

DZ

中华人民共和国地质与矿产资源行业标准

DZ/T XXXXX—XXXX

咸水层二氧化碳地质封存潜力评价技术指南

Guidelines for assessment of carbon dioxide storage potential in saline aquifers

XXXX – XX – XX 发布

XXXX – XX – XX 实施

目 次

前言	III
引言	IV
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 目标和原则	2
4.1 目标	2
4.2 原则	2
4.3 流程	3
5 评价阶段划分	3
5.1 阶段划分依据	3
5.2 普查阶段	3
5.3 详查阶段	4
5.4 勘探阶段	4
5.5 注入阶段	5
6 潜力分类分级	5
6.1 潜力分类	5
6.2 潜力分级	5
6.3 对应关系	5
7 储层筛选	5
7.1 基本要求	5
7.2 储集条件	6
7.3 盖层封闭性	6
7.4 封存体地质稳定条件	6
7.5 深部资源开发互馈	7
8 潜力计算	7
8.1 潜力计算及储层基础参数取值原则	7
8.2 地质潜力	7
8.3 技术容量	7
8.4 技术经济容量	8
8.5 工程封存量	8
9 综合评价	8
9.1 普查阶段	8
9.2 详查阶段	9
9.3 勘探阶段	10
9.4 注入阶段	11
附录 A （资料性） 地质潜力、技术容量与技术经济容量计算公式	13

A.1 地质潜力..... 13

A.2 技术容量..... 16

A.3 技术经济容量..... 17

参考文献..... 19

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本文件由中华人民共和国自然资源部提出。

本文件由全国自然资源与国土空间规划标准化技术委员会（SAC/TC 93）归口。

本文件起草单位：中国地质调查局水文地质环境地质调查中心、中国科学院武汉岩土力学研究所、中国石油大学（北京）、中国科学院地质与地球物理研究所。

本文件主要起草人：刁玉杰、魏宁、马鑫、文冬光、李小春、刘廷、郭建强、彭勃、祁生文、李琦、金晓琳、付雷、付杰、王思源、张成龙、白冰、刘琦、郑博文、李旭峰、张森琦。

引 言

碳捕集利用与封存(carbon capture, utilization and storage, CCUS)技术可助力全球及我国碳中和目标实现,尤其是咸水层二氧化碳地质封存技术,作为支撑碳中和目标必不可少的地学方案之一,被认为是化石能源领域实现碳中和目标的“兜底”技术。国外部分发达国家咸水层二氧化碳地质封存技术已进入商业化应用阶段,实施了大规模的二氧化碳注入封存。我国陆域及海域沉积盆地深部广泛分布有大量的咸水层,为实施二氧化碳地质封存提供了丰富的地质资源基础。

筛选适宜咸水层,科学评价二氧化碳封存潜力,是实施封存工程及封存资源管理的重要前提,迫切需要建立统一的评价阶段和潜力分类分级标准,优选较为科学的潜力评价方法。考虑到当前我国咸水层二氧化碳地质封存重大示范的紧迫性,兼顾对比国外研究动态与国内地质背景,在全国陆域及毗邻海域主要沉积盆地不同尺度的咸水层二氧化碳地质封存潜力评价、重点区域规模化封存选址调查评价,以及鄂尔多斯十万吨级封存示范、新疆准东千吨级强化咸水开采与封存先导性试验等大量调查研究基础上,本文件提出咸水层二氧化碳地质封存潜力分类分级及评价的总体理念思路,其中勘查阶段潜力评价旨在支撑封存场地科学选址,注入阶段潜力评价旨在服务未来深部地下空间合理开发与监管。由于我国尚处于百万吨级规模化示范的早期阶段,本文件提出的潜力计算、综合评价,以及未深入探讨的数值模拟等方法,需要结合规模化工程实践、科技创新不断优化和完善。

咸水层二氧化碳地质封存潜力评价技术指南

1 范围

本文件提供了咸水层二氧化碳地质封存潜力评价工作涉及的目标和原则、评价阶段划分、潜力分类分级、储层筛选、潜力计算及综合评价等指南。

本文件适用于沉积盆地内深部咸水层二氧化碳地质封存潜力评价。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有修改单）适用于本文件。

GB/T 16792 中国含油气盆地及次级构造单元名称代码

GB 18306 中国地震动参数区划图

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

二氧化碳地质封存 **geological storage of carbon dioxide**

通过工程技术手段将二氧化碳注入至适宜地质体中，实现其与大气长期隔绝的过程。

注：适宜地质体通常包括深部咸水层、枯竭油气藏等，由于大多数枯竭油气藏中仍含有地层水，二氧化碳地质封存一般指咸水层封存。

3.2

封存潜力 **storage potential**

咸水层能够封存二氧化碳量的统称。

3.3

储集条件 **storage conditions**

咸水层能够渗流和封存二氧化碳的能力。

3.4

盖层封闭性 **sealing ability**

盖层能够封隔二氧化碳向上发生泄漏的能力。

3.5

封存体 **storage complex**

垂向延伸包括咸水层储层和盖层，横向延伸至封存工程场地限定范围组成的地质系统。

注：限定范围通常由天然地质边界、二氧化碳运移、安全风险等因素，或法律法规等来定义。

3.6

封存体地质稳定条件 **geological stability conditions of storage complex**

影响咸水层二氧化碳地质封存体长期稳定的断裂及其活动性、区域地震活动性条件。

3.7

源汇匹配 **source-sink matching**

二氧化碳排放源与封存靶区或场地之间的空间优化连接工作。

3.8

地质潜力 **geological potential**

咸水层储层所能容纳的最大理论封存量，包括预测地质潜力和控制地质潜力两级。

3.9

技术容量 **technically capacity**

考虑技术条件估算的咸水层储层有效封存量，包括预测技术容量、控制技术容量和探明技术容量三级。

3.10

技术经济容量 **technically-commercial capacity**

考虑全流程技术成本及政策激励等条件时，在一定成本范围内的封存量，包括控制技术经济容量和探明技术经济容量两级。

3.11

工程封存量 **engineering reserves**

咸水层封存工程在不同实施阶段的二氧化碳注入封存量，包括设计封存量和实际封存量两级。

4 目标和原则

4.1 目标

根据咸水层二氧化碳地质封存勘查及地质认识，筛选适宜咸水层储层，计算相应类型、级别的封存潜力，综合评价封存地质适宜性、技术容量规模及丰度、经济性，为咸水层封存工程选址与监管提供依据。

