文章编号:1673-5005(2017)01-0096-06 doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2017.01.012

油藏埋存 CO_2 泄漏机制及故障树分析

任韶然[1], 韩 波[1], 任建峰[1], 张 亮[1], 李德祥[1], 宫智武[1], 王晓慧[2], 陈国利[3], 熊小琴[4]

(1. 中国石油大学石油工程学院,山东青岛 266580; 2. 胜利油田技术检测中心,山东东营 257000; 3. 吉林油田勘探开发研究院,吉林松源 138000;4. 新疆油田工程技术研究院,新疆克拉玛依 834000)

摘要:利用故障树分析法,结合油田 CO_2 驱和埋存示范区泄漏及环境监测结果,对油藏埋存 CO_2 发生泄漏的途径和泄漏机制进行分析,并对 CO_2 驱和埋存示范区进行环境监测。结果表明:对圈闭性很好的油藏,井的密封性失效(包括套管和井口设施损坏)、固井不完善及水泥环腐蚀是造成 CO_2 泄漏的主要原因;整体上,埋存于地下的 CO_2 没有发生大规模的泄漏,但在近井土壤中 CO_2 含量有增加的趋势,越靠近井口土壤中 CO_2 含量越大,表明 CO_2 通过井内套管柱或不完整水泥环发生了微量泄漏。故障树分析结果对 CO_2 埋存区的泄漏监测和预防具有指导意义。

关键词:CO_2 地质埋存; 故障树分析; CO_2 泄露; 井泄漏; 环境监测

中图分类号:TE 992.1 **文献标志码**:A

引用格式:任韶然,韩波,任建峰,等. 油藏埋存 CO_2 泄漏机制及故障树分析[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2017,41(1):96-101.

REN Shaoran, HAN Bo, REN Jianfeng, et al. Mechanisms and fault tree analysis of CO_2 leakage during geological storage in oil reservoirs[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science),2017,41(1):96-101.

Mechanisms and fault tree analysis of CO_2 leakage during geological storage in oil reservoirs

REN Shaoran[1], HAN Bo[1], REN Jianfeng[1], ZHANG Liang[1], LI Dexiang[1], GONG Zhiwu[1], WANG Xiaohui[2], CHEN Guoli[3], XIONG Xiaoqin[4]

(1. *School of Petroleum Engineering in China University of Petroleum*, *Qingdao* 266580, *China*; 2. *Technology Inspection Center of Shengli Oilfield*, *Dongying* 257000, *China*; 3. *Research Institute of Petroleum Exploration & Development*, *Jilin Oilfield Company*, *Songyuan* 138000, *China*; 4. *Institute of Engineering and Technology*, *Xinjiang Oilfield Company*, *Karamay* 834000, *China*)

Abstract: In this study, the leaking mechanisms and potential pathways of CO_2 during geological storage in oil reservoirs were analyzed based on a fault tree analysis method, in combination with the field monitoring results of a CO_2 enhanced oil recovery (EOR) and storage demonstration project. The analysis results show that the sealing failures of injector and oil production wells, including casing and wellhead facilities damage, and well cementing failure, are the main reasons for the leakage of CO_2, which have been observed in the field monitoring. There has been no reported large-scale leakage of CO_2 occurring, but relatively high and abnormal CO_2 concentration in soil near some wellbores were measured, indicating that there was some leakage of CO_2 through well casing string or incomplete cement ring occurring. The fault tree analysis results can provide guidelines for monitoring and preventing leakage of CO_2 during geological storage.

