

# 规模化深部咸水含水层 CO<sub>2</sub> 地质储存 选址方法研究

张森琦 郭建强 刁玉杰 张 徽 贾小丰 张 杨

(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:** 本文依据中国沉积盆地 CO<sub>2</sub> 地质储存潜力评价结果, 认为深部咸水含水层是实现规模化 CO<sub>2</sub> 地质储存的主体, 进而对适宜 CO<sub>2</sub> 地质储存的深部咸水含水层属性进行了界定。提出了深部咸水含水层 CO<sub>2</sub> 地质储存选址原则, 合理划分了选址工作阶段。建立了选址技术指标、安全性评价指标、经济适宜性和地面地质-社会环境选址指标 4 个指标层, 60 余个指标的选址指标体系, 提出了基于层次分析(AHP)的多因子排序选址评价方法。本文的研究成果对中国深部咸水含水层 CO<sub>2</sub> 地质储存场地选址具有一定的指导意义。

**关键词:** CO<sub>2</sub> 地质储存; 深部咸水含水层; 场地; 选址; 指标体系

**中图分类号:** P642.5      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-3657(2011)06-1640-12

## 1 前 言

实施 CO<sub>2</sub> 地质储存工程至关重要的第一步就是储存场地的选择和综合评价, 选址的成功与否决定着储存工程的使用寿命和安全性等一系列关键问题。若 CO<sub>2</sub> 地质储存场地选址失当, 将会带来诸多不利影响, 甚至造成难以弥补的损失。因此 CO<sub>2</sub> 地质储存场地选址是一项谨慎而复杂的系统工程。

2005 年, 国土资源系统对中国 CO<sub>2</sub> 地质储存潜力进行了估算<sup>[1]</sup>。结果显示, 中国 CO<sub>2</sub> 地质储存总量为 14 548×10<sup>8</sup> t。其中, 24 个主要沉积盆地, 分布面积约 34×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup> 的深部咸水含水层可储存 CO<sub>2</sub> 约 14 350×10<sup>8</sup> t, 占总储存量的 98.64%; 46 个含油气盆地可储存 CO<sub>2</sub> 约 78×10<sup>8</sup> t, 占总储存量的 0.54%; 68 个主要煤层区可储存 CO<sub>2</sub> 约 120×10<sup>8</sup> t, 占总储存量的 0.82%(图 1-a)。

随着评价范围的扩大和资料的不断丰富, 2010 年的评价结果表明, 中国陆域深部咸水层 CO<sub>2</sub> 理论

地质封存量占总理论地质封存量的 98.1%; 油藏 CO<sub>2</sub> 理论地质封存量占总理论地质封存量的 0.4%; 天然气藏 CO<sub>2</sub> 理论地质封存量占总理论地质封存量的 1.2%; 煤层气藏 CO<sub>2</sub> 理论地质封存量占总理论地质封存量的 0.3%(图 1-b)。按全国每年 60×10<sup>8</sup> t 的 CO<sub>2</sub> 排放量计算, 可供中国 CO<sub>2</sub> 地质储存 900 年以上<sup>①</sup>。

上述两次评价结果均表明, 深部咸水含水层 CO<sub>2</sub> 地质储存潜力占 98%以上, 远远大于其他储存介质, 是实现规模化 CO<sub>2</sub> 地质储存的主力。但国内外深部咸水含水层 CO<sub>2</sub> 地质储存选址研究尚属空白, 加之中国沉积盆地类型复杂, 地壳稳定性总体较差, 开展相关选址研究十分必要。

## 2 适宜规模化 CO<sub>2</sub> 地质储存的深部咸水含水层属性界定

### 2.1 深部咸水含水层的水质属性

国标《水文地质术语》(GB/T 14157-93)依地下

收稿日期: 2011-03-10; 改回日期: 2011-05-06

基金项目: 中国科技部 21 世纪议程管理中心“中—澳二氧化碳地质储存选址方法及其指标研究”项目、中国地质调查局项目(水[2011]01-16-02)资助。

作者简介: 张森琦, 男, 1962 年生, 教授级高级工程师, 从事水文地质、工程地质、环境地质应用与研究; E-mail: senqizhang@126.com。

①中国地质调查局. 中国二氧化碳地质储存潜力评估报告[R], 2011.

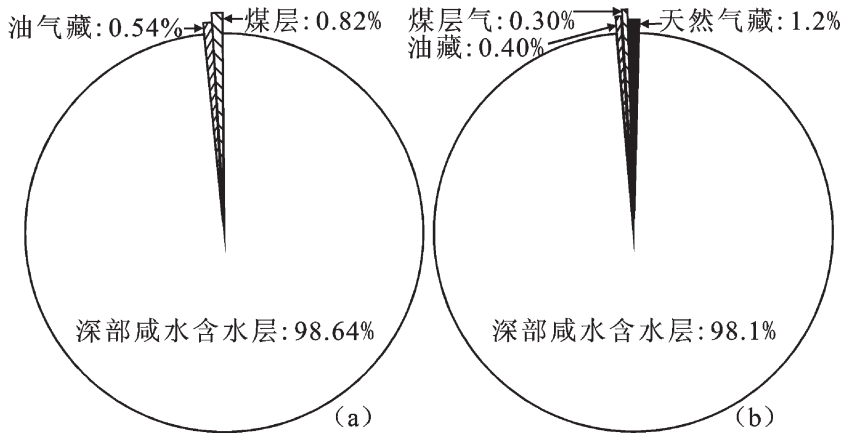


图 1 各评价阶段不同储存介质 CO<sub>2</sub> 地质储存潜力构成比例

Fig.1 the proportions of the potential evaluation of CO<sub>2</sub> geological storage in different storage media at different stages

水矿化度,对地下水类型作了如下划分:地下淡水是指总矿化度小于 1.0 g/L 的地下水;地下微咸水是指总矿化度在 1.0~3.0 g/L 之间的地下水;地下咸水是指总矿化度在 3.0~10.0 g/L 之间的地下水;地下卤水是指总矿化度大于 50.0 g/L 的地下水。出于工、农业多部门、多行业用水对矿化度要求较为宽泛和本着保护地下卤水资源等方面考虑,依据上述,确定深部咸水含水层地下水矿化度介于 10~50 g/L,为既不能作为工农业用水,也不满足地下卤水液体矿化度要求,当今技术、经济条件下“不可利用”的深部咸水含水层。

储层地下水水化学类型无疑是影响 CO<sub>2</sub> 地质储存机理的因素之一,将其作为选址指标尚缺乏理论依据。但场地勘查阶段应查明储层地下水水化学组成和地下水类型,并作为储层水质变化的环境背景监测对照值。

## 2.2 深部咸水含水层的水文地质属性

通常所谓的深层水是指埋藏于地壳较深部位岩层中承压水的统称。“深层”是相对浅层地下水而言的,在深度上与浅层地下水并无绝对的界限<sup>[2]</sup>。在中国水文地质学研究领域,“深层”不是“深度”的概念,主要是指地下水有无补给或补给快慢而言的,以区别于积极参与现代水循环的浅层地下水。由于深层地下水多具承压性,有时又称作深层承压水<sup>[3]</sup>。

