



Research
Clean Energy—Review

碳捕集和封存技术研究开发及未来清洁能源行业部署—— 澳大利亚在过去 20 年中的经验教训

Peter J. Cook

CO2CRC Ltd. & Peter Cook Centre for Carbon Capture and Storage Research, The University of Melbourne, Melbourne, VIC 3010, Australia

ARTICLE INFO

Article history:

Received 15 May 2017

Revised 24 June 2017

Accepted 9 July 2017

Available online 16 August 2017

关键词

二氧化碳
碳捕集和封存技术
Otway
澳大利亚

摘要

碳捕集和封存 (CCS) 技术作为一种碳减排手段, 虽未得到全方位认可, 但其重要性已得到人们的广泛认可。但是, 若要将全球温度上升幅度控制在低于 2°C, 则此技术的推广应用速度并不能满足相关的需求。虽然大规模推广 CCS 技术所面临的困难尚无法全部克服, 但通过不断的研究、交流和规划, 目前 CCS 技术已得到了极大丰富。我们知道如何进行相关操作, 并自信能安全有效地完成相关操作; 我们知道相关的成本情况, 也知道目前成本正在不断降低, 而且未来会继续降低。同时, 我们也知道, 只要各个国家、公司、团体继续将化石燃料用作能源及用于各种工业过程, 则世界就会一直需要碳捕集和封存技术。我们缺少的是必要的政策驱动和技术上呈中性 (不会增加二氧化碳排放) 的方法, 以达到及时、低成本地降低 CO₂ 排放, 并维持稳定的、安全的电力供应以保证能源密集型工业产品的生产和使用。我们以澳大利亚为例来说明过去 20 年内人们对碳捕集和封存技术所做的各种努力, 尤其是在碳捕集和封存技术研究和示范工程以及国际合作方面所做的各种努力。在澳大利亚国内, 碳捕集和封存技术的大规模推广进展非常慢。但全球最大的碳捕集和封存项目将作为 Gorgon 液化天然气项目的一部分, 很快在澳大利亚国内投入运营, 另外还有数个大规模的碳捕集和封存的旗舰级项目正在考察中。CO2CRC Otway 项目是澳大利亚国内目前唯一一个运行中的二氧化碳封存项目。该项目目前正在进行一些细节方面的组织和推进工作。需要指出的是, 如果要推广 Otway 项目, 还需对地下岩石对封存 CO₂ 的影响开展大量研究。如果要在全球范围广泛使用碳捕集和封存技术, 国际能源机构和国际气候变化委员会等机构都认为我们面临很大的挑战, 还有很多重大问题需要解决。要解决这些问题, 全球各方必须紧密协作。

© 2017 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of the Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. 引言

大量确凿证据显示, 人类向大气层中排放的温室气体尤其是二氧化碳不断增多, 已导致全球的气候变化和气温升高。我们还有能令人信服的证据可证明, 如果我们要将全球气温升高的幅度控制在 2°C 以下, 则必须要极大地降低二氧化碳的排放量, 尤其要降低使用化石燃

料过程中排放的二氧化碳。全球都需要提高能源效率, 改进储能技术、大规模地使用可再生能源, 更多采用核电以及碳捕集和封存技术 (CCS)。同时, 我们必须采取更为全面的方法, 解决降低经济成本、提高安全性和降低碳排放三者之间难以调和的问题。很多国家都在研究如何最佳地实现这三个目标, 且很明显各个国家和地区都将选择适合自己的特定环境的技术组合。

E-mail address: pjcook@co2crc.com.au

2095-8099/© 2017 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of the Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

英文原文: Engineering 2017, 3(4): 477–484

引用本文: Peter J. Cook. CCS Research Development and Deployment in a Clean Energy Future: Lessons from Australia over the Past Two Decades. *Engineering*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.eng.2017.04.014>

因此，为什么本文要重点关注碳捕集和封存技术呢？在很大程度上，政府间气候变化专门委员会（IPCC）、国际能源署（IEA）和其他机构的研究结果显示如果不采用碳捕集和封存技术，那么将全球变暖的温升控制在 2°C 以下的目标很可能不会实现，甚至至少会超过 4°C [1]。实际上，如果没有碳捕集和封存技术，要使全球变暖的温升保持在 2°C 以下几乎是不可能的。尽管如此，碳捕集和封存技术的实用部署速度仍旧远低于实际需要的水平。全球碳捕集和封存研究所（GCCSI）的文件显示全球现有16个CCS商业化项目，每年封存的二氧化碳量大约为 $3 \times 10^7 \text{ t}$ ，另外还有6个CCS项目正在施工中。到2020年左右，这22个项目每年将封存 $4 \times 10^7 \text{ t CO}_2$ 。但是，如果要降低全球的二氧化碳排放并且达到各方约定的排放目标，则碳捕集和封存技术要扮演一个更为重要的角色，显然目前是远远不够的。

在IEA 2°C 情景（2DS）中，碳捕集和封存技术承担了到2050年将累积排放量降低12%的任务，这意味着，大约有94 Gt二氧化碳需要被捕集并且封存起来。其中，14 Gt CO_2 是由生物能源产生的，另外80 Gt是由电力行业和其他工业部门产生的。如果维持在目前的进展速度，到2050年，我们只能封存1 Gt多一点的二氧化碳。也就是说，如果我们要将全球变暖温升幅度控制在 2°C 以下，则碳捕集和封存技术的实用部署量需要增加两个数量级。这是一项极为艰巨的工程。

但是，情况可能没有那么坏，尤其是全球很多地方都在进行碳捕集和封存技术的开发研究。过去20年里，通过对Statoil Sleipner（挪威）项目等商业项目的研究（这个项目从1996年开始就在向地下注入二氧化碳，过去20年里已经成功封存了 $2 \times 10^7 \text{ t}$ 二氧化碳），我们已经对碳捕集和封存技术有相当的认识。Boundary Dam（加拿大）和Petra Nova（美国）等项目已经成功地将碳捕集和封存技术与发电厂结合在一起。另外，近年来，全球很多国家都已投入了很多试点项目和示范项目，如澳大利亚的Otway项目、中国的延长 CO_2 驱油项目、日本的Tomakomai、德国的Ketzin和美国与加拿大的地区合作项目。这些项目帮助人们获得了大量的基础知识，可以帮助加速碳捕集和封存技术的应用。这些项目的相关情况以及实验室的各种研究结果，CCS技术商业推广技术方面的难题是可以攻克的。尽管如此，在降低成本和提高技术置信度方面仍旧面临一些现实的问题。这些问题背后的根本问题是需要解决各国领导人、行业领导人、官员、非政府组织和公众担心的各种问题，需要说服他们碳捕集和

