

中国深部咸水含水层 CO₂ 储存优先区域选择

李小春, 刘延锋, 白冰, 方志明

(中国科学院 武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071)

摘要: CO₂ 地下储存可有效地减少人类活动排放到大气中的 CO₂ 量, 从而缓解日趋严重的全球气候变化问题。沉积盆地地下深部存在体积巨大的咸水含水层, 咸水不宜开发利用, 可用来储存大量的 CO₂。为了选出一些将来可优先利用的储存分区并进行详细研究, 在收集大量地质、水文地质、石油勘探等资料的基础上, 将中国大陆地区 24 个主要沉积盆地分为 70 个储存分区, 利用溶解度法计算了各储存分区地下 1~3 km 深度内咸水含水层的 CO₂ 储存容量。根据分区内及其周边 CO₂ 集中排放量, 对各分区进行了分级评价。研究表明, 中国咸水含水层 CO₂ 储存容量达 $1.435\ 05 \times 10^{11}$ t, 约为 2003 年中国大陆地区 CO₂ 排放量的 40.5 倍。华北平原大部, 四川盆地北部、东部和南部, 准葛尔盆地东南部都是将来优先考虑的 CO₂ 含水层储存地区。东南沿海和华南大部, 应考虑利用近海沉积盆地内的咸水含水层储存 CO₂。

关键词: 环境工程; 二氧化碳; 地下储存; 咸水含水层; 溶解度; 分级

中图分类号: X 701.7

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2006)05 - 0963 - 06

RANKING AND SCREENING OF CO₂ SALINE AQUIFER STORAGE ZONES IN CHINA

LI Xiaochun, LIU Yanfeng, BAI Bing, FANG Zhiming

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

Abstract: Geological storage is one of potentially effective means of reducing anthropogenic atmospheric emission of CO₂ to mitigate the worsening global climate change. The enormous saline aquifers deeply buried in the sedimentary basins are saturated with high concentration dissolved solids, which make groundwater unsuitable to any large-scale exploitation. Storing CO₂ in such aquifers is one of good options to reduce anthropogenic CO₂ emission. In order to select some preferential zones for commercial CO₂ storage in the near future, 24 major sedimentary basins in China Mainland are divided into 70 sub-regions and their CO₂ storage capacities in deep saline aquifers are estimated on the basis of geological, hydrogeological, water quality and geothermal data. All the sub-regions are graded into four ranks according to the CO₂ storage capacities and total CO₂ emission from the large-scale industrial sources inside and within 50 km and 100 km around each sub-region. The total storage capacity of CO₂ reaches to $1.435\ 05 \times 10^{11}$ t which is equal to 40.5 times against the total CO₂ emission of China in 2003. The sites in rank I are mainly located in North China Plain, Sichuan Basin and the southeast of Junggar Basin. The sites of east and southeast China are also potential storage candidates. In southeast coastal area and South China, CO₂ can be stored in the brine aquifer of sedimentary basins located on the continental shelf.

Key words: environmental engineering; carbon dioxide; geological storage; saline aquifer; solubility; ranking

收稿日期: 2005 - 10 - 15; **修回日期:** 2005 - 12 - 16

基金项目: 中国科学院百人计划项目

作者简介: 李小春(1964 -), 男, 博士, 1984 年毕业于重庆大学矿山工程专业, 现任研究员, 主要从事岩土工程安全性监测与评价、二氧化碳地下储存地层稳定性评价与工程设计理论方面的研究工作。E-mail: xcli@whrsm.ac.cn

1 引言

由温室气体浓度急剧升高引起的全球气候变化问题已经引起了人们的广泛关注。其中, CO_2 是温室效应的主要因素, 其作用占全部温室气体的 60% 以上^[1]。 CO_2 减排是缓解温室效应的必要措施。欧美国及日本的经验表明, 地下储存可能是处置 CO_2 的有效措施之一^[2]。可用于 CO_2 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^[3]。其中, 咸水含水层分布面积广, 厚度大, 储存容量巨大。尽管咸水含水层的研究程度低, 缺少基础设施, 但是在无大规模煤层和油气田的地区, 咸水含水层可能是主要的 CO_2 地下储存方式。

