

中国 CO₂ 煤层储存容量初步评价

刘延锋, 李小春, 白 冰

(中国科学院 武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071)

摘要: 地下储存是降低大气中 CO₂ 含量以缓解温室效应的有效措施之一。其中煤层储存可有效地减少 CO₂ 排放量, 同时增加煤层气可开采量, 降低 CO₂ 地下储存的成本。煤层储存 CO₂ 是将 CO₂ 吸附在煤基质中, 具有安全可靠的特点。中国煤层分布广泛, 煤炭资源储量丰富, 是 CO₂ 地下储存的首选措施。根据中国煤炭和煤层气勘探资料, 不同性质煤的储量分布及 CO₂ 与 CH₄ 置换比例, 对中国主要含煤层气区深度 300 ~ 1 500 m 范围内的煤层 CO₂ 储存潜力进行初步评价。结果表明, 利用注 CO₂ 增采煤层气技术可使中国总的煤层气可采量达 $1.632 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 可储存约 $120.78 \times 10^8 \text{ t CO}_2$, 相当于 2002 年全国 CO₂ 排放量的 3.6 倍。

关键词: 环境工程; 二氧化碳; 煤层气; 注 CO₂ 增采煤层气; 吸附

中图分类号: X701.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2005)16-2947-06

PRELIMINARY ESTIMATION OF CO₂ STORAGE CAPACITY OF COALBEDS IN CHINA

LIU Yan-feng, LI Xiao-chun, BAI Bing

(Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: Geological storage is an effective means of reducing anthropogenic atmospheric emission of CO₂ to alleviate the worsening global climate change. CO₂ storage in coalbeds can effectively reduce the emission of CO₂, and at the same time, it can enhance the recovery of coalbed methane to reduce the cost of CO₂ geological storage. The CO₂ molecules are absorbed on the surface of coal matrix and the methane molecules can be released when CO₂ is injected into the coalbeds. The absorbed CO₂ on coal matrix can be kept stably in coalbeds for geologic time. There is a huge storage capacity for CO₂ in coalbeds in China for the wide distribution and abundant resources of coal. Putting CO₂ into coalbeds should be the prior choice for its security and safety. According to the latest prospecting data of coal and coalbed methane resources in China and the replacement ratio between CO₂ and CH₄ in the coal with different ranks, it is estimated that the CO₂ storage can be performed from depth of 300 m to 1 500 m in the main coalbed methane basins in China. The total recoverable coalbed methane resources will approach to $1.632 \times 10^{12} \text{ m}^3$ if the CO₂-enhanced coalbed methane recovery(CO₂-ECBM) technology is utilized, and the CO₂ storage capacity in coalbeds is about $120.78 \times 10^8 \text{ t}$, which is about 3.6 times as the total CO₂ emission of China in 2002.

Key words: environmental engineering; carbon dioxide; coalbed methane; CO₂-enhanced coalbed methane recovery(CO₂-ECBM); absorption

1 引 言

由人类活动导致的温室气体(CO₂, CH₄等)浓度

增加所引起的全球气候变化问题已经成为影响世界经济秩序、政治格局和国际关系的一个重要因素及决定世界能源前景的关键。全球气候变化与能源密切相关, 在导致气候变化的各种温室气体中, 人类

收稿日期: 2005-02-03; **修回日期:** 2005-05-31

基金项目: 中国科学院百人计划资助项目

作者简介: 刘延锋(1975-), 男, 博士, 2004年于中国地质大学(武汉)水文学及水资源专业获博士学位, 主要从事二氧化碳地下储存方面的研究工作。E-mail: liuyf@cug.edu.cn.

活动排放的 CO₂ 的贡献率达 63%^[1,2]。

为了减少 CO₂ 的排放量，缓解全球气候变化的影响，《联合国气候变化框架公约》缔约方于 1997 年 12 月通过了《京都议定书》，为发达国家规定了 2008~2012 年间具体的温室气体减排义务^[3]。尽管中国没有承担 CO₂ 减排义务，但不可能永远不承担义务。2002 年我国 CO₂ 总排放量达 33×10⁸ t，占世界总排放量的 13.6%，是仅次于美国的第二大排放国。并且，我国将长期主要依赖化石燃料特别是煤作为能源，预计 2030 年中国的 CO₂ 总排放量将达 67×10⁸ t，约占全世界的 17.6%，从而成为第一大排放国^[4]。目前，要求我国减排 CO₂ 的国际压力和环境压力越来越大，而且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，我国必须尽快开展 CO₂ 排放和处置方面的研究调查工作，对中国的 CO₂ 减排方式及其潜力进行评价，为将来能源结构调整和 CO₂ 减排提供科学依据。

