

深部咸水层 CO₂ 地质储存地质安全性 评价方法研究

刁玉杰 张森琦 郭建强 李旭峰 张 徽

(中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 河北 保定 071051)

摘要:CO₂ 地质储存工程属于环保型工程项目, 地质安全性是影响 CO₂ 长期封存的首要因素。深部咸水层 CO₂ 地质储存地质安全性影响因素主要包括盖层适宜性、场地地震安全性、水文地质条件、地面场地地质条件四个方面, 其中盖层适宜性是 CO₂ 安全储存的最关键因素, 场地地震安全性和水文地质条件次之, 而地面场地地质条件也是影响工程施工的重要因素。本文基于 CO₂ 地质储存的地质安全性影响因素分析, 建立了层次分析结构的地质安全性评价指标体系, 并初步计算了评价指标的权重; 提出可以利用模糊综合评价方法进行深部咸水层 CO₂ 地质储存地质安全性综合评价, 为中国深部咸水层 CO₂ 地质储存的地质安全性评价方法和安全选址指明了方向。

关键词:深部咸水层; CO₂ 地质储存; 地质安全性; 评价; 方法

中图分类号: P642.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2011)03-0786-07

1 引言

目前, 普遍认为 CO₂ 地质储存的储集体主要为正在开采或枯竭的油气藏、因经济或技术原因弃采的煤层和深部咸水层。不同于深部咸水层, CO₂ 提高油气、煤层气采收率 (CO₂-EOR 或 EGR、ECBM) 两种储集模式, 属于 CO₂ 资源利用的范畴, 工程实施过程中会有部分的 CO₂ 回采出来, 并非真正意义上的 CO₂ 地质储存。而 CO₂ 一旦注入深部咸水层中, 其埋存基本不受人为因素和地面因素的影响, CO₂ 地质储存工程场地的地质安全性条件是可能产生 CO₂ 泄露通道而影响 CO₂ 地质储存工程项目长期安全封存的首要因素。

从全球气候变化角度来看, CO₂ 地质储存项目本质上属环保型工程建设项目。从地质安全性角度出发, CO₂ 地质储存场地选址可以借鉴核废料与天然气地下埋存选址方法以及相关的工程建设项目标

准规范^[1]。

2 深部咸水层 CO₂ 地质储存机理

深部咸水层 CO₂ 地质储存储集体为“不可利用”的深部咸水层, 结合《水文地质术语》(GB/T 14157-93) 的定义以及保护淡水和卤水资源的角度, 笔者认为中国适合 CO₂ 地质储存的深部咸水层矿化度宜在 3.0~50.0 g/L。

欲实现 CO₂ 地质储存必须满足 CO₂ 以超临界状态储存于地下。CO₂ 的临界压力为 7.38 MPa, 临界温度为 31.1℃, 也就是说理论埋藏深度必须 ≥ 800 m。同时, 在存储点附近必须有可供进行大规模 CO₂ 存储的优质储层, 储层之上必须有稳定的区域性盖层(或隔水层), 以防止 CO₂ 的直接泄漏^[2,3]。

碳封存领导人论坛 (the Carbon Sequestration Leadership Forum, CSLF) 对 CO₂ 地质储存机理进行了详细描述, 并指出 CO₂ 地质储存机理可以分为两

收稿日期: 2010-09-15; 改回日期: 2011-01-17

基金项目: 中国地质调查局地质大调查项目 (1212010060302, 1212010060304)、中国科技部 21 世纪议程管理中心中澳二氧化碳地质封存合作 (CAGS) 项目资助。

作者简介: 刁玉杰, 男, 1983 年生, 硕士, 助理工程师, 主要从事 CO₂ 地质储存领域的研究; E-mail: diaoyujie1983@163.com。

