



天然气地下储气库管理 基本要素

中美实践综述

作者： Dan Mueller, Hanling Yang, Adam Peltz, Tom Alexander
美国环保协会

2020 年 4 月

目录

执行摘要	2
1.0 引言	4
2.0 美国的地下储气库	5
3.0 现行美国地下储气库技术和监管指南	8
4.0 中国的地下储气库	13
5.0 储气库监管方案的基本要素	17
储气库项目的许可批准	17
风险管控计划	18
应急响应计划	19
储气库信息公开	20
井筒图	20
设施周边区域内的井评估	20
记录管理	21
井的建造要求	21
机械完整性测试	21
压力测试参数	22
监测要求	22
井口和阀门的检查、测试和维护	22
井的泄漏报告	23
地下储气库退役要求	23
变更管理	23
6.0 结语	24
附件 A 中国地下储气库行业标准和企业标准范例	25
附件 B 地下储气库工艺流程中产污节点图	28

执行摘要

本报告由美国环保协会（Environmental Defense Fund）撰写，其目的是针对中美两国天然气地下储气库（Underground Natural Gas Storage）的环境管理现状，为储气库环境监管方案的完善提出前瞻性建议。地下储气库是保障天然气有效、可靠供应的重要手段，有助于提高企业运营的灵活性，改善天然气供需的动态平衡（如应对由于自然灾害或地缘政治等原因导致的供应消减，或在气价低廉的时候加大储备）。制定储气库全生命周期的全面监管方案是维护设施正常运行，保障环境、健康和安全的（EHS）的有效措施。

美国地下储气库建设历史悠久，可以追溯到 1900 年代。相关的监管制度（如许可证管理）和技术指南也比较成熟，覆盖从储气库设计到退役的全生命周期的各个环节。一些值得参考的储气库技术指南包括：美国石油学会（American Petroleum Institute, “API”）的 1170 “盐穴地下储气库设计和运营推荐做法”^[1] 和 1171 “枯竭油气藏和含水层地下储气库功能完整性推荐做法”^[2]；加拿大标准协会（Canadian Standards Association）的“地下地质构造中碳氢化合物的储存指南”^[3]；美国州际油气协定委员会（Oil and Gas Compact Commission）及地下水保护委员会（Ground Water Protection Council）等合著的“地下储气库监管考量”^[4]。

美国的地下储气库监管事务由联邦和州政府共同承担。尽管相关管理制度年代久远且在过去的20几年里也有更新，但这并没能杜绝事故的发生。由于运营问题导致的几起重大储气库泄漏事件对环境、健康和安全的造成了灾难性的影响。例如，2015年加利福尼亚州阿利索峡谷（Aliso Canyon）储气库泄漏持续了111天，排放了1.87亿立方米（66亿立方英尺）的天然气^[5]，造成8000多户居民撤离，泄漏的天然气足以满足洛杉矶19万个家庭的全年用气需求^[6]。这场事故直接推动了联邦储气库法规的出台和加州法规的修编。2016年，美国交通部下属的管道和危险材料安全管理局（Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration, “PHMSA”）着手制定了地下储气库联邦安全法规（该法规已于2020年2月公布）^[7]。加州政府参考API 1170 和1171的推荐措施，在风险管控、应急响应、完整性测试和强化监测方案等方面对其储气库法规做了修订。

与美国相比，中国的地下储气库建设起步较晚。中国第一个地下储气库建于 1969 年，而大规模的储气工程直到 1999 年才出现^[8]。目前，全国有 27 座储气库^[9]。截至 2019 年底，总储气量为 140 亿立方米，约占全国年消费量的 4.5%^[10]。政府计划到 2030 年将地下储气库储气能力提高至 300 亿立方米，达到年消费量的 6%，这也意味着在十年内将储气能力翻一番^[11]。

中国目前的环境管理覆盖了储气库的许多重要环节，多项储气库技术也可比肩国际水平。然而美国的经验表明，不断地完善监管制度、技术指南和运营措施，是及时识别和防范风险、防患于未然的重要保障。

本报告梳理了美国PHMSA新出台的储气库联邦安全法规、加州修订法规以及上述技术指南的章节要点。结合中美业内专家的建议，现提出优质的地下储气库环境管理方案应包含以下基本要素：

- 许可证管理（将持续核查和许可证复审纳入运营监管）；
- 设施选址要求；
- 风险管控计划；
- 应急响应计划；
- 数据收集和记录管理；
- 施工和运营的技术要求；
- 泄漏报告（包括设施故障的追因调查）；
- 完整性测试和监测；
- 退役。

需要强调的是，变更管理（**Management of Change**）理念应贯穿于上述各个环节，确保当组织架构或运营发生变化时，企业能积极应对可能发生的环境、健康和安全风险。通过制定合理的管理程序来避免风险恶化，及时识别和处理新风险，并告知所有利益相关者。

本报告中列出的基本要素是制定有效的地下储气库监管方案的基础。根据设施选址和储存地质条件的不同，相关环节还需要做进一步的强化和细化。计划下一步考虑开展中美两国地下储气库环境许可管理机制的比较研究，以期提出更具体的政策建议。

1.0 引言

天然气储存设施对保持天然气供应和需求的动态平衡至关重要。天然气生产端或进口端的供应变化、消费端的日、季节性需求变化、自然灾害、不可预见事件（如地缘政治冲突）造成的供应变化，都可能导致供求关系的波动。储气库有助于提高天然气供应的灵活性和管道等运输基础设施的合理规划及运营。

地下储气库主要有三种类型：枯竭油气藏、含水层和盐穴。目前世界上大部分的储气库都由枯竭油气藏改建而成。由于该类地层有较高的渗透率和孔隙度，并且最初就是碳氢化合物的储层，所以其存储完整性也相对较高。枯竭油气藏中的老井可改做储气用途，也可根据需要建设新井增加储层的注采能力。

就岩石空隙介质储气性能和储层评估方法而言，含水层与枯竭油气藏之间有许多相似之处。但相较油气藏，含水层的地质特征并不广为人知，因此在开发前需要进行更多的调查确定适用性。地下盐层和盐丘也适合改造成储气库，利用水溶造腔，用来储气。

天然气替代煤炭是中国应对空气污染和气候变化的一个重要战略。中国计划到 2030 年将天然气在其一次能源结构中的比例从目前的 7% 左右增加到 15%^[12]。在未来 20 年里，预计全球天然气需求增长的四分之一将来自中国^[13]。目前，中国天然气供应约 45% 源于进口^[14]。但是，中国现有的地下储气能力仅占年度总消费量的 4.5%^[15]，而美国为 18%^[16]，国际平均水平为 10%-12%^[17]。为了平衡供需和解决地域及季节性的供应瓶颈问题，中国启动了新一轮的地下储气库建设项目。2020 年 4 月，国家发改委、财政部等五部门联合印发了《关于加快推进天然气储备能力建设的实施意见》，要求加快推进储气基础设施建设^[18]。

与拥有世界上最古老、规模最大的储气库设施的美国相比，中国储气库建设时间还较短，只有 20 多年的历史。美国加州 Aliso 峡谷泄漏事件和随后的联邦与州的法规修订表明，尽管储气库技术已较为成熟，但违反操作程序或疏于监管都会对环境、健康和安全造成严重损害。现有的技术资源和国际经验教训可以为中国的储气库建设提供良好的借鉴。

储气库的地面和地下作业可能造成的环境、健康和安全风险有：

环境风险

- 储气库完整性被破坏造成天然气泄漏；
- 地面基础设施的机械故障导致泄漏和排放；
- 自然灾害对地面和地下基础设施造成损害。

安全与健康风险

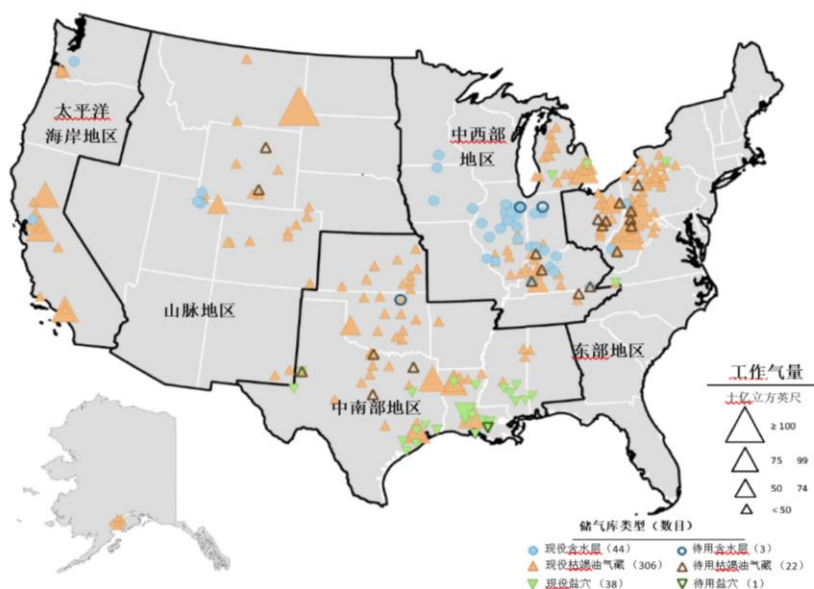
- 地面基础设施的机械故障导致天然气泄漏排放及作业人员和社区的污染暴露；
- 井喷、火灾和爆炸；
- 医疗紧急情况；
- 噪音和光污染。

储气库的设计、建造和运营必须考虑上述风险的防控：制定事故预测方案，最大程度地减少事故发生的可能性和严重性，采纳应急措施将损失最小化和尽快恢复正常。这不仅要求工程技术到位，还需要设立合理的环境、健康和安全管理程序（包括变更管理）、风险管控计划和应急响应计划。以下章节将针对这些重要环节做具体阐述。

2.0 美国的地下储气库

自 1916 年第一座地下储气库开始运营，美国储气库迄今已发展到 400 多座，遍及 31 个州。其中枯竭油气藏储气库有 328 座，贡献了 80% 的储存工作气量，其他为含水层和盐穴型储气库 [19]。图 1 显示的是美国的储气库设施分布。枯竭油气藏型各地均有，而含水层型在中西部更为普遍，盐穴型主要位于墨西哥湾沿岸地区。根据美国能源信息署 (Energy Information Administration, “EIA”) 2017 年数据，美国地下储气库的工作气量相当于其年天然气消费量的 18% [20]。

图 1 美国地下储气库分布（2017）



来源: EIA, Form EIA - 191, “Monthly Underground Gas Storage Report.” [21]

表 1 储气库分类统计如下 (EIA 2017 年数据) [22]:

类型	数量 (座)	储气库工作气量	
		百万立方英尺 (MCF)	亿立方米
枯竭油气藏	328	3,937,382	1,115
含水层	47	413,475	117
盐穴	39	500,596	142
总计	414	4,851,453	1,374

