

·学科进展与展望·

减少二氧化碳向大气层的排放

——二氧化碳地下储存研究

曾荣树 孙 枢* 陈代钊 段振豪

(中国科学院地质与地球物理研究所,中国科学院、国家环保总局地质环境系统研究中心,北京 100029)

[摘 要] 1997年在日本京都召开的联合国气候变化框架公约大会通过了《京都议定书》,确定了全球减少排放 CO₂ 的目标。任何一个工业化国家都把化石燃料作为重要的能源。因此,迫切需要研究能够减少 CO₂ 排放,而又不降低生活水平的办法。碳隔离储存技术就是为解决 CO₂ 的处置而产生的,其核心就是考虑如何把产生的 CO₂ 与环境隔绝开来,不让温室气体影响人类生存的地球。这是积极面对的态度。

本文阐述了 CO₂ 地下储存的基本原理与可行性,同时论述可能产生的风险与有关地质环境问题。作者建议,中国应该开展对 CO₂ 隔离储存原理、技术的研究,以便在不远的将来,把我国排放的二氧化碳储存、利用起来,有效地减少温室气体的排放,在国际的科技竞争中处于主动地位。

[关键词] 碳隔离, CO₂ 地下储存, 地质环境

全球气候变暖问题,由于其对人类以及整个地球环境系统可能产生的危害,已经引起世界各国的广泛关注。

CO₂ 的排放导致大气中 CO₂ 含量升高,产生温室效应。二氧化碳是主要的温室气体,大约占温室气体总量的 65%,其他温室气体是甲烷、各种氮氧化物、臭氧、氟里昂、一氧化碳等。据《世界能源 1996—1997》报道,全世界 CO₂ 工业排放量最高的 15 个国家(见表 1)中,按人均排放量计算,我国居第 14 位,排放总量居世界第二位^[1]。

为了遏制全球增暖趋势,京都协议提出了发达国家减少 CO₂ 排放的指标。由于温室气体的减排直接影响到一个时期国民经济的发展,因此,围绕温室气体的减排问题成为国际政治和外交谈判中涉及国家经济发展的重大问题。多年来发达国家的科学家积极寻找未来的洁净能源,评估它们能提供的不含 CO₂ 能源的能力及其潜在的商业应用前景^[2]。同时,国际科技界已经提出了 CO₂ 地下储存的科学设想,并且开展了若干实验。本文试图对这一问题作一探索。

表 1 全世界 CO₂ 工业排放量最高的国家(1996—1997 年)

国家顺序	二氧化碳排放量(×10 ² 万吨)
1. 美国	4881.349
2. 中国	2667.982
3. 俄罗斯联邦	2103.132
4. 日本	1093.470
5. 德国	878.136
6. 印度	769.440
7. 乌克兰	611.342
8. 英国	566.246
9. 加拿大	409.862
10. 意大利	407.701
11. 法国	362.076
12. 波兰	341.892
13. 墨西哥	332.852
14. 哈萨克斯坦	297.982
15. 南非	290.291

1 京都会议规定的 CO₂ 减排目标

1997年联合国在日本京都召开的气候会议上,经过辩论确定在全球减少排放二氧化碳的目标,制定了相关协议,规定发达国家在 2008—2012 年将温室气体的排放量相对于 1990 年的标准减少 5.2%。

* 中国科学院院士。

本文于 2004 年 4 月 14 日收到。

其中,整个欧盟将减少8%、美国7%、日本6%、加拿大6%、东欧5%—8%的排放。为达到这一目标,一些欧盟成员国(如德国)需要减少的排放比平均数还要高,丹麦的《能源 21》计划目标是到2005年温室气体排放相对于1998年减少21%。

2002年11月在南非约翰内斯堡举行的世界可持续发展会议上,朱镕基总理宣布中国政府已经批准了京都协议。美国政府自布什总统上台后,考虑到国家的经济利益而不愿承诺减排义务。