Keywords: CO_2 geological storage; fault tree analysis; CO_2 leakage; well leakage; environmental monitoring

收稿日期:2016-05-12

基金项目:"十二五"国家油气重大专项(2011ZX05016-005);"十三五"国家油气重大专项(2016ZX05056004-003)

作者简介:任韶然(1960-),男,泰山学者特聘教授,博士,博士生导师,研究方向为 CO_2 地质埋存、注气提高采收率、水合物抑制和开采。E-mail:rensr@upc.edu.cn。

CO_2 捕集与封存(CCS)作为一种新兴的、有望实现化石燃料零排放的技术越来越受到人们的关注[1-4]。它是将捕集到的 CO_2 注入到地下特殊的地质构造中,达到永久封存 CO_2 的目的。用于封存 CO_2 的地质构造包括正在开发或废弃的油气藏、深部盐水层以及无开采价值的煤层[5-9]。将 CO_2 注入到油气藏中不仅可以实现 CO_2 的封存还可以提高油气采收率,具有较好的经济效益,是目前封存 CO_2 的主要形式。经过多年的研究以及大量的 CO_2 埋存试验,CO_2 的地质埋存在技术上可行,但是人们对埋存于地下的 CO_2 是否会发生泄漏(即 CO_2 埋存的安全性)一直存在担心和怀疑,这也是限制 CO_2 地质埋存技术发展的重要因素[1,10-11]。埋存于地下的 CO_2 一旦发生大规模的泄漏会造成难以估量的自然灾害,采取合理的方法对埋存 CO_2 发生泄漏的风险和途径进行分析和预测,进而制定相应的应急措施至关重要。笔者在调研国内外油藏埋存 CO_2 发生泄漏原因的基础上,利用故障树分析法,结合 CO_2 驱和埋存示范区的环境监测工作,对油藏埋存 CO_2 发生泄漏的风险进行分析,对 CO_2 埋存的安全性进行评估,为埋存试验区制定 CO_2 泄漏预防与处置措施,增强对 CO_2 埋存安全性的认识提供基础。

1　油藏埋存 CO_2 泄漏途径

CO_2 的油藏埋存由于具有较好的经济效益(封存 CO_2 同时增产油气)及安全性(储层性质及盖层情况相对明确,好的气密性)而倍受青睐[1]。由于埋存于地下的 CO_2 大部分以游离态的形式存在,埋存体不可避免地受到自然和人类活动的影响,埋存于地下的 CO_2 仍然有泄漏的风险[1,3,12-15]。如图 1 所示(据文献[5]修改)。

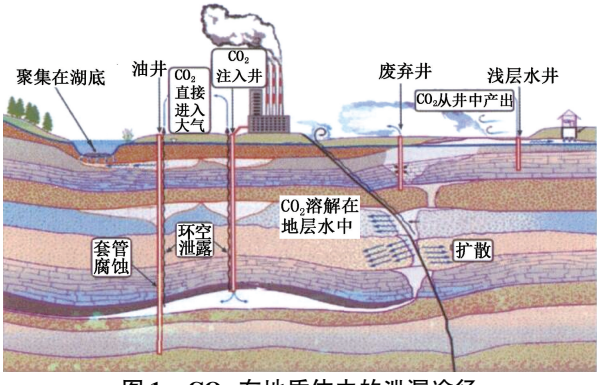

图 1　CO_2 在地质体中的泄漏途径

Fig. 1　Potential leakage pathways of CO_2 stored in underground structures

CO_2 泄漏的途径主要有:密封失效的井筒(注入井、监测井或废弃井)、可能存在的断层裂隙和通过盖层的扩散等[5,16-19]。

2　CO_2 泄漏的故障树分析

2.1　故障树的建立

故障树分析法是一种图形演绎法,是故障事件在一定条件下的逻辑推理方法。规范化的故障树包括三类事件和三种逻辑门,即顶事件、中间事件、基本事件、“与”门、“或”门和“非”门。将会对系统产生重大伤害的事件作为故障树的顶事件,以顶事件作为起点自上而下地分析导致顶事件发生的所有因素及其相互间的逻辑关系,并由此不断深入分析,直到找到事故的基本原因,即故障树的基本事件为止[20-22]。