尽管美国在过去的 100 多年中积累了丰富的储气库技术和运营经验，但单纯依靠技术并不能杜绝事故的发生，尤其是近些年的几次储气库系统事故给环境、健康和安全带来了严重的影响。2001 年，堪萨斯州 (Kansas) 哈钦森镇 (Hutchinson) 附近的岩穴储气库由于井筒故障导致天然气通过地下渠道游离并聚集到废弃井中，造成 4 亿立方米 (1.43 亿立方英尺) 的天然气泄漏，最后通过泄压、堵井等措施才恢复了完整性 [23]。2004 年，得克萨斯州 (Texas) 的一个盐穴储气库的井口起火。起因是生产套管脱离、地上盐水管破裂、天然气从主阀与井口紧急关闭阀间泄漏。大火烧了 6 天才自行熄灭，之后维修人员才得以更换控制阀。这次事故燃烧了 1.7 亿立方米 (60 亿立方英尺) 的天然气 [24]。2015 年，加州 Aliso 峡谷枯竭油气藏储气库发生泄漏。该储气库有 100 多口作业井，其中一口井的 7 英寸生产套管外表面发生腐蚀造成井喷，维修人员花了 111 天才成功堵井。这是美国储气库史上最近的也是最大的一次天然气泄漏事故，直接排放了 1.87 亿立方米 (66 亿立方英尺) 的天然气 [25]，造成 8000 多个家庭的疏散。加州政府为了全面掌握事故起因，事后开展了详细的追因调查，由此发现了企业一系列的运营失误，比如缺乏系统性的风险管控机制、应急响应失效、缺乏井喷紧急预案、企业管理人员漠视反复出现的井筒完整性危险信号以及实时监测不足等诸多问题。

美国地下储气库监管及最新进展

美国储气库的监管由联邦和州政府共同负责，在过去的 20 年中有较大进展。目前在联邦层面上，联邦能源管理委员会 (Federal Energy Regulatory Commission, FERC)、交通部下属的 PHMSA 和联邦环保署 (USEPA) 为主要的监管机构。FERC 管理市场，PHMSA 管理运营和安全，USEPA 负责环境如大气、土壤和水 (地表水和地下水) 等污染防治。

具体而言，根据 2005 年的美国“能源政策法” [26]，FERC 负责管理天然气储存市场事务，比如批准天然气公司按市场价格提供新增储气容量及储存服务，但 FERC 不监管储气库的运营和安全。传统上，美国碳氢化合物跨州储运的运营及安全事务由各州和 PHMSA 共同管辖，这就难免造成潜在的管辖权冲突。2010 年，联邦地区法院的一项裁决 [27] 对该问题做了明确解答，即根据国会授权，跨州储气库的运营和安全由 PHMSA 监管 [28]。但在实际中，PHMSA 并没有积极行使该权力，而仅仅是出台了指导性公告，建议储气库运营商参考行业指南和各州法规进行安全管理。直到 2016 年 Aliso 峡谷事件发生后，国会通过了“管道基础设施保护和改善法案” (PIPES 法

案)^[29]，这个局面才得到改变。PIPES 法案要求 PHMSA 制定储气库的联邦统一安全标准，并允许州政府对其境内州管辖的储气库（不包含跨州设施）实施附加的或比联邦更严格的安全法规^[30]。2016 年，PHMSA 颁布了“储气库设施安全暂行法规”（IFR），并于 2020 年 2 月推出最终版^[31]，设立了储气库联邦最低安全标准。联邦法规主要采纳了 API 的两个推荐做法（RP）。

- API RP 1170 “岩穴地下储气库的设计和运营”（2015 年 9 月）；
- API RP 1171 “枯竭碳氢化合物储层和含水层地下储气库的功能完整性”（2015 年 7 月）。

PHMSA 法规进一步明确了储气库由州和联邦共同管辖。针对服务跨州储气业务的储气库，州政府可以申请 PHMSA 认证，获得授权代表 PHMSA 执行联邦法规、行驶管辖权，但州无权对跨州储气设施提出比联邦更严格的要求。针对服务于州内需要的储气库，州政府也必须先申请 PHMSA 认证，然后可以执行与联邦标准等效或更严格的州法规。

与此同时，加州等地也启动了州层面的储气库法规修订工作。很多州，特别是油气生产州都有储气库相关法规，重点关注井的完整性问题。随着公众对储气库事故关注度的提升和联邦管理的改善，越来越多的州开始复审其储气库相关规定，并考虑完善现行法规或者出台专门的储气库法规。拿加州举例，Aliso 峡谷事故后，州地质能源管理部（前身为“加州石油、天然气和地热资源部”）出台了更新的储气库综合性法规，为其他州提供了样板^[32]。除了采纳 PHMSA 规定的 API 1170 和 1171 推荐做法，加州的新法规还纳入了许多行业领先实践，包括风险管控、应急响应计划以及严格的完整性测试和监控程序等要求。需要指出的是，尽管 PHMSA 和加州法规改进了储气库的监管框架，但该框架仍存在提升的空间。修订应该被视为持续评估和改善监管的良好起点，而非终点。

另外，储气库管理还涉及到联邦和州的环境法律、法规，如大气污染（甲烷、VOCs 和有毒大气污染物等）、水污染（地下水和地表水）、土壤和沉积物污染防治。USEPA 拥有对这些排放的管辖权，但也可以将权力下放到州。州可以实施附加的、独立的（但至少等效于联邦）的监管措施。

就甲烷而言，甲烷排放在整个石油和天然气供应链的各个环节都可能发生。排放源（有交叉）包括钻探、完井、井口排液、加工、储运以及配送等环节；管道和存储设施等基础设施；以及气动控制器、压缩机、分离器和脱水器等生产设备。在美国甲烷被纳入为空气污染物，受到“清洁空气法”的管制。从 2009 年开始，按照 USEPA 温室气体报告计划（GHGRP）的要求，CO₂-eq 年排放量超过 25000 吨的设施需向 USEPA 提交温室气体（含甲烷）排放年度报告^[33]。该规定适用于陆上和海上的油气生产、冶炼、集输和加压、天然气加工、运输和储存、配送、LNG 进出口和储存等设施。2016 年，USEPA 出台甲烷排放管理法规（在此前是通过 VOCs 协同管理），适用于新建和改建的油气设施（针对水力压裂的油气井、压缩机、气动控制器、泵、和原油、凝析液及采出水储罐等）^[34]。

美国联邦“清洁水法”、“安全饮用水法”和“资源保护与恢复法”也适用于储气库的土壤和水污染管理。同样，联邦可以授权州政府代管，州在获得授权后也可以实施等效且通常更为严格的州法规。

3.0 现行美国地下储气库技术和监管指南

在全球范围内，储气库的建设和运营技术已经比较成熟，也有相应的技术、监管指南可供参考。如前文提到的，受到PHMSA重点参考的API 1170 和1171的推荐做法，加拿大标准协会的“地下地质构造中碳氢化合物的储存指南”以及美国地下水管理委员会的“地下储气库监管考量”都是很好的参考资料。本章将对这些指南的要点进行概述。从理论上来说，如果储气库的建设和运营能遵照这些指南，那么设施的质量是可以保证的。但在实际操作中，由于常常出现管理层重视程度不够，或风险管控、应急响应和EHS制度的不到位，导致事故时有发生。所以除了技术保障，制度保障对储气库的安全运营也是不可或缺。另外，Aliso 泄漏事件后出台的两份文件对储气库的设计、运营、评估及应急响应都十分有帮助。一是2016年10月由美国能源部和交通部组成的联合工作组发表的“保障地下储气库的安全和可靠性报告”^[35]，对减少泄漏风险提出了参考建议。另一个文件是2019年5月由加州政府公布的Aliso事件追因调查报告^[36]。

现将上述提到的参考文献的要点总结如下：

API RP 1170 – 水溶造腔盐穴储气库的设计和运营推荐做法

水溶造腔盐穴储气库的设计和运营的主要环节应包括：

- 选择适当的盐穴构造进行建设；
- 确定储气容积和对流率；
- 确定项目时间进度表，包括投产日期；
- 设计、钻井和装配储气库井；
- 设计、钻井和装配供水井、循环泵及盐卤处理井和设施；
- 设计、水溶腔体建造、测试和投产；
- 运营和维护储气库井和腔体，确保完整性。

具体的技术环节包括：

- 机械完整性测试；
- 地质和地质力学评估；
- 井的设计包括井口设计—既可储气，又可控制注采气体流量；
- 钻井作业；
- 盐卤开采；
- 储气作业；
- 盐穴完整性监测（详见 API RP 1170 第 10 章及其附件 B）；
- 弃用。

API RP 1171 – 枯竭油气藏和含水层储气库的完整性

API RP 1171 适用于枯竭油气藏和含水层储气库，重点关注储气井、储层和流体管理，保证设计、施工、运营、监测、维护和文档记录方面的系统完整性。但该文件不覆盖管道、天然气净化和液体处理、压缩机和存储辅助设施。与盐穴和含水层相比，枯竭油气藏改造成储气库具有明显的优势，因为用户更容易掌握其完整性。但需要注意的是，该类储层不一定能直接满足储气作业中对增压和重复循环压力的要求。