在水动力条件上,深层水处于水交替缓慢或十分缓慢的半封闭、封闭型水文地质结构中;在水化学成分组成上,深层地下水总矿化度普遍较高,但也有低至 2~8 g/L 者。深层地下水中 K、Mg、B、Li、Br、I

等有用元素含量普遍较高,其浓度可达到或超过工业品位。深层地下水贫氧或缺氧,代之以 H<sub>2</sub>S、N<sub>2</sub>(变质成因或生物成因)和烃类气体为主体成分。

CO<sub>2</sub> 地质储存要求具备一定的深度和温、压条件,需要在超临界压力下将 CO<sub>2</sub> 注入储层内,通常情况下到达地表 800 m 以下深处 CO<sub>2</sub> 的超临界点,即温度高于 31.1℃、压力高于 7.38 MPa 时,才能保持其稳定性和安全性,因此 CO<sub>2</sub> 的储存深度至少应在 800 m 以下。

基于上述,适宜 CO<sub>2</sub> 地质储存的深部咸水含水层是指稳定隔水层(盖层)底板 800 m 深度以下,水交替缓慢或十分缓慢的半封闭、封闭型水文地质结构中的含水层。

## 2.3 深部咸水含水层的资源属性

在开发利用上,若深层水为淡水时,同样具有浅层水的利用价值。随着人口的增加,经济的发展,地下水资源日益匮乏。当深层地下水隶属于一种淡的或较淡的地下水时,就可应用于工业、农业和民用供水。因此,深层地下水的开发利用越来越受到重视。

面对当前中国地下卤水品质下降、储量减少、地下卤水水位下降,正在成为困扰中国制盐业及其相关产业面临的巨大问题。因此对地下卤水资源应予以保护。

作为新型能源之一的地热资源的开发利用,具有其他能源不可比拟的低成本、可持续利用和环保等优点。最新评价结果表明,中国主要沉积盆地传导型地热资源以每年开采 37.4×10<sup>18</sup> J (折合标准煤 12.8×10<sup>8</sup> t) 共开采 200 年计,每年可减少 CO<sub>2</sub> 排放

$33.5 \times 10^8 \text{ t}^{\text{①}}$ 。因此,在相关技术尚未成熟和纯粹以  $\text{CO}_2$  减排为目的进行  $\text{CO}_2$  地质储存时,选址时应考虑对地热资源开发利用的影响。

依据上述资源属性界定,适宜  $\text{CO}_2$  地质储存的深部咸水含水层是指现今技术、经济条件下,不能满足工农业利用的水资源、地热资源,亦非赋存有液体矿矿水的含水层。

## 2.4 浅层地下水脆弱性和环境保护属性

如果深部咸水含水层上覆隔水层或盖层封闭性存在缺陷时,储存于其下储层内的  $\text{CO}_2$  就有可能发生逃逸现象,从而进入上部饮用地下水含水层,导致饮用含水层中  $\text{CO}_2$  的溶解量增加,pH 值降低,使某些微量元素在地下水中的富集程度增加,形成一些有机酸,增加某些有毒重金属或化合物如铅、硫酸盐和氯化物的活动性,可能改变地下水的颜色、气味和味道,从而造成饮用地下水水质破坏<sup>[4]</sup>。因此,要求储存  $\text{CO}_2$  的深部咸水含水层上覆必须有良好的盖层或隔水层与饮用水含水层隔离,盖层或隔水层无裂缝和活断裂贯穿,亦无贯穿盖层的废弃井,以避免  $\text{CO}_2$  逃逸,影响上部浅层饮用地下水水质、土壤及大气环境。

综上所述,适宜于规模化  $\text{CO}_2$  地质储存的深部咸水含水层是指顶板埋深在 800 m 以下,具有一定分布面积、厚度大,含水介质孔隙度、渗透率高,顶、底板为隔水性良好、大厚度、稳定的泥、膏岩类隔水层/盖层,且无贯通性的盖层裂缝和活断裂发育,亦无畅通的废弃井,矿化度介于 10~50 g/L,既不适合工农业利用,更不适合人类饮用,也达不到地下卤水液体矿矿化度要求,当今技术、经济条件下不可利用的深部咸水含水层。

## 3 选址原则

本文所指的规模化  $\text{CO}_2$  地质储存相当于欧美等发达国家的“商业运行”。目前,国内对于规模化  $\text{CO}_2$  地质储存年灌注量尚无共识的界定。在此借鉴澳大利亚的划分方案,即中试阶段  $\text{CO}_2$  地质储存量为 5~10 000 t/a,示范工程阶段  $\text{CO}_2$  地质储存量为 50~100 000 t/a,商业运行阶段  $\text{CO}_2$  地质储存量为

400~500  $\times 10^4 \text{ t/a}^{\text{②}}$ 。结合中国  $\text{CO}_2$  地质储存地质条件和国情,初步确定中国规模化单项  $\text{CO}_2$  地质储存工程灌注量为  $\geq 100 \times 10^4 \text{ t/a}$ 。

$\text{CO}_2$  地质储存相当于营造一个地下人工气藏,其选址条件主要考虑以下因素: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  $\text{CO}_2$  向大气泄漏的可能性微小;储层孔隙度和渗透率高,有一定厚度,能达到所需要的存储库容;上覆有不透气的盖层。

与天然气储气库储层条件不同的是还要考虑以下因素:储层压力超过  $\text{CO}_2$  的临界值,在这种压力下  $\text{CO}_2$  受到压缩,密度达到 600~800  $\text{kg/m}^3$ ,浮力低于天然气而高于原油;较低的地热梯度和地热流值,使  $\text{CO}_2$  在较小的深度下能达到较高的密度;对人类社会和自然环境、资源带来的负面影响小<sup>[1,5-9]</sup>。

因此,既有可灌注性良好的地下  $\text{CO}_2$  地质储存库系统,又有稳固的盖层,无未贯通性的盖层裂缝、断裂和废弃井等地质缺陷风险因素,确保  $\text{CO}_2$  安全地质储存 1 000 年以上,且灌注场地地面工程不受地表不良地质作用影响,源汇匹配合理,成本相对较低,并符合当地工农业发展规划、相关法律政策和环境保护目标要求,以及“地下决定地上,地下顾及地上”是深部咸水含水层  $\text{CO}_2$  地质储存选址的基本原则。

### 3.1 目标储层具有可储存 $\text{CO}_2$ 30 年以上,有效储存量大的原则

就现代燃煤电厂的平均使用寿命而言,深部咸水含水层  $\text{CO}_2$  地质储存场地合理使用年限不应少于 30 年。场地使用年限是从注入  $\text{CO}_2$  开始至封场结束的时间。从理论上讲,使用时间越长,单位  $\text{CO}_2$  地质储存的费用就越低。因此,场地使用年限在选址阶段就应予以充分考虑。

有效储存量是通过应用一定的技术条件(地质上的和工程上的)来限制储存量的评估范围,如储层的物理条件(孔隙度、渗透率、温度和压力)、埋深、盖层稳定性和安全性,以及该储存区域矿产资源的开发利用情况等。

为确定拟选场地有效储存量,须通过地球物理勘查、钻探、样品采集与测试、灌注试验和监测等手

① 中国地质调查局.中国地热资源潜力评估报告[R],2011.

