过东岸,复越念青唐古拉山到达拉萨,沿途共见温泉5处,其中2处是沸喷

泉，“喷高可达 40 或 60 英尺”。上述有关滇藏地热带内温泉的所有报道均属一鳞半爪，滇藏地热带内到底有多少温泉，在本世纪 70 年代以前，无人能给出比较确切的回答。

关于人们对温泉的利用，早期大多是以洗浴为主，以后用来灌溉农田。人们懂得从温泉中提取矿物质，则是很晚的事情。元顺帝至正九年（公元 1349 年），汪大渊首次报道台湾大屯火山地热区盛产硫磺。明末徐霞客、清初郁永河都分别对云南腾冲和台湾人民如何从地热流体中提取硫磺做了详细的描绘。直到半个多世纪之后，意大利人在 1812 年才开始在拉德瑞罗的地热蒸气中提取硼砂。但是，在以木材为主要能源的时代，谁也没有会想到可以从温泉之下储存的地热能中提取出绿色能源造福人类。

进入 20 世纪，在工业化的资本主义国家中，既无煤又缺油的意大利，尝到了缺乏能源的苦头。1904 年 7 月，生产硼酸的 Francesco de Larderel 公司经理 Prince Piero Ginori Conti 开始试验利用地热蒸气进行发电，虽然当时仅点亮了 5 只灯泡，但却标志着地热发电的开始。1912 年，意大利人在拉德瑞罗开始建造世界上第一座地热电站。1913 年，一台 250 kW 的汽轮机运转成功。在本世纪 20 年代，美国和日本也进行过地热发电的试验，但终因未能解决腐蚀、结垢等问题而宣告失败。此后，战争爆发，一度中断了对地热发电的研究。50 年代，新西兰在怀拉基利用地热水（而不是地热蒸气）发电获得成功，地热发电跨入了新时代。这时，日本、美国和前苏联又开始尝试利用地热进行发电。70 年代开始，能源发展进入石油时代，70 年代初期两次能源危机，再加上自然环境日益恶化、常规能源储量日渐减少，人们开始寻求一些新的替代能源。地热能以资源覆盖面广，对生态环境污染小，运营成本低等优势而受到人们的青睐。这时，在世界范围内（包括中国）出现了一个地热勘探、开发和利用的高潮。1978 年，菲律宾、印度尼西亚等国开始建造一些大功率的地热电站，地热发电才真正具有一定的规模和影响力。据统计，利用地热资源进行发电，1920 年起的年增长率约为 8.3%，1978~1985 年间高达 16.5%。1985 年，全世界地热发电总装机容量为 4 763 MW，1990 年为 5 831.72 MW，1995 年增长到 6 797.975 MW，到 2000 年估计可达到 9 960 MW（Huttrer, 1995）。

70 年代初期，在中国东部 7 个中低温热田建立了小型地热试验电站，但由于地热水的温度比较低，经济效益不明显。现在，除广东丰顺、湖南灰汤试验电站仍继续运营外，其他试验电站均已停运。在我国西部，1976 年开始建设西藏羊八井地热电站，装机容量从 1977 年的 1 MW 逐步发展到目前的 25.18 MW，生产出的电力通过 110 kV 的高压输电线送往拉萨，占拉萨电网的 40%~50%。尽管如此，羊八井地热电站单机的装机容量只有 3 MW，尚不能与世界上一些大规模地热电站的汽轮机组相比较，它们的单机容量往往在 11~135 MW 之间，多数为 55 MW。羊八井热田能否发展成为万千瓦级大型地热电站，除了羊八井之外，还有那些热田有可能成为万千瓦级的地热电站，这是本书作者试图回答的一个问题。

为了比较准确地给出答案，仅靠作者在 5 年内的研究工作显然是不现实的。幸好，北京大学地质学系地热研究室自 1973 年以来就在滇藏地区进行了持续不断的科学研究，先后出版了一批论文和专著，西藏自治区地质矿产厅地热地质大队、云南省地质矿产局第二地质工程勘察院长期在有关热田坚持工作，也积累了一批丰富的资料，为本书的完成奠定了坚实的基础。

全书分为三部分：

第一部分是根据《西藏地热》、《腾冲地热》和《横断山区温泉志》所提供的丰富资料来探讨滇藏地热带的地热资源。尽管研究区内地热显示丰富多彩,有世界上为数不多的高温间歇喷泉,有形态各异的水热爆炸坑等,但它们都不是本书重点讨论的对象。本书在讨论地热活动地质背景的基础上,对于1 028个有水化学资料的地热区,计算出它们的地球化学温度,并以温度超过150℃、在90℃至150℃之间和低于90℃为界限,把它们划分为高温地热系统、中温地热系统和低温地热系统3大类,重点讨论高温地热系统,并根据地质背景对高温地热系统归纳出3种成因类型。最后,将滇藏地热带内的地热能与常规能源进行了比较,提出在大力发展水力发电的同时不应忽视开发地热能。