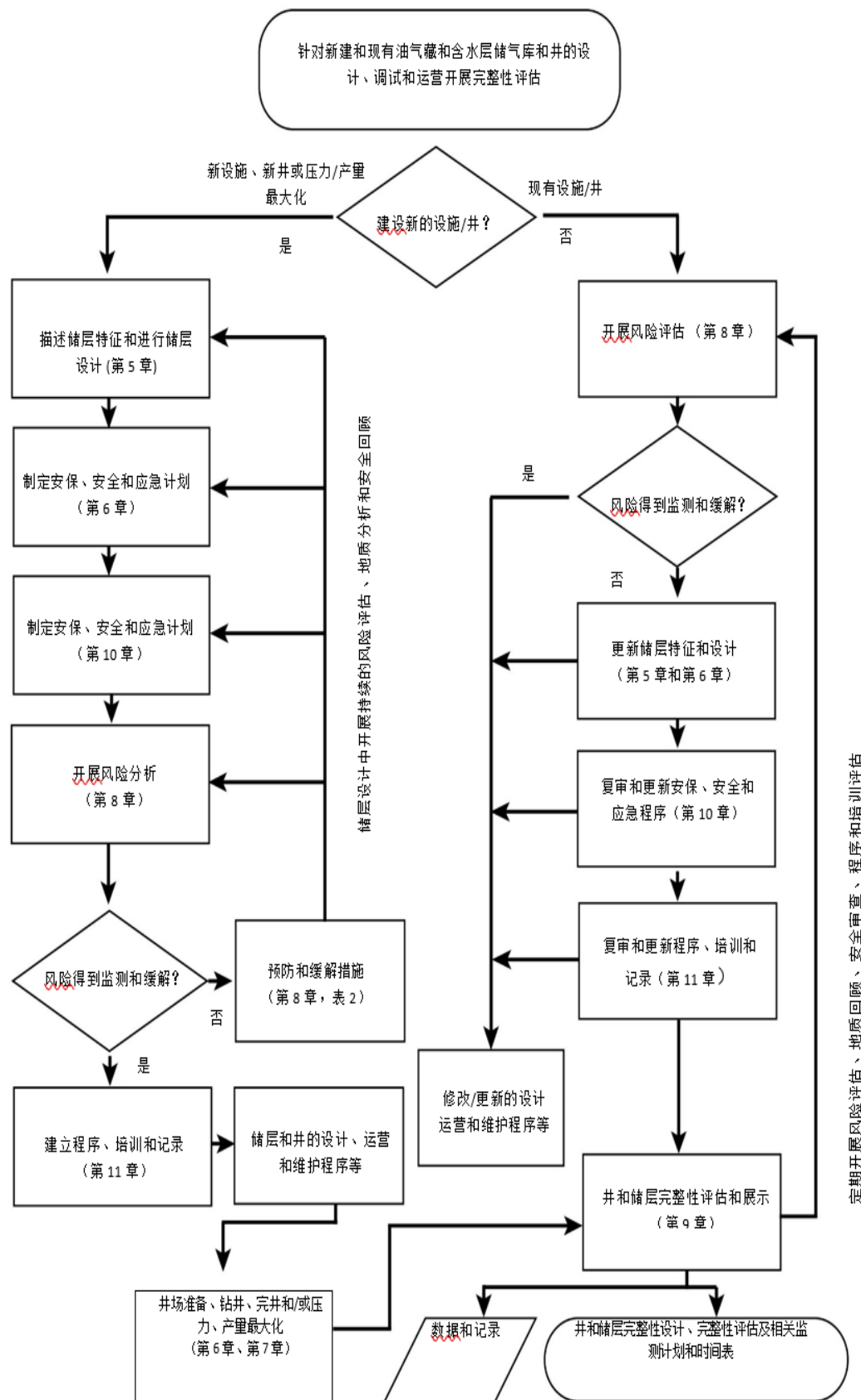
API RP 1171 主要涵盖了以下内容：

- 储层设计的完整性；
- 井的设计和建造完整性；
- 在最大压力和满负荷情况下储层和井的完整性；
- 风险管控；
- 完整性展示、验证和监测措施；
- 储气库安保和安全，现场检查和应急预备及响应；
- 程序和培训。

API RP 1171 第 8 章讨论了风险管控和相关计划制定，相关建议在 PHMSA 法规和加州的修订法规中都得到引用，这也肯定了风险管控是储气库全面有效管理方案不可或缺的要素。第 8 章还阐述了潜在风险、后果以及预防和缓解方案。另外，第 11 章关于“应急预备和响应”以及“变更管理”的建议也很值得关注。

图 2 显示了 API RP1171 推荐的现有和新建的枯竭油气藏及含水层储气库的场站和井的设计、调试及运营的程序和文档记录流程。

图 2 - API RP 1171 记录流程



加拿大标准协会“地下地质构造中碳氢化合物的储存指南” (Z341.1-14)

该指南规定了天然形成的地质储层（枯竭油气藏和含水层）和水溶腔体盐穴储气库的设计、建造、运营、维护、废弃和安全保证的最低要求。

主要覆盖的内容有：

- 材料（包括井的建造和运营以及安全设备有关材料）；
- 完井和改造；
- 储气库选址；
- 设计；
- 建造；
- 地面设施（包括紧急关闭阀）；
- 运营和维护；
- 监测和测量；
- 安全；
- 封井、弃井和场地修复。

附件的技术参考有：

- 盐穴储气库的机械完整性测试；
- 风险评估。

指南的正文和附件中都涵盖了风险评估。“设计与及风险评估”章节规定了运营商应采取多项措施建立风险评估流程，评估基准风险，判断已识别的风险的严重性，审查和更新风险评估，以及规定设施退役后相关记录的保留年限（15年）。

指南的“运营和维护”章节强调应制定应急响应计划，相关内容包括：

- 在发生故障或其他紧急情况时，为保证安全，应控制和关闭全部或部分设施的程序，和启动应急人员的安全保护程序；
- 对应急响应计划开展年检和更新，并记录结果，文档在设施现场保存5年；
- 证明操作员熟悉应急计划。

指南的附件包含有关风险评估的细节，如范围、定义、概念（包括风险分析、评估和衡量）、过程、评估和记录。

美国地下水保护委员会的“地下储气库监管考量”

该指南提供了联邦和州储气库监管框架如州许可证、技术和运营指导。需要说明的是，该文件是在 Aliso 事件和 PHMSA 法规制定工作启动之后出版的，但早于加州和俄克拉荷马州的储气库法规修订。现在，伊利诺伊州和印第安纳州也在着手修订相关的法规。

指南中关于州层面储气库许可证的重点领域为：

- 场地的地质表征；
- 工程审查；
- 储气库周边区域评估；
- 选址和间距；
- 敏感区域附近的作业要求；
- 储气库钻探（针对不同的储气库类型）。

技术层面的具体环节包括：

- 钻井、建造和改造；
- 井完整性测试；
- 储气库完整性；
- 注采井的操作和维护；
- 监测井和观察井；
- 井口和地面设施；
- 暂时弃井、闭井和场地恢复。

鉴于风险管控和应急响应的重要性，指南中既有独立章节又有分插叙述讨论相关问题，加州的修订法规也高度重视这两个环节。储气库风险管控是一个持续的动态过程，需要定期进行更新和评估，针对运营过程中出现的危险因素采取适当的防控措施。

风险管控工作主要包括：

- 识别影响环境、健康和安全的潜在威胁和危害；
- 对上述潜在威胁和危害进行评估和分级；
- 井和储气库完整性及性能产生影响的潜在威胁和危害；
- 监测/降低风险的预防和缓解措施；
- 意外或紧急事件的应急响应措施（API RP 1170 和 1171 中有详细说明）。

风险管控的核心是风险防控和建立公认的指标体系，评估风险是否被控制在“合理可行的最低程度”（“As low as reasonably practicable”, “ALARP”）^[37]。ALARP 标准要求运营商出示可信的证据，证明没有能进一步降低风险的其他可行选择。

应急响应虽然与风险管控相关，但却是一项独立的工作，旨在预防和减少由紧急事件造成的破坏，保护生命、财产和环境免受威胁。应急响应方案的制定是一个持续的动态过程，涉及多个利益相关方（如第一响应人员、监管者、公司员工和领导、媒体及社区代表）。

总体来说，应急响应计划的内容和实施效果与以下要素相关：

- 公司领导和员工有明确承诺，应急计划覆盖范围清晰，在企业的政策、决策过程和程序中得到清楚体现；
- 确定所需资源、应急团队成员、各人的角色和职责以及全方位的内外沟通机制；
- 应急方案，包括目标、目的、管理系统、风险评估和全面的危害识别；
- 与政府和其他响应机构的协调；
- 计划实施，包括记录保存、事件管理程序和应急终止、恢复正常的步骤；
- 完善的培训和教育计划，保证相关人员的执行能力。

4.0 中国的地下储气库

用天然气替代煤炭是中国空气污染治理和应对气候变化的一个重要手段。为了满足天然气需求的快速增长，中国也在加大管道天然气和液化天然气（LNG）的进口及国内生产。2018年，中国天然气消费达2800 亿立方米，增速为17.5%^[38]。预计到2040年，中国的天然气需求将翻倍，增幅将超过亚洲其他发展中国家增长的总和^[39]。2018年，中国已超过日本成为全球最大的天然气进口国^[40]，天然气对外依存度超过45%^[41]。进口入境口岸集中在陆地边境和沿海港口，其中，约40%的进口来自于管道天然气，其余的60%为LNG^[42]。

与此同时，中国天然气消费用户及其地理分布日益多样化^[43]。2000年以前，化工和工业部门占天然气消费的80%以上^[44]。如今，超过50%的天然气供应用于发电和城镇燃气，而且这一趋势仍在持续上升^[45]。这种变化对保证季节性供需平衡提出了更大的挑战，突显了扩大天然气储运网络规模的紧迫性。另外，天然气资源（包括进口和国产）与消费端的地理距离和用户多元化，也对储气库的选址和配套管道设施建设提出了挑战。

中国的储气库发展还处于相对早期的阶段。虽然中国第一个地下储气库建于1969年，但直到1999年陕京一线天然气长输管道建成后，才出现了大规模的储气工程^[46]。储气库的发展在解决首都地区天然气季节性需求波动问题上发挥了重要作用。截至2019年底，中国有27座储气库设施（相比美国的400多座）。中国石油天然气集团公司（中国石油）拥有23座，中国石油化工集团公司（中国石化）有3座，港华燃气有1座^[47]。截至2019年底，中国的储气量仅能满足全国年消费量的约4.5%^[48]，远低于10%-12%的国际平均水平^[49]。

为了填补这一空缺，中国政府采取了一系列措施鼓励推动储气库发展，包括扩大天然气基础设施的第三方准入、成立国家官网公司和设立储气目标等。计划到2020年，国有石油公司的储气能力须达到其年度合同销售额的10%，城市经销商的储气能力须达到其供应量的5%，地方政府应确保其辖区内的储气能力可以满足3天的需求^[50]。全国工作储气能力从2018年的93亿立方米^[51]提高到2020年的148亿立方米、2030年的350亿立方米^[52]。作为对这些政策信号的响应，中国石油和中国石化都在加快储气库的规划和建设，准备用10年的时间实现储存能力翻倍。中国石油

计划在“十四五”期间，建设东北、华北、西北、西南、中西部、中东部等六大储气中心，规划建设储气库23座。^[53] 中国石化计划在中部地区建设中国最大的地下储气库群^[54]。

然而，中国储气库的扩建工作也面临着一系列的挑战：

- 天然气供应源（国产和进口）与消费端地理空间分布不平衡；
- 实现强制性储气目标要求快速增加存储量，这要求在选址、各设施的存储量、设计、施工和运营方面的快速决策；
- 相对复杂的地质条件。

中国大部分可改造为储气库的枯竭油气藏都位于东北、中部和西部地区。但市场需求最大的东部沿海地区其地下构造多为盐穴和含水层，增加了储气库建设的难度^[55]。目前，中国27座储气库中的24座为枯竭油气藏型（其余3座为盐穴型）。这些枯竭油气藏大多为低渗透，深度通常超过2500米，有的超过4500米；相比之下，世界上95%的储气库深度都小于2500米^[56]。此外，中国潜在盐穴储气库的地层深度通常比国际典型同类设施深500米^[57]。一般来说，地质构造较深的盐穴储气库造价比浅层设施更高，技术风险更大。

中国地下储气库环境管理

中国有一系列涉及地下储气库环境和安全管理法律、法规和技术标准。涉及储气库生命周期环境管理的相关法律覆盖环境保护（大气、水、土壤和噪音污染防治）、生态保护、农田和野生动物保护、节能和清洁生产等。具体名录举例如下^[58]：

