

CO₂ 的地质存储

——地质学的新课题

周 蒂

中国科学院边缘海地质重点实验室, 中国科学院南海海洋研究所, 广州 510301

摘要 将人类排放的 CO₂ 捕集和存储到地下或海底以与大气隔绝是缓解温室效应的重要途径, 初步估计可储存至 2050 年累计排放量的一半. IPCC 正组织编写《CO₂ 的捕集和存储特别报告》, 对该方面的研究和实践进行全面科学的总结. 地质存储作为一个主要的存储方式, 有存储容量大、时间长、可利用成熟技术等优点. 文中简要介绍 CO₂ 地质存储所要求的地质条件及相关的科学和技术问题, 列举了若干地质存储的实例, 指出我国的自然条件对实施 CO₂ 地质存储有利, 可首先开展相关区域性研究和 CO₂-EOR, CO₂-ECBMR 的试验.

关键词 CO₂ 地质存储 温室气体 全球变化

在过去的十余年里, 一批科学家在孜孜不倦地开辟着自然科学的一个全新的研究课题——CO₂ 的捕集和存储. 这个课题探讨缓解温室效应的一个重要途径, 与人类的生存和自然的发展有极其密切的关系, 涉及自然科学、社会科学和工程技术的众多领域, 成为一个复杂的系统工程. 科学家的努力逐渐得到产业界的认同, CO₂ 的捕集和存储已在世界若干地点实现. 在这种背景下, 由联合国环境署和世界气象组织共同领导的政府间气候变化委员会(IPCC)第三工作组决定组织编写《CO₂ 的捕集和存储特别报告》(以下简称“特别报告”), 对过去在 CO₂ 的捕集和存储方面所作的研究和实践进行系统的总结和评估, 也作为即将编写的《IPCC 第四次评估报告》的重要专题补充. 为此在世界各国邀请了 136 位专家作为协调主要作者或主要作者(其中包括我国 6 人), 从 2003 年开始编写报告, 迄今已召开了 3 次主要作者会议, 准备在 2005 年完稿. 本文介绍特别报告中有关 CO₂ 地质存储的部分, 以推动相关研究在我国的开展.

1 全球气候变化和温室效应的压力

2001 年完稿的 IPCC 第三次评估报告^[1]对当时

关于全球气候变化, 尤其是全球升温的事实和原因的研究成果进行了全面、科学和客观的总结. 报告指出, 20 世纪全球地面平均气温升高约 0.6℃, 是过去 1000 a 中增温最明显的; 90 年代可能是 1861 年有仪器记录以来最暖的 10 年. 自 1750 年以来, 大气 CO₂ 浓度增加了 31%, 是过去 4.5×10^5 a 间(可能是过去 20 Ma 间)的最高水平, 是过去 2×10^4 a 间最高的增长速率. 利用气候模式对大气温室气体和气溶胶浓度及未来气候进行的预测表明, 在 21 世纪温室效应将持续增加; 相应地, 全球气温和海平面都将升高.

CO₂ 是最重要的温室气体. 人类活动排放的温室气体的辐射强迫 CO₂ 占 60%, CH₄ 占 20%, N₂O 占 6%. 预测未来几十年大气 CO₂ 浓度还将持续增高, 人类活动导致的升温可能每 10 年有 0.1—0.2℃, 其中大气 CO₂ 的影响略高于 50% 到 75%^[1]. 人类活动排放的 CO₂ 的 75% 来自化石燃料, 其他则主要由土地利用变化尤其是森林砍伐引起^[2]. 有固定排放源的工业排放占 63%, 其中一半以上由发电厂排放, 其次为水泥厂和天然气工业的

2004-10-08 收稿, 2004-12-25 收修改稿

E-mail: zhoudiscs@scsio.ac.cn

排放^[3], 这部分排放适于被捕集和存储. 对人类活动排放的 CO₂ 进行捕集和存储将是降低温室效应的重要手段之一. 降低温室效应的其他手段有: 降低能耗、使用较低排放的能源(如用天然气取代煤)、使用可再生能源或核能等. 初步估计通过 CO₂ 捕集和存储(CO₂CS), 可储存至 2050 年累计排放量的二分之一.