欧美一些国家及日本的经验证明，地下储存是处置 CO₂ 的一种有效措施。CO₂ 地下储存就是把从集中排放源(火力发电厂和钢铁厂等)分离得到的 CO₂ 注入地下深处具有适当封闭条件的地层中储存起来，即把 CO₂ 归还原处——地球深部。可用于 CO₂ 地下储存的场地主要有油气田、沉积盆地内的咸水含水层和无商业开采价值的深部煤层等^[5]。中国已经发现 CO₂ 气田 28 处，主要分布在中国东部广大地区^[6]。CO₂ 气田的发现也证明了 CO₂ 地下储存的可行性。CO₂ 煤层储存技术(CO₂-ECBM)是地下储存方式的一种。中国煤炭和煤层气(CBM，主要为 CH₄)资源丰富，2 000 m 以内的储量分别约为 5.57×10¹² t 和 31.5×10¹² m³^[7,8]，且分布面积广；但煤层的渗透性普遍较低，导致煤层气的可开采率低，利用 CO₂-ECBM 技术，在储存 CO₂ 的同时增加煤层气的可开采量，从而降低 CO₂ 地下储存的成本。

2 CO₂-ECBM 原理

煤含有大量的微孔隙，比表面积巨大，且孔隙表面存在不饱和能，与非极性气体分子之间产生一种范德华力，从而吸附气体分子^[9]，煤对不同气体的吸附能力不同。试验表明，煤对 CO₂ 的吸附能力大于 CH₄，在保持煤层压力的同时注入 CO₂，CO₂ 将置换 CH₄。戴尔夫特理工大学的试验表明，在优化的温度与压力条件下，每个吸附的 CH₄ 分子可以被至少 2 个 CO₂ 分子所置换^[10]。因此，在保持煤层

压力的同时，通过注入 CO₂，可以把煤层中多余的 CH₄ 驱出来(如图 1 所示)。CO₂-ECBM 的 CH₄ 生产流量和总产量比常规方法大(如图 2 所示)^[11]。

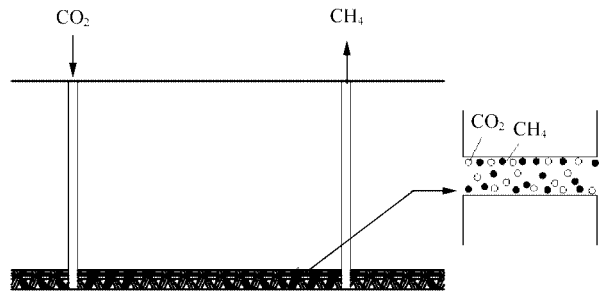


图 1 CO₂-ECBM 过程示意图

Fig.1 Schematic diagram for the process of CO₂-ECBM

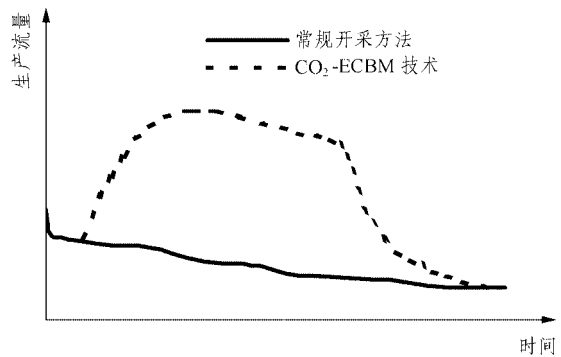


图 2 CO₂-ECBM 煤层气生产过程曲线示意图

Fig.2 Indicative diagram of coalbed methane production profiles with CO₂-ECBM

煤层气的存在证明煤可以储存气体达到数百万年。对于未开采的煤层，利用 CO₂-ECBM 开采煤层气，在开发煤层气之后，CO₂ 在煤层中的储存时间可以达到地质时代尺度^[12]。一般情况下，煤层气最佳开采深度为 300~1 500 m^[13]，本次研究仅对埋深在 300~1 500 m 之间煤层的 CO₂ 储存潜力进行评价。

