

中国能源与水耦合关系研究

Research on Energy-Water Nexus in China

樊静丽 张九天 张贤 等著

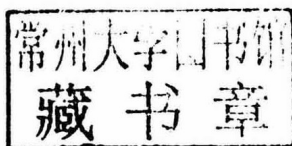


科学出版社

中国能源与水耦合关系研究

Research on Energy-Water Nexus in China

樊静丽 张九天 张 贤 等著



科学出版社

北京

内 容 简 介

水是人类生存的根本，能源是社会进步的动力，两者之间存在着相互依赖的关系。本书围绕中国能源与水耦合关系的若干关键问题，采用能源经济学、计量经济学、运筹学、管理科学和系统科学等多学科模型和方法，深入讨论并实证研究了中国能源与水的生产消费特征和耦合关系、中国能源与水耦合关键部门、能源与水资源政策的协同效应、消费视角下中国能源-水-食物耦合的影响、中国能源与水耦合的研究需求调研等问题，得出了一系列重要的基本结论。

本书适合能源经济与管理、气候政策、可持续发展领域的专业人员阅读，也可供从事经济管理工作的政府公务人员、企业管理人员及相关专业的高等院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

中国能源与水耦合关系研究 = Research on Energy-Water Nexus in China / 樊静丽等著. —北京：科学出版社，2019.3

ISBN 978-7-03-060826-0

I. ①中… II. ①樊… III. ①能源经济—研究—中国 IV. ①F426.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第047278号

责任编辑：刘翠娜 崔元春 / 责任校对：杜子昂

责任印制：吴兆东 / 封面设计：蓝正设计

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>

北京虎彩文化传播有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019年3月第一版 开本：720×1000 1/16

2019年3月第一次印刷 印张：15

字数：300 000

定价：98.00元

(如有印装质量问题，我社负责调换)

前 言

能源和水资源是支撑当今社会经济发展的重要支柱，能源生产的各个环节均需要消耗水资源，水资源的开发也需要能源的供给，两者相互依赖构成了能源与水耦合关系的基础。2015年9月，联合国可持续发展峰会正式通过了17个可持续发展目标，其中清洁饮水和卫生设施(目标6)及经济适用的清洁能源(目标7)是可持续发展目标的重要内容，能源与水耦合关系研究对于如何实现可持续发展目标具有重要意义。

作为全球第一大发展中国家，中国的能源生产量和消费量均居世界首位，但是人均能源消费量不足，约为经济合作与发展组织国家人均能源消费量的52%(2016年)。因此，随着中国经济社会的不断发展，未来能源消费还将持续增长，从而拉动能源生产的进一步增加。能源开采、加工转换和利用过程需要大量水资源(如冷却环节等)，能源生产造成了中国水资源需求不断增加，对水体质量也产生了潜在影响。然而，中国的水资源短缺问题十分严峻，2017年中国人均水资源量仅为2074.5立方米，约为全球水平的28%，被联合国列入全球13个贫水国家之一。另外，中国水资源还存在着过度开采、污染严重等问题，在开发、利用、处理等方面也需要能源的支撑。在这种背景下，中国政府明确提出了能源及温室气体排放控制目标，以及水资源开发利用的“三条红线”目标。

中国能源与水资源之间关系复杂且密切，这两种资源日益成为支撑未来发展的战略性基础资源，但是经济社会发展与能源安全、水资源承载力相适应的问题仍较突出，如何认识和统筹协调经济、社会、能源、水 and 环境等问题，是我国未来能源与水资源政策制定面临的重大挑战。本书针对中国能源与水资源耦合领域的若干问题开展研究，并提出了具有针对性的政策建议，希望能为中国能源与水资源可持续发展领域的研究和政策制定提供部分参考。本书共分为8章，所关注的主要研究领域与问题如下所述。

1) 能源与水关系概述

近年来，随着气候变化等问题的出现，能源和水两种资源之间的关联与耦合问题逐渐引起了人们更多的关注。中国能源与水资源现状和趋势如何？能源行业对水资源影响如何？中国能源转型和结构持续优化能否促进能源与水资源耦合关系的发展？水资源对能源的依赖程度怎样？水资源短缺是否会限制能源产业的持续发展？本书先分析中国能源与水耦合关系的这些基本问题，同时这些基本问题也是政策制定者实现能源与水资源协同发展需要了解的基本信息。

