



CMG

碳 封存 模拟指南

CMG 是全球领先的 CCS 模拟软件独立供应商

CMG 提供创新的模拟技术和专业咨询服务，助力全球 CCS 作业者优化项目价值并降低相关风险。科学模拟技术与深厚行业专长的结合，使 CMG 能够解决价值链上的复杂问题。

CMG

目录

1 背景知识

- 1.1 二氧化碳封存 (CCS) 概述
- 1.2 CMG 软件在 CCS 中的应用定位

2 模拟策略

- 2.1 稳态模拟与瞬态模拟对比
- 2.2 稳态模拟适用场景
- 2.3 瞬态模拟适用场景

3 软件模块

- 3.1 GEM — 多组分/多相 CCS 模拟器
- 3.2 CMOST — 多目标优化与不确定性分析
- 3.3 Builder — 三维地质与流体模型搭建
- 3.4 IMEX — 黑油/扩展黑油快速模拟
- 3.5 CoFlow — 井筒-地面-储层一体化耦合
- 3.6 CO₂LINK — CO₂ 运移与封存后评估插件

4 CCS 研究标准化 workflow

- 4.1 三维流体与地质模型准备
- 4.2 储层属性建模与校准
- 4.3 网格划分与粗化
- 4.4 流体性质与相态建模
- 4.5 盖层/底板/侧向隔层建模
- 4.6 边界条件设定
- 4.7 初始地质力学参数估算
- 4.8 滞后效应与 CO₂ 溶解度模型
- 4.9 地球化学反应模型

5 风险与完整性分析

- 5.1 断层活化风险评价
- 5.2 盖层完整性分析
- 5.3 储层膨胀与地面隆起预测

6 CO₂ 封存效果评估

- 6.1 CO₂ 埋存量核算
- 6.2 多目标优化 (封存率、安全性、经济性)

7 井筒与地面设施模拟

- 7.1 CoFlow 耦合井筒-地面流程
- 7.2 CO₂ 注入全过程一体化模拟

8 附录

- 8.1 全球 CCS & CCUS 项目案例
 - 8.1.1 美国地区项目
 - 8.1.2 欧洲地区项目
 - 8.1.3 亚太地区项目

CMG 的 CCS 模拟



IMEX

- Petrel 转 IMEX 用于高级 CCS 范围界定



GEM

- 完整详细的复杂 CCS 模拟



CoFlow

- 高级稳态井筒及二氧化碳注入系统整体视图



CO2LINK

- 井筒内及井筒附近小规模瞬态注入的完整详细描述

背景

CMG的油藏模拟方案将基于广泛使用GEM的二氧化碳注入项目的设计工作和反馈，包括挪威Sleipner（图1）和Snohvit二氧化碳封存项目长达12年的经验；加拿大萨斯喀彻温省Weyburn二氧化碳提高采收率（EOR）项目的设计；阿尔伯塔省的HARP和WASP项目；澳大利亚的Gorgon和Otway项目；美国Yates EOR项目；荷兰鹿特丹港；英国HyNet North West项目；以及阿尔伯塔省和不列颠哥伦比亚省众多活跃的酸性气体注入项目。目前大多数正在运行的（注入）二氧化碳封存项目都利用了CMG的GEM软件进行项目设计和风险分析。与领先的行业研究机构如阿尔伯塔研究理事会、日本地球创新技术研究所（RITE）以及众多大学的持续合作，确保了CMG的组分模拟器GEM在二氧化碳应用领域保持最先进的技术水平。

在枯竭气田CO₂储存工程中，低压条件是极具代表性的技术挑战。由于枯竭气藏长期开采后压力水平显著降低，且注入CO₂的温度通常远低于储层原始温度，这种“低压-低温”双重工况对井筒管理提出了精细化要求。若管理不当，极易引发流动保障失效与近井地带损害等问题——例如低温条件下CO₂与地层流体结合形成水合物，塞井筒通道；温度差导致的热应力则可能造成套管变形、水泥环密封失效等井下结构损坏。因此，需通过系统优化注入参数（如注入速率、压力控制）、优化井筒结构设计，保障CO₂储存工程的安全稳定运行。

储层体积和注入能力是选择最优二氧化碳封存地点的两大关键标准。然而，流体流经储层时的行为决定了二氧化碳封存的数量和类型，进而影响选址排序。对于枯竭油气藏而言，溢出点压力和再增压效应主要控制封存效果，并决定这些因素是否会随时间发生变化。

含水层中的封存与单纯储存不同，因为通过溶解、残余气体捕集和矿化等机理，力求最大限度地将二氧化碳固定并固化，尽量减少自由气体的迁移。与体积储存方法相比，每个独立含水层中盐水和二氧化碳的相对渗透率是实际封存方法的关键要素。深入的地球化学模拟能力对于理解二氧化碳注入后的变化至关重要。

