

Assessment Methodology of Basin-Scale Site Selection for CO₂ Geological Storage under Background of Climate Change

Guizhen Liu, Qi Li

State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering,
Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan
Email: gzh_liu@hotmail.com

Received: Jul. 2nd, 2013; revised: Aug. 3rd, 2013; accepted: Aug. 12th, 2013

Copyright © 2014 Guizhen Liu, Qi Li. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. In accordance of the Creative Commons Attribution License all Copyrights © 2014 are reserved for Hans and the owner of the intellectual property Guizhen Liu, Qi Li. All Copyright © 2014 are guarded by law and by Hans as a guardian.

Abstract: An assessment method of basin-scale site selection with a set of 15 criteria is introduced for the screening and ranking of sedimentary basins in terms of their suitability for CO₂ geological storage. The application is given for Ordos Basin, and its total score is 0.81, which shows its suitability for CO₂ geological storage. According to the sensitivity analysis, criteria, geothermy, location, geology and hydrogeology have the greatest influence on the total score of the basin. An application of AHP (Analytic Hierarchy Process)-fuzzy comprehensive method is also conducted on the assessment of Ordos Basin. Its results prove Bachu's assessment method, and confirm that Ordos Basin is suitable for CO₂ geological storage. Compared to the AHP-fuzzy comprehensive assessment method, the screening and ranking method developed by Bachu is easier to operate, and has a wider application for the assessment, screening and ranking of basins and areas.

Keywords: CO₂ Geological Storage; Site Selection; Assessment Criteria; Ordos Basin; Fuzzy Comprehensive Assessment; Analytic Hierarchy Process

气候变化背景下二氧化碳地质封存的盆地级选址评价方法

刘桂臻, 李琦

岩土力学与工程国家重点实验室, 中国科学院武汉岩土力学研究所, 武汉
Email: gzh_liu@hotmail.com

收稿日期: 2013年7月2日; 修回日期: 2013年8月3日; 录用日期: 2013年8月12日

摘要: 本文首先回顾了二氧化碳封存的盆地级选址评价方法, 重点介绍 Bachu 提出的一种单级指标评价的盆地级选址评价方法, 此方法能够对多个盆地或盆地的不同区域进行评价、排序和筛选。在设计实现快速计算表格的同时, 对 Bachu 方法指标敏感性进行了评估。利用该方法对鄂尔多斯盆地进行评价, 评价结果为 0.81, 表明鄂尔多斯盆地是一个适宜的 CO₂ 地质封存场地。对该方法的指标进行敏感性分析表明, 地热条件、盆地位置、地质特征和水文地质特征对评价结果的影响最大。同时, 利用基于层次分析法的模糊综合评价法对鄂尔多斯盆地进行比较评价, 得出其场地等级为良, 证明 Bachu 评价方法在鄂尔多斯盆地是有效的, 其结果是合理的, 两种方法相互证实了鄂尔多斯盆地作为 CO₂ 地质封存场地的可行性。将两种方法进行对比, Bachu 的方法操作简单、计算速度快, 能够实现多个盆地或盆地的不同区域进行评价、排序和筛选。

关键词: CO₂ 地质封存; 场址筛选; 评价指标; 鄂尔多斯盆地; 模糊综合评价; 层次分析法

1. 引言

CO₂地质封存是应对全球气候变暖的新举措,选择合适的储存地点,以便最大限度地降低工程费用,保证项目的安全性和稳定性,是工程开展的重要课题^[1,2]。因此,一些考虑到从CO₂捕获到封存的整个项目链中各环节的具体因素,对场地的CO₂地质储存潜力与适宜性进行评价,从而进行场址的筛选排序的研究也不断开展。