3 中国 CO₂ 煤层储存潜力评价

煤层气资源量的计算方法很多，有含气量法(又称容积法)、压降曲线法、产量递减法、类比法、物质平衡法、气藏数值模拟法等。中国所进行的几次煤层气资源评价均采用含气量法^[7]，即

$$G = AT_H \rho_{\text{coal}} G_c \tag{1}$$

式中：G 为煤层气资源量(m³)，A 为含煤盆地的表面面积(m²)，T_H 为煤层的累计厚度(m)，ρ_{coal} 为煤

的密度(t/m³), G_c 为煤层含气量(m³/t)。

对于全国煤层气资源量,不同的单位和研究者在不同时期进行过预测和估算,结果各不相同(见表 1)^[7],其中被引用最多的是张新民等的评价结果。而中国石油天然气集团公司下属煤层气勘探项目经理部经过 6 a 多时间的研究与勘探,对全国五大聚煤区中 39 个主要含煤盆地 68 个有利含煤区内的煤层气资源量进行评价,埋深在 300 ~ 1 500 m 内煤层气总量为 27.34 × 10¹² m³,而且评价分区基本与张新民等的及第三次全国煤炭资源评价的含煤区相对应^[14]。本次评价以高瑞祺等的评价结果为基础,并结合张新民等的评价结果,将全国分为 68 个评价区(将鄂尔多斯盆地合为一个区,添加塔里木盆地东部区),其埋深 300 ~ 1 500 m 内的煤层气资源量为 27.61 × 10¹² m³。

表 1 中国煤层气资源量估算结果

Table 1 Estimation results of coalbed methane resources in China

研究人员和单位	年份	煤层气资源量 (/10 ¹² m ³)	计算范围
焦作矿业学院	1987	31.92	全国所有可采煤层
李明潮等	1990	32.15	全国所有可采煤层
地矿部石油地质研究所	1990	10.60 ~ 25.23	
张新民等	1991	30 ~ 35	未包括褐煤和藏、粤闽台地区以及 C ₁ , P ₁ 煤层
中国统配煤矿总公司	1992	24.75	全国所有可采煤层
段俊虎	1992	36.3	
关德师	1992	25 ~ 50	
张新民等	1995	32.68	未包括褐煤和藏、粤闽台地区以及 C ₁ , P ₁ 煤层
叶建平等	1998	14.34	未包括浅部的煤层气含量小于 4 m ³ /t 的区域
张新民等	2002	31.46	未包括褐煤和藏、粤闽台地区以及 P ₁ 煤层
高瑞祺等	2001	27.34	全国埋深 300 ~ 1 500 m 范围内的煤层

CO₂ 煤层可储存量包括利用 CO₂-ECBM 储存的 CO₂ 和开采煤层气后煤所能储存的 CO₂ 量。利用 CO₂-ECBM 技术进行煤层气开采时可储存在煤层中的 CO₂ 量,可用下式^[15]计算:

$$S_{CO_2} = a\rho_{CO_2} \sum_{i=1}^{68} \sum_{j=1}^{10} G_i \frac{C_{ij}}{C_i} RF_{ij} ER_{ij} \quad (2)$$

式中: S_{CO₂} 为 CO₂ 的可储存量(kg); a 为表征可采煤层气区面积占煤层总分布面积的比例,参考美国

等国家的经验,在此取 10%; ρ_{CO₂} 为标准压力和温度条件下的 CO₂ 密度,取 ρ_{CO₂} = 1.977 kg/m³; G_i 为第 i 评价区内的煤层气资源量(m³); C_i 为第 i 评价区的煤炭资源量(t); C_{ij} 为第 i 评价区第 j 种煤阶的煤炭资源量(t); RF_{ij} 为第 i 评价区第 j 种煤阶煤中利用 CO₂-ECBM 技术煤层气的可采系数; ER_{ij} 为第 i 评价区第 j 阶煤的 CO₂/CH₄ 置换比例。

