

基于证据理论的碳存储选址研究

李 伟,张宏图

(东北电力大学 经济管理学院,吉林省 吉林市 132012)

摘 要:由于碳存储难度大、要求高,因此其存储地址的选择非常重要。目前缺乏明确存储选址标准,基于证据理论,着眼于碳存储地址的选择和比较,提出了碳存储选址的具体方法,并利用数据模拟了3个存储地址选择的过程,证明了该方法的可行性。

关键词:证据理论;碳捕集;碳利用;碳封存;碳存储;选址

DOI:10.6049/kjbydc.2013GC0123

中图分类号:F124.5

文献标识码:A

文章编号:1001-7348(2013)23-0100-04

0 引言

碳捕集、利用与封存(CCUS)技术是一项具有大规模 CO₂ 减排潜力的新兴技术,被世界各国认为是应对全球气候变化、控制温室气体排放的重要技术之一。我国“十二五”控制温室气体排放工作计划中明确把CCUS技术推广和普及作为一项重要任务。2013年,我国连续出台了《“十二五”国家碳捕集利用与封存科技发展专项计划》和《发改委关于推动碳捕集、利用和封存试验示范的通知》,明确提出将碳存储选址研究作为一项重点任务,加强 CO₂ 封存选址工作。

根据 CO₂CRC(The Cooperative Research Centre for Greenhouse Gas Technologies)数据,目前世界上正在运行的 CCS 项目仅 53 个,其中中小型项目占 64%。因此,可以说目前世界各国发展 CCS 技术普遍处于工程试验示范探索阶段。由于目前 CCS 技术不够完善,针对性的碳存储选址研究非常少。C. M. Gibso-Poole^[1]认为完整的地质结构、储存容量大小、储藏点物质是否与 CO₂ 发生化学反应、封存层良好等都是碳存储选址应该考虑的重点方面。Aarnes 等^[2]提出,合格的碳存储场地应该满足存储能力高、泄露风险小、环保要求合格、经济效益和社会效益大等四大要求。刁玉杰等^[3]从碳存储场地地质条件出发,指出地质条件应满足封盖层适宜、封盖场地地震安全、水文条件良好、地上空间条件良好等四大要求。以上学者的研究焦点是 CO₂ 如何存储、放在何处,研究不同地址之间有何不同,标准是什么,没有对碳存储的选址进行比较,且没有针对性

的评价标准。本文采用证据理论对不同碳存储地址进行比较研究,进而提出碳存储选址的科学依据。

证据理论在处理模糊性、不完备性和不确定性问题时具有良好效果,已经在物流中心选址^[4]、火电厂选址^[5]、机器故障诊断^[6]等方面成功应用。本文尝试在利用定量模型对碳存储选址相关费用进行计算的基础上,提出一种基于证据理论的碳存储选址方法。

1 证据理论简介

人们对问题的不确定看法可以分为随机性、模糊性和不确定性 3 种^[7]。证据理论就是认识不确定性问题的一种优秀方法。证据理论对于概率推断的理解既强调证据的客观性,也强调证据的主观性,因为证据是由人获取的,概率本身就是人构造的一种对命题真假的信任程度,即信度。因此,证据理论根据各种信息对系统各部分状态进行归纳与估计,作出正确预测和判断。

定义 1:有一不确定性问题,人们认识范围内可能认识到的所有可能的结果表示为集合 Θ ,所关心的每一个命题都是 Θ 的一个子集。 Θ 的范围依赖于人们的认知水平,称之为认知框架(Frame of Discernment)。

定义 2:称集函数 m 为认知框架 Θ 上的基本概率指派函数,若: $m: 2^\Theta \rightarrow [0, 1]$ 满足:

$$\begin{cases} \sum_{A \subseteq \Theta} m(A) = 1 \\ m(\Theta) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

称 A 为焦点元素(focal element),若 $\forall A \subseteq \Theta$ 有

收稿日期:2013-06-22

基金项目:东北电力大学软科学及人文社会科学专项资助计划项目(07);东北电力大学 2012 年度研究生创新基金项目(24)

