

CO₂地质封存技术及中国南方近海 CO₂封存的前景

秦长文,肖 钢,王建丰,柳迎红

(中海油研究总院,北京 100027)

摘 要:我国大多南方沿海经济发达地区的 CO₂减排压力大。CCS 是继续利用化石能源的同时实现 CO₂近零排放的惟一有效技术,CO₂地质封存是其关键环节。我国南方近海发育一些大型盆地,沉积地层厚度大,储盖层组合好,圈闭非常发育,具有 CO₂封存的有利地质条件。海域封存具有不需征地、安全性高、环境影响小等优点,具有广阔的发展前景。而大多南方沿海省份陆上缺乏大型沉积盆地,在近海封存是惟一的选择。因此,应该在我国南方近海建设 CO₂封存示范工程。

关键词:CCS;示范工程;CO₂地质封存;中国南方近海;大型盆地

中图分类号:TE3

文献标识码:A

根据国际能源署(IEA)的预测,2030 年以前世界一次能源需求的 80%将来自化石能源,以化石能源为主的状态很可能延续到 2050 年。而据国际政府间气候变化委员会(IPCC)的预测,到 21 世纪末化石能源仍约占 50%。为了实现将全球平均升温控制在 2℃以内(大气 CO₂浓度<450×10⁻⁶)的目标,全球需减排 CO₂总计 480 亿 t^[1]。

在 2009 年,我国向世界承诺到 2020 年单位国内生产总值的二氧化碳排放比 2005 年下降 40%~45%。实现这个低碳目标有 4 个主要措施:①节能增效;②发展可再生能源和核能;③增加森林植被碳汇;④化石能源的清洁(低碳)利用。由于自然和资源条件及技术经济因素,前 3 个措施能实现的减排量不是无限度的。在相当长时期内仍以化石能源为主的情况下,化石能源的清洁(低碳)利用对于我国实现减排目标是不可缺少的,其关键技术就是 CCS。

1 CCS 技术及其关键环节

CCS(Carbon Dioxide Capture and Storage)是指 CO₂捕集与封存,即将工业集中排放的二氧化碳捕集起来并封存到地下深处的岩层之中。近年来有些人提出 CCUS,即增加 U(Utilization,利用),以强调对所捕集的 CO₂进行开发利用的重要性。CCS 是为了降低大气温室气体浓度、应对全球气候变化而开发的一项新技术,其独特意义是在继续利用化石能源的同时实现 CO₂近零排放的惟一有效技术。

CCS 包含捕集、运输、封存 3 个环节,其中“封存”指将所捕集的 CO₂注入地下深部含咸水的岩层中、油气田中或煤层中(图 1),进行长期(>1 000 a)封存,是 CCS 技术的关键环节。

将 CO₂封存与提高原油、天然气或煤层气采收率结合起来分别称为 CO₂-EOR、CO₂-EGR 和 CO₂-ECBM,可产生经济效益。但是,这些方式的总封存容量有限,而且不是所有的油气田或煤田都适用。

收稿日期:2012-05-04

作者简介:秦长文(1968—),男,博士,高级工程师,主要从事新能源与碳减排研究工作。E-mail:chwqin@126.com

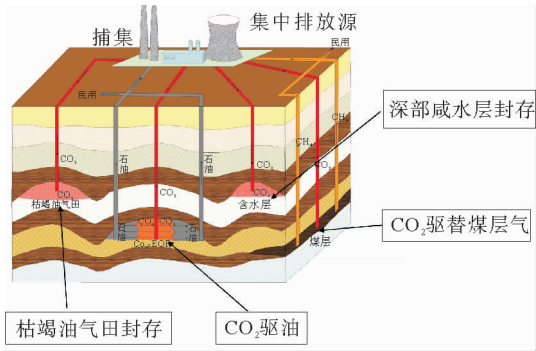


图 1 CO₂ 地质封存方式

Fig.1 Options for carbon dioxide storage

深部咸水层是深部(>800 m)含咸水(不能当淡水使用的水)的岩层,当上覆不渗透的页岩盖层时,就可用于 CO₂ 的长期封存。这种类型的封存容量极大,完全可满足全球实现 CO₂ 封存的需 要,是最具发展前途的 CO₂ 封存方式。