国外将场址评估划分为国家/州级筛选、盆地级评价、场址描述、场址应用四个阶段^[3],也是具体场址选择的工作流程。

在工作的初期,首先可以根据储层及储层流体特征、以及地表设施等条件对CO₂地质封存的有利和不利条件,进行初步的筛选。Kovscek(2002)将CO₂-EOR和CO₂隔离的筛选指标划分为储层特征、油特征和地表设施三类,列出能够反应他们特征的13个具体指标,并给出了所有指标对封存的积极和消极作用的取值范围^[4]。LBNL(2004)在此基础上,将表征储层特性的孔隙压力、地层压力梯度、位置三个指标舍去,形成一个具有10个指标的指标系统^[5]。Chadwick(2008)则是从储层有效性(考虑动态储量和静态储量)、储层特征和盖层有效性三个方面共11个指标进行筛选^[6]。Grataloup(2009)将指标分为杀手指标(Killer criteria)和场地资格指标(Site-qualification criteria),从储存最优化、风险最小化、遵守规则和空间建设、社会经济四个方面进行考虑,利用GIS工具得到潜在的场址^[7]。

在对场址进行初步筛选后,潜在的可能场址可以通过进一步的评价进行排序筛选。Bachu(2003)提出了一套包括15个指标的盆地级别评价指标体系,包括盆地特征、盆地资源和社会因素等,能够应用在国家级、盆地级的尺度场址的初步选择^[8]。而更多的盆地级别的选址方法,都是在该方法上的完善和更新。CO₂CRC(2008)在该方法上增加和改变了一些指标,作为国家和盆地级的选址方法^[3]。除此以外,还有一些考虑到封存安全和环境风险的场址筛选和排序方法。DNV(2009)的场址选择指南,就提供了基于风险的场址选择方法^[9]。Oldenburg(2008)基于健康、安全、和风险建立起场址的筛选和排序框架^[10,11]。这些方法大多需要更翔实的场地资料,能够应用在不同级别的评价对象。

除此以外,NETL(2010)利用是非(Y/N)逻辑,考

虑区域地质、地方保护、社会等不同条件,进行场址的筛选和选择^[12]。WRI(2008)的二氧化碳捕集、运输和封存指南,提出了场址描述和选择的概念性方法,即工作框架^[13]。

我国将CO₂地质储存潜力与适宜性评价工作,基于盆地→圈闭→注入层评价循序渐进开展,即多尺度目标逼近法。根据不同工作阶段,划分为国家级潜力评价(E级)、盆地级潜力评价(D级)、目标区级潜力评价(C级)、场地级潜力评价(B级)和灌注级潜力评价(A级),不同阶段的评价对象分别为盆地、盆地一或二级构造单元、盆地圈闭级构造单元、工程场地以及正式开展CO₂灌注工程场地^[14-16],在各阶段具体的工作时,针对不同的评价阶段和对象,需要综合考虑各种因素,采取不同的评价指标和方法。在国家及盆地级选址方法上,有李小春(2006)等根据封存潜力和CO₂源规模进行盆地分级^[15]。目前国内采用的评价方法主要是基于层次分析法的模糊综合评价。范基姣(2011)提出了我国CO₂地质储存潜力与适宜性评价不同阶段主要评价对象或指标,并采用基于层次分析法的模糊综合评价对我国E级和D级进行评价^[17]。张晓普(2012)将该方法对鄂尔多斯盆地深部咸水层CO₂地质封存进行适宜性评价^[18]。杨国强(2011)则是将其应用在松辽盆地的适宜性评价上^[19]。除了模糊综合评价法,郭建强(2011)介绍了多因子排序综合评价方法^[14]。

Bachu(2003)的单级指标评价法,具有操作简单、便于应用、可操作性强等特点,是其它盆地级场址选择的方法基础,同时也受到了国内学者的重视^[16,20]。因此,本文针对该方法,建立一种快速的计算表格,并针对鄂尔多斯盆地开展CCS(Carbon Dioxide Capture and Storage)工程进行场地选址前的打分,并对方法的指标选取进行分析,并利用该方法的指标进行模糊综合计算,将二者结果对比,验证该方法的可行性和指标敏感性。

2. 方法概况

该方法首先在综合分析盆地特征、盆地资源和社会因素的基础上,选取了15个指标,并根据各指标的重要性,赋予0~1之间不同的权重,所有的权重总和为1。然后将不同的指标分成3~5个级别,如果某一个指标的不同等级具有相对公平的重要性,则该指标的不同级别采用线性函数进行描述,如果增加的值(或

