

21世纪可持续能源丛书

地热资源及其 开发利用和保护

刘时彬 编著



化学工业出版社

P314.2
L670

21世纪可持续能源丛书

地热资源及其 开发利用和保护

刘时彬 编著



化学工业出版社

· 北 京 ·

1037510

5

(京)新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

地热资源及其开发利用和保护/刘时彬编著. —北京:
化学工业出版社, 2005. 1
(21 世纪可持续能源丛书)
ISBN 7-5025-5895-0

I. 地… II. 刘… III. ①地热-资源开发②地热-
资源利用 IV. P314

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 068207 号

21 世纪可持续能源丛书
地热资源及其开发利用和保护

刘时彬 编著

责任编辑: 陈志良

责任校对: 陈 静 李 军

封面设计: 于 兵

*

化学工业出版社出版发行

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64982530

[http:// www. cip. com. cn](http://www.cip.com.cn)

*

新华书店北京发行所经销

北京永鑫印刷有限责任公司印刷

三河市东柳装订厂装订

开本 720mm×1000mm 1/16 印张 20¼ 彩插 4 字数 358 千字

2005 年 1 月第 1 版 2005 年 1 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-5895-0/TK·5

定 价: 42.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

序

能源是人类社会存在与发展的物质基础。过去 200 多年，建立在煤炭、石油、天然气等化石燃料基础上的能源体系极大地推动了人类社会的发展。然而，人们在物质生活和精神生活不断提高的同时，也越来越感悟到大规模使用化石燃料所带来的严重后果：资源日益枯竭，环境不断恶化，还诱发了不少国与国之间、地区之间的政治经济纠纷，甚至冲突和战争。因此，人类必须寻求一种新的、清洁、安全、可靠的可持续能源系统。

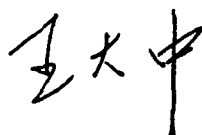
我国经济正在快速持续发展，但又面临着有限的化石燃料资源和更高的环境保护要求的严峻挑战。坚持节能优先，提高能源效率；优化能源结构，以煤为主多元化发展；加强环境保护，开展煤清洁化利用；采取综合措施，保障能源安全；依靠科技进步，开发利用新能源和可再生能源等，是我国长期的能源发展战略，也是我国建立可持续能源系统最主要的政策措施。

面临这样一个能源发展的形势，化学工业出版社组织了一批知名学者和专家，撰写了这套《21 世纪可持续能源丛书》是非常及时和必要的。

这套丛书共有 11 册，以每一个能源品种为一册，内容十分广泛、丰富和充实，包括资源评价，新的工艺技术特性介绍，开发应用中的经济性和环境影响，还涉及到推广应用和产业化发展中的政策和机制等。可以说，在我国能源领域中，这套丛书在深度和广度上都达到了较高的学术水平和实用价值，不仅为能源工作者提供了丰富的能源科学技术方面的专业知识、信息和综合分析的政策工具，而且也能使广大读者更好地了解当今世界正在走向一个可持续发展的、与环境友好的能源新时代，因此值得一读。

我们期待本丛书的出版发行，在探索和建立我国可持续能源体系的进程中作出应有的贡献。

中国科学院院士



2004 年 7 月 8 日

前言

地球内部蕴藏着巨大的自然能源——地热能。它通过火山爆发、温泉、喷泉以及岩石的热能等方式源源不断地向地表传送。地球内部的热能，不论是通过地热流体的循环对流或地幔物质对流，还是通过岩石的热传导，都必须在特定的地质构造部位和水文地质条件下，才能富集赋存在地壳的浅部，形成有开发价值的地热资源。

地热是新能源家族中的重要成员之一。地热利用已有数千年的历史，但是具有一定规模的开发地热能来发电、供暖以及工农业等利用则始于 20 世纪。20 世纪 70 年代初期，全球出现石油危机，再加上自然环境日趋恶化，常规能源储量日渐减小，许多国家为寻找可替代能源，掀起了一个以开发新能源和可再生能源的热潮。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。因此，我国地热能的勘探开发和利用也随之兴起。

