

松辽盆地 CO₂ 地质储存适宜性评价

杨国强^{1, 2, 3)}, 苏小四^{1, 2, 3)}, 杜尚海^{1, 2, 3)}, 徐 威^{1, 2, 3)}, 孟靖莹^{1, 2, 3)}, 高东燕^{1, 2, 3)}

1) 吉林大学环境与资源学院, 吉林长春 130021;

2) 吉林大学水资源与环境研究所, 吉林长春 130021;

3) 吉林大学地下水资源与环境教育部重点实验室, 吉林长春 130021

摘 要: 为缓解全球气候变暖趋势, CO₂ 地质储存成为目前减少向大气排放 CO₂ 量的有效方法之一。区域 CO₂ 地质储存适宜性评价是筛选 CO₂ 地质储存目标区和工程建设的基础, 合理的评价指标体系和指标权重对评价结果有重要影响。本次研究结合松辽盆地地质条件, 建立包括地质储存规模、储存经济性、储存条件和储存安全性 4 个方面、20 个指标、5 个指标划分等级的评价指标体系, 利用层次分析法(AHP)确定各指标权重, 且考虑到各评价指标分级标准的模糊性, 由此得到基于层次分析法的 CO₂ 地质储存适宜性的模糊综合评价方法, 并将该方法应用于松辽盆地 6 个一级构造单元的 CO₂ 地质储存适宜性评价中, 得到各一级构造单元的地质储存适宜度。评价结果表明: 中央坳陷区 CO₂ 地质储存适宜性较好, 可以作为 CO₂ 地质储存的优先区域, 北部倾没区、西部斜坡区和东南隆起区的适宜性一般, 东北隆起区和西南隆起区适宜性均较差, 不适宜储存 CO₂。该评价结果为松辽盆地地区 CO₂ 地质储存场地筛选和工程建设等提供了科学依据。

关键词: CO₂ 地质储存; 适宜性; 层次分析法; 模糊综合评价

中图分类号: X511; X821 **文献标志码:** A **doi:** 10.3975/cagsb.2011.05.07

Suitability Assessment of Geological Sequestration of CO₂ in Songliao Basin

YANG Guo-qiang^{1, 2, 3)}, SU Xiao-si^{1, 2, 3)}, DU Shang-hai^{1, 2, 3)}, XU Wei^{1, 2, 3)},
MENG Jing-ying^{1, 2, 3)}, GAO Dong-yan^{1, 2, 3)}

1) College of Environment and Resources, Jilin University, Changchun, Jilin 130021;

2) Institute of Water Resources and Environment, Jilin University, Changchun, Jilin 130021;

3) Key Laboratory of Groundwater Resources and Environment, Ministry of Education, Jilin University, Changchun, Jilin 130021

Abstract: In mitigating the trend of global warming, CO₂ geological sequestration becomes one of the effective methods for reducing the amount of CO₂ emissions to the atmosphere. Regional suitability assessment constitutes the basis of selecting CO₂ geological sequestration target areas. Both selecting suitable evaluation indicators and determining the weights have important effects on the reasonableness of the evaluation results. Considering the geological conditions of Songliao Basin and taking six I tectonic units as the evaluation objects, the research established an index system which included 4 aspects, 20 indicators and 5 indicator levels. The 4 aspects covered the scale of geological sequestration, the economy of geological sequestration, the conditions of geological sequestration and the security of geological sequestration. Using AHP (Analysis Hierarchy Process) to determine the indicator weights, and considering the fuzziness of grading standards, the authors obtained a fuzzy synthetic evaluation method of CO₂ geological sequestration based on AHP. The research applied this method to the

本文由地质矿产部保障工程项目(编号: 水[2010]矿评 03-08-01-ZT)和吉林大学博士研究生交叉学科科研资助建设项目(编号: 2011J012)联合资助。

收稿日期: 2011-07-04; 改回日期: 2011-08-16。责任编辑: 张改侠。

第一作者简介: 杨国强, 男, 1987 年生。硕士研究生。主要从事地下水科学与工程研究。通讯地址: 130021, 长春市解放大路 2519 号。

E-mail: yangguoqiang640607@163.com。

suitability evaluation of the 6 I tectonic units and obtained the CO₂ geological sequestration suitability. The results of the evaluation show that the central depression area has relatively good suitability of CO₂ geological sequestration, which can hence be used as the CO₂ geological sequestration priority area. It is shown that the northern plunging area, western slope area, and southeast uplift have general suitability for CO₂ geological sequestration, whereas the northeast uplift area and southwest uplift area are not suitable for the geological sequestration of CO₂.

Key words: geological sequestration of CO₂; suitability; analysis of hierarchy process; fuzzy synthesized evaluation

工业革命以来, 人为排放的 CO₂ 浓度急剧升高, 导致的全球气候变暖严重威胁着人类赖以生存的地球环境。大气中 CO₂ 源和汇的不平衡(源大于汇)(李林立等, 2006), 使得节能减排问题成为当前世界各国关注的焦点, 已有的研究表明, 地质储存已经成为世界各国公认的减少二氧化碳向大气中排放(减少大气中 CO₂ 源)的有效方法之一(IPCC, 2001; 张伟等, 2006; Bachu, 2002)。CO₂ 地质储存主要是将高纯度 CO₂ 注入到安全的目标储层中, 并通过各种圈闭机制将 CO₂ 封存于地下储存构造中, 当前各国广泛关注的储存位置主要包括深部咸水层、废弃的油气藏和不可开采的煤层等(徐志刚等, 2009; 任韶然等, 2010; Shukla et al., 2010)。

