



中国资源能源与 可持续发展

清华-力拓资源能源与可持续发展研究中心



姚 强 于永达 朱桂萍 麻林巍 蔡闻佳 齐天宇 等/著



科学出版社



中国资源能源与 可持续发展

清华大学环境科学与工程学院环境工程研究中心

姚 强 于永达 朱桂萍 麻林巍 蔡闻佳 齐天宇 等/著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书是一部综合性、专业性的研究著作。本书包括3篇共14章内容,对中国资源、能源与可持续发展领域的若干重要问题展开分析与研究。资源篇核算中国分省分行业虚拟水和隐含能情况,系统分析中国铁矿石发展战略、定价机制,并对跨国矿产企业战略及矿产金融问题提出了比较与分析;化石能源篇利用中国煤炭分配图来分析煤炭消费增长的驱动因素,针对煤炭清洁高效利用技术和CO₂捕集利用与封存技术进行系统的评价,同时对国内外成品油定价政策进行系统的探讨,提出未来发展的建议。新能源技术篇对全球可再生能源发展进行展望,系统分析中国光伏产业、智能电网、分布式电源与电动汽车发展现状及相关问题,对中国光伏业的国际智力回流问题进行了实证研究。

本书可为资源能源与可持续发展的研究、决策和实施者提供参考。

图书在版编目(CIP)数据

中国资源能源与可持续发展 / 姚强等著. —北京: 科学出版社, 2015

ISBN 978-7-03-045976-3

I. ①中… II. ①姚… III. ①能源经济—可持续性发展—研究—中国 IV. ①F426.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 241813 号

责任编辑: 马 跃 李莉 / 责任校对: 贾如想 李 莉
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>

北京通州皇家印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 9 月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2015 年 9 月第一次印刷 印张: 30

字数: 604 000

定价: 136.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

《中国资源能源与可持续发展》各章执笔人

资源篇

- 第1章 中国分省分行业虚拟水和隐含能核算及节约潜力案例研究 蔡闻佳
杜鹏飞 江永楷 王灿
- 第2章 中国铁矿石发展战略的系统分析 麻林巍 李政 杨洁 沈学思
李伟起
- 第3章 铁矿石定价机制及其波动特征研究 尹峰 于永达
- 第4章 跨国矿业企业的战略研究 于永达
- 第5章 矿产金融问题研究 于永达

化石能源篇

- 第6章 中国煤炭分配图及煤炭消费增长的驱动因素分析 麻林巍 章景皓
李政 于飞飞 李伟起
- 第7章 中国煤炭清洁高效利用技术发展评价 李慧娜 杨倩 卓建坤
姚强
- 第8章 中国成品油定价政策研究 药宁 于永达
- 第9章 二氧化碳捕集利用与封存技术评价 李慧娜 杨倩 卓建坤 姚强

新能源技术篇

- 第10章 全球可再生能源发展展望研究 齐天宇 张旭 张希良
- 第11章 中国光伏产业发展现状及展望 鲁宗相 朱桂萍 王赞基
- 第12章 中国光伏产业的国际智力回流问题研究 罗思平 于永达
- 第13章 中国智能电网发展现状及分布式电源并网的若干问题研究
朱桂萍 鲁宗相 王赞基
- 第14章 中国电动汽车发展现状及展望 鲁宗相 朱桂萍 王赞基

序 一

经济和社会的持续发展，对矿产资源和化石能源的消费需求日益增长，不仅带来日益严峻的资源短缺，也带来了对空气、水资源、土壤乃至生态环境的破坏。如何协调经济、社会的发展和环境保护之间的关系，成为当前全球可持续发展中面临的关键问题。

2012年6月在巴西里约热内卢召开了联合国可持续发展大会，这是继1992年联合国环境与发展大会提出可持续发展的理念20年以来的又一次世界首脑的峰会。这个峰会的主题是发展绿色经济促进世界范围内脱贫和可持续发展。就是用绿色、低碳发展的理念，来统筹可持续发展中经济发展、社会进步和环境保护这三大支柱的关系。2015年9月25日，在纽约召开的联合国峰会达成了可持续发展目标。这一目标的显著特点是实现经济、社会和环境各方面发展目标的整合。保护资源和环境，实现可持续增长，已成为全球可持续发展中的一个核心问题。

