



中国科学院上海高等研究院报告系列

中国行业低碳发展报告

火电、钢铁、水泥

魏 伟 王茂华 / 主编



科学出版社

学院上海高等研究院报告系列

中国行业低碳发展报告

火电、钢铁、水泥

魏 伟 王茂华 / 主编

科学出版社

北 京

内 容 简 介

党的十九大报告中指出,中国引导应对气候变化国际合作,成为全球生态文明建设的重要参与者、贡献者、引领者。节约能源、减少碳排放不仅关系到中国自身的绿色低碳发展,同时也关系到中国在国际中的大国形象和政治地位。中国人为源碳排放主要集中在第二产业中的几个高能耗、高排放行业,但同时也发现,这些行业中既存在着最先进的生产技术,也保留着能耗较高、碳排放较高的落后生产技术。本书选取火电、钢铁、水泥三个行业,针对其行业自身的技术结构,构建碳排放模型和碳评估模型,量化评估了技术结构优化对行业减排的潜力及其成本效益,同时提出适合我国火电行业、钢铁行业 and 水泥行业的低碳发展路径。

本书适合低碳能源和低碳产业相关的政府管理部门、研究机构及相关领域学者。

图书在版编目(CIP)数据

中国行业低碳发展报告:火电、钢铁、水泥 / 魏伟,王茂华主编. —北京:科学出版社,2018.6

(中国科学院上海高等研究院报告系列)

ISBN 978-7-03-057736-8

I. ①中… II. ①魏… ②王… III. ①火电厂-二氧化碳-排气-研究报告-中国②钢铁工业-二氧化碳-排气-研究报告-中国③水泥工业-二氧化碳-排气-研究报告-中国 IV. ①X511

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第115758号

责任编辑:李轶冰 / 责任校对:彭 涛

责任印制:肖 兴 / 封面设计:无极书装

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

天津市新科印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年6月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2018年6月第一次印刷 印张:8 1/2 插页:2

字数:250 000

定价:98.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

本书得到国家重点研发计划项目 (2016YFA0602603, 2017YFA0605300, 2016YFA0602602)、国家自然科学基金面上项目 (51778601)、上海市科学技术委员会重点研发项目 (15DZ1170600)、中国科学院青年创新促进会会员基金、中国科学院 STS 项目 (KFJ-EW-STS-140)、中国科学院战略性先导科技专项 (XDA05000000) 支持。

编写委员会

主 编

魏 伟 王茂华

副主编

汪鸣泉

编 委

王茂华 魏 伟

汪鸣泉 苏 昕

雷 杨

前言

近一百多年来,全球地表平均温度持续上升。节约能源、减少碳排放已成为全球应对气候变化的主要方式。中国已经成为能源生产和消费大国,在巴黎气候大会召开前夕,中国向世界承诺:到2020年,单位国内生产总值二氧化碳排放比2005年下降40%~45%;到2030年,单位国内生产总值二氧化碳排放比2005年下降60%~65%,同时达到碳排放峰值,并争取尽早达峰。因此,绿色低碳发展不仅是我国经济结构转型的现实需求,也关系我国的大国形象和政治地位。

中国人为源碳排放主要集中在第二产业中的几个高能耗、高排放行业,如何减少这些行业的碳排放,使其走上低碳发展的道路,事关中国碳减排的成效,关系到中国能否实现其向世界承诺的自主减排目标。目前,在这些行业中既存在着最先进的生产技术,同时也保留着能耗较高、碳排放较高的落后生产技术,调整这些行业自身的技术结构,提高现有低碳技术的比例,可以在一定程度上促进这些行业的低碳发展,有利于我国承诺的自主减排目标的实现。

本书重点关注能耗和排放量最高的三个行业——火电、钢铁和水泥,以LEAP模型为基础,构建了这三个行业的碳排放模型和碳评估模型,定量化评估了技术结构的改变对这三个行业碳排放总量的影响、单位国内生产总值碳排放量的影响及相应的成本变化,同时提出适合我国火电行业、钢铁行业 and 水泥行业的低碳发展路径。