2 CO₂ 的捕集和存储特别报告

在过去的十多年中, 西方一些科学家对 CO₂CS 进行了大量研究, 并与企业结合, 进行了一些开拓性的实践. “特别报告”包括 10 章, 分别总结和评估有关 CO₂ 的来源、捕集、运输、存储、成本等方面的研究成果和待研究问题. 其中有 3 章专门讨论存储问题, 而“地质存储”和“海洋存储”是主要类型. “地质存储”指将所捕集的 CO₂ 储存到地下深处与大气隔绝, 它作为一个主要的存储方式, 有存储容量大、时间长、可利用成熟技术等优点. “海洋存储”指把 CO₂ 存到海洋深处而与大气隔绝. 一种方式是将 CO₂ 注入温跃层以下, CO₂ 将溶解在海水中, 扩散和参加自然界的碳循环; 另一种方式是将 CO₂ 注入 3 km 水深以下, 在洋底形成“湖泊”, 表面被水合物覆盖. 海洋存储的容量是无限的, 对于那些不具备地质存储条件的地区尤为重要, 但目前还处于对其物理化学机理、生态效应和相关技术进行研究和模拟的阶段, 尚无实践案例. 本文着重介绍地质存储.

3 CO₂ 的地质存储

自然界中 CO₂ 气藏的存在已证实了 CO₂ 可在地下存储数万至数千万年. 适合于 CO₂ 地质存储的介质有: 油气田、煤田、含咸水地层、其他地质介质(多孔玄武岩、油页岩、盐层、废矿坑等). 由于 CO₂ 地质存储相当于造一个地下人工气藏, 其选址条件与天然气藏的储层条件类似, 主要考虑以下因素: (1) 位于地质构造稳定的地区, 地震、火山、活动断裂不发育, 所储存的气体向大气泄漏的可能性微小; (2) 储层孔隙度和渗透率高, 有一定厚度, 能达到所需要的存储容量; (3) 上覆不透气盖层. 与天然气藏的储层条件不同的是还要考虑以下因

素: (1) 储层压力超过 CO₂ 的临界值(临界点 31°C, 7.4 MPa), 在这种压力下 CO₂ 受到压缩, 密度达到 600—800 kg/m³, 浮力低于天然气而高于原油. 因此, 储层深度一般在 800 m 以下; (2) 较低的地热梯度和地热流值, 使 CO₂ 在较小的深度下能达到较高的密度^[4]; (3) 对人类社会和自然环境、资源带来的负面影响小, 如选择含咸水地层就是为了保护自然界的淡水资源; (4) 成本因素, 如离 CO₂ 捕集源较近等.

由上述可推知, 只要选址适当, CO₂ 地质存储可具备以下优点: (1) 存储量大, 因为符合条件的地质介质非常普遍; (2) 存储时间长, 对环境的负面影响可以很小; (3) 物理化学机理清楚, 与天然的 CO₂ 气藏的机理相似; (4) 可利用天然气勘探的成熟理论、经验、技术和设备.

CO₂ 地质存储的成本取决于许多因素, 如储存地与 CO₂ 源的距离、储层性质(深度、渗透率、岩石成分)、地理条件(海洋、平原或山区)、构造环境(活动性)、已有设施的可利用程度、气源成分、所采用的技术等. 有资料表明, 对于每吨 CO₂ 净存储, 含咸水地层存储的成本约 1—18 美元, 与煤层气强化采收相结合进行的成本约 0—30 美元^[5]; 但这些数字不一定有代表性. 有一点是肯定的: 如果能与强化采油(CO₂-EOR)或强化采煤层气(CO₂-ECBMR)相结合, CO₂ 地质存储还有可能提高油气采收率, 从而提高经济效益.