第二部分重点论述几个典型地热系统。西藏羊八井热田是一个已经开发了20多年的热田,装机容量达到25.18 MW,北区两口深井皆已揭穿250℃以上的高温热储层;西藏羊易热田在经过9年的普查、详查和勘探后,1990年已向国家提交了储量报告;云南腾冲热海热田是一个历经普查和长期研究的高温热田,处于岩浆活动区内,现正在进行地热勘探,前景良好;云南瑞丽热田则是另一种类型的热田,深部不存在岩浆囊或地壳熔融体,是受断裂和大气降水循环深度控制的准高温地热系统。对这4个热田进行阐述,无疑将对合理开发和利用滇藏地热资源具有重要的指导意义。

第三部分阐述云南热海热田资源开发的可行性研究和开发西藏地热资源对消灭区内无电县的意义。

参加本书撰写的作者有:北京大学地质学系廖志杰、过帼颖、刘时彬、邵宏翔、赵凤三和朱梅湘,中国科学院地质研究所赵平、金建,西藏地质矿产厅地热地质大队多吉、梁廷立、谢鄂军、杜少平,云南省第二地质工程勘察院贾翕志、贾希义,国家电力公司西安热工研究院刘志江以及中国地震局地质研究所白登海。具体分工如下:前言廖志杰、赵平;第一、二、五、六章廖志杰;第三章廖志杰、邵宏翔;第四章廖志杰、赵凤三;第七章赵平、多吉、梁廷立、金建、谢鄂军、杜少平和过帼颖;第八章梁廷立、朱梅湘和赵平;第九章廖志杰、赵平、贾翕志、朱梅湘、贾希义、过帼颖和白登海;第十章贾希义、刘时彬和白登海;第十一章刘志江、廖志杰;第十二章刘时彬。全部书稿由廖志杰、赵平统编、修改而成。

最后,作者要感谢曾在滇藏地热带开展过地热科学考察的同志们,是他们的辛勤工作,才积累了一批宝贵的资料,感谢任湘、张振国和唐宁华等教授的指导与支持;特别感谢中国地震局地质研究所赵国泽研究员和成都理工大学王绪本教授在云南腾冲热海热田和瑞丽热田所做的MT测量;同时也要感谢中国地质科学院地质力学研究所康文华、李德禄两位研究员对作者的关心和鼓励。

目 录

前 言

第一部分 滇藏地热带的地热资源	(1)
第一章 滇藏地热带概况	(1)
第二章 区域背景	(5)
第三章 滇藏地热带高温地热系统	(9)
第一节 高温地热系统的厘定	(9)
第二节 高温地热系统的成因类型	(17)
第三节 准高温地热系统	(18)
第四节 地热资源评价方法	(19)
第五节 高温地热系统的地热发电潜力	(22)
第六节 准高温地热系统的地热发电潜力	(24)
第四章 滇藏地热带中温地热系统	(31)
第一节 中低温地热资源的类型	(31)
第二节 滇藏地热带的中温地热资源	(32)
第三节 准高温地热系统中浅部热储的中温地热资源	(35)
第五章 滇藏地热带低温地热系统	(42)
第六章 滇藏地热带地热资源潜力	(58)
第一节 滇藏地热带的地热资源	(58)
第二节 滇藏地热带内建立万千瓦级地热电站的前景	(60)
第二部分 典型地热系统	(61)
第七章 羊八井热田	(61)
第一节 引言	(61)
第二节 地质特征	(63)
第三节 地球物理	(66)
第四节 地球化学	(69)
第五节 热储特征和热田成因	(82)
第六节 存在问题和开发前景	(85)
第八章 羊易热田	(88)
第一节 概况	(88)
第二节 勘探历史	(92)
第三节 资源评价	(94)

第四节	开发方案可行性研究	(97)
第五节	热田的开发潜力	(100)
第六节	结论	(101)
第九章	热海热田	(103)
第一节	研究历史	(103)
第二节	地质概况	(104)
第三节	地表显示	(106)
第四节	地球化学	(107)
第五节	水热蚀变	(113)
第六节	深部温度	(118)
第七节	地球物理勘探	(119)
第八节	概念模型	(125)
第九节	资源评价	(125)
第十节	建立万千瓦级地热电站的可能性	(126)
第十章	瑞丽热田	(128)
第一节	概述	(128)
第二节	区域背景和热田地质	(129)
第三节	瑞丽热田的范围	(130)
第四节	热田的水文地质	(133)
第五节	水化学特征	(134)
第六节	瑞丽热田的成因	(135)
第七节	瑞丽热田的地热资源和利用	(136)
第三部分	滇藏地热带地热发电可行性分析	(138)
第十一章	云南腾冲地热发电可行性研究	(138)
第一节	腾冲自然经济概况及电力供应	(138)
第二节	腾冲地热开发是经济腾飞的基础	(139)
第十二章	西藏高原地热能的开发和利用	(142)
第一节	西藏能源概况	(142)
第二节	西藏的电力工业	(143)
第三节	西藏地热发电的发展和现状	(143)
第四节	地热能的开发利用与消灭无电县	(144)
参考文献	(147)
英文摘要	(151)