本书各章节的内容如下。

引言:总体上描绘了中国节能减排面临的形势,并着重阐述了选择火电、钢铁和水泥三个行业作为本书定量化分析目标的原因。

第一章:分析火电行业、钢铁行业 and 水泥行业对国民经济发展的贡献、能耗及碳排放现状、技术应用现状、行业减排目标与规划,旨在让读者了解这些高能耗、高排放行业的发展现状,帮助读者更好地理解本书的后续章节。

第二章:结合本书研究目标构建了研究的技术路线图,同时筛选了能源-环境-经济系统的众多模型,基于LEAP模型构建了这三个行业碳排放模型及碳评估模型。

第三~第五章:通过情景分析法来定量化分析这三个行业技术结构调整所带来的减排潜力。作为本书的主体,首先,详细论述了这三个行业的情景设置结果,突

出技术结构调整在情景设置中的主导地位。其次，从二氧化碳排放量、单位国内生产总值二氧化碳排放量、技术结构调整的成本、低碳发展的影响因素等方面评价这三个行业技术结构调整所带来的减排潜力。最后，总结各行业的情景分析结果，并提出主要结论。

第六章：主要结论和展望凝练了第三~第五章的分析结果，局限性则提出了本书未来的发展方向。

本书的编写由魏伟、王茂华负责总体设计、策划、组织和统稿，模型架构及撰写由汪鸣泉、雷杨和苏昕负责。其中，水泥行业的模型计算和报告撰写由汪鸣泉负责，火电行业的模型计算和报告撰写由雷杨负责，钢铁行业的模型计算和报告撰写由苏昕负责。本书在撰写过程中还得到了上海碳数据与碳评估研究中心魏崇、尚丽、顾倩荣、黄永健、李青青等同事的支持，在此，向他们表示衷心感谢！

在本书的研究与撰写过程中，得到了上海市科学技术委员会重点研发项目“构建天地一体化碳排放数据系统及应用研究”（15DZ1170600）、国家自然科学基金面上项目（51778601）、国家重点研发计划项目（2016YFA0602603，2017YFA0605300，2016YFA0602602）、中国科学院青年创新促进会会员基金、中国科学院科技服务网络计划（KFJ-EW-STS-140）、中国科学院战略性先导科技专项“应对气候变化的碳收支认证及相关问题”（XDA05000000）等相关项目的大力支持。与此同时，本书的写作，先后得到碳专项项目组各位专家，国外同行何钢、刘竹以及碳排放国际会议与会专家，低碳转化科学与工程重点实验室唐志永及相关团队的指导和无私帮助。也同样借此机会，向各个项目的支持，以及专家的指导与帮助，表示衷心感谢！另外，特别感谢本书引文中的所有作者！

本书部分数据的更新时间为2015年，而资料汇编的更新时间为2016年初，因此本书的分析和结论，仅是基于2015年前后三个行业发展的情况所做出的。但本书基于数据挖掘和情景模型的行业低碳技术减排评估方法，为后续的分析拓展和数据更新，提供了一个可供借鉴的研究框架。

限于我们知识修养和学术水平，报告中难免存在不足之处，恳请读者批评、指正！

魏 伟 王茂华

2018年5月于上海

目 录

引言 中国行业低碳发展展望	1
第一节 化石能源技术创新是实现减排目标的关键	2
第二节 中国政府高度重视化石能源减排	2
第三节 化石能源减排的目标分解	3
第四节 化石能源利用行业的排放状况	5
第五节 本书的研究目标及思路	7
第一章 中国行业低碳发展概述	8
第一节 火电行业	8
第二节 钢铁行业	21
第三节 水泥行业	27
第四节 本章小结	37
第二章 行业低碳发展的研究方法	39
第一节 方法和思路	39
第二节 排放模型	42
第三节 评估模型	51
第四节 情景设置	57
第五节 本章小结	59
第三章 火电行业低碳发展	61
第一节 火电行业技术情景设置	61
第二节 火电行业低碳技术发展分析	65
第三节 本章小结	71
第四章 钢铁行业低碳发展	75
第一节 钢铁行业技术情景设置	75

