

青藏高原横断山区科学考察丛书

腾冲地热

中国科学院青藏高原综合科学考察队



505/14p

青藏高原横断山区科学考察丛书

腾 冲 地 热

中国科学院青藏高原综合科学考察队

佟 伟 章铭陶 编

主持单位

北京大学地质学系

中国科学院
自然资源综合考察委员会
国家计划委员会

科 学 出 版 社

1989

00224

内 容 简 介

本书是中国科学院青藏高原综合科学考察队地热专题组继《西藏地热》之后的又一部区域地热研究力作。31位作者在多年野外考察和室内研究的基础上，全面并系统地揭示了我国著名火山地热区的地热地质科学内涵。书中汇集了火山、水热活动、地球化学和同位素地质、岩石蚀变、地震活动、嗜热微生物以及构造地质等大量实际资料和理论探索成果，并在数学地质方法的应用以及利用我国丰富古籍记载分析水热活动历史变迁方面作出了可贵的尝试。它既充分地吸收了国际地热学界的经验和理论，又针对腾冲的特殊性提出了自己的分析，第十五章的综合论证又提出了许多值得我国能源科学界深思的重大问题。

本书可供地球科学和能源科学界的广大科技工作者、高等院校教学工作者、高年级学生和研究生参考。

青藏高原横断山区科学考察丛书

腾 冲 地 热

中国科学院青藏高原综合科学考察队

责任编辑 李林方 彭斌

科学出版社出版

北京东黄城根北街17号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1989年4月第一版 开本：787×1092 1/16

1989年4月第一次印刷 印张：19 插页：4

印数：001—800 字数：388,000

ISBN 7-03-001119-8/P·202

定价：20.30元

35500

《青藏高原横断山区科学考察丛书》顾问

王云章 刘东生 李星学 吴征镒 吴传钧 杨敬之 郑作新
郑丕留 胡淑琴 陶诗言 秦仁昌 徐 仁 涂光炽 席承藩
高由禧 贾慎修 施雅风 黄秉维

《青藏高原横断山区科学考察丛书》编委会

主 任：孙鸿烈
副主任：李文华 程 鸿 佟 伟 章铭陶 郑 度 赵徐懿
委 员：王金亭 王富葆 孔昭宸 刘照光 李吉均 李承彪
李炳元 张玉泉 张谊光 张荣祖 陈宜瑜 陈挺恩
林永烈 武素功 郎楷永 唐邦兴 黄文秀 韩裕丰
温景春 蔡 立 臧 穆 谭福安 樊 平 潘裕生

作者名录

(各单位作者均按姓氏汉语拼音顺序排列)

北京大学地质学系

陈成业 过帼颖 何宗丽 侯发高 廖志杰 刘时彬 穆治国 沈敏子
佟伟 王德新 徐振邦 由懋正 张保山 张昀 张知非 赵凤三
朱梅湘

北京大学地球物理学系

刘宝诚

北京大学化学系

倪葆龄

中国科学院

自然资源综合考察委员会

国家计划委员会

章铭陶 郑亚新 周长进

中国科学院地球物理研究所

张立敏

中国科学院地球化学研究所

林瑞芬

冶金工业部地质研究所

陈民扬

云南省腾冲县人民政府

毕戴周 段亚东 李根兴 刘远复 张兆兴

美国伯克利加州大学地质学和地球物理学系

Garniss H. Curtis

THE CONTRIBUTORS

Chen Chengye, Guo Guoying, He Zongli, Hou Fagao, Liao Zhijie,
Liu Shibin, Mu Zhiguo, Shen Minzi, Tong Wei, Wang Dexin, Xu
Zhenbang, You Maozheng, Zhang Baoshan, Zhang Yun, Zhang Zhifei,
Zhao Fengsan, Zhu Meixiang

Department of Geology, Peking University, Beijing, China

Liu Baocheng

Department of Geophysics, Peking University, Beijing, China

Ni Baoling

Department of Chemistry, Peking University, Beijing, China

Zhang Mingtao, Zheng Yaxin, Zhou Changjin

Commission for Integrated Survey of Natural Resources, Chinese Academy of Sciences and State Planning Commission, Beijing, China

Zhang Limin

Institute of Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China

Lin Ruifen

Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang, Guizhou Province, China

Chen Minyang

Institute of Geology, Ministry of Metallurgical Industry, Guilin, Guangxi Province, China

Bi Daizhou, Duan Yadong, Li Genxing, Liu Yuanfu, Zhang Zhaoxing

People's Government of Tengchong County, Tengchong, Yunnan Province, China

Garniss H. Curtis

Department of Geology and Geophysics, University of California, Berkeley, Ca., U.S.A.