封存技术是安全的、实际可行的并且是必要的[2]。在牢记这种情况的前提下，本文简要地介绍了澳大利亚的能源行业的背景情况，在此背景下考虑了碳捕集和封存技术及其他一些相关的事项，回顾了过去20年里澳大利亚在碳捕集和封存技术领域内的相关活动情况，并且审视了将来的一些研究项目和清洁能源领域的一些机会（如将地下岩石综合利用于清洁能源领域）的相关情况。

2. 澳大利亚的能源组合和碳排放缓解方案

澳大利亚排放的温室气体占全球总量不到2%，但是人均排放量却在全球最高之列。澳大利亚已经签署了COP21《巴黎协议》，并且将在未来数年里极大地降低其国家排放总量和人均排放量，履行自己对降低温室气体排放的国际义务。澳大利亚将采取提高可再生能源的比例、减少能源密集型工业基地以及关闭燃煤电厂等多项措施来实现相关目标。很多立法和司法工作都是推动变化的促进因素，其中包括一项强制性的可再生能源目标（RET）立法，这项立法已使得澳大利亚国内的风能和屋顶太阳能利用的增长速度越来越快。由于澳大利亚实行联邦制，不同的州使用可再生能源的比例有很大的不同，如南澳大利亚州的能源体系中有40%是风能和太阳能。但是澳大利亚的气候变化应对政策中有一个极大的缺点，即政策的最优目标是要引入更多的可再生能源，而不是重点关注降低排放。

澳大利亚有着丰富的能源，包括煤炭、天然气和铀（但是没有核电站）。澳大利亚是世界上最大的煤炭出口国，到2020年，还将成为全球最大的天然气出口国。同时，澳大利亚还要面对一个争议很大的问题——如何保证其国内的电力价格足够低廉、足够可靠并且将排放控制在较低水平。在过去的一年里，由于澳大利亚的电价和天然气价的飞速上升，导致国内的天然气供应不太稳定，且出现了几次大规模的断电事件，这已成了澳大利亚人的一个关注重点。这个问题以及其他一些相关的问题在最近的国家能源市场评论（NEM）中已全面讨论[3]。讨论的结论认为，应采用一个技术上更加中性（不会增加排放量）的方法来降低排放量。

20世纪90年代澳大利亚成立了澳大利亚国家能源市场，当时的目的是为整个国家提供便宜而且可靠的电力，但并未涉及减排的问题。但是在过去10年里，澳大利亚的能源和气候战略重点是向能源体系中引入更多的可再生能源，而不是降低排放量，也没有全面地考虑相

关的后果。至少在未来一段时间内，电池储能系统支持的可再生能源虽可以在家庭层面和地区层面提高能源安全，但是在更大范围的电网层面却不太可能。水力发电，包括抽水储能，可以提高能源系统的安全性，但是，澳大利亚国内开发水力发电站的机会很少。因此可以同时采用其他可靠的、成本较低的、排放较低的发电方式，与可再生能源一起使用，解决能源安全问题，且必须考虑技术上呈中性的方式。目前煤电对澳大利亚的电网稳定性起到了很大作用，但同时也导致了相对较高的二氧化碳排放量。作为对降低排放需求的回应，澳大利亚的煤电比例在最近数年里已有所降低，风能和太阳能发电的比例有所提高，但是却面临电力间歇性的问题，进而不可避免地会导致非计划停电等电网不安全事件。

采用高效低排放（HELE）煤电，会比目前在很大程度上呈临界状态或亚临界状态的发电体系要好些，因为可以在确保电网稳定性的同时排放也较低，但是这种方法每兆瓦时发电量的排放量仍旧会超过Victoria等最近提出的电厂排放标准，且会超过燃气电厂的排放量。另外，虽然天然气发电比煤电要清洁，但是仍旧要排放大量的温室气体。生物质可以用于提供基本负荷功率，且可能不会增加碳排放，甚至可能降低碳排放。但是如果要在将来继续使用煤炭、天然气或生物质来提供有效、安全的电力，则只有采用碳捕集和封存技术，才能既让排放量得到极大的降低又可保证有安全的能源组合。

Finkel[3]曾报道，有大量的措施可以用于保证澳大利亚的能源安全，当然不同措施的成功可能性有所不同。煤炭或天然气发电仍旧在电力行业中占据主导地位，并且提供必要的电网稳定性，但是这两种发电方式的碳排放量也很大，并不符合政府的温室气体政策和人们的相关期望。可再生能源、智能电网、需求管理、储能电池和抽水储能等其他储能手段也将得到更加广泛的应用。但是要让电池提供电网级的支持能力，则还有很多工作要做，甚至用电池为大型工业用户提供后备支持都前途有限；另外虽然各种间歇性能源的成本在下降，但是如果增加储能系统，成本的增加也会对这些能源系统的经济性产生很大的影响。

3. 碳捕集和封存技术的潜在作用

使用碳捕集和封存技术具有很好的潜力，既能维持

煤炭、天然气或生物质发电时的电力系统的安全性，又能防止使用这些能源会造成环境问题，同时成本也很低。目前的数据显示，为原有电厂改装碳捕集和封存技术可以比新建系统便宜很多（CO2CRC[4]和Hooper[5]提交给Finkel报告的数据）。在美国（Petra Nova）和加拿大（Boundary Dam）碳捕集和封存技术已经得到商业推广，用于煤电系统，可以封存高达90%的二氧化碳和硫化物、氮氧化物以及各种颗粒物。这种技术已经成功地用于Decatur（美国伊利诺伊州）的生物燃料装置，在澳大利亚（见下文）的实用部署也没有遇到任何无法克服的技术障碍。

但是常常有人批评碳捕集和封存技术“太贵”“商业上没有可行性”。面对这种质疑，我们必须反问一个问题“你这是要和什么比较？”。新建的单独碳捕集和封存系统的平准化能源成本（LCOE）比风电系统高，与屋顶太阳能处于相同水平，比具有储能系统的太阳能热电系统的成本要低[6]。若将储能技术的成本（如电池的成本）包括在各种间歇性可再生能源发电系统的成本中，则采用碳捕集和封存系统的煤炭/天然气/生物质发电的成本就很可能比风电和太阳能发电要便宜。另外，但Boundary Dam和最近的Petra Nova的碳捕集和封存系统改进的成本数据显示，由于多种原因，改装加建碳捕集和封存系统的成本可比单独新建相关系统的成本低很多，成本有可能会再降低很多（2016年Petra Nova的每兆瓦的成本大约为2014年的Boundary Dam的成本的一半）。尽管现场/项目的具体情况对在现有电厂改装补建碳捕集和封存系统的影响很大，但Bongers等[4]、GCCSI（2017）[7]和Hooper[5]最近的研究发现碳捕集和封存的改装补建成本基本上都在相同的成本区间之内（表1）。很重要的是，这些系统的成本基本上与间歇性的风电和太阳能发电的成本处于相同区间（表1），因而充分支持了下列观点：改装碳捕集和封存系统能采用较低的成本提供排放量很低而且很安全的电力。可以利用的改装补建方法很多，其中，使用部分捕集（表2）的方法，在环境允许的前提下，可以提供一种平衡平准化能源成本和减排要求的方法[†]。

但是，由于煤炭和天然气出口对国家经济具有很重要的意义，因此碳捕集和封存系统对澳大利亚有重要意义。如果采用液化天然气替代煤炭，相关进口国可因二

[†] Hooper personal communication.

