

王敬霞,雷磊,于青春. 我国碳酸盐岩储层 CO<sub>2</sub> 地质储存潜力与适宜性[J]. 中国岩溶, 2015, 34(2): 101-108.  
DOI: 10. 11932/karst20150202

# 我国碳酸盐岩储层 CO<sub>2</sub> 地质储存潜力与适宜性

王敬霞<sup>1</sup>, 雷磊<sup>2</sup>, 于青春<sup>1</sup>

(1. 中国地质大学(北京)水资源与环境工程学院, 北京 100083;  
2. 中国电力工程顾问集团华北电力设计院有限公司, 北京 100120)

**摘要:** 文章系统收集并分析了我国各盆地地层、大地构造、油田地质、水文地质数据, 研究了我国各盆地碳酸盐岩地层空间分布和孔隙度特性, 做出了《全国盆地碳酸盐岩分布面积分级图》、《全国盆地碳酸盐岩厚度分级图》、《全国盆地碳酸盐岩孔隙度分级图》、《全国盆地碳酸盐岩二氧化碳地质储存潜力分级图》。逐一对全国各沉积盆地内 800~5 000 m 深度区间各地质时代形成的碳酸盐岩储层的 CO<sub>2</sub> 储存能力进行了计算。通过层次分析法确定各评价指标权重, 制做出全国盆地 E 级碳酸盐岩储层 CO<sub>2</sub> 地质储存适宜性评价结果表, 绘制出《全国盆地碳酸盐岩储层 CO<sub>2</sub> 储存适宜性评价图》。对全国盆地 CO<sub>2</sub> 储存进行了适宜性评价, 剔除了不适宜 CO<sub>2</sub> 地质储存的沉积盆地, 选出适宜的沉积盆地以供下一阶段继续研究。

**关键词:** 碳酸盐岩; 沉积盆地; CO<sub>2</sub>; 地质储存; 储存潜力; 适宜性

**中图分类号:** P618.13; X141 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4810(2015)02-0101-08

## 0 引言

CO<sub>2</sub> 是最重要的温室气体, 减少 CO<sub>2</sub> 排放, 开发 CO<sub>2</sub> 储存技术愈来愈受关注。20 世纪 70 年代 CO<sub>2</sub> 地质储存技术被提出用于 CO<sub>2</sub> 减排后, 许多国家把 CO<sub>2</sub> 地质储存调查评价作为地质工作的重点<sup>[1]</sup>。20 世纪 90 年代各国政府认为 CCS (Carbon Dioxide Capture and Storage) 技术是减少 CO<sub>2</sub> 最直接、有效的方法。可以进行 CO<sub>2</sub> 封存的场所包括煤层、油气藏、深部咸水层等, 我国很多油气藏和深部咸水层均埋藏在碳酸盐岩中, 我国分布广泛的碳酸盐岩地层为 CO<sub>2</sub> 封存提供了广阔的空间, 因此评价我国碳酸盐岩储层 CO<sub>2</sub> 地质储存潜力与适宜性具有重要意义。

Bachu 最早提出了系统的 CO<sub>2</sub> 地质储存潜力评价方法理论<sup>[2]</sup>。IPCC (政府间气候变化专门委员会) 在 2005 年提出了 CO<sub>2</sub> 地质储存潜力与适宜性评价的总体框架<sup>[3]</sup>。2003 年 Bachu 和 Adams 提出了一

套包括 15 项指标的盆地级别评价指标体系, 并对加拿大的主要沉积盆地进行了评价<sup>[4]</sup>。Oldenburg 在 2008 年综合考虑 CO<sub>2</sub> 地质储存的健康、安全和环境风险的基础上, 建立了 CO<sub>2</sub> 地质储存的筛选评价指标体系和评价方法<sup>[5]</sup>。这些评价指标体系和评价方法为评价我国碳酸盐岩沉积盆地 CO<sub>2</sub> 地质储存潜力与适宜性提供理论基础。

张炜<sup>[6]</sup>系统论述 CO<sub>2</sub> 注入的碳酸盐岩沉积盆地中的咸水含水层应具有可储存性、可注入性和盖层安全性特征, 详细研究了 CO<sub>2</sub> 地质封存评估方法。李旭峰<sup>[7]</sup>等在塔里木盆地奥陶系礁灰岩 CO<sub>2</sub> 毛细残余封存能力实验研究中提出了测定残余气饱和度的实验方法; 同时, 常春<sup>[8]</sup>、刘侃<sup>[9]</sup>等在塔里木盆地奥陶系礁灰岩地层构造封存能力参数实验研究中提出了测定残余水饱和度的实验方法, 这些方法实际对我国塔里木盆地 CO<sub>2</sub> 地质储存潜力进行了评价, 结果表明盆地内 1 500~6 500 m 深度范围埋藏在碳酸盐岩、碎

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41272387, 40772208); 国家公益性基金项目(201211063-04); 中央高校基本科研业务专项资金(2652015235)