重要性)是越来越优先的,则采用几何或指数函数。将待评价的盆地或区域各指标的属性所对应的取值进行归一化,所得到的值与该指标权重值的乘积总和,即为该评价对象的得分。指标体系及分级取值如表1所示。

3. 鄂尔多斯实例

鄂尔多斯盆地位于华北地台的西部,是中国现存最为完整、稳定的构造单元,面积 $37 \times 10^4 \text{ km}^2$,盆地本部面积 $25 \times 10^4 \text{ km}^2$,是我国第二大沉积盆地,总厚 5000~10,000 m。从地质特性看,鄂尔多斯盆地是一个整体升降、拗陷迁移、构造简单的大型多旋回克拉通盆地,结晶基底发育多组断裂,但未上穿沉积盖层。从盆地构造特征看,鄂尔多斯盆地西降东升,东高西低,非常平缓,每公里坡降不足 1° ,具有半盆油,满盆气,南油北汽、上油下气。盆地包含了周边岩溶地下水、白垩系自流盆地地下水和东部黄土去地下水三个地下水大系统。地层温度在 $72^\circ\text{C} \sim 91.6^\circ\text{C}$ 。

根据收集到的鄂尔多斯盆地资料,对每一个指标,即特征 i ,对应确定等级 j ,同时,在表中得到对应的指标属性值 F_{ij} ,并采用式(1)进行标准化:

$$P_i^k = \frac{F_{i,j} - F_{i,1}}{F_{i,x} - F_{i,1}} \quad (1)$$

其中, $F_{i,1}$, $F_{i,n}$ 分别表示评价标准在适宜性方面最差和最好的等级,即 $F_{i,1} = \min(F_i)$, $F_{i,n} = \max(F_i)$,沉积盆地 E 可以用 15 个数 P_i^e 来评价。

将不同指标标准化后的值 P_i 与权重 w_i 的乘积相加,得到的结果 R^e 就是一个表示盆地等级的数值。即:

$$R^e = \sum_1^{15} w_i p_i^e \quad (2)$$

$$\sum_1^{15} w_i = 1 \quad (3)$$

在 EXCEL 中建立一个表格,不同评价指标的赋值在表格中以批注的形式表现,同时表格中还包含了评价场地的特征,以及计算流程。对鄂尔多斯盆地进行评价,结果如表2所示。

Table 1. Scores and weights assigned to the criteria and classes for assessing sedimentary basins^[8]
表 1. 评价指标及分级取值、权重^[8]

标准	等级					权重	
	1	2	3	4	5		
1 构造背景	描述	海洋聚敛边界	聚敛型山间盆地	离散大陆架	大型离散前渊盆地	离散型克拉通	0.07
	分值	1	3	7	15	15	
2 面积	描述	小	中	大	巨大		0.06
	分值	1	3	5	9		
3 沉积深度	描述	浅(<1500 m)	中等	深(>3500 m)			0.07
	分值	1	3	5			
4 地质特征	描述	大规模的断裂	中度的断裂和破碎	有限的断裂和破碎			0.08
	分值	1	3	7			
5 水文地质特征	描述	浅、短流动系统	中等规模流动系统	区域、长距离规模流动			0.08
	分值	1	3	7			
6 地热条件	描述	热盆地	温和的	冷盆地			0.1
	分值	1	3	7			
7 生烃潜力	描述	无	小	中等	大	巨大	0.06
	分值	1	3	7	13	21	
8 成熟度	描述	未开发	开发	发展	成熟	过于成熟	0.08
	分值	1	2	4	8	10	
9 煤和煤层气	描述	无	深(>800 m)	浅(200~800 m)			0.04
	分值	1	2	5			
10 盐岩	描述	无	穹顶	床			0.01
	分值	1	2	3			
11 陆地/近海区	描述	深海区	浅海区	陆地			0.1
	分值	1	4	10			
12 气候	描述	极地	亚极地	沙漠	热带	温带	0.08
	分值	1	2	4	7	11	
13 易接近性	描述	不能接近	难	合适	易		0.03
	分值	1	3	6	10		
14 基础设施	描述	无	较少	中等	大规模		0.05
	分值	1	3	7	10		
15 CO ₂ 源	描述	无	少	中等	多		0.09
	分值	1	3	7	15		