第一部分 滇藏地热带的地热资源

第一章 滇藏地热带概况

1973年,北京大学地质学系地热研究室与有关单位共同组成腾冲地热资源联合调查组,考察了腾冲县境内的地热资源,次年提交专题报告。1975年开始,该研究室参加了中国科学院青藏高原综合科学考察队,对西藏自治区境内的温泉进行了初步调查,促进了羊八井热田的勘探和开发。在上述工作的基础上,1978年提出“喜马拉雅地热带”的概念(佟伟等,1978)。当时定义的“喜马拉雅地热带”西起西藏阿里地区西南端,向东大体沿雅鲁藏布江流域展布,至昌都西南地区后折向东南,经高黎贡山到达云南西部腾冲地热区。地热带的南界为喜马拉雅山主脊线附近的电气石白云母花岗岩体,北界为冈底斯山和念青唐古拉山北坡的白垩纪末至第三纪初的钙碱性火山岩体,其北东端沿念青唐古拉大断裂突出成盲肠状。“喜马拉雅地热带”向西延伸进入克什米尔,更西则到达阿富汗、伊朗、土耳其等国,与地中海地热带相衔接;往南从腾冲地热区经缅甸、印度尼西亚岛弧与环太平洋地热带相汇合。因此,“喜马拉雅地热带”是全球性地热带的重要组成部分,是喜马拉雅造山运动的产物。

鉴于西藏境内的温泉主要分布在喜马拉雅山脉以北的雅鲁藏布江南北两侧,李春昱(1981)曾建议称之为“雅鲁藏布地热带”。1985年,作者根据该区域内温泉出露的地质构造条件和水化学特征,在研究区内划分出4条地热带(Liao et al., 1985):

(1)喜马拉雅地热带:喜马拉雅山脉北坡,雅鲁藏布江两岸,排放富硼的Cl-Na型地热水;

(2)腾冲地热带:怒江断裂带与印缅山脉之间,排放贫硼的Cl-Na型地热水;

(3)羌塘-横断山地热带:怒江断裂带以北和以东的羌塘高原及横断山脉,新构造运动活跃,地震频繁,断裂发育,排放 HCO_3 -Na型地热水;

(4)喜马拉雅南坡地热带:喜马拉雅山脉主脊线南侧,主边界大断层以北的狭长地带,构造活动强烈,浅源地震密集,温泉少、温度低,排放的也是 HCO_3 -Na型地热水。

由于西藏、四川西部和云南西部出露的温泉呈带状密集分布,都处于欧亚板块和印度板块的碰撞造山带上,具有相同的构造成因,而且泉区主要分布在西藏和滇西,因此,将这些地区统称为滇藏地热带。该地热带是近纬向的地中海-喜马拉雅地热带的一部分。

滇藏地热带是我国地热活动最强烈的地带,出露的温泉总数超过全国的一半,汇集着我国大陆地区所有的沸泉、沸喷泉、喷汽孔、冒汽地面、水热爆炸区和间歇喷泉等高温地热显示,现将带内的温泉按区域和温度范围在表1.1中列出:

表 1.1 滇藏地热带地热活动区数量统计表
(单位:个)

地 区	总数	沸泉	热泉	温泉	微温泉	古泉区	情况不明区
西藏	709	44	145	57	90	20	353
1 阿里	42	10	11	4	17	1	
2 日喀则	74	18	33	10	10	3	
3 那曲	82	2	43	8	23	7	
4 拉萨	35	7	13	11	4		
5 山南	26	6	14	2	2	2	
6 昌都	91	1	31	22	30	7	90
四川西部	342	8	101	68	121	15	29
1 甘孜	240	7	75	45	78	12	23
2 阿坝	27	1	3	2	14	3	4
3 凉山	55		18	16	21		
4 攀枝花	12		2	3	5		2
5 其他	8		3	2	3		
云南西部	694	19	269	176	202	11	17
1 迪庆	37		13	10	13	1	
2 怒江	40		11	8	19	1	1
3 德宏	72	4	34	25	9		
4 保山	156	4	70	37	43		2
5 丽江	34		6	4	21		3
6 大理	105		33	21	41	9	1
7 临沧	62	6	31	9	10		6
8 思茅	92	1	35	24	29		3
9 西双版纳	55	3	24	21	6		1
10 红河西南	41	1	12	17	11		
总计	1745	71	515	301	413	46	399
所占百分比		4	30	17	24	3	23