氧化碳排放强度降低而获益匪浅，但是澳大利亚却需要使用能源密集型的天然气处理工艺，如果不采用碳捕集和封存系统，则相关的二氧化碳排放量会大幅增加。如果使用煤炭，进口国会承担相关的排放后果，当然也就不会导致澳大利亚的温室气体排放量大量增加（采矿活动中会产生一些不易收集的二氧化碳，因此还是会有排放），但是仍旧会导致全球的总排放量增加。世界范围的碳排放约束越来越严格，除非有一种可行的、成本较低的技术，尤其是碳捕集和封存技术来降低二氧化碳排放量，否则各个国家将不得不选择减少煤炭和天然气的使用。另外，澳大利亚是全球最大的炼焦煤和铁矿石的出口国，而炼钢的过程产生的二氧化碳排放量也在世界上人类造成的二氧化碳排放总量中占据着很大的比例。要降低这种工业过程的碳排放量，除了碳捕集和封存工艺以外，我们别无选择。如果全球都能实用部署碳捕集和封存系统，则对澳大利亚的经济将大有裨益。因此，毫无疑问的是，澳大利亚是碳捕集和封存技术研发和示范领域的一个重要参与者，且很快就会拥有一个全球最大的二氧化碳封存项目。

表1 来自澳大利亚的不同研究中低排放技术的LCOE范围 (编自Hooper, UNOTech 个人通信)

Technology	LCOE \$(MW·h) ⁻¹	Source
Coal—New-build with CCS (PCC)	150–200	Ref. [6]
Coal—Existing with retrofit CCS (PCC)		
GCCSI (2017)	80–130	Ref. [7]
UNO Technology (2017)	90–130	Ref. [5]
CO2CRC—Limited FGD/DeNO _x (black and brown coal)	105–140	Ref. [4]
CO2CRC—Full FGD/DeNO _x (black and brown coal)	105–165	Ref. [4]
Natural gas—New-build with CCS (PCC)	125–150	Ref. [6]
Natural gas—Existing with retrofit CCS (PCC)	75–115	Ref. [5]
Wind—Intermittent	90–120	Ref. [6]
Solar—Intermittent	125–175	Ref. [6]

FGD: flue gas desulfurization; PCC: post-combustion capture.

表2 部分捕集成本 (作为初始安装全捕集系统工厂的选择)

Partial capture	LCOE \$(MW·h) ⁻¹
No capture	58
25% capture	64
50% capture	74
75% capture	86
90% capture	94

Using data on a brown coal retrofit from a submission to the National Electricity Market review [5].

4. 澳大利亚的碳捕集和封存研发工作

澳大利亚早在1998年就已开始碳捕集和封存技术的相关研究 (图1)，最先通过GEODISC (二氧化碳的地理处理) 项目在澳大利亚大陆评估二氧化碳封存的潜力 [8]。这个研究项目吸引了多家大学和研究机构的很多天才级的地质学家、地球物理学家、地球化学家和水文地质学家，他们组成一个团队，在澳大利亚石油合作研究中心 (APCRC) 的赞助下开展相关工作。这个项目所要解决的一个最主要的问题是“地质封存二氧化碳是否有可能极大地降低澳大利亚的二氧化碳排放量？”。到2002年，研究的结论是“能！”。为此，APCRC在2003年又修订了研究团队提交的研究结果，并且成立了温室气体技术合作研究中心 (CO2CRC)。此研究中心的研究重点是碳捕集和地质封存。CO2CRC随后成为 (到现在仍旧是) 澳大利亚最重要的碳捕集和封存技术合作研发机构。

之后，澳大利亚还有其他一些研究项目，包括澳大利亚联邦科学与工业研究组织 (CSIRO)、澳大利亚地球科学局 (Geoscience Australia) 和各个大学的一些研究。联邦政府的碳捕集和封存旗舰项目，为三个示范规模的碳捕集和封存项目的早期评估工作提供了政府的相关支持：通过澳大利亚低排放煤研发计划 (ANLEC) 为旗舰项目的相关要求提供了工业界和政府联合的资金支持；2008年又成立了GCCSI。2012年，墨尔本大学在力拓公司、维多利亚州和CO2CRC的支持下建立了Peter Cook碳捕集和封存研究中心。多年来，工业界通过ACALET (Australian Coal Association Low-Emission Technologies) 单独为一些碳捕集和封存项目 (如Callide Oxyfuels项目和Surat盆地的封存工作) 提供了相关资金 (通过征税提供资金)。认识到碳捕集和封存的重要性以



图1. 澳大利亚的沉积盆地和CCS活动的地点。

及全球合作的必要性后，必和必拓公司最近投资并且在全球建立了数个碳捕集和封存研究项目。其中包括在加拿大萨斯喀彻温省建立的碳捕集和封存知识中心，北京大学钢铁行业碳捕集和封存技术应用研究中心，以及最近由墨尔本大学、斯坦福大学和剑桥大学共同开展的二氧化碳捕集机制国际合作研究。

虽然澳大利亚还没有一个与电力行业碳捕集和封存相关的先进商业方案，但是维多利亚州的Carbonnet项目、昆士兰州的CTSCo项目和西澳大利亚州的Southwest项目都已处在相应的评估阶段。到目前为止，澳大利亚最重要的一个商业化碳捕集和封存应用项目是全世界最大的二氧化碳封存项目，这个项目是Gorgon液化天然气项目的一部分，位于Barrow岛上；从2018年开始每年将向地下注入 $3 \times 10^6 \sim 4 \times 10^6$ t 二氧化碳，且注入时间将持续25年。