中国煤层气开采程度很低,仅部分煤区开采,且开采煤层气后的煤仍可储存已开采煤层气体积 ER 倍的 CO₂,此部分储存潜力可用式(2)计算。

利用常规煤层气开采技术,RF 在 40% ~ 60% 之间,若采用 ECBM 技术,理论上可达 100%^[16]。文[17]根据我国部分煤层气试井数据,计算得我国煤层气的可采率平均值为 35%,变化区间为 8.9% ~ 74.5%。文[18]利用 CO₂-ECBM 技术,RF 可达 77% ~ 95%,RF 是煤阶的函数,随煤阶的增加而降低。文[19]利用 COMET2 对不同煤阶 CO₂-ECBM 产量进行模拟,得各煤阶中煤层气的可开采系数(见表 2)。

表 2 中国各煤阶的煤层气可采系数和 CO₂/CH₄ 置换比

Table 2 Values of RF and ER of different coal beds in China

煤阶	j	RF	ER
褐煤	1	1.00	10.0
不粘煤	2	0.67	10.0
弱粘煤	3	1.00	10.0
长焰煤	4	1.00	6.0
气煤	5	0.61	3.0
肥煤	6	0.55	1.5
焦煤	7	0.50	1.0
瘦煤	8	0.50	1.0
贫煤	9	0.50	1.0
无烟煤	10	0.50	1.0

煤阶不同,吸附能力不同,故 ER 是煤阶的函数,随着煤阶增大,ER 由 10 1 逐渐减小到 1 1,其函数关系^[19]为

$$\left. \begin{aligned} ER &= 2.573 8C_R^{-1.564 9} \\ R^2 &= 0.976 6 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: C_R 为煤阶,用反射率值表示。