由于涉及到社会、经济、生态环境、安全、公众意识等诸多方面, 实现 CO₂ 地质储存成为一项复杂的系统工程, 使得如何筛选出安全有效的储存位置成为进行 CO₂ 地质储存工程建设前首要解决的问题。因此, 国内外学者就 CO₂ 地质储存区域适宜性评价作了大量而有意义的研究工作, 而建立合适的评价指标体系和评价方法成为解决该问题的主要手段, 其中 Bachu 和 Adams(2003a)结合沉积盆地特征提出了一套包括 15 个指标的国家级评价指标体系, 并对加拿大的主要沉积盆地进行了评价; 我国学者沈平等(2009)提出了一套包括 25 个指标的地质储存适宜性评价体系, 并针对 CO₂ 在油气藏中的储存以提高石油采收率建立了一套包括 13 个指标的评价体系, 选取大庆油田为例进行了评价。这些评价结果表明, 由于 CO₂ 地质储存对地质条件要求相对苛刻, 不同的储存位置适宜性差别很大, 选择合适的储存位置对提高储存量和降低储存风险等具有重要意义。

松辽盆地及其周边地区 CO₂ 排放量在 10⁷ t/a 以上的城市有哈尔滨、大庆、长春、通辽等 6 个(李小春等, 2008), 其中大庆、吉林等城市以石油化工为主, 因此有必要进行 CO₂ 地质储存相关研究。然而, 松辽盆地内部的地热、水文地质和储盖层等条件呈现

出较大的差异性(高瑞祺等, 1997), 为保证地质储存工程的高效安全, 进行储存场地的筛选是十分必要的。目前, 我国 CO₂ 地质储存潜力与适宜性评价工作刚刚起步, 评价工作多以大尺度的沉积盆地为单位, 取得的研究成果无法满足 CO₂ 地质储存工程建设的需求, 以各沉积盆地的一级构造单元为对象的适宜性评价工作成为必需。另外, 由于沉积盆地内储存介质类型包括深部咸水层、废弃油气藏及不可开采的煤层等, 储存介质的多样性使得当前已经建立的单介质评价体系不再适用, 如沈平等建立的 CO₂ 地质储存适宜性评价体系主要是考虑油气藏的储存介质(沈平等, 2009)。本次研究在结合松辽盆地沉积特征的基础上, 分析 CO₂ 地质储存适宜性影响因素, 建立适用于多种储存介质的 CO₂ 地质储存适宜性评价指标体系, 并对松辽盆地内的各一级构造单元的 CO₂ 地质储存适宜性进行评价, 可为 CO₂ 地质储存场地筛选和工程建设提供科学依据。

1 研究区地层特征

松辽盆地包括我国辽河平原的北段和松嫩平原的全部, 地理位置为东经 119°40'~128°24', 北纬 42°25'~49°23', 长轴呈 NE 展布, 面积约 26×10⁴ km²。该盆地为新华夏系第二沉降带北部的一个中生代大型克拉通复合盆地(迟元林等, 2002), 区域构造的轮廓表现为: 西部是东倾大单斜, 南、北均向中央倾伏, 东部为隆起, 中央为北北东向长形凹陷, 由此可以将松辽盆地划分为 6 个一级构造单元, 各一级构造单元分布范围如图 1 所示。

松辽盆地的地层自下而上为: 前古生界、下古生界、上古生界、侏罗系、白垩系、第三系、第四系, 具体如表 1 所示, 总厚度可达 11000 m 以上, 而不同构造单元具有不同的地层特征, 如中央坳陷区地层发育齐全, 沉积深度较大, 东北隆起区、东南隆起区、西南隆起区均地层出现缺失, 发育不全, 基岩埋藏深度也较浅。盆地内发育了多套区域性储盖层, 其中储层由上至下包括嫩三、四段砂岩层, 嫩一段

表 1 松辽盆地地层简表
Table 1 Stratigraphic summary of Songliao Basin

地层				代号	厚度 /m	主要岩性	
界	系	统	组				
新生界	第四系	全新统	温泉河组	Q _{1w}	0~35	上部黄褐色亚粘土、亚砂土、下部灰白色砂夹砂砾石	
		上更新统	顾乡屯组	Q _{2g}	0~50	褐黄亚粘土、砂、砂砾石	
		中更新统	大青沟组	Q _{2d}	0~122	灰黑色亚粘土及粉、细砂	
		下更新统	白土山组	Q _{1b}	0~160	灰白色砂砾石、粘土冰碛泥砾	
	第三系	上新统	泰康组	N _{2t}	0~200	黄绿色泥岩夹砂岩，底部为砂砾岩	
		中新统	大安组	N _{1d}	0~123	黄灰色泥岩夹砂岩，底部为砂砾岩	
		渐新统	依安组	E _{3y}	0~260	黑灰色泥岩、砂质泥岩夹褐煤，底部为砂岩	
			明水组	K _{2m}	0~624	棕灰色泥岩夹砂岩，灰色泥岩	
			四方台组	K _{2s}	0~413	棕红色泥岩夹红色砂岩，底部为砂砾岩	
			嫩江组	K _{2n}	0~1260	灰黑色泥岩，下部夹油页岩，上部为杂色泥岩	
中生界	白垩系	上统	姚家组	k _{2y}	0~228	棕红色泥岩，灰绿色厚层砂岩	
			青山口组	K _{2qn}	0~716	上部为杂色泥岩夹砂岩，下部为黑色泥岩	
			泉头组	K _{1q}	0~2184	棕红色泥岩与灰色砂岩互层，底部为砂岩	
			登娄库组	K _{1d}	0~1739	暗紫红色泥岩与砂岩互层，中、下部夹暗色泥岩	
		下统	营城组	K _{1y}	0~960	中酸性火山岩、火山碎屑岩及正常沉积岩夹煤层	
			沙河子组	K _{1sh}	0~815	灰黑色泥岩与砂岩、砾岩互层夹煤层	
			火石岭组	K _{1h}		凝灰质角砾岩、凝灰岩、安山岩	
			洮南组	J _{3tn}	0~832	中酸性火山岩及沉积岩夹薄煤层	
		侏罗系	上统	洮南组	J _{3tn}	0~832	中酸性火山岩及沉积岩夹薄煤层
			中统	白城组	J _{2b}	0~370	灰绿、灰白色砂岩、砂砾岩、灰黑色泥岩夹煤层
上古生界	石炭二叠系			C-P		黑色泥板岩、石灰岩及花岗岩、安山岩、辉绿岩	
下古生界				Pt ₁		绢云母绿泥石片岩、石英片岩、绿色千枚岩	
前古生界				AnP _z		花岗片麻岩、片麻状花岗岩	