② 中国科学院武汉文献情报中心.国际二氧化碳捕获与封存技术路线图解析[J].能源特刊,2011,01:25-27.

段,通过数值模拟明确场地有效储存量和使用年限。

### 3.2 安全原则

安全原则是深部咸水含水层 CO<sub>2</sub> 地质储存选址的重要原则。CO<sub>2</sub> 地质储存逃逸通道有人为逃逸通道、地质构造逃逸通道以及跨越盖层和水力圈闭逃逸通道三类<sup>[7]</sup>。其中,人为逃逸通道主要包括 CO<sub>2</sub> 灌注井、监测井和场地原有废弃井等;地质构造逃逸通道有断裂构造逃逸通道、盖层扩散裂隙逃逸通道、构造成因地裂缝逃逸通道和地震成因构造逃逸通道 4 种。

逃逸的 CO<sub>2</sub> 对当地环境的影响主要表现在:一是可能增大接纳水体的酸度,打破原有的地球化学和生态平衡,导致地下水污染;二是一旦发生大规模地层运动,大量的 CO<sub>2</sub> 逃逸地表将给附近地区造成毁灭性的灾难<sup>[8]</sup>,影响人群健康;此外,还可能诱发地震,产生地面变形等地质灾害。

因此,在工程选址阶段必须开展相关资料搜集、遥感地质调查、专项地质调查、地球物理勘查、钻探、灌注试验和环境背景监测工作,以期查明 CO<sub>2</sub> 储层盖层封闭性质量,有无废弃钻井、断裂等等潜在 CO<sub>2</sub> 逃逸通道。明确储层上部是否有可供工农业利用地下水含水层、与可利用地下水主要补给区的关系及距离、与河流、水库等地表饮用水水源的位置关系及距离、与固定居民点的距离、与固定居民点的主导风向关系以及与其他需要特别保护目标区的距离等基本数据。在选址阶段,排除因地质缺陷导致深部咸水含水层 CO<sub>2</sub> 地质储存安全风险的产生。

### 3.3 经济原则

以合理的技术、经济方案,以较少的投资,不过多地消耗其他化石能源,实现深部咸水含水层 CO<sub>2</sub> 地质储存,是现阶段 CO<sub>2</sub> 地质储存选址的基本原则。为此,在工程选址阶段要查明 CO<sub>2</sub> 气源分布和规模、碳源距离、基础设施(水、电、交通、通讯、医疗等),对场地征地、CO<sub>2</sub> 灌注工程建造等价格进行了解,对运输方式进行论证,提出最佳的经济方案。

### 3.4 符合一般建设项目环境保护选址条件,不受外部不良地质因素影响的原则

目前,有关 CO<sub>2</sub> 地质储存工程实践更多的是把 CO<sub>2</sub> 作为工业废物来看待。由此界定,CO<sub>2</sub> 地质储存工程属环保型项目。同时因 CO<sub>2</sub> 地质储存存在着泄露的风险,因此,在选址阶段就应坚持符合建设项目环境保护选址条件的原则。

参照《危险废物填埋污染控制标准》(GB18598-2001)选址规定,陆上 CO<sub>2</sub> 地质储存选址应处于一个相对稳定的区域,不会因自然或人为的因素而受到破坏;地表灌注设施必须位于百年一遇的洪水标高线以上,并在长远规划中的水库等人工蓄水设施淹没区和保护区之外;场地位于地下水饮用水水源主要补给区范围之外;地质结构相对简单、稳定,无断层发育。应避开下列区域:破坏性地震及活动构造区;海啸及涌浪影响区;湿地和低洼汇水处;地应力高度集中,地面抬升或沉降速率快的地区;灰岩溶洞发育带;废弃矿区或塌陷区;崩塌、岩堆、滑坡区;山洪、泥石流地区;活动沙丘区;火山活动区;尚未稳定的冲积扇及冲沟地区以及其他可能危及填埋场安全的区域。

## 4 选址阶段划分与选址地质工作重点

### 4.1 选址阶段划分

基于中国多年来地质矿产和地下水资源勘查实践,本文认为中国 CO<sub>2</sub> 地质储存地质选址工作也是一个分阶段、循序渐进式的专业技术工作,是全国 CO<sub>2</sub> 地质储存潜力与适宜性评价工作的深化和延续。CO<sub>2</sub> 地质储存选址包括规划选址和工程选址两大阶段。

全国 CO<sub>2</sub> 地质储存潜力与适宜性评价工作包括如下 5 个阶段。第一阶段国家级预测潜力评价、第二阶段盆地级推定潜力评价、第三阶段目标区级控制潜力评价、第四阶段场地级基础储存量评价和第五阶段灌注级工程储存量评价。按 CO<sub>2</sub> 地质储存潜力评价精度由低到高,依次分称 CO<sub>2</sub> 地质储存潜力与适宜性评价 E、D、C、B、A 级(表 1)。对应碳封存领导人论坛(CSLF,2008)CO<sub>2</sub> 埋存量金字塔分级图见图 2。

深部咸水含水层 CO<sub>2</sub> 地质储存规划选址的第一阶段是国家级潜力与适宜性评价;第二阶段为盆地级一、二级构造单元潜力与适宜性评价;第三阶段为盆地三级构造单元圈闭级(CO<sub>2</sub> 地质储存目标靶区)潜力与适宜性评价;第四阶段即工程选址阶段。

规划选址的第一、第二阶段主要是对国家级和盆地级 CO<sub>2</sub> 地质储存潜力进行评价。第三阶段重点是在选择出可供 CO<sub>2</sub> 地质储存的圈闭或地区的基础上,对圈闭内各地质时代形成的储、盖层做精细描述和刻画,通过圈闭内物化探资料、井筒资料和综合

表 1 中国 CO<sub>2</sub> 地质储存潜力与适宜性评价地质工作阶段划分

Table 1 Working stages of potential and suitability assessment for CO<sub>2</sub> geological storage in China