大类:物理储存和化学储存。其中,物理储存包括构造地层静态储存、束缚气储存和水动力储存;化学储存包括溶解储存和矿化储存。

物理捕获主要是通过水动力捕获实现。当 CO₂ 被注入到深部储层中,部分 CO₂ 将溶解于地层水中,并以溶解态的方式通过分子扩散、分散和对流进行运移,极低的地层水运移速率确保了 CO₂ 在地层中的长期(地质时间尺度)储存^[4,5]。

化学捕获主要通过碳酸盐矿化和碳酸盐岩溶解实现,注入的 CO₂ 与储层岩石发生缓慢的化学反应,形成碳酸盐矿物(碎屑岩储层)或 HCO₃⁻ 离子(碳酸盐岩储层),从而把 CO₂ 储存下来。CO₂ 的捕获形式与储存时间关系如表 1 所示^[6,7]。

3 CO₂ 泄露通道及环境危害

3.1 CO₂ 泄露通道

2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南总结了 CO₂ 地质储存潜在的泄露路径(表 2)^[8]。认为 CO₂ 可以通过以下途径泄露:① 如果 CO₂ 能突破盖层毛细管的吸附压力,那么 CO₂ 可以通过盖层的孔隙

系统泄露;② 通过盖层中断层和裂缝通道系统泄露;③ 通过人为因素,如对废弃井或现有钻井的不封闭处理进行泄露;④ 通过储层与周围岩层的水文动力系统进行泄露;泄露方式有侧向泄露(断层、跨越水力圈闭、溢出口)、通过盖层散失(扩散、裂隙)和通过井筒泄露(封井泥浆、井壁腐蚀)等^[9]。而大量的 CO₂ 泄露可能产生一定的环境危害^[10]。

张森琦等^[10]将 CO₂ 地质储存泄露通道分为人为泄露通道、地质构造泄露通道以及跨越盖层和水力圈闭泄露通道 3 类。其中,人为泄露通道主要包括 CO₂ 灌注井、监测井和场地原有废弃井等;地质构造泄露通道分为断裂构造泄露通道、盖层扩散裂隙构造泄露通道、构造成因地裂缝泄露通道和地震成因构造泄露通道 4 种。

本文重点对 CO₂ 地质储存相关的地质安全性因素进行剖析和研究。

3.2 CO₂ 泄露可能产生的环境危害

IPCC 特别报告推断,CO₂ 地质储存可能出现由于泄露进入饮用地下水的补给层而导致地下水污染;CO₂ 泄露到地表后,可能会造成人类健康和安全的潜在危险,以及陆地和海洋生态系统的破坏。CO₂ 灌注过程中,如果注入的 CO₂ 纯度不是很高,在一些特定的环境下,H₂S、S₂、N₂ 和其他气体等将会和 CO₂ 一起埋存在储集体中,从而带来一些潜在的风险;同时,由于 CO₂ 注入储集层会使地层压力大大增加,如果注入压力超过地层压力,也可能产生

表 1 CO₂ 捕获形式与储存时间

Table 1 Capture form of CO₂ and storage time

CO ₂ 捕获类型	注入后稳定的时间/年
以微观残余形式存在	< 10
存在于构造中	□ 10
以溶解形式存在	□ 100
发生地球化学反应	□ 1000

表 2 CO₂ 地质储存潜在的泄露路径^[8]