4.2 原则

4.2.1 综合性

充分搜集、利用以往地质勘查资料开展综合研究，加强影响咸水层二氧化碳地质封存储集条件、长期稳定性等地质信息的提取和分析。

4.2.2 客观性

尊重地质条件客观规律，充分应用各类实验、模拟等技术方法，尽量取全、取准咸水层二氧化碳地质封存潜力计算参数。

4.2.3 继承性

在已有地质勘查资料较丰富、地质认识程度较高的前提下，尽可能计算和评价高精度、高级别的咸水层二氧化碳地质封存潜力。

4.2.4 动态性

充分考虑重点沉积盆地或区域对咸水层二氧化碳地质封存技术需求的紧迫性，可先行开展相应精度的潜力评价工作，随着地质勘查资料的不断丰富、技术水平的不断进步及政策环境的变化，动态更新潜力评价工作。

4.3 流程

按照储层筛选、潜力计算、综合评价三个步骤开展潜力评价。

4.3.1 储层筛选

充分利用已有地质勘查资料开展综合研究，针对二氧化碳地质封存的要求，筛选符合条件的咸水层储层，掌握其空间分布规律，明晰咸水层储层基础参数并核证符合勘查与地质认识程度要求的评价。

4.3.2 潜力计算

在储层筛选的基础上，判定相应类型、级别的咸水层二氧化碳地质封存潜力，并科学选择计算公式开展潜力计算。

4.3.3 综合评价

重点针对咸水层二氧化碳地质封存地质条件适宜性、技术容量规模及丰度、经济性等开展综合分析评价，并提出封存工程选址与监管建议。

5 评价阶段划分

5.1 阶段划分依据

按照GB/T 13908、GB/T 25283的有关规定，考虑地震、钻井等地质勘查与工程注入两者的工作性质区别，将咸水层二氧化碳地质封存潜力评价划分为普查、详查、勘探和注入四个阶段，其中普查、详查和勘探属于勘查阶段。

5.2 普查阶段

针对某一沉积盆地或其地质构造单元，选择性地完成地震普查，结合已有其他矿产资源深部钻井数据，圈定适宜咸水层储层在平面上的投影分布区（即远景区）。

5.2.1 勘查要求

5.2.1.1 地震

完成二维地震普查，主测线距宜小于4 km。

5.2.1.2 钻井

100 km×100 km范围内已有其他矿产资源深部钻井数据可参考，且主要目的层有取心或井壁取心，能够细化到岩石地层单位组。

5.2.1.3 测井

采用合适的测井系列，初步解释区域性咸水层与隔水层。

5.2.1.4 分析化验

进行常规的岩心与水化学分析。

5.2.2 地质认识程度要求

普查阶段地质认识宜达到以下程度：

- a) 能够圈定封存远景区，目标咸水层储层及盖层构造形态勘查精度能够达到 1:100000-1:250000；
- b) 咸水层储层细化到岩石地层单位组，能够基本明确目标咸水层储层岩性；
- c) 掌握控制盆地沉积及其一、二级构造单元分界线的区域性断裂，初步查明了封存体地质稳定条件，关于沉积盆地及次级构造单元划分具体按照 GB/T 16792 执行；
- d) 能够预测确定咸水层储层有效体积。

5.3 详查阶段

在有利封存远景区内,进一步开展地震等地球物理详查,查明有利二氧化碳封存的圈闭构造与地质条件,通过预探井钻探,并合理配置重要矿产资源勘查开发,进一步圈定适宜咸水层储层在平面上的投影分布区(即靶区)。

5.3.1 勘查要求

5.3.1.1 地震

完成二维地震详查,主测线距宜小于2 km。

5.3.1.2 钻井

20 km×20 km范围内已有预探井,主要咸水层段有代表性岩心,宜细化到岩石地层单位段。

5.3.1.3 测井

采用适合评价区特点的测井系列,解释确定咸水层储层及盖层。

5.3.1.4 试井

通过试井取得了流体性质、温度和压力资料。

5.3.1.5 分析化验

进行常规的岩心分析及必要的特殊岩心分析,取得了地层流体性质分析资料,以及盖层岩石矿物成分等岩心分析资料。

5.3.2 地质认识程度要求

详查阶段地质认识宜达到以下程度:

- a) 能够圈定封存靶区,储盖层构造形态勘查精度能够达到 1:50000-1:100000;
- b) 咸水层储层细化到岩石地层单位段,基本查明咸水层储层岩性、物性,储层发育裂隙时需基本查明裂隙系统;
- c) 基本查明咸水层储层流体性质、温度及压力系统;
- d) 基本查明盖层岩性、物性,以及 CO₂-水-岩反应溶蚀特征;
- e) 掌握控制沉积盆地三级构造单元分界线的局部性断裂,基本查明封存体地质稳定条件;
- f) 了解重要矿产资源勘查开发情况,合理配置二氧化碳封存与资源开发。

5.4 勘探阶段

在有利封存靶区内,开展二维地震精查或三维地震勘探,在满足井筒防腐、泄漏等条件下进行补充钻探,合理配置重要矿产资源勘查开发并规避其他钻井二氧化碳泄漏风险,进一步圈定适宜咸水层储层在平面上的投影分布区(即场地)及注入层,并完成注入方案设计。

5.4.1 勘查要求

5.4.1.1 地震

除复杂施工条件外,高精度二维地震测网宜小于1 km× 1 km,或有三维地震。

5.4.1.2 钻井

5 km×5 km基本单元范围内已完成钻探,潜在封存储盖层段至少有一个完整的取心剖面,岩心收获率需能满足对测井资料进行标定的需求。

5.4.1.3 测井

有合适的测井系列,较清晰地划分咸水层储层及盖层,有效地划分较好的渗透层段。

5.4.1.4 试井与灌注试验

钻井已取全取准注入层流体性质、温度和压力资料，年十万吨级及以上规模进行了注入试验，并掌握了储层可注入性资料。

5.4.1.5 分析化验

在常规岩性与地层流体性质分析基础上，进一步取得目的层位毛管压力、相对渗透率及CO₂-水-岩反应特征，以及盖层封闭性等分析数据。

5.4.2 地质认识程度要求

勘探阶段地质认识宜达到以下程度：

- a) 能够圈定封存场地，储盖层构造形态勘查精度能够达到 1:5000-1:10000；
- b) 咸水层储层岩石地层单位进一步细化（如砂层组或砂层），全面掌握其岩石物理化学性质；
- c) 已查明咸水层储层流体性质、温度及压力系统，以及二氧化碳溶解与矿化特征；
- d) 已查明盖层岩石物理化学性质，以及 CO₂-水-岩反应溶蚀特征；
- e) 掌握对控制局部构造的断裂及伴生断层、小断层等特征，查明封存体地质稳定条件；
- f) 合理配置二氧化碳封存与重要矿产资源开发，规避资源开发或废弃钻井引发的二氧化碳泄漏风险。