Table 2. Spreadsheet of Bachu's screening and ranking method with application to Ordos Basin
表 2. CO₂ 地质封存场址筛选排序法快速计算表格及鄂尔多斯盆地评价结果

位置:	鄂尔多斯盆地				总分 R^e :	0.81
评价指标	描述	分值 F_{ij}	标准化 p_i^t	权重 ω_i	R_i	
$i = 1$	构造背景	升降、拗陷迁移、构造简单的大型多旋回克拉通盆地	15	1.00	0.07	0.07
$i = 2$	面积	面积 $37 \times 10^4 \text{ km}^2$, 盆地本部面积 $25 \times 10^4 \text{ km}^2$	9	1.00	0.06	0.06
$i = 3$	沉积深度	总厚 5000~10,000 m	5	1.00	0.07	0.07
$i = 4$	地质特征	结晶基底发育多组断裂, 但未上穿沉积盖层。	7	1.00	0.08	0.08
$i = 5$	水文地质特征	包含了周边岩溶地下水、白垩系自流盆地地下水和东部黄土区地下水三个地下水大系统	7	1.00	0.08	0.08
$i = 6$	地热条件	地层温度在 $72^\circ\text{C} \sim 91.6^\circ\text{C}$, 总体上属正常地温系统	3	0.33	0.1	0.03
$i = 7$	生烃潜力	大	13	0.60	0.06	0.04
$i = 8$	成熟度	成熟高	8	0.78	0.08	0.06
$i = 9$	煤和煤层气	南部邻区气层埋深 2340~2850 m	2	0.25	0.04	0.01
$i = 10$	盐岩	碳酸盐岩	2	0.50	0.01	0.01
$i = 11$	陆地/近海区	陆地	10	1.00	0.1	0.10
$i = 12$	气候	欧亚大陆东部温带大陆性季风气候	11	1.00	0.08	0.08
$i = 13$	易接近性	容易	10	1.00	0.03	0.03
$i = 14$	基础设施	大规模	10	1.00	0.05	0.05
$i = 15$	CO ₂ 源	中等	7	0.43	0.09	0.04

鄂尔多斯盆地是一个气、油、煤富集的盆地, 资源丰富。早在二十世纪初就开始了石油探勘开发, 因此, 交通便利, 基础设施完备。同时, 各种化工企业落户盆地, 如神华煤制油化工有限公司等大型化工企业, 提供了大量的 CO₂ 源。这些都是开展 CO₂ 地质封存的有力条件, 最终的评价结果也表明了鄂尔多斯盆地是一个合适的 CO₂ 地质封存场所(图 1)。

4. 指标敏感性分析

Bachu 对不同的指标赋予了不同的权重以及相同级别下的不同属性值, 评价对象某一指标的属性值不同, 其评价结果也不同, 由于各指标的权重和相同级别的属性值都不相同, 所以, 不同指标的属性对最终评价结果的影响也不相同, 这反映了指标对 CO₂ 地质封存场址选择的影响程度。因此, 本文将对各个指标进行敏感性分析, 从而分析不同指标对于场址选择的影响程度。

本文以最好的等级作为基准, 即此时盆地 E 的等级 R^e 值为 1, 然后, 保持其它指标属性值不变, 选取特征 i , 从最差等级 $F_{i,1}$ 到 $F_{i,n}$ 取值, 得到对应的