国际上, 含水层储存技术研究开始于 20 世纪 90 年代初期。许多学者已对部分发达国家(如美国、加拿大、英国、丹麦、荷兰、日本等)及全球范围内深部咸水含水层的 CO_2 储存容量进行了评价^[4-9]。挪威的 Sleipner 工程自 1996 年 10 月以来已向北海深部咸水含水层中注入 CO_2 超过 $7 \times 10^6 \text{ t}$ ^[10]。此外, 美国和日本已经开始进行现场试验, 部分发展中国家已经开始或正准备进行评价。

据美国能源部能源信息署(Energy Information Administration, EIA)统计结果, 中国大陆地区 2003 年的 CO_2 排放量为 $35.41 \times 10^8 \text{ t}$ ^[11], 为仅次于美国的第二大排放国。预计 2030 年中国的 CO_2 总排放量将达 $67.0 \times 10^8 \text{ t}$, 约占全世界的 17.6%, 从而成为第一大排放国^[12]。目前, 要求中国减排 CO_2 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, 因此中国必须尽快开展 CO_2 排放和处置方面的研究调查工作。与其他国家一样, CO_2 地下储存研究的第一步工作是储存容量评价和优先场地的选择。为此, 本文利用初步估算的中国各主要沉积盆地深部咸水含水层 CO_2 储存容量及其内部和周边的大规模 CO_2 集中排放源的排放量对各储存分区进行分级评价, 选出应优先进行详细研究的地区。

2 储存容量计算

2.1 储存机制

按照地层和构造特征, 储存场地可以分地质圈闭和单斜构造两类, 但其具有不同的储存机制和演化过程^[2, 13]。

2.1.1 地质圈闭

沉积盆地内往往分布有数目不等、规模不同的地层或构造圈闭。咸水含水层上部覆盖有隔水层, 在浮力作用下, 注入的超临界 CO_2 向上运动并聚集于地质圈闭内。顶部以分子扩散的形式向上运移, 底部不断溶解于地层水, 并随地层水流动, 可与周围矿物发生化学反应形成碳酸盐矿物沉淀。目前已经发现的大量的 CO_2 气田已经证明, 此部分 CO_2 储存时间可达地质时间尺度, 其储存容量取决于地质圈闭内的咸水含水层体积。由于缺少地质圈闭的详细资料, 以超临界 CO_2 方式储存的场地评价有待将来进行研究。

2.1.2 单斜构造

对于无大规模地质圈闭的单斜构造, 其储存方式以溶解储存为主。注入的超临界 CO_2 在浮力和水动力作用下呈羽状随地层水运动, 部分上升至咸水含水层顶部, 受隔水层阻挡, 在顶部汇集, 并在压力作用下沿水平向流动, 若存在小规模地质圈闭, 则在此汇集, 而其余部分则随地层水流动。在此过程中, 超临界 CO_2 不断溶解于地层水, 并与周围岩石矿物发生化学反应, 形成碳酸盐岩矿物沉淀。由此可见, 在单斜构造中, CO_2 的总储存容量包括小规模地质圈闭孔隙中的自由态、地层水中的溶解态和形成的碳酸盐矿物中的矿物态三部分组成。其中矿物态可永久性储存于地下, 但化学反应的过程非常缓慢, 需要数千年^[14, 15], 且溶解是发生化学反应的先决条件; 滞留于局部小规模地质圈闭中的 CO_2 往往会全部溶解于地层水中。由此可见, 可将单斜构造中咸水含水层所能溶解的最大 CO_2 量作为该含水层的 CO_2 储存容量, 直接利用溶解度法计算。

溶解方式储存的滞留时间取决于深部咸水含水层和顶部隔水层的渗透性以及距渗透边界的距离, 深部咸水含水层的渗透系数往往在 $10^{-3} \sim 10^{-2} \text{ m/a}$ 量级, 因此 CO_2 的滞留时间相当长, 可达数百至数百万年, 甚至数百万年。溶有 CO_2 的地层水抵达浅部, 压力降低, CO_2 会逸出, 伴随的温度降低和碳酸盐沉淀会减小或阻塞排泄通道, 从而降低 CO_2 逸出量, 但为了安全, 应根据地层和断层渗透性来确定储存范围。

2.2 潜在场地

中国陆地及大陆架分布有大量的沉积盆地, 分布面积广, 沉积厚度大, 可用于 CO_2 储存的咸水含水层体积大。为使评价对象更细化和具体, 将规模较大的盆地分成面积相近的几部分。图 1 显示了中国主要沉积盆地及其分区^[16]。图中海区盆地外侧