表 1 世界较大规模 CCS 示范工程						
Table 1 Some large-scale CCS demonstration projects around the world						
名称	地点	封存类型	CO ₂ 来源	投产日期	CO ₂ 注入量(100 万 t/a)	作业者
Sleipner	挪威,北海	咸水层	含 CO ₂ 气田	1996	1	Statoil
Weyburn	美国—加拿大	CO ₂ -EOR	煤气化厂	2000	0.8	EnCana
In Salah	阿尔及利亚	CO ₂ -EOR	含 CO ₂ 气田	2004	1.2	BP
Snohvit	挪威,巴伦支海	咸水层	含 CO ₂ 气田	2008	0.7	Statoil
Gorgon	澳大利亚西北陆架	咸水层	含 CO ₂ 气田	2014	4	Chevron

的砂岩层中,这就催生了世界上首个以降低大气 CO₂ 浓度为目的 CO₂ 封存工程。自 1996 年投产以来,每年封存量约 100 万 t CO₂,注入每吨 CO₂ 的成本为 17 USD^[3,4]。

Weyburn 美国达科达州的煤气化厂所分离出的 CO₂ 通过管道输到 325 km 外的加拿大,注入 Weyburn 油田 20~27 m 厚的碳酸盐裂隙型油层中,以提高采收率。从 2000 年起预计注入 20~25 a,目前 CO₂—EOR 产油增量约 1 600 m³/d,预计总共可封存约 2000 万 t CO₂。

In Salah 阿尔及利亚 Krechba 气田的 CO₂—EGR 工程,位于撒哈拉沙漠腹地。气藏中含 CO₂ 约 5%~10%,分离出的 CO₂ 由 3 个水平井注入厚约 20 m 的低渗储层中,天然气由 4 口井采出。

2 国内外 CCS 示范工程简介

国际上所谈的 CCS 示范工程一般指那些最终将 CO₂ 封存到地下的工程,不包括那些仅实现了 CO₂ 捕集而没有实现封存的工程。

2.1 国外 CCS 示范工程

目前发达国家已进入大力兴建 CCS 示范工程的阶段^[2],已实施的达到商业规模的有 5 处(表 1),简介如下:

Sleipner 位于挪威海外约 150 km 的 Sleipner 气田,CO₂ 含量约 9%,而商业天然气的 CO₂ 不得超过 2.5%,多余的 CO₂ 必须分离出来。挪威 1991 年第 1 个开始对近海石油气开采中排放的 CO₂ 收 55 USD/t 的碳税,Statoil 公司决定将分离出的 CO₂ 封存到油层上方埋深约 1 000 m

Snohvit 位于挪威海外约 140 km 的天然气和凝析油田,水深 250~340 m。将从天然气中分离出的 CO₂ 注入油气层以下深约 2 700 m 的咸水层中^[5]。

上述工程都经历了多种方法的多次监测,至今未发现 CO₂ 泄露的迹象。

Gorgon 澳大利亚西北陆架的 Gorgon 气田含约 14%的 CO₂,分离出的 CO₂ 将输送到 Barrow 岛,注入地下咸水层进行封存。预计每年注入量 400 万 t,若该工程在 2014 年如期完工,将是世界上规模最大 CO₂ 封存工程。

2.2 国内 CCS 示范工程

我国已投产和正在实施的主要示范项目如下:

(1)中石油吉林油田 CO₂—EOR 示范项目 投资达 2 亿元,利用高含 CO₂ 天然气分离出的 CO₂ 驱油,提高低渗透油藏的采收率和特低油藏的动用率。已成功完成通过每天注入 CO₂ 300~400 t 提高采油量的先导实验。预测到 2015 年实现年封存 CO₂ 120 万 t,增加原油产量 100 万 t,提高采收率 14%。

(2)中石化胜利油田 CO₂ 捕集和 EOR 示范项目^[6] 2008 年起,中石化胜利电厂开展了 100 t/d 燃煤烟道气 CO₂ 捕获和储存驱油示范工程建设。胜利电厂燃烧后烟道气中的 CO₂ 浓度为 14%,采用复合胺化学吸收法,获得纯度为 99.5%的 CO₂,经罐车运输到储存站,压缩、干燥和液化后,注入油层强化采油,平均提高采收率为 15%。计划扩大 CO₂—EOR 的规模,实现捕集 100 万 t/a,从齐鲁石化企业用管道输入 CO₂,供多个油田进行强化采油,预期在 2013—2014 年建成。