盆地级别评价

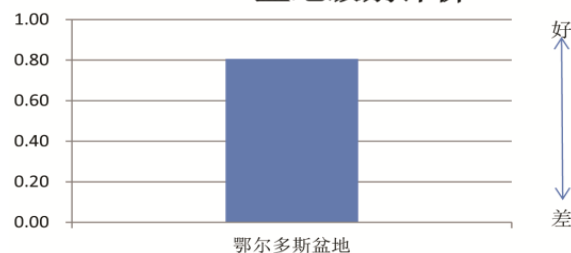


Figure 1. Total assessment score of Ordos Basin
图 1. 鄂尔多斯盆地评价总分示意图

$R_{i,1}^e, \dots, R_{i,n}^e$, 以及由 $R_{i,1}^e, \dots, R_{i,n}^e$ 所构成的拟合直线斜率 K_i 值, 根据 K_i 值的大小来反应结果的变化情况, K_i 值越大, 表示该指标不同等级的取值, 对结果变化影响力越大, 也就是说, 具有较大 K_i 值的特征 i 对盆地的适应性影响较大。 K_i 值即图 2 线性拟合函数的斜率。

根据上面的方法, 得到不同指标 i 的 K 值, 与指标权重对比, 如图 3 所示。

根据图 3 可以看出, K 值与权重的大小排序具有一定的相关性, 但是并不完全一致。影响盆地适宜性评价结果的特征从大到小排序是: 地热条件 = 陆地/近海区 > 地质特征 = 水文地质特征 > 沉积深

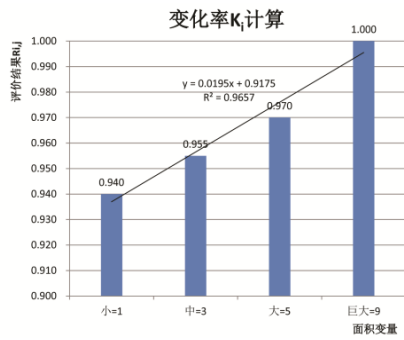


Figure 2. Calculation of total score change rate
图 2. 变化率 K_i 计算示意图

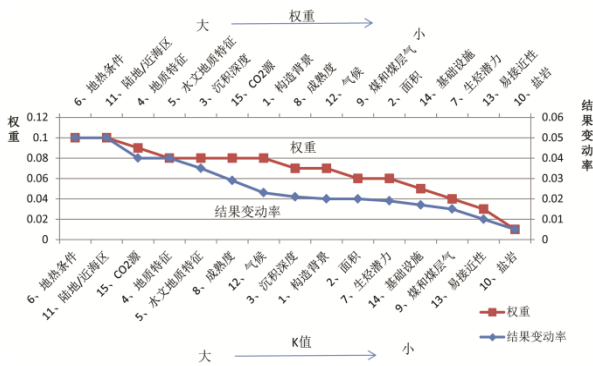


Figure 3. Comparison of total score change rates and related criteria weights
图 3. 变化率 K 值与指标权重对比图

度 > CO₂源 > 盆地成熟度 > 构造背景 = 气候条件 = 煤和煤层气埋深 > 盆地面积 > 基础设施规模 > 生烃潜力 > 场地可达性 > 盐岩发育情况。

由上可知，对一个盆地或区域地质储存适宜性影响最大的是地热条件与其所处的位置，陆地还是近海区。温度较低，则 CO₂ 浓度增大，相同的孔隙体积下，具有更大的存储容量，同时，较低的温度还减少了 CO₂ 的浮力，增加了存储的安全性。而对于盆地的位置，Bachu 则认为，与深海和浅海地区相比较，陆地地区具有较高的准入性，并且基础设施较为齐全，能够减少工程花费，所以，内陆地区的盆地是较好的选择。Bachu 赋予了地质特征、水文地质特征、盆地成熟度以及气候特征相同的权重，但是，对于盆地的适宜性评价，四者的影响程度是不尽相同的，地质特征与水文地质具有相同的地位和影响效应，而成熟度和气候特征的影响则较小。而对评价结果影响最小的是盆地的易接近性和岩盐的发育情况，这是由于二者的权重所决定的，Bachu 赋予了二者最小的权重，认为对于 CO₂ 地质封存来说，这两者并不是很重要的条件。

