

Study on the Problem of Target Area Selection of CO₂ Geological Storage in China

Jijiao Fan, Jin He, Jianqiang Guo, Senqi Zhang, Xiaofeng Jia, Chao Zhang, Yujie Diao

Center for Hydrogeology and Environmental Geology, CGS, Baoding
Email: fanjijiao@126.com

Received: Jul. 28th, 2014; revised: Aug. 27th, 2014; accepted: Sep. 6th, 2014

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

During the process of the suitability investigation and assessment of the important areas, the study and assessment object and the boundary conditions are the two problems that confuse the author. Through studying the international carbon dioxide storage projects that have been carried out, combining target selection process experience in the Sichuan Basin, we think that geological storage of carbon dioxide target investigation and evaluation should begin from three tectonic levels or partially favorable structures, and finish with closed saline aquifers, or suitable non-enclosed interior saline aquifer for the storage of carbon dioxide. In the course of the investigation and evaluation, we should consider objective target boundary conditions, namely, the physical boundary conditions of the saline aquifers, three tectonic levels and local favorable structure. At the same time, when we select the target, we must consider the source-sink match which is conducive to further evaluate the migration of CO₂ in deep saline aquifers and the impact on other energy sources of the aquifer system. The article proposes the target evaluation index system, and points out that when a clear physical boundary condition exists, we recommend using AHP-comprehensive index method; for large-scale regional saline aquifers evaluation, we recommend using multi-factor spatial overlay method.

Keywords

CO₂ Geological Storage, Target Area, Deep Saline Aquifer, Boundary Conditions

中国二氧化碳地质储存目标靶区选取问题研究

范基姣, 何 锦, 郭建强, 张森琦, 贾小丰, 张 超, 刁玉杰

中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 保定
Email: fanjijiao@126.com

收稿日期: 2014年7月28日; 修回日期: 8月27日; 录用日期: 2014年9月6日

摘 要

在开展我国重点地区二氧化碳地质储存适宜性调查评价过程中, 调查和评价对象选取问题和目标靶区边界条件确定的问题是困惑笔者的2大问题。通过研究国际上已经开展的二氧化碳储存工程, 并结合在四川盆地目标靶区选取过程中的经验, 认为: 我国二氧化碳地质储存目标靶区调查评价应始于三级构造单元或局部有利构造, 终于封闭的咸水含水层, 或者适宜储存二氧化碳的非封闭的咸水含水层内部; 在调查评价过程中, 应充分考虑目标靶区边界条件, 即咸水含水层的边界条件和三级构造单元及局部有利构造的物理边界条件。同时, 我们在选取目标靶区时, 一定要考虑源-汇匹配, 有利于进一步评估二氧化碳注入目标靶区后, 在深部咸水含水层中的运移和对该含水层系统中其他能源的影响。文章给出了目标靶区的评价指标体系, 并指出, 存在明确物理边界条件的目标靶区评价对象, 建议采用层次分析-综合指数法, 对于大范围的区域咸水含水层评价对象, 建议采用多因子空间叠加法。

关键词

二氧化碳地质储存, 目标靶区, 深部咸水含水层, 边界条件

1. 引言

在二氧化碳地质储存潜力和适宜性评价方面, 因世界主要国家选址出发点和盆地地质研究程度的差异, 部分国家或学者强调盆地尺度的选址评价, 如 Bachu(2003)提出了一套包括 15 个指标的盆地级别评价指标体系, 并对加拿大的主要沉积盆地进行了评价[1]。澳大利亚地球科学局面向盆地级别的评价筛选出了 20 项指标, 据此将澳大利亚适宜储存 CO₂ 的盆地进行排序[2]; 部分则强调工程选址与场地表征, 如国际能源署(IEA)2009 年发布的《CCS 场地表征标准》, 以及挪威的《CO₂ 地质储存选址、场地和项目核准指南》[3]。国外 CO₂ 地质储存场地选址通常包括 2~3 个阶段, 即初步筛选、场地选择和场地初步描述。