4 CO₂ 地质存储的实例

迄今, CO₂ 地质存储已经在美洲、欧洲、非洲得到实践, 在澳洲和亚洲(日本)也在研发和计划之中(图 1).

4.1 与 CO₂-EOR、CO₂-ECBMR 或其他工业目的相结合的实例

最初的 CO₂ 地质存储实践是为了强化采油(CO₂-EOR)或强化采煤层气(CO₂-ECBMR). 美国在 1970 年左右开始利用 CO₂ 充注来进行强化采油, 现在有 67 个 CO₂-EOR 正在作业, 每年充注 25 Mt CO₂, 但其 CO₂ 大部分来自天然气藏, 只有 3 Mt 来自人类排放^[6]. CO₂-EOR 可增加采收率为在位原油的 7%—23%, 平均为 13.2%^[7-10]. 强化采煤层

气 (CO₂-ECBMR)有可能提高甲烷采收率为在位气体的近90%。其优点是每采收一个分子的甲烷可存

储两个分子的CO₂，缺点是煤层渗透率低，增加了需要的钻井数，从而提高了成本^[11,12]。

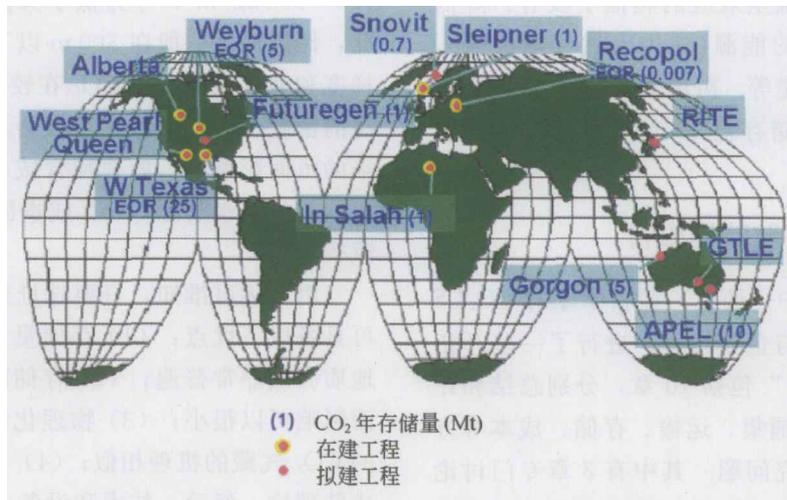


图1 已实施或已计划的CO₂地质存储工程

Weyburn 油田 CO₂-EOR 工程^[13,14]: Weyburn 油田位于美国中北部至加拿大中南部的 Williston 盆地, 面积 180 km², 原油 2.2×10⁸ m³, 产层为早石炭世灰岩。裂隙主要发育于灰岩下部, 因此早先的注水二次采油未影响其上部产层。2000 年末开始 CO₂-EOR, CO₂ 来自 300 km 以外北达科达州的 Dakota 气化工厂; 该厂通过煤的气化生产甲烷气, 伴生较纯的 CO₂, 经去水和压缩后通过管道输给 Weyburn 油田。计划经过 20—25 年的时间, 以约 18 Mt CO₂ 充注一半以上的油田体积, 减去生产过程所排放的 CO₂, 实际净存储 14 Mt CO₂, 同时由 CO₂-EOR 将获得的在位原油的 60%。自 2000 年以来, 该项目每天充注 CO₂ 约 1000 t, 每年增产原油 800 m³。

加拿大 Alberta 酸性气体充注工程^[4]: 酸性气体指 CO₂ 和 H₂S 的混合物。1989 年起, 加拿大政府规定供燃烧的酸性气体不得超过一定的含硫量, 否则要求脱硫。由于脱硫不但成本高, 而且所脱的硫的储存会带来许多法律和环境问题, 因此企业决定将酸性气体注入地下。由于酸性气体中大部分甚至 90% 以上是 CO₂, 这种作业客观上起到了 CO₂ 地质存储的作用。