《青藏高原横断山区科学考察丛书》序

辽阔的青藏高原,包括西藏全部、青海南部,以及四川西部和云南西北部,大部分地区海拔在4000m以上,四面以巨大的落差急剧下降,衬托出世界屋脊的磅礴气势,素有世界第三极之称。由于青藏高原独特的地质历史和自然条件,丰富的生物组成和生物群落类型,成为地球上一个独具特色的地理单元。青藏高原蕴藏着丰富的自然资源,又是许多少数民族生活和居住的地区,且地处边陲,合理保护和开发这一地区的自然资源,对发展经济,改善人民生活,以及巩固民族团结和加强国防建设都有重要的意义。

为了探索青藏高原形成和演变的历史,研究自然条件的特点及其对周围环境的影响,研究自然资源的数量和质量及其合理开发利用的途径。解放以后,中国科学院对这里进行了多次科学考察,特别是自1973年起组织了青藏高原综合科学考察队,对这一地区进行了更为全面、系统的综合性研究。

1973—1980年期间,考察队重点对西藏自治区进行了考察。其科学成果将集中反映在陆续出版的《青藏高原科学考察丛书》(西藏部分)及论文集和画册中。有些成果在实际生产中已得到推广和应用,在国际和国内产生了深远的影响。

考察队从1981年起将考察研究的重点转移到横断山区。横断山地处我国西南的藏东、川西和滇西北一带,是青藏高原的一个组成部分。在行政区域上包括西藏自治区的昌都地区,四川省阿坝、甘孜、凉山及云南省丽江、迪庆、怒江和大理等地(州)区,总面积约50万平方公里。

横断山脉在地质构造上处于南亚大陆与欧亚大陆镶嵌交接带的东翼,是我国东部环太平洋带与西部古地中海带间的过渡地带。地质构造复杂,新构造运动活跃。本区地势由西北向东南倾斜,大部为高山峡谷,山脉、河流南北纵贯,相间并列,高差很大,自然地理条件独具一格,生物区系绚丽多采,且富含古老和孑遗类型,是研究生物和地学中许多重大理论问题的关键性地区。

横断山脉自然资源丰富,尤以多种矿产、水利、森林、草场等资源最为丰富。但是随着人口的增长和开发利用的加剧,自然资源承受的人类压力日益加大,有些地区生态平衡遭到了破坏。为了合理利用自然资源,必须研究本区的自然资源特点,探索其合理保护利用与开发的方向和途径。

横断山区科学考察工作主要围绕六个课题进行:(1)横断山脉形成的原因和地质历史;(2)横断山区自然地理特征及其与高原隆起的关系;(3)横断山区自然垂直地带的结构及其规律;(4)横断山区生物区系的组成;(5)横断山区自然保护与自然保护区;(6)横断山区自然资源的评价及其合理开发利用。

为了使科学考察研究更密切地与当地的经济开发工作结合起来,在自然资源评价与开发利用方面着重抓了农业自然资源条件与自然资源系列制图;亚高山暗针叶林采伐与更新;地方能源的综合利用;畜牧业发展战略及干旱河谷农业自然条件与开发利用等五项

综合专题的考察研究。

横断山区的综合科学考察研究工作由中国科学院-国家计委自然资源综合考察委员会负责组织领导。参加此次考察研究的包括中国科学院有关研究所、高等院校和地方科研与生产部门等单位计 40 余个,约 300 多人,涉及 40 多个专业。

《青藏高原横断山区科学考察丛书》将系统地总结青藏高原综合科学考察第二阶段的成果。

《青藏高原横断山区科学考察丛书》计划由横断山区农业自然条件与农业自然资源评价、四川省金川县农业自然条件与农业自然资源评价、横断山区的地方能源资源、横断山区亚高山暗针叶林采伐与更新的研究、横断山区(川西部分)畜牧业战略发展的研究、横断山区干旱河谷的环境条件与农业资源的开发利用、横断山区地质构造、横断山区的沉积岩及沉积盆地演化、横断山区基性超基性岩、横断山区富碱侵入岩带地球化学和成矿、横断山区花岗岩类地球化学、横断山区锡矿带地球化学、横断山区地层、横断山区古生物、横断山区哺乳动物化石与生活环境、横断山区地热与水热活动区名录、腾冲地热、横断山区自然地理、横断山区地貌与第四纪地质、横断山区气候、横断山区的冰川、横断山区泥石流、横断山区土壤地理、横断山区森林、横断山区草场、横断山区植被、横断山区沼泽与泥炭、横断山区湖泊综合研究、横断山区中小河流及水资源、横断山区自然垂直带结构特征及分布规律、横断山区植物、横断山区家畜种群生态、横断山区鱼类、横断山区哺乳动物、横断山区鸟类、横断山区两栖爬行动物志、横断山区甲壳动物、横断山区昆虫、横断山区土地资源开发与农业布局等专著组成。我们希望它能在探索青藏高原的奥秘和我国社会主义建设中发挥积极的作用。

中国科学院青藏高原综合科学考察队

THE SERIES OF THE SCIENTIFIC EXPEDITION TO THE HENGDUAN MOUNTAINS OF THE QINGHAI- XIZANG PLATEAU

PREFACE

The vast Qinghai-Xizang Plateau, consisting of the Xizang(Tibet) Autonomous Region, the southern part of Qinghai, western part of Sichuan and northwestern part of Yunnan Provinces, is often eulogized as the third polar of the world. The major parts of the Plateau are 4,000 metres above sea level, while the areas around drop drastically setting off the tremendous momentum of the roof of the world. The particularities of the geological history and physical conditions, the variety of biological composition and the different types of bio-communities make the Qinghai-Xizang Plateau a unique geographical unit. As the Plateau, being rich in natural resources, lies on the border regions where inhabit many national minorities, the rational conservation and utilization of the natural resources in this region are of particular importance in developing economy, improving the local livelihood and consolidating national solidarity as well as strengthening national defence.

Ever since the foundation of new China, many scientific surveys have been carried out in this region so as to make a better understanding of the history of the formation and evolution of the Qinghai-Xizang Plateau, to study the characteristics of its natural conditions, their effects on the environment around and the quantity and quality of the natural resources and thus, to find a way of exploiting and utilizing them rationally. Especially after the forming of the Comprehensive Scientific Expedition to the Qinghai-Xizang Plateau in 1973, an even more comprehensive, systematic integrated research has being made on this region.