近十余年来, 美国、澳大利亚、英国、法国、德国、瑞典、挪威、荷兰等发达国家在全球范围内实施了一定数量的成功封存案例, 标志着 CO₂ 地质封存选址方法研究不断趋于成熟。

我国一方面加速开展盆地级潜力与适宜性评价, 即规划选址; 一方面在地质条件较好的地区, 通过工程选址已建立起 CO₂ 地质储存示范工程[4] [5]。

2010 至 2012 年, 我国已经开展了二氧化碳地质储存潜力与适宜性调查评价工作, 借鉴国外 CO₂ 地质储存潜力与适宜性调查评价工作程序, 在充分考虑到我国复杂的地质背景、CO₂ 地质储存研究现状等因素的基础上, 提出了我国 CO₂ 地质储存地质工作是一个分阶段、循序渐进式的专业技术工作。进而将我国 CO₂ 地质储存潜力与适宜性评价工作划分为五个阶段: 第一阶段为国家级潜力评价阶段; 第二阶段为盆地级潜力评价阶段; 第三阶段为目标区级潜力评价阶段; 第四阶段为场地级评价阶段; 第五阶段为灌注、监测运行期评价阶段。按评价精度、由低到高, 依次分称 CO₂ 地质储存潜力与适宜性评价 E、D、C、B、A 级, 提出了适宜中国地质特点的 5 个适宜性评价阶段, 完成了区域级和盆地级的 CO₂ 地质储存适宜性评价与编图工作[6]-[10]。区域级别潜力与适宜性评价工作的过程为: 选取易于获得的评价指标,

对全国 390 个陆域盆地进行 CO₂ 地质储存适宜性评价（排序），淘汰部分不适宜 CO₂ 地质储存的沉积盆地，选择出可供下一阶段继续研究的适宜 CO₂ 地质储存的沉积盆地。以单个沉积盆地为单元，逐一对各沉积盆地内 800~3500 m 深度区间各地质时代形成的主力储、盖层进行高度概化；通过盆地内不同位置少数控制性勘探孔获得的潜力评价参数，预测整个盆地 CO₂ 地质储存潜力，即求取 E 级精度预测潜力。该阶段的评价成果图是区域级 CO₂ 地质储存潜力和适宜性评价结果的反映。一方面表达全国 CO₂ 地质储存预测潜力；另一方面从宏观的角度对各沉积盆地 CO₂ 地质储存条件进行综合评级与排序。区域级别的全国 1:500 万 CO₂ 地质储存潜力与适宜性评价图由层次分析法、GIS 环境下逐层叠加法和综合指数法产生。包括基础性图件、评价性图件和结果性图件。根本目的是为国家 CO₂ 地质储存圈定一批目标盆地。盆地级别的潜力与适宜性评价过程为：对各盆地一级或者二级构造单元进行 CO₂ 地质储存适宜性评价，运用盆地模拟和其他综合评价方法，比选出 CO₂ 地质储存远景区，为宏观 CO₂ 地质储存场地选择提供依据。以盆地一级或者二级构造单元为研究对象，对沉积盆地内一级或者二级构造单元 800~3500 m 深度区间各地质时代形成的储、盖层进一步详细概化，通过构造单元内钻孔、地震地球物理、储层和流体等方面的资料搜集，丰富潜力计算参数，计算各盆地一级构造单元 D 级推定潜力。盆地级别的编图工作由若干个以沉积盆地为编图单元的图册组成，每个沉积盆地为一“册”，最后集结成 3~4 集。反映盆地级别潜力与适宜性评价成果的“图集”由沉积盆地 CO₂ 地质储存基础地质条件分析开始，经盆地一级或者二级构造单元 CO₂ 地质储存适宜性评价过程图件，以圈定出 CO₂ 地质储存远景区为目的。