注:本表资料据佟伟等(1981,1989,1994),略做删减和补充。

在滇藏地热带,水热活动区约有 1 750 个,有 22.9% 的地热活动区情况不明,其中的 88% 出现在西藏。高温沸泉区仅占总数的 4.1%,其中藏南占 62%,滇西占 27%,川西占 11%;热泉(45℃至当地沸点)占 29.5%,其中滇西占 52%,西藏占 28%,川西占 20%;温泉(35~45℃)仅占 17.2%,其中滇西占 58%,川西占 23%,西藏占 19%;微温泉(7~35℃)占 23.7%,其中滇西占 49%,川西占 29%,西藏占 22%。图 1.1 是滇藏地热带内 1°×1°区域的天然热流量分布图。

从图中不难发现,温泉群天然热流量超过 300 MW 的地区有:

- (1) 90°~91°E、30°~31°N 含西藏当雄羊八井、曲才等地热区,478 MW;
- (2) 85°~86°E、29°~30°N 含西藏昂仁搭各加间歇喷泉区,334 MW。

温泉群天然热流量为 201~300 MW 的地区有:

- (1) 98°~99°E、24°~25°N 含云南腾冲热海热田,257 MW;
- (2) 81°~82°E、30°~31°N 含西藏普兰曲普等地热区,217 MW;
- (3) 91°~92°E、28°~29°N 含西藏隆子布雄朗古等地热区,209 MW;
- (4) 80°~81°E、31°~32°N 含西藏噶尔巴尔、索多等地热区,202 MW。

温泉群天然热流量为 101~200 MW 的地区有:

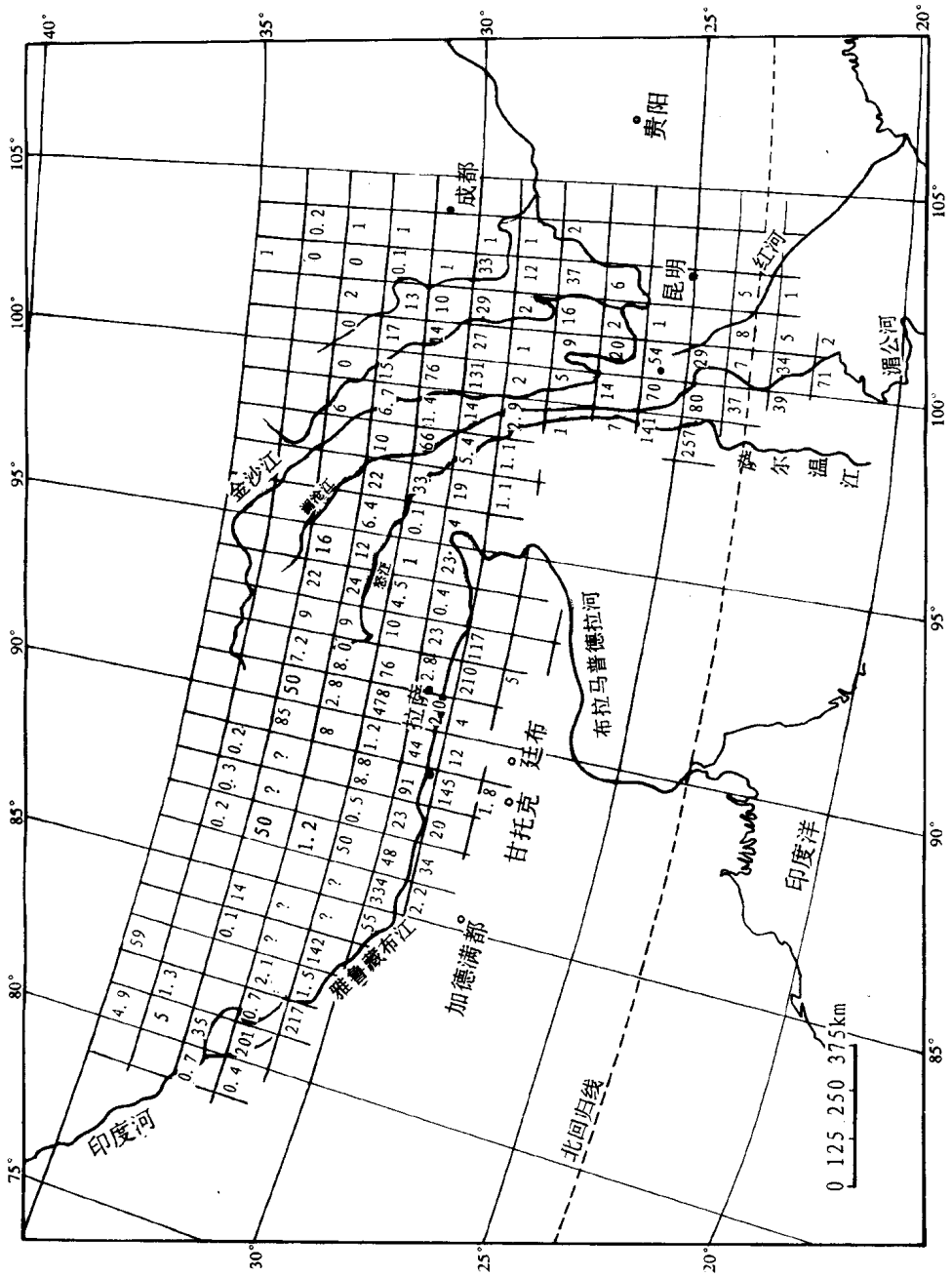


图 1.1 滇藏地带内 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 区域的天然热流量
(单位: MW)

- (1) 86° ~ 87°E、29° ~ 30°N 含西藏昂仁色米、拉布朗等地热区, 148 MW;
- (2) 88° ~ 89°E、28° ~ 29°N 含西藏萨迦卡乌地热区, 145 MW;
- (3) 90° ~ 91°E、29° ~ 30°N 含西藏当雄羊易热田, 121 MW;
- (4) 92° ~ 93°E、28° ~ 29°N 含西藏隆子突多等地热区, 117 MW;
- (5) 98° ~ 99°E、25° ~ 26°N 含云南腾冲瑞滇热田, 141 MW;
- (6) 99° ~ 100°E、30° ~ 31°N 含四川巴塘与理塘交界处的众多地热区, 131 MW;
- (7) 雅鲁藏布江源头玉龙曲珍等地热区(83° ~ 84°E、30° ~ 31°N), 142 MW。

温泉群天然热流量为 50 ~ 100 MW 的地区有:

- (1) 82° ~ 83°E、34° ~ 35°N 含西藏北部改则托和平错高温泉, 59 MW;
- (2) 84° ~ 85°E、29° ~ 30°N 含西藏萨嘎如角地热区, 55 MW;
- (3) 86° ~ 87°E、30° ~ 31°N 含西藏昂仁南独木等地热区, 50 MW;
- (4) 86° ~ 87°E、32° ~ 33°N 含西藏北部龙马尔地热区, 50 MW;
- (5) 88° ~ 89°E、29° ~ 30°N 含西藏谢通门查布间歇喷泉区, 91 MW;
- (6) 89° ~ 90°E、32° ~ 33°N 含西藏北部索布查热泉区, 85 MW;
- (7) 90° ~ 91°E、32° ~ 33°N 含西藏安多兹格塘错地热区, 50 MW;
- (8) 91° ~ 92°E、30° ~ 31°N 含西藏那曲谷露间歇喷泉区, 76 MW;
- (9) 97° ~ 98°E、30° ~ 31°N 含西藏昌都以南至怒江桥以北西西等地热区, 66 MW;
- (10) 99° ~ 100°E、30° ~ 31°N 含四川茶洛间歇喷泉区, 76 MW;
- (11) 99° ~ 100°E、25° ~ 26°N 含云南云龙烟登山等地热区, 70 MW;
- (12) 99° ~ 100°E、24° ~ 25°N 含云南云县大控蚌等地热区, 80 MW;
- (13) 100° ~ 101°E、25° ~ 26°N 含云南洱源至大理等地热区, 54 MW;
- (14) 100° ~ 101°E、21° ~ 22°N 含云南勐海和景洪南部诸地热区, 71 MW。

高天然热流量区的分布具有明显的规律性: 西藏南部主要沿雅鲁藏布江和噶尔曲分布; 西藏北部和东部主要沿怒江断裂带分布; 云南主要分布在高黎贡山以西的腾冲县和德宏州, 另有一条高温地热带大体沿澜沧江西侧的临沧花岗岩带分布。这种分布状态显然受到地质构造的严格控制。