第一作者简介: 王敬霞(1988-), 女, 博士研究生, 水文地质学专业。

通讯作者: 于青春(1963-), 男, 教授, 主要从事水、工、环方面研究。E-mail: xuqch@cugb.edu.cn。

收稿日期: 2015-01-20

屑岩中的所有油气田和深部咸水含水层中  $\text{CO}_2$  地质储量约为 501.05 亿吨。范明<sup>[10]</sup> 等研究不同温度条件下  $\text{CO}_2$  水溶液对碳酸盐岩的溶蚀作用;刘侃<sup>[11]</sup> 等对塔里木盆地巴楚地区奥陶系礁灰岩  $\text{CO}_2$  地质储存的溶解溶蚀特征研究时发现,超临界  $\text{CO}_2$  环境引起礁灰岩溶解,导致孔隙度增大,从而影响其储层的  $\text{CO}_2$  埋存储量。常春等进行超临界  $\text{CO}_2$  和水在低渗透性的砂岩和各向异性的碳酸盐岩中的动态驱替排水实验研究表明,水的不均一性驱替导致较高的残余水饱和度,并降低了靶区的  $\text{CO}_2$  的地质储量<sup>[12]</sup>。 $\text{CO}_2$  溶解度是进行咸水含水层  $\text{CO}_2$  储存能力评价和泄露风险评估等工作的重要参数,王璐<sup>[13]</sup> 对地下咸水中  $\text{CO}_2$  溶解能力进行了研究,为神华 CCS 100 kt/a  $\text{CO}_2$  封存示范项目选择在鄂尔多斯盆地石炭系—侏罗系碎屑岩裂隙含水层和寒武系—奥陶系碳酸盐岩含水层进行  $\text{CO}_2$  封存提供依据。庞忠和<sup>[14]</sup> 等研究新近系馆陶组咸水层,提出了集地热和  $\text{CO}_2$  地质封存于一体的  $\text{CO}_2$ -EATER 模式,以  $\text{CO}_2$  作为化学激活剂,将其注入到砂岩储层中,通过与储层的碳酸盐矿物反应而提高储层的渗透率和孔隙度,达到提高储层回灌率和地热能开采效率的目的,在此过程中  $\text{CO}_2$  消耗于储层中,实现减排。

本文通过系统收集、分析我国各盆地地层、大地构造、油田地质、水文地质数据,旨在研究了我国各盆地碳酸盐岩地层空间分布和孔隙度性;评价全国碳酸盐岩沉积盆地  $\text{CO}_2$  地质储存潜力与适宜性,淘汰出部分不适宜  $\text{CO}_2$  地质储存的盆地,确定适宜  $\text{CO}_2$  地质储存的沉积盆地以供开展下一阶段研究。

## 1 我国碳酸盐岩分布及沉积特点

我国的碳酸盐岩地层基本上分布于以天山—阴山纬向构造带以南(北纬  $42^\circ \sim 43^\circ$  以南),此纬线以北基本无碳酸盐岩沉积,或仅有小部分碳酸盐岩地层出露。

我国碳酸盐岩地层部分产于沉积盖层,部分产于褶皱基底层。既有稳定的地台型碳酸盐岩沉积建造,又有活动型碳酸盐岩—碎屑岩沉积构造。地台型碳酸盐岩沉积常位于沉积盖层的中下部,这个部位的碳酸盐岩层往往厚度巨大且沉积连续,沉积厚度可连续达千米以上。地槽区对碳酸盐岩的沉积起到一定的抑制作用,碳酸盐岩沉积范围小且厚度较薄,多以夹层或区域性透镜体形式出现。

我国区域地壳的稳定性、演化进程及古地理环境等因素决定着碳酸盐岩地层的沉积特征及其时、空分布规律。从碳酸盐岩沉积地层岩性来看,白云岩亚类随着新地层的沉积而逐渐减少。我国碳酸盐岩时空分布特征表现为:燕辽地区的碳酸盐岩沉积时期为长城纪至奥陶纪,华北地区为寒武纪至奥陶纪,扬子准地台为震旦纪至三叠纪的断续沉积,华南地区为泥盆纪至二叠纪,而西南地区的碳酸盐岩层则可延续至白垩纪。

我国地台型碳酸盐岩沉积主要分布在华北区、塔里木区、扬子区、华南区、江南区。从目前地层保存情况来看主要分布在西北、华北和南方三个区,分布面积近 300 万  $\text{km}^2$ ,这些地区碳酸盐岩沉积范围广,厚度较大<sup>[15]</sup>,如图 1 所示。从沉积地层上看,寒武—奥陶纪以及二、三叠纪是我国碳酸盐岩沉积建造的鼎盛时期。碳酸盐岩地层在泥盆纪、石炭纪、侏罗纪、白垩纪也有少量分布,相比寒武—奥陶纪以及三叠纪来说,这些地层的碳酸盐岩储层分布面积及厚度都较为有限。

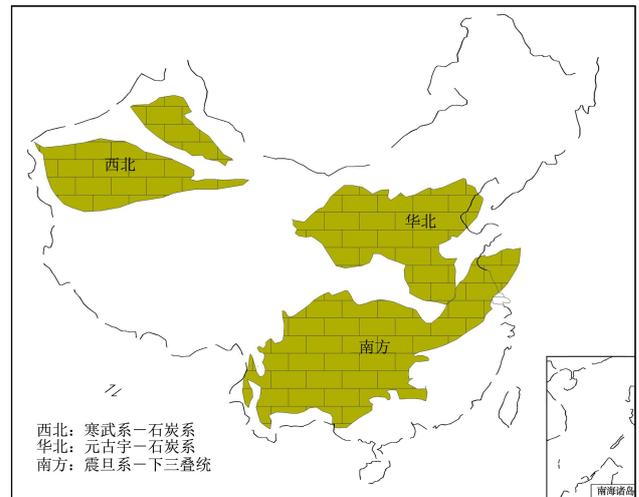


图 1 中国古生界海相沉积盆地碳酸盐岩分布示意图

(赵政璋等,2009)