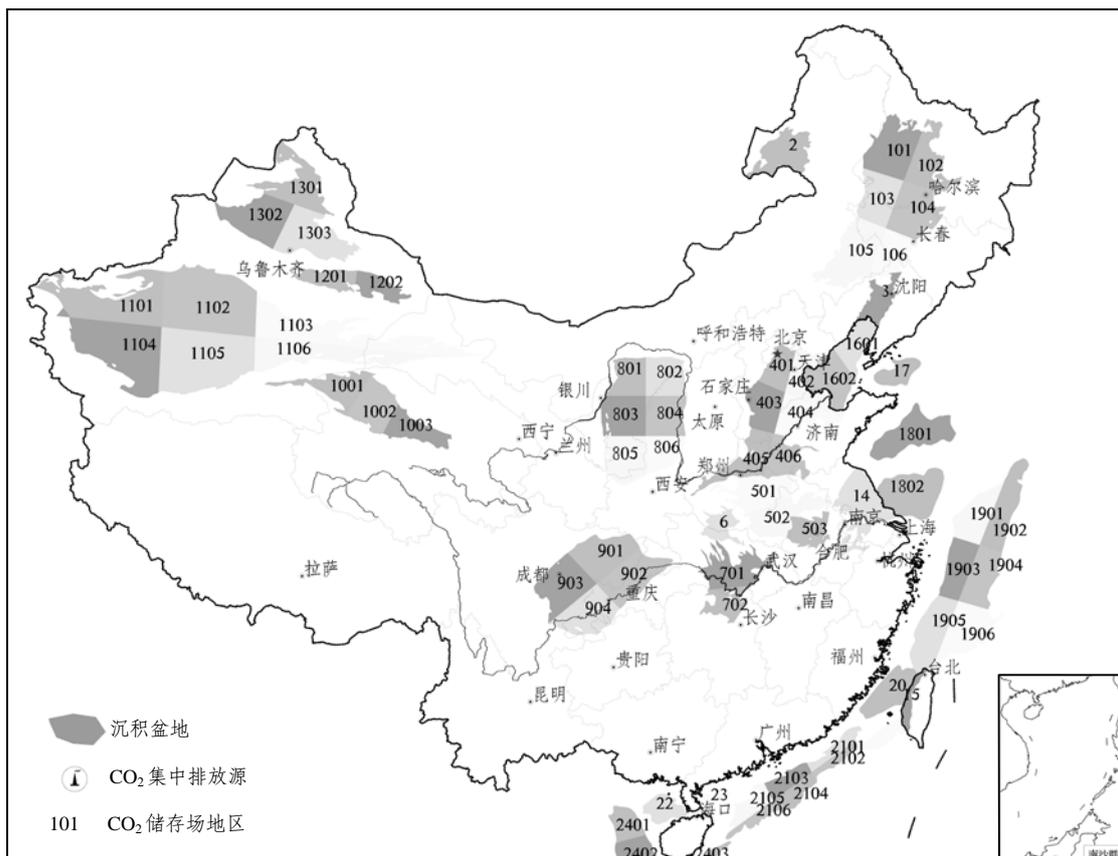


图 1 中国主要沉积盆地及其分区图(分区编号对应盆地见表 1)

Fig.1 Distribution map of main sedimentary basins in China and their ranking(the names of zones in this map are listed in Table 1)

边界为水深 200 m 边界线。

2.3 储存容量计算

2.3.1 计算范围

理论上整个盆地范围内的咸水含水层都能进行 CO₂ 储存。由于盆地内可能存在导水断层、城市、采矿以及地热开发等，并不是整个盆地都可以用来储存 CO₂。由于缺少详细的资料，难以确定平面计算范围，在此参考相关文献，取可用于储存 CO₂ 的平面分布面积为储存区总面积的 1%^[9, 17]。

CO₂ 注入咸水含水层后，由于存在密度差异，CO₂ 会在浮力作用下向上移动。密度差异越大，浮力越大，CO₂ 上移速率越大，因此最好使注入的 CO₂ 处于高密度的超临界状态以减小浮力，根据地温梯度和静水压力梯度，深度超过 800 m 时，地温和压力条件已超过 CO₂ 的临界点。

中国是大陆国家，地下水循环深度大，地层浅部含水层多为淡水，即使存在咸水，将来也可能被开采利用。综合考虑各方面因素，本次计算深度的最小值取为 1 km。随着深度的增加，压力和温度不断增加，而且孔隙度、渗透性不断降低，CO₂ 注入