对于研究程度深的盆地的 CO₂ 地质储存成果图集是由盆地级潜力评价(D 级)和目标区级潜力评价(C 级)两个研究阶段产生的图件组成，是盆地级别评价编图工作的重中之重。

但是，从规划选址的盆地级评价到工程选址之间的“桥梁”——目标靶区选取的问题尚未解决。

2. 评价对象

我们回顾一下世界上已经开展的二氧化碳地质储存工程选取的地下目标靶区。

挪威 sleipner 气田分离出来的 CO₂ 注入的目的层是海域中延伸范围南北超过 400 km，东西 50~100 km 的储层空间，该套砂岩储层的边界条件为向东西方向岩性尖灭，侧向的边界条件为更细粒的沉积。注入点位于该套砂岩中间的一处穹窿构造之下[11]。

丹麦 kalundborg 地区的二氧化碳主要注入了一部分海域一部分陆域的 Havns ϕ 背斜构造中，储层是 Gassun 组砂岩，溢出点以上面积约 80 平方公里，断层不发育[12]。

挪威中部地区的储存空间为一个单斜构造，储层是夹杂在泥岩、页岩之中的碳酸盐岩和砂岩层，其中有 4 条断层分布，但是都没有将上下两盘的地层分隔开，即，在储层空间中只可能形成了侧向封堵，但是仍然作为储层[13]。

德国东北部地区用于储存二氧化碳的的储存场地为细长的盐背斜构造即 Schweinrich 构造，最后的储存空间为根据 1:20 万构造图和邻近钻井资料通过三维地质建模确定的溢出点以上的空间[14]。

英国在海域盆地中找到了规模较大的背斜构造，该背斜构造由圣乔治断层封闭[15]。

我国的第一处示范工程的场地是伊金霍洛旗布连沟地区地下的岩性圈闭，地层水以滞留水为主[16]。

从上面可以看出，上述目标靶区均可以通过可控制的标准来确定，即都存在物理边界条件。相对于一、二级构造单元，三级构造单元空间使得二氧化碳的运移被限制在有限的横向范围内，这有助于封存容量的计算、后期监测以及风险评估。但是，如果有确切的地质控制资料，一、二级构造单元内的区块也可以作为目标靶区评价对象，如果没有确切的控制资料，就要求设计储层流动方案来测试地质不确定性的影响和后果，来预防二氧化碳泄露的风险。可见，大范围封存评价对象的缺陷是需要大面积区域内进行详细的地质绘图和监测工作，来识别潜在的泄露通道。

例如，在开展四川盆地盆地级评价时，得出：川中平缓褶皱带适宜储存二氧化碳的地下储层为侏罗系下统自流井组、三叠系上统须家河组、三叠系中统雷口坡组、三叠系下统嘉陵江组、飞仙关组以及二叠系中统下部的栖霞组。侏罗系下统自流井组和三叠系上统须家河组、三叠系中统雷口坡组储层在华崮山断裂带有泄露的风险，但是三叠系下统嘉陵江组、飞仙关组和二叠系中统下部栖霞组储层由于受龙门山和华崮山逆冲断层的涂抹作用影响，在一定程度上对目标储层具有封闭的作用(图 1)。另据 1:20 万广安幅和重庆幅区域水文地质普查报告[17] [18]，碳酸盐岩裂隙含水岩组主要发育在华崮山断层的东侧上盘，碳酸盐岩裂隙溶洞水以泉出露。断层西侧泉水出露点多远离断层，与深部断裂无关；西侧临近断层部位，无泉水出露点。由此可推断，华崮山断裂西侧下盘具有较好的阻水性质，可产生断层封堵作用，故有利于深部咸水层二氧化碳地质储存。所以，可以判断对于三叠系下统嘉陵江组、飞仙关组和二叠系下统栖霞组储层，川中平缓褶皱带这个二级构造单元的任何区块均可作为地质目标靶区的评价范围。而对于在华崮山断裂带存在泄露风险的侏罗系下统自流井组和三叠系上统须家河组、三叠系中统雷口坡组储层，就目前世界上已经开展的灌注工程的监测结果来看，半径 100 公里的区域足够深部咸水含水层中的 CO₂ 羽扩散，则选择距离该断裂带距离 100 公里以外的区块为适宜的目标靶区评价范围。