我国地热资源丰富，资源潜力占全球总量的 7.9%，高温地热资源（热储温度 $\geq 150^{\circ}\text{C}$ ）主要分布在西藏南部、云南西部、四川西部和台湾省，中低温资源则遍布全国。因此，我国是以中低温地热资源为主的国家。高温地热主要用于发电，西藏羊八井是我国惟一具有一定规模的地热发电基地。装机 25.18MW，被誉为世界屋脊上的一颗明珠。中低温地热主要用于非电利用，目前，我国直接利用年产出能量和设备总装机容量分别在世界排名第 1 位和第 2 位（Lund, Freeston, 2001）。

为了使读者能对地热有较全面的认识，本书以神奇的地热显示来揭开序幕。温泉、火山、水热爆炸、间歇喷泉、泉华等各种地热显示，是人们目睹和

相对熟悉的地热现象,这些现象的出现,表明了地球是个大热库,地球内部蕴藏有巨大的热能。

那么,这个庞大天然锅炉的热量是从何而来?哪些地区会集中存放“锅炉”?哪些地区却十分罕见?这就是第2章和第3章所要阐述的。因为只有知道地球为什么是热的、为什么离地表越深处温度越高,才能进一步了解地球热场的时、空分布规律,热源、热历史等基本概念和理论,才能结合板块构造学说和环球地热带分布规律的研究,对世界乃至我国地热资源的形成与分布规律能从宏观上有所认识,为预测地热资源的赋存与开发区域的勘探目标锁定方位。

本书第4章重点阐述我国地热资源分布规律、类型、评价以及资源的储量,从而进一步了解我国地热资源的特性、分布范围、埋藏深度等特点,为因地制宜地开发地热,尤其是直接利用的中低温地热资源、勘探优选区域奠定初步的基础。

勘探区确立后,需进一步通过地球物理、地球化学、钻探等多种方法勘探,确定开发的靶区,以上则是第5章所述的主要内容。

20世纪70年代末全球地热开发和利用取得重要进展。地热发电在一些国家的能源构成中开始占有一定的比例。地热发电已占全国发电总量10%~20%的有菲律宾、哥斯达黎加、萨尔瓦多、冰岛和尼加拉瓜。非电利用范围更为广泛,目前在技术可靠性、经济及环境可容性等方面已在全世界得到论证。各国的直接利用发展很快,目前全球地热发电总电力为49 263GW·h/年,直接利用为52 979GW·h/年。预计近期内地热发电和非电利用仍将有很大的发展空间,这是第6章综述地热资源利用的内容。我国地热的发展历程、利用现状以及发展趋势在第7章作了较详细的阐述与分析,指出21世纪前期我国地热发展的重点是直接利用,直接利用的重点是发展地热供热和地热旅游。

在全球兴起地热利用热潮中,为了满足社会的需求必然会大量地抽取地下热流体,与此同时资源的浪费现象也屡见不鲜。长期超负荷的抽取必然会导致资源供需的不平衡,从而产生多方面的开发效应,诸如资源参数的下降、地面沉降等现象,直接或间接地影响热利用效率和出现安全隐患。因此地热资源的保护至关重要。地热回灌是资源保护的有效措施,地热热泵的推广与应用为地热能打开一条新的利用通道,而且同时也是高效节能的有效措施。目前我国地热直接利用刚刚步入发展阶段,为实施地热的可持续发展,资源的保护尤为重要,地热回灌必须得以实施,这是第8章的论述要点。

最后1章介绍我国地热开发利用中的几例典范。它们分别是地热发电和直接利用领域的现代“明星”和即将成名于世的地热“明星”。

地热能量是一种可供选择的开发利用的新能源。它在某些方面具备太阳能、风能等所不具备的特点，比如资源的多功能性，不受白昼和季节变化限制以及可直接利用等。与常规能源煤、石油和天然气等相比，它又是一种较为廉价的清洁能源。所以当前它在新能源和可再生能源开发行列中，具有一定的竞争力，而且有广阔的发展空间。

本书写作的目的是面向读者普及地热知识，期望能有更多读者关心、支持和爱护我国地热事业的持续发展。在全国人民的共同努力下，有序地把我国丰富的地热资源优势尽快转化为经济优势、产业优势，为保护环境、节约资源作出积极的贡献。