5. 基于 AHP 的模糊综合评价

基于 AHP(层次分析法)的模糊综合评价法，能够将定性问题转化为定量计算，是一种应用广泛的评价手段 [19,21,22]，也被应用在 CO₂ 地质封存的适宜性评价 [18,19]。因此，本文以模糊综合评价法对鄂尔多斯盆地的适宜性进行评价，进而验证 Bachu [8] (2003) 方法的有效性。

利用模糊综合评价法对场地的适宜性进行评价，是将场地划分为不同的等级，选取合适的指标，并设置不同等级对应的指标取值范围，然后通过对比矩阵获得各指标权重向量，并计算不同指标的率属函数，得到场址的评判向量，获得场址的评价结果 [22]。

以 Bachu(2003) 中的指标作为评价因素集 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$ ，Bachu(2003) 中最终的评价结果是介于 (0~1) 之间，因此，将 CO₂ 地质封存场址的适宜性评价集定义为 [0, 1] 上的连续区间，综合评判集确定为场址的质量等级集 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\} = \{\text{差}[0, 0.60]; \text{中}[0.60, 0.80]; \text{良}[0.8, 0.9]; \text{优}[0.9, 1.0]\}$ 。评价因素和质量等级之间的模糊关系用矩阵 R 来表示：

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \dots & r_{mn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中， $r_{ij} = u(u_i, v_j) (0 \leq r_{ij} \leq 1)$ ，表示因素 u_i 被评为 v_j 的可能性，即率属度 [21]。率属度矩阵通过式(5)计算得到：

$$r_{ij} = \begin{cases} 1 & 0 \leq x \leq a_1 \\ \frac{a_2 - x}{a_2 - a_1} & a_1 \leq x \leq a_2 \quad (j=1) \\ 0 & x \geq a_2 \end{cases}$$

$$r_{ij} = \begin{cases} 0 & x \leq a_{j-1} \text{ 或 } x \geq a_{j+1} \\ \frac{x - a_{j-1}}{a_j - a_{j-1}} & a_{j-1} \leq x \leq a_j \quad (1 < j < n) \\ \frac{a_{j+1} - x}{a_{j+1} - a_j} & a_j \leq x \leq a_{j+1} \end{cases} \quad (5)$$

$$r_{ij} = \begin{cases} 0 & x \leq a_{j-1} \\ \frac{x - a_{j-1}}{a_j - a_{j-1}} & a_{j-1} \leq x \leq a_j \quad (j=n) \\ 1 & x > a_j \end{cases}$$

式中： r_{ij} 为率属度； a_j 为分区标准； x 为实测值。由

实测值 x 代入式(5)即可得到率属度。分区标准和率属度如表 3 所示。

然后利用 1~9 标度法然后通过对比矩阵获得各指标权重向量 $A = (a_1, a_2, \dots, a_m)$, $a_1 + a_2 + \dots + a_m = 1$, 与率属函数 R 计算得到场址的评判向量 B , 获得场址的评价结果。即: $B = A \cdot R$, $B = (b_1, b_2, \dots, b_n) (0 \leq b_j \leq 1)$, $b_j = \sum_{i=1}^m a_i r_{ij} (M(\cdot, +))$, 根据最大率属度准则, $b_j = \max_{1 \leq j \leq n} \{b_j\}$, 所对应的分级即为场址等级。

将 Bachu(2003)中的指标划分为盆地特征、盆地资源和社会因素三个准则, 利用 1~9 标度法构建对比矩阵, 通过方根法简单地计算权重系数, 并通过一致性检验, 获得各指标权重如表 3 所示。

根据表 3 的权重 A 和率属度 R 矩阵, 计算得最后的综合评判集 $B = (0.045, 0.060, 0.475, 0.420)$, $b_j = \max_{1 \leq j \leq n} \{b_j\} = 0.475$, 即利用基于 AHP 的模糊综合评价法对鄂尔多斯盆地进行评价, 得出的结果是该盆地为良, 评价分数位于[0.8, 0.9]区间, 这与 Bachu(2003)