5.5 注入阶段

注入阶段需具备以下前提：

- a) 基于已有勘探基础和成果，编制工程设计并已获有关部门审批并备案，针对获批的封存场地有科学明确的注入方案；
- b) 针对咸水层储层中二氧化碳运移分布及二氧化碳泄漏风险，已制定科学、全面的监测方案，且覆盖注入前、注入期间和注入后全周期。

6 潜力分类分级

6.1 潜力分类

依据地质、技术、经济等因素，以及工程注入阶段，将咸水层二氧化碳地质封存潜力划分为地质潜力、技术容量、技术经济容量和工程封存量四类。

6.2 潜力分级

按照GB/T 15218、GB/T 17766、GB/T 19492等有关地下水、固体矿产和油气矿产资源储量分类分级的有关规定，针对咸水层二氧化碳地质封存不同评价阶段，将封存潜力划分为预测级别（D级）、控制级别（C级）、探明级别（B级）和工程级别（A级）。

6.3 对应关系

勘查注入阶段与潜力分类分级对应关系如下（见表1）：

- a) 普查阶段对应预测级别（D级），包括预测地质潜力与预测技术容量两类；
- b) 详查阶段对应控制级别（C级），包括控制地质潜力、控制技术容量和控制技术经济容量三类；
- c) 勘探阶段对应探明级别（B级），包括探明技术容量和探明技术经济容量两类；
- d) 注入阶段对应工程级别（A级），包括设计封存量和实际封存量两类。

7 储层筛选

7.1 基本要求

咸水层储层需重点考虑储集条件、盖层封闭性、封存体地质稳定条件，以及深部资源开发互馈等基本要求，充分利用地震、钻井、测井和测试等资料进行综合筛选。

表1 勘查注入阶段与潜力分类分级对应关系

评价阶段	潜力级别	潜力类别				
		地质潜力	技术容量	技术经济容量	工程封存量	
普查	预测级别(D级)	预测地质潜力	预测技术容量	/	/	
详查	控制级别(C级)	控制地质潜力	控制技术容量	控制技术经济容量	/	
勘探	探明级别(B级)	/	探明技术容量	探明技术经济容量	/	
注入	工程级别(A级)	/	/	/	设计封存量	实际封存量
<p>注1：考虑探明阶段地质认识程度较高、潜力评价数据较丰富，且应用了地质建模与数值模拟技术手段，不再体现地质潜力。</p> <p>注2：技术容量对咸水层二氧化碳地质封存工程项目预可研、可研及设计等不同实施阶段具有重要参考意义，需重点体现并作为潜力评价的重要依据。</p> <p>注3：技术经济容量主要服务碳捕集与封存（CCS）产业集群及对碳中和目标贡献等战略性研究，一般情况下详查阶段的靶区和勘探阶段的场地才能够支持源汇匹配要求，因此在详查和勘探阶段予以体现技术经济容量。</p> <p>注4：工程封存量主要服务咸水层二氧化碳地质封存地下空间有效开发利用及科学监管。</p>						

7.2 储集条件

咸水层储层筛选时重点考虑影响储集条件的以下因素：

- 咸水层储层深度宜大于 800 m，或通过钻探测量实际地层压力和温度能够满足二氧化碳注入后达到超临界态；
- 咸水层储层岩石类型宜重点考虑碎屑岩、碳酸盐岩及岩浆岩；
- 按照地层层序以组、段或砂层组等单位统计分析时，咸水层储层单层厚度宜大于 1 m，叠加厚度宜大于 5 m；
- 咸水层储层平均有效孔隙度宜高于 5%，平均渗透率宜高于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ；
- 按照 GB/T 14157 关于地下咸水和地下盐水总矿化度的有关规定，进一步从保护地下水资源的角度，咸水层储层的地下水总矿化度应大于 8 g/L；
- 咸水层储层应为半封闭或封闭型水文地质结构，地下水交替缓慢或十分缓慢。

7.3 盖层封闭性

盖层识别需重点考虑影响其封闭性的以下因素：

- 盖层考虑为连续、稳定的低渗透性岩石，无张性贯穿断裂发育；
- 需考虑盖层岩石矿物成分，黏土矿物含量低于 30%或富含长石、碳酸盐岩等矿物时，易发生 CO_2 -水-岩反应溶蚀作用，该类岩石不宜作为盖层；
- 咸水层储层除覆盖较好的直接盖层外，直接盖层上部宜发育有一定厚度的次级盖层。

7.4 封存体地质稳定条件

封存体地质稳定条件重点考虑以下因素：

- 需要考虑活动断层因素，按照 GB 17741 关于 I 级场地地震安全性评价工作近场区范围应外延至半径 25 km 范围的规定，以及《中国地震构造环境探查规划》地震构造分级原则，咸水层储层在地表的垂直投影分布 25 km 范围内不存在一级断裂带（I 级、II 级地块边界活动的断层带）和二级断裂（II 级地块内部活动的断层，一般控制构造单元），5 km 范围内不存在三级断裂（I 级、II 级地块内部规模较小的活动断层和一定规模的第四纪断层）；

- b) 需要考虑区域地震动峰值加速度因素，咸水层储层在地表的垂直投影分布范围内区域地震动峰值加速度宜小于等于 0.15 g，具体按照 GB 18306 规定执行。

7.5 深部资源开发互馈

咸水层储层筛选需要考虑咸水层储层与深部矿产资源空间叠置情况，在详查和勘探阶段，需充分调研深部煤炭、石油、天然气等矿产资源勘查和开采登记资料，在无法回避时提出科学的优先实施次序。

8 潜力计算

8.1 潜力计算及储层基础参数取值原则

8.1.1 潜力计算原则

潜力计算需遵循以下原则：

- 开展沉积盆地、盆地内部构造单元或面积较大区域的潜力评价时，预测和控制级别潜力计算平面最小单元宜不大于 5 km×5 km；
- 探明和工程级别潜力计算平面最小单元宜不大于 1 km×1 km，当评价区面积较小时，应适当提高计算精度；
- 垂向上，不同岩性、储集特征的咸水层储层应划分独立的计算单元；
- 潜力评价原则上按照级别由低到高依次开展，掌握高级别的潜力数据后不再开展低级别评价，但在新的勘查或工程注入实践认识与原有评价结果差异较大，甚至工程失败时，应重新开展封存潜力评价工作。