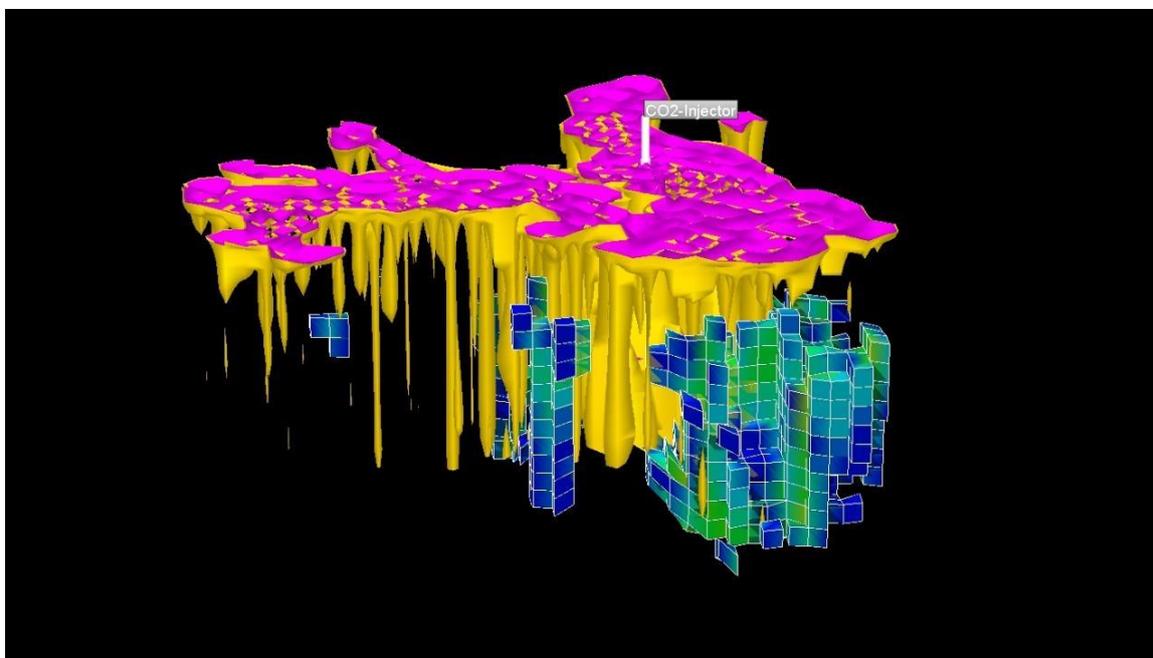


图 1. 挪威 Sleipner 油田 500 年二氧化碳封存模拟

诸如含水层岩石等多孔材料会表现出滞后效应（图 2），即随着饱和度变化，孔隙喉道中的毛细管压力会阻止部分流体流动。在注入二氧化碳的同时注入咸水可利用这一效应来封存温室气体。随着注入过程中 CO₂ 饱和度的上升，其流动性增强。同时注入储层原生盐水会降低 CO₂ 饱和度，在此循环过程中，部分二氧化碳会永久滞留于孔隙空间内。

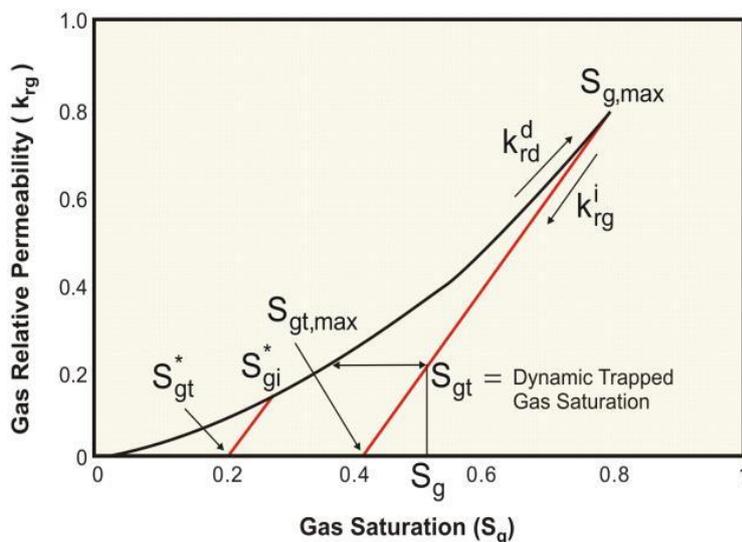


图 2. 滞留气体的滞后效应

GEM 还能通过严格的三维模拟来处理与压力和温度变化相关的拉伸和剪切应力，从而应对地表隆起、沉降、断层再活化及盖层破裂等地质力学效应；在数据不足时，亦可采用较低分辨率的分析方法。针对枯竭储层，可研究热储层中注入低温流体时井周响应，包括原始存储空间回弹分析、盖层所受应力、可能引发破裂的压力阈值、现有断层周边孔隙压力变化是否可能导致滑移，以及井周温度变化如何影响破裂压力等。下图展示了 GEM 中完整的三维地质力学模块示意图。

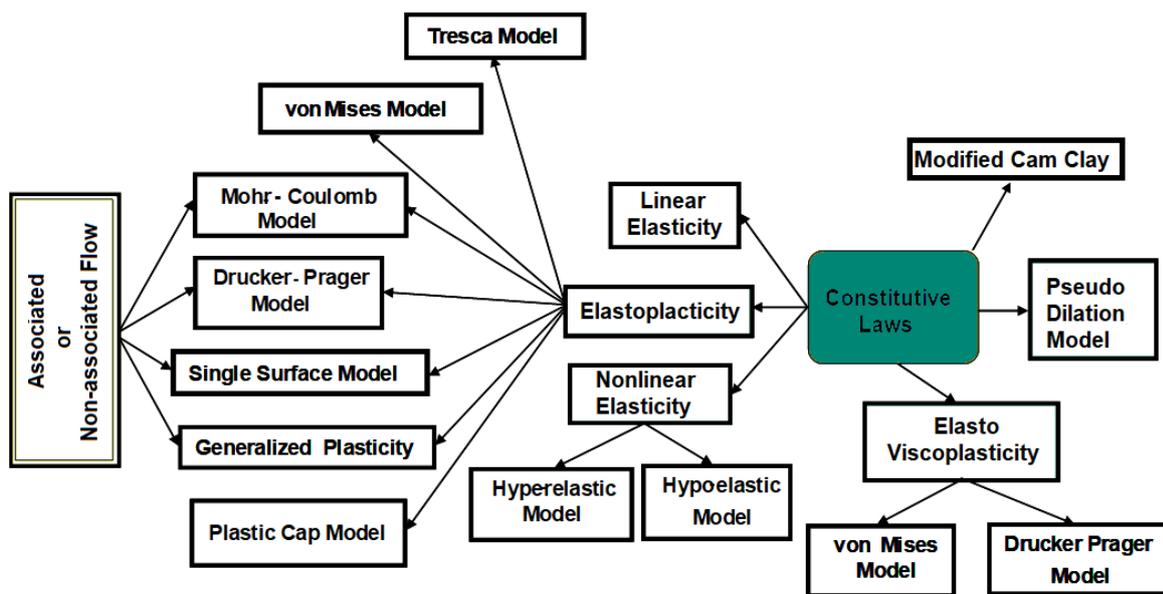


图 3. GEM 中可用的地质力学本构模型

地球化学是长期碳捕集与封存（CCS）评估情景中评价矿物封存效能的另一关键特征。GEM 能够将地球化学计算与流体流动及地质力学模拟相耦合。若发生水分蒸发导致井筒周围盐析进而影响注入能力时，地球化学分析对于评估此类注入能力损失也至关重要。CMG 通过图形化向导工具辅助用户在 Builder 中构建复杂的地球化学模型。

GEM 可与 Kongsberg Digital 公司的 Ledaflow 一维瞬态多相流（井筒与管道）模拟器耦合。这种瞬态井筒与动态油藏流动模型的耦合系统，为注入测试的设计与分析提供了能力。这使我们能够理解项目生命周期中的启动与关停事件及其影响，精确捕捉衰竭系统中的相变效应，并帮助设计安全的井操作范围。

