|  |  |
| --- | --- |
| ICS | 中国煤炭 |
| CCS | |  | | --- | | D:\000000部门项目\09标准化插件开发\程序源代码\StandardEditor_ShanDongKeXieYuan\团标首页面字母T.pngD:\000000部门项目\09标准化插件开发\程序源代码\StandardEditor_ShanDongKeXieYuan\团标首页面字母T后面的反斜杠.pngCCS |   点击此处添加CCS号 |

中国煤炭学会团体标准

T/CCS

咸水层二氧化碳地质封存选址指南

Guidelines for site selection of carbon dioxide storage in saline aquifers

XXXX - XX - XX发布

XXXX - XX - XX实施

中国煤炭学会  发布

目次

[前言 III](#_Toc146131330)

[1 范围 1](#_Toc146131331)

[2 规范性引用文件 1](#_Toc146131332)

[3 术语和定义 1](#_Toc146131333)

[4 目标和原则 2](#_Toc146131334)

[4.1 目标 2](#_Toc146131335)

[4.2 原则 2](#_Toc146131336)

[4.3 封存场地的一般要求 2](#_Toc146131337)

[5 选址勘查阶段及目的任务 3](#_Toc146131338)

[5.1 选址勘查阶段划分 3](#_Toc146131339)

[5.2 各勘查阶段目的任务 3](#_Toc146131340)

[6 普查阶段工作要求 4](#_Toc146131341)

[6.1 勘查研究内容 4](#_Toc146131342)

[6.2 勘查步骤 4](#_Toc146131343)

[6.3 勘查控制要求 4](#_Toc146131344)

[6.4 地质认识程度要求 4](#_Toc146131345)

[6.5 勘查评价成果 4](#_Toc146131346)

[7 详查阶段工作要求 4](#_Toc146131347)

[7.1 勘查研究内容 4](#_Toc146131348)

[7.2 勘查步骤 5](#_Toc146131349)

[7.3 勘查控制要求 5](#_Toc146131350)

[7.4 地质认识程度要求 5](#_Toc146131351)

[7.5 勘查评价成果 5](#_Toc146131352)

[8 勘探阶段工作要求 5](#_Toc146131353)

[8.1 勘查研究内容 5](#_Toc146131354)

[8.2 勘查步骤 6](#_Toc146131355)

[8.3 勘查控制要求 6](#_Toc146131356)

[8.4 地质认识程度要求 6](#_Toc146131357)

[8.5 勘查评价成果 6](#_Toc146131358)

[9 资料编录与综合研究 6](#_Toc146131359)

[9.1 资料编录一般要求 6](#_Toc146131360)

[9.2 综合研究一般要求 7](#_Toc146131361)

[10 成果报告编制 7](#_Toc146131362)

[10.1 报告编写 7](#_Toc146131363)

[10.2 图件编制 7](#_Toc146131364)

[10.3 附件 7](#_Toc146131365)

[附录A （资料性） 预测与控制技术容量计算公式 8](#_Toc146131366)

[A.1 计算公式 8](#_Toc146131367)

[A.2 二氧化碳的密度取值 8](#_Toc146131368)

[A.3 地质系数取值 8](#_Toc146131369)

[A.4 驱替系数取值 9](#_Toc146131370)

[附录B （资料性） 咸水层二氧化碳地质封存适宜性评价方法 10](#_Toc146131371)

[B.1 适宜性评价指标体系 10](#_Toc146131372)

[B.2 适宜性评价方法 11](#_Toc146131373)

[附录C （资料性） 咸水层二氧化碳地质封存选址××（阶段）成果报告提纲 14](#_Toc146131374)

[参考文献 15](#_Toc146131375)

1. 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。

本文件由中国煤炭学会提出。

本文件由中国煤炭学会归口。

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21世纪议程管理中心、北京理工大学、河北省煤田地质局环境地质调查院、怀柔实验室、宁夏回族自治区水文环境地质调查院。