根据式(3)和各煤阶的平均反射率,ER 取值见表 2。

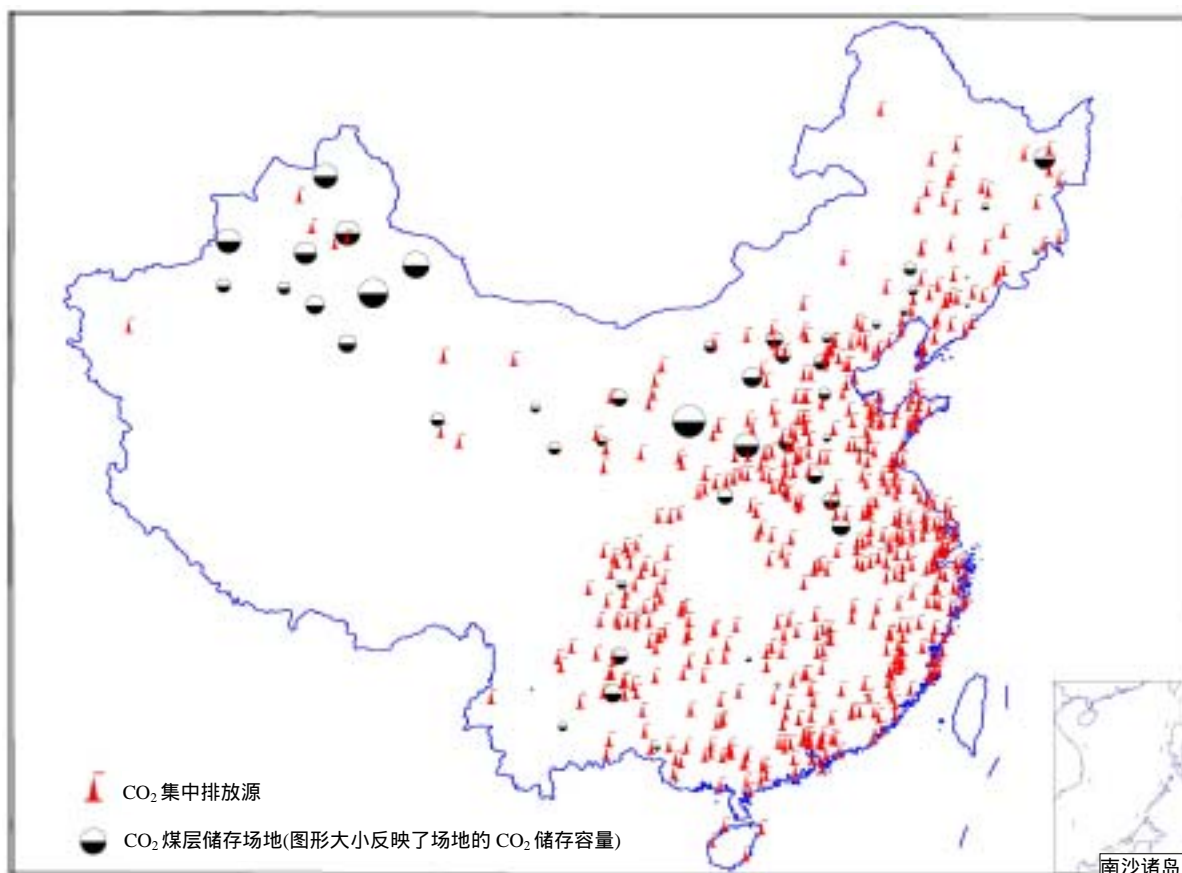
利用式(2)和表 2 中的 RF 和 ER 值,分别计算

各评价区中不同煤阶煤的 CO₂ 储存潜力, 结果见表 3 和图 3。由表 3 和图 3 可以看出, 根据以上条件, 利用 CO₂-ECBM 技术可使中国的煤层气平均可采率由 35% 提高到 59%, 在取可采煤层气面积占煤层总面积 10% 的情况下, 比常规开采技术所能开采的煤层气量多 $0.666 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。中国的 CO₂ 煤层储存潜力约为 $120.78 \times 10^8 \text{ t}$, 其中, 鄂尔多斯盆地、吐鲁

番-哈密盆地和准葛尔盆地的煤层 CO₂ 储存潜力最大, 三者占全国总储存量的 65.49%, 鄂尔多斯盆地的 CO₂ 煤层储存潜力达 $44.52 \times 10^8 \text{ t}$, 约占全国的 36.86%; 约 98% 的储存潜力分布在中国的北方; 华北地区储存场地与主要排放源的空间分布基本一致, 便于 CO₂ 的运输; 华南地区 CO₂ 储存潜力仅占全国的 2%, 其 CO₂ 储存应采用含水层或油气田等

表 3 中国 CO₂ 煤层储存潜力
Table 3 CO₂ storage capacity of Coalbeds in China

编号	评价区	可采煤层气量/(10 ⁸ m ³)		CO ₂ 煤层储存量 /(10 ⁸ t)	编号	评价区	可采煤层气量/(10 ⁸ m ³)		O ₂ 煤层储存量 /(10 ⁸ t)
		常规技术	CO ₂ -ECBM				常规技术	CO ₂ -ECBM	
1	准葛尔北部	278.06	518.20	5.30	36	蛟河—辽源	0.72	1.38	0.02
2	准葛尔东部	287.98	551.28	6.54	37	敦化—抚顺	2.19	5.93	0.11
3	准葛尔南部	243.29	436.60	3.42	38	延边	1.04	2.77	0.05
4	三塘湖	417.62	838.19	9.91	39	浑江—红阳	9.04	13.44	0.03
5	吐鲁番—哈密	953.44	1 868.21	21.95	40	松辽南缘	7.72	17.75	0.28
6	伊犁	258.61	496.67	5.63	41	阜新一彰武	3.60	6.63	0.07
7	尤尔都斯	25.51	44.45	0.26	42	北票—建昌	4.13	7.60	0.08
8	焉耆盆地	115.30	200.95	1.19	43	唐古拉	2.87	4.10	0.01
9	塔里木北部	36.28	62.63	0.36	44	土门—巴青	0.81	1.15	0.00
10	塔里木东部	97.40	169.75	1.01	45	昌都—芒康	0.83	1.26	0.01
11	柴达木北部	10.71	22.15	0.30	46	广旺	1.89	2.86	0.01
12	中祁连	22.19	37.41	0.25	47	雅乐	1.53	2.21	0.00
13	北祁连	5.35	10.12	0.11	48	华蓥山—永荣	35.54	51.16	0.11
14	靖远—景泰	23.64	36.42	0.14	49	川南—黔北	278.86	398.37	0.79
15	桌子山—贺兰山	100.64	146.92	0.38	50	六盘水	363.48	521.50	1.07
16	鄂尔多斯	2 745.84	4 820.44	44.52	51	渡口楚雄	4.42	6.67	0.02
17	大青山—乌拉山	5.32	14.35	0.27	52	昆明—开远	2.01	5.49	0.10
18	张家口	32.20	64.60	0.72	53	鄂中	0.33	0.47	0.00
19	宣化—蔚县	14.92	31.30	0.44	54	川鄂湘边	1.40	2.07	0.01
20	大同—宁武	162.83	282.04	1.64	55	桂中北	3.54	5.06	0.01
21	承德	15.77	25.32	0.11	56	百色	1.41	3.30	0.05
22	北京—唐山	77.28	124.08	0.55	57	南宁	0.95	2.10	0.03
23	大城	24.50	42.70	0.25	58	涟源—邵阳	11.65	16.83	0.04
24	沁水	2 170.07	3 100.10	6.13	59	郴州—资兴	10.07	14.41	0.03
25	太行山东麓	127.36	189.12	0.51	60	鄂赣边	1.13	1.61	0.00
26	豫西	129.08	190.16	0.56	61	萍乐	13.66	19.72	0.04
27	豫东	12.60	18.00	0.04	62	吉仪	0.30	0.43	0.00
28	鲁西	87.73	145.65	0.68	63	粤北	2.61	3.72	0.01
29	鲁中	7.25	11.51	0.04	64	广州	0.10	0.14	0.00
30	济南	6.35	10.81	0.07	65	苏浙皖边	3.41	5.19	0.02
31	鲁南	0.58	0.96	0.00	66	长江下游	3.20	4.59	0.01
32	徐州—淮北	107.31	173.61	0.78	67	浙赣边	1.45	2.34	0.01
33	淮南	167.48	270.95	1.22	68	永梅	8.52	12.18	0.02
34	三江—穆稜河	110.46	218.67	2.37					
35	依兰—伊通	1.12	3.21	0.06					
					全国总计		9 666.49	16 321.94	120.78

