



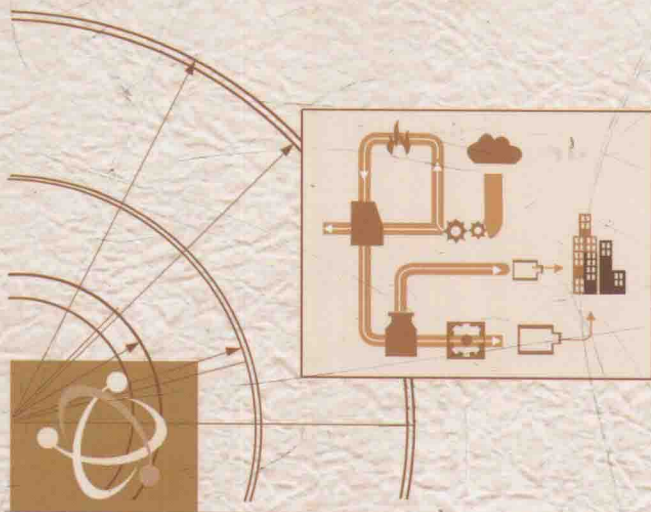
清华大学能源环境经济研究所  
INSTITUTE of ENERGY, ENVIRONMENT and ECONOMY  
TSINGHUA UNIVERSITY

# 中国分布式能源系统综合效益 分析方法及案例研究

METHODOLOGY DEVELOPMENT AND APPLICATION OF  
COMPREHENSIVE BENEFIT EVALUATION OF  
DISTRIBUTED ENERGY SYSTEM PROJECT IN CHINA

欧训民 刘汉思 袁杰辉◎著

OUXUNMIN LIUHANSI YUANJIEHUI



经济管理出版社  
ECONOMY & MANAGEMENT PUBLISHING HOUSE



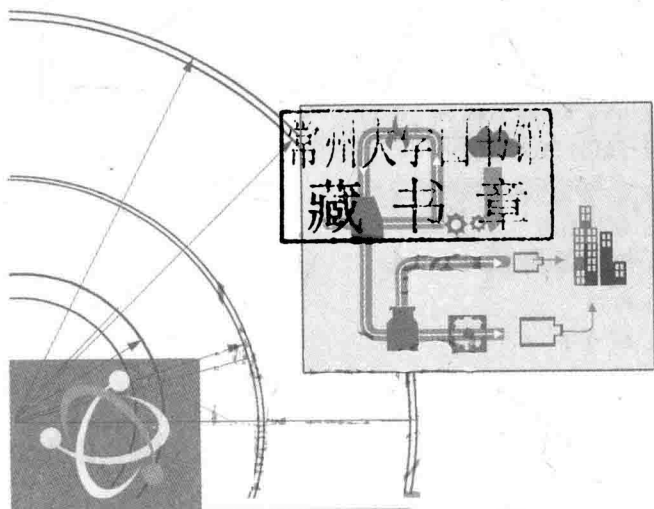
清华大学能源环境经济研究所  
INSTITUTE of ENERGY, ENVIRONMENT and ECONOMY  
TSINGHUA UNIVERSITY

# 中国分布式能源系统综合效益 分析方法及案例研究

METHODOLOGY DEVELOPMENT AND APPLICATION OF  
COMPREHENSIVE BENEFIT EVALUATION OF  
DISTRIBUTED ENERGY SYSTEM PROJECT IN CHINA

欧训民 刘汉思 袁杰辉◎著

OUXUNMIN LIUHANSI YUANJIEHUI



图书在版编目 (CIP) 数据

中国分布式能源系统综合效益分析方法及案例研究/欧训民, 刘汉思, 袁杰辉著.

—北京: 经济管理出版社, 2018. 3

ISBN 978-7-5096-5679-2

I. ①中… II. ①欧… ②刘… ③袁… III. ①节能减排—研究—中国 IV. ①F259.22

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 038098 号

组稿编辑: 郭丽娟

责任编辑: 范美琴

责任印制: 司东翔

责任校对: 董杉珊

出版发行: 经济管理出版社

(北京市海淀区北蜂窝 8 号中雅大厦 A 座 11 层 100038)

网 址: [www.E-mp.com.cn](http://www.E-mp.com.cn)

电 话: (010) 51915602

印 刷: 三河市延风印装有限公司

经 销: 新华书店

开 本: 720mm×1000mm/16

印 张: 6.25

字 数: 67 千字

版 次: 2018 年 4 月第 1 版 —2018 年 4 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-5096-5679-2