本文件主要起草人：

咸水层二氧化碳地质封存选址指南

* 1. 范围

本文件提供了咸水层二氧化碳地质封存选址涉及的目标和原则、选址勘查阶段及目标任务、普查阶段工作要求、详查阶段工作要求、勘探阶段工作要求，资料编录与数据分析、成果报告编制等指南，可作为咸水层二氧化碳地质封存场地选址与审批管理等各项工作的参考。

本文件适用于陆域沉积盆地内深部咸水层二氧化碳地质封存选址。

* 1. 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（包括所有的修改单）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

* 1. 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

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。

1. 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。

普查 **general exploration**

咸水层二氧化碳地质封存选址的初级阶段，通过选择性地地震普查，结合已有深部钻井数据，综合分析并预测圈定适宜咸水层储层的过程。

详查 **detailed exploration**

咸水层二氧化碳地质封存选址的中级阶段，通过二维地震等地球物理详查和预探井钻探等手段，综合分析并基本圈定适宜咸水层储层的过程。

勘探 **advanced exploration**

咸水层二氧化碳地质封存选址的高级阶段，通过二维地震精查或三维地震勘探、补充钻探等手段，综合分析并圈定适宜封存咸水层储层的过程。

远景区 **prospective area**

在咸水层二氧化碳地质封存选址初级阶段预测圈定的适宜咸水层储层在平面上的投影分布区。

靶区 **target area**

在咸水层二氧化碳地质封存选址中级阶段基本圈定的适宜咸水层储层在平面上的投影分布区。

场地 **site**

在咸水层二氧化碳地质封存选址高级阶段圈定的适宜咸水层储层在平面上的投影分布区。

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。

1. 技术容量是咸水层二氧化碳地质封存潜力类型之一。

储集条件 **storage conditions**

咸水层能够渗流和封存二氧化碳的能力。

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。

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。

1. 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。

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。

* 1. 目标和原则
     1. 目标

咸水层二氧化碳地质封存选址目的是在遵循地质工作的特点和规律的基础上，通过一系列资料搜集、地面调查、地球物理、钻探、试井、室内实验及综合研究等技术手段，为碳排放源实施咸水层二氧化碳地质封存筛选适宜场地。

* + 1. 原则
       1. 综合性

充分搜集利用以往基础地质、水工环、油气、煤炭等地质勘查资料开展综合研究，尽可能提取咸水层二氧化碳地质封存地质条件信息。

* + - 1. 客观性

尊重地质条件客观规律，充分应用各类地面调查、地球物理、钻探、实验测试等技术方法，提高地质认识程度。

* + - 1. 阶段性

充分考虑重点沉积盆地或区域对二氧化碳地质封存技术需求的紧迫性，按照工作程度由低到高的原则分阶段开展选址工作。

* + 1. 封存场地的一般要求

咸水层二氧化碳地质封存场地应符合封存技术容量大、地质稳定、经济性好的原则，需要重点考虑储集条件、盖层封闭性、封存体地质稳定条件、深部资源开发互馈及地面技术经济条件。

* + - 1. 储集条件

储集条件需重点考虑以下要求：

1. 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；
2. 按照地层层序以组、段或砂层组等为单位统计分析时，咸水层储层单层厚度宜大于1 m，叠加厚度宜大于5 m；
3. 咸水层储层平均有效孔隙度宜高于5%，平均渗透率宜高于1×10-3 μm2；
4. 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；
5. 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。
   * + 1. 盖层封闭性

盖层封闭性需重点考虑以下要求：

1. 盖层岩石黏土矿物含量应高于30%且不能富含长石、碳酸盐岩等矿物，以降低CO2-水-岩反应溶蚀作用；
2. 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。
   * + 1. 封存体地质稳定条件

封存体地质稳定条件需重点满足以下要求：

1. 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）；
2. 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。
   * + 1. 深部资源开发互馈