1989 年以来在加拿大的 Alberta 和 British Columbia 省批准实施酸性气体地下存储的有 48 处,

其中 41 处至今仍在工作, 截至 2003 年底总共储存了 2.5 Mt CO₂ 和 2 Mt H₂S。所用的储层主要是含咸水地层, 其次是采空的油气藏或其下方的水层。围岩以碳酸盐岩为主, 其次砂页岩, 盖层多数为页岩, 少数为致密灰岩、蒸发岩和硬石膏层。

4.2 挪威 Sleipner 含咸水层 CO₂ 存储工程^[15]

这是世界上第一个完全为了对 CO₂ 进行地质存储而实施的具商业规模的工程, 为 CO₂ 的地质存储及其监测提供了极其宝贵的经验。

Sleipner 天然气田位于北海, 距挪威海岸线约 250 km, 气层深度 2 km 以上。该气田的 CO₂ 含量约 9%, 而商业天然气的 CO₂ 含量不得超过 2.5%。按照挪威国会 1990 年制定的制度, 将 CO₂ 排放到大气中就要缴纳碳排放税。作业者 Statoil 决定将 CO₂ 注回地层中, 以同时达到保护环境的目的。因此, 在 1996 年投产的气田中包括了世界上第一个海上 CO₂ 捕集平台和世界上第一个海上 CO₂ 回注钻孔。

CO₂ 的储层为 Utsira 组高渗透率砂岩, 埋深 800—1000 m, 厚 200—300 m, 面积 32000 km², 顶面平坦, 盖层为页岩, 储存容量在 n×10¹¹ t 数量级。自 1996 年 10 月项目建成以来, 每年向地下充注 CO₂ 约 1 Mt (约 2700 t/d), 至 2004 年初已注入 6—7 Mt, 估计在工程寿命内总共可储存 20 Mt

CO₂。研究和模拟表明,在数百至数千年内 CO₂ 将溶解于孔隙水中,因重量而向储层底部集中,几乎无泄漏的可能性。

在国际能源组织(IEA)温室气体计划和欧共体

研发计划的支持下,将 Sleipner 作为一个示范工程,注资 4500 万美元开展了监测计划(SACS),迄今已用人工地震方法对 CO₂ 的储存状态进行了两次监测,表明储存状态良好,无泄漏迹象(图 2)。

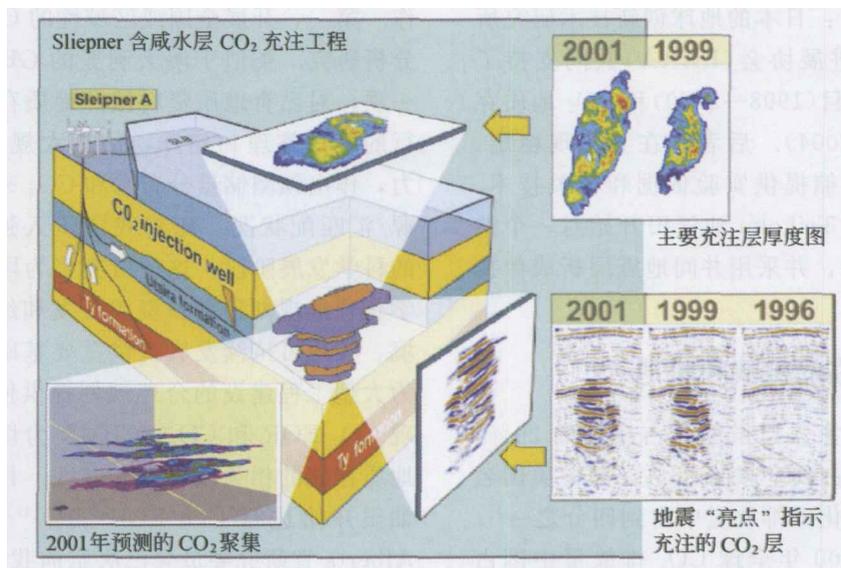


图 2 Sleipner 工程的地质模型及其地震监测结果

可见 CO₂ 气体在盖层之下逐渐扩散,并受 Utsira 组中的低渗透夹层影响^[15]