通过调研国内外油藏埋存 CO_2 泄漏的原因,结合 CO_2 泄漏的机制,确定故障树的顶事件为油藏埋存 CO_2 泄漏,而造成 CO_2 封存失效的最直接原因是存在井泄漏通道或地质构造通道,这两个因素中的任何一个存在都会导致 CO_2 泄漏事故的发生。再以这两个因素作为次顶事件,采用类似的方法继续深入分析,直到找出导致事故发生的基本事件为止。表 1 为故障树的基本事件列表,本故障树中共考虑了 18 个基本事件。按照此原则做出油藏埋存 CO_2 泄漏的故障树(图 2)。由故障树可见,该故障树中“或”门的数量远大于“与”门的数量,根据两种逻辑门的定义(“或”门:只要有一个事件发生,就会有输出;“与”门:必须所有事件都发生才有输出)可知,油藏埋存 CO_2 发生泄漏的风险较大,需要在系统的薄弱环节加强防范措施。

表 1　CO_2 封存泄漏故障树基本事件

Table 1　Basic events for fault tree of reservoir stored CO_2 leakage

代码	事件	代码	事件
X_1	套管腐蚀穿孔	X_{10}	堵井水泥塞自身缺陷和裂隙
X_2	接头密封失效	X_{11}	注入压力过大
X_3	应力变化导致套管损坏	X_{12}	注入速度过快
X_4	井口密封失效	X_{13}	地震
X_5	阀门密封失效	X_{14}	地壳运动
X_6	水泥环和地层间的胶结失效	X_{15}	渗透率大
X_7	水泥环自身的缺陷和裂隙	X_{16}	盖层厚度小
X_8	水泥环和井壁间的胶结失效	X_{17}	CO_2 扩散
X_9	废弃井未经过防泄漏处理	X_{18}	游离态 CO_2