2) 能源与水耦合的国内外研究进展

随着对能源与水耦合关系认识的深入,越来越多的研究人员意识到能源与水耦合关系对实现能源和水资源的协调发展具有重要意义。国内外学者对能源与水耦合问题做了系统而深入的研究。能源与水耦合领域发展趋势及特征如何?能源与水耦合领域有哪些研究热点?生产端和消费端的能源与水耦合研究关注点分别包括哪些?围绕这些问题,本书全面分析了能源与水耦合领域的国内外研究进展,为后续研究奠定了基础。

3) 中国能源与水的生产消费特征和耦合关系

伴随着中国经济的快速发展,中国能源生产和消费也进入了快速增长阶段,中国已经成为全球第一大能源消费国。中国水资源总量十分丰富,但是却呈现出人均占有量低、区域分布不均衡等特征。为了更为深入地探究能源与水的生产消费特征,中国能源总量及各能源品种的生产和消费是否呈现迅速增长的态势?中国能源结构如何转变?中国能源流动是怎样一种流向关系?中国水资源供应及利用的现状?中国水资源的流动及水足迹发展?最终消费对于中国水足迹的影响?中国能源与水耦合关系的流动与发展现状?以及中国能源生产和水资源利用是否存在一定的协整性与关联性?围绕这些问题,本书开展了一系列的实证分析,进一步剖析了中国能源与水的复杂关系。

4) 中国能源与水耦合关键部门研究

节能与节水措施的有效实施对于中国当前及未来的资源可持续发展具有重要意义。各产业部门作为能源和水资源最主要的消费者,是实施节能与节水措施的重点对象,对于各部门能源与水耦合关系的研究是十分必要的。经济产出的变化是否会对各部门的水足迹与碳足迹产生影响,以及影响程度的差异有多大?哪些是中国直接能源消费与直接取水用水的关键部门?哪些是中国间接能源消费与间接取水用水的关键部门?不同收入居民消费拉动的能源和水资源异同?不同收入居民对于各部门消费如何实现节能和节水的协同效益?围绕上述问题,本书进行了全面系统的实证研究,并提出了针对中国各产业部门能源与水资源协同发展的政策建议。

5) 能源与水资源政策的协同效应模拟研究

对于能源与水资源部门来说,一个部门的发展政策很可能会对另一个部门产生重大影响。要实现两种资源的协同管理与协调规划,避免不同部门之间制定决策时可能存在冲突而导致不良后果,对保障未来能源与水资源的供给安全具有重要意义。这就需要对两种政策之间存在的协同效益与权衡效应进行系统全面的分析。也就是说,能源政策实施在推动节能减排的同时,对水资源利用有什么影响?水资源政策的实施在促进节水的同时对我国节能减排是否会产生影响?能源政策与水资源政策之间是否存在契合点以实现两种政策的协同效益?针对这些

问题, 本书建立了中国能源与水耦合关系的可计算一般均衡模型, 探究政策实施对能源与水耦合关系带来的溢出效应, 以期为我国能源与水资源相关政策的制定提供参考。

6) 消费视角下中国能源-水-食物的耦合影响研究

同能源、水资源一样, 粮食也是人类生存和经济社会发展的重要的基础性资源。随着全球资源与环境问题的日益突出, 能源-水-食物耦合关系的概念应运而生, 用以刻画粮食、能源和水之间的密切联系和相互制约关系, 寻找共赢的解决方案, 实现能源、水和粮食的可持续发展。那么, 在我国能源-水-食物耦合关系领域的研究进展如何? 从消费的角度来看, 我国居民的食物消费结构变化将如何影响相关水足迹与碳足迹的变化? 考虑到气候变化的影响, 不同应对气候变化发展路径下居民食物消费对能源-水-食物耦合关系有何影响? 围绕这些问题, 本书在文献综述的基础上, 建立了一系列数学模型, 进行了系统深入的分析。

7) 中国能源与水耦合的研究需求调研分析

当前我国对能源与水耦合关系的研究起步不久, 其内涵和相关研究需求尚未深入探讨, 特别是我国受资源禀赋及资源开发利用方式等方面的影响, 能源与水耦合关系也将呈现出独有的特征和研究需求。具体来看, 我国能源和水资源在地域上与经济中心呈现逆向分布, 能源生产绝大多数均来自西北部水资源短缺地区, 能源与水资源之间的关系紧张程度如何? 传统的能源产业如采煤、煤化工、天然气、石化及与其配套的基础设施建设均会对水环境产生一定程度的影响和破坏, 这又会对我国能源与水资源的关系产生哪些影响? 不同经济、环境因素影响下我国能源与水资源发展又有哪些亟待解决的问题? 围绕这些问题本书将通过专家调查问卷的方式, 来明确在保障我国未来能源和水资源安全, 实现能源、水资源与经济、社会、环境相互协调发展过程中的研究需求, 为我国能源与水资源政策的协同管理提供科学依据。