4.3 在建或计划的工程项目

Statoil 及其合作者于 2001 年在白令海的 Snøhvit 气田开始了另一个 CO₂ 地质存储工程,将富 CO₂ 的天然气通过 160 km 长的管线输到陆上的液化天然气厂,分离出的 CO₂ 再输回气田,注入另一个含咸水地层。该工程将在 2006 年投入使用,年储存 CO₂ 约 7 Mt。

Exxon 和印尼国家石油公司正在考虑在南海 Natuna 气田开展类似的项目。该气田是世界上最大的气田之一,但 CO₂ 含量高达 70%。如果项目启动,每年将有 1×10⁸ t CO₂ 注入海底以下深处地层中^[16]。

5 重大研究项目

作为地质学界的一个新课题,CO₂ 地质存储的相关研究近十年来在国外非常活跃,出现一些国际性或全国性的重大研究项目,如前面提到的欧共体为对 Sleipner 示范工程进行长期监测的 SACS 项目,

还有澳大利亚的 GEODISC 计划、日本 RITE 的研究项目等。

GEODISC 计划¹⁾: 澳大利亚于 1998 年在成立了世界上第一个作为政府机构的温室气体办公室(AGO),于 1999 年成立了温室气体技术联合研究中心(CO₂CRC),1999 年开始执行 GEODISC 计划由澳大利亚联邦科学和工业组织(CSIRO)石油资源研究院(APCRC)牵头,许多大学及研究机构的研究人员参加,主要研究内容有:(1) 区域分析:确定适合作为 CO₂ 储层的地层参数,进行区域资料的编辑整理和建库,作出澳大利亚大规模储存 CO₂ 的能力分布图和 CO₂ 来源分布图,分析源/汇匹配状况。(2) 案例研究(2—4 个),建立 CO₂ 充注的地质模型和流体模型。(3) CO₂—水/卤水-岩石系统的实验研究,建立系统的化学模型。(4) 岩石物性研究(波速、渗透率、毛细压力等),储层和盖层的模拟。(5) CO₂ 充注的化学-动力学耦合模型。(6) CO₂ 充注的监测技术(声速特性、含 CO₂ 地层弹性波传播

1) www.apcrc.com.au/programs/geodisc_res.html

模型、相关的地震探测技术和钻井监测技术)。(7) 风险分析(污染和环境影响的数学模型)。(8) 经济模型。(9) 国际合作。(10) 自然界相似案例。(11) 教育和培训。

RITE 研究项目¹⁾: 日本的地球创新技术研究所(RITE)与日本工程进展协会(ENAA)共同支持了CO₂海洋存储研究项目(1998—2000)和CO₂地质存储研究项目(2000—2004)。后者旨在为实现稳定、安全和长期的地质存储提供实验依据和相关技术。日本已在本州西北的Teikoku油气田开始对一个钻孔进行CO₂充注试验,并采用井间地震层析成像技术进行监测。

6 我国地质界面临的挑战和机遇

据报道,发达国家人口虽然仅占全球的20%,但排放的二氧化碳却占到全球的66%,其中美国名列第一,在全球二氧化碳排放量中占到四分之一²⁾。但也有人统计³⁾,2000年全球CO₂排放量中国占25%,北美占20%,欧洲占13%。无论这些数字是否准确,我国现在是世界上的CO₂排放大户之一是不争的事实。虽然《京都议定书》不要求发展中国家承担CO₂减排任务,但发展中国家依照“共同但有区别的责任”的原则,也承担了控制气候变化的责任。我国人口众多,经济发展迅速,能源结构以煤为主,大量CO₂排放的情况在相当长的时间内很难改变。在这种情况下,实施CO₂地质存储可能是一个行之有效的战略性选择。