2.2　泄漏风险分析

故障树分析法的主要目标是发现系统的高风险部位,为制定预防措施及分析事故原因提供依据,主要的分析方法有定性分析和定量分析两种。本文中

对油藏埋存 CO_2 发生泄漏的故障树进行定性分析以确定导致 CO_2 发生泄漏的主要因素。

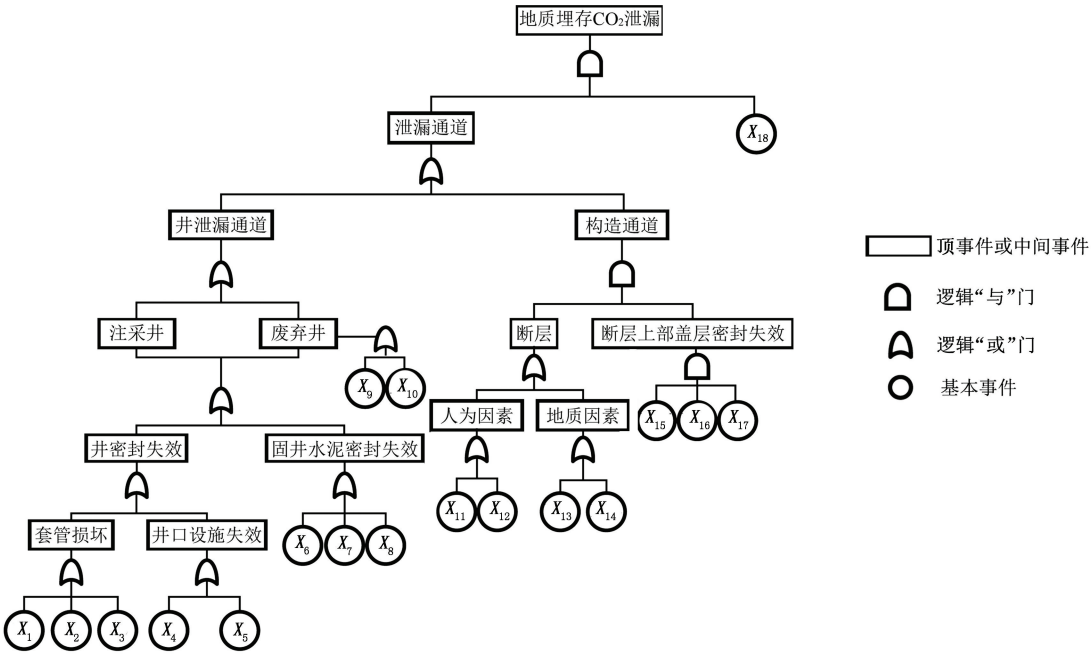

图 2 油藏埋存 CO_2 泄漏故障树

Fig. 2 Fault tree of reservoir stored CO_2 leakage

(1)最小割集。故障树定性分析的最主要的任务就是求出故障树的全部最小割集。割集是故障树的若干基本事件的集合,如果这些基本事件都发生,则顶事件必然发生。最小割集是基本事件数目不能再减少的割集,即在最小割集中任意去掉一个基本事件之后,剩下的基本事件集合就不是割集。一个最小割集代表引起故障树顶事件发生的一种故障模式。一般情况下,一个最小割集中包括的基本事件越少则最小割集越易发生,风险性越大[23]。

本文中采用下行法求出故障树的最小割集,其基本原理是从顶事件出发逐级向下,依次将各个逻辑门的输出事件用输入事件替换,遇到“与”门,增加割集的阶数,遇到“或”门,增加割集的个数,直到所有门的输入事件为基本事件为止。再利用集合运算法则将得到的割集进行简化合并,得到故障树的最小割集。油藏埋存 CO_2 泄漏的最小割集见表 2。该故障树共有最小割集 14 个,其中二阶最小割集 10 个,五阶最小割集 4 个。从故障树最小割集的分布来看,低阶最小割集的数量远大于高价最小割集数量,说明 CO_2 发生泄漏的风险性很大。同时,在各最小割集中,基本事件 X_{18} 出现的频率最大,是导致 CO_2 发生泄漏的主要因素。在油藏 CO_2 地质埋存中,尤其是在埋存初期要加强环境监测,预防大量游离态的 CO_2 发生泄漏。同时在埋存周期内要注意储层温度压力条件的变化,避免出现埋存 CO_2 的二次泄漏。

表 2 CO_2 封存泄漏故障树最小割集

Table 2 The minimum cut set for fault tree of reservoir stored CO_2 leakage

序号	最小割集	序号	最小割集
1	X_1、X_{18}	8	X_8、X_{18}
2	X_2、X_{18}	9	X_9、X_{18}
3	X_3、X_{18}	10	X_{10}、X_{18}
4	X_4、X_{18}	11	X_{11}、X_{15}、X_{16}、X_{17}、X_{18}
5	X_5、X_{18}	12	X_{12}、X_{15}、X_{16}、X_{17}、X_{18}
6	X_6、X_{18}	13	X_{13}、X_{15}、X_{16}、X_{17}、X_{18}
7	X_7、X_{18}	14	X_{14}、X_{15}、X_{16}、X_{17}、X_{18}

(2)基本事件结构重要度分析。结构重要度分析就是在不考虑基本事件发生的概率的情况下,仅从故障树结构上分析各基本事件的发生对顶事件发生的影响程度。结构重要度分析方法有两种,一种是分别计算各基本事件的结构重要度系数,这种方法的计算结果精确,但是计算过程繁琐;第二种方法是用最小割集近似判断各基本事件的结构重要度。本文中采用第二种方法近似计算油藏埋存 CO_2 泄漏中各基本事件的结构重要度,计算公式为

$$I_k(i) = \frac{1}{k}\sum_{r=1}^{k}\frac{1}{m_r(X_i \in E_r)}. \tag{1}$$

式中,k 为故障树最小割集数量;m_r 为最小割集 E_r 所包含的基本事件的数量。

由上述方法得到的基本事件结构重要度排序为

$I(X_{18})>I(X_{10})=I(X_9)=I(X_8)=I(X_7)=I(X_6)=I(X_5)=I(X_4)=I(X_3)=I(X_2)=I(X_1)>I(X_{17})=I(X_{16})=I(X_{15})>I(X_{14})=I(X_{13})=I(X_{12})=I(X_{11})$.