咸水层二氧化碳封存与深部资源开发互馈需重点考虑以下要求：

1. 场地勘探与后期二氧化碳注入不能违反我国现有的矿产资源管理法律体系及重要政策规定；
2. 封存场地应尽可能降低与深部资源开发互馈程度，或能够提出科学的优先次序、监测预警及应急处置等保障措施。
   * + 1. 地面技术经济条件

地面技术经济性条件需重点考虑以下要求：

1. 场地地面用地应与国土空间“三区三线”管控要求不冲突；
2. 场地地面用地选择可按照GB 18598执行，且远离人员密集场所；
3. 在具备碳源目标的前提下，应尽可能缩短源汇距离，二氧化碳运输条件较好。
   1. 选址勘查阶段及目的任务
      1. 选址勘查阶段划分

按照GB/T 13908、GB/T 25283有关规定，根据工作程度由低到高将咸水层二氧化碳地质封存选址划分为普查、详查、勘探三个阶段。

* + 1. 各勘查阶段目的任务
       1. 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，预测圈定封存远景区。

* + - 1. 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，基本圈定封存靶区。

* + - 1. 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，进一步圈定封存场地及注入层，并完成注入方案设计。

* 1. 普查阶段工作要求
     1. 勘查研究内容

普查阶段勘查研究包括但不限于以下内容：

1. 沉积盆地或主要构造单元基底特征及与盆山接触关系，次级构造单元划分及基本形态；
2. 沉积岩地层层序，埋深800 m以下主要沉积岩地层岩性、沉积环境及沉积相；
3. 区域地层压力，以及区域地温场特征；
4. 区域水文地质条件，埋深800米以下含水层的物理化学性质；
5. 区域地壳稳定性、历史地震，主要断裂发育情况及其活动性；
6. 区域煤炭、石油、天然气等深部能源矿产赋存发育特征，以及勘查开发情况。
   * 1. 勘查步骤

广泛收集勘查区内的地质、物探、遥感、水文、矿产等各类调查勘查信息及研究成果。

开展专项地面地质调查工作，包括实测地质剖面、露头岩石和重要水体样品采集等。

选择性开展二维地震普查，视具体情况补充非地震物探勘查工作。

* + 1. 勘查控制要求

勘查工作满足但不限于以下控制要求：

1. 完成二维地震普查，主测线距宜小于4 km；
2. 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；
3. 采用合适的测井系列，初步解释区域性咸水层与隔水层；
4. 进行常规的岩心与水化学分析。
   * 1. 地质认识程度要求

地质认识程度满足但不限于以下控制要求：

1. 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；
2. 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；
3. 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；
4. 能够预测确定咸水层储层有效体积。
   * 1. 勘查评价成果

勘查评价成果应包括以下内容：

1. 估算潜在咸水层封存技术容量（预测级别），公式见附录A；
2. 评价远景区封存适宜性，评价方法见附录B；
3. 圈定咸水层封存远景区。
   1. 详查阶段工作要求
      1. 勘查研究内容

详查阶段勘查研究包括但不限于以下内容：

1. 有利封存远景区内咸水层封存圈闭的分布、类型及特征；
2. 咸水层储层岩性、厚度、物性、分布连续性，以及地下水物理化学性质；
3. 盖层岩性、厚度、物性及分布连续性；
4. 区域地层压力，以及区域地温场特征；
5. 主要断裂发育情况及其活动性；
6. 区域煤炭、石油、天然气等深部能源矿产赋存发育特征，以及勘查开发情况。
   * 1. 勘查步骤

开展二维地震详查，视具体情况补充非地震物探勘查工作。

必要时实施预探井钻探（测井），采集目标储盖层岩石和水体样品等。

必要时实施预探井试井，获取流体性质、温度和压力等资料。

* + 1. 勘查控制要求

勘查工作满足但不限于以下控制要求：

1. 已完成二维地震详查，主测线距宜小于2 km；
2. 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；
3. 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；
4. 已通过试井取得了流体性质、温度和压力资料。
   * 1. 地质认识程度要求