8.1.2 储层基础参数取值原则

咸水层储层基础参数取值需遵循以下原则：

- 裂隙型储层应以连通的裂隙系统细分计算单元，裂隙孔隙（洞）型储层分别确定基质孔隙度和裂隙、溶洞等孔隙度，见 DZ/T 0217；
- 孔隙度宜直接用岩心分析资料或测井解释确定，测井解释孔隙度与岩心分析孔隙度的相对误差不超过±8%，见 DZ/T 0217；
- 封存条件类似的地质单元，参数取值宜类比借用，或使用平均数值计算。

8.2 地质潜力

8.2.1 容积法

8.2.1.1 容积法基本原理是假设咸水层为侧向开放水文地质边界，且注入的二氧化碳可以将原有地层水最大限度地驱替出评价区域，适用于预测地质潜力和控制地质潜力的计算。

8.2.1.2 地质潜力计算宜利用地理信息系统 GIS 空间分析功能辅助计算，以提高成果数据精度。

8.2.1.3 容积法详细计算公式见附录 A。

8.2.2 机理法

8.2.2.1 碳封存领导人论坛（Carbon Sequestration Leadership Forum, CSLF）根据咸水层二氧化碳地质封存的物理和化学封存机理，提出构造地层封存、束缚封存和溶解封存三种不同机理的潜力计算公式（见附录 A），总地质潜力可认为是三部分不同机理地质潜力的和。

8.2.2.2 机理法需要较为丰富的地质数据支撑，宜在控制地质潜力计算时考虑应用。

8.3 技术容量

8.3.1 预测和控制技术容量是利用相应级别的地质潜力与驱替系数 E_{sweep} 的乘积计算获得，计算公式及 E_{sweep} 取值参考见附录 A。

8.3.2 探明技术容量需在精细地质建模基础上，综合储集条件、盖层封闭性、封存体地质稳定条件及深部资源开发互馈等因素，开展咸水层储层不同二氧化碳注入方案情景下的数值模拟，进而预测获取的最大技术容量。

8.4 技术经济容量

8.4.1 在技术容量基础上，假定碳捕集与封存技术（CCS）能够纳入至碳交易体系或有相关碳税政策激励条件时，针对某一碳源或集群，其源汇匹配全流程技术成本不高于政策激励价格时，约束得到技术经济容量。

8.4.2 控制和探明技术经济容量可通过相应级别技术容量与成本系数 E_{cost} 的乘积计算获得，计算公式及 E_{cost} 取值参考见附录 A。

8.4.3 在明确碳源、场地及其探明技术容量的前提下，探明技术经济容量会从经济性的角度淘汰部分碳源或场地的基本单元。

8.5 工程封存量

8.5.1 设计封存量

8.5.1.1 设计封存量需建立在场地探明基础上科学规划设计，且不大于探明技术容量。

8.5.1.2 设计封存量需明晰封存场地的预测地下空间范围、注入执行期，以及详细的注入井和监测井布设方案等信息。

8.5.2 实际封存量

8.5.2.1 在封存体安全稳定、未发生二氧化碳泄漏的前提下，咸水层封存工程场地实际注入的二氧化碳量。

8.5.2.2 当已有封存工程场地邻近新规划或实施封存工程时，出于保障二氧化碳地下封存库的安全性和稳定性，可将工程设计封存量视为实际封存量。

9 综合评价

9.1 普查阶段

9.1.1 评价内容

重点针对储集条件、盖层封闭性、封存体地质稳定条件等地质适宜性，以及预测技术容量规模、丰度开展综合分析评价。

9.1.2 地质适宜性

9.1.2.1 储集条件

储集条件分析评价重点考虑以下内容：

- 区域性咸水层储层细化到岩石地层单位组，编制地层层序及储盖组合综合柱状图、储层顶底面构造图（1:100000–1:250000）；
- 预测评价咸水层储层岩性、孔隙度、渗透率条件；
- 预测评价咸水层储层流体性质与水化学组分，以及温度、压力特征。

9.1.2.2 盖层封闭性

预测评价区域性盖层岩性、空间展布特征。

9.1.2.3 封存体地质稳定条件

封存体地质稳定条件分析评价重点考虑以下内容：

- 重点针对控制盆地沉积及其一、二级构造单元分界线的区域性断裂，分析其与储盖层的接触关系，以及对潜在储盖层的影响，关于沉积盆地及次级构造单元划分按照 GB/T 16792 执行；
- 分析历史地震、地震动参数区划特征，结合区域性断裂，编制封存体地质稳定条件图。

9.1.3 预测技术容量规模及丰度

9.1.3.1 评价远景区预测技术容量规模及丰度，具体按照表 2、表 3 执行，编制远景区及预测技术容量评价图，必要时可针对重要咸水层储层单独编制。

9.1.3.2 咸水层二氧化碳地质封存远景区及预测技术容量评价图需包含以下基本内容：

- a) 第一层次：主要表示与咸水层二氧化碳地质封存相关的地理因子，由地形类、水系类及行政区划等图层构成，比例尺一般为 1:100000-1:250000；
- b) 第二层次：主要表示与咸水层储层有关的地质、水文地质、封存体地质稳定性等条件，如咸水层储层顶（底）板构造等深线、地下水总矿化度、断裂、地震动参数区划等内容；
- c) 第三层次：主要表示远景区范围，以及以平面不大于 5 km×5 km 为基本单元的预测技术容量丰度、分类区划。

表2 技术容量规模分类

单位为亿吨

分类	技术容量规模
大型	≥ 10
中型	$\geq 1 \sim < 10$
小型	< 1

表3 技术容量丰度分类

单位为百万吨

分类	技术容量丰度
高	≥ 25
中	$\geq 12.5 \sim < 25$
低	< 12.5
注：表中技术容量丰度按照平面上 5 km×5 km 为基本单元统计。	

9.2 详查阶段

9.2.1 评价内容

重点针对储集条件、盖层封闭性、封存体地质稳定条件等地质适宜性，以及深部资源开发互馈、控制技术容量规模及丰度、源汇匹配开展综合分析评价。

9.2.2 地质适宜性

9.2.2.1 储集条件

储集条件分析评价重点考虑以下内容：

- a) 咸水层储层细化到岩石地层单位段，编制地层层序及储盖组合综合柱状图、储层顶底面构造图（1:50000-1:100000）；
- b) 预测评价咸水层储层岩性及矿物组分、孔隙度、渗透率、岩石力学性质，以及裂隙发育特征；
- c) 预测评价咸水层储层流体性质与化学组分、温度及压力特征，分析二氧化碳溶解与矿化能力。