Fig. 1 Map showing distribution of carbonate formations in sedimentary basins of Paleozoic marine facies in China mainland

## 2 我国盆地碳酸盐岩 $\text{CO}_2$ 地质储存潜力

### 2.1 我国盆地 $\text{CO}_2$ 在碳酸盐岩中储存量的计算方法及评价参数

碳酸盐岩  $\text{CO}_2$  储存是将  $\text{CO}_2$  储存到盆地中含有碳酸盐岩地层孔隙中去。因此,对评价方法首先做如

下基本假设:适合 CO<sub>2</sub> 储存的碳酸盐岩层埋存深度在 800~5 000 m 范围内,大于 5 000 m 或小于 800 m 的碳酸盐岩不予考虑。对于碳酸盐岩层、油气田和深部含水层不重复考虑。CO<sub>2</sub> 的溶解储存与碳酸盐岩储层中化学特征和压力温度有很大的关系,因此对盆地中储存 CO<sub>2</sub> 的地点要求十分明确。对于国家级 E 级控制潜力评价而言其计算公式如下:

$$M_{\text{CO}_2 t} = A \times H \times \varphi \times \rho_{\text{CO}_2} \quad (1)$$

$$M_{\text{CO}_2 \text{es}} = C_E \times M_{\text{CO}_2 t} \quad (2)$$

式中: $M_{\text{CO}_2 t}$ —CO<sub>2</sub> 在盆地碳酸盐岩层中理论储量;

$M_{\text{CO}_2 \text{es}}$ —CO<sub>2</sub> 在碳酸盐岩储层中的有效储量;

$\rho_{\text{CO}_2}$ —CO<sub>2</sub> 在碳酸盐岩储层条件下的密度,kg/m<sup>3</sup>;

$A$ —盆地中碳酸盐岩储层有效分布面积,m<sup>2</sup>;

$H$ —盆地中碳酸盐岩储层平均碳酸盐岩厚度,m;

$\varphi$ —盆地中碳酸盐岩储层平均孔隙度,无量纲;

$C_E$ —有效储存系数,无量纲。

目前文献尚未对有效储存系数( $C_E$ )给出具体的值,该值要根据具体情况和已有的工程经验来确定,本文取 0.024。

根据上述计算公式可以看出,碳酸盐岩储层 CO<sub>2</sub> 地质储存潜力的评价参数主要是盆地内碳酸盐岩储层分布面积、平均厚度、平均孔隙度和储层深度下 CO<sub>2</sub> 的密度等。

## 2.2 华北地区

华北地区的碳酸盐岩储层主要沉积于中元古代和早古生代早中期。前一期的碳酸盐岩储层主要分布在华北北部,而后一期的碳酸盐岩储层则广泛分布于华北地区的中、南部及西部地区。渤海湾盆地碳酸盐岩储层主要分布在寒武纪和奥陶纪地层。寒武纪地层岩性主要以白云岩、鲕粒灰岩夹页岩、泥岩为主,孔隙度介于 0.85%~4.10% 之间,平均孔隙度为 2.20%。奥陶纪地层岩性主要以灰岩为主夹少量页岩,孔隙度介于 3.16%~10.68% 之间,平均孔隙度为 6.64%。碳酸盐岩储层埋深主要在 3 800~5 000 m 范围内。渤海湾盆地地温梯度为 3.8 °C/100 m<sup>[16]</sup>,在碳酸盐岩地层埋深处,CO<sub>2</sub> 地层压力值为 40.0 Mpa。渤海湾盆地碳酸盐岩 CO<sub>2</sub> 理论储量为 24 421.45 亿吨,有效储量为 586.12 亿吨。

## 2.3 川渝地区

四川盆地继承发育了扬子地台四川台坳,震旦系至中、下三叠统海相地层特别发育。从地质岩性上分析,四川盆地适宜于储存 CO<sub>2</sub> 的碳酸盐岩地层主要是三叠系的飞仙关组和嘉陵江组,埋深主要在 5 000

m 范围内。飞仙关组碳酸盐岩分布面积为 167 230 km<sup>2</sup>,厚度为 450 m,其岩性为灰色泥灰岩、石灰岩、鲕状灰岩互层沉积,飞三段(T<sub>1</sub>f<sub>3</sub>)鲕状灰岩及白云岩孔隙度 0.30%~11.54%,平均孔隙度取 6.29%。嘉陵江组碳酸盐岩分布面积为 167 230 km<sup>2</sup>,厚度为 435 m,孔隙度取 6.29%。四川盆地碳酸盐岩 CO<sub>2</sub> 理论储量为 66 458.30 亿吨,有效储量为 1 595.00 亿吨。