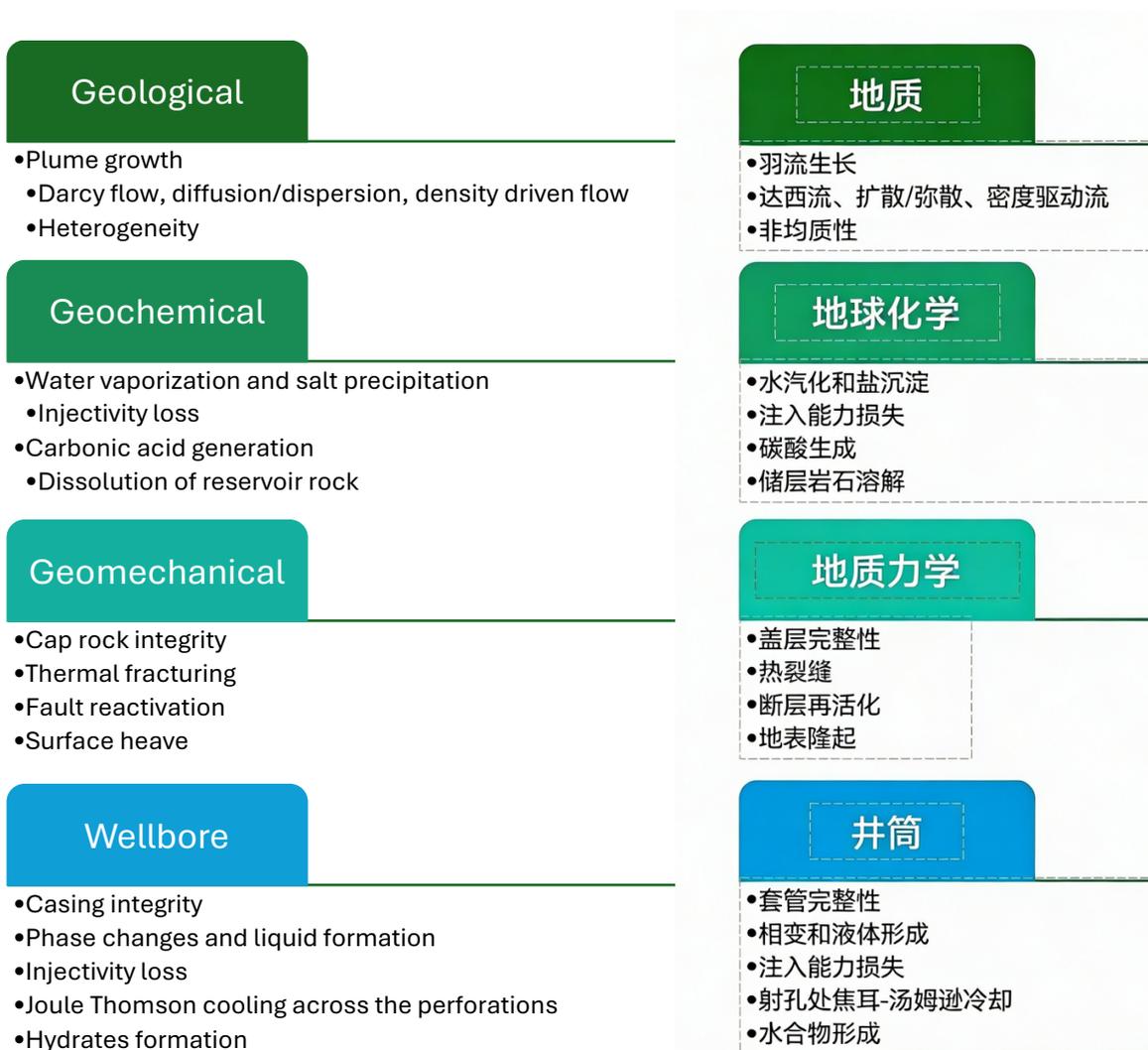


图 4. 相关 CCS 风险

CCS 中的稳态与瞬态模拟

稳态模拟

长期决策制定 —— 瞬态储层（GEM）与稳态井筒 / 地面（CoFlow）模型间的耦合。

稳态模型假设系统的所有流动条件和属性相对于时间保持恒定。

- 描绘流程系统的整体图景
- 预测操作约束与限制
- 注入速率能力与井筒性能
- 注入网络设计与优化
 - CO₂ 供应固定条件
 - 阀门开度恒定
 - 压缩机 / 泵工况恒定

瞬态模拟

短期决策制定 —— 瞬态储层（GEM）与瞬态井筒 / 地面（Ledaflow）模型间的耦合。

瞬态模型能够处理随时间变化的条件，并评估其对热和流动预测的时间相关性影响。

- 压力和温度的快速变化（启动、关井和重启）
 - 焦耳 - 汤姆逊冷却效应
 - 二氧化碳相变
 - 流动状态变化
- 井筒内温度变化大
- 二氧化碳注入能力降低
- 腐蚀
- 侵蚀



GEM

GEM 是全球领先的用于组分、化学、热力学及非常规储层模拟的方程状态 (EoS) 模拟器。GEM 能将流体动力学与地球化学、地质力学、热效应相结合。与其他解决方案不同，GEM 可以在单一软件内完成 CCS 研究。



GEM 能够精确模拟二氧化碳注入地层或咸水层的长期效应，并借助其状态方程和地球化学实现帮助确定 CCS 项目的可行性。

- 模拟并可视化二氧化碳在地质储层和咸水层中长期封存的影响
- 通过纳入由滞后导致的气体捕集效应、溶解度和盐度变化引起的水相密度与黏度变化，以及矿物沉淀和溶解机制，提高计算准确性
- 针对两相烃类系统的水蒸发模型进行了重构，以提高准确性
- 通过包含完整的水相化学平衡计算来提高 CCS 模型的可靠性
- 可用于模拟模型的广泛水相和矿物反应库
- 可与瞬态井筒模型耦合，以准确评估注入能力丧失的风险
- 通过等焓 (PH) 闪蒸计算处理纯 CO₂，替代传统的等温 (PT) 闪蒸计算、
- 允许零下温度
- 使用 CMG 的前处理器 Builder，快速高效地开发 CO₂ 封存模拟模型

地球化学

GEM 能够与地球化学反应模型完全耦合，用于估算矿化度、pH 值、盐析出及矿物沉淀。地球化学对于长期监测模拟至关重要。用户可从 PHREEQC、MINTEQA 和 Wolery 数据库导入化学反应数据。

- 通过化学计量学方法模拟化学反应
- 模拟快速可逆水相反应与化学平衡反应
- 根据过渡态理论 (TST) 模型建立矿物溶解与沉淀的速率定律
- 提供将矿物反应建模为拟平衡反应的能力，作为过渡态理论 (TST) 的替代方案
- 通过矿物溶解和沉淀改变多孔介质的孔隙体积