第二节	钢铁行业低碳技术发展分析	78
第三节	本章小结	82
第五章	水泥行业低碳发展	86
第一节	水泥行业技术情景设置	86
第二节	水泥行业低碳技术发展分析	89
第三节	本章小结	94
第六章	结论与展望	98
第一节	结论	98
第二节	展望	100
第三节	本书的局限性	103
参考文献		105
附录 A	火电行业	110
附录 A-1	火电行业相关统计数据	110
附录 A-2	火电行业政策汇编	114
附录 B	钢铁行业	116
附录 B-1	钢铁行业相关统计数据	116
附录 B-2	钢铁行业政策汇编	120
附录 C	水泥行业	122
附录 C-1	水泥行业相关统计数据	122
附录 C-2	水泥行业政策汇编	125

引言 | 中国行业低碳发展展望^①

随着人类工业化、现代化进程的推进，人类社会不断发展，同时也造成了资源枯竭、环境恶化等不良影响，特别是工业革命以来人类活动带来的能源消费和二氧化碳排放已成为全球发展瓶颈和气候系统变化的主要原因，由此带来的不利影响加剧了自然环境及人类社会面临的风险，甚至直接威胁到人类的生存和发展（中国科学院可持续发展战略研究组，2015）。2000年以来，以中国为代表的发展中国家进入了工业化、城镇化快速推进的阶段，随之带来的能源消耗和碳排放成为全球碳排放增长的主要驱动力，如图 0-1 所示（IEA，2015），中国的节能减排任重而道远（李俊峰，2015）。

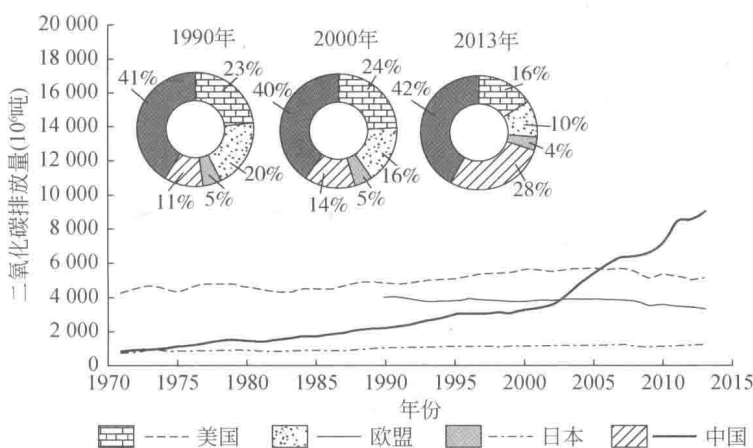


图 0-1 主要国家和地区能源活动碳排放量和占比变化情况（1971~2013 年）

近 20 年来，中国的能源消费一直保持高速增长态势，以煤为主的能源和粗放式的利用方式带来了严重的资源环境问题，甚至威胁国家安全，并导致巨大的国际压力。发展节约、高效、低碳、清洁的现代化发展路径是我

① 本章作者：王茂华、魏伟、汪鸣泉、苏昕、雷杨。

国未来的重要战略方向（中国能源中长期发展战略研究项目组，2011）。从全球的能源消耗结构来看，建筑和工业领域占终端能源消费的近40%（IEA，2015）。工业能源消费也是我国能源消费的主要部分，占2014年全国能源消费总量的69.8%^①。因此，有必要深入研究工业能源领域的低碳技术创新，为低碳发展提供科学和技术支撑。

第一节 化石能源技术创新是实现减排目标的关键

我国的能源技术创新要立足我国经济社会发展、能源结构的现状。化石能源为中国经济工业发展奠定了基础。经济社会取得巨大进步的同时，也消耗了大量化石能源。2014年和1980年相比，全国能源消耗由每年5.7亿吨标准煤增加到42.6亿吨标准煤^②，增长7.47倍。

未来化石能源仍然占我国能源结构中的主体，也是我国工业发展的基础。尽管2014年非化石能源占能源生产量和能源消费量的比例已分别从1980年的3.8%和5.1%上升到13.7%和11.2%，但原煤在我国能源生产和消费中的比例仍高达73.2%和66.0%。因此，如何实现化石能源的能效、碳效提升，降低化石能源的二氧化碳排放强度是我国气候变化策略和行动的关键（国家发展和改革委员会，2015）。