成本不断升高，且注入的技术难度增加。考虑到注入的技术和经济可行性，此处计算的最大深度取为 3 km^[18]。

2.3.2 计算方法

由以上分析可知，溶解方式储存 CO₂ 的容量是指能够溶于咸水含水层中最大的 CO₂ 量，即咸水含水层中 CO₂ 达到饱和度时所能溶解的 CO₂。由于注入 CO₂ 之前，咸水含水层中含有少量 CO₂，据 S. Bachu 和 J. J. Adams(2003)^[2]计算结果可知，在不考虑咸水含水层原有碳含量的情况下，计算所得的 CO₂ 储存容量要高约 1.3%。咸水含水层在原状条件下的碳含量和 pH 值很难测得，此次直接采用饱和度计算^[18]。则计算公式可表示为

$$S_{CO_2} = aAh\eta nR\rho_w M_{CO_2} \tag{1}$$

式中： S_{CO_2} 为 CO₂ 含水层储存容量(g)； a 为可用于储存 CO₂ 的咸水含水层平面分布范围占总盆地的比例，根据 C. Hendriks 等^[9]和 H. Koide 等^[17]研究，取为 0.01； A 为分区面积(m²)； h 为沉积层厚度(m)，根据不同分区沉积层厚度由沉积厚度等值线确定；

η 为含水层厚度占总沉积层的比例, 在具详细地质资料的沉积盆地内利用实际咸水含水层厚度, 其他沉积盆地则取经验值 $0.1^{[18]}$; n 为孔隙度, 取 $0.05 \sim 0.25$, 无资料的沉积盆地内取经验值 $0.20^{[18]}$; R 为地层水中 CO_2 溶解度(mol/kg), 是地温、压力、 NaCl 浓度和 pH 值的函数, 此处采用 Z. H. Duan 和 R. Sun^[19] 的研究结果计算, 其中地温根据各沉积盆地 1, 2 和 3 km 地温等值线确定^[20], 相应压力采用静水

压力, NaCl 浓度和 pH 值取自《中国石油地质志》中各沉积盆地地层水水质分析资料; ρ_w 为储存深度条件下饱和 CO_2 的咸水密度(kg/m^3), 为含盐量的函数; M_{CO_2} 为 CO_2 的摩尔质量, 取为 44 g/mol 。

2.3.3 计算结果

根据各盆地地质、水文地质和石油地质等资料, 利用式(1)计算各主要沉积盆地咸水含水层的 CO_2 储存容量见表 1。

表 1 中国主要沉积盆地含水层储存场地评价

Table 1 Capacities, supply and rank of the main saline aquifers storage sites in China