作者简介:李伟(1968—),男,陕西凤翔人,博士,东北电力大学教授、硕士生导师,研究方向为碳排放约束经济评价及能源政策;张宏图(1987—),男,安徽砀山人,东北电力大学经济管理学院硕士研究生,研究方向为能源系统分析。

$m(A) > 0$ 。

证据理论中用信任函数(Belief Function, Bel)和似然函数(Plausibility Function, Pl)描述问题的不确定性。

定义 3:称 Bel 为 2^θ 上的信任函数,即:

$$Bel(A) = \sum_{B \subset A} m(B) \quad (2)$$

定义 4:称 Pl 为似然函数,即:

$$Pl(A) = \sum_{A \cap B \neq \phi} m(B) = 1 - Bel(A) \quad (3)$$

定义 5:Dempster 合成法则。Dempster 合成法则是反映证据联合作用的一个法则。利用 Dempster 合成法则可以得到不同证据联合作用下产生的新的信任函数。

Bel_1 、 Bel_2 是认知框架 θ 上两个独立的信任函数, m_1 、 m_2 分别是其对应的基本概率指派函数,焦元分别为 A_1 、 A_2 、 \dots 、 A_k 和 B_1 、 B_2 、 \dots 、 B_l 。通过 Dempster 合成法则,可综合求出新的基本概率指派:

$$m(A) = \begin{cases} \frac{\sum_{A_i \cap B_j = A} m_1(A_i) \cdot m_2(B_j)}{1 - \sum_{A_i \cap B_j = \phi} m_1(A_i) \cdot m_2(B_j)} & A \neq \phi \\ 0 & A = \phi \end{cases} \quad (4)$$

2 基于证据理论的碳存储选址方法

2.1 碳存储选址方案评价指标体系

完善的选址评价指标体系是保证选址科学性的重要基础。周锋德等^[8]应用耦合的煤层气数值模型,论证了基质收缩和膨胀对 CO_2 存储的影响。李波、李小春等^[9-12]学者通过介绍 CCS 技术的具体实施技术路线和发展现状,提出了影响 CO_2 存储地址的影响因素。孙亮、陈文颖^[13]对目前碳存储选址标准进行了筛选,介绍了选址的一般流程,讨论了目前国际公认的适宜进行碳存储的地址,给出了一些选址的重要指标。

根据现有学者研究状况及目前碳存储研究进展,本文认为碳存储选址方案评价指标体系应该包括以下几个方面:①经济性指标。不同选址的经济耗费不同,因此必须用定量模型对不同存储地点的经济支出进行定量计算;②政策机制指标。不同国家和地区针对碳存储的政策、方针、法律法规存在很大差异,激励和补贴机制各不相同,因此必须考虑选址点所在地区的政策机制环境;③人文风俗指标。主要指选址所在地周围居民的容纳度。由于碳存储目前不能被所在地民众普遍理解和接受,可能会遭到当地民众反对,如荷兰、德国等碳存储项目被迫叫停;④物质基础指标。主要指所在地的经济发展状况、交通和公共基础设施状况;⑤地质指标。是选址的最基本指标,选址点的地质构造特征、气象、水文和地形等都是地质指标的重要内容;⑥可持续发展指标。主要指不同选址造成的废物排放、污染程度、生态破坏状况不同。

2.2 选址备选方案评价指标描述

设碳存储备选方案构成集合 $A = \{a_1, a_2, \dots, a_z\}$, 决策者构成集合 $B = \{b_1, b_2, \dots, b_T\}$, 评价指标集为 $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_F\}$ 。用评价等级 $H_j = \{H_{1,j}, H_{2,j}, \dots, H_{N,j}\}$ 描述每个指标。其中决策者采用分布评价形式对各属性进行判断:

$$S(f_j(a_i)) = \{(H_{1,j}, \beta_{1,j}(a_i)), (H_{2,j}, \beta_{2,j}(a_i)), \dots, (H_{k,j}, \beta_{k,j}(a_i)), \dots, (H_{N,j}, \beta_{N,j}(a_i))\} \quad (5)$$