第二节 中国政府高度重视化石能源减排

我国政府高度重视化石能源减排，近年来也取得了一系列的进步。“十二五”规划的前4年，全国单位国内生产总值能耗累计下降13.4%，实现节能约为6.0亿吨标准煤，相当于少排放二氧化碳14亿吨。2014年单位国内生产总值二氧化碳排放相比2010年累计下降15.8%，比2005年下降33.8%，“十二五”有望实现下降17%的目标（国家发展和改革委员会，2015）。

近年来我国出台了一系列应对气候变化的战略政策和文件，见表0-1，这些文件的出台，既表达了我国通过能源技术创新推动减排低碳发展的决心，也为提高气候

① 数据来自《中国能源统计年鉴2015》。

② 数据来自《中国能源统计年鉴2015》。

变化应对能力部署了实质性的工作。

表 0-1 我国政府近年出台的应对气候变化的战略政策和文件

年份	政策文件
2007	《中国应对气候变化国家方案》（国家发展和改革委员会，2007）
2008	《中国应对气候变化的政策与行动》（国务院新闻办公室，2008）
2009	《落实巴厘路线图——中国政府关于哥本哈根气候变化会议的立场》（国家发展和改革委员会等，2009）
2011	《“十二五”控制温室气体排放工作方案》国发〔2011〕41号
2013	《国家适应气候变化战略》（国家发展和改革委员会等，2013）
2014	《2014—2015年节能减排低碳发展行动方案》（国务院办公厅，2014a） 《能源发展战略行动计划（2014—2020年）》（国务院办公厅，2014b） 《国家应对气候变化规划（2014—2020年）》（国家发展和改革委员会，2014b）
2015	《中国应对气候变化的政策与行动 2015 年度报告》（国家发展和改革委员会，2015） 《第三次气候变化国家评估报告》（《第三次气候变化国家评估报告》编写委员会，2015）

第三节 化石能源减排的目标分解

根据习近平总书记在 2015 年 12 月 1 日的气候变化巴黎大会开幕式上的讲话内容，和《强化应对气候变化行动——中国国家自主贡献》《中国应对气候变化的政策与行动 2015 年度报告》《“十二五”控制温室气体排放工作方案》《能源发展战略行动计划（2014—2020 年）》《国家应对气候变化规划（2014—2020 年）》以及习近平关于《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十三个五年规划的建议》的说明等一系列报告的要求，对中国应对气候变化实现节能减排的 2020 年和 2030 年目标分别进行了部署。

一、中国应对气候变化的 2030 年减排目标

《强化应对气候变化行动——中国国家自主贡献》中提出：到 2030 年，单位国内生产总值二氧化碳排放比 2005 年下降 60% ~ 65%，非化石能源占一次能源消费的比例为 20% 左右，并于 2030 年前后使二氧化碳排放达到峰值。

二、中国应对气候变化的 2020 年减排目标

到 2020 年，单位国内生产总值二氧化碳排放比 2005 年下降 40%~45%，非化石能源占一次能源消费的比例到 15% 左右，一次能源消费总量控制在 50 亿吨标准煤左右^①。其中，煤炭占一次能源消费的比例控制在 62% 以内，即不超过 31 亿吨标准煤（国务院办公厅，2014b）。