到目前为止，鉴于澳大利亚甚至全球地质特点和咸水层CO₂巨大的封存容量，澳大利亚仍将CO₂的咸水层封存作为研究对象[2]。二氧化碳有哪些实用价值？MacDowell等[9]最近指出，将二氧化碳用于控制气候变化是很有限的，用二氧化碳提高石油开采率是唯一的一种能够大规模利用二氧化碳的途径，且主要是在北美地区才可以有这种用途。不幸的是将二氧化碳用于提高石油开采率的机会在亚太地区很有限[9]，但是尽管如此，在东南亚地区还是有一些机会。澳大利亚人很少注意到这种机会，因为澳大利亚的产油盆地的总体情况显示这种机会很少（当然还需要进一步研究相关情况）。将二氧化碳封存在采空的油气田中用以提高天然气的开采率，可以为Gippsland盆地等澳大利亚的产油盆地提供更多机会。工业界也比较关心用二氧化碳和硅酸盐材料生产各种有用的碳酸盐材料，这也可能是一种有用且有利可图的机会，但是，这种用途对降低二氧化碳排放量仍旧起不到多大作用。在整个世界上，为了让气温上升幅度保持在2℃以下，采用负排放的碳捕集和封存技术的生物能源（BECCS）是很多减排方案中不可或缺的一部分。澳大利亚的BECCS正在开展一些相关工作[10]，但是这个可能需要更多研究。

5. 温室气体技术合作研究中心的碳捕集和封存研发工作

5.1. 结构

早在1998年，就已有针对二氧化碳通过GEODISC

和APCRC进行封存的基础研究。根据这些研究工作的相关结果，2003年正式成立了CO₂CRC。这是一个非法人社团，成员包括30个左右来自澳大利亚和其他国家的工业公司、政府机构、大学和其他研究机构。本中心的工作重点是研究和开发具有重要商业实用意义的二氧化碳捕集和封存技术。本中心的早期研究任务之一是评估位于Latrobe山谷和临近的Gippsland盆地的碳捕集和封存中心的范围。这项工作为后期壳牌公司、Anglo和最近的Carbonnet（见第4部分）仔细评估碳捕集和封存潜力的相关工作奠定了基础。

但是从CO₂CRC成立开始，其主要目标就是在澳大利亚建立一个具有重要商业意义的试点规模的二氧化碳封存项目。2003年，世界上又建立了一些这种项目，多数位于北美地区，我们从这些项目的工作中学到很多经验教训，因为我们并不想“白费力气做重复工作”。例如，如果要和商业上的石油增产项目联用，封存研究项目很明显是非常复杂的，而且商业目标和研究目标并不一定总是一致的。另外，有些相互矛盾的是，对某些项目而言要获得足够的供应是有一定问题的，甚至是很昂贵的。最后，尽管最理想的是将燃煤电厂等机构产生的二氧化碳与二氧化碳捕集设施完全融合，建立相关的碳捕集和封存项目，但是在澳大利亚却没有这种规模，且至少在未来10年里是不太可能这样操作的。CO₂CRC不能等待那么久！因此，CO₂CRC决定，需要建立自己的相关设施、场地以及二氧化碳来源。本中心希望自己对命运负责。

2003年，CO₂CRC决定现场试验的第一个条件，是要具有安全且成本能够负担得起的二氧化碳供应源。为此，本中心购买了维多利亚州西南部的Otway盆地中的一个高二氧化碳气井（Buttress 1）。同时，CO₂CRC购买了一个油气田，该油气田中的天然气田已经采空，储气层岩石的状况很好，封井效果很好，有很好的CO₂储层和盖层，另外还有之前的油气勘探工作获得的一个宝贵的数据库。尽管世界上不可能有完美的研究场地，但Otway这个场地的确也很接近完美了。CO₂CRC可能是各种研究机构中唯一一个拥有生产中的二氧化碳井和采空的气田的研究机构[11]。

CO₂CRC的一个早期决定是要重点关注Otway场地，但是需要首先建立一个能获得CO₂CRC委员会认可的正式的责任和风险管理体系。这并不太容易，因为温室气体技术合作研究中心有很多个成员组织，不同成员对各种风险和责任具有不同的态度——这是勘探公司常常要

面对的问题，但是研究机构却不一定会遇到这种问题。因此，需要成立一个单独的法人社团公司，此社团公司由10个资源公司组成，这些公司须同意共同担任股东，承担地质工作可能产生的财务和其他方面的责任。与资源公司的这种紧密合作还为CO₂CRC提供了相关的勘探和开采经验，借此可以保证相关工作能够符合最高的健康安全和环境管理标准，并且保证工作符合相关的法规和许可证条件的规定。CO₂CRC还建立了一家独立的公司，由其持有和开发相关的知识产权。

这又提供了一个明确的管理结构，帮助管理时间跨度长达数年的一系列碳捕集和封存场地及装置试验。但是由于研究工作需要不断调整，且运行工作的资本需求很大，CO₂CRC有必要做出一些调整，以便推进Otway现场的各项工作。从2012年开始，CO₂CRC通过墨尔本大学逐渐展开了相关研究工作，2014年，与降低捕集成本有关的知识产权（包括溶剂工艺、设备设计和过程/热集成的知识产权）被转让给UNO技术私人有限公司。2015年，其他所有的关于财务、现场运行、研究协调和财产所有权的责任都从非法人社团的合作机构（此机构同时关闭）转让给法人社团CO₂CRC公司、其独立董事会和首席执行官Tania Constable女士。CO₂CRC公司仍旧能获得澳大利亚和外国政府、工业界、大学和其他研究机构的各种支持[†]。

5.2. 温室气体技术合作研究中心 Otway 项目

2003年，CO₂CRC与其合作组织就已开始碳捕集技术的相关研究，研究的重点是通过开发性能更优的溶剂和各种膜材料用于燃烧前和燃烧后碳捕集，以降低捕集的成本。数年里，本中心成功地在Hazeland燃煤发电站运行了一个示范级的燃烧后捕集装置，这个示范工程为供研究人员研究装置集成和现有的电厂加装CCS系统，以及研究相关的经济情况提供了很好的机会。其中，研究人员尤为关注如何使用碳酸盐溶剂。此工艺使用新开发出来的闭合循环的吸收-解吸体系，利用高效的碳酸钾洗涤沉淀工艺，从工业尾气流中除去二氧化碳。2014年，这个工艺的相关知识产权被转让给澳大利亚UNO技术私人有限公司。2017年，CO₂CRC在Otway现场新建了一个示范装置，用于测试从天然气中分离二氧化碳的新技术，该技术的出发点是要利用CO₂含量很高的支撑剂气体（Buttress gas）。