3. 目标靶区边界条件

美国能源部国家能源实验室制定的 CO₂ 封存选址指南——《深部地质构造 CO₂ 封存的场地初筛、选择和最初表征最佳实践》(2010)，提出了选择 CO₂ 地质封存适宜场地的筛选方法，这个方法的图解表示见图 2。该图解并没有对选择区域和合格场地的边界条件做合理解释。

笔者认为，一个合适的场地是在一个合适的目标靶区基础上，考虑地表适宜性条件以及经济适宜性条件的基础上选取出来的，目标靶区的边界条件由地下条件控制，而场地的边界条件由地表因素控制。

通常情况下，如果流体能够较容易地注入多孔的咸水含水地层，那么该地层的孔隙度至少在 20%以

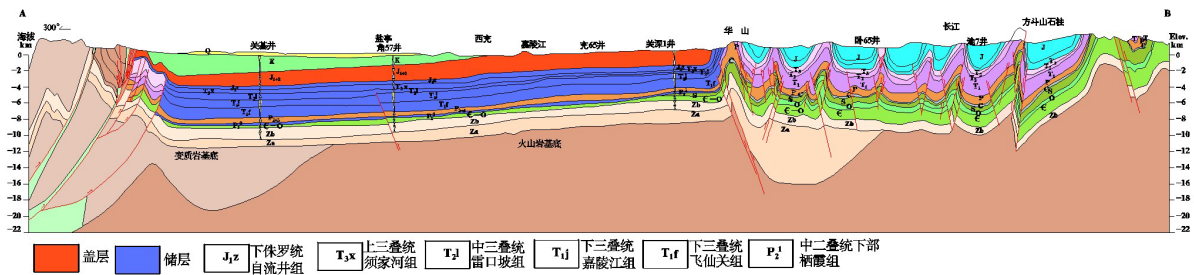


Figure 1. Reservoir and cover distribution diagram of Sichuan Basin

图 1. 四川盆地储盖分布示意图

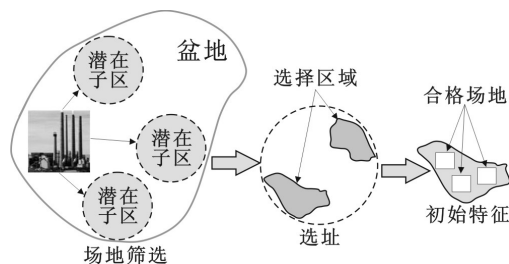


Figure 2. Mature stage of the project site map (According to NETL, 2010)

图 2. 通过勘察阶段的“工程场地成熟阶段”图示(据 NETL, 2010)

上。如果假设二氧化碳注入点的位置位于某含水层内部的一个背斜构造之中,则该储存空间在注入的二氧化碳量没有达到该构造的溢出点时,就为该背斜构造的高点与溢出点之间的空间,即,该储存空间的边界条件为该背斜构造的物理边界条件,但是对于该背斜构造外围的扩散空间的边界条件则变为比该背斜构造高一级的构造的边界条件问题,即可能变为正断层、逆断层或者岩性歼灭带的封闭性问题。以岩性歼灭带为边界条件的封存模式是,使注入点距离储层隐伏露头足够远,在其达到隐伏露头之前在储层内固定下来。所以,确定一个目标靶区的边界条件,即要考虑二氧化碳注入后在横向上的边界条件又要考虑纵向上的边界条件。

如果区域性的咸水层平缓展布,由于地下空间的非均质性,则储层中的大部分孔隙空间可能没有被有效利用,导致较低的封存率。但是如果是均质性很好、渗透率很大的这种咸水层,即使平缓展布,也能增加溶解和束缚气以及矿化机理的捕获量。那么这种理想的咸水含水层的注入点的选择原则除了考虑该含水层的补、径、排条件,就是以碳源距离越近越好为原则。