2 CO₂的地下储存

绝大多数排放的CO₂是由于使用化石燃料引起的。目前,化石燃料对任何一个工业化国家都是重要的能源,不可能简单地取消。因此迫切需要研究能够减少CO₂排放量而又不降低生活水平的方法。根据分析测定,利用水力、风力、生物能、太阳能或地热能等可再生能源替代煤、石油和天然气等燃料,淘汰所有排放二氧化碳的能源是最为理想的选择,然而这种想法是不现实的。因为即使可再生能源的发电量迅速增长,也满足不了经济迅速发展的需要。根据欧盟有关部门的测算,可再生能源的份额在1990年占能源总量的4.6%,到2010—2015年增加为8%—9%,那时化石燃料仍将提供约80%的能源消耗,其余的由核能提供,整体能源消耗同期预计将增长约18%—20%。最近,德国、英国、瑞典等国议会先后制定了终止核能发电的决定,更长远计划是废除核能发电设备。按照现在的工业发展能力,要保持或提高生活水平,化石燃料就更不可能放弃,必将更多地用于满足不断增长的能源需求。所以研究减少二氧化碳排放的新方法,就显得非常重要。那么,哪些是使用化石燃料、排放二氧化碳的主要产业呢?

火力发电厂是排放二氧化碳的最大行业。火力发电厂燃烧化石燃料后排放的CO₂占全球燃烧同种燃料排放量的30%,大约占全球人类活动排放CO₂的24%。除火力发电厂外,建材、陶瓷、水泥、玻璃、冶金及石油化工等行业也燃烧化石燃料,但是排放的CO₂数量相对较少。一座50万kW的硬煤发电厂每年约排放400万吨的CO₂。1990年整个欧盟火力发电厂排放的CO₂大约9.5亿吨,这是京都协定书的参考标准。化石燃料的燃烧是在锅炉等工业设备中进行,这样就比较容易在管道系统中把CO₂分离和富集。所以,比较切实可行的办法,是首先处理从燃烧化石燃料的发电厂排放的CO₂。

交通运输也是排放CO₂的主要行业,大约占总排放量的三分之一。交通运输行业所排放的CO₂是由成千上万辆机动车产生的,这些CO₂很难统一捕集。要减少机动车排放的CO₂,最有效的办法是使用其他燃料代替汽油、柴油或天然气。

综上所述,从火力发电厂、炼油厂、化肥厂等工厂的烟道气中回收CO₂进行地下储存,是减少CO₂向大气排放的有效途径。发达国家对从燃煤电厂排放的烟道气中回收CO₂及地下储存的可行性进行了广泛的研究^[3]。

火力发电厂燃烧的化石燃料主要有煤炭、石油、天然气等,不同的燃料对发电厂排放CO₂的数量有重要影响。表2的数据表明燃烧褐煤排放的CO₂是天然气的一倍多^[4]。

表2 不同燃料发电排放的CO₂数量

燃料种类	排放CO ₂ 量 (kg/kWh)
褐煤	1.18
硬煤	0.97
石油	0.85
天然气	0.53

地下储存CO₂的温度/压力条件是35℃/11MPa。从普通电厂排放、未经处理的烟道气仅含大约3%—16%的CO₂,可压缩性比纯的CO₂小得多。从燃煤电厂出来经过压缩的烟道气中CO₂含量为15%,在这样的条件下储存1吨CO₂大约需要68m³储存空间。如果能将烟气里的CO₂分离,并且经过压缩,在35℃和11MPa的条件下它是一种超临界流体,每吨大约只需要1.34m³的储存空间。所以,和压缩的烟气相比,处理纯的CO₂所需的储存空间大约只有烟气的1/50,因此把CO₂从烟气里分离出来,才能充分有效地对它进行地下处理。

目前,比较成熟的处理技术是储存在距地面800m或更深的地方,地热梯度为25—35℃/km,压力梯度为10.5MPa/km,分离的CO₂将处于超临界状态,它的浓度变化范围为440—740kg/m³。因此,在多孔和可渗透的储存岩层中,不需要特别的压力条件就可以储藏CO₂。