其中, $\beta_{k,j}(a_i)$ 表示 a_i 在属性 f_i 下被评定为等级 $H_{k,j}$ 的置信度。

在选址方案评价过程中,选址评价指标由定量和定性指标两部分构成。定量指标由定量模型计算或根据实际数据得出。在评价定量指标时,决策者可以对定量结果进行分段式分类,然后结合每个存储地点的实际情况给出评价等级。为了方便信息融合,把定量和定性指标等级统一成标准形式: $H = \{H_1, H_2, \dots, H_N\}$ 。因为定量指标与定性指标都有可能与标准的评价等级不等价,考虑到决策者以程度 $\gamma_{k,n} (\gamma_{k,n} \geq 0)$ 认为 $H_{n,j}$ 为 H_k , 可以将所有指标用以 H 为标准评价等级的分布评价来描述:

$$S(f(a_i)) = \{(H_1, \gamma_{1,j}(a_i)), (H_2, \gamma_{2,j}(a_i)), \dots, (H_k, \gamma_{k,j}(a_i)), \dots, (H_{N,j}, \gamma_{N,j}(a_i))\} \quad (6)$$

$$S(f(a_i)) = \{(H_k, \gamma_{k,j}(a_i)) \mid k = 1, 2, \dots, N; j = 1, 2, \dots, P\} \quad (7)$$

2.3 碳存储选址方法

2.3.1 构建认知框架

指标 Q 为推理证据,用评价等级建立认知框架 H , $H = \{H_1, H_2, \dots, H_N\}$ 。

2.3.2 构造基本概率分派函数

获取基本概率分派值是证据理论在实际应用中的一个关键问题。根据碳存储选址特点构造 $mass$ 函数,定义第 h 个决策者第 j 个证据的基本概率分派函数 m_j 为:

$$m_j(H_k) = \gamma_{k,j}(a_i), (i = 1, 2, \dots, P; k = 1, 2, \dots, N; h = 1, 2, \dots, W) \quad (8)$$

$$m_j(H) = 1 - \sum_{k=1}^N m_j(H_k), \text{表示剩下的不能进一步分配的置信度。}$$

2.3.3 信息融合

(1)单一指标信息融合。把 W 位专家(或决策者)对指标的判断作为证据,运用定义 5 的 Dempster 合成法则得到组合。

(2)对备选方案各项指标的信息融合。把评价指标作为证据,用定义 5 的 Dempster 合成法则得到组合。

2.3.4 碳存储方案确定

步骤一:单个选址方案自身评价等级的确定。对于单个选址方案,可以根据“2.3.3”中步骤二信息融合后各评价等级概率分配值的最大值决定该方案所述的

评价等级。

步骤二:对各方案进行排序。根据步骤一的结果进行有限排序,对处于相同等级方案的排序,可以根据该类方案所述等级及其以上等级的各证据概率分配值之和考察,值大者优先。

3 案例分析

为了实现节能减排目标,某国欲选择一处地址用来进行碳存储工作,考虑到运输、储存量等问题,拟定3处存贮地址 a_1 、 a_2 、 a_3 ,根据定量方法计算出每个方案需要的经济费用。由于证据理论的测算指标越多计算越复杂,本文选取3个指标;对于经济性指标、物质基础指标和地质指标而言,很容易通过量化标准衡量和判断,现选取政策机制指标 q_1 、人文风俗指标 q_2 、可持续发展指标 q_3 对这3个备选方案进行决策。其中政策机制指标 q_1 、人文风俗指标 q_2 和可持续发展指标 q_3 是定性属性,它们的评价等级均设为: {很好,好,一般,差,很差}。备选方案的标准评价等级为: $H = \{H_1,$