8) 中国能源与水耦合关系展望和建议

在多种因素影响下, 我国能源与水耦合关系的未来发展趋势充满不确定性。从内部经济建设来看, 我国正处于全面建设小康社会的关键时期, 经济保持中高速增长, 产业结构迈向中高端水平, 人口城镇化率加快提高; 从外部全球环境治理来看, 应对气候变化已形成全球共识, 节能减排步入关键阶段。考虑到城镇化和工业化进程、全球气候变化、能源与水资源政策协同等一系列社会、经济、环境、政策等因素的影响, 未来我国的能源与水耦合关系将面临哪些挑战? 呈现出哪些机遇及如何应对挑战并抓住机遇? 通过整理、归纳和总结, 本书对这些问题进行了详细的阐述和分析。

本书由樊静丽、张九天、张贤负责总体设计、策划、组织和统稿, 孔令斯、胡佳威、王建达、陈坤宇、张豪、曾宾等参与并完成相关章节的内容。魏世杰、曹哲、

孙琦等参与了本书部分章节的讨论及校对工作。本书在研究和撰写过程中,得到了中国科协青年人才托举工程(No. 2016QNRC001)、国家自然科学基金(No.71874193, No.71503249)、亚太全球变化研究网络(APN)资助项目(CBA2018-02MY-Fan)、美国能源基金会“中国可持续能源项目”(G-1601-24219)、煤炭资源与安全开采国家重点实验室重点开放课题(SKLCRSM16KFC05)等的资助。先后得到了彭苏萍院士、武强院士,以及姜耀东、黄晶、谢极、汪航、于福江、孙洪、魏一鸣、王家臣、刘峰、周宏伟、吴刚、丁丁、Peter Morling、陈小欧、仲平、钟丽锦、尹乐、刘世俊、刘强、杨光、杨瑞广、何霄嘉、宋翔洲、陈幸荣、许吟隆、王兆华、李小春、侯运炳、赵毅鑫、唐葆君、陈彬、刘兰翠、廖华、梁巧梅、张跃军、刘炳胜、於世为、李全生、聂立功等专家和领导的鼓励、指导、支持和无私帮助。在围绕能源与水问题开展的研讨和调研中,李小春、聂立功、钟丽锦、杨瑞广、於世为、韩国义、陈贵峰、熊小平、张国生、白雪、李海红、吴敬东、刘培、刘杰、李维明、赵慧明、陈怡、程蕾、刁玉杰、杨晓亮、王蕾、苏罡、曹志国、姜大霖、张苏阳等提供了宝贵的建议和无私帮助。在此向他们表示衷心的感谢和崇高的敬意!

鉴于能源与水耦合问题的复杂性,加上作者知识修养和理论水平有限,书中疏漏之处在所难免,恳请学术前辈和同行学者不吝赐教。

作者

2019年2月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 能源与水关系概述	1
1.1.1 能源需求带动水资源需求持续增长	1
1.1.2 中国能源生产与水资源赋存呈逆向分布	1
1.1.3 水资源短缺制约能源产业发展	3
1.1.4 城镇化进程加剧中国能源与水资源的紧张关系	4
1.2 从能源的角度看水的问题	4
1.2.1 能源行业中电力部门用水量巨大	4
1.2.2 能源生产结构优化的节水效益存在不确定性	6
1.2.3 能源对水质影响加剧水资源短缺危机	11
1.3 从水的角度看能源的问题	14
1.3.1 中国地下水供应总量大且能耗持续上涨	14
1.3.2 非常规水源装机规模和能耗趋向增加	14
1.3.3 抽水蓄能水电站存在能源与水协同效益	16
1.3.4 大型调水工程耗能不容忽视	17
1.3.5 中国废水排放逐年增长, 加剧能水矛盾	17
1.4 本书研究内容	18
1.5 本章小结	19
第 2 章 能源与水耦合的国内外研究进展	21
2.1 能源与水耦合的文献计量分析	21
2.1.1 国际能源与水耦合文献计量	21
2.1.2 国内能源与水耦合文献计量	27
2.1.3 国内外能源与水耦合关系研究现状对比评价	31
2.2 基于生产端的能源与水耦合研究进展	32
2.2.1 能源行业对水资源的需求	32
2.2.2 水资源部门的能源使用	34
2.2.3 能源与水资源的协同关系	37
2.3 基于消费端的能源与水耦合研究进展	38
2.3.1 消费端的水资源与能源需求管理	38
2.3.2 能源和水资源的隐含流动	40