工作阶段	研究对象	等级	CO <sub>2</sub> 地质储存潜力评价		综合评价	方法
			潜力级别	含义与任务	目的、任务	
国家级潜力评价	以中国单个盆地为评价单元	E	预测潜力	以单个沉积盆地为单元, 评价 CO <sub>2</sub> 地质储存潜力, 即预测潜力。对中国沉积盆地进行 CO <sub>2</sub> 地质储存适宜性评价, 淘汰部分不适宜 CO <sub>2</sub> 地质储存的沉积盆地, 选择出可供下一阶段继续研究, 适宜 CO <sub>2</sub> 地质储存的沉积盆地	以单个盆地为单元进行潜力与适宜性评价, 对中国 390 个沉积盆地进行排序, 评价出适宜 CO <sub>2</sub> 地质储存的盆地	资料搜集、遥感解译、野外调研、综合研究
盆地级潜力评价	以盆地一级构造单元为研究对象和评价单元	D	推定潜力	以盆地一、二级构造单元为研究对象和评价单元, 计算各盆地一级构造单元 CO <sub>2</sub> 地质储存潜力, 即 D 级推定潜力。对各盆地一级构造单元进行 CO <sub>2</sub> 地质储存适宜性评价, 评价出盆地内 CO <sub>2</sub> 地质储存远景区, 为宏观 CO <sub>2</sub> 地质储存场地选择提供依据	以盆地一级构造单元为单元, 进行适宜性评价, 评价出盆地中 CO <sub>2</sub> 地质储存远景区	资料搜集、遥感解译、野外调研、综合研究
目标区级潜力评价	盆地圈闭级构造单元	C	控制潜力	以三级构造单元内的圈闭为研究对象和评价单元, 通过圈闭级 CO <sub>2</sub> 地质储存适宜性评价, 优选出 CO <sub>2</sub> 地质储存目标靶区, 计算目标靶区 CO <sub>2</sub> 地质储存潜力, 即 C 级控制潜力, 为 CO <sub>2</sub> 地质储存提供一批目标靶区	制定 CO <sub>2</sub> 地质储存目标靶区选择标准, 在圈闭内比选出 CO <sub>2</sub> 地质储存目标靶区	资料搜集、遥感解译、野外调研、综合研究
场地级潜力评价	储存场地	B	基础储存量	根据 CO <sub>2</sub> 地质储存场地选址标准, 充分考虑业主意见, 进一步筛选出最佳 CO <sub>2</sub> 地质储存场地。通过场地综合地质调查、地球物理勘探、钻探与灌注试验、动态监测、室内物理模拟与数值模拟, 查明场地 CO <sub>2</sub> 地质储存地质条件, 计算场地级 CO <sub>2</sub> 地质储存量, 即 B 级基础储存量, 制定合理的 CO <sub>2</sub> 灌注方案, 为 CO <sub>2</sub> 灌注工程施工图设计提供依据	开展 CO <sub>2</sub> 地质储存场地勘查, 对场地作出勘查评估, 指导 CO <sub>2</sub> 灌注工程的设计	遥感解译、综合地质调查、物探、化探、钻探、样品采集与测试、灌注试验、数值模拟等
灌注级潜力评价	CO <sub>2</sub> 地质储存工程场地	A	工程储存量	在场地级基础储存量评价的基础上, 实现了由灌注试验转化为工程性实际灌注, 并经历了较长的 CO <sub>2</sub> 灌注监测时间, 灌注量日趋稳定, CO <sub>2</sub> 扩散晕在储层内不断有效地扩展, 且没有出现 CO <sub>2</sub> 逃逸、诱发地震等环境、安全问题时, 通过拟合、改进的数值模型而得出的场地级工程储存量	开展 CO <sub>2</sub> 灌注工程监测, 根据灌注工程的运行状况, 对灌注场地 CO <sub>2</sub> 灌注量及场地环境风险进行评估	遥感解译、综合地质调查、物探、化探、钻探、样品采集、灌注试验、数值模拟、实验室物理模拟等

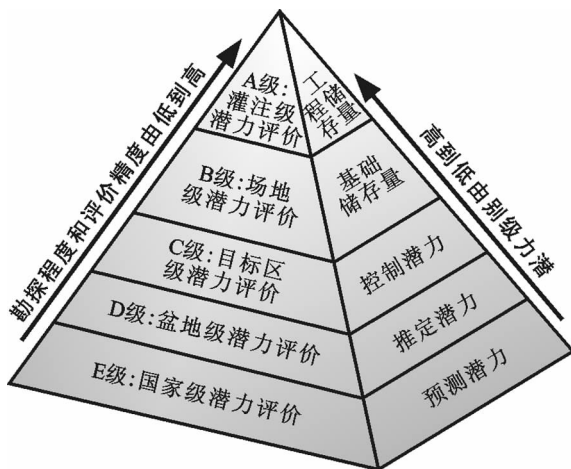


图 2 中国 CO<sub>2</sub> 地质储存工作阶段与潜力分级图  
Fig.2 Working stages and potential grades for CO<sub>2</sub> geological storage in China

研究资料,采用综合评价方法,对圈闭 CO<sub>2</sub>地质储存条件进行评价,优选出 CO<sub>2</sub>地质储存目标靶区。

第四阶段即工程选址阶段,开始于沉积盆地各

三级构造单元 CO<sub>2</sub>地质储存目标靶区(圈闭)评价所筛选出的 3 处以上比选场地。通过对各比选场地相关资料全面搜集、遥感调查、现场实地综合地质调查、地球物理勘查等工作,获取各类评价参数,详细评价这些比选场地,选择出优选场地,最终评价推荐出当地公众、政府和业主可接受的 CO<sub>2</sub>地质储存工程选定场地。

深部咸水含水层 CO<sub>2</sub>地质储存工程选址程序包括比选场地选址、优选场地选址和选定场地选址三大阶段。各阶段排序选出的场地分称比选场地、优选场地和选定场地(图 3)。

#### 4.2 比选场地选址及地质工作重点

比选场地选址工作宜在沉积盆地各三级构造单元内圈闭级 CO<sub>2</sub>地质储存潜力与适宜性评价的基础上,本着“地下决定地上,地下顾及地上”的原则所筛选出的 3 处以上比选场地而开展,相当于地质矿产和地下水水源地勘查的普查阶段,地质工作程度初步确定为 1:5 万,选址控制面积相当于一幅 1:5 万国际标准图幅面积。

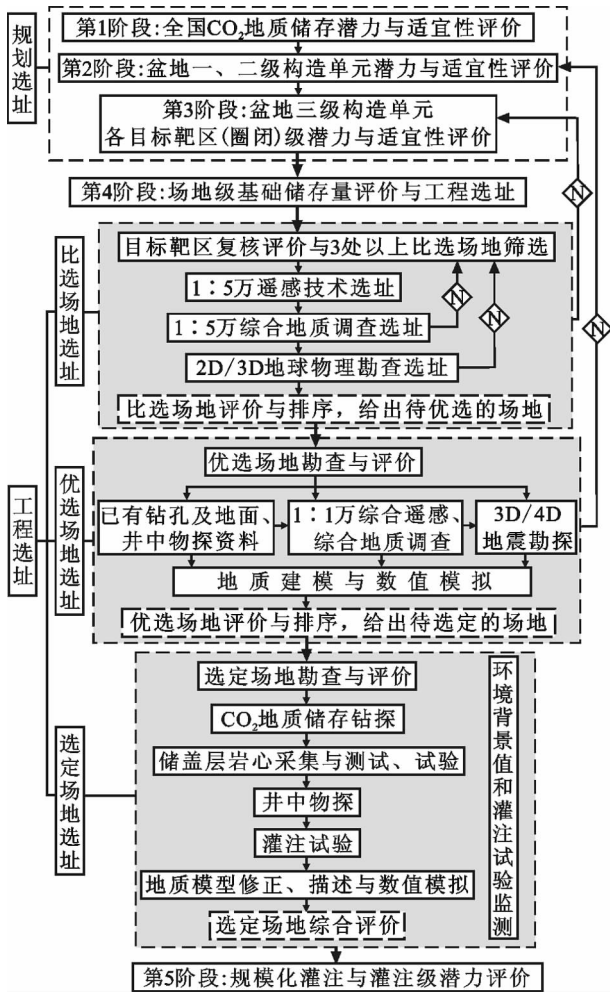


图 3 深部咸水含水层 CO<sub>2</sub> 地质储存选址工作流程图  
Fig.3 Flowchart of site selection for CO<sub>2</sub> geological storage in deep saline aquifers