## 2.4 新疆地区

新疆地区古生代与中、新生代沉积叠合盆地中石炭系、奥陶系和寒武系主要是碳酸盐岩,分布面积、厚度及孔隙度都比较适合 CO<sub>2</sub> 储存。塔里木盆地石炭系碳酸盐岩储层主要包括生屑灰岩段、标准灰岩段及小海子组灰岩段,碳酸盐岩厚 30~400 m,地层埋深平均 3 500~5 000 m 左右,地层压力约为 35~57 Mpa。巴楚生屑灰岩段岩性主要为砂屑灰岩、白云岩及灰质白云岩,孔隙度平均值在 5% 以上,最大孔隙度达到 22%。塔里木盆地碳酸盐岩 CO<sub>2</sub> 理论储量为 15 881.52 亿吨,有效储量为 380.96 亿吨。

## 2.5 滇黔桂地区

滇黔桂地区沉积盆地碳酸盐岩地层以震旦系、下二叠统及三叠系为主,地层中适宜 CO<sub>2</sub> 储存的碳酸盐岩主要以白云岩和生物礁为主,属低渗储集岩。兰坪—思茅盆地下二叠统茅口组地层孔渗性相对较好,并且地层广布全区,主要集中在盆地东西两翼,分布面积为 69 000 km<sup>2</sup>,平均厚度为 406.5 m,主要为颗粒灰岩及亮晶颗粒灰岩。石炭系储集岩也相当发育,地层主要分布在景谷勐腊凹陷和景星江城凹陷中,分布面积为 30 600 km<sup>2</sup>,厚为 615 m,主要为泥微晶颗粒灰岩,孔隙率好,渗透率相对偏低。兰坪—思茅盆地碳酸盐岩 CO<sub>2</sub> 理论储量为 4 073.66 亿吨,有效储量为 97.77 亿吨。

## 2.6 陕甘宁地区

鄂尔多斯盆地碳酸盐岩储层主要分布在奥陶系的马家沟组和寒武系地层中,马家沟组分布广泛,碳酸盐岩储层平均厚度为 450 m,寒武系地层各组碳酸盐岩分布区域较为广范,地层碳酸盐岩平均厚度为 350 m。整体来说,寒武、奥陶地层孔隙度大小为 4%~7%,最高 19.8%,渗透率(0.05~10)×10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>。鄂尔多斯盆地碳酸盐岩 CO<sub>2</sub> 理论储量为 75 189.35 亿吨,有效储量为 1 804.54 亿吨。

## 2.7 西藏地区

西藏地区及青海近邻上古生代地层岩性以海相、

浅海陆棚相的碳酸盐岩为主夹各种碎屑岩,中生代地层岩系由南向北、自新至老由海相沉积逐渐过渡到陆相沉积为主,第三纪地层在雅鲁藏布江断裂带以南为海相。羌塘盆地碳酸盐岩储层主要发育白云岩和礁灰岩。白云岩孔隙度范围在 2.37%~14.20%之间,均值为 7.19%;渗透率介于  $(0.058 \sim 14.572) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  之间,均值为  $5.25 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。生物礁岩中孔、缝少量发育,孔缝率约为 1%~3%。北羌塘适宜 CO<sub>2</sub> 储存的碳酸盐岩储层主要分布在侏罗系的索瓦组,厚度为 284~1 228 m,碳酸盐岩平均厚度为 516 m。南羌塘上侏罗统索瓦组的碳酸盐岩地层沉积厚度为 283~1 825 m。碳酸盐岩储层平均厚度为 430 m。羌塘盆地碳酸盐岩 CO<sub>2</sub> 理论储量为 14 896.51 亿吨,有效储量为 357.52 亿吨。

其他中小型盆地在此不详细说明。对我国碳酸盐岩储层 CO<sub>2</sub> 储存潜力结果汇总,绘制了全国盆地碳酸盐岩 CO<sub>2</sub> 地质储存潜力分级图(图 2)、全国含碳酸盐岩盆地 CO<sub>2</sub> 储存潜力组成饼图(图 3)。

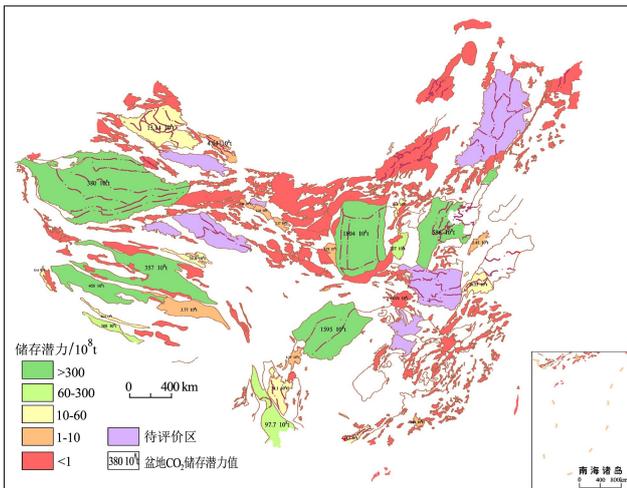


图 2 全国盆地碳酸盐岩 CO<sub>2</sub> 地质储存潜力分级图

Fig. 2 Classification map of CO<sub>2</sub> storage capacity of carbonate formations in basins of China mainland