Table 2 Potential leakage routes of CO₂ geological storage

排放类型	潜在泄露路径/源	其他注释
由油井和开采引起的直接泄露路径	作业或废弃井	预期将尽一切努力来确定储存场地内及周围的废弃井。建造、密封,和/或封井不当,可造成最大的潜在泄露风险。修复泄露井的技术已经开发,如果有必要应该实施
	井喷(注入井产生的非控制排放)	高流量泄露的可能源,通常在短期内。井喷要修复,可能极少发生,因为常规钻井方法可减少风险
	CO ₂ 储藏库的未来开采	一个煤床储层的问题
天然泄露和转移路径(可引起长期排放)	如果超出毛细管吸入压力或 CO ₂ 存于溶液,经过低渗透盖岩中的孔隙系统	适当场地特性、选择和受控的注入压力可减少泄露的风险
	如果当地无盖岩	适当场地特性和选择可减少泄露风险
	如果储藏库过满,则经过溢点	包括水文地质评估的适当场地特性和选择可减少泄露风险
	由于 CO ₂ -水-岩石反应,经过退化的盖岩	适当场地特性和选择可减少泄露风险。盖岩和相关地球化学因素的详细评估将会有所帮助
地质储存场地的其他溢散排放	通过 CO ₂ 溶解于孔隙流体,随后由天然流体流量输出储存场地	包括水文地质评估的适当场地特性和选择,可确定/减少泄露的风险
	通过天然或人为断层和/或破裂	高流量泄露的可能源。适当场地特性核潜艇、选择和受控的注入压力可减少泄露的风险
地质储存场地的其他溢散排放	溢散甲烷排放可产生于地质储存场地 CO ₂ 替代 CH ₄ 这种对于 ECBM、EOR 和耗尽的油气库,情况尤其如此	需要适当的评估

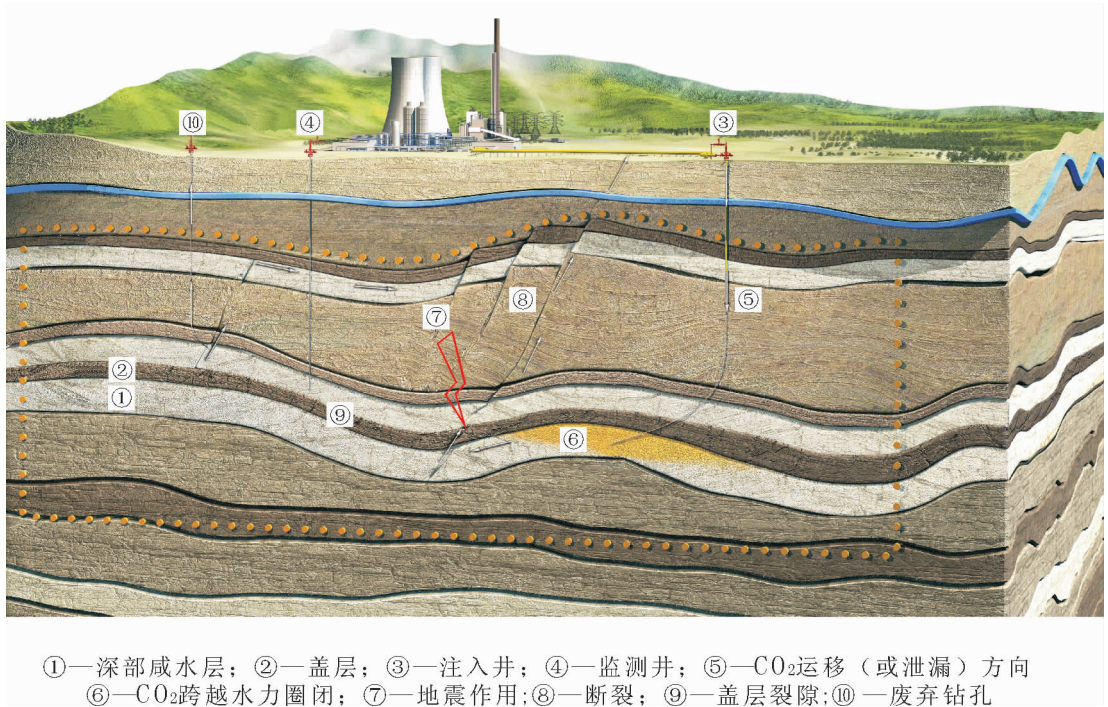


图 1 CO₂ 地质储存泄露通道示意图(据 DNV 修改, 2010)
Fig.1 Schematic diagram of escaping channel of CO₂ geological storage

