

中国CO₂地质埋存条件分析及有关建议

张洪涛¹, 文冬光¹, 李义连², 张家强³, 卢进才⁴

ZHANG Hongtao¹, WEN Dongguang¹,

LI Yilian², ZHANG Jiaqiang³, LU Jincai⁴

1. 中国地质调查局, 北京 100011;

2. 中国地质大学, 湖北 武汉 430074;

3. 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037;

4. 中国地质调查局西安地质矿产研究所, 陕西 西安 710054

1. China Geological Survey, Beijing 100011, China;

2. China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China;

3. Development and Research Center, China Geological Survey, Beijing 100037, China;

4. Xi'an Institute of Geology and Mineral Resources, China Geological Survey, Xi'an 710054, Shaanxi, China

摘要:化石燃料燃烧产生的温室气体导致全球气候变暖是人类共同面临的重大环境问题。本文提出减排大气CO₂含量最为现实和有效的对策是采取CO₂地质埋存技术。在总结国际CO₂地质埋存研究成果的基础上,全面分析了中国适宜CO₂埋存的地质条件和潜在的埋存区域。初步估算,中国CO₂地下贮存总容量约为14548×10⁸t。建议近期加强中国CO₂埋存地质条件调查和相关重大科技问题的研究。

关键词:温室气体;CO₂减排;CO₂地质埋存;沉积盆地

中图分类号:P5 文献标识码:A 文章编号:1671-2552(2005)12-1107-04

Zhang H T, Wen D G, Li Y L, Zhang J Q, Lu J C. Conditions for CO₂ geological sequestration in China and some suggestions. *Geological Bulletin of China*, 2005, 24(12):1107-1110

Abstract: Global climatic warming resulting from greenhouse gases emitted during fossil fuel burning is a serious environmental issue that mankind is facing. The most effective and real countermeasure for CO₂ mitigation is CO₂ geological sequestration. Based on the international research results of CO₂ geological sequestration, the proper geological conditions and potential regions of CO₂ sequestration in China are analyzed. It is preliminarily estimated that the total CO₂ geological sequestration capacity is about 1454.8 billion tons in China. It is suggested that investigations of geological conditions for CO₂ sequestration and research on related major scientific and technological problems should be strengthened in the near term.

Key words: greenhouse gases; CO₂ mitigation; CO₂ geological sequestration; sedimentary basin

人类在生产和生活中,大量使用煤、石油、天然气等化石燃料,造成大气中CO₂含量显著增高,导致全球气候变暖,对人类的生存安全和社会经济的可持续发展构成严重威胁,如何减少向大气排放CO₂已成为人类共同面临的重大问题。为保护全球气候环境,第43届联合国大会于1988年12月通过了《为人类当代和后代保护全球气候》的43/53号决议,1992

年5月9日在纽约联合国总部通过了《联合国气候变化框架公约》,1997年12月,第3次缔约方大会在日本京都举行,通过了《京都议定书》,明确了发达国家量化的温室气体减排“指标”。中国政府已于2002年8月正式核准了《京都议定书》。

为了积极推进减排大气CO₂行动,美国、加拿大和欧洲国家等近10年来针对CO₂地质埋存技术开展了相关研究和工程

收稿日期:2005-11-04

作者简介:张洪涛(1949-),男,博士,研究员,副局长,从事区域地质、矿床学、矿床地球化学、海洋学、经济地质等研究与管理。

通讯作者:文冬光(1964-),男,博士,研究员,从事水文地质环境地质调查研究与管理。E-mail:wdongguang@cgs.gov.cn

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

实践^[1-6],显示出良好的前景。2005年8月22—23日,清华大学、浙江大学和斯坦福大学在北京联合举办了清洁煤技术国际研讨会,与会代表就“CO₂减排、富集、利用与埋存”为主题(GCEP International Workshop on Clean Coal Technology Development—CO₂ Mitigation, Capture, Utilization and Sequestration)进行了广泛交流。