A survey was mainly carried out on the Xizang (Tibet) Autonomous Region during the period of 1973—1980. The scientific findings of the survey, part of which have already been extended and applied to actual production and have brought a far-reaching influence both in and outside China, will be concentratedly compiled in the series of the scientific expedition to the Qinghai-Xizang Plateau (Xizang Volume), proceedings and pictorials. Since 1981, the survey team has shifted its major researching area to the Hengduan Mountainous Region which is a constitutional part of the Qinghai-Xizang Plateau and is located in the east of Xizang, west of Sichuan and northwest of Yunnan Provinces in southwest China. The total area of this region is about 0.5 million square kilometres and administratively speaking including the Qamdo district of Xizang, Erba, Cangzi, Liangshan of Sichuan and the Lijiang, Nujing and Dali districts of Yunnan.

The Hengduan Range is complicated in geological structure and active in new tectonic movements. It lies on the east flank of the juncture area where south Asia and Eurasia are mounted. It is the transition region between the east zones encircling the Pacific and the west zones of ancient mediterranean. The altitude of this area declines from northwest to southeast. Most parts of the area are characterised by a series of paralleled mountain ranges and rivers from south to north, and with a sharp altitudinal differentiation. Its unique physical conditions and variety ecosystems being rich in flora and funa with abundant relic species, give the area

a critical nature for the fundamental research in the field of biology and earth science.

The Hengduan Mountainous Region is abundant in natural resources, among which multi-mineral products, hydrological resources, forest and grasslands account for the great part. But with fast growth of the population and an extensive exploitation and utilization of the natural resources, the human pressure on natural resources has vastly increased which even caused ecologic equilibrium damage in some part of the area. In order to make a more reasonable utilization of natural resources, it is necessary to study the characteristics of the resources in this region so as to work out certain ways and methods for protecting, utilizing and exploiting them rationally.

There are six major subjects in the research work being carried out in the Hengduan Mountains:

1. The geological history of the Hengduan Range;
2. The physiographical characteristics of the Hengduan Mountains and their relationship with the rise of the Plateau;
3. The structure and rule of the altitudinal belts of the Hengduan Mountains;
4. The composition of bio-communities in the Hengduan Mountains;
5. The natural conservation and nature reserves in the Hengduan Mountains;
6. Evaluation of the natural resources in the Hengduan Mountains and their rational development and conservation.

Five intergrated projects have also been given special attention in the research on natural resources evaluation, exploitation and utilization. They include as following: compilation of a series of maps on the conditions of agricultural resources; deforestation and regeneration of subalpine coniferous forest in subalpine areas; the multiple utilization of local energy resources; strategy for the development of animal husbandry and finally the management of the natural resources in the arid valleys. This has been done in line with the purpose of linking scientific research closely to the development of the local economy.

The intergrated survey on the Hengduan Mountainous Region is organized by the Commission for Integrated Survey of Natural Resources under the Chinese Academy of Sciences and the State Planning Commission. There are more than 300 people, coming from more than 40 institutions including different institutes of the Chinese Academy of Sciences, universities and local scientific research and production departments engaged in natural resources research. A series of scientific publications on the Hengduan Mountains will provide the results acquired from the second phase of the integrated scientific survey in the Qinghai-Xizang Plateau. It is designed that this series will be consisted of 39 volumes and 48 monographs. It is also expected that this series will play an important role in exploring the wonders of the Qinghai-Xizang Plateau and in the construction of China.

The Comprehensive Scientific Expedition to the Qinghai-Xizang Plateau,
the Chinese Academy of Sciences

前 言

在横断山脉区的南端,高黎贡山脉的西麓,出现了我国大陆上最活跃的一些地热显示区。这些地热区从宏观构造上无疑构成喜马拉雅陆-陆敛合型板缘地热带的南延部分。腾冲及其邻近地域就是这条地热带中极其重要的一个火山地热区。

腾冲县地处云南省西部边缘,地理坐标东经 98°05′ 至 98°45′,北纬 24°38′ 至 25°51′,东西宽 69km,南北长 137km,总面积 5 692.86km²。巍峨的高黎贡山脉雄峙县境东缘,东北和东部以高黎贡山脉主脊线同泸水县和保山县相连,东南和南部隔龙川江与龙陵县、潞西县接界,西南和西部与梁河县、盈江县毗邻,北部及西北部以平河山、大姊妹山及尖高山与缅甸接壤。整个县境的地势北高南低,并由东北向西南急剧下降。北部最高点(高黎贡山大脑子)海拔 3 780.2m,南端最低点(速庆龙川江边)海拔 930m,县城海拔 1640m。龙川江、大盈江以及槟榔江依山顺流,将高原面切割成丰富多采的地貌形态,整个县境由此形成 24 个南北走向的河谷-山间盆地,盆地面积约占全县面积的 20%,其余 80% 均为山地。山地垂直差异很大,由此而产生变化多端的气候类型。地处腾冲城关镇的气象站的气候要素是:多年年平均气温 14.7℃,极端最高 30.5℃,极端最低 -4.2℃,多年年平均降雨量 1 425.4mm。气温的变化规律是:海拔 1000—2000m 范围内每升高 100m 气温下降 0.5—0.8℃(平均 0.67℃),海拔 1100 m 以下的龙川江河谷的年平均气温为 18—19℃,3 000m 以上山区的年平均温度低于 8℃。腾冲年降水量充沛,具有全年降水集中,干湿季分明,雨热同季,夏秋多雨和冬春干燥等特点,雨季降水占全年雨量的 84.3%,开始期累年平均为 5 月 28 日,最早 4 月下旬,最迟 6 月中旬;结束期累年平均 10 月 29 日,最早 9 月下旬,最迟 11 月下旬¹⁾。