诱发地震的危险^[9-12]。

4 地质安全性评价结构

地质安全性是实现 CO₂ 地质储存的首要前提。IPCC 特别报告认为, CO₂ 地质储存泄露风险要比天然气储存小;同核废料地质处置相比,核废料是以其高度的危害性为基础进行风险评估的,相比之下 CO₂ 的危害要温和的多^[1]。CO₂ 地质储存地质安全性因素主要包括盖层适宜性、场地地震安全性、水文地质条件、地面场地地质条件四个方面。

4.1 盖层适宜性

稳定的区域性盖层是实现 CO₂ 地质储存的有力保障。CO₂ 超临界状态地质储存要求区域性盖层埋深在 800 m 之下,空间分布连续、厚度相对较大,完整,岩层不渗透,无贯穿性脆性断裂发育,密闭性好。此外,要求盖层岩石力学性质坚固。因此对盖层封闭能力评价时,既要考虑盖层的宏观发育特征,又要考虑其微观封闭能力。

4.1.1 盖层宏观评价

理论上讲,任何类型的岩石都可作为封盖层,因为封闭能力取决于其物理性质,唯一的条件是构成

封闭面的岩石组合所具有的排替压力要大于或等于油气藏中油气的剩余压力^[12-13]。

盖层封闭性宏观性影响因素主要包括岩性、厚度、埋深、分布连续性、力学稳定性、断层及断裂发育情况和封闭性等。

4.1.2 盖层微观封闭性指数(CRI)

盖层封油气指数(CRI)概括了各种主要地质因素,对其封闭性的影响,较排替压力等指标更能客观反映盖层的封闭性,初步实现了盖层封闭性评价的综合化和定量化。应用盖层封油气指数可以确定封油封气门限及其演化过程中能够封油封气的最大临界高度,为盖层的判别和定量评价创造了条件^[13-15]。

由于中国 CO₂ 地质储存工作刚刚起步,尚无盖层对不同相态 CO₂ 封闭指数的权威数据,只能借鉴油气地质方法进行盖层封闭性的相对评价。庞雄奇等^[13]按照 CRI 大小将盖层划分为最好、好、较好、差、非 5 个级别。沈平等^[2]结合 CO₂ 物理性质,也是利用封气指数来定量评价盖层封闭性^[3,13]。

4.2 场地地震安全性

4.2.1 地震动峰值加速度(g)

地震动峰值加速度是指与地震动加速度反应谱

最大值相应的水平加速度。《中国地震动参数区划图》(GB 18306-2001) 给出了中国地震动参数区划图及其技术要素和使用规定,同样适用于 CO₂ 地质储存建设工程项目。

4.2.2 场地地震安全性

《工程场地地震安全性评价》(GB 17741-2005) 规定,新建、扩建、改建建设工程及大型厂矿企业、城镇、经济建设开发区的选址必须进行工程场地的地震安全性评价。CO₂ 地质储存工作场地建设标准可以借鉴核废料等埋存标准,归类为《工程场地地震安全性评价》(GB 17741-2005) I 级工作。

4.2.3 25 km 半径范围内是否有活动断层

活动断层是指在晚第四纪以来有活动的断层。中国有关核电站规范指在距离厂址半径 5 km 的范围内不得有能动断层,能动断层与活动断层的区别在于强调地表或近地表可能引起的错动从而破坏储盖层。CO₂ 注入至 800 m 以下深度,活动断层除本身可能成为 CO₂ 泄露通道外,也可能发生错动而破坏储盖层而引发 CO₂ 泄露。