当前中国的能源消费结构中煤炭的比重达到68%,远远高于世界26.5%的平均水平,更高于发达国家21.3%的平均水平。排入大气中的CO₂的85%来自煤炭。2002年中国的CO₂排放量为33.07×10⁸t,与1990年相比增长了44.5%。中国正在积极探索CO₂减排排放措施,一是利用好CO₂资源,开发CO₂应用于冶金、化工、建材、轻工、电子、医药、机械等行业的实用技术;二是改善能源结构,开发低碳或无碳能源,满足能源需求而不增加碳排放,主要包括利用水能、风能、氢气、天然气、煤层气、太阳能、地热、核能等;三是利用陆地生态系统吸收CO₂,增加碳汇;四是试验利用海洋埋存CO₂;五是加紧开发向地下注入CO₂的“碳封存”技术,利用地下空间埋存CO₂。当前最为现实的对策是加快开发、利用CO₂地质埋存技术。

1 CO₂地质埋存技术要点

CO₂地质埋存技术可以分为三大类:海洋埋存、地质埋存和植被埋存。其中地质埋存技术相对比较成熟。

地质埋存(地下埋存)就是将CO₂存放在地下地层中的自然孔隙中,是目前最经济、最可靠的实用技术。地质埋存具有以下优势:①油气田开发中已经积累了CO₂埋存的专业技术经验;②CO₂强化采油和强化煤层气开采方面,已经通过试验获得经济效益;③天然CO₂气藏的赋存状态证明,有利的地质构造能够长时间埋存CO₂。

CO₂地质埋存的场所包括油藏储层和废弃的油气层、煤层(包括煤层气和未开采的煤层)、大的空洞、开采过的大洞穴、盐丘、深部含水层等。

CO₂地质埋存是一项具有广泛运用前途的应用技术。有学者对世界范围内CO₂的地下贮存容量进行了估算^[4],全球可用于贮存CO₂的陆地沉积盆地面积约7000×10⁴km²;假定平均可用厚度为200 m,平均含水层孔隙度为10%,其可容纳的CO₂达56000 Gt(1 Gt=10⁹t);若以20%平均孔隙度计算,全球陆地深部含水层容纳CO₂可达100000~200000 Gt,由此可存放人类几百年至几千年的CO₂的排放量。因此,地下深部埋存CO₂将可能是人类削减温室气体排放的一条有效而又科学的途径。

CO₂地下贮存技术的基本思路是:把从集中排放源(发电厂、钢铁厂等)分离得到的CO₂注入到地下深处具有适当封闭条件的地层中隔离起来。主要包括如下几个环节:首先对大规模集中排放源(发电厂、钢铁厂等)的废气进行分离、压缩得到液体CO₂,再通过输送管道送到隔离场地,最后调整压力,注入地下深处。

1.1 利用沉积盆地深部咸水层贮存CO₂

深部咸水层埋存CO₂有3种机制。一是“液体埋埋”,即把

CO₂以气体或者超临界流体的形态存储在低渗透性的岩石盖层下,把CO₂装进类似“密封罐”的地下空间;二是“溶解埋埋”,即把CO₂直接溶解在地下水中,由于溶解了CO₂的地下水呈弱酸性,这种方式可能增加地下水的酸度和母岩中矿物质的溶解度;三是“矿物埋埋”,使地层中的CO₂直接或者间接与地层中的矿物发生化学反应而生成次生碳酸盐矿物,并产生矿物沉淀。这种方式由于将CO₂变成固体物质,能够很长时间地固化CO₂,因此具有很好的发展前景。

CO₂埋存方式应具备一定的地质、温压条件。在深度上,为了防止CO₂在埋埋过程中转化为气态,需要在超临界压力下将CO₂注入地层,只有达到地表以下800 m深处CO₂的临界点(31℃和7.4 MPa),才能保持其稳定性和安全性,因此CO₂的地层深度至少应在地下1000 m以上,理想的深度应该在1200~1500 m之间。二是埋存CO₂的地层需要有足够的孔隙度,渗透性较好。三是咸水岩层必须与饮用水源隔离,并覆盖有页岩或其他形态的低渗透性岩石盖层,以避免CO₂泄漏。四是埋存CO₂的岩层具有较好的稳定性,不能有明显会导致流体流动泄漏的古断层或活动断层。