据 1982 年全国第三次人口普查,全县总人口 470 311 人(农业人口占 93%)²⁾,由汉、傣、傈僳、回、佤、白、阿昌和纳西等 8 种民族组成。旅居海外的腾冲人有 30 000 多,县内侨眷有 22 500 多人³⁾。

腾冲地近欧亚和印度两个大陆板块的镶接部位。高黎贡山脉西坡面出现的众多火山以及在数量和显示强度上均居我国各县之冠的现代水热活动显示区,古往今来一直吸引着众多的地球科学工作者,他们不惮万里迢迢前来,对火山和温泉的性状和热源等作出各式各样的猜测和推论⁴⁾。我国 70 年初兴起地热热潮以后,腾冲的火山和水热活动开始被赋予新能源意义。本地热专题组成员之一,北京大学地质学系地热研究室,自 1973 年起即和腾冲县地震办公室等单位的同仁们开始从事腾冲地热资源的调查研究工作,并编写

1) 腾冲农业区划工作队,1980,腾冲县自然资源调查报告:气象分册(内部资料),第 2—3 页。

2) 腾冲县农业区划办公室编,1984,腾冲县农业发展总体规划及专题报告汇编(内部资料),第 25 页。按同一资料的第 6 页记载的同年总人口数为 475 235 人,《云南省腾冲县地名志》(1982)第 3 页记载为 461 476 人。

3) 同上,第 6 页。

4) 火山以及温泉的考察研究史分见本书相关章节。

过相应的专题报告¹⁾。1980年起,中国科学院青藏高原综合科学考察队挥师东来横断,腾冲即成为本考察队地热专题组的重点研究区。考察研究的内容虽比过去广泛得多,但中心仍然是地热能源的潜力评价。

地热能源潜力评价是一个复杂问题,其复杂性主要来源于对这种资源的特性的认识至今尚处于朦胧状态。温泉是人类早就熟知的一种自然现象。用现代术语来说,它正是地下热活动的一种地表显示。温泉不论温度高低,一般都年复一年地汨汨地流淌着,中国古代文人曾因此形容它是“千年不变万古常薰”(参见本书第四章)。由此看来它似乎是一种有补给的可再生能源。在本世纪50年代,新西兰从地热是一种可再生能源的基本认识出发,用地表天然热流量法乘以一定的倍率来估定 Wairakei 地热系统的资源开发潜力为 250MW, 据此自 1959 年开始装机,至 1963 年总容量即达到 192.6MW。然而 Wairakei 热田在出力 130—150MW 的情况下即引起热田地面出现严重沉降(Crittenden, Jr., 1981)。Wairakei 等系统几十年来的勘探开发经验使人们有理由地想象水热能源未必是可再生的,至少是液态水为主的水热能源未必可再生。由此自 1975 年开始,美国地质局大力推行体积法,即通过框算地热系统中一定体积内所积存的热能量来评价该系统的地热资源潜力(Muffler, 1981)。体积法的实质是不再把地热能看作是可再生资源。对地热能的这种认识以及随之而来的潜力评价方法的变化过程持续了 20 多年,而且是在意大利、新西兰、日本以及美国等大容量示范实践经验的基础上产生的。我国自地热热潮兴起以来已经有 16 年之久,除了至今尚未完全摆脱理论上的盲目性以外,在实践规模上也很难和地热先驱国家相比。时至今日,开发利用程度够得上示范规模的高温水热系统只有西藏羊八井一处。本书的研究对象腾冲基本上还处于自然状态,浴疗、造纸和养鱼等都仅限于泉口流体利用。因此我们的野外观察研究也只能局限于地表,研究内容有一定广度,但深度比较有限。腾冲当前研究内容和程度大体相当于开发乃至正式勘探的前期工作阶段。然而此阶段研究尽管深度有限,但却十分必要,因为扎扎实实的前期考察研究成果不仅仅构成制订正式勘探工作计划的前提和依据,而且构成任何地热系统开发后动态监测赖以进行比较的必不可少的基准资料。

本书共分 15 章。

腾冲晚新生代火山活动是为本书的第一章。火山既是最强烈的地热地表显示,是地球深部热活动为人类打开的极为难得的一些窗口,同时又是水热活动极其重要的地质背景。国际地热界目前趋于把地热系统归为与上地壳内年青火成侵入体有关和无关的两个大类(Diment, 1980)。火山则是地壳内火成活动的地表显示。地下岩浆喷出有两种可能,一是经一次或若干次喷发以后,地下岩浆全部喷泻到地表,二是不能全部喷出,地下残浆缓缓冷却,因而构成高温水热活动的极为理想的热源。目前世界上已大规模开发的地热区基本上都位于近代至现代火山区,因此地热区考察和评价人员历来重视年青浅成火成活动的研究。我国大陆上的火山并不少,然而火山区目前仍然出现强盛水热活动的并不多,而腾冲又是在火山岩区周边出现沸泉群的唯一的一处火山地热区。这是我们把火山列为本书开宗明义的第一章的根本原因。第一章作者根据传统研究方法并参照同位素计年数据,将腾冲火山活动归结为四期,相对时代从上新世到晚更新世,其中中更新世火山又分出两个亚期。值得注意的是,腾冲地表火山岩区缺乏流纹英安岩、流纹岩以及