3 CO₂地下储存的基本原理与可行性

通常,在地底的温度/压力条件下,分离的CO₂没有像水那样稠密。为了防止CO₂在自身的弹力作用下返回地表以及往别处迁移,需要密封整个储存空间,时间跨度至少数千甚至上万年。利用常规地

质圈闭构造和非常规地质圈闭构造来储存都是有效的方法。常规地质圈闭构造包括气田、油田和不含烃的储气层(含水层)三种,对于前两种,由于熟悉已开采油气田的构造和地质条件,所以利用它们来储存 CO₂ 就比较合算。利用含水层储存有两个优点:一是含水层的圈闭构造比油田和气田更普遍;二是在含水层中可能有一些适于储存 CO₂ 的巨大储气构造。此外,还有把 CO₂ 埋藏在地下深部煤层,增加煤层气产量的方法^[5,6]。非常规地质圈闭构造的处理包括海上与陆地两部分。试验证明海上密封储存 CO₂ 是可行的,例如在北海有许多巨厚的含水层,它们在大范围内都是水平的,这些含水层的面积大,渗透性好,蕴藏着储存 CO₂ 的巨大潜力。

地下储存 CO₂ 的过程是 CO₂ 溶解、转化的过程。处于超临界状态的 CO₂ 相对不活泼,不会和储气层的岩石反应,因此不会被固定成为碳酸盐矿物。但是如果在富钙地层水的环境,由于增加了 CO₂ 的含量,就可能形成方解石和其他碳酸盐的沉淀,这样的化学反应为我们提供了一种在地下固定 CO₂, 实现永久储存的途径。Bowker 等开展的 CO₂ 灌注实验表明,碳酸盐矿物沿着与更加贫化的胶结岩石相应的管道溶解^[7]。因此,根据岩石构造和矿物动力学,碳酸盐矿物在灌注钻井附近或者在储气层范围内首先溶解,它的溶解速度比硅酸盐更快。

把 CO₂ 运送到埋藏地点的最可行办法是利用管道输送,在 10MPa 和 10℃ 条件下将 CO₂ 压缩成液体传输。美国为提高原油采收率,采用远距离输送高压液态 CO₂, 最长的输送管是绵羊山脉(Sheep Mountain)运输管道,它将南克罗拉多州的 CO₂ 运至得克萨斯的二叠纪盆地,距离 656km。运输管道的花费主要决定于管道的长度,大约每公里 1 至 2 百万欧元。CO₂ 输送管道的最大直径约为 1 米,每小时可以运输 2500 吨 CO₂。目前的技术已经达到 1000 米的深度。据估计,欧洲至少有 7000 亿吨 CO₂ 可以被隔离在地下储气层中,而保守的估计是 632.9 亿吨^[8]。

CO₂ 的地下储存技术已受到发达国家政府、科技和产业界越来越多的关注和重视,从 1996 年开始,在挪威北海的 Sleipner 油田每年把 100 万吨 CO₂ 注入到 900m 深处的盐水饱和砂层中^[9];加拿大从 2000 年 10 月开始,每天通过管道把大约 5000 吨或 9500 万标准立方英尺的 CO₂,从美国 North Dakota 州的火力发电厂输送到位于 Williston Basin 盆地的 Weyburn 油田,并灌注到早石炭世碳酸盐岩储层中,

以提高石油采收率,同时又使部分 CO₂ 被永久地储存下来^[10]。这些实验说明,CO₂ 的地下储存(或隔断)是减少 CO₂ 排放极具潜力、并能在经济发展与环境保护上实现双赢的有效方法。

4 CO₂ 地下储存的风险及其防范

地下储存 CO₂ 的好处是可以把它有效地隔离在地球深处,但是地下隔离的负面效应依然存在,主要表现在:

4.1 CO₂ 逃逸进入大气环境

如果将 1 亿吨 CO₂ (相当于一座装机容量为 50 万千瓦的火力发电厂 25 年内排放的 CO₂ 总量)储存在地下,假设这些 CO₂ 从储气层中逃逸并在很短的时间里到达地表,就可以形成约 50 km³ 的“云层”,覆盖的面积大约为 18 000km²,厚度 3m,将会造成最不幸的事件。但这种灾难发生的可能性很小,因为灌注系统的限制,不可能短时间内使 20 年内所灌注的 CO₂ 都逃逸掉。同时 CO₂ 的快速膨胀导致形成干冰,干冰阻碍 CO₂ 的泄漏,减缓释放的速度。CO₂ 灌注到海底所造成的破坏,比逃逸到陆地地表造成的破坏要小得多,主要的影响是在靠近逃逸处海水 pH 值降低,减少海水密度,引起过往轮船的短暂灾难。

为了防止储存 CO₂ 的逃逸,首先必须对储气层盖层的渗透性与完整性、CO₂ 储存区的断层性质、分布及其封堵能力进行详细的研究和评估,同时对灌注区地表土壤层气体成分和变化进行定时观测,并进行可能引发地震的监测。另外,还需要对现在和古含水层补给区和流体运移的情况进行研究,查明它们与储气层连通状况,以便对 CO₂ 逃逸的风险性进行评估,使其降低到最低程度。

4.2 地下水污染

许多微量元素在地下水中的富集程度随着酸度的增加而增加,地下水含有多种组分,同时存在多种可能的污染物,如微量元素、有机酸、石油、有机气体和液体石油等。随 CO₂ 泄漏一起移动的污染物对地下水质量的影响包括以下几个方面:(1)在陆地上储存 CO₂ 时,最可能出现的问题是由于泄漏导致 CO₂ 进入饮用地下水的补给层;(2)碳酸盐矿物和铁氧化物对砂岩和碳酸盐含水层的地下水质量有重要的控制作用;(3)CO₂ 泄漏可能引起重金属污染物从矿体进入附近的饮用地下水补给层;(4)即使从地下储藏点泄漏出少量的 CO₂,也可能造成饮用地下水质量的重大破坏,详细掌握古含水层和现在的补给区、排泄区以及含水层与 CO₂ 储层连通状况,可有效地降

低此类风险的发生。

4.3 地震活动

大量 CO₂ 注入沉积层或断裂岩石后改变了它的力学状态,储气层里或附近高的孔洞压力可以诱发微小的地震,甚至发生破坏性地震。研究诱发地震包括地震灾害评估与现场监测储气层的动力学行为,这两个方面都需要仔细检测储存地点的条件,包括历史上地震活动、区域的地质结构研究、临界液体压力评估和区域的预灌注地震监测,以确定“零状态”地震活动。如果是使用已经开发过的油气田,还应该测试它所发生的变化,可以安装地下和钻井传感器来监测诱发地震。

4.4 地面的沉降或升高

影响地面沉降或升高的因素包括:结构层厚度、结构层的深度和上覆地层的特征。对灌注 CO₂ 来说,只需要考虑流体压力的增加,不考虑压力变化引起的沉降。只要最大储存压力小于上覆地质静压力,就意味着钻井的储气层压力低于原来的构造压力。在构造压力下很大的储气层中,任何构造压力的减少都会诱发断层,导致地表向上抬升或向下错断。沉降的另一个原因是储气层岩石的溶解。如果含水的 CO₂ 腐蚀了岩石结构,在上覆结构层的重力作用下,储气层会被压实,在多孔的碳酸盐岩石中尤其要关注凝结问题。

5 我国应开展 CO₂ 地下储存研究

近年来,欧美国家已经开始把火力发电厂排放的 CO₂ 进行地下储存的实验。2002 年 11 月,美国能源部宣布在西维吉尼亚新港口美国电力能源公司(AEP)的山顶电厂开展为期 18 个月,利用地质学方法存储 CO₂ 的研究项目^[11]。AEP 提供所属的山顶电厂进行试验,该厂位于俄亥俄河流域,以煤为燃料,发电量 130 万千瓦。在俄亥俄河流域,饮用水层位于地下 100m 以浅,而深部咸水层位于地下 800—4000m。地质学家认为饮用水层与咸水层之间岩石的不可渗透性能阻挡 CO₂ 的向上运动,深部咸水层可用于储存 CO₂,而不会污染饮用水。该项目最需要解决的问题是咸水层以上的岩石是否足够坚实,不会破裂,从而保证 CO₂ 不会逐渐泄漏。