热效应

注入的二氧化碳温度可能因焦耳 - 汤姆逊冷却效应而降低。注入二氧化碳的冷却可能对注入性产生不利影响。温度的急剧下降可能导致形成密度更大的液态二氧化碳，其在多孔介质中的流动能力较小。温度下降还会增加二氧化碳水合物形成的风险。GEM软件具备开启热力学计算的功能，以考虑CCS操作中的温度变化。

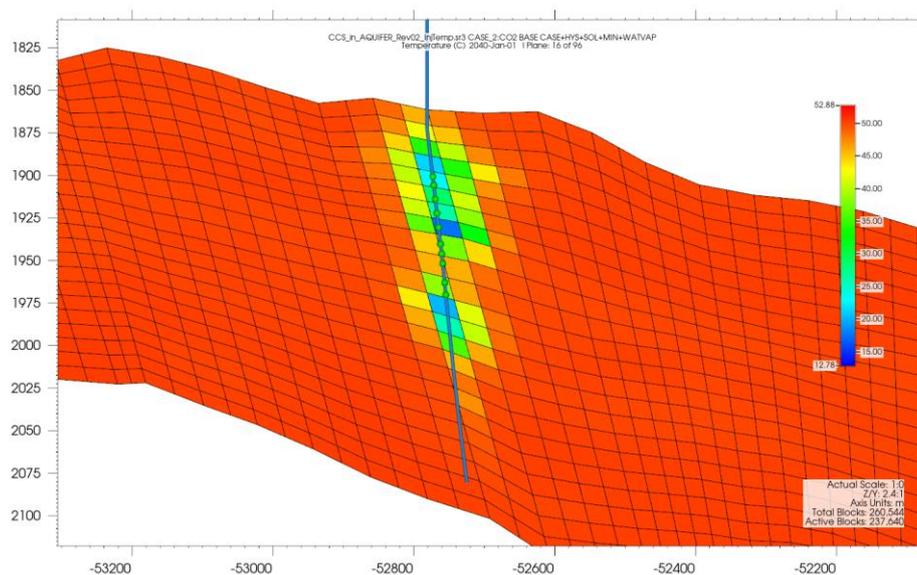


图 5. CO2 注入器周围的温度降低

地质力学

在 GEM 中，严格、迭代耦合的三维地质力学模块能精确模拟 CCS 操作过程中的沉降、压实和膨胀行为。

- 基于有限元的迭代耦合模块，用于精确计算地质力学效应
- 模拟孔隙度相关性和固体组分相关性的地质力学特性

- 模拟应力诱导现象：出砂、近井筒地层坍塌及弹性或塑性变形
- 执行三维压实和膨胀模拟力学计算，研究应力对孔隙度的影响
- 基于滑动趋势模拟断层活化并改变传导率
- 模拟裂缝起裂与扩展，用于理解裂缝机制及应力或应变动态的影响
- 通过查表直接指定应力与裂缝 / 基质渗透率之间的关系

储层与地质力学耦合

GEM 提供两种耦合方法：单向和双向。

在单向耦合方法中，压力和温度从储层模拟器传递至地质力学模块。如图 6（左）所示，地质力学模块不会向模拟器反馈任何信息。

在双向耦合方法中，由地质力学模块计算的应力和应变用于确定新的孔隙压缩系数和绝对渗透率。压力和温度从储层模拟器传递至地质力学模块。图 6（右）展示了双向耦合的流程图。

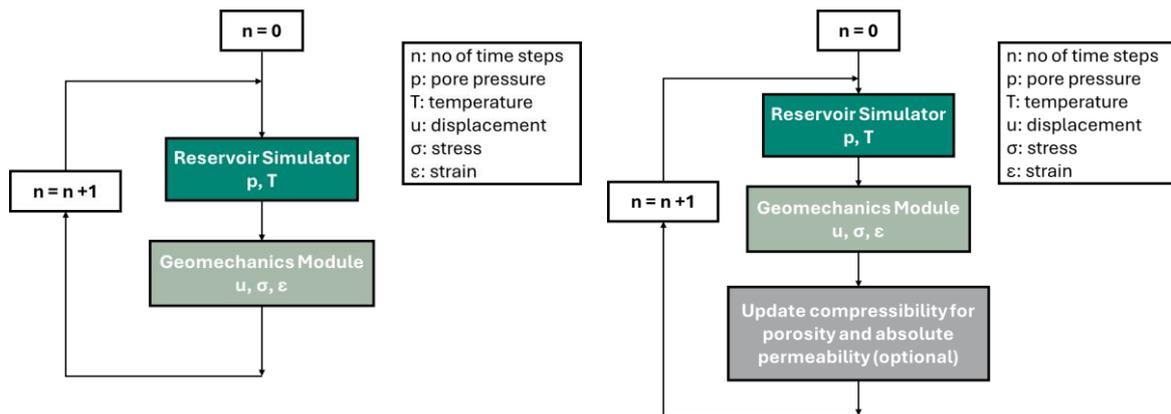
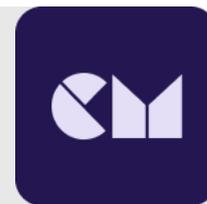


图 6. 单向（左）与双向（右）地质力学耦合流程图

CMOST

CMOST 是 CMG 的敏感性分析、历史拟合、优化以及不确定性评估工具，有助于基于油藏模拟的工作流。CMOST 扩展了 CMG 的模拟能力和潜力，改善了业务决策和流程。

通过结合先进的统计分析、机器学习和无偏方法，并运用工程师工程专业知识进行数据解读，确定最佳解决方案。



增强智能历史拟合

CMOST 能够以最少的工程时间和尽可能少的运行次数找到最优解决方案。

- 利用先进的统计方法自动化历史拟合过程
- 高级计算引擎：CMG DECE、CMG 贝叶斯引擎、粒子群优化（PSO）、差分进化（DE）、拉丁超立方加代理或随机暴力方法
- 运用先进的实验设计（ED）技术，以最少的试验次数创建并组合最佳匹配方案
- 轻松分析油藏与开采过程，辅助历史拟合

优化

CMOST 利用人工智能（AI）技术，以尽可能少的运行次数寻找最优解决方案。

- 快速运行数千个案例以评估 HM 变异性或现场优化及其相关概率
- 定义自定义用户优化目标函数
- 使用高级计算引擎：CMG DECE、PSO、DE、拉丁超立方加代理或随机暴力方法
- 以最少的模拟运行次数确定最佳（全局最优）开发计划或操作条件