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；

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；

基本查明咸水层储层流体性质、温度及压力系统；

基本查明盖层岩性、物性，以及CO2-水-岩反应溶蚀特征；

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；

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。

* + 1. 勘查评价成果

勘查评价成果应包括以下内容：

1. 估算潜在咸水层封存技术容量（控制级别），公式见附录A；
2. 评价靶区封存适宜性，评价方法见附录B；
3. 圈定咸水层封存靶区。
   1. 勘探阶段工作要求
      1. 勘查研究内容
         1. 储集条件

重点包括以下内容：

1. 精细刻画目标咸水层物理化学性质及非均质性特征；
2. 咸水层地层温度、地层压力及水动力特征。
   * + 1. 封存体地质稳定条件

重点包括以下内容：

1. 精细刻画盖层物理化学性质、裂隙发育情况及分布连续性；
2. 断裂发育情况及性质。
   * + 1. 环境风险

重点包括以下内容

1. 废弃钻井及井筒密闭性；
2. 断裂发育情况及性质；
3. 人口密集区等重要环境敏感区。
   * + 1. 能源资源开发互馈

重点包括以下内容：

1. 浅层地下水。
2. 煤炭资源；
3. 石油天然气资源；
4. 地热资源；
5. 卤水资源；
6. 其他已获批准探矿权或采矿权的矿产资源。
   * + 1. 地面技术经济性条件

重点包括以下内容：

1. 地质灾害发育情况；
2. 构造地裂缝发育情况；
3. 城镇开发边界、永久基本农田、生态保护红线；
4. 二氧化碳输送条件。
   * 1. 勘查步骤

实施高精度二维地震详查或三维地震。

实施完成钻探（测井），必要时采集目标储盖层完整的取心剖面等。

年十万吨级及以上封存工程规模实施二氧化碳注入试验。

* + 1. 勘查控制要求

除复杂地质条件下，已完成二维地震测网不大于1 km× 1km，或有三维地震；

5 km×5 km基本单元内已完成评价井钻探和测井，目标储盖层至少有一个完整的取心剖面，已取全取准注入层流体性质、温度和压力资料；

年十万吨级及以上封存规模，须完成二氧化碳注入试验；

* + 1. 地质认识程度要求

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；

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；

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；

已查明盖层岩石物理化学性质，以及CO2-水-岩反应溶蚀特征；

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；

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。

* + 1. 勘查评价成果

勘查评价成果应包括以下内容：

1. 计算潜在咸水层封存技术容量（探明级别），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；
2. 评价场地封存适宜性，评价方法见附录B；
3. 圈定咸水层封存场地。
   1. 资料编录与数据分析
      1. 资料编录一般要求

各类勘查工程要按照有关勘查规程或规范的相关规定，原始记录和数据资料应齐全、准确、真实、可靠。

各类地质露头和勘查工程观测、测量记录资料应及时进行整理、处理、解释。

各种原始记录、原始编录资料以及岩心、样品等实物资料，应按相关规定的要求妥善保管，建立完整的原始资料档案。

* + 1. 数据分析一般要求

对各种勘查技术手段所取得的资料应根据勘查目标任务及时分析研究和利用，成果报告应综合反映各种勘查技术手段和研究方法取得的成果。

* 1. 成果报告编制
     1. 报告编写

成果报告参照附录C编写。

* + 1. 图件编制
       1. 普查阶段

编制咸水层二氧化碳地质封存选址普查评价成果图，应包含但不限于以下基本内容：

1. 与咸水层二氧化碳地质封存相关的地理因子；
2. 远景区范围，以及以平面不大于5 km×5 km为基本单元的封存适宜性、技术容量（预测级别）等信息。
   * + 1. 详查阶段

编制咸水层二氧化碳地质封存选址详查评价成果图，应包含但不限于以下基本内容：

1. 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；
2. 靶区范围，以及以平面不大于5 km×5 km为基本单元的封存适宜性、技术容量（控制级别）等信息；
3. 源汇匹配信息，如初步的二氧化碳输送路径等。
   * + 1. 勘探阶段