2003 年 2 月欧盟委员会资助的“二氧化碳储存”(CO₂STORE)研究项目开始启动,为期 3 年,将在丹麦、德国、挪威与英国开展储存发电厂排放的 CO₂ 新储集区性质的研究,包括储集区的地质特征、地球化学模拟、CO₂ 在储集层长期储存的行为等^[12]。

我国是世界上煤炭生产和消费的大国,煤炭资源储量和产量均居于世界前列,由于石油和天然气资源有限,21 世纪的主要能源仍然是煤炭。最近,欧盟的一个研究小组发表了“世界能源、技术和气候政策”研究报告^[13],预测从现在起到 2030 年世界各国 CO₂ 的排放量,认为到 2015 年我国与美国的排放量相等,2015 年以后将超过美国,成为世界上 CO₂ 排放量最大的国家(见图 1)。尽管从人均 CO₂ 排放量计算,我国在世界的排名不可能居于前列,但是研究减少 CO₂ 排放而又不降低生活水平的问题非常必要。根据我国的国情,要保持和提高人民的生活水平,化石燃料将会更多地用于满足不断增长的能源需求。所以,采取积极的态度,就是首先考虑把工业过程产生的 CO₂ 与环境隔绝开来,储存到地下,不让温室气体影响人类生存的地球。

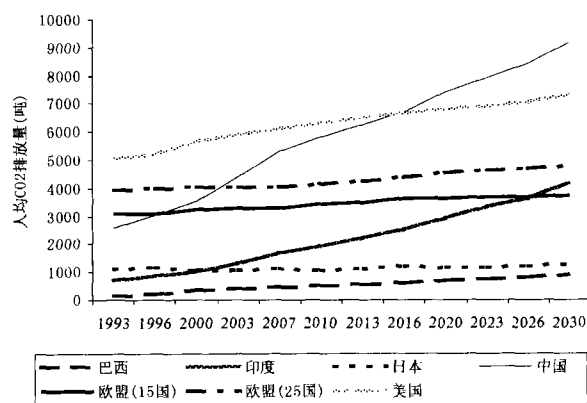


图 1 2030 年 CO₂ 排放量预测

沈平等根据我国石油资源的现状,曾经提出利用工业 CO₂ 废气开采低渗透油田的设想^[14]。张中祥多年来比较系统地研究中国的能源政策和 CO₂ 减排的措施,同时提出发展中国家也应该努力实现京都议定书规定的目标^[15,16]。

我们建议,中国应该开展 CO₂ 地下储存的研究,运用地质学、地球化学、地球物理学、海洋地质学的理论,研究二氧化碳分离、富集、输送、储存过程的特征,阐明碳隔离的机制,确定储存 CO₂ 及可能利用的方案,同时开展广泛的国际合作,逐步建立适合中国国情的碳隔离技术体系,以便在不远的将来,把我国自己排放的 CO₂ 储存利用起来,有效地减少温室气体的排放,在国际的科技竞争中处于主动地位。具体应从以下几个方面开展工作:

(1) 研究储存二氧化碳的候选基地。根据我国能源结构、分布及发展趋势,开展重点地区地质构造、地球化学特质、储藏潜力和有关科学问题的系统

研究。

(2)开展对碳捕集工艺的研究。探索以较低成本,捕集高纯度二氧化碳气体的工艺,从而为碳储存提供可靠的原料来源。

(3)加强对二氧化碳气体储存状态的研究。对被储存的二氧化碳稳定性,它们与地下流体、围岩的反应以及对地下环境的影响做出评估。

(4)发展监测技术。通过地球物理、地球化学、遥感勘测的综合运用,有效监测二氧化碳的存储状态,为将来的碳收集实践准备良好的技术手段。

(5)开展野外实验。与相关企业合作开展野外实验,获取宝贵的第一手资料,并为各方面技术的运用奠定坚实的基础。

(6)加强国际合作,密切关注碳捕集技术的发展。

实现我国经济社会的可持续发展需要发挥各个部门的积极性,被动的环境治理很难达到预期的目的。如果排污企业(如电力部门)在环境治理的过程中能得到一定的经济效益,将会大大提高他们的环保意识和治理环境的自觉性,把排污企业和治污企业(如油气部门)有效地协调起来,双方受益,CO₂的地下储存将是一个很好的平台。