中国当前的经济社会发展，也面临着日益强化的资源和环境方面的制约。中国的 CO_2 排放已经占到世界 CO_2 排放量的1/4以上，煤炭的消费量已经占到世界煤炭消费量的45%。中国大气污染形势严峻，以可吸入颗粒物(PM_{10})、细颗粒物($\text{PM}_{2.5}$)为特征污染物的区域性大气环境问题日益突出。大气中 SO_2 、 NO_x 、 $\text{PM}_{2.5}$ 的排放，约70%以上都来自于燃煤和汽车尾气排放。煤炭的开采，还导致了地下水污染和采矿区土地塌陷等生态环境问题。走绿色低碳的发展路径，也是中国突破资源环境制约，实现可持续发展的根本途径。

推动能源的转型和能源的变革，既是应对气候变化，保护全球生态的战略选择，也是国内可持续发展的内在需要，有着广泛的、强烈的、系统的综合效益。在新的历史背景和新的国内发展形势之下，我们必须制定新的、长远的、符合生态文明建设的新的能源战略和发展思路。实现能源环境与经济社会的协调和可持续发展。

大幅度降低单位国内生产总值的能源消费和 CO_2 排放，是中国当前统筹经济社会持续发展和减缓气候变化的关键着力点。中国尚处于工业化、城镇化较快发展阶段，既要满足随经济社会发展不断增长的能源需求，又要应对全球气候变

化减缓 CO₂ 排放，就必须推进能源生产和消费革命，走绿色发展、循环发展、低碳发展的路径。

大力发展新能源和可再生能源，提高非化石能源比例，是中国构建低碳能源体系的重要对策。中国 2014 年一次能源总消费量为 42.6 亿吨标准煤，未来即使采取大力度节能措施，到 2030 年一次能源总消费量也将达约 60 亿吨标准煤，实现非化石能源比例达 20% 左右目标，届时其供应量将达约 12 亿吨标准煤。新能源和可再生能源发电的装机规模将达 13 亿千瓦左右，可替代煤炭 16 亿吨以上，减排 CO₂ 超过 30 亿吨。2030 年以后，新能源和可再生能源仍将持续快速增长，为 CO₂ 排放达峰并开始下降提供保障。

实现 CO₂ 排放达峰目标，是中国经济发展方式转变的重要标志。在 2014 年 11 月中美发表的《气候变化联合声明》中，中国提出到 2030 年左右，CO₂ 的排放要达到峰值，这是一个必须要经过很大努力才能实现的目标，实现这个目标也就意味着到 2030 年中国化石能源的消费不再增长，经济社会的持续发展增加的能源需求主要依靠新能源和可再生能源发展来满足，实现经济社会持续发展和 CO₂ 排放完全脱钩。这是中国经济发展阶段的一个重要转折点，也标志着中国国内资源和环境问题的根本缓解。

《中国资源能源与可持续发展》是清华-力拓资源能源与可持续发展研究中心资助完成的 6 项课题的研究成果汇总。研究范围涉及清洁煤、可再生能源、智能电网、能源与水资源、矿产资源等多个领域。旨在就全球和中国能源、资源与可持续发展领域这些关键问题开展跨学科系统和深入的研究，提出可持续发展的战略与政策。这一研究将从学者的角度为前瞻性的战略规划和部署提供参考建议。



何建坤

2015 年 9 月 28 日

序 二

力拓非常荣幸能够支持清华-力拓资源能源与可持续发展研究中心（以下简称中心）首部著作的出版。我们希望这部著作能成为一个良好开端，更期望中心的研究成果能为中国的可持续发展做出有价值的贡献。

中心自 2012 年成立以来，其重要的使命就是集结中国和其他各国的一流专家学者，研究、探讨和分享资源利用等可持续发展领域的最佳实践。可持续发展有一个简单的前提。在我们满足当前需求的同时，不能忽视下一代人的未来需求，不能使他们失去自给自足的能力。这意味着我们需要将经济增长中的部分收益，重新投资到社会秩序和环境的维护中。而良好的社会秩序和环境，正是经济增长的基础。力拓对中心的支持正是基于这个使命。我们将其视为对未来的投资，希望中心的研究能帮助确保中国的发展和资源利用是可持续的。

中国和力拓的关系是互惠互利的。一方面，我们为中国供应可靠、高质量的资源产品，以帮助中国满足发展需求。另一方面，中国是我们重要的市场，中国合作伙伴和高质量的中国商品、服务，也是维系力拓业务的关键。力拓和中国都将从可持续的共赢关系中获益，并且双方正积极合作，努力确保我们的资源生产和利用，在社会层面、经济层面和环境层面均可持续。为了实现这一目标，中心为中国和国际政策制定者提供了世界一流的参考资源。中心基于事实的高质量分析报告支撑了政策发展，影响着我们共同的未来。

