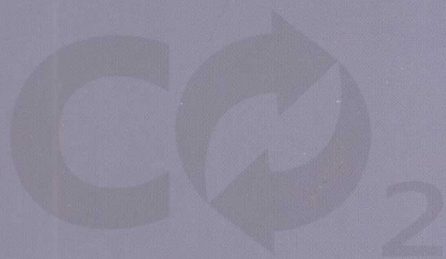


中国二氧化碳注入提高 煤层气采收率先导性试验技术

Recommended Practices for CO₂—
Enhanced Coal Bed Methane Pilot Tests in China



中联煤层气有限责任公司 编著
Alberta Research Council 等

地质出版社

中国二氧化碳注入提高煤层气 采收率先导性试验技术

Recommended Practices for CO₂ —Enhanced
Coal Bed Methane Pilot Tests in China

中联煤层气有限责任公司 编著
Alberta Research Council 等

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

内 容 简 介

本书在介绍美国、加拿大、波兰和日本等国家实施煤层注入二氧化碳提高煤层气采收率技术(CO₂-ECBM)试验结果的基础上,重点以中国山西省沁水盆地南部实施的CO₂-ECBM微型先导性试验为实例,详细介绍和提供了在中国开展CO₂-ECBM技术试验所遵循的程序和过程。本书主要内容包括:技术试验的选区评价、微型先导性试验工程、储层模拟、地面设施设计及商业化途径、多井先导性试验的实施及分析等。

本书适用于从事煤层气开发和二氧化碳注入/埋藏技术研究及其相关工作的技术人员使用。

图书在版编目(CIP)数据

中国二氧化碳注入提高煤层气采收率先导性试验技术:
汉英对照/中联煤层气有限责任公司等编著. —北京:地
质出版社, 2008. 9

ISBN 978-7-116-05833-0

I. 中… II. 中… III. 二氧化碳-应用-煤层-地下气
化煤气-地下开采-中国-汉、英 IV. TD823. 7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 140022 号

责任编辑: 郑长胜 王春庆

责任校对: 郑淑艳

出版发行: 地质出版社

社址邮编: 北京海淀区学院路 31 号, 100083

电 话: (010) 82324508 (邮购部); (010) 82324575 (编辑部)

网 址: <http://www.gph.com.cn>

电子邮箱: zbs@gph.com.cn

传 真: (010) 82310759

印 刷: 北京地大彩印厂

开 本: 787 mm × 1092 mm ¹/₁₆

印 张: 18.25

字 数: 450 千字

印 数: 1—1200 册

版 次: 2008 年 9 月北京第 1 版·第 1 次印刷

定 价: 128.00 元

书 号: ISBN 978-7-116-05833-0

(如对本书有建议或意见, 敬请致电本社; 如本书有印装问题, 本社负责调换)



百达门资源有限公司 (Petromin Resources Ltd.)

与



环能国际控股有限公司

(Enviro Energy International Holdings Limited)

赞助出版

中加合作“中国煤层气技术开发/二氧化碳埋藏”项目研究成果

《中国二氧化碳注入提高煤层气采收率先导性试验技术》

编辑委员会

主 任：孙茂远

副主任：冯三利 Bill Gunter 林建浩

委 员：(以字母顺序或姓氏笔画排列)

Peter Ho	Rudy Cech	Sam Wong	丁健春	王国强
王明寿	叶建平	刘贻军	孙晗森	吴建光
杜 明	范志强	范 华	胡爱梅	胡乃人
郭本广	彭小妹			

主 编：范志强 Sam Wong 叶建平

编写人员：(以字母顺序或姓氏笔画排列)

Doug Macdonald	Peter Ho	Rudy Cech	Sam Wong
Sorin Andrei	Deng Xiaohui	王国强	王明寿
叶建平	孙晗森	范志强	