1. “环境保护法”（2014年4月24日修订）；
2. “大气污染防治法”（2018年10月26日修订）；
3. “水污染防治法”（2017年6月27日修订）；
4. “土壤污染防治法”（2019年1月1日生效）；
5. “固体废物污染防治法”（2016年11月7日修订）；
6. “环境噪声污染防治法”（2018年12月29日修订）；
7. “环境影响评价法”（2018年12月29日修订）；
8. “水土保持法”（2011年3月1日生效）；
9. “土地管理法”（2004年8月28日生效）；
10. “水法”（2016年2月7日修订）；
11. “清洁生产促进法”（2012年7月1日生效）；
12. “节约能源法”（2016年7月2日修订）；
13. “循环经济促进法”（2018年10月26日修订）；
14. “森林法”（2009年8月27日修订）；
15. “野生动物保护法”（2018年10月26日修订）；
16. “油气管道保护法”（2010年10月1日生效）；
17. “城乡规划法”（2019年4月23日修订）；

18. “突发事件应对法”（2007 年 11 月 1 日生效）。

除了以上的法律，与储气库安全、环保相关的还有国家和地方法规、条例及行业技术指南等等。附件 A 列举了中国行业层面和中国石油企业层面的主要储气库相关标准名录。

就储气库环境管理而言，根据“建设项目环境影响评价分类管理名录”（环境保部令第 44 号），储气库建设应编制建设项目环境影响报告书（而不是编制相对简单的“环境影响报告表”或仅仅完成登记备案），对潜在的大气、水、土壤和噪音污染进行环评^[59]。“生态环境部审批环境影响评价文件的建设项目目录”（2019 年）未将储气库环评审批纳入负面清单中，这意味着相关审批工作由省级生态环境部门负责^[60]。目前，除了某些规定情形^{1 [61]}，油气开发和储气库整体来说尚未被列入“固定污染源排污许可分类管理名录”（2019 年）。除水污染物排放适用于“排污许可证申请与核发技术规范 水处理通用工序”^[62]外，其余工序暂不需要申请排污许可证。

此外，储气库设施还需要通过生产安全评估，运营商需要获得企业层面的安全生产许可证。相关审批和监管由应急管理部门负责。

中国储气库的大气污染防治和甲烷排放管理

储气库工艺流程中有多种潜在排放源。以枯竭油气藏为例，潜在的废气排放节点包括钻井、完井、废弃、天然气收集和处理、压缩、脱水、放空和火炬燃烧、储罐、井口排液、废水灌注、天然气注采、内燃、锅炉烟气和车辆排放等。典型产污节点图示详见附件 B。

中国“大气污染防治法”（2018 修正）的有关规定适用于储气库大气污染排放管理^[63]。其中，第 2 条要求对颗粒物、二氧化硫、氮氧化物、挥发性有机物 (VOCs)、氨等大气污染物和温室气体实施协同控制；第 47 条规定储油储气库、加油加气站、原油成品油码头、原油成品油运输船舶和油罐车、气罐车等，应当按照国家有关规定安装油气回收装置并保持正常使用。

此外，现行的和正在审议中的油气行业大气排放的规范和技术规范有“建设项目竣工环境保护验收技术规范石油天然气开采”（2011）^[64]；“石油天然气开采业污染防治技术政策”（2012）^[65]；“煤层气（煤矿瓦斯）排放标准（暂行）”（2008）^[66]；“陆上石油天然气开采大气污染物排放标准”（审议中）；“环境影响评价技术导则 陆地石油天然气开发建设项目（征求意见稿）”（2019/10）^[67]；和“关于进一步加强石油天然气行业环境影响评价管理的通知”（2019/12）等^[68]。

¹ 有下列情形之一的，还应当对其生产设施和相应的排放口等申请取得重点管理排污许可证：（一）被列入重点排污单位名录的；（二）二氧化硫或者氮氧化物年排放量大于 250 吨的；（三）烟粉尘年排放量大于 500 吨的；（四）化学需氧量年排放量大于 30 吨，或者总氮年排放量大于 10 吨，或者总磷年排放量大于 0.5 吨的；（五）氨氮、石油类和挥发酚合计年排放量大于 30 吨的；（六）其他单项有毒有害大气、水污染物污染当量数大于 3000 的。污染当量数按照《中华人民共和国环境保护税法》的规定计算。

就甲烷排放环境管理而言，由于中国尚未将甲烷纳入大气污染物，目前地下储气库甲烷排放管理主要以安全为核心，储气库甲烷排放核算主要参照“中国石油天然气生产企业温室气体排放核算方法与报告指南”（试行）^[69]，同时鼓励甲烷回收再利用。不具备回收利用条件的，应安排天然气火炬燃烧，避免直接泄放。有些地方政府如黑龙江省对油气甲烷回收在利用也开展了试点^[70]。

泄漏检测与修复（LDAR）是控制无组织排放的重要手段，也是甲烷减排技术的核心。针对 VOCs 的 LDAR 已在石化行业广泛应用，但在油气开采及储运环节还在起步阶段，LDAR 有待在上游和储运等环节全面推行^[71]。2019 年 6 月，生态环境部出台了“挥发性有机物无组织排放控制标准”，适用于 VOC 占比 10% 的物料和管线组件密封点超过 2000 个的设施^[72]。由于天然气中的 VOCs 成分一般低于 10%，所以基本不受限。按照该规定，新建企业自 2019 年 7 月起、现有企业自 2020 年 7 月起，满足 VOCs 含量及密封点数量要求的石油生产和储运设施，需要对阀门、法兰、泵、储罐等开展 LDAR。需要指出的是，虽然这项规定在石油上游开采的 VOCs 排放管理方面迈出了积极的一步，但是其覆盖面还很有限。鉴于甲烷是一种强势的短寿命温室气体同时也是宝贵的资源，建议在油气行业整个供应链中实施 LDAR 控制 VOCs 和甲烷排放。

中国油气开发废水管理

油气生产开发包括储气库建设都会产生废水。油气废水处理主要有两种方式：经处理后通过地表排放，或进行回注。对于地表排放，处理后的水质必须达到“污水综合排放标准”（GB 8978-1996）^[73]，而陆上油气开采的采出水的回注则要求水质满足“碎屑岩油藏注水水质推荐指标及分析方法”（SY/T5329, 2012）^[74]。本报告终稿时，“陆上石油天然气工业水污染物排放标准”还在审议阶段。在该标准正式公布前，油气采出水处理需要遵循前面提到的 1996 年和 2012 年的相关规定。为了防止对地下水和地表水造成污染，中国需要尽快建立油气采出水回注和地表排放标准，并建立相应的监测和报告体系。同时，也有必要对回注层的地质构造开展研究，证明回注的可行性。

中国储气库质量管理和健康、安全和环境保护体系（QHSE）

质量控制。 主要涵盖工程设计、产品采购、施工、完工和投产运行，以确保储气库安全可靠。对于地面施工，质量控制计划必须依据工程设计文件和标准，并得到适当的审核、检查和监督。其中，为确保地面工程建设质量，依照工程设计文件、相关标准规范及管理制度，编制工程质量控制方案。施工期管理重点工作包括人员培训、安全防护设施、作业许可制度、危险源的辨识和控制、环境因素的识别和评价、工程质量监督检查、事故事件调查和处理等方面。工程主体完工后，应控制地貌恢复质量、水土保持和水工保护质量，检查地貌恢复后是否影响农田复耕，检查竣工资料的及时性。试运行包括建立组织领导机构、培训、工作前安全分析、启动前安全检查、上锁挂牌、安全目视化、应急预案及演练、环保技术措施等内容。

职业健康。按照“中华人民共和国职业病防治法”的要求^[75]，储气库项目设计需编制职业卫生专篇，识别建设及生产过程中可能存在的职业病危害，做好相应的对策与措施的设计，使其防护性能及效果符合国家职业卫生标准及卫生需要。设计中包含有毒有害物质、噪声等职业病危害因素的防护设施；在正常生产过程中粉尘、化学性毒物及部分物理因素等职业病危害因素的浓度或强度符合要求。

安全管理。依据“中华人民共和国安全生产法”等法律法规^[76]，制订储气库的“安全生产管理实施细则”。储气库安全控制系统由注采气自动控制系统、紧急关闭系统、火气探测系统、设备和管道防腐保温措施、供配电工程、安全泄放系统、消防站和消防系统、防毒和防化学伤害安全措施、防噪声措施及自然灾害安全防范措施等组成。此外，还需建立健全安全监测系统，形成地层—井筒—地面三位一体监测体系，进行全周期实时监控、分析及预警，确保储气库安全运行。

环境保护。科学编制大气污染、废水、噪声污染、固体废物污染等各项防治措施、生态环境保护及恢复等保护措施，最大限度减少施工对环境和生态的破坏。运行期应对生态环境进行恢复，编制注采运行过程中涉及的噪声污染、废液处理、有毒气体、气体泄放等安全防范措施及其应急方案。

地下储气库风险和应急管理。地下储气库环境风险防范和应急措施一般主要包括：评估储气库周边老井，对不能利用的老井进行水泥封堵，消除事故隐患。落实地面和地下井控设施，定期检修维护，确保其处于正常操作环境。加强对注水地层的压力监测，避免超压注水，确保回注水量不超过回注层最大容积。加强应急措施和应急管理，注采井和集注站发生事故时，应及时通知受影响公众及时撤离，严格事故报告制度，制定应急预案，加强应急演练，工程的应急预案应与地方政府应急预案相衔接。

5.0 储气库监管方案的基本要素

为了满足天然气需求的增长，中美两国的储气库还在建设发展过程中。基于加州法规、PHMSA法规、API、加拿大和地下水管理委员会的指南，本章对储气库监管框架的基本要素和推荐做法做了总结（见下），希望能为两国的储气库管理提供参考。需要强调的是这些要素的实际设计和操作应该因地制宜。

监管方案的基本要素

储气库项目的许可批准

批准储气库项目的前提是运营商能证明该项目对生命、财产、环境、健康和自然资源不会造成威胁和破坏。在审查过程中，监管者往往参考公认标准（比如美国监管者常用API等指南）所

提供的设计、建造和运营细则。除了日常检查，监管机构应对储气库定期全面复审（如至少 3 年 1 次），确保运营满足许可要求和条件。如果发现违规情况，监管机构必须立即通知企业停止作业，只有改正错误后，才能复工。

风险管控计划

每一个新项目都必须制定全面的风险管控计划，并提交监管机构批准。对于在法规通过前就已经开始运营的设施，其风险管控计划必须在法规生效 6 个月内递交。计划必须能充分证明天然气得到安全储存，相应防范措施得以采纳。监管机构有权要求企业提供相关的支持性文件和数据。风险管控方案应能将风险控制在“合理可行的最低程度”，且至少包含以下要素：

- 风险评估方法；
- 评估潜在的威胁和危害；
- 预防和缓解措施；
- 事故情境；
- 事故频率和影响范围；
- 有必要的話，针对每口井制定方案；
- 风险严重性分级排序；
- 记录；
- 定期审查方案要素和绩效；
- 设计和施工标准；
- 安全装置；
- 与地面的相互影响；
- 维修和安装的风险；
- 离环境敏感地区的距离；
- 身体保护措施；
- 地形；
- 天气；
- 地质灾害；
- 机械完整性；
- 监测方法；
- 人力资源配备的评估；
- 培训计划；
- 设备维护；
- 应急计划；
- 内部和外部沟通；
- 利益相关方反馈/互动。