作为中国市场重要的矿产资源供应商之一，力拓十分关心中国的可持续发展，并且这一议题对全球都有重要意义。中国过去 40 年的经济增长令人赞叹。中国的经济增长使千百万人民脱离了贫困，也使中国恢复到与世界第一人口大国相匹配的经济地位。中国拥有世界五分之一的人口，是世界经济不可或缺的一部分。我们所有人都从中国的繁荣稳定中获益，因此我们都期望中国增长具有可持续性。然而，许多最初驱动中国增长的因素已经不复存在。中国亟须改革，以应对快速增长所带来的社会 and 环境影响，并以新的发展模式使经济在更可持续的基础上增长。为了满足中国日益增长的能源和资源需求，我们需要新政策、新技术以及新的国际合作形式。这对供应端和需求端都是挑战。资源和能源的供应对中国的发展至关重要，因此它必须安全、可靠、高质、低耗。最理想的情况是，供

应商都是效率最高的生产者，总体经济和环境生产成本保持最小化。从需求方面看，焦点则在于效率和行为变化——如何为污染、产品生命周期中的用水和耗能等外部性定价，从而促使排放最小化，并促进人们使用更清洁的能源产品？中心正试图解答以下问题：在“新常态”环境下，中国需要哪些政策和技术来实现可持续发展。中国如何最佳利用国际贸易系统中各个合作伙伴的比较优势，以最有成本优势、最环境友好的方式满足自身对资源安全的需求？这些复杂的问题涉及了多个学科领域。然而中心的优势之一，正在于其集结中国和国际一流跨学科团队的能力。他们来自清华大学、力拓以及其各自研究合作网络，包括其他大学、政府和相关行业。中心拥有的专家资源的广度和深度，使其能够提出解决现实世界复杂问题的有效方案。

本书中所呈现的初期研究项目，充分展现了中心研究成果的高质量和实用性。研究的课题包括中国工业中的水和能源利用、减小煤炭使用负面影响的方法、全球大宗商品市场的供需趋势、可再生能源技术、中国“智能电网”的发展等。尽管研究的焦点是中国，但全球都将从这些成果中受益，因为我们都面临相似的挑战，这些挑战并不受国界和文化差异的影响。在大多数情况下，这些初始研究结果的高质量和实用性，使得很多进一步研究工作能在这些基础上进行。我们非常期待能有更多进一步的研究成果，为中国的繁荣和可持续发展做出有价值的贡献。力拓非常荣幸能支持中心的工作，我也衷心祝贺与本书所有相关的研究和工作人员取得的丰硕成果。



Andrew Harding

何彦枢

力拓铁矿集团首席执行官兼

力拓集团中国、澳大利亚和韩国区执行官

2015年10月7日

前 言

2014 年 5 月，习近平在考察河南的行程中说：“中国发展仍处于重要战略机遇期，我们要增强信心，从当前中国经济发展的阶段性特征出发，适应新常态，保持战略上的平常心态。”意味着中国经济已进入一个与过去 30 多年高速增长期不同的新阶段，这是一种趋势性、不可逆的发展状态，所处的是与以前截然不同的新形势，遇到的是前所未有的新挑战。在新常态下，中国的资源和能源都面临着新的战略调整问题。

中国资源面临的主要问题：人均占有量低，使用粗放，环境问题严重。

水资源方面，中国是贫水国，人均水资源占有量仅为世界人均占有量的四分之一强，其中，北京、天津所在的海河、滦河流域，人均水资源占有量不到 200 立方米，低于像以色列、沙特这样的沙漠国家的人均占有量水平。经济发展和城市化水平的提高，使水资源供需矛盾日益尖锐，同时带来大量的污染治理问题。

矿产资源方面，中国矿产资源总量丰富，矿种比较齐全，但人均资源量少，矿产资源地区分布不均，部分资源供需失衡，优劣矿并存，查明资源储量中地质控制程度较低的部分所占的比重较大。新中国成立后经过 60 多年的发展过程，GDP 增长的同时，矿产资源的消耗量也增加了 40 多倍，其中粗放式的资源利用方式造成了大量浪费。目前，中国矿产资源面临严峻的形势，经过多年的开采，地表以及浅部矿产资源已被开发和利用，矿产资源的开发逐渐向地下深部和海域发展，开发和利用难度加大，前期开采成本也大幅提高；同时，由于勘探工作落后，多种重要矿产储量一直在下降，到 2020 年，中国已探明的 54 种主要矿产中短缺数量会增至 39 种，这将严重影响中国经济的发展。矿产资源的开采也影响到水土资源，带来很多新的环境问题。