致 谢

编著者感谢加拿大国际发展署 (CIDA) 和中华人民共和国商务部 (MOF-COM) 对“中国煤层气技术开发/二氧化碳埋藏”双边项目的支持和经济援助。同样感谢加拿大联合体成员公司 [Alberta Research Council Inc (ARC), Sproule International (Sproule), Computer Modelling Group (CMG), SNC Lavalin Inc. (SNC), Computalog, CalFrac Well Services (CalFrac), Porteous Engineering (Porteous)] 的工作人员, 由于人员太多, 这里不能一一列出。他们中大多数尽管没有列为本书的编著者, 但对本项目的成功和本书依据的报告做出了重要的实际的贡献。另外, 中联煤层气有限责任公司为本项目提供了试验场地, 委派了优秀的技术人员和工程师, 提供了配套工程和资金, 与加拿大技术人员一起工作, 成功实施了本项目技术的先导性试验; 加拿大百达门资源有限公司和环能国际控股有限公司为本书的出版提供了资金, 在此一并表示感谢。

声 明

本书是在 ARC 指导下完成的“中国煤层气技术开发/二氧化碳埋藏”项目的研究总结报告。在研究过程中，报告力争满足可接受的科学和工程准则。然而，中联公司和 ARC 及其雇员对本书中涉及的不侵犯私有权利的信息、仪器、产品或披露过程的准确性、完整性、有效性均不做任何担保，不管是明示还是暗示，均不承担任何法律责任和义务。

本书参考的任何特定的商业产品、过程或商业名义的服务、商标、制造商等并非构成或暗示得到中联公司和 ARC 的确认、推荐或支持。编著者在本书中表达的意见和主张并非代表或者反映中联公司和 ARC 的意见和主张。

前 言

基于在加拿大、日本和中国的实践和经验,本书旨在提供在中国如何一步一步地完成二氧化碳注入提高煤层气采收率(CO_2 -ECBM)先导性试验的程序。本书利用在中国山西省沁水盆地南部完成的微型先导性试验作为一个实例,尽可能详尽地说明整个过程。本书所依据的实例是由中华人民共和国商务部(MOFCOM)和加拿大国际发展署(CIDA)分别代表中加两国政府签署的、通过加拿大气候变化发展基金(Canadian Climate Change Development Fund)提供资金支持的、由中联煤层气有限责任公司(以下简称中联公司,CUCBM)和加拿大联合体具体实施的“中国煤层气技术开发/二氧化碳埋藏”项目的合作研究成果。本书所提供的试验过程和程序是一个动态的文件,随着更多的微型先导性试验的完成和新的成果的取得(更多新知识的出现),本书必然将进行修订和更新。

开发利用中国丰富的煤层气资源,不仅可以增加中国的清洁能源,而且可以同时改善中国的能源结构,减少 CO_2 的排放,但是,如何完善煤层气的开发利用技术目前仍是一个挑战。为了开发和完善提高煤层气采收率(ECBM)技术,并使之商业化推广,需要建立一整套技术和工艺体系。为满足ECBM技术开发的需要,加拿大组建了ECBM技术联合体,专门在中国和世界其他国家承担这样的技术开发项目。加拿大联合体由7个加拿大公司组成,每个公司都拥有承担国际性的煤层气开发项目所必需的技术和技能。加拿大阿尔伯达研究院(Alberta Research Council, ARC)被推举为加拿大联合体的领导单位。中联公司和7个加拿大公司的专业特长如下:

(1) 中联公司是中国国内唯一专门从事煤层气勘探、开发、生产、销售的专业公司,在国家计划中单列,拥有煤层气对外合作的专营权,总部设在北京市。

- 拥有众多的煤层气勘探开发区块和项目
- 煤层气勘探、开发技术
- 煤层气生产和销售
- 项目管理

(2) 阿尔伯达研究院(ARC)是加拿大最大的省级研究机构,总部设在阿尔伯达省的埃德蒙顿市。

- 加拿大ECBM技术的创立者
- 技术开发和商业化
- 项目管理、储层模拟、经济/环境评价

(3) Cal Frac井筒技术服务公司是一个私有油田服务公司,总部设在阿尔伯达省卡尔加里市。

- 连续油管技术、油气井增产技术、完井技术

(4) Computalog有限公司是一个私有油田服务公司,总部设在阿尔伯达省卡尔加里市。

- 测井技术、定向和水平井钻井

(5) 计算机模拟集团有限公司 (CMG) 是一个私有能源软件公司, 总部设在阿尔伯达省卡尔加里市。

- 储层建模和数值模拟

(6) Porteous 工程有限公司 (PEL) 是一个工程和管理服务公司, 总部设在阿尔伯达省卡尔加里市。

- 培训评价和协调

(7) SNC Lavalin 公司 (SLI) 是一个基于加拿大的专门从事工程、采办和建筑全方位服务的私有公司。

- 地面设施设计、环境评价和经济评价

(8) Sproule 国际有限公司是一个私有工程咨询公司, 总部设在阿尔伯达省卡尔加里市。

- 储层工程、试井、水文地质、地质和经济评价、储量评估

第一章是综述, 给出了 ECBM 技术的简单描述和该技术在世界范围内所作的先导性试验的总体评价。ECBM 技术涉及的注入气体可以是二氧化碳 (CO_2) 或氮气 (N_2) 或二氧化碳 (CO_2) 和氮气 (N_2) 的混合气 (烟道气)。在适当的条件下, 注入 N_2 和烟道气的确是有优点的。尽管 CO_2 埋藏是本书和 ECBM 技术涉及的重要方面, 但本书的重点是对 CO_2 - ECBM 技术的研究。

第二章是有关盆地的分级和试验场地的选择。首先对全国的含煤盆地进行评价和筛选, 根据盆地的地质情况、潜在的 CO_2 埋藏能力和煤层气开发潜力, 对盆地进行分级。然后, 缩小评价范围, 并把选择的对象限制在几个盆地内。再根据这些盆地的地质情况、 CO_2 气源情况、煤层气开发潜力和现有资料的多少等, 对这些有限的盆地进一步分级。

第三章是微型先导性试验工程。本章说明完成单井微型先导性试验 (按阶段) 的试验过程设计和试验的实施。微型先导性试验的目的之一是收集并获取一组用于评价的综合和准确的现场测试数据。第三章同样提供了现场数据的工程评价, 这些现场数据包括根据试井分析获得的煤储层参数。通过对所采集的现场数据包括产出气体的组分数据进行历史拟合, 从工程评价中获得的煤储层参数用于校正储层模拟器。

第四章是储层模拟。历史拟合过程提供了对 CO_2 注入后煤储层特征变化的深入了解 (煤的膨胀/收缩, 渗透率变化, 气体扩散时间)。如果历史拟合成功, 储层模拟器将被校正, 并用于预测煤储层的表征。如果不成功的话, 需要另一个微型先导性试验点作后备保证。历史拟合成功后, 使用校正的储层模型预测该技术商业开发的概念模型, 并形成经济模型, 以确定基本的经济可行性 (第五章)。如果预测结果显示经济可行, 下一步则在原试验地点, 使用现有的井或者新钻的井或者两者的结合, 设计多井先导性试验方案。如果经济不可行, 则在备选的另一个地点继续进行微型先导性试验。

第五章是关于地面设施系统的设计。这一章包括地面设施设计的两方面内容。

第一方面关于在选定的试验点的地面设施的概念性商业模型。 CO_2 气源情况已经摸清, 并已获得最佳的气源供应。按照所设计的地面设施规模, 对该概念模型的管线输送成本、投资和作业成本进行估算。这些成本估算为初步的经济模型的建立奠定基础。如果经济可行的话, 建议进一步开展多井先导性试验。

第二方面关于第四章中多井先导性试验设计要求的地面设施模型。据此，对多井先导性试验的投资和作业成本（包括 CO_2 成本）进行估算。

第六章是多井先导性试验的分析和实施。本章介绍多井先导性试验的实施（第四章和第五章中已详细地给出设计和成本估算）。典型的先导性试验将连续地运行 1~3 年。多井先导性试验的目的是验证在第四章和第五章中预测的经济学特征参数和储层特征参