该阶段地质工作以 3 处以上比选场地为研究对象,首先在已有区域地质资料的基础上,通过比选场地钻孔、地震地球物理、储、盖层和流体资料等资料的搜集,对 800~3 500 m 深度区间各地质时代形成的储、盖层进行概化,确定和分析、描述各评价指标。进而本着“先遥感,后地面地质调查,再物探”的工作程序,依次开展:① 1:5 万遥感技术选址→② 1:5 万综合地质调查选址→③ 2D/3D 地球物理勘查选址。如果过程①、②和③依次分别得出“可选”的结论,各项选址工作亦依次正常进行;若过程①、②和③分别得出“不可选”的结论,则须对目标靶区进行复核评价,重新确定比选场地,重复上一过程。最后依新获的资料对 3 处以上比选场地进行综合评价和排序,给出 1 处以上待优选的场地。如果不能给出待优选

的场地,则返回第三阶段目标靶区确定阶段,因此,沉积盆地内 CO<sub>2</sub> 地质储存目标靶区的确定是至关重要的。

CO<sub>2</sub> 地质储存比选场地评价结束后应提交比选场地可行性研究报告,目的是利用充足的资料说明是否具有可选性和下一步工作建议。

### 4.3 优选场地勘查及地质工作重点

该阶段工作对象是上一阶段确定的 1 处以上待优选的场地,相当于地质矿产和地下水水源地勘查的详查阶段,工作精度为 1:1 万,初步确定待优选场地地质工作控制面积为 25 km×25 km。目的是通过对场地已有资料深入分析、1:1 万综合遥感、1:1 万综合地质调查、3D/4D 地震地球物理勘探,基本查明场地储、盖层地层岩性、地质构造、活动断裂、地壳稳定性、地质灾害、社会经济、气象水文和矿产资源分布等。深入研究待优选场地 CO<sub>2</sub> 地质储存地质条件,通过地质建模和数值模拟,计算有效储量。最后对待优选的场地进行综合评价和排序,确定出选定场地。

优选场地综合评价结束后,应编制优选场地综合地质评价技术报告。报告应详细说明优选场地的综合地质条件与各种利、弊因素,进行综合评价与排序,给出选定场地,并对下一步工作提出建议,并以报告的形式提交项目业主单位,再由业主单位报请官方审批,列入国家或地方的计划项目。

优选场地综合地质评价技术报告是 CO<sub>2</sub> 地质储存选址的关键依据和工程立项依据,标志着 CO<sub>2</sub> 地质储存项目由选址阶段正式过渡到工程阶段。该报告也是场地进入钻探及灌注试验阶段的依据。如果该阶段工作得到“不可选”的结论,以上选址工作将面临着返回第一或第二阶段进行重新选址的风险。

### 4.4 选定场地勘查及地质工作重点

选定场地勘查工作相当于地质矿产和地下水水源地勘查的勘探阶段,工作手段以钻探、岩心样品采集与测试试验、CO<sub>2</sub> 环境背景值监测、CO<sub>2</sub> 灌注试验、灌注期动态监测和数值模拟为主。通过优选场地钻探、储盖层岩心采集、测试与试验、井中物探、CO<sub>2</sub> 地质储存灌注试验、地质模型修正与数值模拟等工作,重点解决选定场地的可灌注性、使用年限等关键技术问题。

钻探及灌注试验结束后,应编写“二氧化碳地质储存场地勘查与场地选定报告”。报告应详细说明选定场地的综合地质条件,评价选定场地 CO<sub>2</sub> 可灌注

量,安全及环境影响、经济合理性等。如具备规模化 CO<sub>2</sub> 地质储存条件,则转入工程性实际灌注,选址结束。

## 5 选址指标体系及评价方法

### 5.1 选址指标体系构成

CO<sub>2</sub> 地质储存场地选址受到自然地理、气象水文、地形地貌、地质构造、储盖层组合及其物性、社会经济、源汇匹配、交通运输以及工程技术条件等诸多因素制约,可将其归纳为选址技术、安全性、经济适宜性和地面地质-社会环境条件 4 个方面建立层次分析结构的选址评价指标体系(表 2)。

### 5.2 主要地质指标的涵义

(1) 地形地貌和主导风向: 由于 CO<sub>2</sub> 的密度比空气重近 50%,当 CO<sub>2</sub> 逃逸地表后,将在重力和大气流的作用下,沿地表在洼地处聚集,使局部 CO<sub>2</sub> 浓度增高。如果人或动物在此区域活动,危险也随之产生。因此,不宜将 CO<sub>2</sub> 灌注场地置于地势低洼,缺乏主导风向的地区,避免对作业人员和其他人员的影响。据此可确定拟选场地地形高凸开阔,有主导风向时,场地为“好”;地形开阔—较浅洼地,主导风向不明时,为“一般”;地形低洼、复杂,缺乏主导风向时,为“差”。

(2) 水文地质条件: 依 CO<sub>2</sub> 地质储存与水文地

质条件的关系分为水力运移逸散作用、水力封闭作用和水力封堵作用 3 种水文地质控气作用<sup>①</sup>。其中,前一种作用将导致 CO<sub>2</sub> 逃逸,后两种则有利于深部咸水含水层 CO<sub>2</sub> 地质储存。

水力运移逸散控气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 CO<sub>2</sub> 地质储存储层水力联系较好,随地下水运移可携带 CO<sub>2</sub> 逃逸地表,进入大气环境。

水力封堵控气作用常发生于不对称向斜或单斜中。在一定压力差作用下,CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 向上扩散时将被地下水封堵,致使 CO<sub>2</sub> 得以封存。

水力封闭控气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 and 下部存在良好的隔水层(盖层),深部咸水含水层与上覆、下伏含水层以封闭的盖层相隔离,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,以静水压力和重力驱动方式流动。水力封闭控气作用一般发生在深部,地下水通过压力传递作用而构成水力封闭。

表 2 深部咸水含水层 CO<sub>2</sub> 地质储存多因子排序法选址指标体系

Table 2 Site selection index system for CO<sub>2</sub> geological storage in deep saline aquifers