刘时彬

2004年5月20日于北京大学

目 录

第 1 章 地球上的地热显示	1
1.1 最受人类青睐的温泉	2
1.1.1 中国古代对温泉的记载	2
1.1.2 温泉源源何处来	5
1.1.3 温泉的特性	8
1.1.4 温泉疗疾功效神奇	11
1.1.5 世界各国早期利用温泉记载	18
1.2 温泉的分类和分布	19
1.2.1 温泉的定义	19
1.2.2 温泉的分类	21
1.2.3 我国温泉的分布态势	21
1.2.4 中国温泉有多少?	22
1.3 惊心动魄的水热爆炸	24
1.3.1 水热爆炸的成因	24
1.3.2 世界哪些国家发生过水热爆炸	26
1.3.3 中国的水热爆炸区	26
1.4 墨守成规的间歇喷泉	29
1.4.1 间歇喷泉形成的特定条件	30
1.4.2 全球著名的间歇喷泉	32

1.4.3 中国的间歇喷泉	37
1.5 千姿百态的泉华沉积	43
1.5.1 泉华的形成和分类	43
1.5.2 中国泉华的分布	48
1.5.3 千姿百态的泉华体	49
1.6 五颜六色的水热蚀变	54
1.6.1 西藏的水热蚀变现象	55
1.6.2 云南腾冲热海的水热蚀变现象	56
1.6.3 水热矿化现象	57
1.7 震天动地的火山喷发	57
1.7.1 火山的类型	58
1.7.2 地球上的火山分布	61
1.7.3 火山喷发与人类活动	64
1.7.4 中国晚新生代火山活动与现代高温水热系统	68
1.8 地热区的神秘奇观	72
1.8.1 扯雀塘、醉鸟井与死亡谷的出现	72
1.8.2 地热活动区的生物效应	74
1.8.3 火山岩区的柱状节理	76
1.8.4 温泉河里捕捞活鱼	76

第2章 地球是庞大的热库 78

2.1 地球内部的结构	78
2.2 地球内部的温度和热历史	80
2.2.1 地球内部的温度	80
2.2.2 地球的热历史	82
2.3 地球内部和外部热源	84
2.3.1 地球外部热源	85
2.3.2 地球内部热源	87
2.4 地球内部热的传导	89
2.5 庞大热库真是取之不尽用之不竭吗?	91

第3章 环球地热带是怎样形成的 95

3.1 大地热流与构造活动关系	95
3.2 板块构造运动和环球地热带	97

3.3 板缘地热活动带的形成和分布	99
3.3.1 环太平洋地热带	99
3.3.2 地中海-喜马拉雅地热带	101
3.3.3 红海-亚丁湾-东非裂谷地热带	101
3.3.4 大西洋中脊地热带	102
3.4 全球驰名的高温地热田	102
3.4.1 什么是地热田	102
3.4.2 高温地热田形成特征和条件	105
3.4.3 著名高温地热田	105
3.5 板内地热活动带的形成和分布	109
3.5.1 断裂型	109
3.5.2 沉积盆地型	110
3.6 世界著名的中低温地热田	112
3.6.1 匈牙利潘诺宁热水盆地	112
3.6.2 法国巴黎热水盆地	113
3.6.3 俄罗斯西西伯利亚盆地	115
第4章 中国地热资源丰富多彩	118
4.1 我国地热资源的分布	119
4.1.1 高温地热资源分布	119
4.1.2 低温地热资源分布	122
4.2 我国地热资源的类型	125
4.2.1 岩浆型地热资源	125
4.2.2 隆起断裂型地热资源	126
4.2.3 沉降盆地型地热资源	127
4.2.4 地热资源形成与地质条件的关系	128
4.3 我国地热资源的评价	133
4.4 我国地热资源有多少	136
第5章 如何找地热资源	141
5.1 寻找地热有哪些标志	143
5.2 地质-水文地质调查	145
5.2.1 地质构造控制问题是寻找地下热水的关键	145
5.2.2 调查区域地层剖面应以其透水与不透水层、岩层化学成分、 岩石蚀变和地下热水矿物沉积特征为重点	146