我国的自然条件对实现CO₂地质存储有利。在我国经济发达的东部和中部从北到南分布着松辽、渤海湾、鄂尔多斯、苏北、四川、江汉、三水、南雄等许多大大小小的沉积盆地,在近海还有渤海、黄海、东海、珠江口、北部湾、莺歌海等大型沉积盆地,其中不难找到符合CO₂的地质存储要求的地质条件,容易达到CO₂的源和汇在地理位置上相近,可降低储存成本。尤其是这些盆地中不少是重要的油气产地和煤田,有实现CO₂-EOR和CO₂-ECBMR的需求和可能,容易将CO₂地质存储与挖

掘油气田和煤田的生产潜力结合起来,实现减缓我国能源缺口压力和降低温室效应的协调统一,实现经济发展与环境保护的协调统一。

目前,我国应该优先开展以下两方面的研究工作。第一,开展全国或区域性的CO₂地质存储潜力分析研究。类似于澳大利亚的GEODISC计划的第一项,对已有地质资料按照地质存储的参数要求进行的编辑整理和建库,估算大规模储存CO₂的能力,作出预测储量分布图和CO₂来源分布图,分析源/汇匹配状况。随着我国步入强调“绿色GDP”的科学发展阶段,这项研究将为国家和地方政府科学合理地规划和部署资源开发和经济建设、保护环境、实现可持续发展提供重要基础资料,同时也可大型工程建设的合理规划提供依据。第二,以实现CO₂-EOR和CO₂-ECBMR为切入点,开展CO₂地质存储的相关研究和实践。目前我国只在少数油田开始进行CO₂-EOR试验^[17],据报道加拿大Alberta省研究委员会已决定向我国传输CO₂-ECBMR技术³⁾。随着我国越来越多的油气田面临着稳产挖潜的压力,通过科研单位与企业相结合的方式,大力加强CO₂-EOR和CO₂-ECBMR的相关研究和试验,尽快投入应用,可作为我国实施CO₂地质存储的第一步。

CO₂地质存储给地质工作者和科学家开辟了一个崭新的、具有广阔前景的研究领域。从《CO₂地质存储特别报告》所涉及的内容可看出,这是一个可以利用我们在地质研究和资源勘探中积累的知识、经验、资料和技术,同时又需要进行自然科学和社会科学的交叉、自然科学中各学科间的交叉、科学和技术的交叉、科研和生产的交叉的,内容非常丰富的领域,是保护地球环境、缓解温室效应这个关系世界前途和人类命运的伟大事业的一部分。国外的科学家已经先行了一步,我国科学家应该急起直追,奋力跨越,做出我们应有的贡献。

后记 在本文即将刊出之际,IEA Greenhouse Gas R&D Program在2005年3月份的一期简讯完

1) www.rite.or.jp/english/E-home-frame.html

2) 庄贵阳,步维艰的《京都议定书》。<http://www.china.com.cn/>,2003年01月

3) http://www.arc.ab.ca/energy/Coalbed_pilot.asp

全用于刊登关于 CO₂ 地质存储的文章,报道了最近一年来世界各地非常活跃的研究和实践新动态.在美国,由能源部资助的 Frio 前期实验于 2004 年 10 月 4—14 日在墨西哥湾边将 1600 t CO₂ 最近注入深 1500 m 地 Frio 含咸水砂岩层中,之后进行了全面严格的监测,包括从地面和观测井重复进行地球物理和地球化学测试,对地下水、土壤、植被、居民等进行各种测试和观察等.6 个月的监测结果表明,CO₂ 在含咸水砂岩层中的存储是安全的,对人类健康和环境不会带来影响.该试验还检验和发展了有关 CO₂ 地质存储的各种模式和技术,积累了经验.此外,俄亥俄州的 Ohio River Valley 存储计划旨在将火电厂所排放的 CO₂ 注入地下,目前选址工作即将完成,下一步将进入灌注阶段.在西欧,Sleipner 的经验被用于 4 个岸上或海上的 CO₂ 地质存储试验区,即丹麦的 Kalundborg、挪威中部海外、英国的 Valleys Energy 计划、德国的 Schweinrich.此外,法国 2004 年在 RTPG 计划中对全国油气田可供 CO₂ 存储的容量进行了评估,现在又由工业部资助启动了 PICOREF 计划,旨在选择试验场址,开发和检验相关技术.在亚洲,韩国在 2002 年成立了 CO₂ 减排和存储研发中心(CDRS),开展了相关研究,并于 2005 年 1 月在科技部的资助下召开了《第一届 CO₂ 减排和存储国际研讨会》.总之,世界上许多国家在政府大力支持、企业和科研机构积极参与的形势下 CO₂ 地质存储的研发进展得非常快,已经不是新课题,而是即将成为一个热门领域了.