但是，在过去14年里，CO₂CRC的研究重点一直是封存。基于位于维多利亚州西部的Otway项目的研究工作，本中心最关注的问题是测试和监控可以商业应用的大规模封存技术。在这14年里，CO₂CRC和各个合作组织在Otway现场的开发、钻探和监测设备以及各种重大科研项目上总共花费了1亿美元以上的经费。预计从今年到2019年CO₂CRC还将使用4100万美元的经费，才能为现场提供足够的仪器，监控现场的情况，并且开展更加前沿的碳捕集和封存科学研究。

CO₂CRC的研究重点一直是要证明碳捕集和封存技术“有效”，且本中心足够胜任安全地开展碳捕集和封存项目的运行工作。到2005年，CO₂CRC已收到各种必要的批文。本中心随后已开始着手安装一条天然气管道并钻了一口约2000 m深的注入井，亦即完全商业化的碳捕集和封存项目所需要的相关工作，当然Otway的1期工程（现在的名称）只是一个纯研究性项目。

2008年3月开始向新钻的CRC-1井注入二氧化碳，注入工作完成于2009年9月，当时一共向2053 m深的Waarre C地层中注入了65 445 t超临界二氧化碳（严格地说是富二氧化碳气体）。运行期延长后，不可避免地需要解决一些运行方面的问题，例如，有些地下设备可能会因故障失效，初期阶段的注入能力较低，需要调整取样或场地勘察日程，防止影响当地的农业生产等。对将来的一些碳捕集和封存项目而言，一个重要的要素是要确保能成功地关闭现场。对CO₂CRC的Otway项目而言，这并不是一个问题，因为已经决定2009年之后还将建设一期新的项目。因此CRC-1井和其他项目设施的各种活动已被暂停，已进入看管和维修阶段，到2期工程完成之前将一直被监控起来。Otway的1期工程很成功；Otway 1期最重要的研究成果如下：

温室气体技术合作研究中心的Otway项目已证明，可以很安全地设计并且使用采空的气田封存二氧化碳。监控结果显示，封存的二氧化碳对土壤、地下水或大气都不会产生任何明显的影响……地震图像和流体取样研究结果确认了相关的动力学和地球化学模型。数据显示，监测技术对地表泄漏速率的敏感度为每年数千吨。能获得这种敏感度，则商业规模的封存项目可得以有效监控，能够确保缓解气候变化问题[12]。

[†] More information on CO₂CRC can be found at www.co2crc.com.au.

Stalker等[13]、Underschultz等[14]以及Cook[15]已经报告了此项目的其他一些重要科研结果。

2008年CO2CRC开始规划将在未来数年里在现场开展一系列新的试验（Otway 2A、2B、2C），当然重点仍旧是商业化碳捕集和封存技术的应用。咸水层在全球范围内都很多，因而适合封存的机会很多，但是要确保符合法律规定且获得当地社区的认可，则需要更好地研究在二氧化碳羽流迁移期间发生作用的多种CO₂固定机理（图2）[2]，还需要有效地监控二氧化碳羽流并且确认羽流的稳定性。Otway 1期试验已完成，测试了Warree构造的封存效果，这个构造是在采空的气田中的一个均质砂岩气藏。Otway 2期的目标是研究没有结构封闭措施的情况在咸水层（即位于1500 m深度处的Paaratte地层）中进行封存。Otway 2期的目标是评估在CO₂羽流迁移期间CO₂的残余和溶解机理，以及成功监测羽流的能力，并且预估羽流在何时可以达到平衡状态。

作为Otway 2A期工作的一部分，钻了一个新的注入井（CRC-2），并且进行了大量的岩芯取样工作，对Paaratte地层做了地质表征工作，补充了流体模型中岩石物理性质和地震模型中弹性性能，由此建立了一个静态模型[16]。

Otway 2B CO₂残余饱和度与溶解的系列测试工作完成于2011年，并且在2013年做了重复测试，测试工作将140 t 纯二氧化碳注入了Paaratte地层中。通过向相同的区段注入含饱和和二氧化碳的地层水（450 t），将二氧化碳羽流驱赶至残留饱和体系中，测试工作使用单井法，可以在工业项目中应用这种方法，用较低的成本改善近井表征方法，并且扩大其用途。相关的试验仅涉及10 t 二氧化碳，

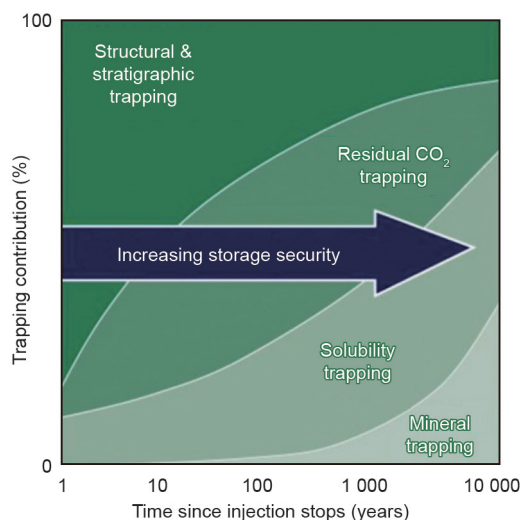


图2. 二氧化碳捕集机制[2]。

也被用于确定在碳捕集和封存期间（包括在存在痕量污染物的情况下）的岩石-流体地球化学反应的范围，置信度较高[17-19]。

2015—2016年，Otway 2C测试工作在Paaratte的咸水层中完成，测试的目的是：

准确地预测二氧化碳的移动，进而为碳捕集和封存技术的用户和监管部门提供足够的信心，说明二氧化碳的行为方式决定其将被永久封存起来，且地震监测系统有能力证实这种羽流移动情况。（Tania Constable, 2016）[†]

注入了15000 t 富二氧化碳的气体，用以测试抗震性。很重要的是，羽流需要有足够的厚度和连续性，以便让开发工作实现4D地震监控系统直观化，同时要在横向有足够的限制，让CO₂羽流分布在地震监测可监测到的范围（大约1 km²）。另外在有限的时间（短时间）内确保稳定性也是很重要的。CO2CRC预计在注入大约两年后（即2017年），地震分辨率数据将显示二氧化碳实际上会变成固定不动的状态。2C期的监控工作仍在进行中，将验证这一预测是否准确（www.co2crc.com.au）。安装了成本较低的光缆和分辨率较高的埋入地底的接收器，以及自动化通信设施，让研究人员可以远程访问地面和地下监控系统，并且进行相关操作[20-22]。