图 3 中国主要含煤区及其 CO₂ 储存量分布图Fig.3 Main coal fields and capacity for CO₂ coalbeds storage in China

方式。

4 结 论

中国煤炭和煤层气资源丰富,利用 CO₂-ECBM 技术可使煤层气总开采量达 $1.632 \times 10^{12} \text{ m}^3$,按热值效益计算,相当于 $16.32 \times 10^8 \text{ t}$ 标准煤,按燃烧效率计算,相当于 $65.29 \times 10^8 \text{ t}$ 煤;可以储存约 $120.78 \times 10^8 \text{ t}$ CO₂,相当于 2002 年全国 CO₂ 排放量的 3.6 倍。

由于中国的煤层气开采程度低,缺少煤层气开采的有关参数,特别是与 CO₂ 煤层储存相关的试验数据,此次评价所用参数大多借用美国的试验结果,评价结果可能存在偏差。为了能够更准确地评价中国煤层的 CO₂ 储存潜力,需要加强以下几方面的研究:

(1) 对各含煤区煤层气和煤炭资源开采状况以及不同煤阶煤的空间分布进行调查,确定具有商业开采价值的煤层气分布区;

(2) 对不同煤质煤对 CO₂ 和 CH₄ 的吸附特性进

行试验研究,获取适合中国煤阶分类的 CO₂/CH₄ 置换比;

(3) 测定不同煤阶煤吸附 CO₂ 前后的强度和渗透性能特征,为现场试验和数值模拟提供参数;

(4) 进行现场的 CO₂-ECBM 试验,并结合 CO₂-ECBM 数值模拟试验,获取不同煤阶煤中煤层气的可开采系数。

此外,随着科学技术的进步,煤层气可采面积占煤层总面积的比例将不断增加,相应的煤层气可开采量和 CO₂ 煤层储存容量随之增加。

参考文献(References):

- [1] IPCC. Climate change 2001[A]. In: The Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[C]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- [2] 吴 兑. 温室气体与温室效应[M]. 北京:气象出版社,2003.(Wu Dui. Greenhouse Gas and Greenhouse Effects[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2003.(in Chinese))
- [3] UNFCCC. Kyoto protocol to the united nations framework