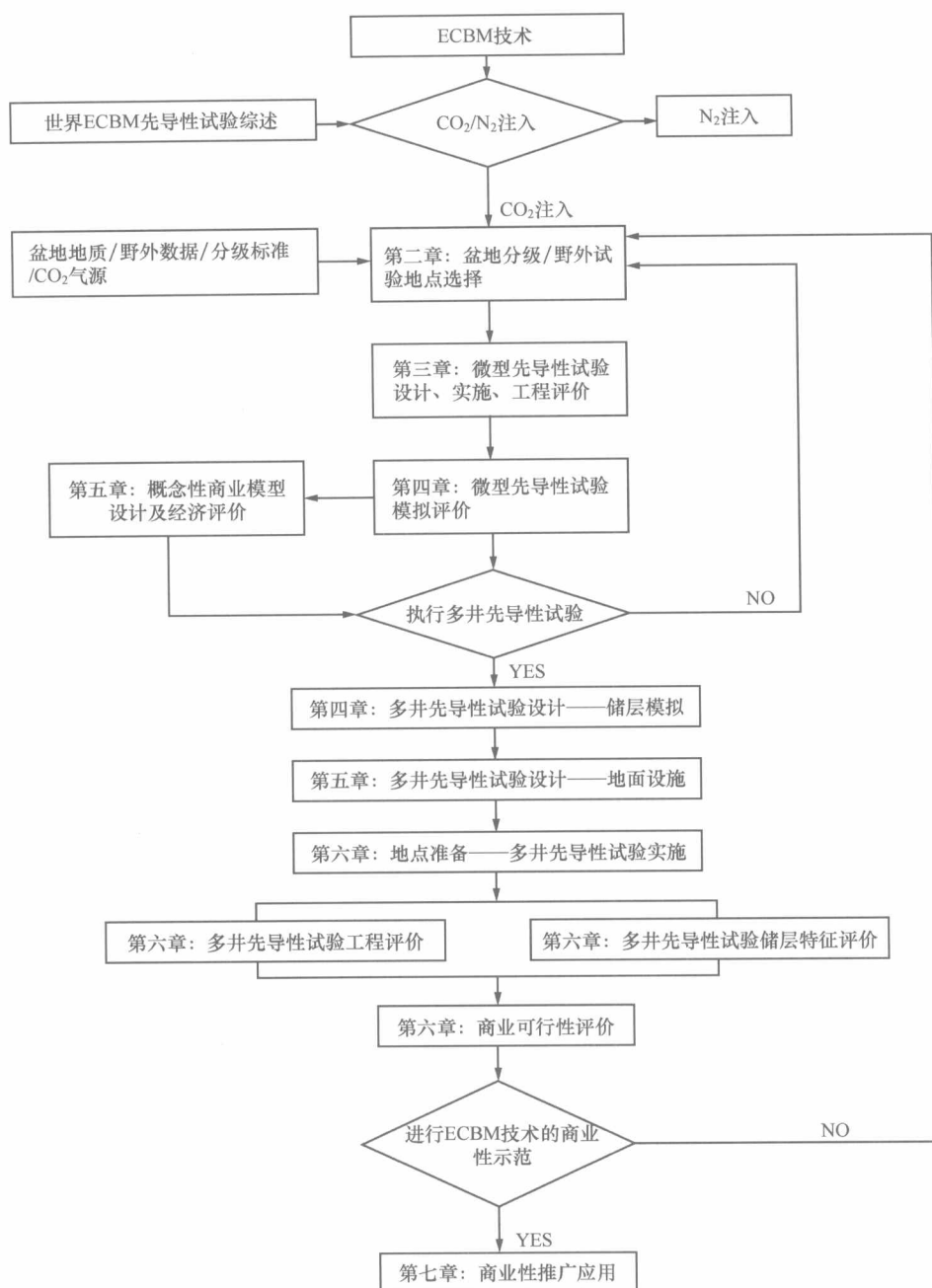


图 1 在中国完成的 ECBM 先导性试验的逻辑图

数。作为进一步的评价，将继续进行工程评价和新的现场数据的历史拟合。多井先导性试验完成时，将进行详细的商业可行性评价，以确定是否进行商业化的推广示范。如果失败，考虑另一个试验点的多井先导性试验。