(3)神华集团 10 万 t/a CO₂ 捕集和封存示范项目 神华集团计划建立全流程的 CCS 示范工程,目前已建成世界最大的百万吨级鄂尔多斯煤制油厂,从煤制油厂产生的高浓度 CO₂ 经捕获液化后,由槽车运送至鄂尔多斯盆地东北部的埋存场地,注入 1 300 m 的深部咸水层进行封存,预计年封存 CO₂ 10 万 t。三维地震探测和数值模拟初步研究表明,埋存场地深部咸水层具有封存 CO₂ 的能力,单井能够达到 10 万 t/a 的注入规模。2011 年 1 月 2 日 CO₂ 试注成功,目前,该项目正在实施中。未来计划分 2 步建成年捕集与封存 CO₂ 分别达 100 万 t 和 300 万 t 的项目。

2.3 示范工程的启示

国内外 CCS 示范工程给予我们如下启示:

(1)CCS 是针对一些工业生产过程中产生大量 CO₂ 的集中排放源,主要为高含 CO₂ 的气田、化工厂和发电厂等,以降低埋存成本和提高存储效率。

(2)出于对埋存成本的考虑,一般选择就近埋存。IPCC 认为,CO₂ 气源与埋存体之间的合理距离应 <300 km,埋存体以盐水层为主。

(3)用于 CO₂ 地质埋存工程的费用依据工程规模和现场条件而定,一般需要几千万到几亿 USD^[2],资金来源广泛,可由国家资助、多方联合、

石油企业自筹资金等方式组成。

(4)有些发达国家开征的碳税在很大程度上推动了 CO₂ 地质埋存工程的实施。挪威的 Sleipner 示范工程每吨 CO₂ 的埋存成本已经低于其排放征收的碳税,产生了经济效益。CO₂ 埋存与 EOR、EGR 相结合无疑会产生经济效益,但其受限因素较多,埋存总量比较有限。

(5)CO₂ 地质埋存技术作为一种新兴技术,实施时间不长,经验不足,其安全性未得到长期验证。目前主要在海上和人烟稀少之地开展,最大限度的减少对人类安全带来的风险。

随着更多 CO₂ 地质埋存示范工程的成功实施,不仅可以技术走向成熟,其安全性也可以逐步得到验证。当社会各界的普遍认可时,便可以制定相关经济政策,促进相关行业积极参与,推动更多 CO₂ 埋存工程的实施,以达到大规模减排的目的。

3 CO₂ 地质封存的机理

一般地,在地表 800 m 深度之下,温度 >31.1 °C,压力 >7.38 MPa,这时注入这样深度的储层中的 CO₂ 就处于超临界状态。这时的 CO₂ 密度约为水的 50%~80%,使得储存 CO₂ 的空间大大缩小,同时 CO₂ 具有较好的流动性、扩散性和溶解能力。CO₂ 地质封存就是利用 CO₂ 具有超临界流体的特点,具体的封存机理包括构造封存、束缚封存、水动力封存、吸附封存、溶解封存和矿物封存等类型^[6]。

(1)构造封存机理 利用储层上部的圈闭构造阻止 CO₂ 在浮力作用下向上运移,从而达到封存 CO₂ 的目的。此类圈闭构造包括地下的背斜、断鼻和地层圈闭等。

(2)束缚封存机理 CO₂ 在储层运移过程中,由于岩石毛细管力、气液相表面张力的作用使少量 CO₂ 气体或超临界流体长久的滞留在岩石颗粒的孔隙中。

(3)水动力封存机理 如果深部咸水层没有完全封闭,而且层内流体流速缓慢,则比较有利于 CO₂ 的水动力封存。注入咸水层的 CO₂ 在浮力作用下上升到咸水层顶部,随地层水缓慢移动,在此过程中,部分 CO₂ 将被溶解。地层水极低的运移

速率可以确保CO₂在储层中长期封存。

(4)吸附封存机理 该机理指煤层中的CO₂封存。煤层内部孔隙表面易与非极性分子产生范德华力,从而具有吸附气体的能力。煤层对CO₂的吸附能力比CH₄高2倍以上,因此,可以用CO₂置换煤层中的CH₄,只要压力和温度保持稳定,那么CO₂会长期封存于煤层中。

(5)溶解封存机理 CO₂气体或超临界流体在地下储层的咸水和原油中有一定的溶解能力。CO₂溶解量与溶解速度主要取决于地下水的化学成分、原油的组成和与不饱和地下水和原油的接触程度。溶解了CO₂的咸水因密度增大会下沉,与上部的纯咸水对流,会进一步促进CO₂的溶解。