定 价: 45.00 元

· 版权所有 翻印必究 ·

凡购本社图书, 如有印装错误, 由本社读者服务部负责调换。

联系地址: 北京阜外月坛北小街 2 号

电话: (010) 68022974 邮编: 100836

# 前 言

在现代化进程中，中国将长期面临保障能源安全和减缓气候变化所带来的挑战。发展分布式能源是改善中国能源结构和减少二氧化碳排放的重要举措。国际上针对分布式能源系统或者项目的能源消耗、温室气体排放和经济性等问题的研究比较丰富；国内对分布式能源系统或者项目进行全生命周期能耗和排放的研究相对较少。

过去几年，我们利用全生命周期分析方法（LCA）开发分析工具，建立起针对中国分布式能源项目的能源消耗、温室气体排放和经济性方面的综合效益分析方法，并对四川 A 市天然气冷热电联供项目和内蒙古 B 市生物质天然气项目两个分布式能源项目进行了案例研究。基于上述研究，本书提出应对我国分布式能源未来发展挑战的一些政策建议。

本书研究工作主要由欧训民指导刘汉思完成，袁杰辉参与了部分数据调研、整理和分析工作。第一、第二和第五章由欧训民、刘汉思执笔；第三、第四章由刘汉思、欧训民和袁杰辉执笔；全书由欧训民负责统稿。清华大学能源环境经济研究所的老师、同学们在本课题研究和本书写作过程中提供了多方面的指导和支持。



研究工作得到国家自然科学基金委员会、国家能源局、工信部、科技部和中国国际经济交流中心的大力支持和帮助。经济管理出版社郭丽娟编辑为本书的出版做了大量细致的工作。在此一并表示感谢。

相关研究同时得到了国家自然科学基金项目（71690244、71774095）、教育部人文社会科学重点研究基地重大项目（17JJD630005）和科技部国际科技合作计划项目（2016YFE0102200）的经费支持。

由于笔者水平所限，书中不足之处在所难免，恳请专家和读者给予批评指正。

欧训民 刘汉思 袁杰辉

2018年2月于清华园

## 摘 要

本书首先介绍分布式能源系统的概念，梳理分布式能源系统在全球及中国发展的动力、现状以及挑战，讨论分布式能源系统在项目评估和政策制定方面遇到的问题。通过文献调研发现，针对分布式能源系统的能源消耗、温室气体排放、经济性等问题已有比较丰富的研究，但是针对国内实际情况、考虑全生命周期能耗和排放的研究较少。本书重点运用全生命周期分析方法（LCA）开发分析工具，对四川 A 市天然气冷热电联供项目和内蒙古 B 市生物质天然气项目这两个分布式能源项目进行了案例研究。

通过对四川 A 市天然气冷热电联供项目进行全生命周期能耗和 GHG 排放分析发现，现有路线与两个对比情景（“煤+电”供能路线、全煤供能路线）相比，全生命周期节能率分别达到-12%和 24%左右，GHG 减排率分别达到 22%和 48%左右。如果在现有路线发电量提升 10%且余电上网情况下，替代四川电网所供电力使得 GHG 排放率达到 24%。如果替代全国平均排放水平的电网电力，则 GHG 减排率达 42%。若因地制宜地利用酒糟制沼气进行冷热电联产，与应用较广泛的“煤+电”供能路线相比，全系统实现



全生命周期节能 20%、GHG 减排 18%。可以看出，可再生分布式能源系统有着非常大的潜力和空间。

通过对内蒙古 B 市生物质天然气项目进行全生命周期能耗和 GHG 排放分析、技术经济分析和边际减排成本分析，发现与汽油、普通天然气作为交通能源的对比路线相比，现有路线的全生命周期 GHG 减排高达 95% 以上。现有路线与沼气发电技术路线比较，也可达到近 70% 的 GHG 减排效果。研究发现，该项目的 10 年期内部收益率（IRR）为 4.69%；该回报水平与融资成本相比较低，说明还需要进一步的政策支持。与汽油作为交通能源的技术路线相比，该项目的边际 GHG 排放成本为负，可以看出，在 GHG 排放和经济方面，分布式能源都占优；与普通天然气作为交通能源的技术相比，该项目的边际 GHG 减排成本是 95 元/吨二氧化碳当量左右。

在案例研究基础上，本书对不同种类的激励政策可带来的政策效果进行比较分析，并提出促进中国未来分布式能源发展的若干政策建议：①采用补贴（尤其是后端补贴）和税收减免政策以促进此类项目的收益；②实施更严格的环保政策（包括禁烧秸秆、征收废弃物处理费等政策）以降低该类项目的原料成本；③出台优惠的贷款政策以解决项目融资问题。

**关键词：**分布式能源系统；综合效益分析；全生命周期分析；案例研究

## Abstract

The book researched benefit evaluation and policy problems of distributed energy system project by examining concepts of distributed energy system and analyzing development of distributed energy system in the world and China. Literature discussed energy consumption, greenhouse gas emissions, economy and other issues about distributed energy system, but studies considering the life cycle energy consumption and emissions in China are relatively rare. This book contributed to the existing research by using the analytical method of life cycle analysis (LCA) tool to implement case studies. A natural gas CCHP system project and biogas project are analyzed in the perspective of life cycle energy consumption and greenhouse gas emissions analysis, economic analysis and marginal abatement cost.