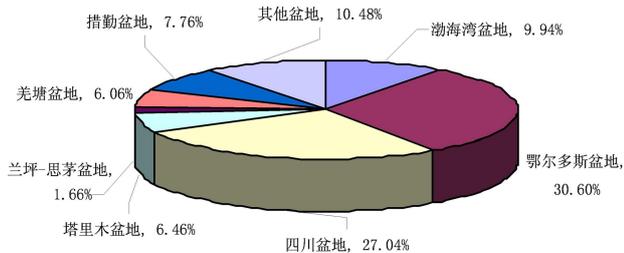


图 3 全国含碳酸盐岩盆地 CO<sub>2</sub> 储存潜力组成饼图

Fig. 3 Pie charts of CO<sub>2</sub> storage capacity of carbonate formations in basins of China mainland

### 3 我国盆地碳酸盐岩储层 CO<sub>2</sub> 地质储存适宜性评价

#### 3.1 国家级盆地适宜性评价指标及其权重

根据中国地质调查局 CO<sub>2</sub> 地质储存专家组意见,将我国 CO<sub>2</sub> 地质储存潜力评价分为 5 个阶段:①区域级预测潜力评价;②盆地级推定潜力评价;③目标区级控制潜力评价;④场地级基础储量评价;⑤灌注级工程储量评价。按评价精度由低到高,依次分称为 E、D、C、B、A 级 CO<sub>2</sub> 地质储存潜力与适宜性评价。区域级(E 级)预测潜力评价是以单个沉积盆地为评价单元,对各沉积盆地内 800~3 500 m 深度区间各主力储、盖层进行高度概化,通过盆地内不同位置少数代表性勘探孔获得的潜力评价参数,预测整个盆地 CO<sub>2</sub> 地质储存潜力<sup>[16]</sup>。

##### 3.1.1 预测储量

在图面上表达各沉积盆地概化的储盖层 CO<sub>2</sub> 地质储存预测潜力(E 级)。预测储量越大,越适宜。预测储量可以根据碳酸盐岩分布面积、碳酸盐岩厚度、孔隙度和计算储量四个等级来评判。

##### 3.1.2 碳酸盐岩分布面积

由盆地剖面图收集钻孔资料及岩相地理图来确定。对于理想状态来说,面积越大越有利于 CO<sub>2</sub> 的储存,共分适宜、较适宜、一般、较不适宜和不适宜 5 个评价等级。对于碳酸盐岩地层埋深较大,或地质资料不全,可能还存在碳酸盐岩地层的盆地的属于待评价区,分级如图 4 所示。

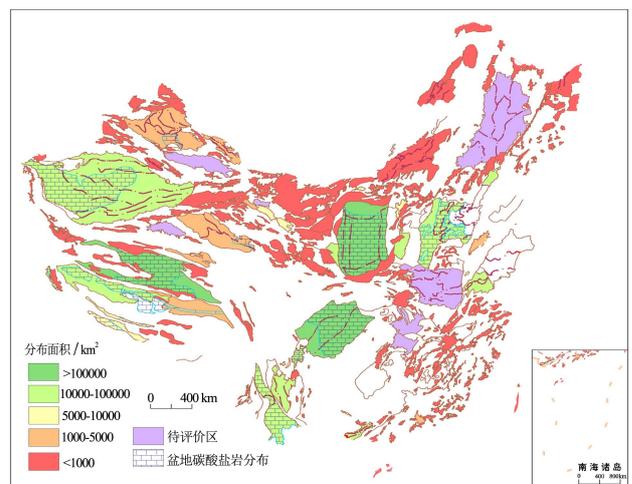


图 4 全国盆地碳酸盐岩分布面积分级图

Fig. 4 Classification map of areas of carbonate formations in basins of China mainland

### 3.1.3 碳酸盐岩厚度

根据收集的钻孔资料、地层厚度等值线,确定盆地内沉积碳酸盐岩评价厚度。理想状态是,厚度越大越有利于 CO<sub>2</sub> 的储存。对全国各盆地内碳酸盐岩厚度最大的地层进行分级,如图 5 所示。

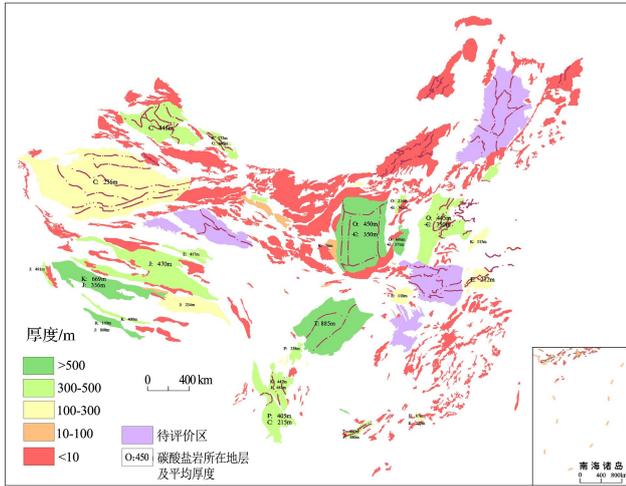


图 5 全国盆地碳酸盐岩厚度分级图

Fig. 5 Classification map of thicknesses of carbonate formations in basins of China mainland