(6)矿物封存机理 溶解的CO₂通过与储层中的矿物或地下水中的某些组分发生化学反应,从而产生碳酸盐矿物的沉淀,可实现CO₂的永久封存。例如,蛇纹石与CO₂反应生成菱镁矿和石英,还有常见的CaCO₃沉淀。

不同封存机理在CO₂地质封存过程中具有不同的作用时间尺度。CO₂注入过程一般是几十年,在此期间构造封存、水动力封存和煤层中的吸附封存起主要作用。束缚封存、溶解封存和矿物封存产生作用的过程比较缓慢,尤其是矿物封存,需要几百年到上千年才能发挥作用。在CO₂注入期溶解封存和矿物封存的CO₂几乎可以忽略。但随着时间的推移,到上百年以上,束缚封存、溶解封存和矿物封存的作用就显示出来了,逐渐成为主导地位,而且封存CO₂的安全性越来越高。

4 CO₂地质封存的基本条件

4.1 地质条件

将CO₂埋存于地下,使其在相当长的时期内不会泄露出来,埋存场地必须要满足一定的地质条件:

(1)容积条件 埋存体的存储潜力要足够大,以保证工程期限内的CO₂能全部埋存进去。对于常见的构造封存,首先,要求埋存CO₂盆地的面积要大,盆地内发育足够多的地下圈闭可供选择;其次,选择出的适宜圈闭的面积也要足够大;再次,储集CO₂的地层要达到一定的厚

度;最后,储层的孔隙度也是决定埋存体的存储能力的重要因素。

(2)构造条件 CO₂埋存的地质体的构造特征,关系到CO₂的封存形式、运移过程及是否会发生泄漏。构造封存中背斜圈闭最有利于CO₂封闭在可预测的范围之内,如果构造顶部平缓,则CO₂的运移路径将很难预测和控制。此外,埋存体要具有良好的稳定性和侧向封闭性,无断层或断层的密封性良好,随着CO₂的持续注入,不会导致泄露、串层等意外的发生。

(3)储层条件 CO₂埋存体的储层不仅在厚度方面有一定的要求,还要具有足够大的孔隙度和较好的渗透率,有利于超临界CO₂入渗和流通。一般要求储层总厚度>30 m,孔隙度>10%,渗透率>10×10⁻³ μm²[6]。另外储层要具有较好的均质性,有利于CO₂的溶解扩散以及与地层矿物的反应。

(4)盖层条件 在地层条件下,注入的CO₂的密度小于水,由于浮力作用而聚集在盖层下面,因此盖层具有良好的密封性十分重要。盖层的性质和密封能力是保证CO₂长期存储的关键因素。盖层一般为泥岩或粉砂质泥岩,这些岩性颗粒小,粒间有效孔隙极小,一般孔隙中以束缚水存在为主,渗透率特低,排驱压力很大。盖层必须有较大的厚度,一般要求总厚度>150 m,而且盖层横向上必须连续稳定分布,没有被断层破坏。总体要求盖层的毛细管进入压力远大于最大CO₂液柱所产生的浮力。

(5)温压和流体条件 埋存地质体的温度、压力将影响CO₂在储层中的相态。深度在800 m以下的埋存体的温压条件可以使CO₂以超临界状态存在。埋存体中的流体性质对于CO₂的埋存也至关重要,直接影响到CO₂的注入能力和埋存量。即使为同一流体,若成分不同,也会对CO₂的溶解扩散有很大影响。此外,流体性质及成分对于CO₂的监测也具有十分重要的意义。

4.2 其他需要考虑的因素

在选择CO₂埋存地点时还要考虑政治、经济、环境和安全等因素。一般选择在CO₂排放源多、排放量大的地区,减排压力大;离排放源越近,输送CO₂的费用就越低;为了保护淡水资源,要求埋

存 CO₂ 的储层孔隙水盐度大于可饮用水的标准(这种储层简称“咸水层”)。

CO₂ 的地质埋存存在一定的风险,可能对周围的生态系统、自然资源、人工建筑等造成影响。如果埋存在地质体中的 CO₂ 发生泄漏,可能污染地层资源(如浅层淡水、矿产资源、地热资源),甚至对地面上的人类安全造成威胁。