1.2 利用油气田贮存CO₂

采用油气田封存CO₂的情况有2种:一是利用废弃油气田贮存CO₂,其原理是采用“酸气”封存技术。这种方法早在许多年前已有应用,目的是为了处理油气开采和提炼过程中的“酸气”,即一种CO₂、H₂S和其他副产品的混合物,其中CO₂占总量的90%。将CO₂直接注入废弃油气田的原始储油(气)层中,能够可靠地封存CO₂。另一种是采用CO₂-EOR技术(EOR为Enhance Oil Recovery的缩写,即“提高石油回采率”),把超临界状态的CO₂直接注入已开采过的储油层中,在高压条件下,CO₂推动原油向生产井流动,从而提高石油的采出率。其中部分CO₂溶解于未能被开采的原油中或贮存于地层孔隙中;部分CO₂随原油、水和天然气从生产井排出,这部分CO₂可以通过分离和压缩由注气井循环注入储油层。这一技术目前比较成熟,一些老油田、气田附近的发电厂、化肥厂等产生大量CO₂的企业,如大庆油田、胜利油田、大港油田、中原油田等,考虑收集CO₂气体,液化后输送到废弃的油井、气井中,把CO₂埋藏到地下地层里,同时可增加油田采油井、采气井的产量。

在附近没有老油气田、煤田,但地下存在含咸水地层的地区,如长江三角洲及两翼地区、珠江三角洲地区的石油化工基地、钢铁生产基地,可以考虑回收CO₂气体,液化后通过井管将CO₂输送到地下具有良好区域盖层(致密泥岩、页岩、膏盐岩等)的含咸水地层中埋藏起来。但这首先需要地质调查,搞清地下地层类型及结构、构造。

1.3 利用弃采煤层贮存CO₂

在煤系地层中普遍存在着因技术原因或经济原因而弃采的煤层,例如不可采薄煤层、埋藏超过终采线的深部煤层、构造破坏严重的煤层等,是埋存CO₂的另一种潜在的适宜的地质构造。当CO₂注入这样的煤层后,类似于利用活性碳过滤

空气和水中杂质的过程,它们在煤层的孔隙中扩散,并最终被媒体所吸附。由于媒体表面对CO₂的吸附能力是对甲烷吸附能力的2倍左右,当CO₂被注入煤层时,在封存CO₂的同时可有效地替换甲烷,使吸附状态的甲烷转变成游离状态,可以大大增加煤层气的产出率,提高煤气层的产量。在煤田坑口发电厂或煤田附近的发电厂、炼焦厂等产生大量CO₂的企业,如山西、陕西、黑龙江、辽宁、河南、山东等省的大型煤炭基地,也可以考虑收集CO₂气体,通过井管把CO₂注入不开采的煤层中,或注入到不开采煤但开采煤层气的煤层中,同时可增加煤层气的产量。

2 中国CO₂地质埋存条件

受新构造运动的影响,中国主要大型盆地沉积了多层组合的沉积体系,其层数往往是十几层,甚至几十层。层与层之间的相对隔水层或弱透水层构成相对较好的密封条件,如松辽盆地、渤海湾盆地、鄂尔多斯盆地、四川盆地、准噶尔盆地、塔里木盆地等,以及近海海域的主要沉积盆地如渤海盆地、北黄海盆地、南黄海盆地、东海盆地、冲绳海槽盆地、台西盆地、台西南盆地、台东盆地、珠江口盆地、北部湾盆地、莺歌海—琼东南盆地、南海南部诸盆地等。

中国陆上的大型含油气盆地中大都进行过CO₂驱油(地下埋存)试验,可以作为CO₂地下埋存的目标区。这些含油气盆地地质认识程度较高,其中的陆地深部咸水层、油气田、不可采煤田等,均为CO₂地质埋存条件较好的地下空间。

2.1 深部咸水层CO₂地质埋存

(1) 东部平原

新生代以来,中国东部诸盆地区以沉降为主,堆积了厚层、巨厚层的陆相、海陆交互相的松散沉积物。适宜CO₂地质埋存的深部咸水层应埋深大于800 m、空隙发育较好、盖层连续完整且封闭良好。