第二章 区域背景

号称世界屋脊的青藏高原,北起昆仑,南达喜马拉雅,西自喀喇昆仑,东抵横断山脉,幅员辽阔,地势险峻,构造复杂。高原的抬升与新第三纪以来较近期的断裂和挤压作用有关。青藏高原及其周边地区的地热活动十分活跃,如果说岩浆喷发是最强烈的地热景观,那么,温泉就是最常见的地热显示,而在青藏高原,两者兼而有之。早在 19 世纪末和本世纪初,许多西方学者怀着不同的目的先后进入高原,他们首先描述了高原北侧的火山活动及火山岩,此后,在西藏南部雅鲁藏布江北岸、冈底斯山北坡,他们又发现一条东西延伸逾 1 000 km、南北宽约 400 km 的早新生代火山岩带。青藏高原温泉数量之多、温度之高皆居全国之冠。在那皑皑雪山之下,深壑断谷之中,分布着上千个温泉和沸泉,烟雾缭绕,蓝天、白云、雪山、温泉交相辉映。为什么在这巍巍高原之上会有如此强烈的地热活动呢?仔细考察一下,又可发现青藏高原及其周边地区的地热活动在各个部位也不尽相同:汹涌澎湃的雅鲁藏布江两岸,分布着许多富硼的 Cl-Na 型高温热水;云南腾冲热海热田出现的是贫硼的 Cl-Na 型高温热水;在一望无垠的藏北高原、川西高原及沟脊纵横的横断山区,高温热泉则属于另外一种类型,贫硼的 $\text{HCO}_3\text{-Na}$ 型热水(即苏打水)。那么,又是什么原因导致它们之间有如此大的差别呢?长期以来,这些地热奥秘一直吸引着中外地球科学工作者进行不懈的探索。

青藏高原地热活动成因的探索必须从区域地质和深部地质两方面进行研究。青藏高原是全球最高、最年轻的高原,经过一次次陆-陆碰撞,由多个地体拼贴而成。从中生代到始新世,青藏高原上出现过完整的威尔逊旋回,此后,便发生了直到今天还在活动的碰撞后变形作用。在地形上,该带具有许多堪称世界之最的特征:最大的上升速率(南迦帕尔巴特山几乎每年升高 1cm),极地之外最大的冰川聚集区(喀喇昆仑),最高的地势(喜马拉雅山脉)以及一些最大河流的发源地,如印度河、雅鲁藏布江-布拉马普特拉河、恒河、长江、澜沧江-湄公河、怒江-萨尔温江和黄河等。在 3 000 km 长的青藏高原上,从北向南依次分布着昆仑山褶皱系、可可西里-巴颜喀拉褶皱系、羌塘-青南-三江褶皱系、班公湖-东巧-怒江超基性岩带、藏北构造区(自北向南依次出现:北部拗陷带、北冈底斯火山岩带和冈底斯-拉萨-波密褶皱带)、雅鲁藏布江缝合带和喜马拉雅构造区(自北向南依次出现:北喜马拉雅变形复理石带、喜马拉雅北坡推覆构造带、高喜马拉雅结晶岩叠瓦构造带、低喜马拉雅推覆构造带和西瓦里克边缘褶皱带)。青藏高原地质构造的基本特征可以概括为:地壳加积楔、壳幔滑脱、高原南部的大陆岩石圈俯冲、高原北缘和东缘的大规模侧向平移。在大陆岩石圈碰撞之后,岩石圈的俯冲并未随之停止,而是分裂为一系列近似水平的薄片,互相运动和冲掩堆叠起来,形成厚约 70 km 的地壳。这除了新生代印度大陆北缘的地壳加积楔之外,中生代末广泛的岩浆活动及适度地壳缩短的安第斯型岛弧增厚作用、新生代晚期北区出现的向南倾斜的陆内俯冲带并伴以新一轮地壳加积楔,也都起到重要的作

用。

撕裂的陆壳薄片在相互运动过程中,由于摩擦熔融,形成许多小规模的花岗岩体侵入在增厚的地壳中。在高喜马拉雅带,花岗岩和伟晶岩的矿物年龄为 22 Ma,代表变质作用和花岗岩化的最小年龄。这些岩石的铷同位素初始比值大于 0.71,证明它们是地壳成因的 S 型花岗岩,成岩过程与主中央冲断层活动有关,并导致基底和富硼特提斯沉积物发生变质。Andreux 等(1978)提出:在冲断层之下 30 km 至 40 km 深处,低喜马拉雅的一些岩层局部重熔形成岩浆,这些岩浆沿着向北倾斜的片理向上侵位,在高喜马拉雅形成广泛分布的、平行于向北倾斜的层理或平行于母岩片理的巨大的整合板状体或岩席,有的岩体呈岩墙贯入南北向的断裂中。虽然板块以每年几厘米的平均会聚速率在主中央冲断层上运动时所产生的剪切生热不会产生花岗质熔融体,但是,在冲断层上面快速的间歇性运动则有可能产生足够的热量引起局部熔融。在西藏高原南部,除高喜马拉雅带以外,拉轨岗日山脉和冈底斯山脉均有一些同位素年龄为 25 ~ 10 Ma 的小花岗岩体,它们可能就是在这些地区由于巨大冲断层的间歇性剪切运动使地壳的温度升高,进而局部熔融而形成的。因此,可以认为,西藏南部的高热流背景场主要是板内冲断作用引起的。西藏南部的花岗岩,特别是高喜马拉雅的电气石白云母花岗岩以异常高的硼含量为特征,这是西藏南部高温地热水中硼含量高的根本原因。