$H_2, \dots, H_5\} = \{\text{很好,好,一般,差,很差}\}$ 。决策者对备选方案各评价指标的判断如表1所示。

表1 备选方案评价指标判断信息

方案	决策者	政策机制指标 q_1	人文风俗指标 q_2	可持续发展指标 q_3
a_1	1	1.76 亿元(低, 0.8), 一般(0.2)	(好, 0.9)	(好, 0.8)
	2	1.76 亿元(低, 0.7), 一般(0.3)	(好, 0.8), (一般, 0.2)	(好, 0.9)
a_2	1	2.13 亿元(高, 0.7), 一般(0.1)	(好, 0.6), (一般, 0.2)	(很好, 0.9)
	2	2.13 亿元(高, 0.7), 一般(0.1)	(好, 0.5), (一般, 0.5)	(很好, 0.6), (一般, 0.2)
a_3	1	1.84 亿元(高, 0.4), 一般(0.5)	(很好, 0.6), (一般, 0.2)	(很好, 0.7), (一般, 0.3)
	2	1.84 亿元(高, 0.5), 一般(0.5)	(很好, 0.6), (一般, 0.2)	(很好, 0.6), (一般, 0.2)

3.1 各证据基本概率分配值

定量的费用指标评价等级表述与认知框架等价。根据“2.3.2”的讨论结果,得到各证据的基本概率分派值,如表2所示。

表2 各证据基本概率分派值

决策者	评价等级	政策机制指标 q_1			人文风俗指标 q_2			可持续发展指标 q_3		
		a_1	a_2	a_3	a_1	a_2	a_3	a_1	a_2	a_3
1	$m(H_1)^1$	0	0	0	0	0	0.50	0	0.80	0.60
	$m(H_2)^1$	0.70	0.30	0.4	0.90	0.60	0.30	0.80	0	0.30
	$m(H_3)^1$	0.20	0.50	0.60	0	0.30	0	0	0	0
	$m(H_4)^1$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	$m(H_5)^1$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	$m(H_\theta)^1$	0	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.20	0.20	0
	$m(H_1)^2$	0	0	0	0	0	0.30	0	0.60	0.70
	$m(H_2)^2$	0.70	0.10	0.50	0.70	0.50	0.60	0.90	0.20	0.20
	$m(H_3)^2$	0.20	0.60	0.50	0	0.30	0	0	0	0
	$m(H_4)^2$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	$m(H_5)^2$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	$m(H_\theta)^2$	0.10	0.20	0	0	0	0.10	0.10	0.10	0.10

3.2 证据信息融合

根据“2.3.3”步骤一确定决策者对单一指标判断

的信息融合结果,如表3所示,根据步骤二确定备选方案各项评价指标信息融合结果如表4所示。

表3 单一指标判断的信息融合结果

评价等级	政策机制指标 q_1			人文风俗指标 q_2			可持续发展指标 q_3		
	a_1	a_2	a_3	a_1	a_2	a_3	a_1	a_2	a_3
$m(H_1)$	0	0	0	0	0	0.367	0	0.974	0.862
$m(H_2)$	0.954	0.112	0.326	0.957	0.734	0.367	0.892	0.008	0.187
$m(H_3)$	0.035	0.876	0.673	0.028	0.254	0	0	0	0
$m(H_4)$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$m(H_5)$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$m(\theta)$	0.017	0.021	0.043	0.020	0.017	0.062	0.009	0.008	0.064

3.3 最终选址方案确定

根据上文的分析结果,选址方案的优先排序为: $a_3 > a_1 > a_2$,因而确定最终的碳存储方案为 a_3 。

4 结语

本文针对碳捕集、利用与封存(CCUS)中的碳存储选址问题进行了研究,提出了利用证据理论进行选址决策的方法。在目前的经济技术发展状况下,碳存储

的很多技术仍需有重大突破才能完成其重要使命。因此,在人们对碳存储选址的认识还很不完善的情况下,证据理论由于其对认识不确定性造成的模糊问题的有效解决,使得对碳存储选址的研究成为可能。文章对证据信息进行了两次融合,从表2和表3中可以看到,融合的结果放大了决策者们持相同意见的概率分派值,缩小了不同意见之间的差距,使得融合后的判断更为合理;文章还对各备选方案在单一指标数据融合的