9.2.2.2 盖层封闭性

盖层封闭性分析评价重点考虑以下内容：

- a) 分析评价区域性盖层岩性及矿物组分、空间展布特征；
- b) 预测评价区域性盖层渗透性，以及 CO₂-水-岩反应溶蚀特征。

9.2.2.3 封存体地质稳定条件

封存体地质稳定条件分析评价重点考虑以下内容：

- a) 细化至控制沉积盆地三级构造单元分界线的局部性断裂，分析其与储盖层接触关系，以及对储盖层的影响；
- b) 在 9.1.2.3 b) 基础上，可进一步综合局部性断裂信息，完善封存体地质稳定条件图。

9.2.3 深部资源开发互馈

重点考虑咸水层储盖层与深部资源交叉重叠情况，充分调研深部煤炭、石油、天然气等矿产资源勘查和开采登记资料，合理配置咸水层封存与资源开发，在无法回避时提出科学的优先实施次序。

9.2.4 控制技术容量规模及丰度

9.2.4.1 评价靶区控制技术容量规模及丰度，具体按照表 2、表 3 执行，编制靶区及控制技术容量评价图，必要时可针对重要咸水层储层单独编制。

9.2.4.2 靶区及控制技术容量评价图需包含以下基本内容：

- a) 第一层次：具体按照 9.1.3.2 a) 执行，比例尺一般为 1:50000-1:100000；
- b) 第二层次：具体按照 9.1.3.2 b) 执行；
- c) 第三层次：主要表示靶区范围，以及以平面不大于 5 km×5 km 为基本单元的控制技术容量丰度、分类区划。

9.2.5 源汇匹配及经济性

9.2.5.1 开展靶区内部及其边界以外 250 km 范围内的高碳排放源调研，结合地形、水系、行政区划等地理因子，以及控制技术经济容量与分级区划，初步分析全流程 CCS 经济性。

9.2.5.2 编制源汇匹配示意图，图件需包含以下基本内容：

- a) 第一层次：具体按照 9.2.4.2 a) 执行；
- b) 第二层次：主要表示碳源信息，如碳源类型（电厂、化工、钢铁、水泥等）及碳排放量；
- c) 第三层次：具体按照 9.2.4.2 c) 执行；
- d) 第四层次：主要表示源汇匹配信息，如初步的二氧化碳输送路径、碳源集群等。

9.3 勘探阶段

9.3.1 评价内容

重点针对储集条件、盖层封闭性、封存体地质稳定条件等地质适宜性开展场地精细表征评价，提出咸水层封存与深部资源开发互馈及解决方案，评价探明技术容量规模及丰度，在源汇匹配基础上分析评估经济性。

9.3.2 场地精细表征及地质适宜性

9.3.2.1 储集条件

储集条件分析评价重点考虑以下内容：

- a) 咸水层储层岩石地层单位进一步细化（如砂层组或砂层），精细表征咸水层岩石与流体物理化学性质，构建三维地质模型；
- b) 综合咸水层储层岩性及矿物组分、非均质性，以及岩石与流体的物理化学性质，全面评价咸水层储层二氧化碳可注入与渗流能力，以及溶解与矿化能力。

9.3.2.2 盖层封闭性

综合盖层岩性及矿物组分、空间展布、物化性质特征，全面评价盖层完整性及封闭能力。

9.3.2.3 封存体地质稳定条件

在 9.2.2.3 a) 基础上，进一步针对控制局部构造的断裂及伴生断层、小断层等，分析评价封闭性、活动性及对储盖层的影响。

9.3.3 深部资源开发互馈

深部资源开发互馈分析评价重点考虑以下内容：

- a) 在 9.2.3 基础上, 进一步预测分析咸水层储层二氧化碳注入封存与煤炭、石油、天然气等矿产资源开发互馈程度;
- b) 需要考虑场地已有钻井分布情况及封井详细资料, 掌握其密封性, 分析引发二氧化碳泄漏的可能性。

9.3.4 探明技术容量规模及丰度

9.3.4.1 评价探明技术容量规模及丰度, 具体按照表 2、表 4 执行, 编制场地及探明技术容量评价图, 必要时可针对重要咸水层储层单独编制。

表4 技术容量丰度分类

单位为百万吨

分类	技术容量丰度
高	≥ 1
中	$\geq 0.5 \sim < 1$
低	< 0.5
注: 表中技术容量丰度按照平面上1 km×1 km为基本单元统计。	

9.3.4.2 靶区及探明技术容量评价图需包含以下基本内容:

- a) 第一层次: 具体按照 9.1.3.2 a) 执行, 比例尺一般为 1:5000-1:10000;
- b) 第二层次: 具体按照 9.1.3.2 b) 执行;
- c) 第三层次: 主要表示场地范围, 以及以平面不大于 1 km×1 km 为基本单元的探明技术容量丰度、分类区划。

9.3.5 源汇匹配及经济性

9.3.5.1 重点针对场地内部及其边界以外 100 km 范围内的高碳排放源, 结合地形、水系、行政区划等地理因子, 以及探明技术经济容量与分级区划, 初步分析全流程 CCS 经济性。

9.3.5.2 编制源汇匹配示意图, 具体按照 9.2.5.2 执行。

9.4 注入阶段

9.4.1 评价内容

在准确记录咸水层二氧化碳地质封存工程设计封存量及动态实际封存量的同时, 充分利用咸水层储层中二氧化碳运移分布及泄漏监测数据开展综合研究, 进一步核验、修正场地探明技术容量和探明技术经济容量, 并提出封存体地下空间利用监管保护措施。

9.4.2 二氧化碳运移分布及泄漏监测评价

二氧化碳运移分布及泄漏的监测评价重点考虑以下内容:

- a) 监测咸水层储层中的二氧化碳羽流空间分布及饱和度、压力和温度特征, 通过数值模拟预测评价二氧化碳的运移分布规律, 以及物理和化学封存机理形式演化特征;
- b) 监测评价封存体的稳定情况, 确定咸水层储层中的二氧化碳是否突破盖层发生泄漏, 若发生泄漏应采取有效措施封堵, 并估算二氧化碳的泄漏量。

9.4.3 容量核验与修正

9.4.3.1 利用实际封存量、咸水层储层注入参数和监测数据, 优化场地精细地质模型, 核验、修正场地探明技术容量, 预测评价剩余探明技术容量。

9.4.3.2 基于全流程碳捕集与封存实施成本, 核验、修正探明技术经济容量, 预测评价场地剩余探明技术经济容量。

9.4.4 地下空间利用监管

从科学开发利用深部地下空间、保护封存体长期稳定的角度，在封存工程设计、注入期间、注入完成后不同阶段，应及时向有关部门备案封存体空间范围、工程封存量数据，以及监管与保护建议。

附录 A
(资料性)
地质潜力、技术容量与技术经济容量计算公式

A.1 地质潜力

A.1.1 容积法

A.1.1.1 计算公式

容积法计算公式见式 (A.1)：

$$P = A \times h \times \phi \times \rho_{\text{CO}_2} \times E_{\text{geol}} \dots\dots\dots (\text{A.1})$$