风险

CMOST 通过自动化的鲁棒优化工作流程，能够最大化成功概率并降低您的风险。

- CMG 的 PAR 方法通过利用 “失配” 模拟结果和实测生产数据来定义后验概率密度函数
- 提高 RBF 代理模型在历史拟合良好区域的准确性
- 在油田应用中，使用多个历史拟合模型生成 P10、P50 和 P90 预测
- 利用高级分析和图形输出，准确预测储层成功概率，降低风险

Builder

Builder 是 CMG 的前处理软件，通过提供一个框架来实现 GEM 与外部数据源之间的数据集成和工作流管理，从而简化模拟模型的创建过程。



直观模型构建：简化数据输入

交互式、直观且易于使用的界面使用户能够快速高效地整合所有必需数据，从而构建模拟模型。

- 地质建模与地质统计学
 - 利用等高线图、区域厚度图等构建储层构造和三维地质模型
 - 将地质模型粗化用于流动模拟
 - 结合测井曲线和岩心数据，利用地质统计模块进行属性分布计算
- 效率提升工具
 - 轻松导入或创建地质模型、储层属性分布PVT 模型、注入 / 生产历史、井轨迹与完井数据及水力压裂数据
 - 利用网格编辑工具进行网格加密、子模型提取、粗化、网格分割等操作
 - 通过相关式生成相对渗透率和PVT 数据
 - 将数据集从 IMEX 转换为 STARS 或 GEM 以模拟更复杂的开采过程
 - 定义并编辑油藏任意区域或网格的属性
 - 便捷选择需输出的属性和数据至 Results 模块
 - 采用直观的井位规划与油田开发工具，实现基于井网的钻井设计、水平井钻井、定义井组及周期性井控等操作、

地质力学：高效模拟地质力学特性

Builder通过将地质力学效应纳入模拟模型，测试开采过程对储层岩石的影响。

- 沉降、压实和膨胀的精确模拟
- 有多种不同的地质力学模型可用于模拟应力 - 应变关系
- 轻松输入数据以设置地质力学模块
- 全面控制耦合类型及其他地质力学数值参数
- 选择重要的地质力学属性输出到模拟结果

IMEX

IMEX 是一款具备大规模并行能力的快速热计算黑油油藏模拟器。针对高级别碳捕集与封存（CCS）快速评价，IMEX 可与 Petrel 配套使用。用户可直接从 Petrel 转入IMEX，随后无缝切换至 GEM 进行复杂 / 完整的 CCS 模拟，研究热效应对注入或储层流体特征的影响。IMEX 通过单向和双向耦合有限元地质力学，包括热地质力学效应。



CoFlow

CoFlow是业界首个多用户、多学科集成、储层与生产系统模拟（IPSM）软件应用。CoFlow使油藏与生产工程师能够在大型综合石油、天然气及CCS项目中做出明智决策。CoFlow将用于将储层/地质力学模型与井筒/地表模型耦合，评估与CCS操作相关的二氧化碳注入能力和流动保障。



CO2LINK

Kongsberg Digital 与 CMG 联合推出了革命性模拟器耦合系统 CO2LINK，该系统通过整合 Kongsberg Digital 的多相流模拟器 LedaFlow 与 GEM，优化了二氧化碳注入与封存流程。

CO2LINK 使作业者能够更准确地预测并应对因井筒中 CO2 独特相态行为变化及其与储层封存点相互作用可能导致的短期瓶颈与挑战。

CCS 研究工作流程示例

3D 地质与流体模型准备

可以使用 Builder 创建初始的 3D 地质模型。Builder 能够构建笛卡尔网格和角点网格系统，还能通过简易向导导入 RESCUE 地质数据集。如有需要，Builder 还能进行一些特殊的 3D 地质建模处理，例如引入尖灭网格。

储层属性建模与校准

动态和静态储层属性，如孔隙度、绝对渗透率、初始含水饱和度和压力，将利用给定数据填充到初始三维地质模型中。Builder 可通过地质统计学方法辅助储层属性建模过程。

为了估算孔隙度，将收集电缆测井、RCA/SCA 报告和岩心照片以确定可靠的孔隙度基础数据。随后将通过序贯高斯模拟方法确定三维特殊孔隙度分布，该过程可在 Builder 中完成。

若未给定孔隙度与绝对渗透率之间的相关性（ ϕ - k 关系），则需对其进行估算。利用 ϕ - k 关系，可计算出水平（ k_h ）和垂直（ k_v ）方向的三维特殊渗透率分布。

初始条件下的压力与含水饱和度建模需根据储层的实际情况开展。若目标储层为枯竭油气田，其初始条件必须通过 CMOST 软件进行历史拟合来完成校准；若目标储层是盐水含水层，则可采用简化假设，进而生成初始压力与含水饱和度分布图。

网格化和粗化

Builder 软件可通过粗化技术减少网格单元数量。网格单元的最优数量通常需通过启发式试错法确定，而借助 CMG 的优化套件 CMOST，可通过对网格单元数量进行参数化处理，提供一种系统的优化方案——在不损失地质模型准确性的前提下，实现网格单元数量的精准优化。

流体模拟

将基于现有实测数据，构建适用于干气 - 二氧化碳体系的状态方程（EoS）PVT 模型。该状态方程将应用于本研究的所有动态模拟模型中，能拟合油气的历史开采数据，也可用于二氧化碳注入过程的预测分析。

上覆/下伏/侧伏载荷模拟

GEM 软件可在油藏网格基础上添加地质力学网格，且二者相互独立。借助这一设计，无需在油藏网格（含渗流方程）中额外增加网格单元，即可便捷地对盖层、底层及边部地层进行模拟，从而显著节省计算时间。同时，地质力学网格兼容多种网格系统，即便是非正交角点网格也能完美适配。

可针对每种地质力学岩石类型，赋予杨氏弹性模量、泊松比、内聚力、比奥系数、剪胀角等地质力学参数。软件支持选择多种不同的岩石类型模型，例如弹塑性模型可从摩尔 - 库仑模型、德鲁克 - 普拉格模型、特雷斯卡模型及冯-米塞斯模型中任选；若有需求，还可添加断层活化模型。断层在无外力作用时处于非活动状态，而当外力施加并超过特定值后，断层将被激活，流体可通过断层或在断层内部实现运移。模拟过程中会循环计算滑动趋势以评估断层激活状态，当滑动趋势大于最大断层滑动趋势时，断层即发生激活。

可对基质和裂缝的绝对渗透率变化进行模拟。对于基质渗透率，可选择 Li-Chalaturnyk 经验公式或 lookup 表（查找表）两种方式；对于裂缝渗透率，则可选用 Barton-Bandis Model (BB 模型) 或查找表方案。