指标层	指标亚层	指标组成
技术指标层	储层宏观特征	埋深、厚度、地层压力系数、沉积环境、地层组合与砂厚比、水文地质条件、矿化度、水头状态
	储层物性参数	孔隙度、渗透率、非均质性
	储层储存前景	有效储存量、使用年限
	地热地质特征	地表温度、地温梯度、大地热流值
	灌注试验评价 灌注控制技术	注入指数、有效封存系数 注入井作业压力、注入井注入量、注入井注入速度
安全性评价指标层	盖层宏观特征评价指标	盖层的岩性、盖层单层厚度、盖层累计厚度、盖层分布连续性
	盖层微观封闭能力评价指标	盖层封气指数、主力盖层之上的小盖层数量
	二次截留条件评价指标	主力盖层之上次级盖层和储层的数量和质量
	断裂通道评价指标	断裂和裂缝发育情况
	人为通道评价指标	场地 100km <sup>2</sup> 范围内是否有其他钻井及废弃井
地面地质—社会环境选址指标层	地壳稳定性评价指标	地震动峰值加速度、场地地震安全性、场地 25km 半径范围内是否有活动断层
	经济评价指标层	碳源规模、碳源距离、运输方式、社会环境、基础设施、蕴矿状况、成本
	场地地质环境影响因素	地质灾害易发性、是否在采矿塌陷区、岩溶塌陷区、是否在地面沉降区、是否在沙漠活动状况区、是否在火山活动状况区、是否低于江河湖泊、水库最高水位线或洪泛区
	可能的 CO <sub>2</sub> 泄露通道对作业人员的影响	场地及周边是否有废弃钻井、现有技术条件下未被发现的断裂 CO <sub>2</sub> 灌注场地地形地貌、CO <sub>2</sub> 灌注场地有无主导风向
	所在地区的性质	是否符合城市和区域发展总体规划、是否在农业保护区、自然保护区、风景名胜、文物保护单位、生活饮用水源保护区、供水远景规划区、矿产资源储备区和其他需要特别保护的区域以及植被状况
与敏感区的关系和距离	与饮用水源的关系和距离	CO <sub>2</sub> 储层上部是否有可供工农业利用地下水含水层、是否在饮用地下水主要补给区内、距离河流、水库等地表饮用水水源的距离
	与敏感区的关系和距离	与固定居民点的距离、与固定居民点的主导风向关系、与其他需要特别保护目标区的距离

据上述水动力控气作用机理分析,可确定拟选场地水文地质条件为水力封闭控气作用时,场地为“好”;水文地质条件为水力封堵控气作用时,为“一般”;水文地质条件为水力运移逸散控气作用时,为“差”。

(3) 深部咸水含水层水头状态:由于深部咸水含水层多为深层承压水含水层。如果将 CO<sub>2</sub> 注入到承压水头高出场地地面的深部咸水含水层中,不仅注入压力大、不经济;而且一旦井口装置失效,注入的 CO<sub>2</sub> 将随承压自流水不断溢出地表,成为安全隐患。因此,将深部咸水含水层水头低于地面时的场地为“好”;与地面大体一致的场地为“一般”;高出地面的场地为“差”。

(4) 储层非均质性:储层非均质性制约着 CO<sub>2</sub> 在储层中的流动状况。储层的非均质性越严重,CO<sub>2</sub> 波及的范围越小,从而影响 CO<sub>2</sub> 的地质储存能力。储层的非均质性评价可选择层间非均质性和层内非均质性两个指标评价。层间非均质性采用平面非均质性评价。平面非均质性包括储层砂体的几何形态、砂体展布与连续性、物性的平面变化等方面的研究内容。砂体连续性一般分为 5 级:一级为砂体延伸超过 2 000 m,连续性极好;二级为砂体延伸 1 200~2 000 m,连续性良好;三级为砂体延伸 600~1 200 m,连续性中等;四级为砂体延伸 300~600 m,连续性差;五级为砂体延伸小于 300 m,连续性极差。层内非均质性重点是研究层内纵向上渗透率的变化。非均质性主要指高孔渗段所处的位置、渗透率级差和渗透率的非均质性、层内垂向渗透率与水平方向渗透率的比值,常用渗透率变异系数、渗透率突进系数和渗透率级差等参数对层内非均质性进行评价。

(5) 盖层岩性:理论上讲,任何类型的岩石都可作为封盖层。实际上,油气田勘探证实最常见的盖层有泥质岩(泥岩、页岩)和蒸发岩(石膏、盐岩),其次为碳酸盐岩(泥灰岩、泥质白云岩、致密灰岩、致密白云岩)和冰冻成因盖层,而燧石层、煤层、致密火山岩及侵入岩盖层偶见。世界 334 个大油气田统计资料表明,泥质岩盖层占 65%,蒸发岩盖层占 33%,致密灰岩盖层占 3%,结合 CO<sub>2</sub> 地质储存机理,综合现有盖层岩性评价标准,可给出盖层岩性评价等级。

(6) 断裂和裂缝发育情况:断裂和裂缝的发育会影响盖层的完整性和连续性,进而影响对 CO<sub>2</sub> 的封闭能力。一般情况下,断裂作用对盖层的封闭性起着

破坏性作用,尤其是当断层断距大于盖层厚度或断裂带呈开启状态时,断裂可使盖层完全丧失封闭能力,对 CO<sub>2</sub> 的储存十分不利。

(7) 场地及周边是否有废弃井:废弃井是 CO<sub>2</sub> 地质储存主要的人为泄露途径之一。随着各类地下勘探开发的深入,废弃井的数量越来越多。如果这些废弃井无封堵处理,将成为 CO<sub>2</sub> 人为逃逸通道。因此,在深部咸水含水层规模化 CO<sub>2</sub> 地质储存选址阶段,应查明场地 100 km<sup>2</sup> 范围内是否有废弃井和断裂构造存在,并采取措施避免通过废弃井发生逃逸。

(8) 压覆矿产资源:是指因 CO<sub>2</sub> 地质储存工程实施后导致矿产资源不能开发利用的现象。但是建设项目与矿区范围重叠而不影响矿产资源正常开采的,不作压覆处理。矿产资源是指国家规划矿区、对国民经济具有重要价值的矿区和《矿产资源开采登记管理办法》附录中 34 个矿种的矿床规模在中型以上的矿产资源。评价的理念是 CO<sub>2</sub> 地质储存场地越不影响矿产资源开发利用,越适宜 CO<sub>2</sub> 地质储存。因此,在深部咸水含水层 CO<sub>2</sub> 地质储存选定场地评价阶段,应委托具有地质勘查资质的单位进行压覆区的矿产资源评估。

(9) 场地地质灾害易发性:地质灾害是指包括自然因素或者人为活动引发的危害人民生命和财产安全的山体崩塌、滑坡、泥石流、地面塌陷、地裂缝、地面沉降等与地质作用有关的灾害(国务院令 394 号)。地质灾害易发区是指具有地质灾害形成的地质地貌条件和在自然、人为等营力作用下,容易产生地质灾害的区域。