编制咸水层二氧化碳地质封存选址勘探评价成果图，应包含但不限于以下基本内容：

1. 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；
2. 场地范围，以及以平面不大于1 km×1 km为基本单元的封存适宜性、技术容量（探明级别）等信息；
3. 源汇匹配信息，如初步的二氧化碳输送路径等。
   * 1. 附件

附件应包括但不限于：

1. 地球物理勘查采集报表、原始资料、数据处理综合解释报告，其中地震勘探可按照GB/T 33583、GB/T 33685执行；
2. 钻探工程报表、泥浆报表、成果报告及录井资料；
3. 测井采集原始资料、解释报告，可按照SY/T 7620执行；
4. 各类分析化验报告；
5. 试井或灌注试验报告。
7. （资料性）  
   预测与控制技术容量计算公式
   1. 计算公式

计算公式见式（A.1）：

 (A.1)

式中：

 ——地质潜力，单位为千克（kg）；

 ——咸水层储层面积，单位为平方米（m2）；

 ——咸水层储层厚度，单位为米（m）；

 ——咸水层储层孔隙度，%；

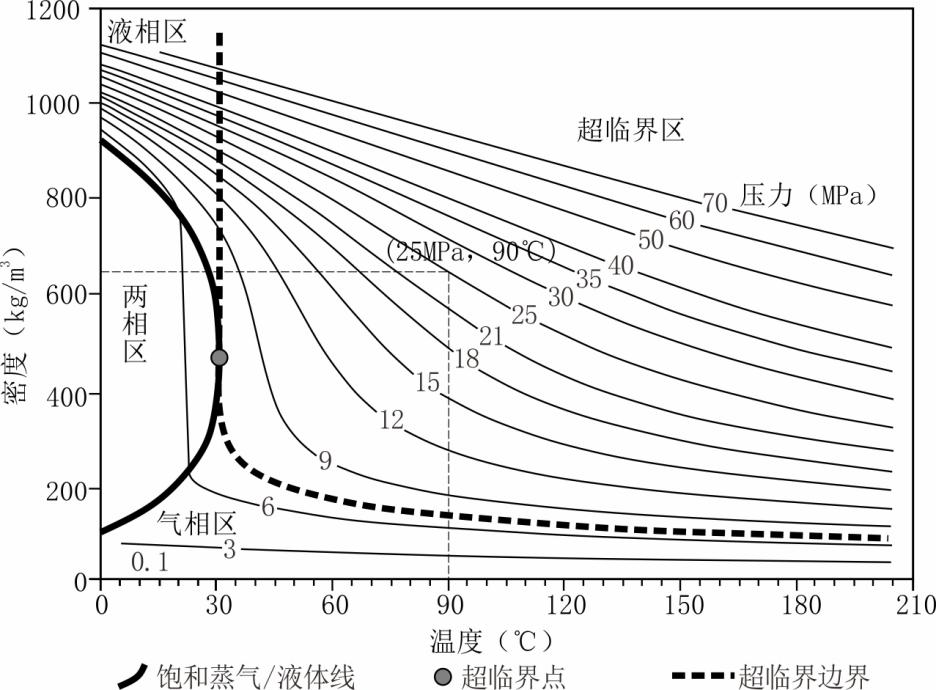
 ——咸水层储层中二氧化碳的密度，单位为千克/立方米（kg/m3）；

 ——地质系数，无量纲；

——驱替系数，无量纲。

* 1. 二氧化碳的密度取值

咸水层储层中二氧化碳的密度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

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。

* 1. 地质系数取值

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

 (A.2)

式中：

 ——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；

 ——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；

 ——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。

1. 储层勘查阶段地质认识程度越高，、、和的取值精度越高。
   1. 驱替系数取值

驱替系数是波及效率和驱替效率的乘积，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的取值，计算公式见式（A.3）。

 (A.3)

式中：

 ——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；

 ——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。

1. 驱替系数取值可参照表A.1，但实际取值范围会随地质条件与注入工艺发生变化，宜分别针对和开展补充室内实验、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 取值推荐