式中：

P ——地质潜力，单位为千克 (kg)；

A ——咸水层储层面积，单位为平方米 (m^2)；

h ——咸水层储层厚度，单位为米 (m)；

ϕ ——咸水层储层孔隙度，%；

ρ_{CO_2} ——咸水层储层中二氧化碳的密度，单位为千克/立方米 (kg/m^3)；

E_{geol} ——地质系数，无量纲。

示例：

若咸水层储层面积、厚度、孔隙度分别为 10000 m^2 、 10 m 和 10% ，咸水层储层中二氧化碳的密度为 $700 \text{ kg}/\text{m}^3$ ，地质系数为 0.5 ，则咸水层储层地质潜力为：

$$P = 10000 \times 10 \times 10\% \times 700 \times 0.5 = 3.5 \times 10^6 \text{ kg}$$

A.1.1.2 咸水层储层中二氧化碳的密度取值

咸水层储层中二氧化碳的密度 ρ_{CO_2} 是温度和压力的函数，可通过查表法取值，见图 A.1。

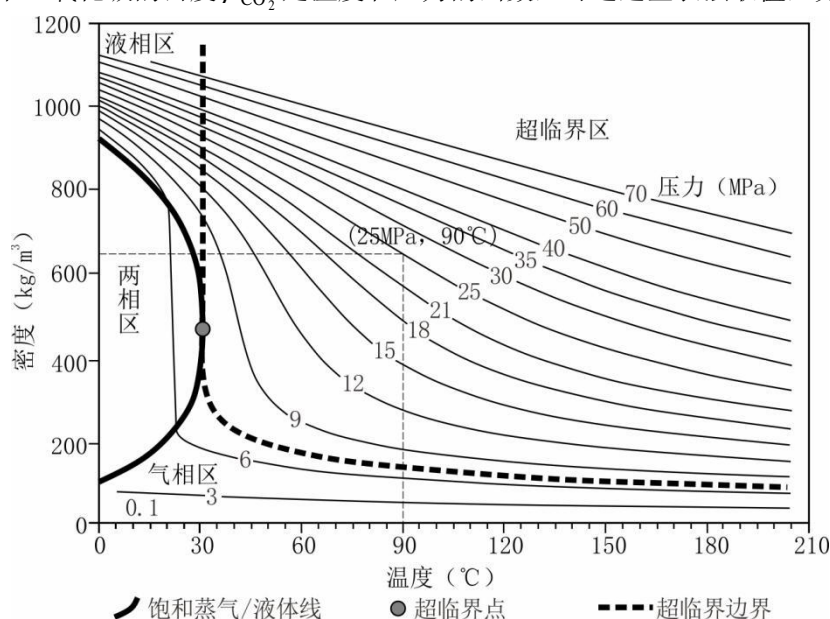


图 A.1 二氧化碳密度随温度和压力的变化函数示意图

示例：

若咸水层储层温度为 90℃、压力为 25 MPa，则通过查阅图 A.1 可知，咸水层储层中二氧化碳的密度约为 645 kg/m³。

A.1.1.3 地质系数取值

地质系数 E_{geol} 是有效封存二氧化碳的储层面积 A 、厚度 h 和孔隙度 ϕ 的函数，反映了储层的空间非均质性特征，计算公式见式 (A.2)：

$$E_{geol} = E_{A_n/A_t} \times E_{h_n/h_g} \times E_{\phi_e/\phi_t} \dots\dots\dots (A.2)$$

式中：

E_{A_n/A_t} ——储层面积有效系数，能够有效适宜二氧化碳封存的储层面积占总储层面积的比值；

E_{h_n/h_g} ——储层厚度有效系数，能够有效适宜二氧化碳封存的储层厚度占总储层厚度的比值；

E_{ϕ_e/ϕ_t} ——储层孔隙度有效系数，能够有效适宜二氧化碳封存、相互连通的孔隙度占总孔隙度的比值。

注：储层勘查阶段地质认识程度越高， E_{A_n/A_t} 、 E_{h_n/h_g} 、 E_{ϕ_e/ϕ_t} 和 E_{geol} 的取值精度越高。

A.1.2 机理法

咸水层二氧化碳地质封存机理包括物理和化学两类封存机制，其中物理封存机制主要包括构造地层封存、束缚封存和水动力封存，化学封存包括溶解和矿化封存。碳封存领导人论坛 (CSLF, 2007) 提出了咸水层二氧化碳地质封存潜力计算的机理法及公式，可参考式 (A.3)、式 (A.4) 和式 (A.6) 分别计算构造地层封存、束缚封存、溶解封存三类封存机理地质潜力，总的地质潜力即为三类封存机理地质潜力之和。

A.1.2.1 构造地层封存

构造地层封存是阻挡二氧化碳运移并使其聚集的圈闭封存机制，通常包括构造圈闭、地层圈闭及构造地层复合圈闭，其计算公式见式 (A.3)：

$$P_{ts} = A \times h \times \phi \times (1 - S_{wirr}) \times \rho_{CO_2} \times E_{geol} \dots\dots\dots (A.3)$$

式中：

P_{ts} ——构造地层封存的地质潜力，单位为千克 (kg)；

A ——咸水层储层面积，单位为平方米 (m²)；

h ——咸水层储层厚度，单位为米 (m)；

ϕ ——咸水层储层孔隙度，%；

S_{wirr} ——咸水层储层孔（裂）隙中的束缚水饱和度，%；

ρ_{CO_2} ——咸水层储层中二氧化碳的密度，单位为千克/立方米 (kg/m³)；

E_{geol} ——地质系数，无量纲。

注1： S_{wirr} 可通过深部钻井直接测试或室内二氧化碳驱替咸水物理模拟实验获取。

注2：咸水层储层中二氧化碳的密度 ρ_{CO_2} 具体按照 A.1.1.2 执行。

注3：地质系数 E_{geol} 取值具体按照 A.1.1.3 执行。

示例：

若咸水层储层面积、厚度、孔隙度分别为 10000 m²、10 m 和 10%，咸水层储层孔（裂）隙中的束缚水饱和度为 15%、二氧化碳的密度为 700 kg/m³，地质系数为 0.5，则咸水层储层构造地层封存的地质潜力为：

$$P_{ts} = 10000 \times 10 \times 10\% \times (1 - 15\%) \times 700 \times 0.5 = 2.975 \times 10^6 \text{ kg}$$