参 考 文 献

- 1 IPCC. 气候变化 2001: 综合报告决策者摘要. 政府间气候变化专业委员会, 2001, <http://www.ipcc.ch/pub/un/syrchinese/spm.pdf> [2004-09-20]
- 2 IEA. CO₂ emissions from fuel combustion, 1997—2001, OECD/IEA, 2003, Paris
- 3 Gale J. Overview of CO₂ emissions sources, potential, transport and geographical distribution of storage possibilities. Workshop on Carbon Dioxide Capture and Storage-Proceedings. Regina, Canada. 2002, 15—29
- 4 Bachu S, Gunter W D. Acid Gas Injection; A Study of Existing Operations (Phase 1: Interim Report). Report Number PH4/15. IEA Greenhouse Gas R&D Programme. 2003, 1—55
- 5 Hendriks C, Graus W, van Bergen F. Global carbon dioxide storage potential and costs. Report Ecofys & The Netherland Institute of Applied Geoscience TNO. Ecofys Report EEP-02002, 63 2002, 45
- 6 Stevens S H, Kuuskra V A, Gale J, et al. CO₂ injection and sequestration in depleted oil and gas fields and deep coal seams; Worldwide potential and costs. Environmental Geosciences, 2001, 8(3): 200—209
- 7 Martin F D, Taber J J. Carbon dioxide flooding. Journal of Petroleum Technology, 1992, 44(4): 396—400
- 8 Holtz M H, Nance P K, Finley R J. Reduction of greenhouse gas emissions through CO₂ EOR in Texas. Environmental Geosciences, 2001, 8(3): 187—199
- 9 Moritis G. Enhanced oil recovery. Oil and Gas Journal, 2002, 100(15): 43—47
- 10 Moritis G. CO₂ sequestration adds new dimension to oil, gas production. Oil and Gas Journal, 2003, 101(9): 71—83
- 11 Murray D K. Technology development in western North America can enhance the worldwide potential of coal bed gas. Proceedings of the CIM-SPE Symposium on Technology in the 90's—Prospering in a Changing Environment, 10—13 June 1994, Calgary, Alberta. 1994, 90—103
- 12 Gunter W D, Gentzis T, Rottenfusser B A, et al. Deep coalbed methane in Alberta: A fuel resource with the potential of zero greenhouse gas emissions. Energy Conversion and Management, 1997, 38(Suppl.): S217—S222
- 13 Malik Q M, Islam M R. CO₂ injection in the Weyburn field of Canada: Optimization of enhanced oil recovery and greenhouse gas storage with horizontal wells, SPE paper 59327, 2000
- 14 Davis T L, Terrell M J, Benson R D, et al. Multicomponent seismic characterization and monitoring of the CO₂ flood at Weyburn field, Saskatchewan, The Leading Edge, 2003, 22(7): 696—697
- 15 Karstad O. Geological Storage, Including Costs and Risks, in Saline Aquifer. Proceedings of the workshop on carbon dioxide capture and storage, 18—21 November 2002, MIT Centre for Energy Policy Research, Regina, Canada, 2002, 53—60
- 16 Hanisch C. The pros and cons of carbon dioxide dumping. Environmental Science and Technology, 1998, 32(1): 20A—24A
- 17 田仲强,李淑兰,王志敏,等.注蒸汽加气体开采稠油技术室内研究与现场试验应用.油田化学,2002,19(1): 47—50