盆地编号	盆地名称	CO ₂ 储存容量/(10 ⁸ t)	CO ₂ 排放量/(10 ⁶ t)			场地级别	盆地编号	盆地名称	CO ₂ 储存容量/(10 ⁸ t)	CO ₂ 排放量/(10 ⁶ t)			场地级别
			E ₀	E ₅₀	E ₁₀₀					E ₀	E ₅₀	E ₁₀₀	
101		8.78	12.03	27.66	27.66	II	1103		41.35		0.92	3.63	IV
102		6.43		29.29	31.26	II	1104	塔里木盆地	48.29	0.11	0.11	1.09	IV
103	松辽盆地	6.52	40.76	59.51	59.51	I	1105		56.38				IV
104		7.91	19.88	69.22	70.39	II	1106		30.25		0.19	3.09	IV
105		9.80	6.40	22.76	41.39	II	1201	吐鲁番盆地	7.02			29.66	III
106		4.99	15.79	40.15	65.48	IV	1202	哈密盆地	6.40				IV
2	海拉尔盆地	1.50				IV	1301		14.14	7.80	7.80	10.41	IV
3	渤海湾盆地(辽宁)	6.95	14.08	78.86	101.44	II	1302	准葛尔盆地	15.80		3.87	33.53	III
401		10.00	30.27	85.85	170.31	I	1303		16.94	30.92	30.92	30.92	I
402		15.11	109.52	153.68	246.92	I	14	苏北盆地	7.30	79.14	284.47	386.44	I
403	渤海湾盆地(华北)	14.17	26.51	106.33	148.93	I	15	台湾西部盆地	3.54				IV
404		13.32	53.40	153.05	272.03	I	1601	渤海湾盆地(海域)	35.25		42.68	68.29	II
405		15.69	100.49	161.51	234.35	I	1602		48.83		114.90	185.80	II
406		12.15	74.23	197.27	311.37	I	17	北黄海盆地	3.46		11.62	16.41	IV
501		11.00	25.34	88.61	248.07	I	1801	南黄海盆地北部	31.65			15.95	IV
502	河淮盆地	10.78	9.06	69.19	195.56	II	1802	南黄海盆地南部	4.98		7.30	90.95	IV
503		6.37	32.87	119.37	252.27	I	1901		24.22				IV
6	南襄盆地	3.54	6.51	6.62	49.64	IV	1902		27.98				IV
701	江汉盆地	8.00	35.47	84.60	103.99	I	1903		22.45				IV
702	洞庭盆地	4.39	1.59	24.29	75.90	IV	1904	东海盆地	24.76				IV
801		10.00		30.77	56.12	II	1905		31.48			9.21	IV
802		12.26	1.26	26.79	26.79	II	1906		43.73				IV
803	鄂尔多斯盆地	14.14		29.40	45.09	II	1907		10.42				IV
804		12.91	1.69	6.06	13.69	IV	20	台湾西侧盆地	59.45		0.23	24.07	III
805		14.44	9.61	20.32	50.62	II	2101		38.70			10.07	IV
806		9.42	2.61	13.19	68.80	III	2102		27.54				IV
901		15.72	20.32	35.98	104.77	I	2103	珠江口盆地	46.26			7.79	IV
902	四川盆地	16.06	4.53	65.46	78.87	II	2104		44.98				IV
903		16.57	40.76	60.44	110.16	I	2105		49.10			0.65	IV
904		15.72	57.77	84.31	108.42	I	2106		30.54			0.28	IV
1001		36.64				IV	22	北部湾盆地	29.81		1.03	9.02	IV
1002	柴达木盆地	41.63				IV	23	濠州岛盆地	3.85		3.81	20.71	IV
1003		31.09		1.26	1.26	IV	2401	莺歌海盆地	9.65			1.05	IV
1101	塔里木盆地	42.57	0.47	0.47	1.56	IV	2402		12.41			1.23	IV
1102		59.86	1.20	1.67	2.06	IV	2403	琼东盆地	3.70			0.18	IV

注: (1) E₀ 为分区内 CO₂ 大规模集中排放源的年排放总量; (2) E₅₀ 为分区内及周边 50 km 范围内的 CO₂ 大规模集中排放源的年排放总量; (3) E₁₀₀ 为分区内及周边 100 km 范围内的 CO₂ 大规模集中排放源的年排放总量。

3 场地分级

影响储存场地 CO₂ 储存经济性的因素主要有含水层的可注入性、储存容量和 CO₂ 供给潜力等^[18]。由于缺少详细的地层渗透系数和地质结构数据，很难评价各储存场地的可注入性。在此仅根据各分区的 CO₂ 储存容量、其内部及其周边 50 和 100 km 范围内的大规模 CO₂ 集中排放源的排放总量来进行评价。

利用 GIS 空间分析中的点区相交和缓冲区技术，分别统计储存分区内及其周围 50 和 100 km 范围内的大规模 CO₂ 集中排放源的排放总量(见表 1)。为了使不同级别的场地数目相对均匀，本文制定了分级标准(见表 2)。根据表 2 所列的分级标准对各储存场地进行分级，分级结果见表 1。图 2 列出了 I 级区的分布。由表 1 和图 2 可知，I 级区为华北平

表 2 CO₂ 储存场地分级标准

Table 2 Ranking criteria of CO₂ storage fields

场地级别	储存容量 /(10 ⁸ t)	E ₀ /(10 ⁶ t·a ⁻¹)	E ₅₀ /(10 ⁶ t·a ⁻¹)	E ₁₀₀ /(10 ⁶ t·a ⁻¹)
I	≥5	≥20		
II	≥5	<20	≥20	
III	≥5	<20	<20	≥20
IV	其他	其他	其他	其他

原大部、四川盆地大部、准葛尔盆地东南部以及苏北盆地，它们几乎不需要管道输送，因此成本低。I 级区内总的 CO₂ 储存容量达 184.58×10⁸ t，占全部咸水含水层储存容量 12.8%；I 级分区周围 100 km 范围(包括分区内部)的大规模 CO₂ 排放源排放量约 16.61×10⁸ t，占排放总量的 56.1%；其储存容量可以储存 I 级分区内部及其周围 100 km 以内的大规模 CO₂ 集中排放源 11.1 a 的排放量。