从各基本事件结构重要度排序可知:存在游离态的 CO_2 是埋存 CO_2 发生泄漏的最主要因素。同时,根据各基本事件对埋存 CO_2 发生泄漏的贡献程度,套管的腐蚀损坏以及油气井井口阀门密封失效等造成的井密封失效,水泥自身裂隙及胶结面失效造成的固井密封性失效,盖层的封闭性差,埋存点注入速度过快、注入压力过大以及地壳构造运动导致的断层(断裂带)的产生,是导致埋存 CO_2 泄漏的关键因素。

从以上对基本事件结构重要度的分析可知,对于圈闭性良好的油藏,井泄漏通道(包括井密封性失效及固井水泥密封失效)的存在是导致 CO_2 发生泄漏的最主要因素,如图 3 所示。埋存的 CO_2 通过失效的胶结面、破损的水泥环、腐蚀的套管泄漏到地层表面,造成近井带 CO_2 含量增大。

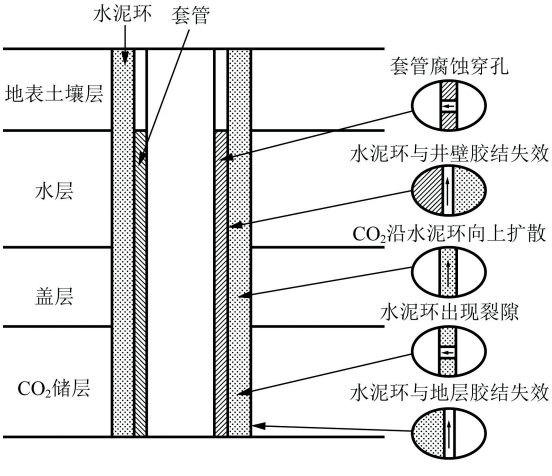

图 3　井泄漏通道

Fig. 3　Well leakage channel

3　CO_2 泄漏地面环境监测

地面泄漏环境监测是一种简单有效的判断 CO_2 埋存是否安全的基本措施。通过环境监测,可以实时掌握 CO_2 对埋存试验区自然环境的影响,一旦发现可能的泄漏途径,能够及时采取补救措施,避免 CO_2 泄漏产生重大的自然灾害。同时,科学完善的环境监测制度是确保公众对 CO_2 地质埋存信心的重要依据。

环境监测的主要对象包括浅层水、土壤气以及大气中的 CO_2 含量等。浅层水常受到水源地限制,而且不宜获得;大气中 CO_2 含量常常到风的影响,且微量的变化不宜发现。土壤气较易获得,且不受风的影响,可作为判断 CO_2 是否发生泄漏的主要有效数据。在 CO_2 驱和地质埋存试验区进行的长期环境监测阶段,主要监测内容为试验区内注入井及生产井周围土壤中的 CO_2 含量变化情况。

3.1　背景值的监测

背景值为实施 CO_2 埋存工作前监测到的 CO_2 含量值,作为以后监测阶段判断 CO_2 是否发生泄漏的环境背景对比值。CO_2 埋存试验区的背景值监测数据见表 3。

表 3　基准数据监测

Table 3　Baseline data

取样日期	监测点	CO_2 含量/10^{-6}
2012-05-16	试验区外 X-1 井周围 30 m“下风处”	370
	试验区外 X-1 井周围 30 m 地下 1 m 土壤中	3 600

3.2　监测结果分析

为了分析 CO_2 的泄漏程度和近地表处 CO_2 的含量分布,选择一口注入井 X-2 和一口生产井 X-3 进行取样监测。分别在井南、北两个方位距离井口 5、10、15 和 25 m 处设置监测点,得到注入井 X-2 和生产井 X-3 附近土壤中 CO_2 含量分布,结果如图 4 所示。