1) 腾冲地热联合调查组,1974,云南省腾冲县地热资源考察报告(内部专题报告)。

凝灰岩等典型的酸性喷出岩，这是腾冲火山区与世界上已开发的大型火山地热区的重大区别之一。作者还根据火山岩石学和岩石化学分析数据，把四期火山活动分成弱碱性玄武岩到钙碱性安山英安岩的两个岩浆旋回，并推论富碱的本源岩浆可能来源于上地幔的局部熔融，但在向地表上行的过程中又受到壳源物质的混染，从而产生钙碱性岩浆。

如果火山过老，则即使它在地壳浅部遗留过残浆体，也构不成今日水热活动的局部热源，因为只要不存在后续活动，则随着时间的推移，侵位岩浆体的温度将和环境温度逐渐趋于均一化。从目前已知地热区的地质环境来看，火山活动的时代一般都不老于上新世，因此除了传统地质方法以外，开展火山岩石的同位素计年研究至关重要。本书第二章“腾冲火山岩 K-Ar 年龄和铷同位素研究”的作者趁 1983 年在美国加利福尼亚大学伯克利分校访问之机，在 G. H. Curtis 教授指导之下，测定了 47 块腾冲火山岩样品的 K-Ar 年龄，得出的值域在 0.09 至 17.84Ma 之间。Curtis 教授在审查测定结果之后明确地认为腾冲的火山不是死火山。作者对 K-Ar 年龄数据的概率分析也表明，腾冲火山是一群休眠火山，不是死火山。他用放射性成因 ^{40}Ar 含量大于 2% 的年龄数据做 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}-^{40}\text{K}/^{36}\text{Ar}$ 等时图解，得到四次喷发的等时年龄分别为 2.93、0.81、0.31 和 0.13Ma，与此对应的地质时代是从中新世到更新世，喷发高潮似乎在晚更新世¹⁾。另外作者还测定了 20 个样品的铷含量和稳定铷的同位素组成。得出的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比为 0.70578 至 0.71437，意味着这些火山岩石是在陆-陆板块的碰撞带生成的。它们都属于高钾的钙碱性岩浆系列。同第一章一样，本章作者也认为火山岩的原始岩浆²⁾是来源于地幔的玄武岩质岩浆，在上升过程中受到过富含放射性成因铷的陆壳物质的强烈混染。

第三章是“腾冲县的现代水热活动区”。就某种意义上说，术语水热活动区与旧称温泉区大体相当。但不论中外，旧称温泉(相当英文 thermal springs)的涵义都过于含混，由此我们力主采用国际上渐趋统一的术语水热活动区 (hydrothermal area)，用以表示以水为主要传热介质的地热异常区。腾冲县水热区不仅在数量(分布密度)上居全国各县之冠，在活动强度和显示类型多样化方面亦历来吸引众多中外学者的极大兴趣。本章根据多年的实地调查，并参照国际上水热区划分标准，将腾冲的“三十里一温泉”划分成 58 个水热区，并分区记述了其基本要素和现象。这些要素和现象是本书一切讨论的出发点。此外作者还希望本章既能构成未来监测工作的基准资料，又能成为为资源评价服务的一份概略资产目录。

腾冲远离我国的腹地，因此不论履及的次数多少，我们对腾冲各水热区的考察都只能记录到它们的瞬时状态。它们在地质历史长河里的变化是难以在区区几年内观察到的，而历史动态对于判断水热活动的未来宏观发展趋势又至关重要。加之我们每次去腾冲考察，高温水热区附近的居民总要反映当地各式各样的异常动态。然而居民的反映并不就等于科学记录。本书第四章“腾冲水热活动今昔考”利用我国有关当地水热活动的丰富的古籍，在一定程度弥补了这方面的不足。考据的结果是在最近的几百年过程中，瑞滇热田的活动强度可能有所下降，热海热田的变化比较大，黄瓜箐显示区的喷汽孔活动很可能只有百来年的历史，徐霞客 1639 年见到的硫磺塘“大四五亩”的沸泉湖已变为今日的冒汽地

1) 火山活动的始发时代与第一章作者的推论有所不同。考虑到地表研究的局限性，计年研究不可能一次完成，保留不同的结果及其推论对今后的研究工作显然有益。
2) 即第一章作者所说的本源岩浆。

面,沸喷泉已变为“大滚锅”,其中面积上千平方米的昔日沸泉湖最值得注意,作者通过研究认为这个沸泉湖只可能是水热喷发穴口。今日热海虽然仍然有水热喷发,但频度和强度很可能已今不如昔矣。如果这一推论属真,则热海出露的所谓第三纪砂砾岩很可能是水热喷发砂砾岩¹⁾。