### 3.1.4 碳酸盐岩孔隙度

全国各盆地的碳酸盐岩储层都有一个共同的特性:就是储集的空间类型颇多,缝、孔、洞复杂多变,各地区发育程度不同,导致非均质程度高,横向上不稳定分布,相比于砂石储层纵向上变化大。在各种储集类型中,以发育裂缝-洞穴储集类型为最好。本文采用孔隙度分为 >10%、10%~5%、5%~3%、3%~1% 和 <1% 五个等级来评价碳酸盐岩储层的优劣。全国盆地根据孔隙度评价 CO<sub>2</sub> 储存空间优劣如图 6 所示。

根据《全国 CO<sub>2</sub> 地质储存潜力与示范工程技术要求》建议,对比各指标(碳酸盐岩分布面积、厚度、孔隙度、计算储量、)相互之间的重要性,使用层次分析法求得各评价参数的权重分别为: 0.109、0.109、

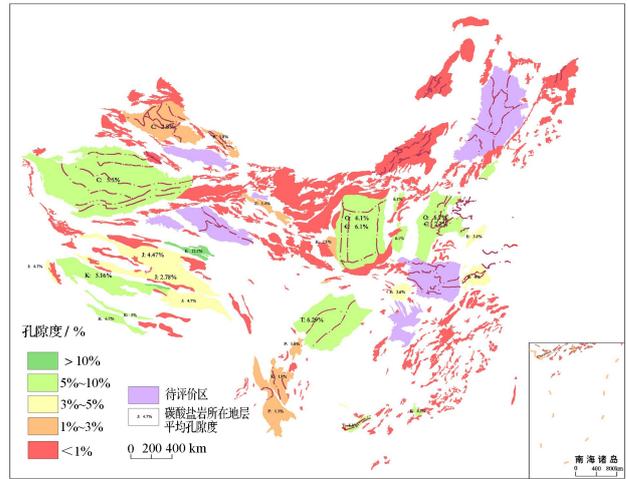


图 6 全国盆地碳酸盐岩孔隙度分级图

Fig. 6 Classification map of porosity of carbonate formations in basins of China mainland

0.297、0.484。经过平均随机一致性检验知得到的权重分配是合理。

### 3.2 适宜性综合评价方法

全国盆地碳酸盐岩储层 CO<sub>2</sub> 地质储存适宜性综合评价公式:

$$P = \sum_{i=1}^n P_i A_i \quad (i = 1, 2, 3 \dots n) \quad (3)$$

式中: P—评价单元的 CO<sub>2</sub> 地质储存适宜性综合评分值;

n—评价因子的总数,本次评价中取 4;

P<sub>i</sub>—第 i 个评价指标的给定指数;

A<sub>i</sub>—第 i 个评价指标的权重,由层次分析法得出。

通过评价公式计算出每个含有碳酸盐岩盆地的 CO<sub>2</sub> 地质储存适宜性综合评分值,通过综合评分值可以确定最终碳酸盐岩储层 CO<sub>2</sub> 地质储存适宜性评价等级划分标准(表 1),进而判定我国盆地碳酸盐岩 CO<sub>2</sub> 地质储存的适宜性并绘制成图(表 2,图 7)。

表 1 全国碳酸盐岩储层 CO<sub>2</sub> 地质储存适宜性评价标准表

Table 1 Evaluation standards of suitability of CO<sub>2</sub> storage in carbonate formations in basins of China mainland

适宜性	适宜	较适宜	一般适宜	较不适宜	不适宜
评价指标范围	10 ≥ P > 8	8 ≥ P > 6	6 ≥ P > 4	4 ≥ P > 2	P ≤ 2

表 2 全国盆地 E 级碳酸盐岩储层 CO<sub>2</sub> 地质储存适宜性评价结果表Table 2 Assessment results of suitability of CO<sub>2</sub> storage in E-class carbonate formations in basins of China mainland

地区	盆地	碳酸盐岩地层 分布面积指标	碳酸盐岩地层 厚度指标	平均孔隙 度指标	CO <sub>2</sub> 储量指标	碳酸盐岩 CO <sub>2</sub> 储存适宜性综合评价
华北地区	渤海湾	9	7	7	9	8.179
	胶莱	3	5	5	3	3.809
	大同	5	7	7	5	5.807
	沁水	7	9	7	7	7.211
	鄂尔多斯	9	7	7	9	8.179
	六盘山	7	3	3	3	3.433
鄂湘赣地区	南襄	3	5	5	1	2.841
川渝地区	四川	9	9	7	9	8.397
	西昌	7	7	3	3	3.869
苏浙皖地区	苏北	7	5	5	5	5.213
新疆地区	准噶尔	3	7	3	5	4.401
	塔里木	9	7	7	9	8.179
	三塘湖	3	7	3	3	3.433
滇黔桂地区	兰坪—思茅	7	7	7	7	6.993
	百色	1	9	5	3	4.027
	楚雄	7	7	3	5	4.837
	十万大山	7	7	5	5	5.431
琼粤地区	三水	3	5	7	3	4.403
西藏地区	羌塘	9	7	5	9	7.585
	措勤	7	9	7	9	8.179
	日喀则昂仁	5	7	7	5	5.807
	伦波拉	3	3	9	3	4.779
	波林	5	7	5	5	5.213
	岗巴定日	7	9	5	7	6.617
	比如	3	5	5	3	3.809
	可可西里	3	7	5	5	4.995
甘青地区	酒西	3	3	3	3	2.997
	酒东	3	3	3	3	2.997
	民乐	3	3	3	3	2.997