除非获得例外许可，运营商应严格遵照监管机构批准的计划开展作业。除了监管机构同意保密的信息，风险管控计划应对外公开。运营商必须能向监管机构证明，其有足够的资源保证风险管控计划的有效实施，从决策领导层到基层工作人员，所有人都支持该计划。作为风险管控的一部分，运营商必须开发基于风险防范的井的完整性管理系统，确保每口井的完整性。实施阴极

保护，防止表面套管腐蚀，做好防腐工作。运营商应针对所有的威胁和危害采纳预防和减缓措施，并制定和更新公司和企业层面的风险管控政策。

其他值得注意的方面还包括：

- 加拿大标准对风险评估程序给出了较多的细节；而加州的规定则更粗略。
- 地下水管理委员会的监管考量明确要求针对所有的威胁和危害制定预防和缓解措施。
- API RP 1171（针对枯竭油气藏和含水层储气库）指出缺乏数据并不是将某种风险排除在考虑范围之外的理由。一旦发现缺乏数据，就必须启动程序开始收集数据，并将困难和需求记录在案，认真评估在没有掌握全部信息的情况下采取行动潜在的风险。
- API RP 1171 要求组建跨专业的队伍来制定和实施风险管控计划。
- API RP 1171 明确要求严格保存风险管控的记录。
- 绩效考核体系应包括独立审计，积极应对新兴风险、改变滞后局面，评估以往成效和判断未来趋势，而非仅仅停留在对风险评估过程的考核。

应急响应计划

运营商制定的应急响应计划应可立即付之于行动，有明确的演练时间表，演练能充分展示企业对设备、人员及配套服务的管理协调能力。应急计划应该提前 30 天提交监管机构审阅和批准。应急计划必须覆盖井口碰撞、火灾、井喷、爆炸、有害物质溢洒、设备故障、自然灾害、泄漏、井故障和医疗紧急情况。

应急计划至少应包括清晰的书面政策、目标和目的，建立针对资源配置、通讯和记录保存的管理系统。行动计划需明确具体人员分工和响应措施，确保在紧急情况发生之前资源就得到了合理配置；制定定期演练时间表，安排监管机构等所有利益相关方参加；制定有效培训计划，定期对计划进行评估和更新；明确应急报告规程、人员职责；建立有效的紧急联系方式、发布公告的程序；保证应急响应计划与风险管控计划的无缝衔接。针对不可控的可能影响周边社区的大泄漏事件，必须要求立即向监管部门报告。运营商必须证明应急计划的有效性，每年开展涉及主要利益相关方的突击演习来评估效果。所有的演练及培训必须要有实效，而不是为了满足政府的演练次数要求。

其他值得考虑的要素包括：

- 加拿大标准的建议：
 - 根据运营、组织、人员、法规修订和实际经验，至少每年更新应急计划；
 - 设有标准和程序确保培训师的资质；
 - 重点确保设施安全；
 - 有完整的计划模板，保证计划的一致性，便于评估、更新和经验共享。模板应包括计划范本、人员职责分配、风险评估表、审计标准和应急指南目录等。
- 地下水管理委员会建议：
 - 通过客观、独立和有效的审计，对应急计划开展持续评估；
 - 应急计划应该对行动策划和实施进行分别论述；

- 强调开展无事先通知的突击演练。
- **API RP 1171 (枯竭油气藏和含水层储气库)推荐做法:**
 - 特别强调应急计划的措施应该具体，其实施能确保设施安全。风险管控计划也应以维护安全为目的；
 - 建议运营商重视网络安全维护。

另外，Aliso 事件的追因报告建议，储气井的控制计划必须建立在熟识相关具体参数的基础上。

储气库信息公开

运营商必须提供充分信息，证明设施能达到储气要求，而且不会威胁生命、健康、财产、环境或自然资源。运营商至少应向监管机构提供以下信息：及时监测得到的储气量变动情况；地面和地下安全装置和措施；产出水处理计划；作业压力和容积；维护封闭和隔离的工程及地球物理、储层和地质（结构、地层、横截面分析）数据；地表位置和邻近地况；对设施周围特定区域内的其他非项目井（储气库附近区域）的分析；运行监测；机械完整性维护；以及钻井、改造、完井和装备计划。

监管机构可以视情况要求运营商提供证明储气库完整性的数据和信息。如果因运营条件变化，需要更新或修改原始计划，运营商应及时向监管机构提供相关信息。所有数据都必须以电子格式提交（运营商证明不可行的情况除外）。运营商可以申请，监管机构也有权批准某些信息为机密信息。监管机构必须公开运营商提交的设施数据，除非数据被批准为机密信息。

井筒图

运营商应提供并严格按照井筒图进行相关建设。井筒图应充分描述井筒构造的重要特征事项如套管具体信息、阀门、井眼参数、穿孔间距细节、塞子或其他井眼硬件、地质信息如标记、地层和相关区域，深度（测量值和真实值）、水泥信息，井口阀和安全阀、地下水、高程和位置，以及其他相关信息。这些要求适用于所有与储气库相关的井，包括作业井（注采井）、审核区内的所有孤井和已被封堵的井。定向钻井需开展定向测量。井筒图应以电子格式提交。运营商应提供井筒的主要和次要保护屏障的相关信息。

设施周边区域内的井评估

以下规定为最低要求。监管机构可以酌情决定是否提更多的要求，防止周边区域内的其他井成为天然气的流动通道。

- 必须对周边区域内所有的井进行评估，判断是否有天然气渗透到储气库之外的可能性。
- 堵塞和废弃的井应符合当地的封井要求，监管机构可以要求重新封井保证达标。如果周边区域中的堵塞井和废弃井完整性存在缺陷，监管机构则有权要求运营商实施其他附加措施，防止天然气迁移。
- 地下水管理委员会的报告对周边区域和缓冲区做了区分。缓冲区的范围可以涵盖审查区之外的井。缓冲区有纵向也有横向，目的是提供额外的安全保护。

记录管理

企业必须建立记录管理计划，并将计划提交给监管机构批准。在项目生命周期内，有关运营要求及条款遵守情况的所有相关记录应予保留。记录管理程序采用的归档和存储方案需保证访问便利和安全。该计划还应登记历史及修改记录。记录必须易于检索和导出，供监管机构检查。

关于记录管理，参考指南中特别提到的事项有：

- 加拿大标准要求在项目退役后保持 15 年的记录；
- API RP 1171 要求在项目生命周期内保留所有记录。

井的建造要求

企业对储气井或其他穿透储层的井的设计、建造、改造和维护，应该在计划的作业条件下，能确保机械和储层的完整性。井的主要建造要求包括：

- 任何单点故障都不会直接造成气体泄漏。（前面提到的“确保安全可靠的地下天然气存储”建议是很好的参考）。
- 井的建造必须包含主要和次要的机械屏障。主要屏障直接接触注采，需保证能在各种作业条件下正常运作。虽然次要屏障在正常情况下不会直接接触注采，但也必须能承受各种操作条件的考验。
- 提供主要和次要机械障碍的示例（请参阅加州现行储气库法规）^[77]。
- 套管（包括连接设备）必须能在各种作业条件下正常运作。
- 水泥要求以及井口组件和配置都有明确说明。
- 如果井无法满足监管放提出的要求，运营商可以提交替代解决方案申请例外，但替代方案必须具有同等效果。
- 法规必须明确对中间套管的机械要求。

API RP 1171 要求在作业前必须建立运营、维护程序并保证实施。

机械完整性测试

机械完整性测试应包括：

- 每年至少开展一次温度和噪声记录，确保完整性和验证数据的准确性。如发现异常则说明完整性可能遭到破坏，必须立即报告监管机构，后者有权命令关闭该井；
- 应至少每 24 个月采用标准测井方法对套管壁厚做一次评估。一旦发现壁厚不足以承受最大允许压力的 115%，应立即修井，在监管机构批准前不得将其用于注采。监管机构也有权酌情决定减少壁厚测试的频率；
- 可以视情况对生产套管开展定期压力测试，具体取决于井况和监管机构的要求，但通常不超过 5 年间隔。如果井未能通过压力测试，运营商必须立即通知监管方，在获得许可前，不得开展注采活动；
- 必须对新建或翻修过的井进行压力测试；
- 监管机构有权决定修改压力测试标准；
- 应在测试前 48 小时通知监管机构，以便后者能派人到现场观察测试；

- 所有机械完整性测试数据均应记录在案，结果应提交监管机构；
- 套管完整性的测试频率应基于运营商对储气库和相关井的风险分析。

压力测试参数

- 除非监管机构批准使用气体，否则应使用液体进行压力测试；
- 如果采用的液体或添加剂成分有别于盐卤，运营商需征求监管机构的意见；
- 必须对压力测试进行测量和记录，误差应控制在最大允许注入压力的 1% 以下；
- 井口初始测试使用的压力为最大允许注入压力的 115%；
- 压力测试应持续 1 小时；
- 成功的测试是实现压力在前 30 分钟内下降不超过 10%，在后 30 分钟内下降不超过 2%；
- 监管机构可以视情况修改压力测试要求。

监测要求

运营商每天必须通过实时监测和数据采集（Supervisory Control and Data Acquisition, “SCADA”）或类似系统，开展压力分析，监测环套空间中是否存在气体。

主要监测要求如下：

- 运营商至少每年向监管机构提交核实后的储气库物料平衡数据。相关手段和监测参数可包括：观察井、测试作业井的压力、液位，采出量、注入量、地下地球物理测井记录和偏移距、非工程井的参数；
- 实时数据收集，包括恰当的警报和响应程序。德克萨斯州的地下储气库法规（德州行政法规第 16 章第 1 部分 §3.96）中就有关于检漏仪的安装、测试和警报系统范例^[78]；
- 观测井可以设置在储层的周围、上方或下方，用来监测潜在的渗漏或迁移。

如发生储气安全受到威胁或机械完整性偏离规范的情况，例如套管压力不正常，运营商应立即通知监管机构，并谨慎处理。运营商应制定计划，确定基线和开展气体泄漏检测，并将计划提交监管机构审批。运营商应遵守监管机构批准的泄漏检测规程，范例可参考加州第 1726.7 节（f）项。泄漏检测工具和方法应用可因地制宜。加州空气资源委员会的要求包括大气监测、注采井口开展每日或连续泄漏监测、以及向监管机构提交监测计划供审批^[79]。

井口和阀门的检查、测试和维护

井口和阀门的检查、测试和维护方案应包括以下内容。

- 每 6 个月进行一次地面和地下安全阀测试；
- 根据 API RP 14B“地下安全阀系统的设计、安装、操作、测试和纠正”的指南进行测试；
- 开展井口和管道隔离阀年度测试；
- 无法使用的阀门必须在 90 天内修理否则应该实施临时弃井措施；
- 安装隔离阀门，方便员工进入储气井检查；