2.4	本章小结	41
第3章	中国能源与水的生产消费特征和耦合关系	42
3.1	中国能源生产与消费特征	42
3.1.1	中国能源生产现状	42
3.1.2	中国能源消费现状	45
3.1.3	中国能源流图分析	52
3.2	中国水资源开发与利用现状	57
3.2.1	中国水资源供应概况	57
3.2.2	中国水资源利用概况	58
3.2.3	中国水流图分析	62
3.2.4	中国的水足迹变化特征研究	64
3.3	中国能源和水耦合流图分析	73
3.3.1	方法和数据来源	73
3.3.2	2016年中国能源与水耦合流图分析	74
3.4	中国能源生产与水资源利用之间的协整性与因果关系	77
3.4.1	计量经济模型与数据	77
3.4.2	结果分析与讨论	82
3.5	本章小结	87
第4章	中国能源与水耦合关键部门研究	89
4.1	经济产出变化对水足迹与碳足迹关键部门的影响	89
4.1.1	模型与数据	89
4.1.2	碳排放强度与水消耗强度相互关系	92
4.1.3	碳足迹与水足迹关键部门分类标准	94
4.1.4	碳足迹与水足迹关键部门耦合关系	95
4.2	中国能源与水耦合关键部门分析与识别	97
4.2.1	能源与水耦合关键部门投入产出模型	97
4.2.2	直接能源与水资源消费部门分析	99
4.2.3	间接能源与水资源消费部门分析	100
4.2.4	最终使用的间接能源与水使用分析	103
4.2.5	能源与水耦合关键部门	105
4.3	居民层面能源与水耦合关系关键部门研究	107
4.3.1	数据来源与处理	108
4.3.2	不同居民的收入和消费特征	108
4.3.3	不同居民的能源消耗分析	110
4.3.4	不同居民的水消耗分析	112
4.3.5	不同收入居民能源与水耦合关键部门识别	114

4.4	本章小结	118
第5章	能源与水资源政策的协同效应模拟研究	121
5.1	化石燃料补贴改革对中国能源与水的影响	121
5.1.1	中国化石燃料补贴改革政策	121
5.1.2	水-能源经济环境动态可计算一般均衡模型	122
5.1.3	化石燃料补贴改革对宏观经济的影响	125
5.1.4	化石燃料补贴改革对能源系统的影响	126
5.1.5	化石能源补贴改革对水资源系统的影响	127
5.1.6	化石能源补贴改革对非能源行业的影响	128
5.2	水资源政策对中国能源与水耦合关系的影响	130
5.2.1	中国的水资源政策	130
5.2.2	水资源与能源政策情景设置	131
5.2.3	水资源政策对工业用水的影响	131
5.2.4	水资源政策对能源系统的影响	132
5.3	中国气候政策与水资源政策的协同效益研究	133
5.3.1	中国的气候政策	133
5.3.2	气候政策与水资源政策情景设置	134
5.3.3	气候与水资源政策对社会经济的影响	134
5.3.4	气候与水资源政策对工业用水的影响	135
5.3.5	气候与水资源政策对碳排放的影响	135
5.3.6	气候与水资源政策对能源系统的影响	136
5.3.7	能源与水政策的协同与权衡分析	137
5.4	本章小结	139
第6章	消费视角下中国能源-水-食物耦合的影响研究	140
6.1	能源-水-食物耦合关系研究现状	140
6.1.1	协同决策研究	141
6.1.2	实证研究与应对策略	141
6.1.3	已有文献评述	143
6.2	居民饮食结构变化对水资源与碳排放的影响	144
6.2.1	资源环境约束下的最优饮食结构模型	144
6.2.2	中国居民的饮食结构变化	147
6.2.3	水资源约束下中国最优饮食结构	150
6.2.4	碳排放约束下中国最优饮食结构	152
6.3	居民消费结构变化对中国能源-水-食物耦合的影响研究	154
6.3.1	能源-水-食物耦合可计算一般均衡模型	154
6.3.2	中国食物消费的需求与结构的变化	155