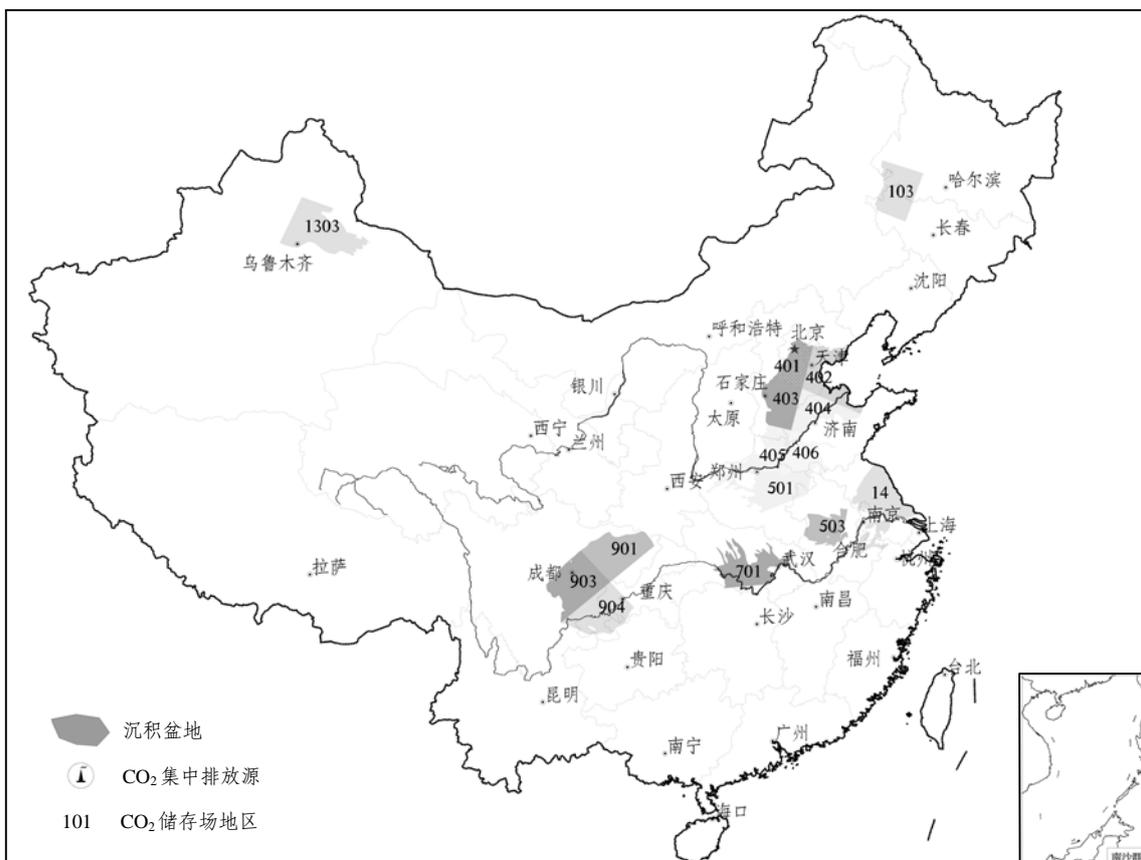


图 2 I 级储存分区分布图

Fig.2 Distribution of storage regions rank I

4 结 论

利用溶解度法计算的中国咸水含水层 CO₂ 储存容量约为 $1.435\ 05 \times 10^{11}$ t, 相当于中国大陆地区 2003 年 CO₂ 排放总量的 40.5 倍。其中, 陆地区的储存容量约为 773.80×10^8 t, 约占总储存容量的 53.92%; 大陆架区的储存容量约为 661.25×10^8 t, 约占总储存容量的 46.08%。

华北平原大部、四川盆地大部、准葛尔盆地东南部及苏北盆地的储存容量大, CO₂ 集中排放源密集, 排放量大, 是应该首先考虑进行详细研究的地区。华南和东南沿海地区 CO₂ 排放量大, 但无较大规模沉积盆地, 在无其他储存措施的情况下, 可考虑利用近海的沉积盆地进行储存。