- 井口和阀门必须能够承受最大工作压力。

运营商应提前 48 小时通知监管机构测试时间, 便于后者派人参加。所有测试记录按监管机构要求存档。

井的泄漏报告

监管者必须明确定义“需报告的泄漏”。该定义应涵盖可能严重危害健康、安全、财产或环境的当前或潜在的泄漏情况。EPA 方法 21 (“挥发性有机化合物泄漏的测定”) 提供了很好的参考, 对设备和器材以及样品的收集、保存、存储和运输有详细建议^[80]。如发生“需报告的泄漏”, 运营商应立即通知监管机构。运营商必须全面分析所有的管道泄漏和故障, 采取维修和补救措施, 并向监管机构汇报。

评估泄漏起因是确定问题根源和开展补救的重要因素。在 Aliso 事件后, 加州政府进行了详细的调查追因。针对重大影响事故开展全面调查是非常有必要的。虽然不同调查的范围和细节可能不同, 最关键的是要保证调查分析得以开展, 对发现的缺陷提出改善建议并予以严格实施。API RP 585 关于“压力设备完整性事故调查”提供了这方面的指南。

地下储气库退役要求

运营商的退役计划应向监管机构报批。该计划至少必须涵盖: 如何处理剩余的天然气、退役后井的计划用途、变更用途的计划以及监管机构要求提供的信息。

参考指南中特别说明的事项包括:

- 加拿大标准对退役过程和程序做了详细说明;
- 地下水管理委员会指南对临时弃井及如何管理该类井以确保井筒和储层的完整性提供了参考;
- API 公告 E3 提供了“堵井和弃井推荐做法”。

变更管理

变更管理 (MOC) 是一种先进的管理实践, 目的是确保当管理构架或运营发生变更时, 运营商有能力应对环境、健康和安全风险。变更管理旨在确保新变化不会加剧现有风险, 并能识别和防范新风险。

API RP 1171 规定了针对设施的各项变更建立正式管理机制, 其程序如下^[81]:

- 总则: 运营商可以修改程序和过程, 但需保证变更的可控性。在变更实施前, 需完成相应的计划、框架和程序修订。然而并非所有的更改 (比如预料中的更改), 都需要走正式的变更管理流程。运营商应明确哪些变更是重要的且需遵循正式程序;
- 变更流程的覆盖范围: 运营商应制定变更管理流程, 并根据设备、材料或程序的变化对流程进行更新; 流程应包含识别变更对储气库造成何种影响的步骤, 明确变更批准的权责, 记录实施情况。变更管理流程还应涵盖在异常或紧急情况下对例外申请的批准。变更流程应得到严格遵守、及时传达和备案。运营商应核实作业人员对变更有清楚的认识, 并接受了相关培训。

6.0 结语

世界地下储气库的运营已有100多年的历史。相关的设计、建造和运营的技术指南也都十分成熟。但是曾经发生的事故表明，单纯依靠先进的技术不足以防范事故。相反，事故造成的环境、健康、安全危害会削弱技术保障。建立储气库的先进对标管理体系可以为技术及法规的完善奠定基础。除了合理的设计、建造和许可申请，还需要对运营做持续评估，严格监督和执法，包括制定及实施处理机械或操作故障的计划。风险管控和评估是防患于未然、有效应对紧急情况的重要手段。

一个完善的储气库管理框架除了设施生命周期的技术规范，还应包括详细的实施流程、持续监测、数据收集、跟踪、故障修复、设施绩效评估等要求。从风险管控出发，还需要设定“合理可行的最低程度”风险控制目标和指标，制定风险评估和应急响应计划，及保障全方位的应对变更和持续改进的能力。最后，这些要素的具体设计和操作还需要依据实际情况进行调整。

中国计划未来10年大力拓展地下储气设施。对中国来说，现在是评估现有设施绩效、吸取国际经验、改善储气库管理机制的大好时机。近日出台的环境管理改革方案强调加快环境许可证制度的建设^[82]。考虑到储气库尚未被纳入环境许可体系，但又具有潜在的环境影响，下一步希望针对中美两国地下储气库环境许可制度开展比较研究，为完善中国相关许可证制度建设建言献策。

附件 A 中国地下储气库行业标准和企​​业标准范例

中国地下储气库行业标准

1. Design Standards on UGS (3/01/2012)
地下储气库设计规范 SY/T 6848-2012
2. Technical Safety Standards on Depleted Oil and Gas Reservoirs UGS (3/01/2018)
油气藏型地下储气库安全技术规程 SY/T 6805-2017
3. Operation Standards on Injection and Withdrawal Wells for Converted UGS in Depleted Oil and Gas Reservoir (5/01/2010)
油气藏改建地下储气库注采井修井作业规范 SY/T 6756-2009
4. Recommendations on the Selection and Design of Casing Strings for Injection and Withdrawal in UGS (8/01/2017)
地下储气库注采管柱选用与设计推荐做法 SY/T 7370-2017
5. Technical Standards on Energy-efficient Engineering Design of Gas Transmission Pipelines and UGS (12/01/2012)
天然气输送管道和地下储气库工程设计节能技术规范 SY/T 6638-2012
6. Technical Safety Standards on Salt Cavern UGS (5/01/2011)
盐穴地下储气库安全技术规程 SY 6806-2010
7. Standards on Engineering Design of Well Perforation and Completion of Injection and Withdrawal Wells in Depleted Oil and Gas Sandstone Reservoir (1/01/2007)
枯竭砂岩油气藏地下储气库注采井射孔完井工程设计编写规范 SY/T 6645-2006
8. Technical Safety Standards and Regulations on Natural Gas Injection into Oil and Gas Field (11/01/2011)
油气田注天然气安全技术规程 SY 6561-2011

中国石油天然气集团公司地下储气库企​​业标准

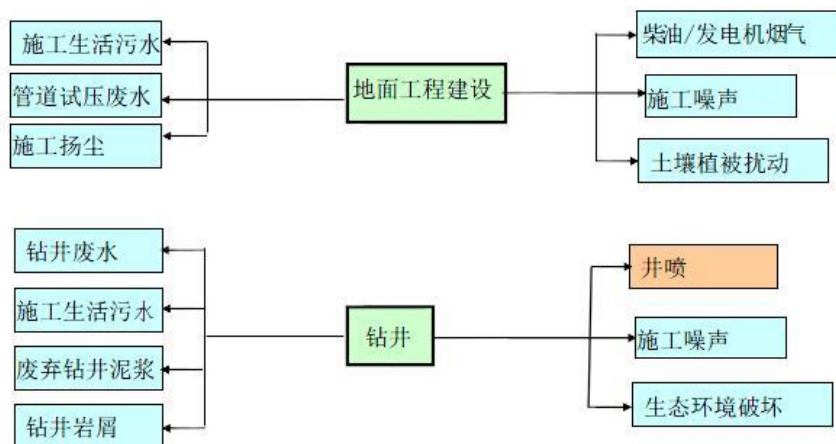
1. Calculation of Natural Gas Loss in UGS, Part I: Gas Reservoir
地下储气库天然气损耗计算方法第 1 部分：气藏型 Q/SY 195.1-2007
2. Operations and Management Standards on UGS Converted from Oil and Gas Reservoir, Part I: Gas Reservoir Management (Confirmed in 2014)
油气藏改建地下储气库运行管理规范第 1 部分：储气库气藏管理（2014 年确认）Q/SY 1183.1-2009
3. Operations and Management Standards on UGS converted from Oil and Gas Reservoir, Part II: Injection and Withdrawal Well Management (Confirmed in 2014)
油气藏改建地下储气库运行管理规范第 2 部分：储气库注采井管理（2014 年确认）Q/SY 1183.2-2009
4. Operations and Management Standards on UGS converted from Oil and Gas Reservoir,

- Part III: UGS Surface Facilities Management (Confirmed in 2014)
油气藏改建地下储气库运行管理规范第3部分：储气库地面设施管理 Q/SY 1183.3-2010
5. Technical Standards on Plugging Abandoned Wells in Oil and Gas Reservoir (Confirmed in 2015)
油气藏型地下储气库废弃井封堵技术规范（2015年确认）Q/SY 1270-2010
 6. Cavern Design Standards for Salt Cavern UGS (Confirmed in 2016)
盐穴储气库腔体设计规范（2016年确认）Q/SY 1416-2011
 7. Technical Standards on Solution Mining of Salt Caverns (Confirmed in 2016)
盐穴储气库造腔技术规范（2016年确认）Q/SY 1417-2011
 8. Technical Standards on Sonar Detection in Salt Caverns Confirmed in 2016)
盐穴储气库声纳检测技术规范（2016年确认）Q/SY 1418-2011
 9. Measures on Safety Assessment of Casing Strings in UGS
地下储气库套管柱安全评价方法 Q/SY 1486-2012
 10. Guidelines on Risk Assessment of In-Service Salt Cavern UGS
在役盐穴地下储气库风险评价导则 Q/SY 1599-2013
 11. Technical Conditions for UGS Casing
地下储气库套管技术条件 Q/SY 1703-2014
 12. Technical Standards on Well Drilling and Completion in Salt Caverns UGS
盐穴型储气库钻完井技术规范 Q/SY 1859-2016
 13. Technical Standards on Air Tightness Testing of Wellbore and Salt Caverns of UGS
盐穴型储气库井筒及盐穴密封性检测技术规范 Q/SY 1860-2016
 14. Inspection Approval Testing Criteria for Drilling and Completion of Injection and Withdrawal Wells in Oil and Gas Reservoirs
油气藏型储气库注采井钻完井验收规范 Q/SY 01009-2016
 15. Design Standards on Injection and Withdrawal Wells in Depleted Oil and Gas Reservoirs
油气藏型地下储气库注采完井设计规范 Q/SY 01012-2017
 16. Methods for Designing Storage Capacity Parameters of Sandstone Reservoirs UGS
砂岩气藏型储气库库容参数设计方法 Q/SY 01021-2018
 17. Criteria for Dynamic Monitoring Data Acquisition on Depleted Gas Reservoirs UGS
气藏型储气库动态监测资料录取规范 Q/SY 01022-2018
 18. Technical Standards on Well Drilling and Completion of Depleted Gas Reservoirs
气藏型储气库钻完井技术规范 Q/SY 01561-2019
 19. Geological and Technical Engineering Standards on the Construction of Depleted Gas Reservoirs
气藏型储气库建库地质及气藏工程设计技术规范 Q/SY 01636-2019
 20. Design Standards on the Injection and Withdrawal System in Salt Caverns UGS
盐穴储气库注采系统设计规范 Q/SY 06024-2017
 21. Surface Engineering Design Standards on Solution Mining System in Salt Caverns
盐穴储气库造腔系统地面工程设计规范 Q/SY 06025-2017
 22. Process Design Standards on Oil and Gas Storage and Transmission, Part V: UGS
油气储运工程工艺设计规范 第5部分：地下储气库 Q/SY 06305.5-2016