依据《工程场地地震安全性评价》(GB 17741-2005),对 I 级场地地震安全性评价工作近场区范围应外延至半径 25 km 范围。挪威北海的 Sleipner 项目是目前世界上最成功的 CO₂ 深部咸水层储存项目,该项目开始于 1996 年,预计在项目结束时可以储存 CO₂ 约 2000×10⁴ t。通过四维地震技术,在 Sleipner 咸水层中的 CO₂ 运移和存储状况得到了成功监测,监测结果表明,由于浮力作用和储层渗透率较低的原因 CO₂ 向上发生运移,与此同时在水平方向上也向外扩散,进而产生巨大的储存有 CO₂ 的面积,大约 5 km²,此外也表明由于盖层的作用阻止了 CO₂ 泄露^[9]。

因此可以借鉴《工程场地地震安全性评价》(GB 17741-2005) I 级场地地震安全性评价工作,对近场区 25 km 范围内存在活动断层即认为 CO₂ 地质储存工程场地适宜性差。

4.3 水文地质条件

盆地中的流体主要在较高孔渗的输导层、层间断面和断裂及裂隙系统中运动。流体运动与断裂活动均为相互作用的动态过程,同生断裂可以引起高压流体从压力囊中大规模突破,而高压的流体又可造成水力破裂,形成由断裂和裂隙组成的 CO₂ 运移或泄露通道^[9]。

类比水文地质条件对煤层气赋存、运移影响研究成果^[6],根据 CO₂ 地质储存与水文地质条件的关系,将水文地质条件对 CO₂ 流体的作用分为水力封闭作用、水力封堵作用及水力运移逸散作用 3 种形式,对 CO₂ 储存安全性依次降低。

水力封闭作用发生于断裂不甚发育的宽缓褶皱或单斜中,而且断裂构造多为不导水性断裂,特别是一些边界断层,具有挤压、逆掩性质,成为隔水边界,储层上部和下部存在良好的隔水层(盖层),CO₂ 地质储存咸水体与上覆、下伏含水层无水力联系,区域水文地质条件简单,含水层水动力较弱,地下水径流缓慢甚至停滞,地下水以静水压力、重力驱动方式流动。水力封闭作用一般发育在深部,地下水通过压力传递作用,对 CO₂ 流体形成水力封闭。

水力封堵作用常发生于不对称向斜或单斜中,在一定压力差条件下,CO₂ 从高压区向低压区渗流,如果含水层地表接受补给,顺层由浅部向深部运动,则 CO₂ 向上扩散时将被地下水封堵,达到封存 CO₂ 流体目的。

水力运移逸散作用常见于导水性强的断层构造发育地区,通过导水断层或裂隙,沟通储层与含水层,水文地质单元的补径排系统完整,含水层富水性与水动力强,含水层与 CO₂ 地质储存储层水力联系较好,在地下水的运动过程中,地下水可以携带 CO₂ 运移而泄露至地表。

4.4 地面场地地质条件适宜性

地面场地地质条件时影响 CO₂ 地质储存工程场地施工的重要因素。CO₂ 地质储存工程场地可以根据《建设用地地质灾害危险性评估技术要求》(DZ 0245-2004)进行地质灾害危险性评估,崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害的易发性越高,越不适宜 CO₂ 地质储存。同时,CO₂ 地质储存工程不宜在火山活动区、沙漠活动区或低于江河湖泊、水库最高水位线或洪泛区选址。

4.5 地质安全性评价指标体系

根据以上对 CO₂ 地质储存地质安全性影响因素的分析,参考 Bachu(2003)深部咸水层 CO₂ 地质储存适宜性评价标准^[17],初步建立了 CO₂ 地质储存安全性评价指标体系,如表 3 所示。

5 层次分析法基础上的评价方法

层次分析法 (Analytic Hierachy Process, 简称

表3 CO₂地质储存安全性评价指标体系
Table 3 Safety evaluation of the system of CO₂ geological storage