松辽平原:松辽平原受新生代以来沉降的影响,堆积了巨厚层的新生代松散沉积物。沉积物从山前至盆地中心往往由单一成因变为多成因,沉积物颗粒由粗变细,地下水化学组成基本呈带状分布。盆地中部地下水年龄较老,泰康组地下水年龄为10000~18000 a,大安组地下水年龄为15000~24000 a。盆地中部循环较慢,地下水的年龄较老,适宜CO₂地质埋存。

黄淮海平原:黄淮海平原地处华北地区的东部,总面积逾28×10⁴ km²。新生代以来,围绕渤海湾堆积了厚达1000~3500 m的松散沉积物,中东部平原由冲积、湖积组成,滨海平原主要为海积、湖积及冲积叠积,含水层组多由单层变为多层。深层地下水最大年龄超过30000 a。这些地区的深部咸水层可以作为今后CO₂地质埋藏的备选场所。

(2) 长江三角洲

长江三角洲地处构造沉降区,由长江挟带的大量泥沙在本区沉积而成,面积4.2×10⁴ km²。新生代以来,长江三角洲地区海陆环境频繁交替,沉积类型复杂,大体归纳为三大成因

系列、9种类型,即陆相堆积系列、海陆过渡相沉积系列和海相沉积系列。具有沉积序列的多旋回变化和沉积物的特有利状,第四系由11个厚度比较均匀的韵律组成,深层承压水表现为从三角洲顶部至滨海矿化度逐渐升高,年龄大于20000 a,是进行CO₂埋存场所选区的重要地带。

(3) 西北内陆盆地

西北内陆盆地,受新生代以来沉降作用的影响,广泛堆积了新生代沉积物。不同盆地沉积物是多源的,组合结构也是复杂的,厚度往往在千米以上,有时厚度超过2000 m。例如,准噶尔盆地和塔里木盆地均为1000~2000 m或更大,在柴达木盆地大于2000 m,在河西走廊的几个大型盆地中厚度也高达1000 m以上。盆地中心地带具有多层结构的承压水分布区是选择埋存的重要地区。

(4) 四川盆地

四川盆地为中生代发展起来的沉降盆地,定型于白垩纪末的四川运动。成都平原中下更新统为第一间冰期堆积,岩性为含泥砂砾石层,据物探资料圈定的深层承压水分布面积约为3770 km²。

据初步统计,中国可用于CO₂埋存的深部咸水层面积为34×10⁴ km²。

2.2 油气田CO₂地质埋存

中国各大型沉积盆地主要油田的开采区是进行CO₂埋存的良好地带,特别是老油气田开采区或废弃开采井田等是选择CO₂埋存的重点地带,主要有大庆、胜利、辽河、克拉玛依、四川、华北、大港、中原、吉林、河南、长庆、江汉等46个油田。目前需要重点调查油气田采空区的范围、深度、压力和油气开采的驱油、驱气模式等,一方面研究减少直接向大气排放CO₂的量,同时还可替代水等其他流体驱动油气,提高油气产量,产生显著的经济效益。鄂尔多斯盆地是近几年发展建设最快的能源基地之一,环鄂尔多斯地区排放的CO₂应与鄂尔多斯盆地油气开发紧密结合。由于鄂尔多斯盆地为典型的低渗透油藏,油田采收率相对较低,可以通过推广CO₂驱油,提高油田采收率。同时,鄂尔多斯也是一个大型的含煤盆地,石炭系—二叠系和侏罗系具有丰富的煤层气资源,尤其是侏罗系煤层分布范围广,埋藏深度适合CO₂埋存要求,具有巨大的CO₂埋存潜力。可优先在鄂尔多斯盆地进行CO₂强化煤层气开发试验,探索一条适合中国煤层气开发的新路。东北地区是中国CO₂地下埋存潜力最大的地区之一,大庆、吉林等油田在CO₂驱油方面取得过许多成功的经验。辽河油田是典型的稠油油田,开发难度大,辽宁是CO₂排放的大省,利用CO₂驱油能降低原油的黏度,提高辽河油田的采收率。