实际情况，主要遵循的原则有：

- (1)一级构造单元的 CO₂ 储存推定潜力越大，越有利于 CO₂ 地质储存；
- (2)一级构造单元中碳气源越多、规模越大、勘探程度越高及资源潜力越大，储存经济性越好，越有利于储存；
- (3)从地热条件、水文地质条件、储盖层条件三个方面考虑，地表温度、地热流值、地温梯度越低，地下水流动规模越小、流动深度越浅、更新越快，储盖层条件越好，储存条件越好，越有利于 CO₂ 地质储存；
- (4)地壳稳定性越好，基底断裂密度越小，储存安全性越好，越有利于 CO₂ 地质储存。

根据以上评价指标体系建立的原则，结合研究区实际情况，建立了 CO₂ 地质储存适宜性评价指标体系框架图，如图 2 所示。从图中可以看出，本次评

价体系包括 4 个方面、20 个指标。

2.2 CO₂ 地质储存适宜性的模糊综合评价方法

模糊综合评价是以模糊数学为基础，应用模糊关系合成的原理，将一些边界不清，不易定量的因素定量化，进行综合评价的一种方法(谢季坚，2000；柳军，2003；苏耀明，2007)。由于 CO₂ 的地质储存本身存在着大量不确定性因素，各个指标的级别划分、标准的确定都具有模糊性，因此能够将模糊综合评价较好地应用到 CO₂ 地质储存的适宜性评价中。模糊综合评价法的一般步骤包括：

- (1)确定评判对象：本次评判对象为松辽盆地各一级构造单元的 CO₂ 地质储存适宜性；
- (2)确定评语集 V：本次评价采取 5 等级评语集，即 V={好，较好，中等，较差，差}；
- (3)确定因素集 U=(u₁, u₂, …, u_m)，即选取的评价指标；

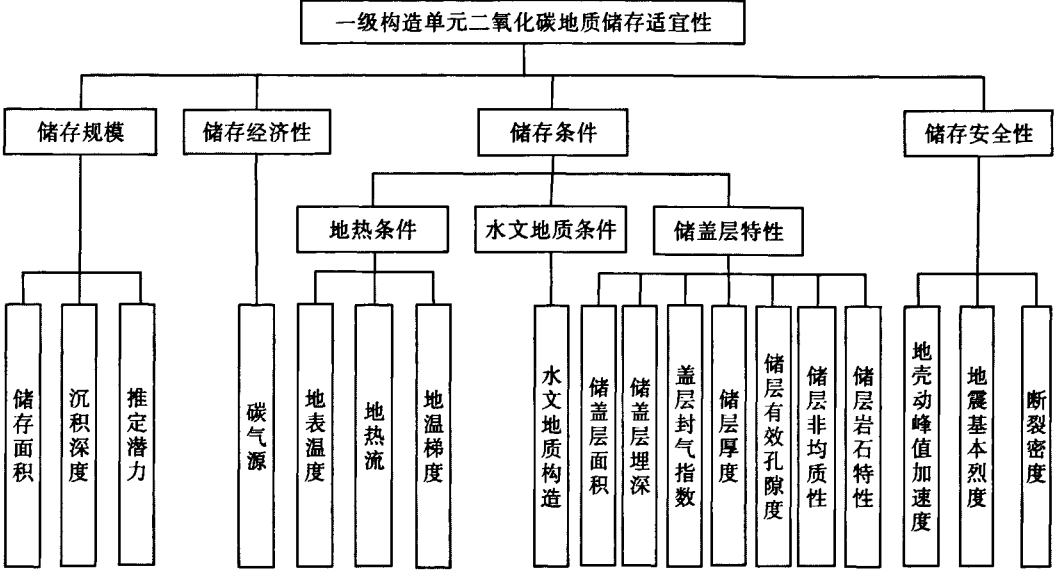


图 2 松辽盆地 CO₂ 地质储存适宜性评价指标体系框架图
Fig. 2 Suitability evaluation framework chart of CO₂ geological sequestration in Songliao Basin

(4)构造模糊关系矩阵 R : 首先需确定各个因素对各个等级的隶属度, 由于各评价指标为单向分布, 半梯形分布函数能够有效刻画隶属度的分布(余琼芳等, 2003), 进而可建立评价指标与评价等级间的模糊关系矩阵 R , 本次评价指标为 20 个, 等级数为 5, 评判矩阵 $R=(r_{ij})_{20 \times 5}$;

(5)确定权重集 $W=(w_1, w_2, \dots, w_m)$: 本次权重的计算采用层次分析法(潘峰等, 2003; 官辉力等, 1989);

(6)做模糊变换求得 $B=W \otimes R$: 根据模糊关系矩阵 R , 应用相乘相加算子进行模糊推理(赵和平, 2001), 相乘相加算子考虑了所有参评因子对 CO₂ 地质储存适宜性的影响, 既强调了最大影响因子, 又使所有参评因子在评价中发挥了应有的作用, 能够比较准确地反映盆地 CO₂ 地质储存适宜性;

(7)利用模糊综合评判向量 B 确定适宜度: 本次评价最终适宜度的确定采用加权平均法, 即对评语集 $V=\{\text{好, 较好, 中等, 较差, 差}\}$ 中的元素数量化, 如 $V=\{9, 7, 5, 3, 1\}$ 。

3 松辽盆地 CO₂ 地质储存适宜性评价

3.1 评价指标分级标准

结合松辽盆地的实际地质、地热、水文地质和石油地质等条件, 应用上述评价体系, 分别确定出各评价指标的分级标准, 如表 2 所示。从表中可以看出, 越大越好型的指标有推定潜力、碳/气源、资源潜力等 10 个, 越小越好型的指标有地热流值、地震烈度、断裂密度等 7 个, 双向指标有盖层埋藏深