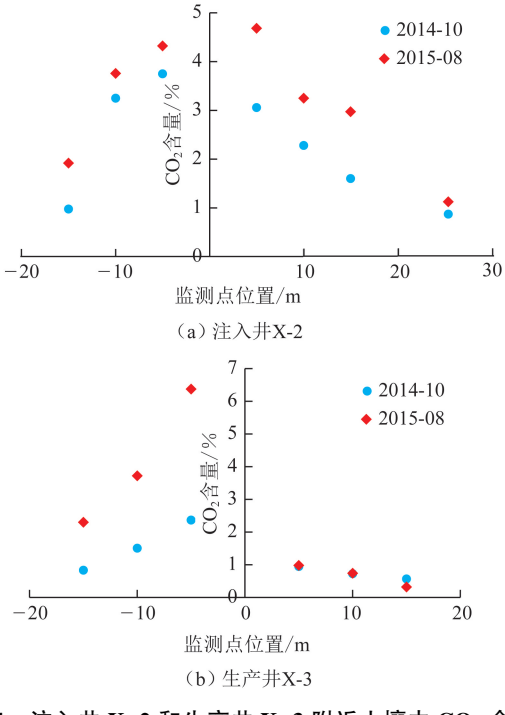

图 4　注入井 X-2 和生产井 X-3 附近土壤中 CO_2 含量

Fig. 4　CO_2 concentration in soil near injection well X-2 and production well X-3

2014 年 10 月和 2015 年 8 月,在注入井 X-2 以及生产井 X-3 附近土壤中取样检测 CO_2 含量,发现后期检测到的 CO_2 含量明显大于前期。并且,距离井口越近,检测到的土壤中 CO_2 含量越大,随着监测点对于井口距离的增大,土壤中的 CO_2 含量逐渐减小,趋于基准值。

通过对 CO_2 驱和埋存试验区的环境监测数据进行分析可以发现,整体上土壤中 CO_2 含量处于正常的范围内,埋存的 CO_2 没有发生大规模的泄漏,但同时应该注意到,土壤中 CO_2 含量有逐渐增大的趋势。越靠近井口附近,土壤中 CO_2 含量越高,当距离超过 30 m 时,土壤中的 CO_2 含量迅速下降,在距离井口 100 m 处,土壤中 CO_2 含量处于基准值范围。这证明埋存的 CO_2 通过套管柱的微裂隙在压力差和浮力作用下产生微量泄漏,CO_2 的泄漏主要发生在近井带,与故障树的分析结果一致。由于在距井口较远处的土壤中或井口附近空气中并未监测到显著地 CO_2 含量变化,可以证明没有发生大规模的 CO_2 泄漏。

4 CO_2 埋存防泄漏措施建议

从埋存试验区环境监测数据可知,虽然整体上没有发生大规模的 CO_2 泄漏,但是试验区土壤中 CO_2 的含量逐年增加,可判定 CO_2 发生泄漏的风险仍然存在。基于故障树分析,对埋存试验区防泄漏措施提出以下建议。

(1)在 CO_2 埋存初期加强环境监测,防止游离态的 CO_2 发生大规模的泄漏。同时,在埋存周期内要密切注意储层温度、压力等条件的变化,以免发生埋存 CO_2 的二次泄漏。

(2)在固井工作中,通过选用优质固井水泥、优化固井过程等措施提高固井质量,防止由于固井不完整而导致井的密封性失效。

(3)对埋存试验区内油气井管柱进行防腐蚀处理,同时定期对 CO_2 埋存试验区内油气井井口装置、套管柱等设备进行检查和维修。

(4)对埋存试验区的废弃井进行相应的防泄漏和封闭处理。

(5)在选择埋存点时要尽量避开有断层和地质活动频繁的区域,同时要避免因为人类活动对地层造成伤害的区域。

5 结 论

(1)通过建立故障树对油藏埋存 CO_2 发生泄漏的途径进行分析和对 CO_2 发生泄漏的风险进行评估发现,故障树中“或”门的数量远大于“与”门的数量,故障树的最小割集数量较多并且最小割集中低阶最小割集的数量远大于高阶最小割集数量,这说明 CO_2 泄漏的途径很多,埋存 CO_2 发生泄漏的风险性较大。