但是考虑 CO₂ 注入后,对此区域含水层中其他资源的影响,则形成了多种能源的边界条件问题。例如,在气水分异没有彻底分异的过渡带,水区中较高含量的溶解气膨胀将起着驱动地层水侵入天然气区的作用。因为在地质区域上,同一水动力系统内可能存在多个背斜地区,不同的微构造,通过水体连通,由于背斜构造高度的差异,导致不同背斜内部压力不同[19]。当然,选择一个水动力系统只有一个构造高点的目标靶区是上选。因为,在气水分异不彻底的过渡带,溶解的 CO₂ 气膨胀驱动地层水侵入天然气区的作用不可忽视,构造越平缓的气藏,CO₂-水的分异越不彻底,溶解的 CO₂ 膨胀驱动地层水的作用越强,那么对邻近具有的天然气藏的侵入性更强,具有的干预性就越大,边界条件很难确定。

例如,川中平缓褶皱带内的川中区块构造总体平缓,地层倾角 1°~5°,须家河组储层中天然气、水分异不彻底,气水过渡带纵向范围较大。广安与已探明的八角场气田、西充气田、磨溪气田的气水分布特征相似,整个气藏遵循上气下水特征,但是没有明显的气水界面[20]。物性资料统计分析表明,水层平均渗透率范围为 0.072×10^{-3} ~ $0.886 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,大部分小于 $0.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,总体上属于低孔低渗特征。如果将气田构造外部的咸水含水层作为储存二氧化碳的目标靶区则会对油气生产造成严重干扰,且不排除二氧化碳会随油气井泄露的风险,对于二氧化碳目标靶区边界条件的确定也造成极大的困难。所以,对于在此类油气密集的开发区域内部选取目标靶区时,还是选择枯竭的油气藏——有明确物理边界条件的咸水含水构造比较合适[21]。

4. 目标靶区评价指标体系

自 2013 年开展“重点地区二氧化碳地质储存适宜性调查评价”项目,项目组初步制定了目标靶区的评价指标体系,从安全性、储层条件两方面对评价对象建立具有层次分析结构的评价指标体系(表 1),各指标的含义见文献[22],在此不再赘述。

4.1. 安全性评价指标层

安全性评价指标层包括盖层适宜性、地壳稳定性和可能的泄露通道 3 个评价指标亚层,具体的等级划分详见表 2 所示。

- 1) 区域地壳稳定性:目标靶区区域地壳稳定性评价指标包括地震动峰值加速度、场地地震安全性和场界 25 km 为半径的范围内是否有活动断层三个评价指标亚层。
- 2) 盖层宏观特征:包括包括盖层岩性、厚度分布连续性等四个方面。
- 3) 可能的 CO₂ 泄露通道:主要包括断裂和裂缝的发育情况和主力盖层之上次级盖层和储层的数量和质量等评价指标亚层。

Table 1. The main indicators summary table of CO₂ geological storage targets selection
表 1. CO₂ 地质储存目标靶区评价主要指标构成简表

指标层	指标亚层	指标组成
安全性	1、区域地壳稳定性	①地震动峰值加速度；②场地地震安全性；③场界 25 km 半径范围内是否有活动断层
	2、盖层宏观特征	①盖层岩性；②盖层分布的连续性；③盖层单层厚度；④盖层累计厚度
	3、可能的泄露通道	①断裂和裂缝的发育情况；②主力盖层之上次级盖层和储层的数量和质量； ③场地 100 km ² 范围内是否有其他深度大于 800 m 的钻井及废弃井； ④现有技术条件下未被发现的断裂
储层条件	4、储层宏观特征	①埋深；②厚度；③沉积环境；④地层组合与砂厚比；⑤水文地质条件；⑥矿化度；⑦ 地层压力系数；⑧深部咸水层水头状态；⑨有效储层长宽比
	5、储层物性参数	①孔隙度；②渗透率
	6、地热地质特征	①地温梯度；②大地热流值；③地表温度
	7、储层储存前景	①有效储存量；②使用年限；