度、储层埋藏深度和储层孔隙度 3 个, 但由于各构造单元储盖层平均深度均在 1500 m 以下, 储层孔隙度均在 15% 以上, 所以也可将这三个指标当作单向指标。

3.2 评价指标参数获取

结合上述建立的评价指标体系, 分别对各一级构造单元的每个评价指标的取值进行了详细探讨, 具体如下:

(1)盆地勘探程度、资源潜力、构造水文地质条件、封气指数、储层厚度、储层岩石特性、储存有效孔隙度、储层非均质性(渗透率变异系数 $V(K)$)、断裂密度等参数由参考文献《松辽盆地陆相石油地质学》(侯启军等, 2009)、《中国石油地质志(卷二)——大庆油田(上册)、吉林油田(下册)(吉林油田石油地质志编写组, 1993)、《松辽盆地南部坳陷湖盆沉积相和储层研究》(赵志魁等, 2009)、《裂陷盆地分析原理和方法——以松辽盆地为例》(张功成等, 1996)《松辽盆地十屋断陷反转构造样式及其油气勘探意义》(张玉明等, 2006)中获得;

(2)推定潜力: 区内主要的 CO₂ 地质储存介质为深部咸水层及油气藏, 因此本文通过参考文献《Sequestration of CO₂ in geological media in response to climate change: capacity of deep saline aquifers to sequester CO₂ in solution》(Bachu et al., 2003a)和《Evaluation of the CO₂ sequestration capacity in Alberta's oil and gas reservoirs at depletion and the effect of underlying aquifers》(Bachu et al., 2003b)中的方法, 计算推定潜力;

表 2 CO₂ 地质储存适宜性评价指标分级表
Table 2 Suitability index classification of CO₂ geological sequestration

评价指标		适宜	较适宜	一般	较不适宜	不适宜
储存规模	D 级推定潜力/10 ⁶ t	>10 ⁴	5 × 10 ³ ~10 ⁴	10 ³ ~5 × 10 ³	5 × 10 ² ~10 ³	<5 × 10 ²
储存经济性	碳/气源	多, 规模大	较多, 规模较大	一般, 规模一般	较少, 规模较小	无气源
	勘探程度	开发中	详细勘探过	勘探过	粗略勘探过	未勘探过
	资源潜力	大	较大	一般大	较小	小
	地表温度/℃	< - 2	- 2~3	3~4	10~25	> 25
地热条件	地热流值/(mW/m ²)	< 54.5	54.5~65	65~75	75~85	> 85
	地温梯度/(℃/m)	冷盆地	次冷盆地	中等	次热盆地	热盆地
		< 2.0	2.0~3.0	3.0~4.0	4.0~5.0	> 5
储存条件	水文地质条件	流动规模长、深度深、更新差	规模长、深度深、更新较差	规模中等、深度中等、更新一般	规模短、深度浅、更新较快	流动规模短、深度浅、更新快
	区域性盖层	埋藏深度/m	1400~1900	1900~2400	2400~2900	2900~3400
				1100~1400	900~1100	700~900
	区域性盖层及其组合、物性特征	面积比例/%	>80	60~80	40~60	20~40
		封气指数/m	> 400	200~400	100~200	0~100
	区域性盖层	埋藏深度/m	1500~2000	2000~2500	2500~3000	3000~3500
				1200~1500	1000~1200	800~1000
	区域性盖层	面积比例/%	>80	60~80	40~60	20~40
		厚度/m	> 40	30~40	20~30	10~20
	区域性盖层	岩石特性	碎屑岩, 层状分布	混合, 层状分布	碳酸盐, 层状分布	非层状分布
						没有盐岩
	有效孔隙度/%	10~15	15~20	20~25	25~30	> 30
			8~10	6~8	4~6	< 4
储存安全性	非均质性	< 0.5	0.5~0.55	0.55~0.6	0.6~0.65	> 0.65
	地震动峰值加速度/g	< 0.05	0.05~0.10	0.10~0.15	0.20~0.30	> 0.40
	地震基本烈度	< VI	VI ~ VII	VIII	IX	> X
	断裂密度/(km/km ²)	< 0.2	0.2~0.3	0.3~0.4	> 0.4	> 0.4

(3)储、盖层埋藏深度、储盖层占一级构造单元面积等参数由参考文献《松辽盆地陆相石油地质学》(侯启军等, 2009)、《松辽盆地石油勘探图集》(大庆油田科学研究设计院, 1969)和《松辽盆地南部泉头组砂岩型铀矿成矿条件分析》(宫文杰等, 2010)获得, 其中构造单元沉积深度及储、盖层埋藏深度取自平均值;

(4)碳/气源分布和规模由参考文献《1997—2007 年中国分省化石能源碳排放强度变化趋势分析》(杜官印等, 2010)和《中国区域碳排放研究》(刘占成等, 2010)分析获得;

(5)地震动峰值加速度、地震基本烈度由参考文

献《1: 4000000 中国地震烈度区划图》(国家地震局, 1990)获得;

(6)地热流值、地温梯度参考文献《松辽盆地油气田形成条件与分布规律》(高瑞祺等, 1997)、《【东北】松辽盆地地热初步分析》(中国科学院地质研究所, 1961)、《松辽盆地地热场带》(吴乾蕃, 1991)和《松辽盆地古地温恢复》(任战利等, 2001)并取平均值获得。

最终, 得到松辽盆地一级构造单元的各适宜性评价指标的取值结果, 如表 3 所示。

3.3 评价指标权重的确定

层次分析法(Analysis Hierarchy Process, AHP)

表 3 松辽盆地各一级构造单元评价因子数据表
Table 3 Evaluation factors data of Grade-I tectonic units in Songliao Basin