在 BB 模型中，需通过双重渗透率选项在网格中定义次生裂缝系统：当常规网格内压力升高时，地层应力状态发生改变，导致裂缝面法向应力增大，最终当应力突破岩石的破坏包络线时，会产生新的裂缝（或使原有裂缝开启），从而允许流体通过。默认情况下，BB 模型用于模拟盖层、底层及边部地层中的裂缝生成过程。若要启用该模型，需基于实测数据及类比假设，赋值初始裂缝开度、初始裂缝法向刚度、裂缝开启应力、水力裂缝渗透率、裂缝闭合渗透率及裂缝闭合渗透率残余值等参数。

地层孔隙度和岩石压缩系数的压力相关性也被相应赋值，以计算导致地表隆起或沉降的变形。

建议进行盖层模拟，因为评估泄漏和地表隆起风险至关重要。至于底层和侧层模拟，则视模型规模而定，属于可选步骤。若模拟区域范围相对于注入二氧化碳的有效作用半径足够大，则可跳过底层 / 侧层建模流程。

边界条件模拟

在垂直方向上，除油藏网格外，地质力学网格中的盖层必须建模至地表。若为需要特殊边界条件的扇形模型，则需对底层及边部地层进行建模。同理，含水层需采用数值法或解析法进行表征建模：由于解析法含水层模型不允许气相从油藏向含水层运移，因此对于CCS场景，建议使用数值法含水层模型。

初始地质力学特性估算

需对地质力学参数进行参数化处理与校准，以最大限度缩小一维地质力学分析结果与 GEM 软件通过三维地质力学模型计算得出的结果之间的偏差。CMOST 优化套件将通过自动运行多个 GEM 模拟场景，选出最优的地质力学参数组合。

滞后与二氧化碳溶解度模拟

在 CCS 研究中使用的气水两相系统中，GEM 采用了 Carlson 与 Land 提出的滞后模型。一旦输入了吸吮过程的最大残余气体饱和度 ($S_{gt,max}$)，其余的扫描曲线将由 GEM 自动计算得出。以图 2 为例，最大残余气体饱和度为 0.4，该值将通过 RCA/SCA 数据确定。例如，滞后效应可能导致 CCS 操作后 CO₂ 分布的显著差异，如图 7 所示。

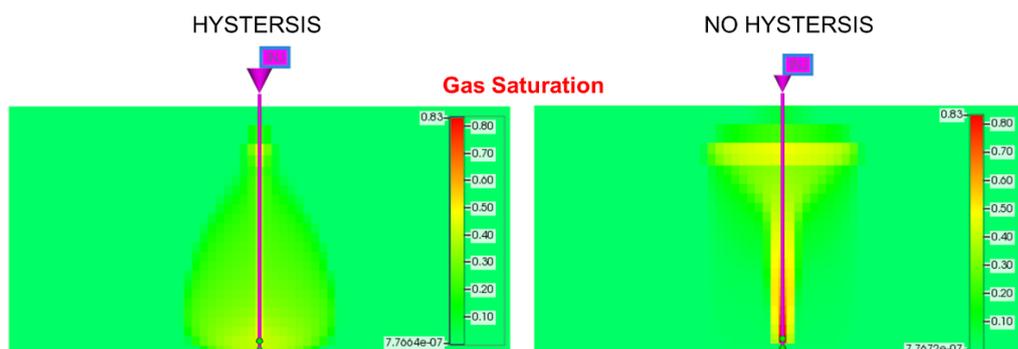


图 7. GEM 中滞后效应的示例输出

溶解封存的发生周期相较于残余气封存更长，且在很大程度上取决于压力、温度以及与新鲜水相的接触表面积。GEM 软件提供两种水相溶解度模拟方法：第一种是基于亨利定律的溶解度关联式法，支持选择多种模型，即 Li-Nghiem 经验公式、Harvey s Correlation 关联式以及基于 ENI 实验室数据的修正关联式 (Revised Harvey s Correlation)；第二种是溶解度 K 值表法，需通过相平衡计算软件（如 CMG 的 WinProp、Calsep 的 PVTsim）导出 K 值表，由油气水闪蒸计算得到的气 - 水及油 - 水 K 值将直接应用于 GEM 模拟中。

地球化学模拟

地球化学模拟的目的是在长期预测模型的基础上，通过加入二氧化碳导致的矿化作用，将残余和溶解度捕集纳入其中。通过矿化作用捕集二氧化碳是最安全的捕集形式，但在不同机制中耗时最长。原因之一是二氧化碳必须先溶解于溶液中，才能以矿化形式沉淀析出。

在 GEM 软件中，矿物反应默认采用过渡态理论 (Transition State Theory, TST) 进行模拟，活度系数模型可从理想溶液模型、Debye-Huckel模型、B-dot模型及 Pitzer 模型中任选。反应比表面积、活化能、反应速率等地球化学参数，可通过 Builder 软件调用 CMG 内置化学反应数据库获取。

矿物的溶解与沉淀过程会改变多孔介质的孔隙体积：模拟中若启用化学反应功能，软件将默认根据反应结果同步更新孔隙度；而孔隙度的变化可能引发渗透率改变，GEM 可通过幂律模型或 Kozeny-Carman 方程给出的阻力系数，对渗透率进行重新调整。

由于包含矿物反应的数值模拟计算量极大，地球化学模拟仅针对特定研究范围与场景可选配使用，不会应用于历史拟合及风险分析环节。

分析

可提供油田尺度的变形风险分析，同时结合 CO₂封存量优化方案。需防控的风险包括地表隆起量、盖层附近高压地层形成（盖层完整性）以及 CO₂通开启裂缝的泄漏。

断层活化风险分析

将给出注入井底压力 (BHP) 与注入速率的阈值建议。由于 GEM 软件可通过双重渗透率模型结合 BB 模型，实现渗透率随应力变化的动态调整，因此能够精准复现断层活化过程。

盖层完整性分析

盖层完整性可通过盖层附近的压力分析进行评估，GEM 软件能够输出该区域的压力与应力分布数据，为完整性研究提供依据。

储层膨胀与地表隆起分析

CO₂注入及长期运移引起的储层变形可通过GEM软件输出结果直观获取，软件将对地表隆起和/或沉降现象进行行量化评估与可视化展现。图8为CMG 此前开展的地质力学耦合模拟研究地表隆起模拟的案例