指标层	权重	具体指标	评价标准			权重
			好(3分)	一般(2分)	差(1分)	
盖层适宜性评价指标层	0.40	岩性	蒸发岩类	泥质岩类	页岩和致密灰岩	0.14
		单层厚度	>20	10~20	<10	0.20
		累计厚度	>300	150~300	<150	
		分布连续性	好	一般	差	0.15
		力学稳定性	好	一般	差	0.13
		封气指数	>200	100~200	<100	0.19
		主力盖层之上的小盖层数量	多套	一套	无	0.02
		断裂和裂缝发育情况	有限的裂缝	裂缝发育中等	大裂缝	0.17
地震安全性评价指标层	0.30	地震动峰值加速度	<0.10 g	0.10~0.15 g	>0.30 g	0.18
		场地地震安全性	高	中等	低	0.35
		25km 范围内是否有活动断裂	否	×	是	0.47
水文地质条件评价指标层	0.20	水动力作用	水力封闭作用	水力封堵作用	水力运移逸散作用	1.00
地面场地地质条件适宜性评价指标层	0.10	崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害的易发性	无	低易发	中—高易发	0.18
		是否在采矿塌陷区、岩溶塌陷区	否	×	是	0.21
		是否在地面沉降区	否	×	是	0.12
		是否在沙漠活动状况区	否	×	是	0.09
		是否在火山活动区	否	×	是	0.34
是否低于江河湖泊、水库最高水位线或洪泛区	否	×	是	0.06		

AHP法)是由 T. L. Saaty 于 20 世纪 70 年代中期研究出来的。层次分析法作为一种将定性问题转化为定量计算行之有效的系统分析与决策方法,特别适用于那些难以完全用定量进行分析的复杂问题,具有简洁、灵活、实用等特点。

5.1 评价因子取值及其权重

对评价标准好、一般、差分别赋值 3 分、2 分、1 分,从而实现 CO₂ 地质储存地质安全性的定量评价。

对盖层适宜性、地震安全性、水文地质条件、地面场地地质条件适宜性采用专家打分法,权重取值分别为 0.40,0.30,0.20,0.10;对盖层适宜性、水文地质条件、地震安全性、地面场地地质条件适宜性所属的指标层利用层次分析法计算权重,如表 3 所示。

5.2 利用隶属函数确定评价决策矩阵^[18]

根据评价要素等级标准,利用升(或降)半梯形和矩形曲线构造隶属函数。对于数值越大适宜性等级越高的定量指标,采用升半梯形分布的隶属函数;对于数值越小适宜性等级越高的定量指标,采用降半梯形分布的隶属函数;对于定性指标则采用正态型分布的隶属函数。根据求出的隶属度得到单要素评价决策矩阵 R_i 。

$$R_i = \begin{bmatrix} r_{i11} & r_{i12} & r_{i13} & r_{i14} \\ r_{i21} & r_{i22} & r_{i23} & r_{i24} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{ij1} & r_{ij2} & r_{ij3} & r_{ij4} \end{bmatrix}$$

其中 r_{ij} 表示准则层指标集 U_i 中的指标 U_{ij} 对于评价等级 V_n 的隶属度。

5.3 模糊综合评价

由单要素的权重 W_i 和评价决策矩阵 R_i 合成得到单因素模糊评价结果 B_i ^[17]。

评价集是对评价结果的直接描述和表征形式,本文中评价结构分为三个等级,建立评价集 V :

$$V = \{v_1, v_2, v_3\}$$

式中: v_1, v_2, v_3 分别代表评价区 CO₂ 地质储存适宜性好、一般、差。

模糊矩阵的复合运算采用 I 型综合评判公式,即 $(\cdot, +)$ 模型,即 $B = W_i \cdot R_i$ 。

最终生成各评价单元的相对模糊指数,即评价指数。评价指数越大,越接近于最高等级,越适宜

CO₂ 地质储存。

6 结 论

地质安全性是实现 CO₂ 长期封存的首要因素,也是工程场地选址需要考虑的重要因素。对 CO₂ 地质储存地质安全性评价可以从盖层适宜性、场地地震安全性、水文地质条件、地面场地地质条件四个方面建立 CO₂ 地质储存安全性层次结构指标评价体系;其中,盖层适宜性是最关键因素,地震安全性和水文地质条件次之,地面场地地质条件适宜性虽占比重较小,但是影响工程施工的重要因素。在层次评价指标结构基础上,可以利用模糊综合评价方法进行 CO₂ 地质储存地质安全性综合评价。