(2)游离态的 CO_2 是导致泄漏发生的最主要因素,在埋存初期要加强环境监测,预防埋存初期大量的游离态 CO_2 发生泄漏。同时,在 CO_2 埋存周期中,要注意储层温度、压力的变化,避免埋存 CO_2 发生二次泄漏。

(3)井泄漏通道(包括井密封性失效及固井水泥密封失效)的存在是导致 CO_2 发生泄漏的最主要原因,埋存的 CO_2 通过失效的胶结面、破损的水泥环、腐蚀的套管泄漏到地层表面,造成在近井带 CO_2 含量增大。

(4)基于 CO_2 驱与埋存示范环境监测数据可知,越靠近井口附近,土壤中 CO_2 含量越高;当距离超过 30 m 时,土壤中的 CO_2 含量迅速下降,在距离井口 100 m 处,土壤中 CO_2 含量处于基准值范围。这证明埋存的 CO_2 通过套管柱的微裂隙在压力差和浮力作用产生微量泄漏。CO_2 的泄漏主要发生在近井地带,与故障树分析的结果一致。

参考文献:

[1] 任韶然,李德祥,张亮,等. 地质封存过程中 CO_2 泄漏途径及风险分析[J]. 石油学报,2014,35(3):591-601.
REN Shaoran, LI Dexiang, ZHANG Liang, et al. Leakage pathways and risk analysis of carbon dioxide in geological storage[J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(3): 591-601.

[2] 任韶然,张莉,张亮. CO_2 地质埋存:国外示范工程及其对中国的启示[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2010,34(1):93-98.
REN Shaoran, ZHANG Li, ZHANG Liang. Geological storage of CO_2: overseas demonstration project and implications to China[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science),2010,34(1):93-98.

[3] 张旭辉,郑委,刘庆杰. CO_2 地质埋存后的逃逸问题研究进展[J]. 力学进展,2010,40(5):517-527.
ZHANG Xuhui, ZHENG Wei, LIU Qingjie. Advances in CO_2 escape after sequestration[J]. Advances in Mechanics,2010,40(5):517-527.

[4] 刘兰翠,李琦. 美国关于二氧化碳地质封存井的要求[J]. 低碳世界,2013,20(1):42-52.
LIU Lancui, LI Qi. Requirements of the United States on

the geological storage of carbon dioxide[J]. Low Carbon World, 2013,20(1):42-52.

[5] ZHANG Y, OLDENBURG C M, BENSON S M. Vadose zone remediation of carbon dioxide leakage from geologic carbon dioxide sequestration sites[J]. Vadose Zone Journal, 2004,3(3):858-866.

[6] LIU L C, LI Qi, ZHANG J T, et al. Toward a framework of environmental risk management for CO_2, geological storage in China: gaps and suggestions for future regulations[J]. Mitigation & Adaptation Strategies for Global Change, 2016, 21(2):191-207.

[7] 李琦,宋然然,匡冬琴,等. 二氧化碳地质封存与利用工程废弃井技术的现状与进展[J]. 地球科学进展, 2016,31(3):225-235.
LI Qi, SONG Ranran, KUANG Dongqin, et al. Status and advances of abandoned process of wells for CO_2 geological storage[J]. Advances in Earth Science, 2016,31(3):225-235.

[8] 谷丽冰,李治平,侯秀林. 二氧化碳地质埋存研究进展[J]. 地质科技情报,2008,27(4):80-84.
GU Libing, LI Zhiping, HOU Xiulin. Existing state about geological storage of carbon dioxide[J]. Geological Science and Technology Information,2008,27(4):80-84.