The result shows that Sichuan natural gas CCHP system project when compared with “coal + electricity” and all coal cases, reduces life cycle energy consumption by -12% and 24% respectively, and reduces life cycle GHG emission by 22% and 48% respectively. If efficiency in-





creases by 10% and residual electricity is sold to local grid, GHG emission reduction rate can be more than 24%. If residual electricity substitutes national grid electricity, GHG emission reduction rate can be more than 42%. If wine lees are used to produce methane, the project reduces life cycle energy consumption by 20%, and reduces GHG emission by 18% compared with “coal + electricity” case.

The book uses LCA method to show that Inner Mongolia biogas project when compared with gasoline and natural gas as transportation energy cases, reduces life cycle GHG emission by more than 95%, and when compared with methane-electricity case, reduces life cycle GHG emission by nearly 70%. IRR of the project is 4.69% on a 10 years basis, which shows supportive policies are needed. The marginal abatement cost of GHG emission is 95 RMB/ton carbon dioxide equivalent compared to natural gas taxi case, and is negative compared to gasoline taxi case.

Based on the case studies, this book made policy recommendations to promote the development of distributed energy system projects: ① use subsidies on product and tax deduction to improve marginal revenue and average revenue efficiently; ② set strict environmental policies such as waste management fee to reduce the cost for collecting energy input; ③ offer beneficial loan rate for project financing.

**Key Words:** Distributed Energy System; Comprehensive Benefit; Life Cycle Analysis; Case Study

## 主要符号对照表

BNG	生物质天然气 (Bio-Natural Gas)
CGE	可计算一般均衡 (Computable General Equilibrium)
CO <sub>2,e</sub>	二氧化碳当量
COP	冷系数 (Coefficient of Performance)
DER	分布式能源资源 (Distributed Energy Resources)
DG	分布式供能 (Distributed Generation)
DP	分布式电力 (Distributed Power)
EPRI	美国电科院 (Electric Power Research Institute)
GHG	温室气体 (Greenhouse Gas)
HPR	热电比例 (Heat-Power Ratio)
IEA	国际能源署 (International Energy Agency)
IRR	内部收益率 (Internal Return Rate)
LCA	全生命周期分析方法 (Life Cycle Analysis)
NPV	净现值 (Net Present Value)
tce	吨标准煤 (ton coal equivalent)

# 目 录

第一章 引言	1
第一节 分布式能源的概念	1
第二节 世界分布式能源发展情况	4
一、发展动力	4
二、发展基础	6
三、发展情况	7
第三节 中国分布式能源发展	8
第四节 多维度评价方法总结	12
第五节 中国相关研究进展	15
第六节 本书研究内容、技术路线与结构安排	16
第二章 研究方法	19
第一节 本章概述	19
第二节 全生命周期能耗和温室气体排放分析	19
第三节 技术经济分析	20
第四节 边际减排成本	21



<b>第三章 四川 A 市天然气冷热电联供项目的综合效益分析</b> .....	23
<b>第一节 本章概述</b> .....	23
<b>第二节 项目背景</b> .....	23
<b>第三节 本章研究主要方法</b> .....	24
一、系统边界确定 .....	24
二、分析情景设计 .....	25
三、计算公式 .....	27
<b>第四节 关键数据与假设</b> .....	29
<b>第五节 本章研究结果与讨论</b> .....	32
一、全生命周期节能和 GHG 减排分析 .....	32
二、边际减排成本分析 .....	35
三、研究结果讨论 .....	36
<b>第六节 本章小结</b> .....	43
<b>第四章 内蒙古 B 市生物质天然气项目的综合效益分析</b> .....	45
<b>第一节 本章概述</b> .....	45
<b>第二节 项目背景</b> .....	46
一、秸秆气化的技术发展 .....	46
二、项目概况 .....	49
<b>第三节 本章主要研究方法</b> .....	51
一、系统边界确定 .....	51
二、计算公式 .....	52
<b>第四节 关键数据与假设</b> .....	53

第五节 经济性分析 .....	55
第六节 本章研究结果与讨论 .....	58
一、全生命周期节能、减排分析 .....	58
二、边际减排成本分析 .....	62
三、研究结果讨论 .....	63
第七节 本章小结 .....	68
第五章 研究结论与政策建议 .....	71
第一节 研究结论 .....	71
一、分布式能源具有节能、减排的优势，但需要因地制宜 ...	71
二、现阶段分布式能源经济性欠佳，需要合理的政策支持 ...	72
三、分布式能源系统边际减排成本较低，值得推广 .....	72
第二节 发展分布式能源的挑战与政策建议 .....	73
参考文献 .....	77