5.2.3	对于调查区内地热显示应进行详细的调查和描述	149
5.2.4	地震活动、地貌、第四纪地质研究	149
5.3	地球化学勘探	149
5.3.1	利用水文地球化学方法圈定地热异常区	149
5.3.2	利用汞指示元素圈定地热异常区	152
5.3.3	利用地球化学地热温标预测地下热储温度	153
5.3.4	同位素研究对地热资源勘探方面的应用	156
5.4	地球物理勘探	162
5.4.1	地表浅孔测温	163
5.4.2	电法	167
5.4.3	重力勘探	171
5.4.4	微地震观测	172
5.4.5	地球物理勘探应用成果示范	179
5.5	钻探	183

第6章 地热资源的利用 185

6.1	世界地热资源的利用	185
6.1.1	意大利	186
6.1.2	新西兰	186
6.1.3	美国	187
6.1.4	冰岛	188
6.1.5	萨尔瓦多	190
6.1.6	尼加拉瓜、哥斯达黎加和危地马拉	191
6.1.7	非洲大陆	192
6.1.8	亚洲	194
6.1.9	欧洲	194
6.2	地热发电	195
6.2.1	地热蒸汽发电	196
6.2.2	地热水发电	196
6.2.3	世界地热发电现状	198
6.3	地热直接利用	200
6.3.1	地热供热	201
6.3.2	地热在工业方面的利用	202
6.3.3	地热在农业方面的利用	206

6.3.4 地热在医疗保健和旅游方面的利用	209
第7章 中国地热资源利用现状	211
7.1 地热发展历程	211
7.2 地热发电现状	212
7.2.1 地热发电热源的制约	214
7.2.2 地热资源地理分布的制约	214
7.2.3 地热勘探高风险的制约	214
7.2.4 国家现存体制的制约	214
7.2.5 地热发电经济性的制约	215
7.3 地热直接利用现状	216
7.3.1 中低温地热资源丰富	216
7.3.2 具有广阔的发展空间	218
7.3.3 地热勘探技术有保障	218
7.3.4 开发周期短, 效益显著	219
7.4 地热直接利用范例	219
7.4.1 天津市蝶泉温泉小区	219
7.4.2 河北省南孟坝地热利用	220
7.5 地热利用的发展趋势	221
7.5.1 地热发电	221
7.5.2 地热直接利用	221
7.6 地热利用需求量预测	225
第8章 地热资源开发和保护	228
8.1 地热利用会产生哪些主要开发效应	228
8.1.1 新西兰怀拉基热田	228
8.1.2 意大利拉德瑞罗热田	231
8.1.3 冰岛劳加奈斯热田	232
8.1.4 西藏羊八井热田	232
8.2 地热利用会产生哪些次要开发效应	235
8.3 地热回灌是资源保护的有效措施	237
8.3.1 地热回灌目的	237
8.3.2 地热回灌发展现状	238
8.3.3 回灌存在的重要问题	242

8.3.4	地热回灌的回采率	244
8.4	地热泵是高效节能的佼佼者	245
8.4.1	什么是地热泵	245
8.4.2	地热泵理论性能指标分析	246
8.4.3	地热泵经济效益分析	247
第9章	中国地热开发利用中的几颗明珠	253
9.1	世界屋脊上的一颗明珠——羊八井地热发电站	253
9.1.1	羊八井地热发电站建站回顾	253
9.1.2	羊八井地热田地质概况	255
9.1.3	羊八井地热发电	258
9.1.4	羊八井地热发电未来	260
9.2	城市中的地热之星——天津市	262
9.2.1	天津地区地热资源的分布	262
9.2.2	天津地热资源量有多少?	265
9.2.3	天津地热资源的综合利用	265
9.2.4	天津地热坚持推广应用新技术	266
9.2.5	地热在未来城市发展中的前景	267
9.3	南方丝绸之路上的博物馆——腾冲地热与火山	268
9.3.1	腾冲地热区域地质背景特征	269
9.3.2	腾冲地区现代水热活动特点	269
9.3.3	腾冲水热活动的今昔	270
9.3.4	腾冲近代的火山活动	282
9.3.5	云南地热旅游资源的研究与开发	286
9.3.6	将腾冲建成世界级的地热火山公园	289
9.4	地热与北京 2008 年奥运会	290
9.4.1	北京的地热资源如何?	290
9.4.2	北京地热资源有何特点?	292
9.4.3	北京有哪些可开发地热资源	293
9.4.4	北京有多少已开发地热异常区	294
9.4.5	北京奥林匹克公园地区地热资源如何?	296
	附录	301
	参考文献	308