6.3.3	共享社会经济路径下中国食物消费的水足迹与碳足迹的变化	157
6.4	本章小结	158
第7章	中国能源与水耦合的研究需求调研分析	159
7.1	调研概述	159
7.2	调研结果	159
7.2.1	水资源相关问题清单	159
7.2.2	能源相关问题清单	167
7.2.3	能源与水耦合相关问题清单	170
7.3	结果分析	193
7.3.1	能源与水耦合关系仍然没有引起广泛的重视	193
7.3.2	能源行业提出的水相关问题明显多于水部门的能源问题	194
7.3.3	煤炭行业是问题涉及最多的能源行业, 其对水环境的破坏尤为受到关注	194
7.3.4	能源与水资源的协同问题关注较少	194
7.3.5	技术层面的改进与创新是能源与水资源关系领域的关注焦点	195
7.3.6	用能用水数据统计严重缺失, 相关理论研究进展缓慢	195
7.4	本章小结	195
第8章	中国能源与水耦合关系展望和建议	197
8.1	中国能源与水耦合发展面临的挑战	197
8.1.1	城镇化快速发展, 能源和水资源安全形势更为严峻	197
8.1.2	随着工业化进程的推进, 各部门对能源与水资源的竞争加剧	197
8.1.3	全球气候变化背景下, 能源与水关系将更具复杂性	198
8.1.4	我国在制定能源和水资源规划时缺乏协调与统一	199
8.1.5	受能源、水资源供需影响, 粮食生产面临更大挑战	199
8.2	中国能源与水耦合关系展望	199
8.2.1	能源与水资源需求增速逐渐回落, 但回落区间存在不确定性	199
8.2.2	能源生产重心西移, 水资源对能源发展的影响逐步显现	200
8.2.3	相关研究方兴未艾, 多学科交叉性进一步加强	200
8.2.4	政策制定趋于统筹协调	201
8.3	中国能源与水耦合关系相关建议	202
8.3.1	加强管理与技术创新, 提高能源行业水资源的利用效率	202
8.3.2	推动能源与水资源决策的协调性与统一性	202
8.3.3	重视能源产业发展的水资源保障问题, 明确水资源在国家能源重大决策中的战略地位	203
8.3.4	注重资源开发利用过程中的环境问题, 将碳排放核算纳入水资源规划	203
8.3.5	加强能源行业用水统计核算能力建设	204
8.3.6	积极引导健康绿色饮食结构	204

参考文献	205
附录 1: 发电技术的用水比较	219
附录 2: 国际文献计量检索式	222
附录 3: 国内文献计量检索式	223
附录 4: 投入产出表合并及部门名称	224
附录 5: 调查问卷	225

第1章 绪 论

1.1 能源与水关系概述

水资源和能源是支撑经济社会发展的重要支柱，能源生产的各个环节都需要消耗水资源，水资源的开发利用也需要能源供给，二者的这种相互依赖关系构成了能源与水重要关系的基础。

1.1.1 能源需求带动水资源需求持续增长

能源的生产和转换环节往往伴随着大量的水资源消耗。2014年全球能源生产的取水量达到3980亿立方米，约占世界总取水量的10%(IEA, 2016a)。随着人口增长和经济持续发展，全球能源需求仍将持续增长，根据BP(2015)的预测，到2035年，世界能源消费总量将比2015年增长37%，这将持续增加能源行业的水资源需求。另外，水资源开发利用的每个环节(水的提取与净化、运输和分配、废水处理等)也离不开能源的投入。2014年全球水资源部门相关的总能源消费量约1.2亿吨油当量，几乎相当于整个澳大利亚的能源需求。其中，大约60%的能源通过电力(electricity)供给，约为8200千瓦·时，占全球电力消费总量的4%。据IEA(2016a)估计未来全球水资源部门的能耗也将持续增长，预计到2040年全球水资源部门的能耗将比2014年翻一番。

作为全球第一大发展中国家，中国的城市化、工业化进程推动了能源需求的快速增加，2016年中国能源消费量在全球能源消费总量中的比重达到了23.2%(BP, 2018)。在能源需求快速增长的拉动下，中国能源生产量已从1990年的10.39亿吨标准煤^①增加至2016年的34.6亿吨标准煤(国家统计局, 2018a)。各类能源的生产都离不开水资源的使用，随着中国能源生产和消费的不断增长，水资源的需求也在逐渐增加。据IEA(2016a)估计，在新政策情景^②下，2014~2040年中国能源相关取水量年均增长0.8%，耗水量年均增长1.3%。