2020 年的减排分解目标及实现情况如图 0-2 所示。

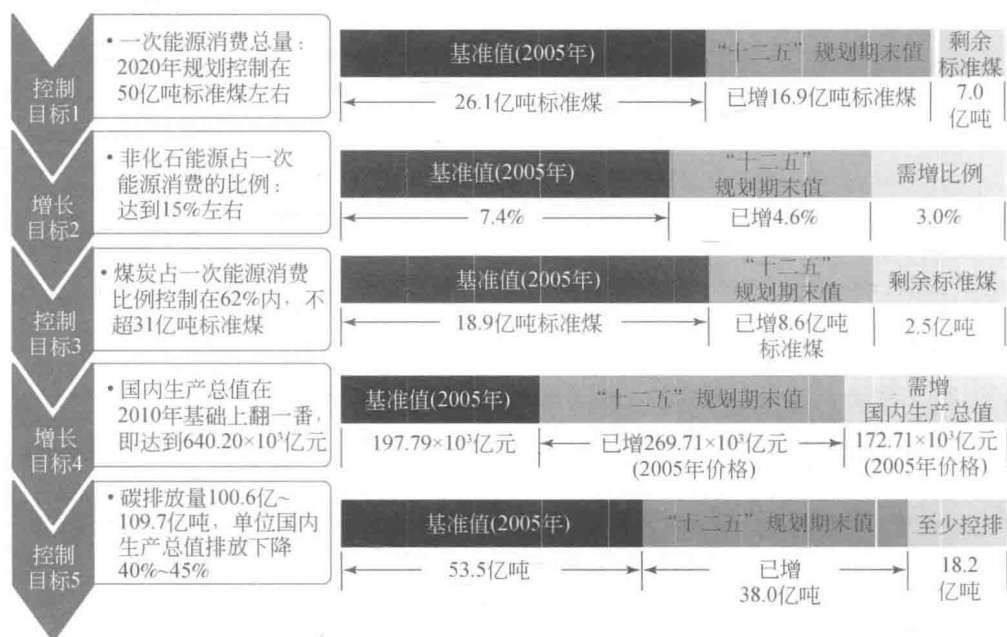


图 0-2 2020 年的减排分解目标及实现情况

图 0-2 系统描述了 2020 年的减排分解目标及实现情况，其中按照控制目标和增长目标，可以将这一减排目标进一步分解如下。

控制目标 1：一次能源消费总量为 2020 年规划控制在 50 亿吨标准煤左右；

增长目标 2：非化石能源占一次能源消费的比例达到 15% 左右；

控制目标 3：煤炭占一次能源消费的比例，控制在 62% 以内，即不超过 31 亿吨标准煤；

增长目标 4：国内生产总值在 2010 年基础上翻一番，即达到 640.20×10^3 亿元；

^① 数据来自《能源发展“十三五”规划》。

控制目标5：二氧化碳排放总量为100.6亿~109.7亿吨，单位国内生产总值排放下降40%~45%。

第四节 化石能源利用行业的排放状况

要实现以上目标一方面要调整能源结构，另一方面要大力推动产业结构转型升级，尤其是重点发展有针对性的低碳技术。中国现在二氧化碳的排放行业包括火电、钢铁、水泥、有色金属、煤化工、民用煤、石油化工、天然气、液化天然气、焦炉气、煤层气等行业。目前，各个行业最先进和最落后的技术并存，各个技术在排放方面的差异较大。本书重点关注排放量较大的前三个行业：火电、钢铁、水泥，并针对三个行业进行重点分析。

目前这三个重点行业的能耗排放现状如下。

一、火电行业能耗排放现状

2013年中国火电行业的装机容量为8.62亿千瓦^①。2012年的火电行业的能源消费总量为12.7亿吨标准煤，带来44亿~48亿吨的二氧化碳排放^②。

二、钢铁行业能耗排放现状

2013年中国粗钢产量为8.2亿吨^③。2013年中国以钢铁为主的黑色金属制造业能源消耗量为79 203万吨标准煤^④。2009年的钢铁工业二氧化碳排放量达到10亿吨（研究计算值）。

三、水泥行业能耗排放现状

2014年中国水泥的总产量为24.76亿吨（中国科学院碳专项水泥子课题组，

① 数据来自《2014中国电力年鉴》。

② 数据来自2011~2013年《中国能源统计年鉴》及《2013中国电力年鉴》。

③ 数据来自《中国钢铁工业年鉴2014》。

④ 数据来自《中国能源统计年鉴2015》。

2015)。2013 年的水泥全行业消耗能源为 2.58 亿吨标准煤，共计排放 13.12 亿吨二氧化碳（Liu et al., 2015）。

从以上数据可以看出，仅火电、钢铁、水泥三个行业的能源消耗量约为 23.4 亿吨标准煤，已约占我国总体能源消耗量 41.7 亿吨标准煤的 56%（其中，火电、钢铁和水泥分别占到 35%、15% 和 6%，图 0-3）。火电、钢铁、水泥三个行业的二氧化碳排放量约为 70 亿吨（其中水泥行业排放考虑直接排放和间接排放），已约占我国总体排放量 91.5 亿吨二氧化碳的 77%（其中，火电、钢铁和水泥分别占到 45%、18% 和 14%，图 0-4）。