基础上,对单个评价指标进行信息融合以获得对评价等级的判断。通过模拟计算,表明证据理论的方法合理有效。当然,由于目前缺失有关碳存储的实际数据,不能真正就选址问题进行实地测算,但随着科学技术的进步,相信可以更加科学地选择碳存储地址,更好地为实现节能减排目标作出贡献。

表 4 各项评价指标信息融合结果

评价等级	a_1	a_2	a_3
$m(H_1)$	0	0.287	0.708
$m(H_2)$	0.993	0.279	0.169
$m(H_3)$	0.008 3	0.428	0.309
$m(H_4)$	0	0	0
$m(H_5)$	0	0	0
$m(\theta)$	0.000 3	0.014	0.021

参考文献:

- [1] PHILIP S RINGROSE, DAVID M ROBERTS, CATHERINE M, et al. Characterisation of the krechba CO₂ storage site: critical elements controlling injection performance[J]. Energy Procedia, 2011, 4(0):4672-4679.
- [2] JØRG E. AARNES, STÅLE SELMER-OLSEN, MICHAEL E. CARPENTER, et al. Towards guidelines for selection, characterization and qualification of sites and projects for geological storage of CO₂[J]. Energy Procedia, 2009, 1(1):

- 1735-1742.
- [3] 刁玉杰,张森琦,郭建强,等.深部咸水层 CO₂ 地质储存地质安全性评价方法研究[J].中国地质,2011(3):786-792.
- [4] 周爱莲,肖志华.基于证据理论的物流中心选址方法研究[J].公路与汽运,2007(3):44-47.
- [5] 倪明,单渊达.证据理论在火电厂选址中的应用[J].电力系统自动化,1996(8):18-21,57.
- [6] 倪国强,梁好臣.基于 Dempster-Shafer 证据理论的数据融合技术研究[J].北京理工大学学报,2001(5):603-609.
- [7] 倪明,单渊达.证据理论及其应用[J].电力系统自动化,1996(3):76-80.
- [8] 周锋德,姚光庆,唐仲华.煤基质收缩和膨胀对甲烷开采和二氧化碳存储的影响[J].天然气地球科学,2010(1):150-156.
- [9] 李波.应对气候变化的有效途径:二氧化碳捕集与封存[J].中国人口·资源与环境,2011(1):517-520.
- [10] 李小春,方志明,魏宁,等.我国 CO₂ 捕集与封存的技术路线探讨[J].岩土力学,2009(9):2674-2678,2696.
- [11] 王景云,郭茹,杨海真.碳捕捉与封存研究进展浅析[J].环境科学与技术,2012(2):156-160.
- [12] 张卫东,张栋,田克忠.碳捕捉与封存技术的现状与未来[J].中外能源,2009(11):7-14.
- [13] 孙亮,陈文颖. CO₂ 地质封存选址标准研究[J].生态经济,2012(7):33-38,46.

(责任编辑:张益坚)

A Study on Carbon Storage Siting Based on Evidence Theory

Li Wei, Zhang Hongtu

(School of Economics and Management, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China)

Abstract: Carbon capture, utilization and storage (CCUS) technology is generally considered by the world to be the technology using which carbon dioxide emission reduction targets can be effectively implemented. China is also actively promoting CCUS pilot demonstration projects. As the carbon storage is difficult and demanding, so the choice of storage address is very important. As to the lack of clear selection criteria for storage address, this paper proposes the specific method of carbon storage address selection, simulates the process of three storage address selection using data, and proves the feasibility of methods based on evidence theory and focusing on carbon storage address selection and comparison.

Key Words: Evidence Theory; Carbon Capture; Carbon Utilization; Carbon Storage; Carbon Storage; Siting