1.1.2 中国能源生产与水资源赋存呈逆向分布

中国幅员辽阔，各地区能源和水资源禀赋差异巨大。整体上看，中国能源与

① 除非特别说明，本书对于能源生产和消费总量均采用发电煤耗法。

② 新政策情景：广泛参考各国已经宣布的政策承诺(温室气体排放量增长2%以内和改革化石燃料补贴)，综合考虑预期即将发布的气候政策及所带来的影响的情景。

水资源赋存情况呈现逆向分布(图 1-1)。从中国能源分布特征来看,中国能源资源特别是化石能源(煤炭、石油、天然气)储量丰富,但分布极不均衡,总体呈现“西北多、东南少”的分布格局,主要集中在山西、内蒙古、陕西、新疆等地,其中山西、陕西和内蒙古能源生产量达到 15.57 亿吨标准煤,占全国总生产量的 47.8% (国家统计局, 2018b)。但从水资源分布特征来看,其呈现“南方多、北方少”的特点,可见能源产量高的地区往往是缺水地区,如山西、陕西和内蒙古等资源大省,其水资源总量仅占全国水资源总量的 2.5%。这些地区化石能源生产用水需求大,无疑会加剧当地水资源紧张的态势。

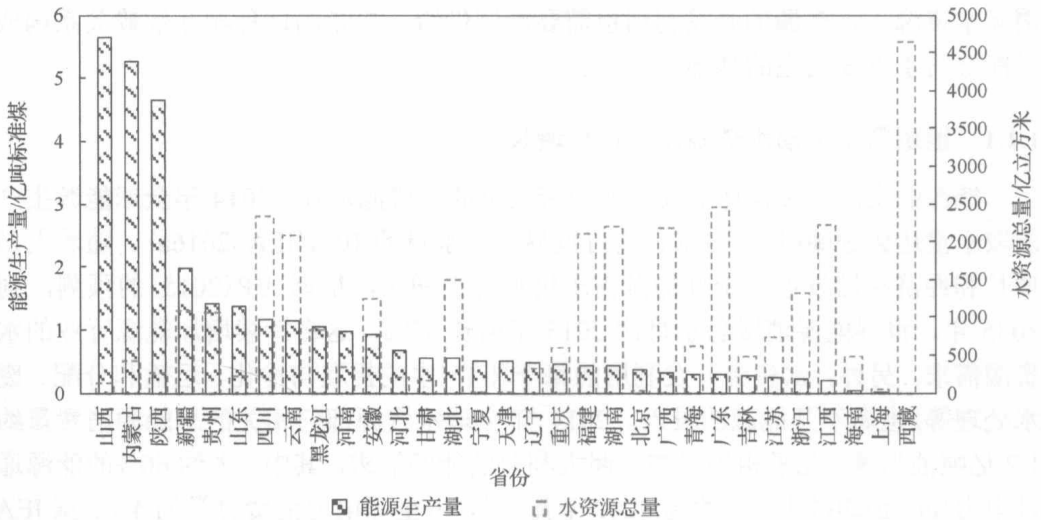


图 1-1 2016 年各省份能源生产量和水资源总量分布

资料来源: 国家统计局 (2018a, 2018b)

缺少港澳台数据

具体来看,煤炭、石油和天然气产量与水资源量分布均存在明显差异。中国煤炭储量的分布极不均衡,使得煤炭生产主要集中在山西、内蒙古、安徽、山东、河南、贵州、陕西、宁夏、新疆等少部分省份,且随着煤炭产业的集中布局,中国煤炭生产将更加集中于这些省份。按缺水等级划分 (Malin and Carr, 1999), 这些省份中陕西、山西、山东、宁夏、河南都属于极度缺水地区(图 1-2),安徽属于中度缺水地区,内蒙古、贵州和新疆属于轻度缺水地区。水资源短缺将给当地煤炭开采和洗选业带来巨大的制约作用。与煤炭相似,石油受资源储量分布影响,产地主要分布在少数地区,以新疆、黑龙江、天津、山东、陕西最为集中,石油开采用水需求也相对集中于这些地区,而这些地区水资源都相对缺乏。对于天然气而言,与煤炭、石油产量分布相似,天然气主要集中在新疆、陕西、四川等省份,这三个省份天然气产量占全国总产量的 73.78%。其中,产量相对集中的新疆、陕西均属于缺水地区(图 1-2)。