5 中国南方近海 CO₂ 封存的前景

我国南方沿海工业发达地区存在大批大规模的 CO₂ 集中排放源,而许多沿海省份(如浙江、福建、广东、广西),陆上只有零星分布的古近纪陆相断陷盆地^[7],盆地的面积小,CO₂ 封存条件及容量很有限。对于这些省份,实现大规模 CO₂ 封存的希望只能在海域。

我国南方近海发育有大量大型沉积盆地,如台西、台西南、珠江口、莺歌海、琼东南、东海、北部湾盆地等,其中在珠江口、莺歌海、琼东南、北部湾和东海等盆地发现了丰富的油气。这些盆地的沉积物厚度一般有从几千米至十余千米,储盖层组合好,圈闭非常发育^[8-10],具有 CO₂ 封存的有利地质条件。以珠江口盆地为例,该盆地靠近经济发达的广东省,位于南海的东北部海域。东西长约 800 km,南北宽约 100~360 km,海域面积 17.7×10⁴ km²,属南海北部被动大陆边缘上的断陷裂谷盆地,以古、新近系沉积为主(图 2)^[11]。自始新世以来,接受了大量的湖相及海相沉积,古、新近系厚度可达 5 000~7 000 m(图 3)。盆地内不但发现了大量的石油天然气藏,还发现了一些幔源的 CO₂ 气藏。珠海组、珠江组和韩江组发育海陆过渡相及海相的砂岩,单层一般厚 3~7 m,最厚 15 m,孔隙度一般为 15%~30%,渗透率可达(1 102~1 709)×10⁻³ μm²,具有很好的储集性能。盖层是在海进过程中形成的海陆过渡相及海相的泥岩,尤其在韩江组及其以上地层形成了数百到上千米厚的滨浅海相泥岩,成为非常好的区域性盖层,中新世以来构造活动较弱,很少有断穿这套盖层的断裂^[12]。另外,储盖层组合好,盆地内发育众多背斜、断鼻和岩性等类型的圈闭。因此,该盆地具有封存 CO₂ 的优越地质条件。

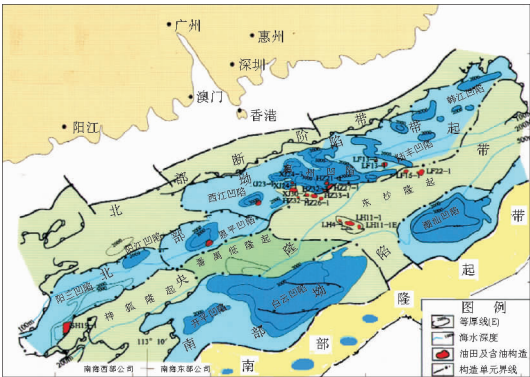


图 2 珠江口盆地位置及构造概图(据文献[11])
Fig. 2 Tectonic map of Pearl River Mouth Basin
(from reference [11])

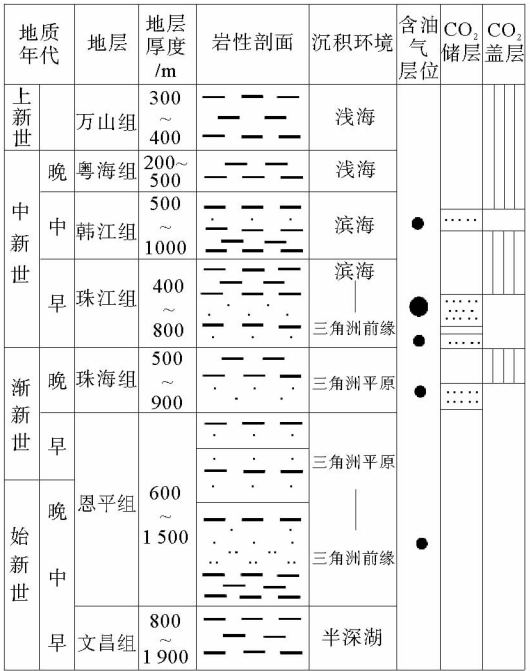


图 3 珠江口盆地新生代地层柱状图
Fig. 3 Cenozoic stratigraphy of Pearl River Mouth Basin

海域封存 CO₂ 的安全性高、环境影响小。一方面,封存 CO₂ 的海域远离人类居住区,对人类安全没有影响;另一方面,近海有数十米到数百米深的海水,封存在地层中的 CO₂ 即使有部分泄露到海底,海水也能稀释和溶解泄露的 CO₂,大大降低了安全性风险。前面提及的 5 大 CCS 示范工程,其中有 3 个就是将 CO₂ 封存在海域中。