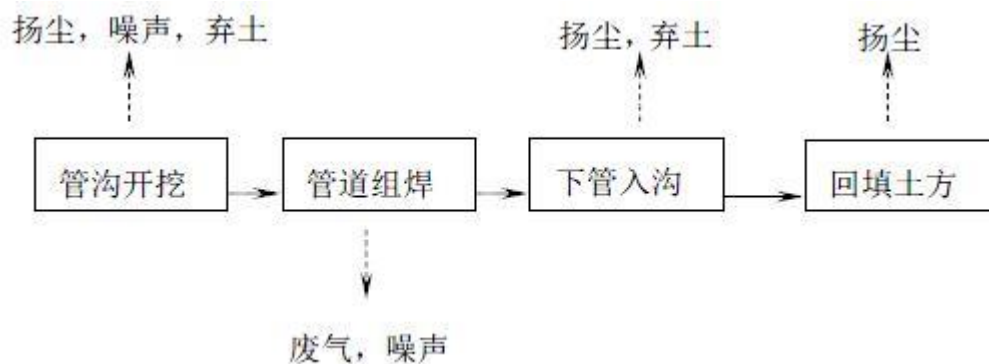
23. Design Standards on Auto-Control Instruments in UGS
油气储运工程地下储气库自控仪表设计规范 Q/SY 06306-2016
24. Engineering Design Standards on Oil and Gas Storage and Transmission, Part II: UGS
油气储运工程总图设计规范第 2 部分：地下储气库 Q/SY 06307.2-2016
25. On-Site Safety Inspection Standards for Oil Companies, Part 21: UGS Sites
石油企业现场安全检查规范 第 21 部分：地下储气库站场 Q/SY 08124.21-2017
26. Design Standards for Well Completion for Injection and Withdrawal Wells for Depleted Oil and Gas Reservoir UGSs
油气藏型地下储气库注采完井设计规范 Q/SY 01012-2017

附件 B 地下储气库工艺流程中产污节点图

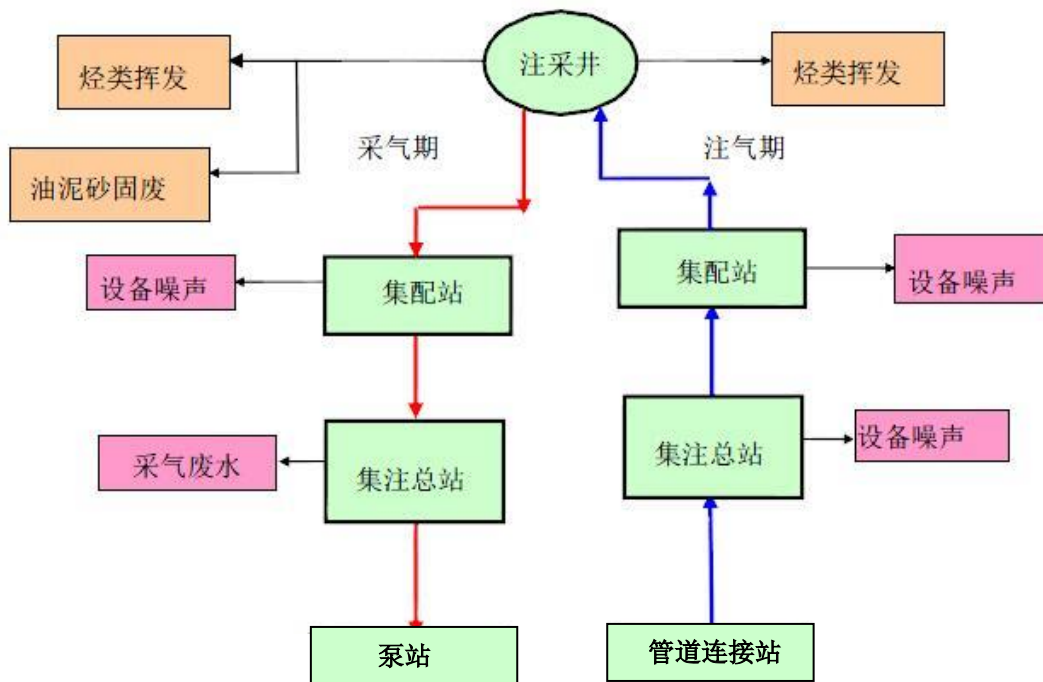
1. 地面建设及钻井作业施工期工艺流程及产污节点图



2. 管线施工期工艺流程及产污节点图



3. 地下储气库运营期注采过程工艺流程及产污节点图



- [1] API (American Petroleum Association), *API Recommended Practice 1170: Design and Operation of Solution-mined Salt Caverns Used for Natural Gas Storage*, (2015).
- [2] API, *API Recommended Practice 1171: Functional Integrity of Natural Gas Storage in Depleted Hydrocarbon Reservoirs and Aquifer Reservoirs*, (2015).
- [3] Canadian Standards Association, *Storage of Hydrocarbons in Underground Formations*, (2014).
- [4] Ground Water Protection Council and Interstate Oil and Gas Compact Commission, *Underground Gas Storage Regulatory Considerations: A Guide for State and Federal Regulatory Agencies*, (2017).
- [5] Blade Energy Partners. *Root Cause Analysis of the Uncontrolled Hydrocarbon Release from Aliso Canyon SS-25*, (May 2019). ftp://ftp.cpuc.ca.gov/News_and_Outreach/SS-25%20ORCA%20Final%20Report%20May%2016,%202019.pdf
- [6] CARB (California Air Resources Board). "Aliso Canyon leak emitted 109,000 metric tons of methane." CARB, October 21, 2016. <https://ww2.arb.ca.gov/news/aliso-canyon-leak-emitted-109000-metric-tons-methane>
- [7] "Pipeline Safety: Safety of Underground Natural Gas Storage Facilities," *85 Federal Register 8104* (2020), pp. 8104-8127.
- [8] Wei Yang, Xueliang Wang, and Chengrong Ma, "国内外地下储气库现状及发展趋势," "Underground Gas Storage – Status Quo and Development Worldwide," *OGST* 26, no. 6 (2007): 15-19.
- [9] "中国地下储气库累计供气突破 500 亿立方米." "Accumulative Supply from China's Underground Gas Storage Facilities reached 50 BCM." *Energy Administration Office of Jiangsu Province*, February 4, 2020. <http://jsb.nea.gov.cn/news/2020-2/202024101902.htm>
- [10] Chaoquan Liu and Xuefeng Jiang, "2019 年国内外油气行业发展报告," *2019 Report on China and International Oil and Gas Industry Development (Beijing: Petroleum Industry Publishing House, 2020)*.
- [11] Xin Zheng. "Storage capacity is set to expand further." *China Daily*, May 15, 2018. <http://www.chinadaily.com.cn/a/201805/15/WS5afa3eafa3103f6866ee868b.html>
- [12] NDRC (National Development and Reform Commission of the People's Republic of China), "加快推经天然气使用的意见." *Opinions on Accelerating Natural Gas Utilization* (2017). <http://www.gov.cn/xinwen/2017-07/04/5207958/files/258c2c4d2100473ba69b45fb8b4b9b3a.pdf>
- [13] IEA (International Energy Agency), *World Energy Outlook 2017: A world in transformation*, (2017).
- [14] Faouzi Aloulou and Victoria Zaretskaya. "China adds incentives for domestic natural gas production as imports increase." *U.S. Energy Information Administration*, October 23, 2019. <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=41773>
- [15] Chaoquan Liu and Xuefeng Jiang, "2019 年国内外油气行业发展报告," *2019 Report on China and International Oil and Gas Industry Development*.
- [16] EIA (U.S. Energy Information Administration), *Natural Gas Annual 2017* (Washington, DC: EIA, 2017), pp. 1, 45, accessed April 6, 2020. <https://www.eia.gov/naturalgas/annual/pdf/nga17.pdf>
- [17] National Energy Administration's Oil and Gas Department, State Council's Development Research Center, and Ministry of Natural Resources' Oil and Gas Resources Strategic Research Center. "中国天然气发展报告 (2018)." *China's Natural Gas Development Report (2018)*, (2018), pp. 8.
- [18] NDRC. "关于加快推进天然气储备能力建设的实施意见." "Implementing Opinions on Accelerating Natural Gas Storage Capacity Building," (2020). https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202004/t20200414_1225639.html
- [19] EIA, *Natural Gas Annual 2017*, pp. 1, 45.
- [20] Ibid.
- [21] EIA, *Natural Gas Annual 2017*, pp. 46.
- [22] Ibid., 45.
- [23] "Hutchinson natural gas explosion." *University of Kansas*, n.d. <http://geokansas.ku.edu/hutchinson-natural-gas-explosion>; Nate Alleman, "A Look at Underground Natural Gas Storage Operations and Regulation in the United States" (PowerPoint presentation, GWPC 2016 UIC Conference, Denver, CO, February 25, 2016).
- [24] Judy Clark. "Second Moss Bluff explosion accesses 6 bcf of gas in cavern, feeds larger fire." *Oil & Gas Journal*, August 20, 2004. <https://www.ogi.com/general-interest/companies/article/17290997/second-moss-bluff-explosion-accesses-6-bcf-of-gas-in-cavern-feeds-larger-fire>; "1,000-Foot Natural Gas Inferno Still Burns." *Free Republic*, August 21, 2004. <http://www.freerepublic.com/focus/f-news/1196407/posts>; DOE (U.S. Department of