为了扩大2期研究的成果，2017年3月下旬，CO2CRC投入Otway 3期的研究，预计成本为4200万美元，2017年4月新钻了一口评估用井——CRC-3号井。Tania Constable (CEO)在2017年3月27日的CO2CRC新闻发布会上做了简要介绍：

项目将主要关注开发一个成本较低的“智能区域”，高达 4×10^4 t 二氧化碳将被注入地下，并且使用多种新工具和新技术实时监测相关情况。这个注入量对注入量达到每年 4×10^6 t 二氧化碳的商业封存项目的建模工作是必须的。项目的设计可以转移至不同的海上和陆上环境中，对很多行业而言都是一项很有价值的投资。

智能区域可让监管方和附近的社区有足够的信心相信，可以采用很低的成本持续监测二氧化碳的相关情况。

安装在地下后，这种技术可以快速查明有风险

[†] <http://www.co2crc.com.au/15000-tonnes-of-co-2-used-to-make-emissions-reduction-cheaper/>

的区域，且相关成本比传统的二氧化碳监控方法的运行成本更低。我们的仪器都在地下，可能都无需成本高昂且产生一定破坏的地面地震数据观测工作。……[†]

Otway现场将继续开展这些工作以及相关的碳捕集和封存活动，直至2019年或2020年，也可能会持续更久。

5.3. 将来的地下研究机会

在澳大利亚和全球各地，沉积盆地的上部4~5 km是人类勘探最多、投资最多的区域，相关的工作目的包括开采石油、天然气、煤炭和其他资源，或者处理发电过程中产生的二氧化碳或盐水。在地质限制CO₂的领域内，沉积盆地对未来能源安全至关重要（图3）。

前文中讲述的一系列位于CO₂CRC Otway现场的二氧化碳封存项目已在下列领域取得极大的成功：通过改善监测效果，测试新的地下技术和增进我们对地下过程尤其是二氧化碳迁移和捕获的理解等途径，对降低商业化碳捕集和封存项目的成本起到相当大的作用。这些项目也极大地促进了碳捕集和封存技术在澳大利亚和全球其他国家降低二氧化碳排放量的可信度，并且增强了人们对这种技术的相关了解。最后，这些项目还是一个奇妙的催化剂，推动了来自澳大利亚和其他国家的数十个

机构的数百位科学家和工程师的合作。

澳大利亚和全球的科学界在CO₂CRC的Otway现场拥有一些珍贵的地下设施，这些设施不只是与碳捕集和封存技术的研究有关，还可对研究各种能源机会和将地下岩石层用于更广泛的用途发挥重要作用。在Otway现场，CO₂CRC对各种地下和相关的地面设施的投资总额为1.4亿美元，已获得监管方的批准，且获得了当地社区和各级政府的对二氧化碳捕集和封存工作的支持，这对开发一个地球深层能源和环境项目（AusDEEP）的相关工作是一个非常好的起点。

可以将AusDEEP比作一个望远镜，其观测深度可以达到4~5 km，可以扩大我们对“地球内部空间”的理解，地球的这部分空间中容纳了大多数能源资源。提出的策略是要在Otway和其他现场开发一些先进的仪器、改进监控系统及提高3D和4D多相建模能力，进而帮助我们有效地评估、利用和保护各种资源。为此地下深层能源和环境项目将开发一个100 km³的沉积盆地立方体的极全面的图像。这种规模和分辨率在之前是不可能的。100 km³的近场立方体将放在一个500 km³的远场立方体盆地背景下，后者的分辨率会比较低一些。相关设施将确定这些立方体的几何外形、动力学情况以及组成情况，监控各种自然过程和人为过程，并且决定其中的各种通量和路线，时间尺度为数天到数十年。

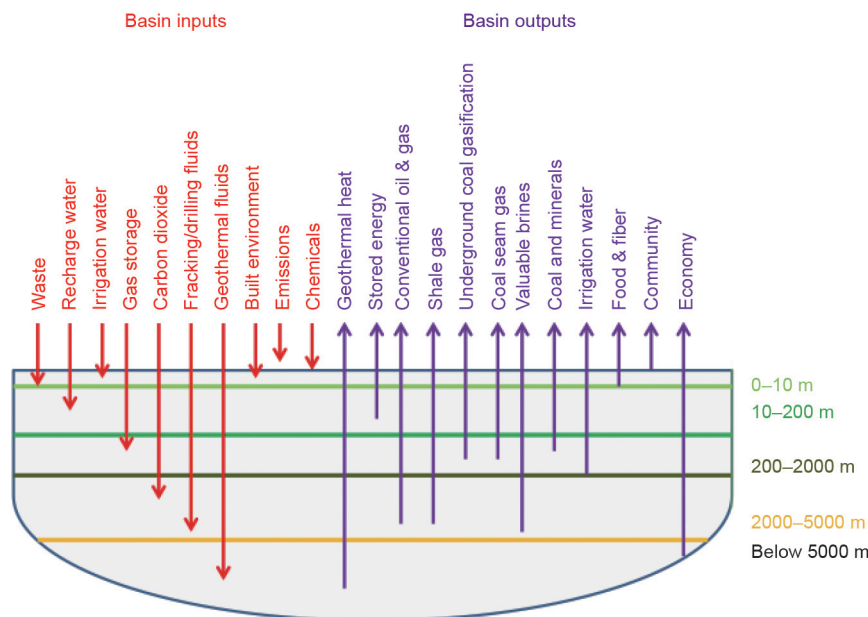


图3. 由于提取资源（紫色）以及盆地用于与废物处理或流体注入（红色）有关的一系列活动（包括二氧化碳封存），沉积盆地正日益成为多个有时有相互冲突的用途的场所。

[†] <http://www.co2crc.com.au/41m-emissions-reduction-project-otway-victoria-begins/>

下列例子可以说明AusDEEP的潜在的工业和商业重要性:

(1) 钻井、录井和井下仪器以及完井和井废置过程中的各种创新可以降低相关的生产成本和负面影响。

(2) 对水力压力或地下水处置的研究可能非常重要,不只是为了提高致密气层的回采率,还可为监管机构和社会公众关心的各种问题给出相关的答案。

(3) 很多现有的孔下技术只能在150℃以下运行,但是在澳大利亚的某些盆地中,运行温度要高得多;能够在高温高压下运行的各种仪器对将来开采更深处各种资源是非常重要的。

(4) 二氧化碳的存在会极大地增加井废弃工作的复杂性(和成本),但是在整个亚太地区,尚无任何研究机构来解决这个问题; AusDEEP可以对开发更佳的井废置流程和技术做出自己的贡献,并且帮助降低二氧化碳含量很高的油气井的废置成本。