Table 2. Evaluation table of safety evaluation index layer classification
表 2. 安全性评价指标层分级评价表

评价指标	评价等级	评价等级		
		好	一般	差
区域地壳稳定性	地震动峰值加速度(g)	<0.10	0.10~0.2	>0.2
	场地地震安全性	安全	中等	危险
	场界 25 km 半径范围内是否有活动断层	无	无，但此范围之外存在可能造成影响的 活动断层	有
盖层宏观特征	盖层岩性	蒸发岩类	泥质岩类	页岩和致密灰岩
	盖层分布的连续性	分布连续性， 具区域性	分布基本连续	分布不连续，局限
	盖层单层厚度(m)	>20	10~20	<10
	盖层累计厚度(m)	>300	150~300	<150
断裂泄露通道	断裂和裂缝的发育情况	有限的裂缝， 有限的断层	裂缝发育中等， 发育断层中等	大裂缝，大断层
	主力盖层之上次级盖层和储层的数量和质量	多套，质量好	一套，质量一般	无
	场地 100 km ² 范围内是否有 其他深度大于 800 m 的钻井及废弃井	无	有，但均做了封固处理	多，且未封固
	现有技术条件下未被发现的断裂	无	无	可能有

4.2. 储层条件评价指标层

储层条件评价指标层包括储层宏观特征、储层地热地质特征、储层物性参数和储层储存前景 4 个评价指标层，具体的等级划分详见表 3 所示。

- 1) 储层宏观特征：目标靶区储层宏观特征评价指标包括埋深、厚度和沉积环境等 8 个评价指标亚层。
- 2) 储层物性参数：包括孔隙度和渗透率 2 个评价指标亚层。
- 3) 地热地质特征：包括地温梯度、大地热流值和地表温度 3 个评价指标亚层。
- 4) 储层储存前景：包括有效储存量和使用年限 2 个评价指标亚层。

5. 目标靶区评价方法

通过上述分析，我们可以得出不同目标靶区的评价方法，针对局部构造类的目标靶区评价对象，即

Table 3. Evaluation table of reservoir conditions classification

表 3. 储层条件评价指标层分级评价表

评价指标	评价等级			
	好	一般	差	
埋深(m)	800~3500	>3500	<800	
厚度(m)	>80	80~30	<30	
储层压力系数	<0.9	0.9~1.1	>1.1	
陆相沉积环境	冲积平原、三角洲平原和三角洲前缘水下分流河道	冲积扇、三角洲前缘、滨浅湖	湖底扇、浅-半深湖及其他	
地层组合; 砂厚比(%)	砂岩夹泥岩; 砂厚比 > 60%	砂泥岩互层或泥岩夹砂岩; 砂厚比 20%~60%	泥岩夹砂岩; 砂厚比 < 20%	
水文地质条件	水力封闭作用	水力封堵作用	水力运移逸散作用	
矿化度(g/L)	10~50	3~10	<3、>50	
深部咸水层水头状态	低于场地地面	大体与场地地面一致	高于场地地面	
有效储层长宽比	≤1:5	1:5~1:20	>1:20	
地表温度(°C)	<-2	-2~10	>10	
地温梯度(°C/h)	<2	2~4	>4	
大地热流值(HFU)	<54.5	54.5~75	>75	
孔隙度 (%)	砂岩	>15	15~10	<10
	碳酸盐岩	>12	12~4	<4
渗透率 (×10 ⁻³ μm ²)	砂岩	>50	50~10	<10
	碳酸盐岩	>10	10~5	<5
有效储量(×10 ⁴ t)	>900	900~300	<300	
使用年限(a)	>30	30±	<30	