A. 1. 2. 2 束缚封存

束缚封存是二氧化碳吸附于矿物表面或非连续状态残留于岩石孔隙的封存机制，其计算公式见式（A. 4）：

$$P_{tr} = A \times h \times \phi \times S_{CO_2t} \times \rho_{CO_2} \times E_{geol} \dots\dots\dots (A. 4)$$

式中：

P_{tr} ——束缚封存的地质潜力，单位为千克（kg）；

A ——咸水层储层面积，单位为平方米（m²）；

h ——咸水层储层厚度，单位为米（m）；

ϕ ——咸水层储层孔隙度，%；

S_{CO_2t} ——二氧化碳驱替咸水过程中咸水逆流时，咸水层储层孔（裂）隙中的束缚二氧化碳饱和度，%；

ρ_{CO_2} ——咸水层储层中二氧化碳的密度，单位为千克/立方米（kg/m³）；

E_{geol} ——地质系数，无量纲。

注1：咸水层储层孔（裂）隙中的二氧化碳饱和度 S_{CO_2t} 可通过深部钻井直接测试或室内咸水驱替二氧化碳物理模拟实验获取。

注2：咸水层储层中二氧化碳的密度 ρ_{CO_2} 具体按照A. 1. 1. 2执行。

注3：地质系数 E_{geol} 取值具体按照A. 1. 1. 3执行。

示例：

若咸水层储层面积、厚度、孔隙度分别为 10000 m²、10 m 和 10%，束缚二氧化碳饱和度为 5%、二氧化碳的密度为 700 kg/m³，地质系数为 0.5，则咸水层储层束缚封存的地质潜力为：

$$P_{tr} = 10000 \times 10 \times 10\% \times 5\% \times 700 \times 0.5 = 0.175 \times 10^6 \text{ kg}$$

A. 1. 2. 3 溶解封存

溶解封存是二氧化碳溶解于咸水中的封存机制，计算公式见式（A. 5）：

$$P_{td} = A \times h \times \phi \times \rho_i \times R_{CO_2} \times E_{geol} \times 10^{-2} \dots\dots\dots (A. 5)$$

式中：

P_{td} ——溶解封存的地质潜力，单位为千克（kg）；

A ——咸水层储层面积，单位为平方米（m²）；

h ——咸水层储层厚度，单位为米（m）；

ϕ ——咸水层储层孔隙度，%；

ρ_i ——初始咸水的密度，单位为千克/立方米（kg/m³）；

R_{CO_2} ——二氧化碳在咸水中的溶解度，单位为千克/100千克咸水（kg/100 kg咸水）；

E_{geol} ——地质系数，无量纲。

示例：

若咸水层储层面积、厚度、孔隙度分别为 10000 m²、10 m 和 10%，初始咸水的密度为 1200 kg/m³，二氧化碳在咸水中的溶解度为 5 kg/100 kg 咸水，地质系数为 0.5，则咸水层储层溶解封存的地质潜力为：

$$P_{td} = 10000 \times 10 \times 10\% \times 1200 \times 5 \times 0.5 \times 10^{-2} = 3.0 \times 10^5 \text{ kg}$$

注1：初始咸水的密度 ρ_i 可通过室内实验测试获得。

注2：地质系数 E_{geol} 取值具体按照A. 1. 1. 3执行。

注3：二氧化碳在纯水中的溶解度 R_{CO_2w} 随温度升高而降低，随压力升高而增大（图A. 2）；二氧化碳在咸水中的溶解度 R_{CO_2} 随盐度的增加而降低，可通过查阅图A. 2并利用式（A. 6）计算获得：

$$R_{CO_2} = R_{CO_2w} \times (1.0 - 4.893414 \times 10^{-2} \times S + 0.1302838 \times 10^{-2} \times S^2 - 0.1871199 \times 10^{-4} \times S^3) \dots\dots\dots (A. 6)$$

式中：

$R_{\text{CO}_2\text{w}}$ ——二氧化碳在纯水中的溶解度，单位为千克/100千克纯水（kg/100 kg纯水）。

S ——初始咸水的盐度，%。

示例：

若咸水层储层温度为 90℃、压力为 25 MPa，初始咸水的盐度为 5 %，首先可以通过查阅图 A. 2，获得温度为 90℃、压力为 25 MPa，二氧化碳在纯水中的溶解度约为 5.40 kg/100 kg 纯水；然后通过式（A. 6）计算获得二氧化碳在咸水中的溶解度约为 4.24 kg/100 kg 咸水。