第 1 章

地球上的地热显示



地球是个庞大的热库，蕴藏着巨大的热能。地热能当今被誉为新能源和可再生能源家族中的重要成员。自有文明史以来，世界上许多地区就有人利用地热温泉洗浴疗疾，这种初始的利用方式持续了数千年之久，真正有规模地开发利用地热能发电、采暖是从 20 世纪初开始的。地球上露出地表、并能够被我们直接感知的与地球内热相关的自然现象，就是通常所讲的地表地热显示，或称之地热的漏泄显示。它有几种类型：一是微温地面或放热地面，有水汽释放时，地面上容易形成特殊的晨雾；二是温泉和热泉，包括与它相关的各种泉塘和热水湖；三是沸泉；四是湿喷汽孔；五是间歇喷泉，包括泥火山；六是干喷汽孔；七是水热爆炸；八是火山喷发。前两类由于出露地面的水温较低，我们统称它为低温或低强度显示。其余均属高温或高强度显示。这些源自地表深处所形成的地热显示，它们的科学身价可不低，因为它能把很多重要的地质、地球化学、地下温度等重要信息携带上来，为人类揭示地表深层的奥秘提供可靠的依据。那么它们的出露究竟有何科学意义和价值呢？

首先，地热显示的出露预示着这一地区地下深处有热异常，如同通常探矿找油一样，普查到地表有铁帽或油苗出露，亦作为进一步勘探的重要依据，探查可能存在的潜伏地热田、矿田或油田。其次，地热显示中的流体，自身不仅携带有多种微量元素、化合物、气体以及溶解的各类矿物盐等，而且还有一些金属和非金属能从流体中淀积出来形成矿物，诸如金-银矿化、硫磺矿以及高岭土等矿化，这些地表的矿化现象，通常是“找热探热”的重要标志。

另一方面，对地热流体化学组分特征的研究，有助于了解流体上升过程中周围岩石的物理化学特性；对热流体温度、流量、压力等条件变化的研究，有助于了解地球深处岩石增温、岩石渗透率、地质构造等特征。所以地质科学工作者把地热的地表显示，通常比喻是揭示地球内部的一个重要窗口。

1.1 最受人类青睐的温泉

温泉是地球上分布最广又最常见的一种地热显示。它较为集中地出露在高山峡谷、沟谷、河谷以及盆地的边缘地带。世界各国以及我们祖先留下的文海当中,描述、歌颂、神传温泉的记载史料甚多。为何全球人类都如此青睐温泉呢?原因很简单,一是泉水清澈又温热;二是用它洗浴或饮用有治疗疾病之功效。对于早期生活在地球上的人类而言,对居住在经济落后、人烟稀少、交通不便、缺医少药的山区、半山区的居民而言,当他们发现有一股股一塘塘长流不息的温泉时,当然是如获至宝,就地利用,所以早期人类常把温泉比作“神泉”,把泉水比作“圣水”,如此代代相传。至今只要提及到温泉时,大家仍都有一种亲切温馨的感觉。