图 1 给出了在中国完成的 ECBM 先导性试验的步骤（即本书各章的顺序）。

第七章是关于 ECBM 技术在中国进行商业化推广的技术路线的建议，体现了技术集成和生命循环的考虑。

目 录

致 谢

声 明

前 言

第一章 综 述	(1)
第一节 提高煤层气采收率 (ECBM) 技术概述	(1)
第二节 世界提高煤层气采收率 (ECBM) 技术先导性试验	(4)
一、美国 ECBM 先导性试验	(6)
二、加拿大的 ECBM 先导性试验	(9)
三、波兰的 ECBM 先导性试验	(11)
四、日本的 ECBM 先导性试验	(11)
第二章 地质概述和地点选择	(15)
第一节 中国煤田地质基本情况和煤层气资源潜力	(15)
一、东北地区	(15)
二、华北地区	(16)
三、南方地区	(17)
四、西北地区	(18)
第二节 选区步骤	(18)
第三节 试验地点排序的标准	(19)
第四节 CO ₂ 注入微型先导性试验地点的排序	(21)
第五节 沁水盆地南部储层特征和工程特征	(23)
一、沁水盆地南部柿庄南勘探区块的煤储层特征	(24)
二、沁水盆地南部微型先导性试验点的工程特征	(25)
第六节 CO ₂ 注入速率的初步估算	(27)
第三章 微型先导性试验工程	(28)
第一节 微型先导性试验的设计	(28)
一、钻新井或现有井的井口装置	(29)
二、安装井下设备	(29)
三、初始生产	(33)
四、CO ₂ 注入和闷井	(34)

五、CO ₂ 注入后的排采生产	(37)
六、最后的关井阶段	(38)
第二节 微型先导性试验的实施	(38)
一、井口设备	(38)
二、井下和地面设备的安装	(38)
三、初始的排采生产	(40)
四、CO ₂ 的注入和闷井	(40)
五、CO ₂ 注入后的排采生产	(44)
六、最后的关井阶段	(46)
第三节 微型先导性试验的工程评价	(47)
一、煤层气原位地质储量及储存能力	(48)
二、原始含气饱和度和储层渗透率	(50)
三、CO ₂ 的可注入量	(51)
四、CO ₂ 的储层渗透率	(51)
五、烃类置换效率和 CO ₂ 埋藏能力	(52)
第四章 储层模拟	(55)
第一节 微型先导性试验的历史拟合	(55)
一、微型先导性试验中采集的数据描述	(55)
二、煤层参数	(57)
三、数值模拟的描述	(61)
四、历史拟合的方法	(64)
五、历史拟合结果的解释	(64)
六、结 论	(72)
第二节 多井先导性试验设计	(73)
一、数值模拟的网格系统	(75)
二、煤层特性	(77)
三、煤层气产量的历史拟合	(77)
四、多井先导性试验总体特征预测	(80)
五、多井先导性试验的建议	(84)
第三节 概念性商业开发模式的设计	(84)
一、数值模拟的网格系统	(86)
二、煤层特征和气-水相对渗透率曲线	(86)
三、概念性商业开发设计整体特征的预测	(86)
四、推荐的商业开发项目设计	(90)
第五章 地面设施设计及商业化途径	(92)
第一节 商业化开发地面设施设计	(92)