为了深入探讨西藏高原隆升动力和形成机理,1994 ~ 1996 年由中国地质大学(北京)、美国华盛顿大学和加拿大地质调查局合作进行了 INDEPTH-MT 研究。其研究的主要成果是:(1)西藏中南部地壳中存在深度不同、沿剖面方向不完全连续的上、下两组低角度北倾的电性梯度带和畸变带。其中,位于 25 ~ 60 km 深处的梯度带在藏南与深地震反射法发现的主喜马拉雅逆冲断裂(MHT)相当吻合,它由南向北延续到当雄南边折落直下,而上部的电性畸变带普遍发育,深度在 15 ~ 30 km 之间,它可能是上地壳中一系列逆冲、滑脱构造面的反映;(2)西藏中南部普遍存在壳内低阻高导体,它们彼此互不相连、一般埋深较浅但延伸深,分别位于构造带的结合部位。冈底斯构造带的壳内高导体分布范围广,顶面埋深约 20 km,底面深度在 40 ~ 60 km 之间,可能反映上地壳存在局部熔融区(魏文博等,1997)。这些局部熔融区是西藏中南部强烈的水热活动的主要热源。

当刚性的印度大陆板块向北俯冲时,在它的东翼形成缅甸弧。缅甸弧由北部的那加山脉和南部的阿拉干山脉组成,弧顶向西,弧形山系的东麓是蛇绿岩套。根据中-深源地震的震源机制解析,该地区具右行平移特征,即印度板块向北俯冲,欧亚板块向南滑动。在缅甸弧形成和发生陆-陆碰撞之前,缅甸弧后并未如西藏冈底斯北坡一样出现钙碱性火山岩带,缅甸中央火山带的火山喷发在中新世以后,更新世达到高峰。安达曼海中巴仑岛的克拉卡陶火山,在 1789、1795、1803 和 1883 年还出现过灾难性喷发。腾冲火山位于缅甸火山带的北端,岩性偏碱性,它们的形成与缅甸弧后开裂有着直接联系,因为在大陆相撞形成缅甸弧的同时,腾冲与掸邦开始上升形成高原,在缅甸则出现了缅甸中央谷地。中新世以后,缅甸弧后的开裂程度最为强烈,并伴有碱性岩浆喷发,缅甸地区的开裂作用直接影响到腾冲地区。由于印度板块的冲撞在滇西一带表现为欧亚板块的右行滑动,因而在腾冲地区出现了一系列北东向呈边幕式排列的地堑盆地,堆积了中、上新统,有碱性岩浆喷发。上新世末的褶皱运动,使缅甸中央谷地的伊洛瓦底江群和腾冲的中、上新统褶皱,并伴随钙碱性岩浆喷发。在缅甸南部,晚中新世的扩张运动最为强烈,导致安达曼海的出

现。目前,印度板块继续向东北消减,活动的消减带位于安达曼和尼科巴群岛西侧,向北延伸到阿拉干山脉西麓。安达曼海的活火山、中源地震的带状分布、震源面的东倾,都为现代消减作用提供了佐证(廖志杰,1988)。

腾冲县境内没有现代火山,但是,根据微地震观测、地热气体中氦同位素测定、大地电磁测深等工作,可以推测出在热海热田下部约 7 km 深处存在一个正在冷却的岩浆囊,它是该地区强烈的地热活动的热动力。在热海热田,热泉排放的热水属于 Cl-Na 型水,与西藏南部大部分高温热泉的水质类型相同。前者热水中贫硼,后者富硼,两者热源也有本质上的不同。

青藏高原北部的地热活动以多火山、少热泉为特征。在北羌塘和昆仑山地区,集中出露新生代火山岩近 30 余处,大体分布在东经 78°至 92°、北纬 34°至 36°的范围内,构成一条长约 1 300 km、宽 100 km(西段)至 400 km(东段)的新生代火山岩带。它们可以分成两个亚带、四个岩石省:南亚带的北羌塘火山岩省,北亚带的可可西里火山岩省,中昆仑火山岩省和西昆仑-喀拉昆仑火山岩省。南亚带是渐新世和中新世的碱性和过碱性火山岩,其成因与羌塘内部一条初始裂谷有关;北亚带以更新世的火山岩为主,少量是第三纪的,岩性是高钾安粗岩和钾玄岩,喷出时间与塔里木地体向南作 A 型俯冲有关,其成因包括富集地幔的形成和地壳混染作用(邓万明,1993)。