1.1.1 中国古代对温泉的记载

我国是一个多温泉国家,温泉出露多、分布广。追溯起初始利用温泉的历史有数千年之久,我国也是世界上最早利用温泉治疗疾病的国家之一。目前见于文字最早记载利用温泉洗浴的是先秦时期,在《礼记》中记有“头有创则沐,身有病则浴”。被誉为中医经典著作的《内经》中也有记述,《素问·五常政大论》中写到“虚则补之,药以祛之,食以随之,行水渍之”。《素问·至真要大论》中有“摩之,浴之……”,说明先秦时期我国已有温泉疗法的雏形。春秋战国时期(公元前5世纪)成书的黄帝内经《灵枢篇》记载:“神农尝百草之滋味,水泉之甘苦,令民知所避就,一日而遇七十毒。”按此推算,至少在公元前2500年,我们的祖先就已知道不同的水源对人体的利弊各异,故要就其利,避其害。东汉著名地震仪发明者张衡(公元78~139年),在《温泉赋》中歌颂温泉“有疾病兮,温泉泊焉。以流秽兮,蠲除苛慝”。说明当时用温泉洗浴治病已广为人知。大约公元200年在《辛氏三秦记》书中,曾对骊山汤泉有记载:“秦始皇与神女游,而忤其旨,神女唾之则生疮,始皇怖谢,神女为出温泉洗除,后人因以为验……”。这段描述是解释骊山温泉为什么能治病而敷演出来的,把温泉疗疾归结为“神灵造化”之功。类似这样的神话和传说,出自我国古代文人墨客笔下的诗歌、文献中到处可见。北魏(公元386~534年)元奘在《温泉颂》载“千城万国之民,怀疾枕痾之客,莫不宿粮而来宾,疗苦于斯水……”。生动描述当时来自四面八方的患者,蜂拥而来骊山温泉(陕西临潼华清池)疗苦治病的空前盛况。北魏郦道元《水经注》中有对河南鲁山温泉记述“鲁山温泉,可愈百病,清身沐浴,一日三次,多少自在,四十日后,身中百病愈”。该书还对饮泉疗疾有所阐述,如鲁山“皇女汤,饮之

愈百病”等。可见早在1500多年前温泉饮疗已被百姓应用。公元1000年（北宋）唐庚在《汤泉记》中记有“……或说贵州地性酷热，故山谷多汤泉，或说水中出硫磺，地中即温，初不向南北，临潼汤泉，仍在正西，而贵州余水，未必皆热，则地性之说，固已失之，然以硫磺置水中，水不能温，则硫磺之论，亦未为得，吾意汤泉在天地间，自为一类，受性本然，不必有待然后温也……”。这一段记述，表明唐庚在探讨起温泉成因与地质的关系了。《太平寰宇记》（公元930~1007年）载有“晃女有恶疾，浴于汤泉，应时而愈”，记唐代名画家韩晃的女儿，用南京附近的汤山温泉治好恶疾。宋朝秦观记温泉为“爬搔委顿之病，浴之辄愈”。同是宋朝胡仔的《苕溪渔隐丛话》，把温泉进行分类为：

硫磺泉。汤泉多作硫磺气，浴之则袭人肌肤。

朱砂泉。惟新安黄山是朱砂泉，春时水即微红色。

矾石泉。长安骊山是矾石泉，不甚作气也。

雄黄泉。朱砂泉虽红而不热，当是雄黄耳。

砒石泉。有砒石处，亦有汤泉，浴之有毒。

虽然这种分类与现代温泉及其化学组分分类差别甚大，但是从距今几百年前的科学水平来看，也应该算是很科学了，因为它是以泉水中所含物质为基础划分的。明代著名医药家李时珍（公元1518~1593年）在《本草纲目》记述了用药物配合温泉治疗，“病在皮肤骨节者，浴訖，当大虚惫，可随病与药物及饮食补养。”《食物本草》记述“庐山下有温泉池，往来方士杀令、患疥癩及杨梅疮者入池，久浴得汗出乃止。”综上所述，可见我们的祖先早就对温泉的特性有所认识，而且对温泉利用也积累了很多丰富的经验。

目前，我国的温泉区大约有3000余处。出露数量最多的前5位省分为云南、西藏、广东、四川和福建。其中云南被誉为“温泉之乡”，历代文人墨客对云南温泉考察和记载之多，可谓举不胜举。

安宁温泉是云南省著名温泉，距昆明37.5km，是我国开发利用较早的温泉之一。据传早在东汉建武年间（公元25~56年），伏波将军从交趾（今越南）班师回朝，途经此地，其部将苏文达因染瘴疔留此休养，常浴温泉而愈，从此温泉名声大振。从元朝起即建露天浴场供人洗浴治病。后经明代扩建修缮，殿宇已颇具规模。明代大文学家杨慎赞其神奇功效，誉为“天下第一汤”而闻名全国。滇西腾冲县热海也是国内著名的温泉区。有文字记载的历史有500多年，最早见于明朝景泰二年（公元1451年）任云南右布政使陈文纂修的《景泰云南图经金腾两指挥使司志》，内记腾冲温泉4处，“一在城北马邑村，一在城东南大洞村，一在城南罗左冲村，一在城西缅甸村，皆水沸如汤，