存在明确物理边界条件的评价对象,我们采用层次分析-综合指数法。层次分析-综合指数法也是我们开展区域级别和盆地级别适宜性评价时采用的方法,在此不再赘述。

对于大范围的区域咸水含水层评价对象,建议采用多因子空间叠加法。“多因子空间叠加法”的主要原理是采用计算机辅助设计技术,运用区位理论,分析评价区域内每个评价因子的作用分值及其权重,最后根据计算得出的综合分值进行评价。实际操作时将待评价区域按要求划分成多个编号连续的网格,将多个评价因子对区域的影响结果填入网格,再根据不同的评价因子,用不同的系数进行加权计算,得出每个网格多个因子的影响综合结果,最后将影响结果相近的网格根据地域相邻的原则用计算机绘出等值线,组格成区,得出宏观的评价[23]。

具体分析过程为划分网格-选取评价因子-填充基础数据-加权计算-结果评价。即采取等面积划分方法剖分研究区域。每个网格按“弓”字形编码方式进行编号;标注、汇总、计算每个网格环境中的安全性、储层条件、场地地面环境条件和经济适宜性四个方面评价因子,每个因子的评价结果按好、一般、差分为三级,分别赋值为 3、2、1,作为评价分级基础。加权计算各网格综合级别,运用计算机绘制出等值线,将综合级别相近网格连片成区域,结果分值越高越好[24][25]。

6. 结论

本文打破封闭咸水含水层封存二氧化碳的固有思维,对二氧化碳地质储存的目标靶区进行了分类研

究, 并对各类型的目标靶区研究和评价方法进行了探讨。文章认为: 我国二氧化碳地质储存目标靶区调查评价应始于三级构造单元或局部有利构造, 终于适宜储存二氧化碳的开放的、或者封闭的咸水含水层; 我国二氧化碳地质储存目标靶区调查评价应始于三级构造单元或局部有利构造, 终于适宜储存二氧化碳的开放的、或者封闭的咸水含水层; 在调查评价过程中, 既要考虑横向目标靶区边界条件, 又要考虑垂向目标靶区边界条件, 同时, 我们在选取目标靶区时, 一定要在拟定碳源或者确定碳源的情况下选取, 即, 先确定要选取一个多少封存量的目标靶区, 才能进一步评估目标靶区注入二氧化碳后对深部咸水含水层系统中其他能源的影响; 在目标靶区选取的初始阶段, 将三级构造单元或者局部构造作为评价对象, 不失为一个明智的选择, 因为大范围咸水含水层中的二氧化碳储存库的多种能源边界条件很难确定和控制; 一个合适的场地是在一个合适的目标靶区基础上, 考虑地表适宜性条件以及经济适宜性条件的基础上选取出来的, 目标靶区的边界条件由地下条件控制, 而场地的边界条件由地表因素控制; 存在明确物理边界条件的目标靶区评价对象, 我们采用层次分析-综合指数法, 对于大范围的区域咸水含水层评价对象, 建议采用多因子空间叠加法。

参考文献 (References)