- Energy), *Ensuring Safe and Reliable Underground Natural Gas Storage: Final Report of the Interagency Task Force on Natural Gas Storage Safety*, (2016), pp. 16-17.
- [25] Blade Energy Partners. *Root Cause Analysis of the Uncontrolled Hydrocarbon Release from Aliso Canyon SS-25*, (May 2019).
- [26] *Energy Policy Act of 2005*, 42 USC § 15801 (2005).
- [27] *Colorado Interstate Gas Company v. Wright*, 707 F. Supp. 2d 1169 (D. Kan. 2010).
- [28] DOE, *Ensuring Safe and Reliable*, pp. 11.
- [29] *Protecting Our Infrastructure of Pipelines and Enhancing Safety Act of 2016*, 49 USC § 60101 (2016).
- [30] DOE, *Ensuring Safe and Reliable*, pp. 12.
- [31] “Pipeline Safety: Safety of Underground Natural Gas Storage Facilities.”
- [32] California Department of Conservation, “Requirements for California Underground Gas Storage Projects: Final Statement of Reasons,” (n.d.).
<https://www.conservation.ca.gov/index/Documents/Final%20Statement%20of%20Reasons.pdf>
- [33] “Petroleum and Natural Gas Systems,” Title 40 *Code of Federal Regulations*, Pt. 98. 2009 ed.
- [34] EPA (U.S. Environmental Protection Agency). “Controlling Air Pollution from the Oil and Natural Gas Industry,” (n.d.). <https://www.epa.gov/controlling-air-pollution-oil-and-natural-gas-industry>
- [35] DOE, *Ensuring Safe and Reliable*.
- [36] California Public Utilities Commission. “Aliso Canyon Well Failure,” (n.d.). <https://www.cpuc.ca.gov/aliso/>
- [37] U.K. Health and Safety Executive. “ALARP ‘at a glance,’” (n.d.).
<https://www.hse.gov.uk/risk/theory/alarpglance.htm>
- [38] Oil and Gas Department, Development Research Center, and Gas Resources Strategic Research Center. “中国天然气发展报告 (2019).” *China’s Natural Gas Development Report (2019)*, (2019), pp. 4.
- [39] IEA, *World Energy Outlook 2019*, (2019), pp. 181-182.
- [40] “2018 年中国超过日本成世界最大天然气进口国.” “China overtook Japan as the largest natural gas importing country.” *CCTV*, March 23, 2019.
<http://m.news.cctv.com/2019/03/23/ARTId69moKU0WmvgI7ZofUQ3190323.shtml>
- [41] “中国石油经济技术研究院发布‘2018 年国内外油气行业发展报告.’” “CNPC Economics and Technology Research Institute released ‘The 2018 Report on China and International Oil and Gas Development’.” *Union China*, January 17, 2019. http://union.china.com.cn/jdnews/txt/2019-01/17/content_40646263.html
- [42] Oil and Gas Department, Development Research Center, and Oil and Gas Resources Strategic Research Center. “中国天然气发展报告 (2019).” *China’s Natural Gas Development Report (2019)*, pp. 5.
- [43] Guosheng Ding. “中国地下储气库的需求与挑战.” “Demand and challenges for China’s Underground Gas Storage.” *Natural Gas Industry*, (2011).
http://www.cngascn.com:81/ngi_wk/CN/article/downloadArticleFile.do?attachType=PDF&id=12183
- [44] Guosheng Ding, Chun Li, Jieming Wang, et al. “中国天然气地下储气库现状及发展趋势.” “The Status Quo and Technical Development Direction of Underground Gas Storage in China,” *Natural Gas Industry* 35, no. 11 (2015): 107-112, DOI:10.3787/j.issn.1000-0976.2015.11.017
- [45] Oil and Gas Department, Development Research Center, and Oil and Gas Resources Strategic Research Center. “中国天然气发展报告 (2019).” *China’s Natural Gas Development Report (2019)*, pp. 4.
- [46] Guosheng Ding, Chun Li, Jieming Wang, et al., “The Status Quo and Technical Development Direction of Underground Gas Storage in China.”
- [47] “中国地下储气库累计供气突破 500 亿立方米.” “Accumulative Supply from China’s Underground Gas Storage Facilities Reached 50 BCM.”
- [48] Chaoquan Liu and Xuefeng Jiang, “2019 年国内外油气行业发展报告,” *2019 Report on China and International Oil and Gas Industry Development*.
- [49] Oil and Gas Department, Development Research Center, and Oil and Gas Resources Strategic Research Center. “中国天然气发展报告 (2018).” *China’s Natural Gas Development Report (2018)*, pp. 8.
- [50] NDRC and NEA (National Energy Administration). “关于加快储气设施建设和完善储气调峰辅助服务市场机制的意见.” “Opinions on Accelerating UGS Construction and Perfecting Market Mechanism of UGS Peak Shaving Service Function,” (2018). https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghxwj/201804/t20180427_960946.html

- [51] Liu Xiang. “王学军：管网互联互通助推天然气储气调峰能力建设。” “Xuejun Wang: Pipeline Network Will Promote Natural Gas Storage Peak-Shaving Capacity Building,” SHPGX, June 4, 2019, <https://www.shpgx.com/html/xyzx/20190604/1681.html>
- [52] NDRC, “加快推经天然气使用的意见。” *Opinions on Accelerating Natural Gas Utilization*.
- [53] “四大技术突破补产业最短板 我国储气库建设迎来黄金期。” “Four Technologies Make Up for Industry Deficiency and China’s Underground Gas Storage Construction Enters into a Golden Era,” Xinhuanet, April 20, 2020, http://www.xinhuanet.com/2020-04/20/c_1125877722.htm
- [54] “中国石化建设国内最大储气库群。” “Sinopec builds the largest UGS clusters in the country,” *People’s Daily Online*, August 7, 2018, <http://energy.people.com.cn/n1/2018/0807/c71661-30214925.html>
- [55] Guosheng Ding. “中国地下储气库的需求与挑战。” “Demand and Challenges for China’s Underground Gas Storage.”
- [56] G. Zhang, B. Li, et al. “中国地下储气库业务面临的挑战及对策建议。” “Challenges to and Proposals for UGS Business in China.” *OILSNS*, March 13, 2017. <http://www.oilsns.com/article/175753>
- [57] Ibid.
- [58] “相国寺储气库扩容达产完善工程环境影响报告书 (公示板).” *Xiangguosi UGS Expansion EIA Report (Public Version)*, (2019). <http://sthjj.cq.gov.cn/uploadfiles/201907/17/2019071708271763377956.pdf>
- [59] MEE (Ministry of Ecology and Environment of the People’s Republic of China). “建设项目环境影响评价分类管理名录.” “Catalogue for Classification Management of Environmental Impact Assessment of Construction Projects,” (2017). <http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bl/201707/W020170711374924027666.pdf>
- [60] MEE. “关于发布‘生态环境部审批环境影响评价文件的建设项目目录（2019 年本）’的公告。” “Catalogue of Construction Projects Subject to the Ministry of Ecology and Environment for EIA Assessment (2019),” (2019). http://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk01/201903/t20190301_694114.html
- [61] MEE. “固定污染源排污许可分类管理名录（2019 年版）.” “Catalogue for Classification Management of Stationary Discharging Sources,” (2019). <http://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk02/202001/W020200220415709177749.pdf>
- [62] MEE. “排污许可证申请与核发技术规范 水处理通用工序”（HJ 1120-2020）. “Technical Specification for Application and Issuance of Pollutant Discharge Permit - Wastewater Treatment General Process” (HJ1120-2020). http://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bz/bzwb/pwxk/202003/t20200324_770309.shtml
- [63] “中华人民共和国大气污染防治法(2018 修正).” *Atmospheric Pollution Prevention and Control Law of the People’s Republic of China (2018 Amendment)*. <http://www.ilo.org/dyn/natlex/docs/ELECTRONIC/92654/126612/F-1979421844/CHN92654%202018.pdf>
- [64] MEE. “建设项目竣工环境保护验收技术规范 石油天然气开采.” “Technical Guidelines for Environmental Protection in Oil & Natural Gas Exploitation Development for Check and Accept Completed Project,” (2011). http://kjs.mee.gov.cn/hjbhzbz/bzwb/other/hbysjsgf/201102/t20110216_200859.htm
- [65] MEE. “石油天然气开采业污染防治技术政策.” “Policies on Oil and Gas Production Pollution and Control Technology,” (2012). <http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgth/200910/W020091019369619465677.pdf>
- [66] MEE. “煤层气（煤矿瓦斯）排放标准（暂行）.” *Emission Standard of Coalbed Methane/Coal Mine Gas (on trial)*, (2008). <http://www.mee.gov.cn/gkml/zj/bgth/200910/W020071029485852725097.pdf>
- [67] MEE. ““环境影响评价技术导则陆地石油天然气开发建设项目（征求意见稿）.” *Technical Guidelines for Environmental Impact Assessment on On-Shore Construction Projects for Oil and Natural Gas Development (Draft for Commenting)*,” (2019). <http://hps.mee.gov.cn/zhxx/201910/W020191009538546856236.pdf>
- [68] MEE. ““关于进一步加强石油天然气行业环境影响评价管理的通知（征求意见稿）.” “Notice on Further Strengthening of Oil and Gas Industry Environmental Impact Assessment (Draft for Comments),” (2019). <http://hps.mee.gov.cn/zhxx/201910/W020191009530405583712.pdf>
- [69] NDRC, “中国石油天然气生产企业温室气体排放核算方法与报告指南（试行）.” *Guidelines for Greenhouse Gas Emissions Accounting and Reporting for China’s Petroleum and Natural Gas Production Enterprises*, (2015). <http://www.ccchina.org.cn/archiver/ccchinacn/UpFile/Files/Default/20150210105228007489.pdf>
- [70] People’s Congress of Heilongjiang Province. “黑龙江省石油天然气勘探开发环境保护条例.” “Environmental Protection Ordinances for Oil and Gas Exploration and Development of Heilongjiang Province.” *Safehoo*, April 17, 2015. <http://www.safehoo.com/item/393855.aspx>

^[71] MEE. “‘十三五’挥发性有机物污染防治工作方案。” “VOCs Emissions Prevention and Control Work Program under the 13th Five-Year-Plan,” (2017).

<http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bwj/201709/W020170919373521878296.pdf>

^[72] MEE. GB 37822-2019. “挥发性有机物无组织排放控制标准 (发布稿).” *Standard for Fugitive Emission of Volatile Organic Compounds (Final Release)*, (2019).

<http://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bz/bzwb/dqjhbh/dqgdwrywrwpfbz/201906/W020190606587693632696.pdf>

^[73] MEE. GB 8978-1996. “污水综合排放标准.” *Integrated Wastewater Discharge Standard*, (1996).

<http://www.china-tpepc.com/docs/2013-09/20130928152037803803.pdf>

^[74] NEA. SY/T 5329-2012. “碎屑岩油藏注水水质推荐指标及分析方法.” “Water Quality Standard and Practice for Analysis of Oilfield Injecting Waters in Clastic Reservoirs,” (2012). <http://www.wdfxw.net/Fulltext95764130.htm>

^[75] Zhengzhou Foreign Investment Service Center. “中华人民共和国职业病防治法 (2018 年修订).” “Law of the People’s Republic of China on the Prevention and Treatment of Occupational Diseases,” (2018 Revision).

<http://www.waizi.org.cn/doc/52133.html>

^[76] “中华人民共和国安全生产法 (2017 年修订).” “Law of the People’s Republic of China on Safe Production,” (2017 Revision). <http://www.zmm.cn/l/show.asp?id=79>

^[77] *Development, Regulation, and Conservation of Oil and Gas Resources*. Title 14 CCR, Division 2, Chapter 4 (2014).

^[78] *Underground Storage of Liquid or Liquefied Hydrocarbons in Salt Formations*. Title 16 TAC, Part 1, Chapter 3, Rule §3.95.

^[79] CARB. “Oil and Gas Methane Regulation: Standards and Implementation.” CARB, August 13, 2018.

<https://ww2.arb.ca.gov/resources/fact-sheets/oil-and-gas-methane-regulation>

^[80] EPA. “Method 21 – Determination of Volatile Organic Compound Leaks,” (2017).

https://www.epa.gov/sites/production/files/2017-08/documents/method_21.pdf

^[81] API, *API Recommended Practice 1171*, pp. 48.

^[82] The Central People’s Government of the People’s Republic of China. “中共中央办公厅 国务院办公厅印发‘关于构建现代环境治理体系的指导意见.’” “General Office of the Communist Party of China State Council’s Guiding Opinions on Establishing a Modern Environmental Governance System,” (2020).

http://www.gov.cn/zhengce/2020-03/03/content_5486380.htm