中国能源面临的主要问题：日益严峻的全球气候变化、能源安全挑战和环境破坏。

目前，世界主要国家均加速调整能源结构和转变能源开发利用模式，加快向绿色、多元、高效的可持续能源系统转型，技术也在不断变革。能源新形势主要表现在：①一次能源结构加速调整，形成多元化格局。2013 年，全球一次能源结构为石油 32.9%、煤炭 30.1%、天然气 23.7%、核电 4.4%、非水可再生能源

源 2.2%，初步形成以石油、煤炭、天然气和非化石能源为四大支柱的多元化格局。②主要发达国家能源战略调整和技术变革取得成效，并对世界能源格局和未来趋势产生深远影响。美国通过页岩气革命使其石油对外依存度下降到 45%；欧盟以低碳经济为发展方向，规模推广可再生能源技术，成为全球最大的碳排放总量控制交易体系；日本从能源安全的角度，大力推进技术革新和产业升级，实现了全球领先的能源利用率，其能源消费强度降到全球平均水平的三分之一。③以中国为首的新兴经济体在全球能源发展中的作用和地位日益突出。④能源科技成为各国抢占新一轮能源革命制高点的主要手段。全球能源技术创新加速进入高度活跃期，呈现多点突破、交叉融合、加速应用、影响深远等特点，可再生能源、非常规油气技术已大规模应用，电动汽车和储能等技术处在市场导入期，高温气冷堆等第四代核能技术有望取得重大突破，能源与信息、材料等领域深度融合催生智慧能源网络，将实现多种能源在统一平台下的高效优化运行。

中国能源也面临严峻的新形势和新挑战：一是能源结构不合理，2014 年煤炭消费比重仍高达 64.2%。二是环境承载能力接近极限，雾霾严重，中国碳排放占全球总量的 29%，位居第一，全国有监测的 190 个城市中 172 个 $\text{PM}_{2.5}$ 年均数值超标。三是能源利用方式粗放，能源效率低下，综合能源效率不足 40%。2013 年中国单位 GDP 能耗是世界平均水平的 1.8 倍，是美国的 2.3 倍、日本的 3.8 倍，甚至高于巴西、墨西哥和印度等发展中国家。四是技术创新能力不足，燃气轮机、光伏电池、电力电子等核心技术和关键装备还与国外有较大差距。五是体制机制改革亟待深化，现有的相关法律法规政策不适应新的形势，能源领域条块分割、管理粗放，科技成果转化率高。此时，中国恰逢其时地提出了能源革命战略，包括能源消费革命、供给革命、技术革命、体制革命四个方面。能源革命针对的正是中国能源的新常态。

上述这些新挑战同时给了我们技术上突破的新契机，本书的研究正是围绕中国在资源和能源面临新形势和新挑战的情况下，如何在技术、金融、政策、体制等方面进行创新来适应新常态。

本书将从多个视角分 3 部分、14 个章节对资源、化石能源和新能源的部分热点问题进行研究。第 1~5 章分别对中国水资源的节约潜力、铁矿石物质流向、铁矿石定价机制和波动特征、跨国矿企和矿产金融等涉及资源的问题进行研究。第 6~9 章分别对中国煤炭开发利用和消费模式、煤炭清洁高效利用技术、中国成品油的定价政策和二氧化碳捕集利用与封存（CCUS）技术等涉及化石能源的问题进行研究。第 10~14 章分别研究了全球可再生能源总体发展情景、中国光伏产业发展情况、中国光伏产业国际智力回流问题和中国智能电网发展中的一些重要问题。

中国的资源、能源问题十分复杂，需要开展系统、深入的多学科综合研究。

为此，清华大学整合本校低碳能源实验室、热能工程系、核能与新能源技术研究院、环境学院、电机工程与应用电子技术系、公共管理学院的研究资源，于2012年与澳大利亚力拓公司联合成立了清华-力拓资源能源与可持续发展联合研究中心（以下简称中心），组织跨学科研究团队，针对全球特别是中国能源、矿产资源与可持续发展领域的若干关键课题进行了持续系统的研究。本书正是在中心的这些研究工作的基础上进行的总结，展示了中心三年来的研究成果，供同行参考和指正。

本书的初稿、修订稿和终稿得到了安丰全、杜铭华、何建坤、刘燕华、马军、欧阳明高、钱易、苏峻、魏建国、谢克昌、张坤民、张玉卓、郑方能和朱继民等特约评审专家的审阅和修正，研究和编写过程中得到了力拓公司专家的支持和帮助，推广过程中得到科学出版社的大力支持，在此一起致以衷心感谢！