综上所述,我国南方近海海域具有封存 CO₂ 的良好而广阔的前景。

6 结论与建议

为应对全球气候变暖的趋势,人类正努力减少温室气体的排放,在可预见的将来,世界一次能源需求仍主要来自化石能源。CCS 是继续利用化石能源的同时实现 CO₂ 近零排放的惟一有效技术。国外已建成多个 CO₂ 地质封存的示范工程,我国对于 CO₂ 地质封存尚处于研究和早期发展阶段,只在北方陆上开展了少量示范工程的建设。

目前,对于我国大多南方沿海经济发达地区 CO₂ 减排压力大,其陆上缺乏大型沉积盆地来说,近海 CO₂ 封存是惟一的选择。由于我国南方近海发育大型的盆地,沉积地层厚度大,储盖层组合好,圈闭非常发育,具有 CO₂ 封存的有利地质条件。另外,海域封存具有不需征地、安全性高、环境影响小等优点。因此,应该在我国南方近海建设 CO₂ 封存示范工程,为将来在海域开展大规模的 CO₂ 封存积累技术和经验。

参考文献:

[1] Bert M, Ogunlade D, Heleen D C, et al. IPCC special report on carbon dioxide capture and storage [M]. New

York: Cambridge University Press, 2005:195-276.

[2] 任韶然,张莉,张亮. 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,2010,34(1):93-98.

[3] Audigane P A, Gaus I, Czernichowvki-Lauriol I, et al. Two-dimensional reactive transport modeling of CO₂ injection in a saline aquifer at the Sleipner site, North Sea[J]. American Journal of Science, 2007,307:974-1 008.

[4] Holloway S,Chadwick A,Lindeberg E, et al. Best practice manual from SACS-saline aquifer CO₂ storage project[R]. Trondheim:Statoil research Center,2004;3-18.

[5] Maldal T, Tappel I M. CO₂ underground storage for Snøhvit gas field development[J]. Energy,2004,29:1 403-1 411.

[6] 张森琦,郭建强,李旭峰,等. 中国二氧化碳地质储存地质基础及场地地质评价[M]. 北京:地质出版社,2011:7-32,162-175.

[7] 李国玉,吕鸣岗. 中国含油气盆地图集[M]. 北京:石油工业出版社,2002:1-10.

[8] 朱伟林,米立军. 中国海域含油气盆地图集[M]. 北京:石油工业出版社,2010:25-39.

[9] 朱伟林. 中国近海新生代含油气盆地古湖泊学与烃源岩条件[M]. 北京:石油工业出版社,2009:3-20.

[10] 彭伟欣,叶丛英. 中国近海油气资源开发现状及前景[J]. 海洋石油,1999(3):21-26.

[11] 傅宁,米立军,张功成. 珠江口盆地白云凹陷烃源岩及北部油气成因[J]. 石油学报,2007,28(3):32-38.

[12] 王斌,祝春荣,丰勇. 珠江口盆地番禺低隆起油气输导体系及运移脊线[J]. 海洋石油,2006(1):1-6.

A REVIEW OF CO₂ STORAGE TECHNOLOGY AND PERSPECTIVE OF CO₂ STORAGE IN THE NEARSHORE AREA OF SOUTH CHINA

QIN Changwen, XIAO Gang , WANG Jianfeng, LIU Yinghong
(CNOOC, Research Institute, Beijing 100027, China)

Abstract: To reduce CO₂ emission has become an urgent mission of the better developed coastal provinces in south China. CCS is the only technology that makes the CO₂ emission approaching zero whereas fossil energy sources continue to be used. CO₂ geological storage is the key to CCS. In the offshore area of South China, there occur large-scale basins with thick sediments. The good combination of reservoir and seal rocks, and traps are available. It means that geological conditions are favorable for CO₂ storage. The geological storage of CO₂ has great advantages. It is safe for people, clean for environment, and there is no land requisition. It is the only choice to store CO₂ in offshore basins since there is no large-scale basin on land in most of the coastal provinces in south China. Demonstration projects for CO₂ geological storage are recommended in the offshore areas.

Key words: CCS; demonstration project; CO₂ geological storage; the south offshore of China; large-scale basin