- [1] Bachu, S. (2003) Screening and ranking of sedimentary basins for sequestration of CO₂ in geological media in response to climate change. *Environmental Geology*, **44**, 277-289.
- [2] Gibson-Poole, C., Svendsen, L., Underschultz, J., Watson, M., Ennis-King, J., van Ruth, P., Nelson, E., Daniel, R. and Cinar, Y. (2008) Site characterisation of a basin-scale CO₂ geological storage system: Gippsland Basin, Southeast Australia. *Environmental Geology*, **54**, 1583-1606.
- [3] Det Norske Veritas (2009) CO₂Qualstore: Guideline for selection and qualification of sites and projects for geological storage of CO₂. Det Norske Veritas, Hovik, 77.
- [4] 张森琦, 郭建强, 等 (2011) 中国二氧化碳地质储存地质基础及场地评价. 地质出版社, 北京.
- [5] 孙典文 (2011) 为了经济的可持续发展——神华集团成功封存二氧化碳于千米以下地层纪实. *中国石油和化工*, **8**, 11-15.
- [6] 范基姣, 贾小丰, 张森琦 (2011) CO₂地质储存潜力与适宜性方法及初步评价. *水文地质工程地质*, **6**, 108-112.
- [7] 范基姣, 张森琦, 郑宝锋 (2011) CO₂地质储存潜力与适宜性编图方法研究. *水文地质工程地质*, **4**, 101-105.
- [8] 郭建强, 张森琦, 刁玉杰, 等 (2011) 深部咸水层 CO₂地质储存工程场地选址技术方法. *吉林大学学报(地球科学版)*, **4**, 1084-1091.
- [9] 刁玉杰, 张森琦, 郭建强, 等 (2012) 深部咸水层二氧化碳地质储存场地选址储盖层评价. *岩土力学*, **8**.
- [10] 张森琦, 郭建强, 刁玉杰, 等 (2012) 规模化深部咸水含水层 CO₂地质储存选址方法研究. *中国地质*, **6**, 1640-1651.
- [11] Baklid, A., Korbol, R. and Owren, G. (1996) Sleipner vest CO₂ disposal, CO₂ injection into a shallow underground aquifer. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*.
- [12] Nielsen, L.H. (2003) Late triassic-jurassic development of the Danish Basin and the Fennoscandian Border zone, southern Scandinavia. The Jurassic of Denmark and Greenland. *Geological Survey of Denmark and Greenland Bulletin*, **1**, 459-526.
- [13] Lundin, E., Polak, S., Bøe, R., Zweigel, P. and Linderberg, E. (2005) Storage potential for CO₂ in the Froan Basin area of the Trøndelag Platform, mid-Norway. NGU Report.
- [14] Meyer, R., May, F., Müller, C., Geel, K. and Bernstone, C. (2008) Regional search, selection and geological characterization of a large anticlinal structure, as a candidate site for CO₂-storage in northern Germany. *Environmental Geology*, **54**, 1607-1618.
- [15] Evans, D.J., Williams, G., Vincent, C., Holloway, S. and Chadwick, R.A. (2004) An appraisal of offshore CO₂ repositories for a planned CGCCS power plant in south walls. British Geological Survey Report No. CR/04/017C, British Geology Survey, Nottingham, 49 p.
- [16] 李旭峰, 贾小丰, 胡丽莎, 张晓娟, 刁玉杰, 孙晟, 等 (2013) 二氧化碳地质储存示范工程成果报告.
- [17] 陈学敏, 陈厚林 (1977) 重庆幅(H-48-23)1/20万区域水文地质调查报告.

- [18] 谢应修 (1981) 广安幅(H-48-17)1/20 万区域水文地质普查报告.
- [19] 何晓东, 孔玲, 安菲菲 (2013) 有水气藏气水分布及水区能量. *天然气勘探与开发*, **1**, 33-35.
- [20] 田冷, 何顺利, 刘胜军, 兰朝利 (2009) 广安地区须家河组气藏气水分布特征. *天然气工业*, **6**, 23-26.
- [21] 付国明 (2013) 四川盆地二氧化碳地质储存适宜性评价. 长安大学, 西安.
- [22] 中国 21 世纪议程管理中心 (2012) 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心. 中国二氧化碳地质封存选址指南研究. 地质出版社, 北京.
- [23] 金鑫, 王合生, 涂俊, 张子凡(2002) 用“多因子空间叠加法”评价城市区域环境综合质量. *环境监测管理与技术*, **14**, 24-26.
- [24] 刘爱芳, 郭树荣 (2009) 多因素排序法在工业建设项目选址中的应用. *建筑管理现代化*, **2**, 135-137.
- [25] 黄定轩, 应可福, 武振业 (2003) 基于事例的多因素重要性排序确定方法及其应用. *工业工程与管理*, **3**, 24-27.