的评价结果相同, 证明了 Bachu(2003)的方法是有效可行的。

根据如上的计算, Bachu(2003)和基于 AHP 的模糊综合评价法, 在指标选取、范围划定以及权重确定上都具有一定的主观因素。在计算操作上, 前者只需简单的数值计算, 操作简单, 可以通过表格实现快速计算, 而后者需要掌握矩阵等较多的数值计算能力, 操作较为复杂。在计算结果的表现形式上, 前者不单单能够对单个盆地进行评价, 而且可以通过结果数值, 对多个评价对象进行排序和筛选, 后者比较适合于单个指标评价。

6. 结论

Bachu(2003)提出的盆地级选址评价方法是一种单级指标评价法, 指标涵括了盆地特征、盆地资源和社会经济三大类。该方法操作简单, 能够通过表格快速实现。利用该方法对鄂尔多斯盆地进行评价, 得到

Table 3. Criteria layers, weights, grades and memberships of AHP-fuzzy assessment method
表 3. 基于 AHP 的模糊综合评价法指标分层、权重、等级划分和率属度

目标层	准则层		指标层					率属度 [®]
	准则(权重)	指标	权重(A)	等级				
				差[0, 0.6)	中[0.6, 0.8)	良[0.8, 0.9)	优[0.9, 1.0]	
盆地特征 (0.52)	构造背景	0.08	海洋聚敛边界	聚敛型山间盆地、离散大陆架	大型离散前渊盆地	离散型克拉通		(0, 0, 0, 1)
	面积	0.03	小	中	大	巨大		(0, 0, 0, 1)
	沉积深度	0.05	浅(<1000 m)	中等(1000~2000 m)	较深(2000~3500 m)	深(>3500 m)		(0, 0, 0, 1)
	地质特征	0.09	大规模的断裂	中度的断裂和破碎	有限的断裂和破碎	几乎没有断裂和破碎		(0, 0.5, 0.5, 0)
	水文地质特征	0.08	浅、短流动系统	中等规模流动系统	较长距离规模流动	区域、长距离规模流动		(0, 0, 0, 1)
	CO ₂ 地质封存场址等级评价 A	陆地/近海区	0.12	深近海区	浅近海区	陆地	陆地	
气候		0.07	极地、亚极地	沙漠	热带	温带		(0, 0, 1, 0)
地热条件		0.14	热盆地	较暖的	温和的	冷盆地		(0, 0, 0.5, 0.5)
生烃潜力		0.06	较小	中等	大	巨大		(0.75, 0.25, 0, 0)
成熟度		0.09	未开发	开发	发展	成熟		(0, 0, 1, 0)
盆地资源 (0.34)	煤和煤层气	0.03	无	深(>800 m)	较浅(400~800 m)	浅(200~400 m)		(0, 0, 0, 1)
	盐岩	0.02	无	穹顶	成床	大量发育的盐床		(0, 0, 0, 1)
	易接近性	0.04	不能接近	难	合适	易		(0, 0, 1, 0)
社会经济 (0.14)	基础设施	0.04	无	较少	中等	大规模		(0, 0, 1, 0)
	CO ₂ 源	0.06	无	少	中等	多		(0, 0, 1, 0)

较好的分数，结果表明鄂尔多斯盆地是一个适宜的CO₂地质封存场地，对该方法的指标进行敏感性分析，地热条件、盆地位置、地质特征和水文地质特征对评价结果的影响最大。同时，利用基于层次分析法的模糊综合评价法对鄂尔多斯盆地进行评价，得出其场地等级为良，证明Bachu评价方法在鄂尔多斯盆地是有效的，其结果是合理的，两种方法相互证实了鄂尔多斯盆地作为CO₂地质封存场地的可行性。将两种方法进行对比，Bachu(2003)的方法操作简单、数学要求较低，容易实现，同时，能够对多个盆地或盆地的不同区域进行评价、排序和筛选。

基金项目

中国科学院百人计划资助项目；国土资源部公益性行业科研专项(201211063-4-1)；中国地质调查局地质调查项目二氧化碳地质封存示范工程(项目编号：1212011087128)，中澳二氧化碳地质封存国际合作项目(CAGS)。