指标	地区					
	北部倾没区	东北隆起区	西部斜坡区	中央凹陷区	东南隆起区	西南坳陷区
推定潜力/10 ⁶ t	10553	5741	7209	12549	3632	1860
碳/气源	少(0)	少(0)	较多(2)	较多(2)	较多(2)	一般(1)
勘探程度	勘探过(5)	勘探过(5)	开发中(9)	开发中(9)	开发中(9)	勘探过(5)
资源潜力	较小(3)	较小(3)	一般大(5)	大(9)	一般大(5)	较小(3)
地表温度/℃	4	4	4	4	4	4
地热流值/(mW/m ²)	54	54	54	83	54	54
地温梯度/(℃/m)	2.81	2.81	3.054	4.023	5.09	3.35
水文地质条件	规模短、深度浅、更新较快(3)	规模短、深度浅、更新较快(3)	规模短、深度浅、更新较快(3)	流动规模长、深度深、更新差(9)	规模长、深度深、更新较差(7)	规模短、深度浅、更新较快(3)
盖层埋藏深度/m	794	612.5	581.25	1506.25	462.5	620
盖层面积比例/%	0.889	0.58	0.974	1	0.71	0.242
封气指数/m	150	150	150	316	150	150
储层埋藏深度/m	462.5	480	900	1010	533.3	516.9
储层面积比例/%	0.813	0.739	0.667	1	0.758	0.272
储层厚度/m	48.8	27.1	24.4	47.6	16.7	7.1
储层岩石特性	碎屑岩(9)	碎屑岩(9)	碎屑岩(9)	碎屑岩(9)	碎屑岩(9)	碎屑岩(9)
储层有效孔隙度/%	21.74	21.74	20.47	20.54	19.2	19.2
储层非均质性	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
地震动峰值加速度/g	<0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	<0.05
地震基本烈度	< VI	< VI	VI ~ VII	VI ~ VII	VI ~ VII	< VI
断裂密度/(km/km ²)	0.03	0.022	0.014	0.035	0.012	0

是在定性方法基础上发展起来的，定量确定参评因子权重的一种系统分析方法(王莲芬等, 1989)，这种方法可将人们的经验思维数量化，用以检验决策者判断的一致性，有利于实现定量化评价。

用层次分析法计算权重的步骤包括(赵焕臣等, 1986):

(1)分析系统中各因素的关系，建立系统的层次结构;

(2)对同一层次上各因素关于上一层次某一准则的重要性进行两两比较，构造两两比较判断矩阵(正互反矩阵);

(3)由判断矩阵计算被比较元素对于该准则的相对权重，并进行一致性检验;

(4)计算各层元素对系统目标的合成权重，并进行排序。

通过层次分析法计算的权重如表 4 所示。从表

表 4 适宜性评价指标权重表
Table 4 Suitability index weight

指标	推定潜力	碳/气源	勘探程度	资源潜力	地表温度	地热流值	地温梯度
权重	0.175	0.056	0.056	0.056	0.01	0.02	0.02
指标	水文地质条件	盖层埋藏深度	盖层面积	封气指数	储层埋藏深度	储层面积	储层厚度
权重	0.056	0.032	0.056	0.094	0.032	0.056	0.056
指标	储层岩石特性	储层有效孔隙度	储层非均质性	地震动峰值加速度	地震基本烈度	断裂密度	合计
权重	0.056	0.056	0.056	0.02	0.02	0.02	1

中可以看出, 储存规模的指标权重较大, 地热条件指标和地震安全指标权重均较小, 反映出由于松辽盆地地壳活动较稳定, 而较低的地热梯度和地热流值虽然能使 CO₂ 在较小的深度下达到较高的密度, 但同时也说明区内地热条件的不足可由深度等因素弥补, 因此, 此次研究将储存规模作为重点考虑因素。而最终一致性比率 CR=0.005<0.1, 也说明求取的权重是合理的。

3.4 评价结果与讨论

应用模糊综合评价方法, 结合松辽盆地各一级构造单元评价指标取值, 模糊综合评判向量 $B=W \otimes R$, 由表 4 可得权重向量 W , 通过隶属度的计算可得模糊关系矩阵 R 。由于篇幅关系, 本文仅以中央坳陷区为例, 给出模糊关系矩阵 R_4 :

$$R_4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.8571 & 0.1429 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1699 & 0.8301 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.9772 & 0.0228 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.58 & 0.42 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.05 & 0.95 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.892 & 0.108 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0.5 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

由此可以得出松辽盆地各一级构造单元的模糊综合评价向量 B 如表 5 所示。

通过对模糊综合评价的结果进行量化, 不仅能评价出适宜度的等级, 而且能对各个一级构造单元的适宜度进行比较排序。本次研究采用加权平均法确定最终的适宜度, 首先对备择集(评判者对评判对象可能作出的评判结果的集合) $V=\{\text{好, 较好, 中等, 较差, 差}\}$ 进行数量化, 用“9, 7, 5, 3, 1”依次表示各

等级, 并称其为各等级的秩, 得到 $V=\{9, 7, 5, 3, 1\}$, 通过加权计算, 得到最终的适宜度和评价结果如表 5 所示。从表中可以看出, 中央坳陷区 CO₂ 地质储存适宜度为 7.742, 可以作为 CO₂ 地质储存的优先区域, 北部倾没区、西部斜坡区和东南隆起区的适宜度分别为 5.288、5.294 和 5.14, 说明这 3 个一级构造单元的地质储存适宜性一般, 而东北隆起区和西南隆起区适宜度分别为 4.155 和 4.126, 说明这 3 个一级构造单元不适宜储存 CO₂。各分区的评价结果解释如下:

(1)中央坳陷区: 由于中央坳陷区地层发育齐全, 沉积深度较大, 局部沉积岩厚度达 7000~10000 m, 发育有多套生储盖组合, 且储盖层面积大, 在整个中央坳陷区均有分布, 储层厚度较大, 盖层封盖能力较强, 成藏条件好, 是盆地中最重要的油气源区和油气田分布区, 且碳气源较多, 规模较大。另外, 坳陷区内地下水更新能力较差, 为滞留浓缩区, 基本不受现代水循环影响, 地震基本烈度总体为 VI~VII, 地震动峰加速度为 0.05~0.10, 地壳活动较相对稳定, 虽然坳陷区内地温梯度及地热流值较其它一级构造单元偏高, 但整体的地质、水文地质等条件决定了中央坳陷区具有较好的适宜度;

(2)北部倾没区: 北部倾没区基岩埋藏深度为 100~3500 m; 储盖层分布较广泛, 储层厚度较大, 盖层封盖能力一般; 碳气源少; 该区为一供水淡化区, 地下水更新速度较快; 区内地温梯度和地热流值均较低; 区内地震基本烈度总体为 < VI, 地震动峰加速度为 < 0.05, 相对稳定;

(3)东北隆起区: 东北隆起区地层发育不全, 上白垩统基本缺失, 基岩起伏大, 埋藏深度 500~3000 m, 储盖层分布较广泛, 储层厚度一般, 盖层封闭能力较中央坳陷区差; 碳气源少; 该区同样为一供水淡化区, 地下水更新速度较快。区内地温梯度高, 但地热流值较低。区内地震基本烈度总体为 < VI, 地震动峰加速度为 0.05~0.10, 相对稳定;

(4)西部斜坡区: 基岩埋藏浅, 为 2000~2500 m;

表 5 松辽盆地各一级构造单元模糊综合评判向量表
Table 5 Vector of fuzzy comprehensive evaluation of Grade-I tectonic units in Songliao Basin

一级构造单元	模糊综合评判向量 B	适宜度	评价结果
北部倾没区	(0.3078, 0.0613, 0.2694, 0.1885, 0.176)	5.288	一般
东北隆起区	(0.1298, 0.1102, 0.2893, 0.2977, 0.176)	4.155	较差
西部斜坡区	(0.284, 0.117, 0.2602, 0.2379, 0.104)	5.294	一般
中央坳陷区	(0.695, 0.133, 0.0715, 0.0475, 0.056)	7.742	较好
东南隆起区	(0.293, 0.1506, 0.1638, 0.2371, 0.1585)	5.14	一般
西南隆起区	(0.145, 0.1729, 0.1539, 0.0.2751, 0.2561)	4.126	较差

储盖层分布较广泛, 储层厚度一般, 盖层封闭能力较中央坳陷区差; 碳气源较多; 该区水力坡度大, 易于补给水源长期深入, 为一供水淡化区, 更新速度较快。区内地震基本烈度总体为 VI ~ VII, 地震动峰加速度为 0.05 ~ 0.10, 相对较稳定;

(5) 东南隆起区: 东南隆起区地层发育不全, 上白垩统缺失, 基岩起伏较大, 埋藏深度为 500~3000 m。储盖层分布面积约占全区的 70%, 储层厚度一般, 盖层封闭性一般; 碳气源较多; 区内地下水主要为氯化物-钠型水, 水文条件稳定, 外来水影响不大, 更新能力较差; 区内地温梯度和地热流值均较低; 区内地震基本烈度总体为 VI~VII, 地震动峰加速度为 0.05~0.10, 相对较稳定;

(6) 西南隆起区: 西南隆起区没有登娄库组沉积, 泉头组、青山口组分布范围不广, 厚度较小, 姚家组超覆于基岩之上, 基岩埋藏浅, 深度约在 250~1000 m; 储盖层在区内分布的范围较小, 储层厚度较小, 且盖层封盖能力较差; 碳气源较少; 区内地下水矿化度较低, 更新速度较快; 区内地温梯度和地热流值均较低; 区内地震基本烈度总体为 < VI, 地震动峰加速度为 < 0.05, 相对稳定。

从以上讨论可知, 整个盆地各一级构造单元的地热条件和安全性相差不大, 但中央坳陷区由于沉积深度、水文地质条件、储盖层条件(储盖层面积、埋藏深度、储层厚度等)均较其它各一级构造单元好而适宜度较高, 北部倾没区、西部斜坡区和东南隆起区由于以上条件均较中央坳陷区稍差而适宜性一般, 东北隆起区和西南隆起区同样因为储盖层分布较少, 储层厚度较小等条件而适宜性较差。由此可见, 上述结果与研究区的实际情况相符, 说明该评价方法的合理性。

另外, 沈平平等同样曾利用模糊综合评价方法对位于松辽盆地中央坳陷区的大情字油田进行了 CO₂ 地质储存适宜性评价, 结果表明大情字油田的 CO₂ 地质储存适宜性是适宜的, 也很好地验证了本次评价结果的准确性, 但由于他主要侧重于油田介质, 指标体系的差别使得评价结果与本次研究有一定的差别。

4 结论

由于 CO₂ 地质储存条件的严格和沉积盆地地质条件的复杂性, 建立合适的 CO₂ 地质储存适宜性评价指标体系具有重要意义。通过上述研究可以看出, 本次研究建立的评价指标体系能够较好的应用于盆地级 CO₂ 地质储存场地筛选中, 且评价结果表明,

中央坳陷区 CO₂ 地质储存适宜度为 7.742, 可以作为 CO₂ 地质储存的优先区域, 北部倾没区、西部斜坡区和东南隆起区的适宜度分别为 5.288、5.294 和 5.14, 说明这 3 个一级构造单元的地质储存适宜性一般, 而东北隆起区和西南隆起区适宜度分别为 4.155 和 4.126, 说明这 2 个一级构造单元不适宜储存 CO₂。为 CO₂ 地质储存场地筛选和工程建设等提供了科学依据。

参考文献:

- 迟元林, 云金表, 蒙启安. 2002. 松辽盆地深部结构及成盆动力学与油气聚集[M]. 北京: 石油工业出版社.
- 大庆油田科学研究设计院. 1969. 松辽盆地石油勘探图集[M]. 大庆: 大庆油田科学研究设计院.
- 杜官印, 蔡运龙, 李双成. 2010. 1997-2007 年中国分省化石能源碳排放强度变化趋势分析[J]. 地理与地理信息科学, 26(5): 76-81.
- 高瑞祺, 蔡希源. 1997. 松辽盆地油气田形成条件与分布规律[M]. 北京: 石油工业出版社.
- 官辉力, 鲍新华. 1989. 层次分析法在水质污染模糊综合评判中的应用[J]. 地下水, (4): 193-198.
- 官文杰, 张振强. 2010. 松辽盆地南部泉头组砂岩型铀矿成矿条件分析[J]. 地球学报, 31(6): 813-818.
- 国家地震局. 1990. 1: 4000000 中国地震烈度区划图[M]. 北京: 地震出版社.
- 侯启军, 冯志强, 冯子辉. 2009. 松辽盆地陆相石油地质学[M]. 北京: 石油工业出版社.
- 吉林油田石油地质志编写组. 1993. 中国石油地质志(卷二)——大庆、吉林油田, 吉林油田(下册)[M]. 北京: 石油工业出版社.
- 李林立, 向颖, 况明生, 谢世友, 张远瞩, 蒋勇军, 刘玉. 2006. 重庆金佛山表层岩溶生态系统土壤的 CO₂ 释放规律[J]. 地球学报, 27(4): 329-334.
- 李小春, 魏宁, 刘延峰, 白冰, 方志明, 王燕. 2008. 中国二氧化碳地质封存潜力评估和早期实施机遇[Z]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所.
- 刘占成, 王安建, 于汶加, 李铭. 2010. 中国区域碳排放研究[J]. 地球学报, 31(5): 727-732.
- 柳军. 2003. 模糊综合评价在水环境质量评价中的应用研究[D]. 重庆: 重庆大学.
- 潘峰, 付强, 梁川. 2003. 基于层次分析法的模糊综合评价在水环境质量评价中的应用[J]. 东北水利水电, 21(8): 22-24.
- 任韶然, 张莉, 张亮. 2010. CO₂ 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), 34(1): 93-98.
- 任战利, 萧德铭, 迟元林. 2001. 松辽盆地古地温恢复[J]. 大庆

- 石油地质与开发, 20(1): 13-14.
- 沈平平, 廖新维. 2009. 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.
- 苏耀明. 2007. 基于 GIS 的鄂尔多斯白垩系地下水盆地地下水水质的模糊综合评价[D]. 长春: 吉林大学.
- 王莲芬, 许树柏. 1989. 层次分析法引论[M]. 北京: 中国人民大学出版社.
- 吴乾蕃. 1991. 松辽盆地地热场带[J]. 地震研究, 14(1): 31-39.
- 谢季坚. 2000. 模糊数学方法[M]. 武汉: 华中科技大学出版社.
- 徐志刚, 陈代钊, 曾荣树, 郭凯, 王旭. 2009. 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), 31(1): 91-95.
- 余琼芳, 陈迎松. 2003. 模糊数学中隶属函数的构造策略[J]. 漯河职业技术学院学报(综合版), 2(1): 12-14.
- 张功成, 蔡希原, 周章保. 1996. 裂陷盆地分析原理和方法——以松辽盆地为例[M]. 北京: 石油工业出版社: 88-110.
- 张炜, 李义连. 2006. 二氧化碳储存技术的研究现状和展望[J]. 环境污染与防治, 8(12): 950-953.
- 张玉明, 张青林, 王明君, 杨木壮. 2006. 松辽盆地十屋断陷反转构造样式及其油气勘探意义[J]. 地球学报, 27(2): 151-156.
- 赵和平. 2001. 环境综合评价模糊数学方法中 4 个算子的比较[J]. 贵州环保科技, 7(3): 28-32, 35.
- 赵焕臣, 许树柏, 和金生. 1986. 层次分析法[M]. 北京: 科学出版社.
- 赵志魁, 张金亮, 赵占银, 张大伟. 2009. 松辽盆地南部坳陷湖盆沉积相和储层研究[M]. 北京: 石油工业出版社.
- 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心. 2010. 全国二氧化碳地质储存潜力评价与示范工程实施技术要求(征求意见稿)[Z]. 正定: 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心.
- 中国科学院地质研究所. 1961. 【东北】松辽盆地地热初步分析[R]. 北京: 中国科学院地质研究所.
- CHI Yuan-lin, YUN Jin-biao, MENG Qi-an. 2002. Deep Structure and Dynamics and Petroleum Accumulation of Songliao Basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press(in Chinese).
- Center for Hydrogeology and Environmental Geology, China Geological Survey. 2010. The national carbon dioxide geological storage potential evaluation and technical requirements for implementation of demonstration projects(for comments)[Z]. Zhengding: Center for Hydrogeology and Environmental Geology, China Geological Survey(in Chinese).
- DU Guan-yin, CAI Yun-long, LI Shuang-cheng. 2010. Fossil-Fuel Carbon Emission Intensity Change of Each Province in China during 1997-2007[J]. Geography and Geo-Information Science, 26(5): 76-81(in Chinese with English abstract).
- GAO Rui-qi, CAI Xi-yuan. 1997. The formation conditions and distribution of oil and gas of Songliao Basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press(in Chinese).
- GONG Hui-li, BAO Xin-hua. 1989. The application of AHP in water pollution fuzzy comprehensive evaluation[J]. Groundwater, (4): 193-198(in Chinese with English abstract).
- GONG Wen-jie, ZHANG Zhen-qiang. 2010. Metallogenic Condition Analysis of the Sandstone Uranium Deposit in Quantou Formation, Southern Songliao Basin[J]. Acta Geoscientica Sinica, 31(6): 813-818(in Chinese with English abstract).
- HOU Qi-jun, FENG Zhi-qiang, FENG Zi-hui. 2009. Continental Petroleum Geology of Songliao Basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press(in Chinese).
- Institute of Geology Chinese Academy of Geological Sciences. 1961. 【Northeast】Preliminary analysis of geothermal of Songliao basin[R]. Beijing: Institute of Geology Chinese Academy of Geological Sciences(in Chinese).
- IPCC. 2001. Climate change 2001: the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change[R]. Cambridge: Cambridge University.
- Jilin Oil Field Committee of Petroleum of China. 1993. Petroleum Geology of China(Vol. 2), Daqing oilfield and Jilin oilfield: Jilin oilfield[M]. Beijing: Petroleum Industry Press(in Chinese with English preface).
- LI Lin-li, XIANG Hao, KUANG Ming-sheng, XIE Shi-you, ZHANG Yuan-zhu, JIANG Yong-jun, LIU Yu. 2006. The Regularity of CO₂ Release from Soils of the Epikarst Ecosystem in the Jinfu Mountain, Chongqing[J]. Acta Geoscientica Sinica, 27(4): 329-334(in Chinese with English abstract).
- LI Xiao-chun, WEI Ning, LIU Yan-feng, BAI Bing, FANG Zhi-ming, WANG Yan. 2008. Evaluation of Potentials and Early Deployment Opportunities of CO₂ Geological Storage in China[Z]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chi-