华南地区陆域主要为一些小断陷盆地,总体地质认识程度较低,目前没有发现具有CO₂埋存潜力的油气藏或煤层。因此,华南地区应选择南海东部油田为CO₂埋存基地,或论证CO₂捕集量以后,规划管道输送到渤海湾盆地的胜利、大港、华北(任丘)等油田。

华中—西南地区的CO₂埋存应以四川盆地为主要基地,

四川盆地不仅是一个大型的含油气盆地,而且也是重要的含盐盆地。除四川盆地的油藏以外,溶解后的盐矿也可以作为CO₂埋存的地质体。自贡地区是中国(乃至全球)开发地下盐矿最早的地区,也可作为CO₂地下埋存的基地之一。此外,江汉盆地(湖北)的江汉油田、潜江盐田和贵州的煤层也具有一定的CO₂埋存能力。

2.3 不可开采煤层CO₂地质埋存

中国煤层分布广泛,其中不可开采煤层占有相当比例,是进行CO₂埋存的良好地带,埋存潜力巨大。围绕山西、陕西、内蒙古等主要煤层分布区,开展深部煤层CO₂埋存空间调查,主要调查煤层地质构造、埋藏深度、孔隙度、渗透性和盖层厚度、密闭性等。

2.4 CO₂地下贮存容量估算

利用圈闭体积法、溶解度法和埋存容量法^[5,6]初步估算,中国CO₂地下贮存总容量为14548×10⁸t。其中,24个主要沉积盆地深部咸水层可埋存CO₂约14350×10⁸t,46个含油气盆地可埋存CO₂约78×10⁸t,68个主要煤层区可埋存CO₂约120×10⁸t。按2002年中国CO₂总排放量为33×10⁸~40×10⁸t的1/3估算,地下空间容量可供中国CO₂地质埋存使用1000年以上。

3 建议

CO₂地质埋存技术研究在中国还十分薄弱,公开发表的文献资料^[7]也很少,离CO₂地质埋存工程的实施还有很大距离。因此,建议尽快开展CO₂地质埋存条件调查和相关重要科技问题的研究。

(1)开展CO₂地质埋存条件调查:尽管中国在区域上有许多适宜CO₂地质埋存的大型沉降盆地和平原,但是还需要通过大量的地质调查工作,筛选出一批适宜CO₂地质埋存的场址,在此基础上进行场址评价和工程前期研究。

(2)开展CO₂地质埋存有关重要科学技术问题的研究:与

CO₂地质埋存相关的科学问题很多,当前可集中解决一些急需攻关、短时间有效的科学技术问题,如CO₂地质埋存的机理研究、不同地质条件的建模试验、多相体系CO₂-H₂O-岩石相互作用模拟、CO₂在地下空间的运动规律研究、CO₂地质埋存的安全性和可靠性研究、CO₂地质埋存工程技术研究及示范等。除埋存基地选择以外,还应对以下的技术问题开展攻关,如探索以较低成本捕集高纯度CO₂气体的工艺;研究CO₂储存状态、稳定性及其与地下流体、围岩的反应和对地下环境的影响;开发地球物理、地球化学、遥感勘测及监测技术,等等。

参考文献:

[1]Natural analogues for the geological storage of CO₂[R]. European Commission, 2005.
[2]The GEO-SEQ project results [R]. Lawrence Berkeley National Laboratory etc. USA, 2004.
[3]Carbon management—assessment of fundamental research needs[R]. Office of Energy Research, Department of Energy, USA, 1997.
[4]Bruant R G, Guswa A J, Celia M A, et al. Sate storage of CO₂ deep aquifer[J]. Environment Science and Technology,2002, 36(11):240A-245A.
[5]Hendriks C, Graus W, van Bergen F. Global carbon dioxide storage potential and costs[R]. 2004.
[6]Reeves S R. Assessment of CO₂ sequestration and ECBM potential of USA coal beds[R]. Houston:Advanced Recourses International,2003.
[7]Wen Dongguang, Zeng Jianhua. Possibility of geological disposal of CO₂: results from geochemical modeling[A]. In: Richard B, Wanty eds. 4th International Symposium on Environmental Geochemistry Program with Abstract, USGS Open File Report 97-496[C]. 1997. 97.