一、二氧化碳气源的初步调查及选择	(93)
二、筛选投资和作业成本估算标准	(94)
三、二氧化碳厂和管线的初步设计	(96)
四、投资和作业成本估算——初步经济评价	(99)
五、二氧化碳气源的选择	(100)
第二节 多井先导性试验的地面设施	(101)
一、二氧化碳源调查和选择	(103)
二、液态二氧化碳设备的初步设计和成本估算	(105)
三、井场设备的初步设计和成本估算	(108)
四、设备的经济评价	(109)
五、地面设施工程、采办、建筑和经济评价	(110)
第六章 多井先导性试验的实施和分析	(112)
第一节 多井先导性试验的实施	(112)
第二节 多井先导性试验工程评价	(115)
一、原地资源量和埋藏量	(115)
二、初始含气饱和度和储层渗透率	(115)
三、二氧化碳注入能力	(116)
四、多井先导性试验的渗透率	(116)
五、烃类置换效率和二氧化碳埋藏能力	(116)
第三节 多井先导性试验储层模拟评价	(117)
第四节 商业化开发的储层特征预测	(118)
第七章 未来的方向	(119)
第一节 中国的 CO_2 - ECBM 项目案例	(119)
第二节 CO_2 - ECBM 技术与其他技术的结合	(119)
第三节 资源的污染	(120)
第四节 未来的方向	(121)

CONTENTS

ACKNOWLEDGEMENTS	(125)
DISCLAIMER	(126)
CHAPTER 1 OVERVIEW	(127)
1.1 INTRODUCTION	(127)
1.2 ORGANIZATION OF THE MANUAL	(128)
1.3 OVERVIEW OF THE ECBM TECHNOLOGY	(130)
1.4 OVERVIEW OF WORLD PILOT EXPERIENCE IN ECBM	(134)
1.4.1 ECBM Pilot Tests in the U. S	(136)
1.4.2 ECBM Pilots in Canada	(139)
1.4.3 ECBM Pilot Test In Poland	(141)
1.4.4 ECBM Pilot Test In Japan	(143)
1.5 REFERENCES	(145)
CHAPTER 2 GEOLOGICAL OVERVIEW & SITE SELECTION	(147)
2.1 GENERAL COAL GEOLOGY AND CBM POTENTIAL OF CHINA	(147)
2.1.1 The Northeast Region	(148)
2.1.2 The North Region	(149)
2.1.3 The South Region	(151)
2.1.4 The Northwest Region	(151)
2.2 SCALING APPROACH	(152)
2.3 CRITERIA FOR RANKING OF SITES	(152)
2.4 SITE RANKING FOR CO ₂ -INJECTION CBM PILOT PROJECT	(154)
2.5 South Qinshui Basin	(157)
2.5.1 Reservoir Characterization in the Shizhuang Exploration Block, South Qinshui Basin	(158)
2.5.2 Engineering Characterization of South Qinshui Pilot Site	(159)
2.6 NEXT STEPS	(162)
2.7 REFERENCES	(162)
CHAPTER 3 MICRO-PILOT ENGINEERING	(164)
3.1 INTRODUCTION	(164)
3.2 MICRO-PILOT DESIGN	(165)
3.2.1 Stage 1 Procedures: Drill new well or Inspection of old wellhead equipment	(166)
3.2.2 Stage 2 Procedures: Deployment of downhole equipment	(166)
3.2.3 Stage 3 Procedures: Primary production	(170)
3.2.4 Stage 4 Procedures: CO ₂ injection and soak periods	(172)