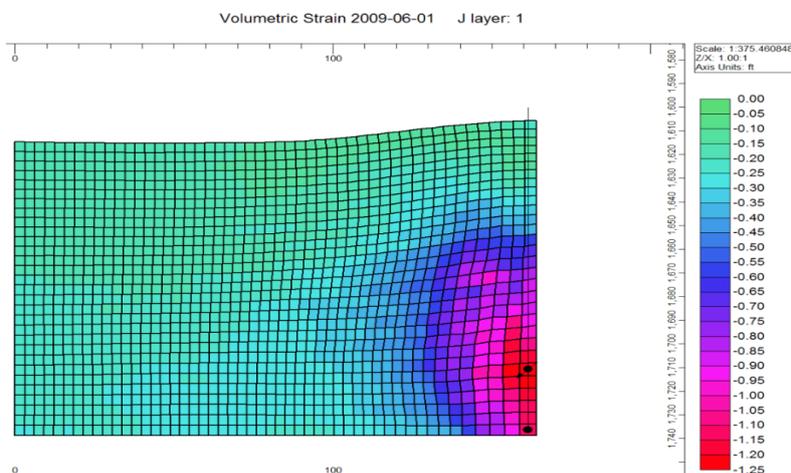


图 8. 地表隆起模拟可视化示例

二氧化碳封存量核算分析

GEM是一款专为CCS（碳捕集与封存）和CO₂强化采油（EOR）设计的专业模拟器，已在工业领域得到广泛应用。GEM捷输出CO₂封存量相关信息，分析结果将提供可封存的CO₂体积、存储形态及封存速率。本例中注入了1.28E8摩尔的CO₂，其中滞后捕集量为7.6E7摩尔，水溶解量为3.1E7摩尔。

```

Cumulative Field Total at Reservoir Conditions for Components.....

```

Comp	Cum Inj gmole	Cum Prod gmole	Accum gmole	Acc/(Inj-Pro)	Recovery %	Error mol in place, %
CO2	1.27901E+08	0.00000E+00	1.27899E+08	9.99988E-01	0.00000E+00	-1.18435E-03
CH4	0.00000E+00	0.00000E+00	1.85130E-05	1.00000E+00	0.00000E+00	1.93901E-06
CO2_T	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	1.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
H2O	0.00000E+00	0.00000E+00	1.37044E+03	1.00000E+00	0.00000E+00	1.38034E-05

Total Cum Inj, mol =	1.27901E+08	Ave. Acc/(Inj-Pro)	=	9.99997E-01
Total Cum Prod, mol =	0.00000E+00	Ave. Error, % mol in place =		3.00022E-04
Total Accum, mol =	1.27901E+08			

CO2 Storage Amounts in Reservoir		Moles	kg
Gaseous Phase	=	0.00000E+00	0.00000E+00
Liquid Phase	=	0.00000E+00	0.00000E+00
Supercritical Phase	=	9.70322E+07	4.27039E+06
Trapped Sg < Sgc / Hysteresis	=	7.60807E+07	3.34831E+06
Dissolved in Water	=	3.11317E+07	1.37010E+06

Mole Percent Hydrocarbon Recovered: Total-HC-Prod/Total-HC-Originally-In-Place = 0.0000

图9. CO₂封存量输出

多目标优化

在地表隆起量约束下实现CO₂注入量最大化，属于多目标权衡问题。CMOST优化套件提供帕累托前沿粒子群优化算法，可求解得到帕累托前沿解集，该解集包含了由局部目标函数间的多组最优权衡方案。CMOST会自动运行多组代表不同CO₂注入情景的模拟方案，选出满足多目标函数的最优解方案。

图 10 展示了帕累托优化案例研究的分析结果。基准方案将储存约 2.2 万吨二氧化碳并对应9厘米的隆起。然而，通过帕累托优化找到了一个更优方案，能在减少隆起的同时注入更多二氧化碳。CMOST 还能生成帕累托前沿曲线，曲线上分布着多个最优方案解。

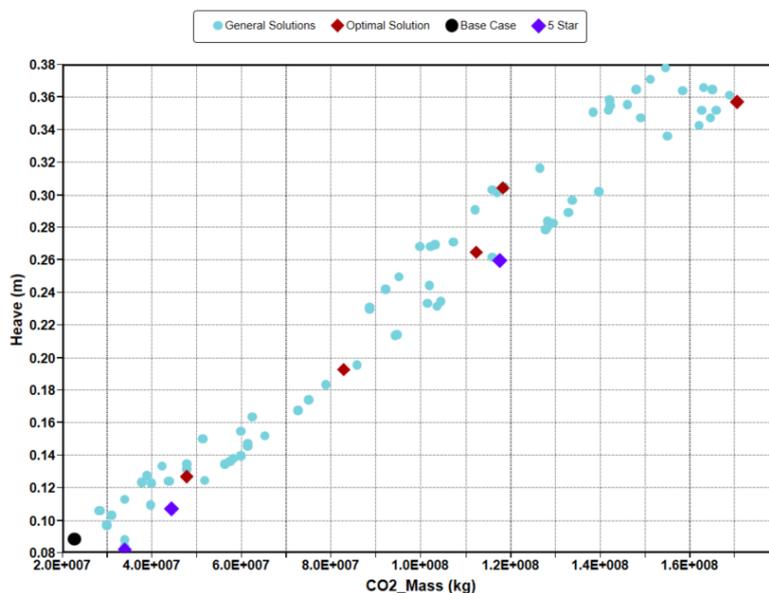


图 10. 帕累托前沿粒子群优化示例（CO₂ 质量与地表隆起对比）

使用 CoFlow 进行井筒和地面分析

在碳捕集封存（CCS）项目中，若要明确井筒及地面系统的CO₂注入能力与流动保障问题，将油藏-地质力学模型与井筒-地面管网模型进行耦合模拟至关重要。GEM瞬态热-组分-地质力学模拟器，可与CMG CoFlow软件中的稳态井筒及管网模型实现耦合，其中CO₂的流体物性由状态方程（EoS）模型定义。该耦合模型可覆盖枯竭气藏中CO₂注入井的全生命周期模拟。

井筒-油藏系统的耦合热模拟具有重要意义，不仅能够预测系统的压力-温度（P-T）分布特征，还能明确如何通过优化调控规避已知的工程风险点。基于稳态流动条件下的耦合模拟结果，可确定压力、温度及流体组分的安全作业边界。GEM与CoFlow并

筒管网建模软件的耦合方案，能够帮助分析上述稳态压力、温度及组分分布特征，并根据实际需求进行针对性调整。

CoFlow软件内置的向导式任务模块可直接导入GEM的模拟数据集。如图 11 所示，用户可通过CoFlow的无缝图形用户界面（GUI），完成井筒与地面设施的建模工作。