《地质灾害防治条例》(国务院令 394 号)和各省(自治区)地质灾害危险性评估规程规定,在地质灾害易发区内进行工程建设,必须在可行性研究阶段或者在申请核准、备案前进行地质灾害危险性评估。因此,在 CO<sub>2</sub> 地质储存选址阶段,需委托有资质的单位对场地进行地质灾害危险性评估。在此选择地质灾害易发性进行评价。通常根据地质灾害易发性划分为高易发、中易发、低易发和不易发。

### 5.3 基于层次分析(AHP)的多因子排序选址评价方法

多因子排序选址方法的主要思路是把层次分析法(AHP)计算出的客观权重加入到距离综合评价中去,距离综合评价是通过描述被评价对象的多个指标进行的,如果把指标看成坐标上的变量,则在几何



上形成一个高维空间<sup>[10]</sup>。

从几何角度看，每个被评价对象是由反映它的多个指标值在该空间决定的一个点，决策即方案选择问题就变成了对这些点进行排序和评价，为便于比较分析，一个自然的想法就是首先在空间确定出参考点，如最优点和最劣点，然后计算各个评价对象与参考点的距离，与最优点越近越好，与最劣点越远越好<sup>[11]</sup>。

在综合影响深部咸水含水层 CO<sub>2</sub> 地质储存选址的 60 余项因素的基础上，建立的层次结构评价指标体系和计算的评价指标权重见表 3。

评价方法的具体步骤描述如下：

①确定评价矩阵。构造原始的指标矩阵  $X=(X_{ij})_{m \times n}$ ，其中  $m$  为评价个体的数目， $n$  为评价因素的数目。取  $n$  个因素的指标矩阵为  $X=(X_1, \dots, X_n)$ 。

②层次分析法计算客观权重<sup>[17,18]</sup>。决策者对每个因素的相对重要性进行比较，全部的比较值  $a_{ij}(i, j=1, \dots, n)$  组成一个成对比较矩阵  $A$ ：

$$A=(a_{ij})_{m \times n} > 0, a_{ji} = \frac{1}{a_{ij}} \tag{1}$$

对互反矩阵  $A$  按行求几何平均值：

$$\overline{\omega}_i = n \sqrt[n]{\sum_{j=1}^n a_{ij}} \tag{2}$$

将  $\overline{\omega}_i$  归一化：

$$\omega_i = \frac{\overline{\omega}_i}{\sum_{i=1}^n \overline{\omega}_i} \tag{3}$$

计算矩阵  $A$  的最大特征值的近似值  $\lambda$ ：

$$\lambda = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(A\omega)_i}{\omega_i} \tag{4}$$

计算互反矩阵  $A$  的一致性指标  $CI$  及一致性比率  $CR$ ，检验其一致性。当  $CR < 0.1$  时，认为  $A$  通过一致性检验。

计算得权重向量： $\omega=(\omega_1, \dots, \omega_n)$ 。

③指标同向化。如果指标矩阵  $n$  个因素中有逆指标（即越小越好的指标）和适度指标，就要首先进行指标同向化处理，将其转化为正指标，最简单的方法是，对于逆指标，取：

$$x'_{ij} = \frac{100}{x_{ij}} \tag{5}$$

得矩阵： $X'=(X'_{ij})_{m \times n}$

④对评价矩阵  $X'$  进行无量纲化处理，化为标准矩阵  $Y'=(Y'_1, \dots, Y'_n)$ 。进行无量纲化处理得到新的指标矩阵  $Y'=(y'_{ij})_{m \times n}$ 。其中：

$$y'_{ij} = \frac{x'_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x'^2_{ij}}} \tag{7}$$

⑤确定加权数据矩阵。由层次分析法确定出的

表 3 深部咸水含水层 CO<sub>2</sub> 地质储存选址指标层和指标亚层权重<sup>[9,12-16]</sup>

Table 3 Weight table of index level and sub-index level for CO<sub>2</sub> geological storage in deep saline aquifers

指标层	权重	指标亚层	权重	评价因子
选址技术因素	0.40	储集体条件	0.51	孔隙度，渗透率，……
		储存潜力	0.26	有效储存量，储存年限，……
		地层压力	0.13	地温梯度，大地热流值，……
		地层温度	0.03	注入层压力，……
		灌注技术	0.07	注入指数，注入量，注入速度，……
地质安全性因素	0.30	盖层封闭性	0.63	盖层宏观发育特征，盖层定量封闭指数，……
		地壳稳定性	0.26	活动断裂发育情况，地震安全性，……
		地面地质灾害易发性	0.11	崩塌，滑坡，泥石流，……
经济因素	0.20	灌注成本	0.06	CO <sub>2</sub> 成本，……
		源汇匹配	0.26	碳源规模，碳源距离，……
		基础设施	0.12	运输方式，交通条件，……
		压占资源情况	0.56	煤层、油气、地热，……
环境保护条件因素	0.10	公众社会环境	0.67	人口密集程度，公众认可程度，……
		场地地理条件	0.33	地理位置，与敏感区的距离，……

权重  $\omega$ , 对  $Y'$  的各行数值进行加权平均, 得  $y_{1j}, \dots, y_{mj}$ , 由此确定加权矩阵  $Y$ :

$$Y = \begin{pmatrix} y_{1j} \\ y_{2j} \\ \vdots \\ y_{mj} \end{pmatrix} = (y_{ij})_{m \times n} \quad (8)$$

⑥确定理想样本和负理想样本。由于各因素已经正向化, 可以用所有样本中各因素的最大值构成理想样本, 用各指标的最小值构成负理想样本, 分别用  $y_j^+$  和  $y_j^-$  表示。

⑦计算每个评价对象与理想样本和负理想样本的距离。

样本点到最优点的距离:

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (y_{ij} - y_j^+)^2} \quad i=1, 2, \dots, m \quad (9)$$

样本点到最劣点的距离:

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (y_{ij} - y_j^-)^2} \quad i=1, 2, \dots, m \quad (10)$$

⑧计算评价对象与最优样本相对接近度。相对接近度越大, 表明评价对象与理想样本的相对距离越小, 评价结果越好。计算公式为:

$$C_i^- = \frac{D_i^-}{D_i^- + D_i^+} \quad (11)$$

$C$  的值越高, 评价价值越好。(0 ≤ C ≤ 1)

⑨排序。根据接近度  $C$  的大小可以进行各评价对象的排序, 即  $C$  越大, 相应评价对象的评价结果越好<sup>[19]</sup>。

## 6 结论

中国沉积盆地深部咸水含水层 CO<sub>2</sub> 地质储存潜力远远大于油气藏、煤及煤层气藏等其他地质储存介质, 是实现规模化 CO<sub>2</sub> 地质储存的主力介质类型。