第五章“腾冲水热流体的地球化学”是我们区域地热研究的“保留节目”。作者在专题组历年来采集的 49 个气样、77 个热泉水样和 5 个冷水样品化学分析结果的基础上得出了如下的统计性结论: 1) 水热气体组成主要为 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{S-CH}_4\text{-N}_2\text{-O}_2$, 热海中心还逸出少量 H_2 , 这种组合与世界上大多数火山地热区的水热气体组合相似; 2) $\text{HCO}_3\text{-Na}$ 型水最普遍, 年青火山附近高温水热区涌出 $\text{Cl-HCO}_3\text{-Na}$ 或 $\text{HCO}_3\text{-Cl-Na}$ 型水, 并掺混有酸性 $\text{SO}_4\text{-Na}$ 水; 3) 可能有岩浆源 Cl 进入地下热水; 4) 化学温标温度估算结果是: 有五个水热区(朗蒲热水塘、热海、瑞滇、攀枝花硝塘和黑石河)的平均地下温度超过 150°C , $150\text{—}90^\circ\text{C}$ 间有 45 个水热区; 5) 为热海热田提出的水化学概念模型表明: 加热带上升的亲水温度可能不低于 276°C , 300m 以深的蒸汽分离后热水的温度大体在 230°C 。当然, 化学地热温标的运用有许多必须遵循的条件, 而这些条件在地表研究阶段又往往容易使人陷入扑朔迷离之中, 因此读者必须牢记: 化学地热温标温度绝不等于实测温度, 它的真确性如何尚有待热田基准孔的实测资料来证实。至于概念模型, 它和建立在热田钻探资料基础上的数值模型之间, 还有一段长长的路要走。

汞法勘探在世界地热研究中并不罕见, 但第六章“腾冲热海-朗蒲热水塘土壤汞砷铍和铋的测定研究”却是我们的“新增节目”。本项工作的目的是试图利用汞等浓度异常来圈定热海热田的边界, 探索热海与朗蒲热水塘间的联系, 以及朗蒲热水塘的延伸范围等。因此研究区域面积广及 61km^2 。测定结果: 汞浓度范围为 $16\text{—}462\text{ppb}$, 高值出现在热海忠孝寺-硫磺塘一线, 汞异常最大反差是 8; 砷浓度范围为 $1.62\text{—}139.4\text{ppm}$, 最高值在朗蒲热水塘, 砷异常的最大反差是 5; 铍浓度范围为 $0.14\text{—}11.4\text{ppm}$, 最高值出现在朗蒲热水塘 (11.4ppm) 和硫磺塘 (11.4ppm); 铋浓度范围为 $0.05\text{—}2.31\text{ppm}$, 高值点出现在梁河县曩宋关北。从土壤汞等异常图来看, 朗蒲异常区目前的范围虽向北东方向延伸, 但与热海似乎并不存在明显的联系; 然而根据土壤砷和铍的等异常图判断, 它们在过去又似乎存在过某种联系。

第七章作者总结了利用 69 个热泉水、大气降水、地表水以及地下水的氡、氧-18 以及氟等天然同位素对腾冲水热系统进行追踪研究的初步成果, 认为腾冲所有的地下热水都是大气来源的, 但热泉水的 δD 一般比当地地表水及地下水的 δD 轻化, 因此认为热泉水很可能是由远距热泉的高海拔地区补给的。腾冲绝大多数水热区地下热水的氧漂移均小于 2‰ , 仅高温区的氧漂移大于 2‰ , 这可能说明腾冲各水热系统的地下温度存在很大的差异。另外作者还根据氢氧同位素资料推论了地下沸腾和稀释等过程, 以及这些过程对热泉水同位素组成的影响等。氟分析结果则表明热海系统的水热环流历时短, 热储上覆岩体的通透性好, 以及水的补给比较充分等。

第八章“腾冲水热活动碳硫同位素组成变异的研究”试图通过碳硫天然同位素组成的变异来探讨腾冲近代火山和现代水热活动之间的时空联系, 探讨地下是否存在后续的岩

1) 1985 年 12 月美国 Donald E. White 博士参观腾冲热海时首次对第三纪砂砾岩的成因提出疑问。

浆活动,以及岩浆来源深度等等。这种探索当然存在一定的主观性。地热系统并不存在统一的物质来源,譬如第七章作者推论腾冲各水热系统的水全部来源于大气降水,然而本章作者根据49个水热碳的 $\delta^{13}\text{C}$ (值域+1.52至-11.5‰,算术平均值为-5.14‰)和48个水热硫的 $\delta^{34}\text{S}$ (绝大部分样品的 $\delta^{34}\text{S}$ 都落在值域 $\pm 4\text{‰}$ 之内)推论很可能确有某种幔源物质上升到地壳浅部。然后混入水热流体中来。另外考虑到亲硫菌在硫化物氧化还原中的作用,而腾冲高温区不同价态硫并不存在明显的同位素分馏现象,由此作者推论高温区的浅部也许存在亲硫菌难以存活的高温环境。

就中国大陆来说,腾冲火山地热区的显示类型特别齐全,而高温水热区又多出现在火山岩流周边的易蚀变岩体之中,因此地表水热蚀变现象相当发育。水热蚀变研究有可能为勘探远景区的选择以及勘探目标区可能达到的温度水平提供进一步的佐证。本书第九章“腾冲水热区地表水热蚀变”就是作者在这方面研究的总结。初步结果表明:钙华、方解石、天然碱和水碱等碳酸盐盐华以及无水芒硝和石膏等简单硫酸盐多出现在低温水热区,而硅华以及毛矾石和铁明矾等复杂硫酸盐只出现在热海和瑞滇等少数几个高温区。最值得注意的是热海眼镜泉坑硅华垣体之中含有浸染状沥青铀矿和铀石等含铀矿物,以及黄铁矿和赤铁矿等。水热区含铀矿物的出现为铀矿成因类型研究提供了重要的启示。另外热海热田地表蚀变存在明显的分带现象。第一带沿硫磺塘-黄瓜箐展布,矿物组合自内向外为钠明矾石+高岭石 \rightarrow 高岭石+I-S混层矿物;第二带沿大地脚展布,其内带为I-S混层矿物,外带则为I-S混层矿物+高岭石。