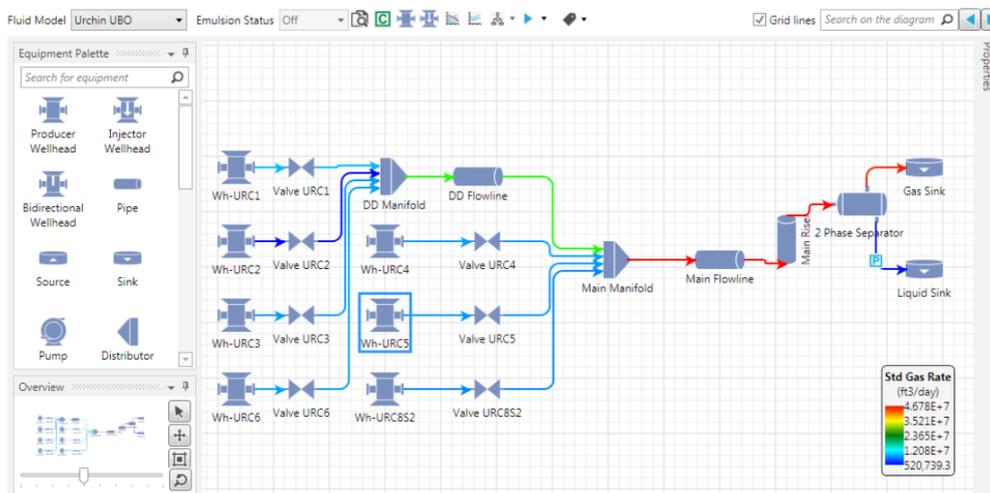


图 11. CoFlow 中井与地面设施的耦合

CO2 注入耦合模拟

现有GEM模拟模型可直接导入 CoFlow 软件中。若已建立地面流体模型，则可将其与该模型进行集成；随后需对井筒模型及地面模型进行参数设定。

按照 CoFlow 的向导式操作流程，即可便捷地将井筒-地面模型与已有 GEM 模型完成耦合。CoFlow 将作为耦合模拟的运行平台，并实现模拟结果的可视化。在 CoFlow 耦合方案中，井筒及地面管网模型可支持长期（稳态）流动特征的精细化分析。

GEM 软件亦可与Kongsberg公司的 Ledaflo 软件进行耦合。这款瞬态流动保障井筒及管道模拟器，能够开展短期（瞬态）流动特征的精细化分析。

上述两款耦合方案均能精准捕捉二氧化碳在管道及（或）井筒内发生的相态变化效应。

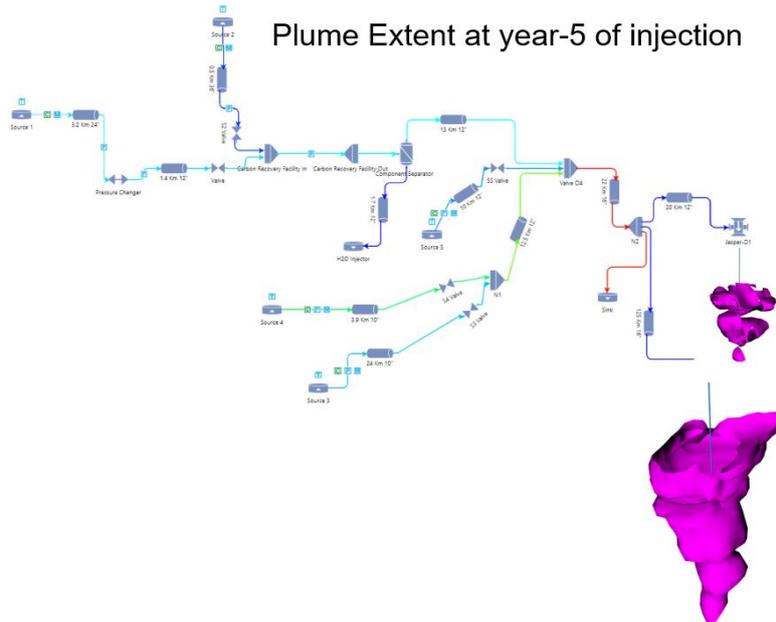


图 12 基于 CoFlow软件的二氧化碳羽流运移模拟预测

附录：二氧化碳封存项目案例记录

美国CCS和CCUS项目

在美国地区，CMG公司已为众多客户的碳捕集封存（CCS）及碳捕集利用与封存（CCUS）项目提供软件和深度技术咨询服务，服务客户如下：

- Denbury– CCSandCCUS
- Lonquist– CCS
- RESPEC– CCS
- GHD– CCS
- NextDecade– CCS
- BlueSkyInfrastructure– CCS
- ElysianCarbonDevco,LLC– CCS

CMG 还与其他以下公司有过广泛合作

- Shell（CCS支持）
- Aera 能源公司（CCS咨询项目）
- BP（CCS支持）
- Talos Energy（CCS支持）

对于壳牌和 Aera 公司，CMG 正在协助其向美国能源部提交二氧化碳注入的 6 类许可申请。

欧洲的CCUS项目

CMG 在欧洲的以下 CCS 领域提供了大量的技术支持。

- 冰岛 Carbfix项目——玄武岩岩浆封存。
- BP – Endurance – 咸水层 已枯竭的SNS气田
- Pale Blue Dot——咸水层Acorn CCS
- Neptune UK Ltd – Delphynus – 高矿化度含水层
- Geostock – Hortamin – 陆上枯竭气田
- Repsol – CCS基准测试 – 未积极运营但参与Endurance项目合作
- 丹麦与格陵兰地质调查局——枯竭气田
- WintershallDEA – 格林桑德项目 – 枯竭气田
- Neptune Netherlands BV – L10 – 枯竭气田 地质力学（热压裂）
- EBN – 鹿特丹港 – 枯竭油田地质力学（热压裂）
- Energean——地中海枯竭气田
- Perenco – Leman – 枯竭SNS天然气田 – CO2注入性测试模拟
- Harbour Energy – Viking – 枯竭SNS天然气田
- One Dyas – 枯竭SNS天然气田
- Sval Energy - 特鲁德万咸水层（超临界）

亚太地区CCUS项目

- 马来西亚 K5 气田 CO2 封存与地质力学耦合模拟研究
- 马来西亚 M3 气田二氧化碳封存与地球化学和地质力学耦合的模拟研究
- 马来西亚 M4 气田 CO2 封存与地球化学耦合模拟研究
- 马来西亚 K5 气田方解石溶解实验室实验的历史拟合研究
- 印度尼西亚Jatibarang二氧化碳驱油模型
- 印度尼西亚Sukowati CO2-EOR模拟
- 日本国内CCS项目的地质力学CCS模拟