表 2、图 7 表明,我国各盆地构造单元中,四川、鄂尔多斯、渤海湾、塔里木、措勤盆地内碳酸盐岩地层分布面积广泛、厚度较大、孔隙度较大、CO<sub>2</sub> 储量大,因此 CO<sub>2</sub> 地质储存适宜性最好。兰坪—思茅盆地内碳酸盐岩面积较广泛、厚度较大、孔隙度较好、CO<sub>2</sub> 储量较大,属于较适宜区;羌塘盆地碳酸盐岩面积分布

广泛、厚度较大、CO<sub>2</sub> 储量大,但孔隙度相对较小,所以整体上羌塘盆地属于较适宜区。而准格尔盆地碳酸盐岩地层虽厚度较大,但分布面积较小,孔隙度小,属于一般适宜区。适宜性最差的为甘青地区,该区碳酸盐岩地层分布面积小、厚度小、孔隙度小、CO<sub>2</sub> 储量小。

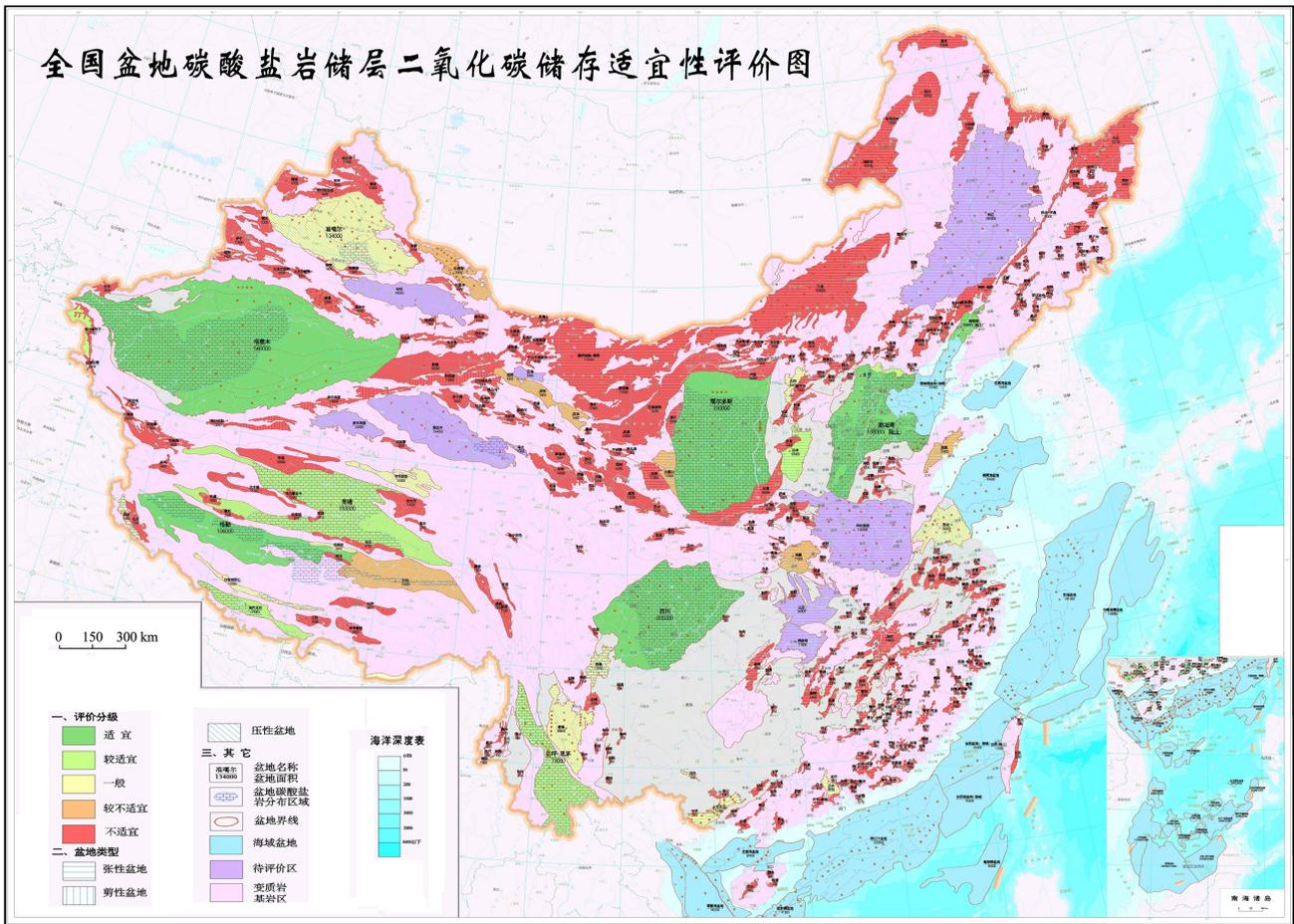


图 7 全国盆地碳酸盐岩储层 CO<sub>2</sub> 储存适宜性评价图

Fig. 7 Evaluation map of suitability of CO<sub>2</sub> storage in carbonate formations in basins of China mainland

### 4 结 论

对我国盆地碳酸盐岩 CO<sub>2</sub> 地质存储潜力和适宜性评价的结果表明,我国各盆地构造单元中,适宜度最好的是鄂尔多斯、四川、渤海湾、塔里木、措勤盆地;兰坪—思茅和羌塘盆地等属于较适宜区;准格尔盆地属于一般适宜区;适宜性最差的为甘青地区。

### 参考文献

[1] 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.