姚强

目 录

资 源 篇

第 1 章 中国分省分行业虚拟水和隐含能核算及节约潜力案例研究	3
1.1 中国区域虚拟水和隐含能的研究意义	3
1.2 中国区域虚拟水和隐含能的研究现状	4
1.3 中国各省与各行业的虚拟水和隐含能核算	8
1.4 中国水和能源在国内与国际间的转移	17
1.5 重点行业的虚拟水和隐含能节约潜力分析	27
本章结论	31
参考文献	31
第 2 章 中国铁矿石发展战略的系统分析	36
2.1 中国铁矿石发展战略的研究背景	36
2.2 中国铁矿石发展战略的研究方法	37
2.3 中国铁矿石的供需现状	38
2.4 中国铁矿石的发展趋势	43
2.5 中国铁矿石发展战略的关键问题	49
本章结论	53
参考文献	54
第 3 章 铁矿石定价机制及其波动特征研究	57
3.1 铁矿石定价机制及其演变过程	57
3.2 铁矿石价格波动特征研究	62
3.3 铁矿石市场风险测算	67
本章结论	69
参考文献	70
第 4 章 跨国矿业企业的战略研究	71
4.1 跨国矿业企业的运作机制	71
4.2 跨国矿业企业的全球战略	73
本章结论	80

参考文献	83
第 5 章 矿产金融问题研究	84
5.1 金融机构与矿产资源	84
5.2 金融市场与矿产资源	93
5.3 金融工具与矿产资源	100
5.4 贸易货币与矿产资源	107
本章结论	116
参考文献	116
化石能源篇	
第 6 章 中国煤炭分配图及煤炭消费增长的驱动因素分析	123
6.1 研究背景、文献综述和内容简介	125
6.2 中国煤炭能量分配桑基图	129
6.3 中国煤炭消费增长的驱动因素分析	140
本章结论	155
参考文献	156
第 7 章 中国煤炭清洁高效利用技术发展评价	159
7.1 技术发展评价范围	159
7.2 中国燃煤高效发电技术评价	160
7.3 中国煤炭清洁转化技术评价	176
7.4 中国燃煤污染物控制技术评价	208
本章结论	226
参考文献	227
第 8 章 中国成品油定价政策研究	233
8.1 国际石油价格形成机制	233
8.2 成品油定价政策的国际比较	249
8.3 中国成品油定价政策变迁历程	259
8.4 对中国成品油定价政策的解释	268
本章结论	279
参考文献	279
第 9 章 二氧化碳捕集利用与封存技术评价	282
9.1 导言	283
9.2 二氧化碳捕集与运输技术	283
9.3 二氧化碳的封存与利用技术	289
9.4 大型 CCS 项目应用现状分析	294
9.5 CCUS 技术研究开发的相关政策法规	298

9.6 CCS 技术评价问卷调查结果评析	300
本章结论	315
参考文献	315

新能源技术篇

第 10 章 全球可再生能源发展展望研究	321
10.1 本章概述	321
10.2 研究背景及现状	322
10.3 全球可再生能源发展现状及目标	326
10.4 全球可再生能源分析模型	333
10.5 全球可再生能源发展展望	338
本章结论	345
参考文献	346
第 11 章 中国光伏产业发展现状及展望	348
11.1 中外光伏产业发展概述	348
11.2 全球光伏电站发展现状	349
11.3 中国光伏产业发展现状	357
11.4 中国光伏与光热发电发展展望	366
本章结论	368
参考文献	369
第 12 章 中国光伏产业的国际智力回流问题研究	370
12.1 中国光伏产业发展概况	370
12.2 假设提出与数据来源	373
12.3 国际智力回流与技术创新	375
本章结论	387
参考文献	388
第 13 章 中国智能电网发展现状及分布式电源并网的若干问题研究	390
13.1 智能电网的内涵及关键技术	390
13.2 中国智能电网发展现状	392
13.3 电力系统储能	398
13.4 分布式电源并网对现有配电网的影响分析	418
本章结论	430
参考文献	430
第 14 章 中国电动汽车发展现状及展望	432
14.1 中国电动汽车发展现状概述	432
14.2 新能源汽车和电动汽车的分类	433

14.3	中国电动汽车发展历程及现状.....	435
14.4	中国电动汽车发展展望.....	437
14.5	动力电池产业发展现状.....	440
14.6	动力电池产业发展展望.....	448
	本章结论.....	449
	参考文献.....	450
	词汇表.....	451

资源篇