但中国的 CO₂ 地质储存示范工程建设刚刚起步,亟待 CO₂ 地质储存工作者进行工程场地地质安全性评价方面的进一步研究和实践,对 CO₂ 地质储存的安全选址具有重要意义。

参考文献 (References):

- [1] IPCC. Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage[R]. July, 2005.
- [2] 张洪涛,文冬光,李义连,等. 中国二氧化碳地质埋存条件分析及有关建议[J]. 地质通报, 2005, 24(12): 1101-1110.
Zhang Hongtao, Wen Dongguang, Li Yilian, et al. Conditions for CO₂ geological sequestration in China and some suggestions [J]. Geological Bulletin of China, 2005, 24(12): 1107-1110 (in Chinese with English abstract).
- [3] 沈平平,廖新维. 二氧化碳地质埋存与提高石油采收率技术[M]. 北京:石油工业出版社, 2009.
Shen Pingping, Liao Xinwei. The Technology of Carbon Dioxide Stored in Geological Media and Enhanced Oil Recovery [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2009 (in Chinese).
- [4] Bert M. IPCC special report on CO₂ capture and storage [M]. London UK: Cambridge University Press, 2005.
- [5] Holloway S. Underground sequestration of carbon dioxide available greenhouse gas mitigation option [J]. Energy Conversion and Management, 2005, 30(11/12): 231-333.
- [6] Holtz M H. Residual gas saturation to aquifer influx: A calculation method for 3-D computer reservoir model construction [C]. SPE 75502, 2002.
- [7] 许志刚,陈代钊,曾荣树,等. CO₂ 地下地质埋存原理和条件[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2009, 31(1): 91-97.
Xu Zhigang, Chen Daizhao, Zeng Rongshu et al. The theory and conditions of geological storage of CO₂ [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2009, 31(1): 91-97 (in Chinese with English abstract).
- [8] 政府间气候变化专门委员会 (IPCC). 2006 IPCC 国家温室气体排放清单指南[R]. 2006.
Intergovernmental Panel on Climate Change. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories[R]. 2006.
- [9] 许志刚,陈代钊,曾荣树. CO₂ 地质埋存泄漏风险及补救对策[J]. 地质论评, 2008, 54(3): 373-386.
Xu Zhigang, Chen Daizhao, Zeng Rongshu. The Leakage Risk Assessment and Remediation Options of CO₂ Geological Storage [J]. Geological Review, 2008, 54(2): 373-386 (in Chinese with English abstract).
- [10] 张森琦,刁玉杰,程旭学,等. 二氧化碳地质储存泄漏通道及环境监测研究[J]. 冰川冻土, 2010, 12(6): 1251-1261.
Zhang Senqi, Diao Yujie, Cheng Xuxue, et al. CO₂ Geological Storage Leakage Routes and Environment Monitoring [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, 12(6): 1251-1261 (in Chinese with English abstract).
- [11] 许志刚,陈代钊,曾荣树,等. CO₂ 地下埋存分布状况及环境影响的监测[J]. 气候变化研究进展, 2008, 4(6): 363-368.
Xu Zhigang, Chen Daizhao, Zeng Rongshu, et al. Technologies for monitoring subsurface CO₂ distribution and local environmental effects of CO₂ geological storage [J]. Advances in Climate Change Research, 2008, 4(6): 363-368 (in Chinese with English abstract).
- [12] 曲建升,曾静静. CO₂ 捕获与封存: 技术、实践与法律——国际推广 CO₂ 捕获与封存工作的法律问题研究[J]. 世界科技研究与发展, 2007, 29(6): 78-83.
Qu Jiansheng, Zeng Jingjing. Carbon Dioxide Capture and Storage: Technology, Demonstration, and Legal Aspects—An Analysis on the Legal Related Issues of International CCS Efforts [J]. World Sci-Tech R&D, 2007, 12(6): 78-83 (in Chinese).
- [13] 庞雄奇,付广,万龙贵. 盖层封油气性综合定量评价——盆地模拟在盖层评价中的应用[M]. 北京:石油出版社, 1998.
Pang Xiongqi, Fu Guang, Wan Longgui. Cover layer sealing oil and gas sex comprehensive quantitative assessment—basin simulation in cap rock evaluation of application [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1998 (in Chinese).
- [14] 鲁雪松,蒋有录,宋岩. 盖层力学性质及其应力状态对盖层封闭性能的影响[J]. 天然气工业, 2007, 27(8): 48-56.
Lu Xuesong, Jiang Youlu, Song Yan. Influence of mechanical properties and stress state of caprock on its sealing performance [J]. Natural Gas Industry, 2007, 27(8): 48-56 (in Chinese with English abstract).
- [15] 李小春,小出仁,大隅多加志. CO₂ 地中隔离技术及其岩石力学问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(6): 989-994.
Li Xiaochun, Koide Hitoshi, Ohsumi Takashi. CO₂ aquifer storage and the related rock mechanics issues [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(6): 989-994 (in Chinese with English abstract).
- [16] 叶建平,武强,王子和. 水文地质条件对煤层气赋存的控制作用[J]. 煤炭学报, 2001, 26(5): 459-462.
Ye Jianping, Wu Qiang, Wang Zhihe. Controlled characteristics of