第十章“腾冲地区的地热数学地质特征”是我们在区域地热研究中应用数学地质方法的一次尝试。作者利用简单的统计分析、组合变量全回归分析、聚类分析、对应分析以及趋势面分析等方法对腾冲各热区的水化学分析数据以及地表实测温度和化学温标温度进行处理,计算各种变量的平均值、标准差、变异系数、极差和各变量间的相关系数等。结果表明 Cl 、 HCO_3 以及地表温度数值的波动与化学温标温度数值的波动有密切的关系。在组合变量全回归分析方法得到的7个方程中,作者选取 $y_6 = 91.55 + 0.252x_2^2 + 0.387x_3$ 方程来预测地下温度。用聚类分析和对应分析方法可以明显地将腾冲各热区分成三类,而地表温度、 Cl 浓度、 HCO_3 浓度以及温标温度的趋势面很相似,说明这四个变量有密切的成因联系。作者还利用剩余标准差将腾冲分出三个异常区,其中以热海-朗蒲热水塘异常区的面积最大,最稳定,而且其西南方向上并未封闭,作者据此认为这一异常区很可能是腾冲最理想的勘(钻)探目标区。

近年来出于理论和实用上的原因,生物学家很重视对“极端环境”中生物区系的研究。热泉环境就是受到关注的一种特殊生境,因为它不仅温度异常,而且它的水化学类型和酸碱度也异于正常环境,其中沸泉更是典型的极端环境。沸泉往往只出现在火山活动区。这种环境类似于地球早期(前寒武纪)的地质环境,因此研究这种环境中的生命活动无疑会给我们带来许多有关生命起源及其早期演变的信息。1969年美国首次在 90°C 以上的沸水中发现有微生物生存,最近又在东太平洋深海底 250°C 硫质气孔的高温环境中发现有细菌生存。我国虽然从1982年开始有人在腾冲热泉中找到过嗜热酸细菌,但对热泉环境中微生物自然群体的分布还没有人研究过。本书的第十一章“腾冲热海热泉水中的嗜热微生物”填补了这一空白。

环球地热带和环球地震带以及火山带存在奇妙的叠加关系,因此地震活动构成地热

活动最重要的背景之一。腾冲火山地热区出露于喜马拉雅地震带由东西转向南北的地段上,本身又构成腾冲-龙陵-澜沧地震带的北段。腾冲及其邻近地区地震活动频繁,有明显的周期性,震中依南北向呈带状分布,并存在周期性南北迁移现象。腾冲地震活动多以群震的形式释放能量,另外自1961年以来两次报导过腾冲地震以及龙陵1976年大震的余震有可能是浅源岩浆冲击地震。由此我们自1980年起对热海热田附近地震活动组织了两次短期现场观测,共记录到 $4.4 \leq M \leq -0.1$ 的地震334次,其中 $M \leq 2.0$ 的地震多达278次,但小震及微震多发生在热海热田的四周,震级小,且多以震群的形式释放能量。观测结果的分析还表明,腾冲地面以下可能存在薄仅7km的薄壳,厚度向四周逐渐增加,因而呈现伞状结构,伞下具有存在岩浆囊的条件。小震综合断层面解所反应的应力场方向与大震的一致,二者均呈南北向。另外设在黄瓜箐的台站还捕捉到水热活动引起的震动。上述成果列为本书内题为“腾冲火山地热区地震活动的观测研究”的第十二章。

第十三章“腾冲地热区地质背景研究”也是我们的例行节目,其目的仍然是试图说明地热区形成的构造地质背景。我们并不苛求这种研究去解决第一个勘探孔的定位问题,但却可以要求它去定性地判别地热田的开发潜力。譬如,只要地热田出现在消减型、敛合型或扩张型板块边缘构造带上,它就有可能具有动力开发的前景。腾冲火山地热区正好位于两个大陆板块的敛合带上。本章作者还认为腾冲自晚古生代以来就是被夹持在欧亚大陆和冈瓦纳大陆之间的一个狭长微大陆。三叠纪时冈瓦纳大陆北缘分裂,腾冲微大陆向北漂移,侏罗纪时与欧亚大陆敛合,构成欧亚大陆的最南缘,侏罗纪末冈瓦纳进一步解体,印度板块向北漂移,当两大陆在新生代敛合之际,冈底斯至腾冲一线便首当其冲,自此它就一直处于板块敛合构造最活跃的前沿阵地之上,表现在出现喜马拉雅期的高温变质作用,复杂的花岗岩质岩浆的入侵、火山喷发以及频繁的地震活动等。作者还认为尽管第三纪以前的岩浆入侵以及喷出到地表的火山都不可能构成现代水热活动的热源,但在腾冲上地壳内很可能有滞留的岩浆囊,或者存在后续性岩浆活动,它们才是腾冲现代高温水热系统赖以存在的关键因素。作者认为热海热田位于一个环形构造之内,这个环形构造很可能是浅埋岩钟造成的。