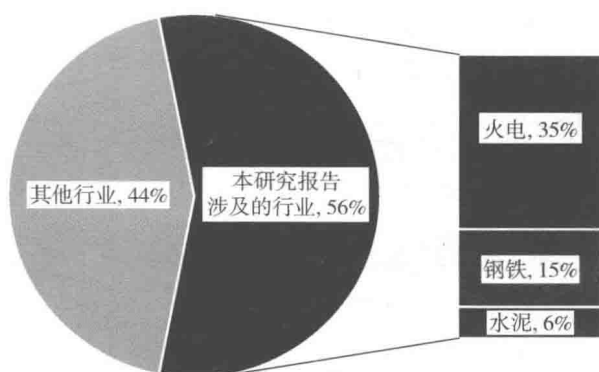


图 0-3 中国能源消耗总量中火电、钢铁、水泥等行业的占比（2013 年）

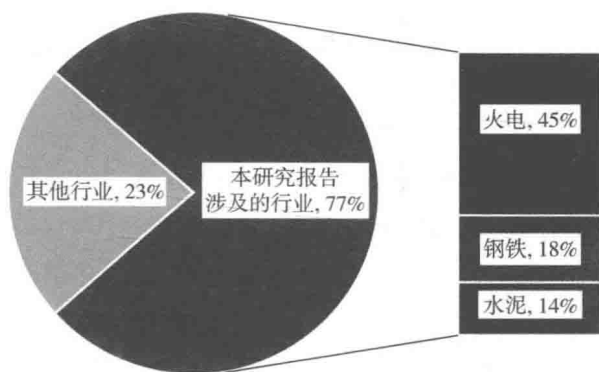


图 0-4 中国碳排放总量中火电、钢铁、水泥等行业的占比（2013 年）

影响行业二氧化碳排放的因素包括低碳技术的推广、能源结构调整、未来技术的发展及经济结构调整，其中低碳技术的推广是最主要的减排途径，因此有必要对重点行业既有产能改造、淘汰落后产能并用新技术“等量替换”、净新增高效产能等低碳技术发展路径的减排影响和成本进行综合分析。

第五节 本书的研究目标及思路

综上所述，本书以化石能源的低碳技术为主要研究对象，针对我国行业现状和技术的发展趋势，重点选取与化石能源消耗、二氧化碳排放紧密相关的火电、钢铁、水泥三个行业，根据各行业各类技术类型的技术特点及参数、碳排放因子、单位产能能耗等数据，结合不同的低碳技术发展趋势、技术结构、成本投入、主要风险等，全面深入地开展以技术为重点的研究和分析，并对各个行业 2020 年的低碳发展提出展望，为我国行业低碳技术的研发和提升建立定量化的数据库与评估模型体系，针对不同技术投入的能耗、排放、成本等进行综合评估，为我国经济绿色低碳转型升级及应对气候变化提供技术支撑，为不断探索中国可持续发展之路提供战略引导。

第一章 | 中国行业低碳发展概述^①

本章将详细介绍火电行业、钢铁行业 and 水泥行业在国民经济发展中的重要地位、能耗及碳排放现状、技术应用现状、行业减排目标及规划，旨在让读者了解这些高能耗、高排放行业的发展现状，帮助读者更好地理解本书的后续章节。

第一节 火电行业^②

一、火电行业的重要性及现状

电力行业是由发电、输电、变电、配电和用电等环节组成的电力生产与消费系统。电力是国民经济发展重要的基础能源产业，为国民经济各产业的健康发展提供支撑，同时对人民生活水平的提高具有重要意义。特别地，随着我国工业化、城镇化进程的迅速推进，电力需求迅猛增长，电力工业的持续快速发展为国民经济发展转型和人民生活水平的迅速提高做出了巨大的贡献。

目前，我国的发电方式主要包括：火力发电、水利发电、核能发电、风能发电和太阳能发电等。虽然，随着不可再生资源的不断减少，以及国家经济结构的调整、环保政策的落实和洁净能源份额的不断提高，火电行业的增长规模将呈现连续下降的态势（表 1-1）。但是，由于我国电力供应相对紧张、能源结构中煤炭比例较高、新能源发电在技术成熟度和成本控制方面仍有待提高，短期内我国电能供应以火电为主的基本格局不会发生根本变化。

① 本章作者：雷杨、苏昕、汪鸣泉。

② 本节作者：雷杨。