hydrogeological conditions on the coalbed methane migration and accumulation[J]. Journal of China Coal Society, 2001, 26(5):459-462(in Chinese with English abstract).

[17] Bachu S, Adams J. Sequester ration of CO₂ in geological media in response to climate change;Capacity of deep saline aquifers to sequester CO₂ in solution[J]. Energy Conversion and Management,

2003, 44:3151-3175.

[18] 黄栋, 王翊虹. 模糊综合评价法在垃圾填埋场选址中的应用[J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 2009, 30(2):10-12.

Huang Dong, Wang Yihong. Application of fuzzy comprehensive evaluation in selection of landfill site [J]. Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition), 2009, 4(2):10-13.

Geological safety evaluation method for CO₂ geological storage in deep saline aquifer

DIAO Yu-jie, ZHANG Sen-qi, GUO Jian-qiang, LI Xu-feng, ZHANG Hui

(Center for Hydrogeology and Environmental Geology, CGS, Baoding 071051, Hebei, China)

Abstract: CO₂ geological storage projects belong to environmental protection projects, and geological safety is the primary factor for CO₂ sequestration for a long time. Geological safety influencing factors of CO₂ geological storage include cap rock suitability, site safety for earthquake, hydrogeological condition and geological condition of the ground site, of which cap rock suitability is the most important factor, and geological condition of the ground site is the main factor influencing project construction. According to an analysis of CO₂ geological storage safety influencing factors, the authors built geological safety evaluation indexes system on the basis of the AHP structure and tentatively calculated the weights. It is held that CO₂ geological storage safety could be evaluated comprehensively by fuzzy synthetic evaluation method. In addition, the geological safety evaluation method of CO₂ geological storage and the means for safe project site selection in China's deep saline aquifer are put forward in this paper.

Key words: saline aquifer; CO₂ geological storage; geological safety; evaluation; method

About the first author: DIAO Yu-jie, male, born in 1983, master, assistant engineer, mainly engages in the study of CO₂ geological storage; E-mail: diaoyujie1983@163.com.