有些研究者根据龙陵-腾冲-泸水一线只存在浅源地震,因而推论腾冲并不处于消减带边缘,而是处于扩张带。我们强调欧亚大陆与印度次大陆之间是两个陆地板块间的敛合,它显然不同于洋-陆板块间的消减关系,所产生的地热活动的规模和强度(包括火山活动)也有别于岛弧地热带,它也许是介乎消减型和板内型之间的一种新类型地热带,如果这种推论真确,则资源开发潜力很可能也介乎这二者之间。

第十四章的题目是“云南腾冲地热资源开发潜力初步评价”。作者按照化学温标温度概值将腾冲58个水热区划分成高温($>150^{\circ}\text{C}$)、中温($150-90^{\circ}\text{C}$)和低温($<90^{\circ}\text{C}$)三种系统,并用两种方法对这些系统所储存的热能量进行估定。体积法给出热海、瑞滇、朗蒲、攀枝花和黑石河等5个高温系统的潜在电功率为449.8MWe,天然热流量法给出的潜在电功率为78.14MWe。我们在前面已经提到地热资源评价是一个难题,并且开发潜力的估定需要有广泛的根据,而我们的根据恰恰不那么广泛。由于缺乏必要的钻孔资料,许多参数的选取相当任意。另外“资源评价是在给定的时间内利用给定的成套资料以及给定的一组有关经济和工艺的假设所做出的某种报告书。就大多数矿产品而言,资料和假设都会很快地起变化,前者主要随勘探活动而变,后者则是工艺发展,经济状况,政治上的无常

变幻、环境制约关系以及社会政策等等的反应。因此资源评价仅仅具有暂时的价值，而且经过一定的时间以后必须予以修正，这种情况对于地热能这样的资源来说尤其如此。”(Muffler, 1981)。好在地热能的开发量总是逐步增加的，随着勘探、开发和监测资料的日益积累，潜力评价也会不断地得到修正。

本书最后一章是“腾冲地热资源开发的决策论证”。这也是一个难题。新能源在当前以及近期的能源构成中占有的比重微不足道，因而往往受到决策者的忽视。另外从世界范围来看，新能源尚处于试验和示范阶段，因而需要较多的风险投资，第三世界国家往往无力承担。除此以外，腾冲地热区还存在一些地缘经济学性质的不利因素，她孤悬西部边陲，远离我国的政治、经济和人口的腹心地区，本身的商品经济又不发达，内地对她无所求，也就不愿多所贡献。腾冲的小水电盛名远扬，可供开发的水能蕴藏量很大，丰富的森林资源可资薪用，因此就全国范围来看，腾冲根本不算“缺能户”。当然，森林资源的大量薪用已经引起了严重的后果，对水资源的水能和水利利用也产生了严重影响，然而这种影响却越不过巍峨的高黎贡山，等等。本章作者根据世界地热事业发展的形势和中国自身的经验教训，并从我国经济活动和人口战略西移这一假设前提出发，有针对性地论证了腾冲地热资源动力开发的必要性和可行性，结论是腾冲地热的示范性开发利用，建立十兆瓦级的地热电站，绝不是“锦上添花”，而应是我国能源和经济发展战略的必然之举。

在多年的实地考察和室内研究过程中，我们还比较全面地分析过腾冲各水热区热水的化学组分浓度，本书附录“腾冲各水热活动区热水化学分析总表”就是历年分析成果的汇总。资料和数据即使准确无误，也只不过是一些信息而已，它本身并不就是论文或专著。构成本专著各个章节的基础确是这些资料和数据，但其思想和观点实际上却来自国内外同仁们的反复启迪。譬如世界著名的地热专家 Don White 就非常注意我们在 1981 年出版的《西藏地热》里公布的数据和资料，1985 年底还专程来中国和我们进行了十分有益的直接讨论。他在提交给国际第五届水-岩石相互作用讨论会的论文中说“喜马拉雅山脉北沿的某些水与美国加利福尼亚的变质水相似，但温度和 Li 和 Cs 等稀碱金属浓度均高于后者”，由此他推论西藏高温水热区的地下热水有可能是“来源于 S 型(变质)花岗岩形成过程中进一步脱水作用的一种超变质水 (ultrametamorphic water)”。White 博士对腾冲热海的宿主岩体“第三纪砂砾岩”以及顺江街“火口湖”的看法对我们也有很大的启发。这些都说明文章固然需要有主笔，但主笔绝不等于孤笔，更不是绝笔。我们热烈地欢迎国内外同仁在本专著提供的资料和数据的基础上创造新的论著，即使是本书的观点和思路被彻底颠翻了也罢！

本项研究曾先后得到国家自然科学基金委员会和国家教育委员会科学基金的资助。在历年的考察研究过程中，曾得到云南省腾冲县人民政府县长陈昌黎、副县长钊炳蓁、科学技术委员会主任刘家庆、副主任王绍洪、科委邓紫芬、段亚东，腾冲县地震办公室主任张兆兴，以及李根兴、唐本善、毕戴周、上官德树和刘振蔚等各位先生的热情支持和鼎力相助，其中张兆兴、李根兴、刘远复、毕戴周和段亚东等还参与了实际考察和部分编写工作，成为本专题组不可或缺的“编外人员”。另外在持续数年的室内研究过程中，许多单位和个人为我们承担了繁重的分析、鉴定、运算、绘图、照相等工作。北京大学的张淑媛、郑淑蕙、任磊夫、曹正民、臧启家、江绍英、王凤珍、杜芝兰、张旭东、张小萍，北京化纤工学院的张立昂，地质矿产部的郭立鹤、朱炳球和金仰芬，石油工业部的支瑞良和中国科学院