3.2.5	Stage 5 Procedures; CO ₂ Production Testing	(175)
3.2.6	Stage 6 Procedures; Final shut-in period	(176)
3.3	MICRO-PILOT IMPLEMENTATION	(177)
3.3.1	Stage 1 Operation; Wellhead equipment	(178)
3.3.2	Stage 2 Operation; Deployment of downhole and surface equipment	(178)
3.3.3	Stage 3 Operation; Primary production	(179)
3.3.4	Stage 4 Operation; CO ₂ injection and soak	(180)
3.3.5	Stage 5 Operation; CO ₂ production	(185)
3.3.6	Stage 6 Operation; Final shut-in period	(187)
3.4	MICRO-PILOT ENGINEERING ASSESSMENT	(189)
3.4.1	Initial gas-in-place and storage capacity	(189)
3.4.2	Initial gas saturation & reservoir permeability	(192)
3.4.3	CO ₂ injectivity	(192)
3.4.4	CO ₂ Micro-Pilot permeability	(192)
3.4.5	Hydrocarbon displacement efficiency & CO ₂ storage capacity	(193)
3.5	REFERENCES	(196)
CHAPTER 4	RESERVOIR SIMULATION	(197)
4.1	OBJECTIVES	(197)
4.2	HISTORY MATCH OF MICRO-PILOT TEST	(197)
4.2.1	Description of Data Collected In The Micro-Pilot Test	(197)
4.2.2	Coal Seam Parameters	(199)
4.2.3	Numerical Simulation Descriptions	(204)
4.2.4	History Match Methodology	(207)
4.2.5	Interpretation of History Match Results	(208)
4.2.6	Conclusions	(217)
4.3	DESIGN OF MULTI-WELL PILOT TEST	(217)
4.3.1	Numerical Grid System	(219)
4.3.2	Coal Seam Properties	(221)
4.3.3	History Match of Historic CBM Production	(221)
4.3.4	Prediction of Multi-Well Pilot Test Performance	(225)
4.3.5	Recommendation for Multi-Well Pilot Test	(229)
4.4	CONCEPTUAL COMMERCIAL DEVELOPMENT DESIGN	(229)
4.4.1	Numerical Grid System	(230)
4.4.2	Coal Seam Properties and Gas-Water Relative Permeability Curves	(231)
4.4.3	Prediction of Commercial Design Performance	(232)
4.4.4	Recommendation for Commercial Development Design	(236)
4.5	REFERENCES	(237)
CHAPTER 5	SURFACE FACILITIES DESIGN AND COMMERCIALIZATION	
	PATHWAY	(239)
5.1	COMMERCIAL SURFACE FACILITIES DESIGN	(239)
5.1.1	Preliminary CO ₂ Sources Identification and Selection	(240)
5.1.2	Screening Capital and Operation Cost Estimates	(242)

5.1.3	CO ₂ Plant and Pipeline Preliminary Design	(242)
5.1.4	Capital and Operation Costs Estimate. Preliminary Economics	(248)
5.1.5	CO ₂ Source Selection	(250)
5.2	MULTI-WELL PILOT TEST SURFACE FACILITIES	(251)
5.2.1	CO ₂ Source Identification and Selection	(251)
5.2.2	Liquid CO ₂ Facilities Preliminary Design and Cost Estimate	(255)
5.2.3	Field Facilities Preliminary Design and Cost Estimate	(259)
5.2.4	Facilities Economic Assessment	(261)
5.2.5	Facilities Engineering, Procurement, Construction & Economics	(261)
5.3	REFERENCES	(262)
CHAPTER 6 MULTI-WELL PILOT IMPLEMENTATION AND ANALYSES		(263)
6.1	INTRODUCTION	(263)
6.2	MULTI-WELL PILOT IMPLEMENTATION	(263)
6.3	MULTI-WELL PILOT TEST ENGINEERING ASSESSMENT	(267)
6.3.1	Initial gas-in-place and storage capacity	(267)
6.3.2	Initial gas saturation & reservoir permeability	(267)
6.3.3	CO ₂ injectivity	(268)
6.3.4	Multi-well pilot permeability	(269)
6.3.5	Hydrocarbon displacement efficiency & CO ₂ storage capacity	(269)
6.4	MULTI-WELL PILOT RESERVOIR SIMULATION ASSESSMENT	(269)
6.5	RESERVOIR PERFORMANCE PREDICTION OF COMMERCIAL OPERATION	(271)
CHAPTER 7 THE PATH FORWARD		(272)
7.1	THE CASE FOR CO ₂ -ECBM IN CHINA	(272)
7.2	INTEGRATION OF CO ₂ -ECBM WITH OTHER TECHNOLOGIES	(272)
7.3	CONTAMINATION OF RESOURCES	(274)
7.4	THE PATH FORWARD	(275)
7.5	REFERENCES	(275)