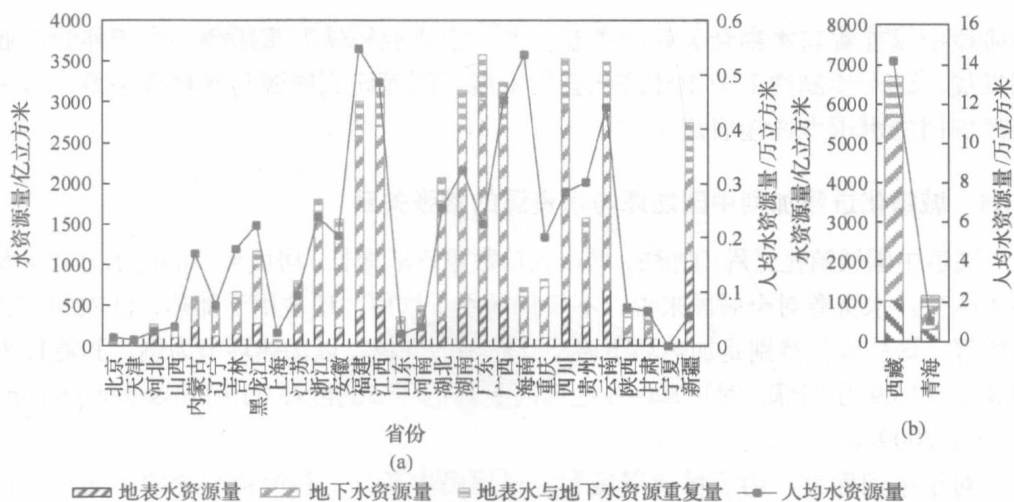


图 1-2 2016 年各省份水资源量及人均水资源量

资料来源：国家统计局(2018a)

缺少港澳台数据

1.1.3 水资源短缺制约能源产业发展

世界经济论坛发布的《2015 年全球风险评估报告》指出水危机将是未来 10 年全球人类需要应对的最为严峻的挑战之一(WEF, 2015)。中国的水资源短缺问题则更为严峻, 2017 年中国人均水资源量仅为 2074.5 立方米, 约为全球平均水平的 28%, 位列世界第 121 位, 被联合国列入全球 13 个贫水国家之一(国家发展和改革委员会, 2017)。全国每年缺水 500 多亿立方米, 600 多座城市中约三分之二的城市存在不同程度的缺水问题, 其中 110 座城市严重缺水(国家发展和改革委员会, 2017)。

除了水资源短缺问题, 水资源还存在过度开发、粗放利用、水污染严重 3 个方面的突出问题, 对此, 中国政府明确提出水资源开发利用控制、用水效率控制和水功能区限制纳污“三条红线”的主要目标, 推动经济社会发展与水资源水环境承载能力相适应, 这样就对能源产业产生了约束作用。首先, 中国是能源生产大国, 2016 年能源生产量为 34.60 亿吨(国家统计局, 2018a), 因此能源生产相关用水量基数庞大。其次, 中国的能源和水资源在地域上呈现逆向分布, 能源生产基地集中分布于中国北方地区, 而北方地区恰恰是中国水资源较为贫乏的地区。最后, 受开采条件和生产技术的限制, 中国能源生产还伴随着大量的废水污水排放, 2015 年仅煤炭开采与洗选、石油加工与炼焦、电力热力生产和供应 3 个行业的废水排放就占到全国废水排放总量的 13%(国家统计局, 2017a)。大量的废水污水排放对当地水环境造成了严重的污染和破坏, 使本已严峻的水资源短缺问题雪上加霜。在这样的情况下, 水资源政策势必会限制能源产业的发展。

综上所述, 中国水资源的严重短缺同能源需求与生产持续增长之间的矛盾是

现阶段中国能源与水耦合关系的主要方面。水资源短缺严重阻碍了中国能源产业的发展,进一步制约了中国经济社会的发展,因而研究能源与水耦合关系,缓解能源部门的水压力迫在眉睫。

1.1.4 城镇化进程加剧中国能源与水资源的紧张关系

随着中国城镇化进程的加快,城市人口数量逐渐增长,居民部门的用水方式也发生了改变。水资源对于居民来说,不仅仅只用于饮用,还被用于加热、洗衣和冲洗厕所等,这些过程特别是加热环节离不开能源的支撑。以加热环节为例,其能耗为14.8万~15.9万(千瓦·时)/加仑^①,远远高于其他环节的能耗(Griffithsattenspiel and Wilson, 2009)。