(5) 最近的一场研讨会中确认了能源研究工作中的一些重点领域, AusDEEP可以在压力监控和管理、被动地震研究和封存优化以及地球化学屏障生成等方面做出一定贡献。CO2CRC的Otway现场以及其他相关的现场的工作范围可能会逐渐扩大,会逐步纳入一些先进能源研究和技术工作,进而可以强化现场与碳捕集和封存有关的各项研究。

AusDEEP目前还只是CO2CRC公司提交给政府的一个建议,尚需进一步研究,如果有可能才会提供相关的资金。若获得了相关的资金,这会是澳大利亚的一项重大科技投资,可以帮助我们更好地研究、管理和保护我们的能源资源。这个项目可以提供一个引领全球的多学科、多机构合作的世界地球科学和技术平台,澳大利亚和其他国家都会因此大获裨益。这个平台可以帮助我们更好地利用传统天然气和非传统天然气、地热能等各种资源,并且更加智能化、更加经济、更加环保地利用地下储能和二氧化碳封存空间(包括降低我们的温室气体排放)。

6. 结论

6.1. 澳大利亚对碳捕集和封存技术研究的政策背景

作为一个重要的化石燃料出口国,碳捕集和封存技术对澳大利亚非常重要。澳大利亚可以从碳捕集和封存装置在全球的实用部署中获得大量的经济利益。另外,由于澳大利亚的地质学研究基础和工业基础情况,澳大

利亚可以选择将碳捕集和封存技术作为其国内一个重要的减排方案,用来履行自己应履行的国际温室气体减排义务。但是,除了Gorgon LNG这个著名项目以外,澳大利亚国内没有任何正在开发的其他大型碳捕集和封存项目,只有数个尚在早期考虑阶段(预可研阶段)的项目。为现在的一些燃煤电站加装碳捕集和封存系统对澳大利亚而言是一种成本很低的方案,可以改善现有电网的安全性和稳定性,并且降低二氧化碳排放。

国家能源市场最近发布的Finkel报告以及报告中给出的各种建议,提供了一个基础,可以帮助在技术上呈中性的状况下将碳捕集和封存用作一种清洁能源方案。由于可以满足低排放、电网稳定性和低成本等多方面的要求,因此采用碳捕集和封存系统的煤电或天然气发电被认为是能源行业的未来发展趋势。Boston等[23]最近为澳大利亚电网的ANLEC研发而做的一项研究的结果更进一步强化了这种观点,他们的研究结果中有如下结论:

在满足较高的二氧化碳去除水平的同时,还需要高效低排放+碳捕集和封存系统发出的可调度的电能,才能保证电网的稳定性和弹性。这种技术还可用最低的成本提供最深的封存深度,降低二氧化碳的排放量。(Boston等[23])

这个消息以及Finkel报告中的相关建议,很可能会改变人们现在对使用化石燃料的各种看法,以及人们对碳捕集和封存系统在澳大利亚将来的能源组合中的相关地位的各种观点,甚至还会改变政府的相关政策。

总之,若澳大利亚的碳捕集和封存研究工作被延迟至政府对碳捕集和封存以及能源行业出台明确的政策规定之后,则可能直到现在,澳大利亚还没有获得任何关于碳捕集和封存系统的相关经验。实际上,在过去20年里,由于研发工作人员在没有等到相关政策澄清的情况下,就已开始着手进行了相关研究,到现在已完成了大量关于碳捕集和封存系统的相关研究。总之,只要相关政策到位,澳大利亚现在已经具有足够的知识和经验,可以大规模推进碳捕集和封存项目的相关实用工作。

6.2. 从 Otway 学到的各种经验教训

CO2CRC Otway项目已经是且还将是澳大利亚最成功的碳捕集和封存技术研究项目。这个项目与商业化运行具有直接关系,并且为我们详细地说明了应如何捕集

二氧化碳。同时，相关的经验教训也非常重要。我们从一些重要工作中学到了很多知识，其中包括：

(1) 设计了一个雄心勃勃的项目，开发了一系列技术，为收集大量的数据而开展了相关的培训、开发和执行工作；证明了已可满足正式司法要求；以及已将大量的毫不相关的数据集成功地整合在一起。这些工作对全面地说明在二氧化碳封存用综合设施中发生的一切都非常重要。

(2) 要合法地实地到访研究区域需要一定时间，另外还要和土地所有人就相关许可权谈判，要处理调查方案变化带来的相关问题，还要确保调查团队到访现场期间的安全。这些工作所需要的时间和各种付出比预期的要多。还需要考虑现场的物理变化，如水位的急剧变化会影响地震调查以及土壤气体和土壤通量的测量工作。

(3) 通常，我们没有适当的现成的分析技术。开发可靠的流体样品分析技术需要耗费大量的时间，且非常困难。示踪剂测定仪器的开发尤其是个大问题，因为被测定物质的含量可能很低、测量设备可能有记忆效应，还有样品污染等诸多问题。

(4) 另外，如何可靠地评估数据的误差对所有试验都是一个巨大的挑战，即使实验室分析技术或其他仪器人为因素已得到深入研究。例如，地下水数据在不同季节的变化很大，这很可能与农业生产取水等环境因素有关。

(5) 监控方案涉及大量的技术，且在过去数年里监控范围一直在扩大。因此，有必要确定一些有效的流程，确保在人员变动之后相关流程仍旧能稳定运行。

(6) 监控工作中收集了大量的数据，但是在数据类型、数据量和相关的元数据等方面有很大的变化空间。整理这些数据非常重要，当然相关工作也很有挑战性。

总之，Otway项目在科研、工业、政府机构、环保部门和其他监管机构都产生了巨大影响。本项目之前，人们对CCS了解不多，且对其原理基本没有认知，而本项目使人们对CCS有了了解。本项目优化了相关设备、加强了数据分析、改善了现场流程，从而降低了项目成本。最后，本项目将降低各种风险和不确定性，让利益相关方更加相信这种技术可以安全、有效地降低排放到大气层中的CO₂量，因此也将加快CO₂地质封存的实施进度。