[9] 罗二辉,胡永乐,李昭. CO_2 地质埋存技术与应用[J]. 新疆石油天然气,2013,9(3):14-21.
LUO Erhui, HU Yongle, LI Zhao. Storage of CO_2 in geologic formations and its application[J]. Xinjiang Oil & Gas,2013,9(3):14-21.

[10] 蔡博峰. 二氧化碳地质封存及其环境监测[J]. 环境经济,2012(8):44-49.
CAI Bofeng. CO_2 geological storage and environmental monitoring[J]. Environmental Economy,2012(8):44-49.

[11] 李琦,刘桂臻,张建,等. 二氧化碳地质封存环境监测现状及建议[J]. 地球科学进展,2013,28(6):718-727.
LI Qi, LIU Guizhen, ZHANG Jian, et al. Status and suggestion of environmental monitoring for CO_2 geological storage[J]. Advances in Earth Science,2013,28(6):718-727.

[12] GOZALPOUR F, REN S R, TOHIDI B. CO_2 EOR and storage in oil reservoir[J]. Oil & Gas Science & Technology, 2005, 60(3): 537-546.

[13] EKE P E, NAYLOR M, HASZELDINE S, et al. CO_2 leakage prevention technologies [R]. SPE 145263, 2011.

[14] KOVSCEK A R. Screening criteria for CO_2 storage in oil reservoirs[J]. Petroleum Science & Technology, 2002, 20(7/8): 841-866.

[15] HAWKES C D, MCLELLAN P J, BACHU S. Geomechanical factors affecting geological storage of CO_2 in depleted oil and gas reservoirs[J]. Work & Occupations, 2005, 44(10):52-61.

[16] TAO Q, CHECKAI D, HUERTA N J, et al. Model to predict CO_2 leakage rates along a wellbore[R]. SPE 135483, 2010.

[17] 张森琦,刁玉杰,程旭学,等. 二氧化碳地质储存逃逸通道及环境监测研究[J]. 冰川冻土,2010,32(6):1251-1261.
ZHANG Senqi, DIAO Yujie, CHENG Xuxue, et al. CO_2 geological storage leakage routes and environmental monitoring[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010,32(6):1251-1261.

[18] SAADATPOOR E, BRYANT S L, SEPEHRNOORI K. CO_2 leakage from heterogeneous storage formations[R]. SPE 135629, 2010.

[19] le GUEN Y, le GOUEVEC J, CHAMMAS R, et al. CO_2 storage: managing the risk associated with well leakage over long time scales[J]. SPE Projects, Facilities & Construction, 2009,4(3):87-96.

[20] 陈利琼,张鹏,梅云新,等. 油气管道危害辨识故障树分析方法研究[J]. 油气储运,2007,26(2):18-30.
CHEN Liqiong, ZHANG Peng, MEI Yunxin, et al. Study on the FTA(fault tree analysis) of oil/gas pipeline hazard[J]. Oil & Gas Storage and Transportation,2007, 26(2):18-30.

[21] YUHUA D, DATAO Y. Estimation of failure probability of oil and gas transmission pipelines by fuzzy fault tree analysis[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2005,18(2):83-88.

[22] 董玉华,高惠临,周敬恩,等. 长输管线失效状况模糊故障树分析方法[J]. 石油学报,2002,23(4):85-89.
DONG Yuhua, GAO Huilin, ZHOU Jing'en, et al. Fuzzy fault tree analysis method for assessing oil and gas pipeline's fault[J]. Acta Petrolei Sinica,2002,23(4): 85-89.

[23] 阎凤霞,董玉华,高惠临. 故障树分析方法在油气管线方面的应用[J]. 西安石油大学学报(自然科学版),2003,18(1):47-50.
YAN Fengxia, DONG Yuhua, GAO Huilin. Application of fault tree analysis to the failure analysis of oil and gas pipelines[J]. Journal of Xi'an Shiyou Institute(Natural Science Edition),2003,18(1):47-50.

(编辑　李志芬)