适宜规模化 CO<sub>2</sub> 地质储存的深部咸水含水层是指顶板(盖层)埋深在 800 m 以下, 具有一定分布面积, 厚度大, 含水介质孔隙度、渗透率高, 顶、底板为隔水性良好、大厚度、稳定的泥、膏岩类隔水层, 且无贯通性的裂缝和活断裂发育, 矿化度介于 10~50 g/L, 既不适合工农业利用, 更不适合人类饮用, 也达

不到地下卤水液体矿化度要求, 当今技术、经济条件下不可利用的深部咸水含水层。

CO<sub>2</sub> 地质储存选址原则宜坚持目标储层具有可储存 CO<sub>2</sub> 30 年以上, 有效储存量大的原则、安全原则、经济原则和符合一般建设项目环境保护选址条件, 不受外部不良地质因素影响的原则四项。CO<sub>2</sub> 地质储存工程选址工作阶段依次为: 比选场地选址、优选场地选址和选定场地选址 3 个阶段。

选址综合评价指标体系由技术、安全性、经济适宜性和地面地质-社会环境条件 4 个指标层, 60 余个指标组成, 可采用基于层次分析(AHP)的多因子排序选址评价方法进行综合评价与排序。

## 参考文献 (References):

- [1] 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 CO<sub>2</sub> geological sequestration in China and some suggestions [J]. Geological Bulletin of China, 2005, 24(12):1107-1110 (in Chinese with English abstract).
- [2] 汪蕴璞, 王翠霞. 加强深层地下水资源的研究工作 [J]. 中国地质, 1988, (6):6-8.  
Wang Yunpu, Wang Cuixia. Strengthen study on deep groundwater resource [J]. Geology in China, 1988, (6):6-8 (in Chinese).
- [3] 刘花台, 郭占荣. 深层地下水及其可利用性分析 [J]. 水文地质工程地质, 2008, (2):124-128.  
Liu Huatai, Guo Zhanrong. An analysis of deep groundwater and its utilization [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2008, (2):124-128 (in Chinese with English abstract).
- [4] 强薇, 李义连, 文冬光, 等. 温室性气体地质处置研究进展及其问题[J]. 地质科技情报, 2006, 25(2):10-14.  
Qiang Wei, Li Yilian, Wen Dongguang, et al. Advances and problems of geological disposal of greenhouse gases [J]. Geological Science and Technology Information, 2006, 25 (2):10-14 (in Chinese with English abstract).
- [5] 许志刚, 陈代钊, 曾荣树. CO<sub>2</sub> 地质埋存逃逸风险及补救对策[J]. 地质论评, 2008, 54(2):373-386.  
Xu Zhigang, Chen Daizhao, Zeng Rongshu, et al. Technologies for monitoring subsurface CO<sub>2</sub> distribution and local environmental effects of CO<sub>2</sub> geological storage [J]. Advances in Climate Change Research, 2008, 4 (6):363-368 (in Chinese with English abstract).
- [6] 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 with English abstract).

- [7] 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. CO<sub>2</sub> geological storage leakage routes and environment monitoring [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, 12 (6):1251-1261 (in Chinese with English abstract).
- [8] 周锡堂, 樊栓狮. 二氧化碳收集利用与处置技术分析 [J]. 中外能源, 2006, 1:38-43.  
Zhou Xitang, Fan Shuanshi. Analysis of capture and disposal technologies of carbon dioxide [J]. China Foreign Energy, 2006, 1: 38-43(in Chinese with English abstract).
- [9] 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).
- [10] 刘爱芳, 郭树荣. 多因素排序法在工业建设项目选址中的应用 [J]. 建筑管理现代化, 2009, 23(2):135-137.  
Liu Aifang, Guo Shurong. Multiple factors ranking in location of industry construction project [J]. Construction Management Modernization, 2009, 23 (2):135-137 (in Chinese with English abstract).
- [11] 杨建平, 陶普. 距离综合评价法在工程招投标中的应用[J]. 基建优化, 2007(5):93-94.  
Yang Jianping, Tao Pu. TOPSIS method used for tendering and bidding [J]. Optimization of Capital Construction, 2007(5):93-94 (in Chinese with English abstract).
- [12] 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:地质出版社, 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: Geological Publishing House, 1998 (in Chinese with English abstract).
- [13] 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 Xu esong, 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).
- [14] 李小春, 小出仁, 大隅多加志.CO<sub>2</sub>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. CO<sub>2</sub> 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).
- [15] Bachu S, Adams J. Sequestration of CO<sub>2</sub> in geological media in response to climate change: Capacity of deep saline aquifers to sequester CO<sub>2</sub> in solution [J]. Energy Conversion and Management, 2003, 44:3151-3175.
- [16] 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):10-13.  
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(in Chinese with English abstract).
- [17] 刘俊娥, 刘敬严, 王卫刚. 基于 AHP 的工程承包风险模糊综合评价[J]. 建筑管理现代化, 2005, (5):9-12.  
Liu Jun -e, Liu jingyan, Wang Weigang. AHP based fuzzy comprehensive evaluation of bid risk [J]. Construction Management Modernization, 2005, (5):9-12(in Chinese with English abstract).
- [18] 焦娜. 基于 AHP 和模糊评判的施工企业核心竞争力综合评价[J]. 建筑管理现代化, 2008, (3):22-25.  
Jiao Na. Synthetical evaluation of competition of construction enterprises based on AHP and fuzzy model [J]. Construction Management Modernization, 2008, (3):22-25 (in Chinese with English abstract).
- [19] 陈荣, 李月. 基于距离综合评价法的物流中心选址[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2006, (2):221-224.  
Chen Rong, Li Yue. Logistics centre locating based on TOPSIS method [J]. Journal of Anhui University of Technology, 2006, (2): 221-224(in Chinese with English abstract).

## Technical method for selection of CO<sub>2</sub> geological storage project sites in deep saline aquifers

ZHANG Sen-qi, GUO Jian-qiang, DIAO Yu-jie, ZHANG Hui, JIA Xiao-feng, ZHANG Yang

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

**Abstract:** According to the potential evaluation result of CO<sub>2</sub> geological storage in China's sedimentary basins, the authors consider that the deep saline aquifer is the main body for realizing CO<sub>2</sub> geological storage. The properties of the appropriate CO<sub>2</sub> geological storage in deep saline aquifers are defined and analyzed. This paper presents principles of geological storage site selection in deep saline aquifers, and reasonably divide the stages of site selection. The evaluation index system can be established on the basis of four indicator layers and more than 60 special indicators from the conditions of location technology, security, economic suitability and land geology-social environment. Ranking multi-factor index method on the basis of AHP could be used for CO<sub>2</sub> geological storage project site selection. The result of this study will provide a guidance for CO<sub>2</sub> geological storage project site selection in deep saline aquifers of China .

**Key words:** CO<sub>2</sub> geological storage; deep saline aquifer; site selection; index system

---

**About the first author:** ZHANG Sen-qi, male, born in 1962, master, senior engineer, mainly engages in application and study of hydrological geology, engineering geology and environmental geology; E-mail: senqizhang@126.com.