References:

- BACHU S, ADAMS J J. 2003a. Sequestration 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, 44(20): 3151-3175.
- BACHU S, SHAW J. 2003b. Evaluation of the CO₂ sequestration capacity in Alberta's oil and gas reservoirs at depletion and the effect of underlying aquifers[J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 42(9): 51-61.
- BACHU S. 2002. Sequestration of CO₂ in geological media in response to climate change rod map for site selection using the transform of geological space into the CO₂ phase space[J]. Energy Conversion and Management, 43(1): 87-102.

- nese Academy of Sciences(in Chinese).
- LIU Jun. 2003. Applying fuzzy synthesise evaluation in the study of water environment quality assessment[D]. Chongqing: Chongqing University(in Chinese with English abstract).
- LIU Zhan-cheng, WANG An-jian, YU Wen-jia, LI Ming. 2010. Research on Regional Carbon Emissions in China[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 31(5): 727-732(in Chinese with English abstract).
- PAN Feng, FU Qiang, LIANG Chuan. 2003. Application of fuzzy comprehensive evaluation based on AHP in quality evaluation of water environment[J]. *Water Resources & Hydropower of Northeast*, 21(8): 22-24(in Chinese with English abstract).
- REN Shao-ran, ZHANG Li, ZHANG Liang. 2010. CO₂ geological storage: Foreign demonstration project and its Implications in China[J]. *Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science)*, 34(1): 93-98(in Chinese with English abstract).
- REN Zhan-li, XIAO De-ming, CHI Yuan-lin. 2001. Restoration of the Palaeogeotherm in Songliao Basin[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 20(1): 13-14(in Chinese with English abstract).
- Research Institute of Daqing Oilfield. 1969. Oil exploration Atlas of Songliao Basin[M]. Daqing: Research Institute of Daqing Oilfield(in Chinese).
- SHEN Ping-ping, LIAO Xin-wei. 2009. Geologic storage of carbon dioxide and enhanced oil recovery technology[M]. Beijing: Petroleum Industry Press(in Chinese).
- SHUKLA R, RANJITH P, HAQUE A, CHOI X. 2010. A review of studies on CO₂ sequestration and caprock integrity[J]. *Fuel*, 2651-2664.
- State Seismological Bureau. 1990. 1: 4000000 Seismic intensity zoning map of China[M]. Beijing: Earthquake Press(in Chinese).
- SU Yao-ming. 2007. Fuzzy Synthetic Evaluation of Groundwater Quality Based on GIS in Ordos Cretaceous Artisan Basin[D]. Changchun: Jilin University(in Chinese with English abstract).
- WANG Lian-fen, XU Shu-bai. 1989. Introduction of Analysis Hierarchy Process(AHP)[M]. Beijing: China Renmin University Press(in Chinese).
- WU Qian-fan. 1991. The Geothermal field in Songliao Basin[J]. *Journal of Seismological Research*, 14(1): 31-39(in Chinese with English abstract).
- XIE Ji-jian. 2000. Fuzzy Mathematics[M]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology Press(in Chinese).
- XU Zhi-gang, CHEN Dai-zhao, ZENG Rong-shu, GUO Kai, WANG Xu. 2009. The theory and conditions of geological storage of CO₂[J]. *Journal of Southwest Petroleum University(Science & Technology Edition)*, 31(1): 91-95(in Chinese with English abstract).
- YU Qiong-fang, CHEN Ying-song. 2003. The constructing policy of membership function in fuzzy mathematics[J]. *Journal of Luohe Vocational and Technical College (Comprehensive)*, 2(1): 12-14(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Gong-cheng, CAI Xi-yuan, ZHOU Zhang-bao. 1996. Rift basin analysis principles and methods—Case Study of Songliao Basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press: 88-110(in Chinese).
- ZHANG Wei, LI Yi-lian. 2006. Research status and prospects of carbon dioxide sequestration technique[J]. *Environmental Pollution and Control*, 8(12): 950-953(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Yu-ming, ZHANG Qing-lin, WANG Ming-jun, YANG Mu-zhuang. 2006. The Reverse Structural Styles in the Shiwu Rift Depression, Songliao Basin, and Their Oil and Gas Exploration Significance[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 27(2): 151-156(in Chinese with English abstract).
- ZHAO He-ping. 2001. The four operators comparison in the fuzzy mathematics of environment assessment[J]. *Guizhou Environmental Protection Science and Technology*, 7(3): 28-32, 35(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Huan-chen, XU Shu-bai, HE Jin-sheng. 1986. Analysis Hierarchy Process[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- ZHAO Zhi-kui, ZHANG Jin-liang, ZHAO Zhan-yin, ZHANG Da-wei. 2009. The research of lake sedimentary and reservoir in the southern depression of Songliao Basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press(in Chinese).