# 第一章 引言

本章重点介绍了分布式能源系统的概念，以及分布式能源系统在全球及中国发展的动力、现状与挑战，总结了分布式能源系统在项目评估和政策制定方面遇到的问题，并通过文献综述，发现使用全生命周期方法分析能耗、GHG 排放且结合中国实际情况、基于项目而非区域的研究较少。

本章第一节介绍分布式能源的概念，第二节介绍了世界分布式能源的发展情况，第三节介绍了中国分布式能源的发展情况，第四节对分布式能源综合效益的多维度评价方法进行文献综述，第五节介绍了中国相关研究的进展，第六节对文章内容、路线和结构进行了介绍。

## 第一节 分布式能源的概念

分布式能源系统是一个较宽泛的概念，在定义上有细微的差



别<sup>[1-3]</sup>，如表 1-1 所示。根据国际能源署（International Energy Agency, IEA）给出的定义，分布式供能（Distributed Generation, DG）是相对简单的概念，DG 与分布式电力（Distributed Power, DP）的区别在于它没有储能，与分布式能源资源（Distributed Energy Resource, DER）的区别在于没有需求侧管理，是更为简单、纯粹的分布式能源系统。为便于分析，本章重点分析分布式能源系统中 DG 的综合效益。

分布式能源系统（DG）是相较于去中心化的能源系统（Decentralized Energy System）的一种更一般化的形式，除了技术上让能源的生产、转换与终端用户靠近，经济上也意味着地区的独立自主性<sup>[3]</sup>，因此可以通过因地制宜的规划、布局、建设来满足不同地区个性化的需求，更好地服务于用户。

基于分布式能源系统使用的能源种类，可以分为多种技术（能源）类型，从使用能源的角度，可以分为天然气和可再生能源（风能、太阳能和生物质能等）；从能源系统的角度，可以分为独立能源、风光储互补和冷热电联供等。一个典型的分布式能源系统如图 1-1 所示，图 1-1 中的天然气冷热电联供系统将天然气通过发电机组和溴化锂机组等装置转化为冷、热、电三种能源服务形式，同时满足用户和业主的多种能源需求。

表 1-1 关于分布式能源系统的定义比较

名称	定义机构	具体含义
分布式电力 (Distributed Power, DP)	美国能源部  美国天然气协会	是在用户附近产生或者储存电能系统，容量在 1kW 到数 MW 之间，可独立工作也可连接到电网
分布式供电 (Distributed Generation, DG)	国际能源署 (International Energy Agency, IEA)	是小型发电设备，靠近用户或变电站，包含了多种技术(能源)类型
分布式能源资源 (Distributed Energy Resource, DER)	美国能源部  美国电科院 (Electric Power Research Institute, EPRI)	是服务当地用户或电网的发电站，一般不包含风力发电站。与 DP 的区别在于没有储能，与 DER 的区别在于没有需求侧管理  是结合用户侧和供应侧的供电技术，在需求端附近的装置且模块化，容量在数 kW 到 50MW  是产生并储存能源的小型系统，结合供应侧和用户侧的管理技术，在用户或者配电站附近，容量在 1kW 到 50MW



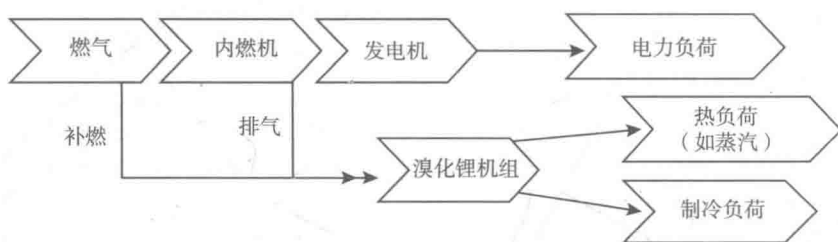


图 1-1 天然气冷热电三联供技术示意图

## 第二节 世界分布式能源发展情况

### 一、发展动力

驱动分布式能源系统发展的因素有以下几个：首先，从全球来看，能源资源依然存在稀缺性，而各国能源消费的压力依旧较大。如图 1-2 所示，主要国家石油的消费量稳定增长。

其次，能源生产与能源消费之间存在地域不平衡。宏观层面上，这可能会造成一些国家的能源安全问题，或者说能源的局部过度稀缺带来的政治经济隐患。而微观层面上，地区之间的关系也可能因此出现矛盾。较为丰富的可再生能源若能得到充分的利用，可以解决能源生产与能源消费之间地域不平衡的问题。

再次，分布式能源系统有着更好的供能稳定性。能源供给的稳定与供能的方式有关，相较于依赖二次能源的集中供能方式，多个