对于中国而言,由于城镇居民和农村居民生活方式和消费观念的不同,两者水资源使用情况存在明显差异,城镇居民人均用水量明显高于农村居民。2014年,中国城镇居民人均生活用水量(含公共用水)为213升/天,是农村居民人均生活用水量(81升/天)的2.63倍(国家统计局,2018a)。这意味着在农村人口向城镇转移过程中,居民用水将呈现巨大的增长趋势,这无疑会带动居民用水能源需求的快速增长。此外,居民生活用水过程中的大量生活废水处理也会造成额外的能源消耗。近些年来中国生活废水排放总量呈现逐年增长的趋势,2015年生活废水排放量已高达535.2亿吨,在全国废水排放总量中所占比重由2000年的53.20%增加到了2015年的72.7%(国家统计局,2017a)。对于生活废水的处理无疑也将增加各地区水资源部门的能源需求。因此,未来城镇化进程的快速发展会在一定程度上加剧中国能源与水资源的紧张关系。

1.2 从能源的角度看水的问题

能源部门对水资源的需求和影响主要发生在煤、石油、天然气等化石能源及核能、风能、太阳能和生物质能(bivenergy)等非化石能源的生产和加工转换过程中。

1.2.1 能源行业中电力部门用水量巨大

中国是一个农业大国,因而农业用水量基数远高于其他部门,一直处于主导地位,但随着中国经济和社会的发展,农业用水量占全国用水总量的比重正在逐渐下降,已由2000年的68.82%下降到2016年的62.38%(国家统计局,2018a)。与此同时,工业部门的用水量占全国用水总量的比重却由2000年的20%上升到2016年的34.7%(国家统计局,2018a),且在工业部门中,电力、热力生产和供应

^① 1加仑(UK)=4.54609升;1加仑(US)=3.78543升。

业的用水情况十分突出。从 2012 年中国工业部门的取水量和耗水量^①情况来看, 电力、热力生产和供应业取水量占工业部门取水总量的 50.49%(图 1-3), 耗水量占工业部门耗水总量的 14.58%(图 1-4), 尽管耗水量低于非金属及金属产品制造业等重点部门, 但仍占较大比重。

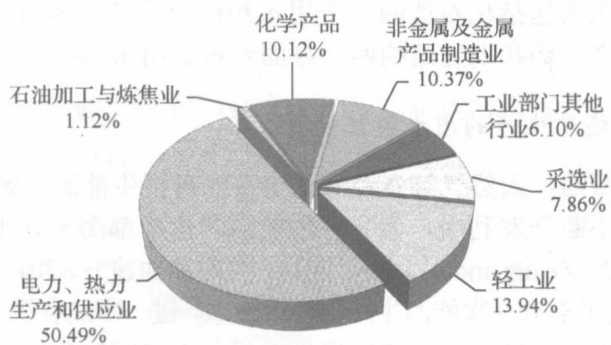


图 1-3 2012 年中国工业部门取水情况

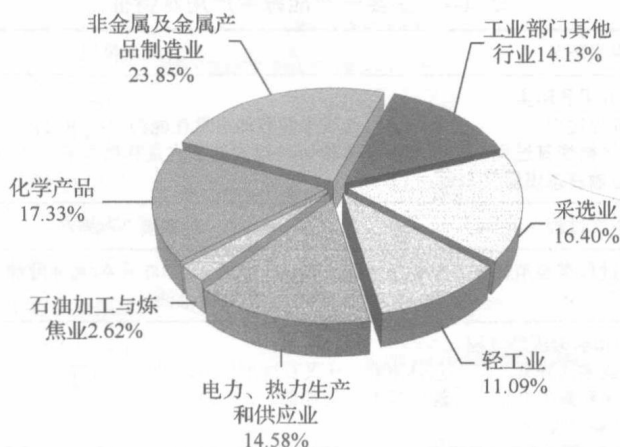


图 1-4 2012 年中国工业部门耗水情况

在电力、热力生产和供应业部门中, 电力耗水最明显。电力部门作为支撑其他行业发展的基础, 在经济社会发展中起着关键性的作用。2000 年以来, 中国电力需求量逐步增加, 全社会用电量从 2000 年的 1.36 万亿千瓦·时增长到了 2016 年的 6.13 万亿千瓦·时, 年均增速为 9.9%(国家统计局, 2018a)。随着电力需求的增加, 电力供给及其电力生产过程中的用水需求也会相应增加, 在国内水资源供应短缺的情况下, 电力生产与水资源之间的矛盾逐渐突出。未来一段时间内, 电力生产的取水和耗水问题仍值得我们关注。

^① 取水量是指从源头上取出的水的量; 耗水量是指最终不返回到源头的水的量, 消耗的方式包括蒸发或运输到其他位置等。