本研究是以沉积盆地为单位对全国范围内的咸水含水层 CO₂ 储存容量进行评价, 精度相对较低。今后应在 I 级场地内进行详细区划, 以构造单元为基础, 建立深部咸水含水层结构模型和地下水流动模型, 圈定安全可靠的储存场地并确定其 CO₂ 储存容量, 评价其技术和经济可行性, 确定更加合理的储存容量评价方法和场地的分级评价标准。

参考文献(References):

- [1] IPCC. Climate change 2001: the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change[R]. Cambridge: Cambridge University, 2001.
- [2] Bachu S, Adams J J. Sequestration of CO₂ in geological media in response to climate change: capacity of deep saline aquifers to sequester CO₂ in solution[J]. Energy Conversion and Management, 2003, 44(20): 3 151 - 3 175.
- [3] 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, Hitoshi K, Takashi O. CO₂ aquifer storage and the related rock mechanics issues[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(6): 989 - 994.(in Chinese))
- [4] Dahowski R T, Dooley J J, Davidson C L, et al. A CO₂ storage supply curve for North America[R]. IEA: Greenhouse Gas R&D Programme, 2004. 15 - 20.
- [5] Holloway S, Savage D. The potential for aquifer disposal of carbon dioxide in the UK[J]. Energy Conversion and Management, 1993, 34(9 - 11): 925 - 932.
- [6] Krom T D, Jacobsen F L, Ipsen K H. Aquifer based carbon dioxide disposal in Denmark: capacities, feasibility, implications and state of readiness[J]. Energy Conversion and Management, 1993, 34(9 - 11): 933 - 940.
- [7] van der Meer L G H. Investigations regarding the storage of carbon dioxide in aquifers in the Netherlands[J]. Energy Conversion and Management, 1992, 33(5 - 8): 611 - 618.
- [8] Tanaka S, Koide H, Sasagawa A. Possibility of underground CO₂ storage in Japan[J]. Energy Conversion and Management, 1995, 36(6 - 9): 527 - 530.
- [9] Hendriks C, Graus W, van Bergen F. Global carbon dioxide storage potential and costs[R]. [s. l.]: [s. n.], 2004. 24 - 25.
- [10] Torpa T A, Gale J. Demonstrating storage of CO₂ in geological reservoirs: the Sleipner and SACS projects[J]. Energy, 2004, 29(9 - 10): 1 361 - 1 369.
- [11] Energy Information Administration. International Energy Annual 2003[OL]. http: //www.eia.doe.gov/environment.html, 2003.
- [12] 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))
- [13] Bachu S, Gunter W D, Perkins E H. Aquifer disposal of CO₂: hydrodynamic and mineral trapping[J]. Energy Conversion and Management, 1994, 35(4): 269 - 279.
- [14] Gunter W D, Perkins E H, McCann T J. Aquifer disposal of CO₂-rich gases: reaction design for added capacity[J]. Energy Conversion and Management, 1993, 34(9 - 11): 941 - 948.
- [15] Xu T, Apps J A, Pruess K. Reactive geochemical transport simulation to study mineral trapping for CO₂ disposal in deep arenaceous formations[J]. Journal of Geophysical Research, 2003, 108(B2): 2 071 - 2 084.
- [16] 任纪舜. 中国及邻区大地构造图(1 : 5 000 000)[M]. 北京: 地质出版社, 2000.(Ren Jishun. Geotectonics Map of China and Its Vicinage (1 : 5 000 000)[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2000.(in Chinese))
- [17] Koide H, Tazaki Y, Noguchi S, et al. Subterranean containment and long-term storage of carbon dioxide in unused aquifers and in depleted natural gas reservoirs[J]. Energy Conversion and Management, 1992, 33(5 - 8): 619 - 626.
- [18] Li X, Ohsumia T, Koide H, et al. Near-future perspective of CO₂ aquifer storage in Japan: site selection and capacity[J]. Energy, 2005, 30(11 - 12): 2 360 - 2 369.
- [19] Duan Z H, Sun R. An improved model calculating CO₂ solubility in pure water and aqueous NaCl solutions from 273 to 533 K and from 0 to 2 000 bar[J]. Chemical Geology, 2003, 193: 257 - 271.
- [20] 王 钧, 黄尚瑶, 黄歌山, 等. 中国地温分布的基本特征[M]. 北京: 地震出版社, 1990.(Wang Jun, Huang Shangyao, Huang Geshan, et al. The Basic Distribution Characteristics of Geotemperature in China[M]. Beijing: Earthquake Press, 1990.(in Chinese))