- convention on climate change[R]. FCCC/CP/1997/L.7/Add.1, Bonn : [s. n.], 1997.
- [4] 国际能源署. 世界能源展望 : 2002[M]. 北京 : 中国石化出版社, 2004.(International Energy Agency. World Energy Outlook :2002[M]. Beijing : China Petrochemical Press , 2004.(in Chinese))
- [5] 李小春, 小出仁, 大隅多加志. 二氧化碳地中隔离技术及其岩石力学问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(6) : 989 - 994.(Li Xiaochun, Koide H, Ohsumi T. CO₂ aquifer storage and the related rock mechanics issues[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(6) : 989 - 994.(in Chinese))
- [6] 杨方之, 周荔青, 郭念发, 等. 江苏黄桥二氧化碳气田[M]. 北京 : 石油工业出版社, 2001.(Yang Fangzhi, Zhou Liqing, Guo Nianfa, et al. The CO₂ Gas Field in Huangqiao, Jiangsu Province[M]. Beijing : Petroleum Industry Press , 2001.(in Chinese))
- [7] 张新民, 庄 军, 张遂安. 中国煤层气地质与资源评价[M]. 北京 : 科学出版社, 2002.(Zhang Xinmin, Zhuang Jun, Zhang Suian. Coalbed Methane Geology and Resources Evaluation in China[M]. Beijing : Science Press , 2002.(in Chinese))
- [8] 毛节华, 许惠龙. 中国煤炭资源预测与评价[M]. 北京 : 科学出版社 ,1999.(Mao Jiehua, Xu Huilong. Prediction and Evaluation of Coal Resources in China[M]. Beijing : Science Press , 1999.(in Chinese))
- [9] 钟玲文. 煤的吸附性能及影响因素[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2004, 29(3) : 327 - 332.(Zhong Lingwen. Adsorptive capacity of coals and its affecting factors[J]. Earth Science —Journal of China University of Geosciences , 2004, 29(3) : 327 - 332.(in Chinese))
- [10] Schreurs H C E. 荷兰煤层气开发应用 CO₂ 注入技术的可行性——潜力与经济评价[A]. 见 : 2002 年第三届国际煤层气论坛论文集[C]. 徐州 : 中国矿业大学出版社, 2002. 79 - 87.(Schreurs H C E. Feasibility for enhanced coalbed methane in the Netherlands—potential and economic evaluation[A]. In : Proceedings of the Third International CBM/CMM Symposium in China[C]. Xuzhou : China University of Mining and Technology Press , 2002. 79 - 87.(in Chinese))
- [11] Gale J, Fraund P. Coal-bed methane enhancement with CO₂ sequestration worldwide potential[J]. Environmental Sciences, 2001, 8(3) : 210 - 217.
- [12] Stevens S H, Kuuskraa V A, Taber J J. Sequestration of CO₂ in depleted oil and gas fields ;barriers to overcome in implementation of CO₂ capture and storage (disused oil and gas fields)[A]. In : Report for the IEA Greenhouse Gas Research and Development Programme (PH3/22)[C]. Arlington : Advanced Recourses International , 1999.
- [13] ARI. Enhanced coalbed methane recovery with CO₂ sequestration[A]. In : Prepared for International Energy Agency Greenhouse Gas Research and Development Programme(PH3/3)[C]. Arlington : Advanced Recourses International , 1998. 8 - 8.
- [14] 高瑞祺, 赵政章. 中国油气新区勘探——中国煤层气勘探[M]. 北京 : 石油工业出版社, 2001. (Gao Ruiqi, Zhao Zhengzhang. The Frontier Petroleum Exploration in China—China's Coalbed Methane Exploration[M]. Beijing : Petroleum Industry Press , 2001.(in Chinese))
- [15] Hendriks C, Graus W, Bergen F. Global carbon dioxide storage potential and cost[R]. Netherlands : ECOFYS , 2004.
- [16] Stevens S H. CO₂ injection for enhanced coal bed methane recovery : project screening and design[A]. In : Proc. of the 1999 Int. CBM Symp.[C]. Tuscaloosa, Alabama : [s. n.], 1999.
- [17] 叶建平, 秦 勇, 林大扬. 中国煤层气资源[M]. 徐州 : 中国矿业大学出版社, 1998.(Ye Jianping, Qin Yong, Lin Dayang. Coalbed Methane Resources in China[M]. Xuzhou : China University of Mining and Technology Press , 1998.(in Chinese))
- [18] Reeves S R. The Coal-seq project :key results from field ,laboratory , and modeling studies[A]. In : Proc. of the 7th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies (GHGT - 7)[C]. Oxford, UK : Elsevier Science , 2004. 544 - 548.
- [19] Reeves S R. Assessment of CO₂ sequestration and ECBM potential of USA Coalbeds[R]. Houston : Advanced Recourses International , 2003.