青藏高原北部的火山活动虽然十分活跃,可出露的热泉却很少。热泉以低温的居多,高温的较少,有大量的古泉华。究其原因有以下几种可能:一是这里的剥蚀深度较浅,缺少温泉出露的地质条件;二是年降水量较少,不足以补偿地表的湖、河,更不会有大量的地表水渗透至地下深处加温后再返回浅层地表形成温泉;三是那里的高钾熔岩没有滞留在地下深处成为正在冷却的岩浆囊;四是该地区的断裂都比较老,新构造活动不强烈。羌塘高原出现较多的古泉华说明那里曾经有过较强烈的地热活动。托和平错和布喀达坂峰附近的两个沸泉的水化学类型都是 $\text{HCO}_3\text{-Na}$ 型,为断裂深循环成因热泉。

在西藏东部和川西高原,地质构造上分属羌塘-青南-三江褶皱带和巴颜喀拉褶皱带,后者有人称之为松潘-甘孜造山带(许志琴等,1992)。在该地区出现了许多大型平移剪切带,如怒江平移剪切带、澜沧江平移剪切带、金沙江平移剪切带、甘孜-理塘平移剪切带和鲜水河平移剪切带等,这些剪切带的共同特点是北西走向和左行平移。澜沧江、金沙江和甘孜-理塘等断裂的平移剪切作用均叠加在早期俯冲作用之上,是板块单元边界上的走滑运动,时间大约是 80 ~ 20 Ma。鲜水河韧性平移剪切带规模最大,是一条浅层的高温剪切带,同期的构造花岗岩如道孚岩体的年龄为 20 Ma,折多山岩体为 15 ~ 20 Ma。它们的平移时间都比西部诸平移带要晚,原因是左行走滑运动的驱动力自西向东推进(许志琴等,1992)。该地带的温泉主要出露在鲜水河断裂西南,其中高温地热系统有:鲜水河断裂带的康定榆林宫热泉、道孚的约玛插曲热泉、七美科插曲热泉;甘孜-理塘断裂带的甘孜干音郭沸泉、理塘耶姆擦沸泉、曲开隆洼沸泉;金沙江断裂带的茶洛间歇泉和章柯沸泉。除康定榆林宫热泉属于 $\text{HCO}_3\text{-Cl-Na}$ 型水外,其余的都属于 $\text{HCO}_3\text{-Na}$ 型水。榆林宫的热泉水可能与比较年轻的折多塘同构造花岗岩有关,而 $\text{HCO}_3\text{-Na}$ 型热泉主要是大断裂深循环成因。理塘附近的热泉都分布在花岗岩体周围,花岗岩中半衰期较长的放射性元素可能是地热活动的稳态热源,这类温泉排放出具壳源特征的二氧化碳和氦,如甘孜甘因郭等(戴金星等,1994)。

滇西地区高温地热系统的分布明显受到变质基底活跃程度和地质构造的隆起与拗陷布局的控制。自红河断裂带向西,滇西地区可划分出:哀牢山复背斜、兰坪-思茅拗陷、昌宁-澜沧复背斜、保山复向斜、腾冲-高黎贡山复背斜,温泉数量分别是 25、82、167、60 和 193 个,其中热储温度超过 150℃ 的地热系统分别是 2、0、17、0 和 10 个,复背斜上的温泉数量最多,存在着高温地热系统;而复向斜内的温泉数量较少,没有高温地热系统(Liao et al., 1986)。滇西高温地热系统按其热水的化学类型可以分为两类:怒江断裂带以西的腾冲地区,以热海热田为代表,排放 Cl-Na 型热水,有滞留在地壳浅层的岩浆囊供热;怒江断裂带以东的高温热泉排放 HCO_3 -Na 型热水,是大气降水沿断裂通过深循环而形成。在昌宁-澜沧复背斜上出露的这些高温热泉大多分布在大断裂切过复背斜的交汇部位,如南定河断裂的北支交错时出露大控蚌沸泉;南支交错时出露幸福沸泉和马鹿田坝沸泉。

综上所述,滇藏地热带形成与欧亚板块和印度板块的陆-陆碰撞密切相关,西藏南部面临着印度板块陆壳的正面俯冲,导致陆壳局部重熔,产生富硼的 S 型花岗岩,高温地热流体属于富硼、低氦同位素比值的 Cl-Na 型水;云南腾冲地区位于缅甸弧后,由于中新世以来的弧后开裂,导致上地幔局部熔融,形成岩浆并喷溢到地表形成火山。部分岩浆滞留在浅层地壳,成为地热活动的主要热源。热海热田的地热流体属于高氦同位素比值、贫硼的 Cl-Na 型水;在羌塘高原、川西高原和滇西大部分地区,断裂构造发育,规模巨大,当大气降水沿着断裂向下渗透到一定深度后,受壳内稳态热源的加热,密度降低。地热流体密度上的差异导致对流系统生成,热水沿断裂溢出地表,皆为 HCO_3 -Na 型水质。