6.3. 国际合作

通过Otway、Callide Oxyfuel、CCS Flagship和在澳

大利亚国内的很多其他活动，澳大利亚已经通过碳捕集和封存领域的国际合作获得很多相关经验（并且因此获益匪浅），澳大利亚很希望在未来能够继续推动相关合作。通过参与早期的Frio Brine项目的国际合作，澳大利亚也大获裨益。通过一些现有的项目，澳大利亚和中国已经有强化碳捕集和封存领域合作的相关基础，如澳大利亚地球科学局协调的中澳项目、澳大利亚联邦工业部（Federal Department of Industry）的低排放项目、CSIRO的试点规模的二氧化碳捕集工作以及最近必和必拓发起的北京大学碳捕集和封存国际协作研究项目。澳大利亚和中国双方的很多大学和研究机构已经建立了紧密的合作关系。我们非常欢迎中国和其他国家与组织参与CO₂CRC Otway现场和AusDEEP将来的研究工作，或者参与各种被提议建设的采用碳捕集和封存技术的大型旗舰项目。

总之，我们必须紧密地合作来解决被很多人认为是几乎无解的问题，既要满足永远会存在下去的能源需求，也要生产各种能源密集型产品，同时还要极大地降低我们的碳排放量。在很大程度上，只有通过全世界合作，共同研究、开发、展示和最终大规模实用部署多种降低碳排放的技术，尤其是碳捕集和封存技术应作为一种最至关重要的技术，这种挑战才可能被攻克。

Acknowledgements

The author thanks his many colleagues at CO₂CRC and the University of Melbourne for their insights, their friendship, and their contribution to CCS science. The contributions of Tania Constable and Barry Hooper to this paper are acknowledged with thanks. The support of industry and governments made it possible to undertake Otway and the other research activities summarized in this paper.

References

- [1] International Energy Agency. 20 years of carbon capture and storage: Accelerating future deployment. Paris: International Energy Agency; 2016.
- [2] Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC special report on carbon dioxide capture and storage. Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Metz B, Davidson O, de Coninck HC, Loos M, Meyer LA, editors. New York: Cambridge University Press; 2005.
- [3] Finkel A, Moses K, Munro C, Effeney T, O'Kane M. Independent review into the future security of the National Electricity Market: Blueprint for the future. Canberra: Commonwealth of Australia; 2017 Jun.
- [4] Bongers G, Byrom S, Constable T. Retrofitting CCS to coal: Enhancing Australia's energy security. Melbourne: CO₂CRC Ltd.; 2017.
- [5] Hooper B. Submissions to the independent review into the future security of the National Electricity Market. 2017. Available from: <http://www.environment.gov.au/energy/national-electricity-market-review/submissions>.
- [6] Electric Power Research Institute, Inc. Australian power generation technology report. Melbourne: CO₂CRC Limited; 2016.
- [7] Chambers M. Gas carbon capture "cheaper" than wind and solar, experts say [Internet]. Sydney: The Australian; 2017 Feb 20. Available from: <http://www>.

- theaustralian.com.au/business/mining-energy/gas-carbon-capture-cheaper-than-wind-and-solar-experts-say/news-story/0d1a7971f3dc872192ab28bacacab1f6.
- [8] Cook PJ, Rigg A, Bradshaw J. Putting it back where it came from: Is geological disposal of carbon dioxide an option for Australia? *APPEA J* 2000;40(1):654–66.
- [9] Mac Dowell N, Fennell PS, Shah N, Maitland GC. The role of CO₂ capture and utilization in mitigating climate change. *Nat Clim Change* 2017;7(4):243–9.
- [10] Pour N, Webley PA, Cook PJ. A sustainability framework for bioenergy with carbon capture and storage (BECCS) technologies. *Energy Procedia* 2017. In press.
- [11] Cook PJ, Causebrook R, Gale J, Michel K, Watson M. What have we learned from small-scale injection projects? *Energy Procedia* 2014;63:6129–40.
- [12] Jenkins CR, Cook PJ, Ennis-King J, Underschultz J, Boreham C, Dance T, et al. Safe storage and effective monitoring of CO₂ in depleted gas fields. *Proc Natl Acad Sci USA* 2012;109(2):E35–41.
- [13] Stalker L, Boreham C, Underschultz J, Freifeld B, Perkins E, Schacht U, et al. Geochemical monitoring at the CO₂CRC Otway Project: Tracer injection and reservoir fluid acquisition. *Energy Procedia* 2009;1(1):2119–25.
- [14] Underschultz J, Boreham C, Dance T, Stalker L, Freifeld B, Kirste D, et al. CO₂ storage in a depleted gas field: An overview of the CO₂CRC Otway Project and initial results. *Int J Greenh Gas Con* 2011;5(4):922–32.
- [15] Cook PJ, editor. *Geologically storing carbon: Learning from the Otway Project experience*. Melbourne: CSIRO Publishing; 2014.
- [16] Bunch M, Daniel R, Lawrence M, Browne G, Menacherry S, Dance T, et al. Multi-scale characterisation of the Paaratte Formation, Otway Basin, for CO₂ injection and storage. *APPEA J* 2012;52(2):664.
- [17] Haese RR, LaForce T, Boreham C, Ennis-King J, Freifeld BM, Paterson L, et al. Determining residual CO₂ saturation through a dissolution test—Results from the CO₂CRC Otway Project. *Energy Procedia* 2013;37:5379–86.
- [18] Paterson L, Boreham C, Bunch M, Dance T, Ennis-King J, Freifeld B, et al. Overview of the CO₂CRC Otway residual saturation and dissolution test. *Energy Procedia* 2013;37:6140–8.
- [19] Paterson L, Boreham C, Bunch M, Dance T, Ennis-King J, Freifeld B, et al. CO₂CRC Otway Stage 2B residual saturation and dissolution test. In: Cook PJ, editor. *Geologically storing carbon: Learning from the Otway Project experience*. Melbourne: CSIRO Publishing; 2014. p. 329–60.
- [20] Pevzner R, Urosevic M, Caspari E, Galvin RJ, Madadi M, Dance T, et al. Feasibility of time-lapse seismic methodology for monitoring the injection of small quantities of CO₂ into a saline formation, CO₂CRC Otway Project. *Energy Procedia* 2013;37:4336–43.
- [21] Pevzner R, Caspari E, Gurevich B, Dance T, Cinar Y. Feasibility of CO₂ plume detection using 4D seismic: CO₂CRC Otway Project case study—Part 2: Detectability analysis. *Geophysics* 2015;80(4):B105–14.
- [22] Shulakova V, Pevzner R, Dupuis JC, Urosevic M, Tertyshnikov K, Lumley DE, et al. Burying receivers for improved time-lapse seismic repeatability: CO₂CRC Otway field experiment. *Geophys Prospect* 2015;63(1):55–69.
- [23] Boston A, Bongers G, Byrom S. *Balancing flexibility whilst decarbonising electricity on the NEM*. Canberra: Australian National Low Emissions Coal Research & Development; 2017.