参考文献 (References)

- [1] 孙枢 (2006) CO₂ 地下封存的地质学问题及其对减缓气候变化的意义. *中国基础科学*, **3**, 17-22.
- [2] IPCC (2008) Climate change 2007: Synthesis report. In: Core Writing Team, Pachauri, R.K. and Reisinger, A., Eds., *Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC, Geneva, 104.
- [3] CO2CRC (2008) Storage capacity estimation, site selection and characterisation for CO₂ storage projects. Cooperative Research Centre for Greenhouse Gas Technologies, Canberra.
- [4] Kovscek, A.R. (2002) Screening criteria for CO₂ storage in oil reservoirs. *Petroleum Science and Technology*, **20**, 841-866.
- [5] Ernest Orlando Lawrence Berkeley Laboratory (2004) GEO-SEQ best practices manual-geologic carbon dioxide sequestration: Site evaluation to implementation. Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley.
- [6] Chadwick, A., Arts, R., Bernstone, C., May, F., Thibeau, S. and Zweigel, P. (2008) Best practice for the storage of CO₂ in saline aquifers-observations and guidelines from the SACS and CO2STORE projects. *British Geological Survey*, Hawthornes, 267.
- [7] Grataloup, S., Bonijoly, D., Brosse, E., Dreux, R., Garcia, D., Hasanov, V., Lescanne, M., Renoux, P. and Thoraval, A. (2009) A site selection methodology for CO₂ underground storage in deep saline aquifers: Case of the Paris basin. *Energy Procedia*, **1**, 2929-2936.
- [8] 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.
- [9] Det Norske Veritas (2009) CO2QUALSTORE: Guideline for selection and qualification of sites and projects for geological storage of CO₂. Det Norske Veritas, Hovik.
- [10] Oldenburg, C.M. (2008) Screening and ranking framework for geologic CO₂ storage site selection on the basis of health, safety, and environmental risk. *Environmental Geology*, **54**, 1687-1694.
- [11] Li, Q., Liu, G., Liu, X. and Li, X. (2013) Application of a health, safety, and environmental screening and ranking framework to the Shenhua CCS project. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, **17**, 504-514.
- [12] National Energy Technology Laboratory (2010) Best practices for: Site screening, selection, and initial characterization for storage of CO₂ in deep geologic formations. National Energy Technology Laboratory, Morgantown.
- [13] World Resources Institute (2008) Guidelines for carbon dioxide capture, transport, and storage. WRI, Washington DC.
- [14] 郭建强, 张森琦, 刁玉杰, 等 (2011) 深部咸水层 CO₂ 地质封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.
- [15] 李小春, 刘延锋, 白冰, 等 (2006) 中国深部咸水含水层 CO₂ 储存优先区域选择. *岩石力学与工程学报*, **5**, 963-968.
- [16] 中国21世纪议程管理中心, 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 编著 (2012) 中国二氧化碳地质封存选址指南研究. 地质出版社, 北京, 282.
- [17] 范基姣, 贾小丰, 张森琦, 等 (2011) CO₂ 地质储存潜力与适宜性评价方法及初步评价. *水文地质工程地质*, **6**, 108-112.
- [18] 张晓普, 于开宁, 李文 (2012) 鄂尔多斯地区深部咸水层二氧化碳地质储存适宜性评价. *地质灾害与环境保护*, **1**, 73-77.
- [19] 杨国强, 苏小四, 杜尚海, 等 (2011) 松辽盆地 CO₂ 地质储存适宜性评价. *地球学报*, **5**, 570-580.
- [20] 李小舟, 马瑶, 李红中 (2009) 关于 CO₂ 地质封存场址选择的探讨. 2009 中国可持续发展论坛论文集, 北京.
- [21] 贾玉跃 (2010) 中国北方岩溶塌陷风险评价与岩溶水资源保护对策研究. 硕士论文, 青岛理工大学, 青岛.
- [22] 赵青 (2009) 基于 AHP-模糊综合评价法的露天矿生态环境质量评价. 硕士论文, 辽宁工程技术大学, 阜新.