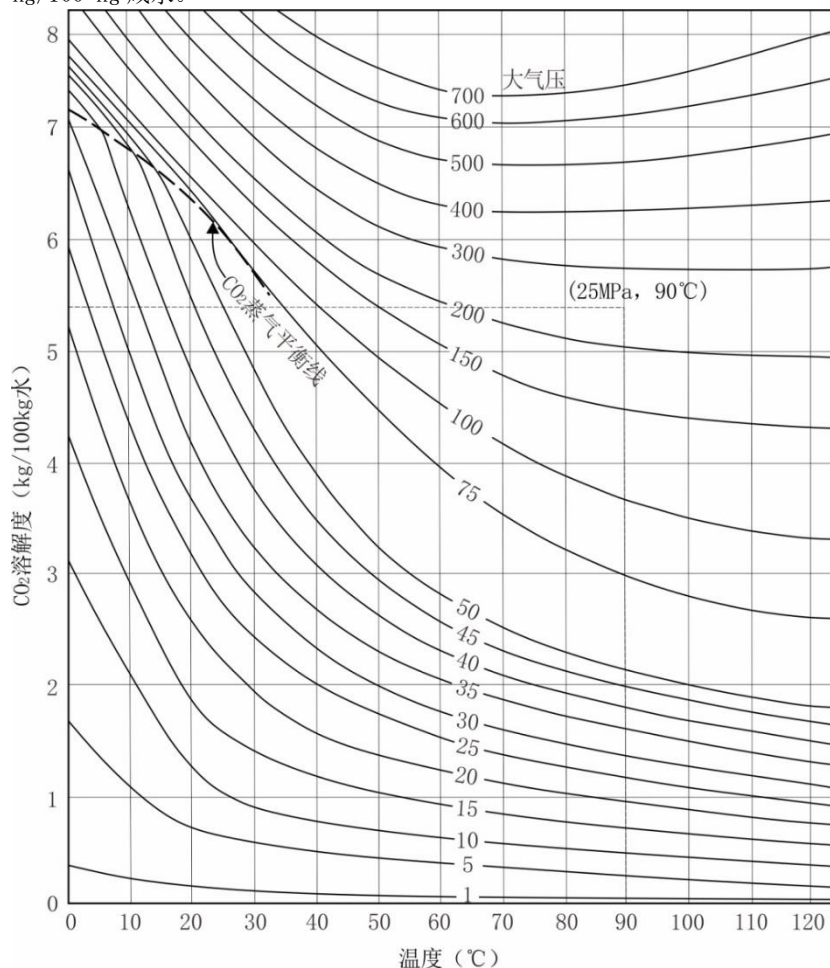


图 A. 2 二氧化碳在纯水中的溶解度图

A. 2 技术容量

A. 2. 1 计算公式

技术容量计算公式见式（A. 7）：

$$C_{\text{tech}} = P \times E_{\text{sweep}} \dots\dots\dots (\text{A. 7})$$

式中：

C_{tech} ——技术容量，单位为千克（kg）；

P ——地质潜力，单位为千克（kg）；

E_{sweep} ——驱替系数，无量纲。

A. 2. 2 驱替系数取值

驱替系数 E_{sweep} 是波及效率 E_v 和驱替效率 E_d 的乘积，储层物性、水化学、压力、温度、相对渗透率等因素均会影响驱替系数 E_{sweep} 的取值，计算公式见式（A. 8）。

$$E_{sweep} = E_v \times E_d \dots\dots\dots (A. 8)$$

式中：

E_v ——波及效率，是由于二氧化碳和地层水之间的密度差异，有效厚度范围内分布有二氧化碳的储层体积占储层总体积的比例；

E_d ——驱替效率，是由于原位流体不流动导致的储层中不可封存二氧化碳的孔隙空间占比。

注：驱替系数 E_{sweep} 取值可参照表A. 1，但实际取值范围会随地质条件与注入工艺发生变化，宜分别针对 E_v 和 E_d 开展补充室内实验、统计方法、数值模拟等确定，进而获取更可信的技术容量。

表 A. 1 E_{sweep} 取值推荐

岩性	E_{sweep}		
	P ₁₀	P ₅₀	P ₉₀
碎屑岩	7. 4%	14%	24%
白云岩	16%	21%	26%
石灰岩	10%	15%	21%

注1：P₁₀、P₅₀和P₉₀为参考美国能源部提出的基于蒙特卡洛（Monte Carlo）方法的置信度，P₉₀对应值为驱替系数 E_{sweep} 置信度为90%的置信区间上限，表示 E_{sweep} 均值小于该值的可能性为90%，一般等同于最大值的概念；P₅₀对应值为驱替系数 E_{sweep} 置信度为50%的置信区间上限，表示 E_{sweep} 均值小于该值的可能性为50%，大于该值的可能性也是50%，一般等同于平均期望值的概念；P₁₀对应值为驱替系数 E_{sweep} 置信度为10%的置信区间上限，表示 E_{sweep} 均值小于该值的可能性为10%，一般等同于最小值的概念。

注2：利用P₁₀对应 E_{sweep} 取值计算获得的技术容量可认为是最小值，利用P₉₀对应 E_{sweep} 取值计算获得的技术容量可认为是最大值，利用P₅₀对应 E_{sweep} 取值计算获得的技术容量可认为是平均期望值。

A. 3 技术经济容量

A. 3.1 计算公式

技术经济容量计算公式见式（A. 9）：

$$C_{ecno} = C_{tech} \times E_{cost} \dots\dots\dots (A. 9)$$

式中：

C_{ecno} ——技术经济容量，单位为千克（kg）；

C_{tech} ——技术容量，单位为千克（kg）；

E_{cost} ——成本系数，无量纲。

A. 3.2 成本系数取值

成本系数 E_{cost} 体现了经济条件对咸水层二氧化碳地质封存的驱动能力，当前咸水层二氧化碳地质封存以示范为目的，因缺乏政策激励，成本系数 E_{cost} 视为0。假定碳捕集与封存技术（CCS）能够纳入至碳交易体系或有碳税政策等激励条件、且工程项目运行周期为20年时，不同浓度碳源 E_{cost} 取值建议见表A. 2。

表 A.2 E_{cost} 取值推荐

政策激励价格（元/tCO ₂ ）	E_{cost}	
	高浓度碳源（煤化工）	低浓度碳源（除煤化工外的工业排放源）
0~<200	≈70%	≥1%~≤5%
≥200~<350	≈80%	≥20%~<40%
≥350~≤500	≈90%	≥40%~<60%
<p>注1：在有政策激励的前提下，全流程CCS工程实施最大可接受成本约为政策激励价格，根据2020年全流程CCS技术经济水平基准值预测获得 E_{cost}。</p> <p>注2：当全流程CCS成本高于一定数值时，在实现碳中和目标技术体系中的竞争性或贡献度将大幅度下降，甚至被淘汰，本文件设定全流程CCS工程实施最大可接受成本为500元/tCO₂。</p>		

参 考 文 献

- [1] GB/T 13908 固体矿产地质勘查规范总则
 - [2] GB/T 14157 水文地质术语
 - [3] GB/T 15218 地下水资源储量分类分级
 - [4] GB 17741 工程场地地震安全性评价
 - [5] GB/T 17766 固体矿产资源储量分类
 - [6] GB/T 19492 油气矿产资源储量分类
 - [7] GB/T 25283 矿产资源综合勘查评价规范
 - [8] DZ/T 0217 石油天然气储量计算规范
 - [9] 郭建强, 文冬光, 张森琦等. 中国主要沉积盆地二氧化碳地质储存潜力与适宜性评价图集[M]. 北京:地质出版社, 2014.
 - [10] 沈平平, 廖新维. 二氧化碳地质埋存与提高石油采收率技术[M]. 北京:石油工业出版社, 2009.
 - [11] Bachu, S. Screening and Ranking Sedimentary Basins for Sequestration of CO₂ in Geological Media in Response to Climate Change[J]. Environmental Geology, 2003, 44(3):277-289.
 - [12] Bachu S. Review of CO₂ storage efficiency in deep saline aquifers[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2015(40):188-202.
 - [13] Capacity and Fairways Subgroup of the Geologic Working Group of the DOE Regional Carbon Sequestration Partnerships. Appendix B: Methodology for Development of Geologic Storage Estimates for Carbon Dioxide[R]. 2008.
 - [14] Goodman A, Hakala A, Bromhal G, et al. U. S. DOE Methodology for The Development of Geologic Storage Potential for Carbon Dioxide at the National and Regional Scale[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2011(5):952 - 965.
 - [15] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage[R]. 2005.
 - [16] Task Force on CO₂ Storage Capacity Estimation for the Technical Group (TG) of the Carbon Sequestration Leadership Forum (CSLF). Phase II Final Report from the Task Force for Review and Identification of Standards for CO₂ Storage Capacity Estimation[R]. 2007.
-