[2] Bachu S. Evaluation of the CO<sub>2</sub> sequestration capacity in Alberta's oil and gas reservoirs at depletion and the effect of underlying aquifers[J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 2003, 42(9):51—61.

[3] IPCC (Intergovernment Panel on Climate Change). IPCC special report on carbon dioxide capture and storage (Metz B, Davidson O, Coninck H C, et al. ) Cambridge University Press, Cambridge U. K. , and New York, NY, U. S. A. , 2005, 442.

[4] Bachu S, Adams J. Sequestration of CO<sub>2</sub> in geological media in response to climate change: capacity of deep saline aquifers to sequester CO<sub>2</sub> in solution[J]. Energy Conversion and Management,2003, 44 (20): 3151—3175.

[5] Oldenburg C M, Lewicki J L, Dobeck L, et al. Modeling gas transport in the shallow subsurface during the ZERT CO<sub>2</sub> release test[J]. Transport In Porous Media, 2010, 82(1): 77—92.

[6] 张炜. 场地规模咸水层系统 CO<sub>2</sub> 地质封存评估方法的研究[D]. 武汉:中国地质大学(武汉),2011.

[7] 李旭峰,常春,郭建强,等. 塔里木盆地奥陶系礁灰岩 CO<sub>2</sub> 毛细残余封存能力实验研究[J]. 地质前缘,2011,18(6):190—194.

[8] 常春,李旭峰,夏露,等. 塔里木盆地奥陶系礁灰岩 CO<sub>2</sub> 地层构造封存能力参数实验研究[J]. 水文地质工程地质,2012,39(1):89—94.

[9] 刘佩. 塔里木盆地 CO<sub>2</sub> 地质储存潜力评价[D]. 北京:中国地质大学(北京),2011.

[10] 范明,蒋小琼,刘伟新,等. 不同温度条件下 CO<sub>2</sub> 水溶液对碳酸盐岩的溶蚀作用[J]. 沉积学报,2007,25(6):825—830.

[11] 刘佩,孙颖,于青春. 塔里木盆地巴楚地区奥陶系礁灰岩 CO<sub>2</sub> 地质储存的溶解溶蚀特征[J]. 地球科学与环境学报,2013,35

- (3):106—112.
- [12] Chang C, Li X F, Shen Z L, et al. Experimental drainage dynamics study of supercritical CO<sub>2</sub> and water in low-permeability and heterogeneous rocks[J]. *Procedia Earth and Planetary Science*, 2013, 7:127—130.
- [13] 王璐. 地下咸水中 CO<sub>2</sub>溶解能力研究[D]. 北京:中国地质大学(北京),2014.
- [14] 庞忠和,杨峰田,李义曼,等. 馆陶组咸水层与二氧化碳的相互作用及其地热利用与碳封存意义[A]//地热能开发利用与低碳经济研讨会——第十三届中国科协年会第十四分会场论文摘要集[C]. 中国科学技术协会、天津市人民政府、中国地质学会,2011:114—116.
- [15] 赵政璋,杜金虎,张国珍,等. 碳酸盐岩储层地震勘探关键技术与应用[M]. 北京:石油工业出版社,2009.
- [16] 齐陆宁,崔建国. 埕岛地区油藏数值模拟与剩余油分布研究——以埕岛油田海二管理区馆上段油藏为例[M]. 北京:石油出版社,2009.

## Evaluation of capacity and suitability of CO<sub>2</sub> geological storage in carbonate formations in basins of China mainland

WANG Jing-xia<sup>1</sup>, LEI Lei<sup>2</sup>, YU Qing-chun<sup>1</sup>

(1. School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2. North China Power Engineering CO., Ltd of China Power Engineering Consulting Group, Beijing 100120, China)

**Abstract** Geological storage of carbon dioxide is one of the effective techniques to reduce CO<sub>2</sub> emissions. Evaluation of capacity and suitability of such storage can provide a scientific foundation for policies of reducing greenhouse gas emissions. This work collects and analyzes the relevant data from the studies of petroleum geology and engineering and hydrogeology. The porosity and thickness of carbonate formations in the basins of China mainland are investigated. A series of important geological maps related to CO<sub>2</sub> storage in carbonate formations in these basins are prepared, including the “Classification map of areas of carbonate formations in the basins of China”, “Classification map of thicknesses of carbonate formations in the basins of China”, “Classification map of porosities of carbonate formations in the basins of China”, “Classification map of CO<sub>2</sub> storage capacity of carbonate formations in the basins of China”, “Classification map of suitability of CO<sub>2</sub> storage in carbonate formations in the basins of China”. After suitability evaluation and removal of those basins not suitable for CO<sub>2</sub> storage, the basins with high suitability for CO<sub>2</sub> storage are chosen for further investigation.

**Key words** Carbonate rocks, CO<sub>2</sub> geological storage, storage capacity, suitability assessment

(编辑 张 玲)