参 考 文 献

- [1] World Resources Institute. World Resources 1996 - 1997. London: Oxford University Press, 1996, 326—327.
- [2] Hoffert M I et al. Advanced technology paths to global climate stability: energy for a greenhouse planet. *Science*, 2002, 1:981—987.
- [3] Hendriks C. Carbon dioxide removal from coal-fired power plants. Lon-

- don: Kluwer Academic Publishers. 1994, 233.
- [4] Holloway S et al. The underground disposal of carbon dioxide. Summary report. British Geological Survey, UK. 1996, 2.
- [5] Gunter W D et al. Deep coalbed methane in Alberta, Canada, a fuel resource with the potential of zero greenhouse emissions. *Energy Convers Mgmt.* 38 (Suppl.) S217—S222.
- [6] Byrer C W et al., Carbon dioxide storage potential in coalbeds: A near-term consideration for the fossil fuel industry. Proceedings of the 23rd International Technical Conference on Coal Utilization & Fuel Systems. Clearwater, FLA, 1998, 593—600.
- [7] Bowker K A et al. Carbon dioxide injection and resultant alteration of the Weber sandstone, Rangely field, Colorado. *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists*, 1991, 75(9): 1489—1499.
- [8] Holloway S et al. The underground disposal of carbon dioxide, Summary report. British Geological Survey, UK. 1996, 11.
- [9] Christensen N P. European potential for geological storage of CO₂ from fossil fuel combustion (GESTCO), EuroGeo Surveys, 1999, 3.
- [10] Website: west coast regional carbon sequestration partnership, <http://www.westcarb.org/news-sequest.htm>.
- [11] Gupta N et al. New Project on Geological Storage of CO₂, IEA Greenhouse Gas R&D Programme, Greenhouse Issues, 2003, 64:3.
- [12] CO₂STORE-New Project to Build on Existing Research, IEA Greenhouse Gas R&D Programme, Greenhouse Issues, 2003, 68:3.
- [13] Claessens M. A dead end in 30 years, RTD info, *Magazine on European Research*, 2003, 39: 30—34.
- [14] 沈平等. 利用工业 CO₂ 废气改善低渗油气藏的开发效果. 中美清洁能源技术论坛论文集(中文版), 北京: 中华人民共和国科技部、美国能源部, 2001, III - 1 - 7.
- [15] Zhang Zhongxiang. Cost - Effective Analysis of Carbon Abatement Options in China's Electricity Sector. *Energy Sources*, 1998, 20 (4 - 5): 385—405.
- [16] Zhang Zhongxiang. Meeting the Kyoto Targets: The Importance of Developing Countries Participation. *Journal of Policy Modeling*, 2004, 26 (1): 3—19.

DECREASE CARBON DIOXIDE EMISSION INTO THE ATMOSPHERE ——UNDERGROUND DISPOSAL OF CARBON DIOXIDE

Zeng Rongshu Sun Shu Chen Daizhao Duan Zhenghao

(Institute of Geology and Geophysics, CAS, Research Centre for Geo-environment and Geo-technology, CAS & SEPA, Beijing 100029)

Abstract The global and regional reduction targets of CO₂ emission was defined by “Kyoto Protocol” in 1997. Fossil fuels are main energy source in all industrialized countries. It is a urgent task to decrease CO₂ emission and maintain high standards of living. The principle and feasibility of carbon sequestration, some risks and relevant geo-environment issues are summarized by the authors in this paper.

Key words carbon sequestration, underground disposal of CO₂, geo-environment