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 岩性 |  | | |
| P10 | P50 | P90 |
| 碎屑岩 | 7.4% | 14% | 24% |
| 白云岩 | 16% | 21% | 26% |
| 石灰岩 | 10% | 15% | 21% |
| 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对应值为驱替系数置信度为90%的置信区间上限，表示均值小于该值的可能性为90%，一般等同于最大值的概念；P50对应值为驱替系数置信度为50%的置信区间上限，表示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对应值为驱替系数置信度为10%的置信区间上限，表示均值小于该值的可能性为10%，一般等同于最小值的概念。 2. 利用P10对应取值计算获得的技术容量可认为是最小值，利用P90对应取值计算获得的技术容量可认为是最大值，利用P50对应取值计算获得的技术容量可认为是平均期望值。 | | | |

1. （资料性）  
   咸水层二氧化碳地质封存适宜性评价方法
   1. 适宜性评价指标体系

咸水层二氧化碳地质封存适宜性评价指标体系由基础指标和附加指标组成，可进一步划分为一级、二级、三级指标层次分析结构，普查阶段、详查阶段和勘探阶段适宜性评价指标体系分别见表B.1、B.2和B.3。

基础指标是适宜性评价的必备基础条件，附加指标可根据实际需求进行适当取舍。

如果重点关注咸水层地质体适宜性客观条件，可以不考虑附加指标，但在详查和勘探阶段明确碳源的情况下，应将距碳源距离等指标作为必选指标。

表B.1 普查阶段适宜性评价指标体系

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 指标类型 | 评价指标 | | | 适宜性等级评价准则 | | | 备注 |
| 一级指标层 | 二级指标层 | 三级指标 | 高 | 中 | 低 |
| 基础指标 | 储集条件 | 技术容量 | 单位面积  预测技术容量  ×106 t/km2 | ≥1 | ≥0.5～＜1 | ＞0～＜0.5 | 必选 |
| 盖层封闭性 | 盖层岩石封闭能力 | 直接盖层厚度  m | ≥10 | ≥5～＜10 | ＜5 | 必选 |
| 封存体地质稳定性 | 地震活动性 | 地震动参数区划  g | 0.05 | 0.10 | 0.15 | 必选 |
| 附加指标 | 经济性 | 勘探成本 | 地质研究程度 | 高 | 中 | 低 | 可选 |

表B.2 详查阶段适宜性评价指标体系

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 指标类型 | 评价指标 | | | 适宜性等级评价准则 | | | 备注 |
| 一级指标层 | 二级指标层 | 三级指标 | 高 | 中 | 低 |
| 基础指标 | 储集条件 | 技术  容量 | 单位面积  控制技术容量  ×106 t/km2 | ≥1 | ≥0.5～＜1 | ＞0～＜0.5 | 必选 |
| 储层单层厚度  m | ≥10 | ≥3～＜10 | ≥1～＜3 | 可选 |
| 可注入性 | 储层渗透率  ×10-3 μm2 | ≥50 | ≥10～＜50 | ≥1～＜10 | 必选 |
| 盖层封闭性 | 盖层岩石  封闭能力 | 直接盖层厚度  m | ≥10 | ≥5～＜10 | ＜5 | 必选 |
| 盖层岩性 | 泥岩、膏岩、盐岩、钙质泥岩 | 含砂泥岩、含粉砂泥岩、砂质泥岩、粉砂质泥岩 | 泥质粉砂岩、泥质砂岩、页岩、致密灰岩等 | 可选 |
| 盖层完整性 | 5 km×5 km范围内贯穿盖层钻井数量 | 0 | ≥1～＜10 | ≥10 | 可选 |
| 封存体  地质稳定性 | 地震活动性 | 地震动参数区划  g | 0.05 | 0.10 | 0.15 | 必选 |
| 附加指标 | 能源资源  开发互馈 | 矿权压覆  情况 | 矿权压覆情况 | 简单  （无压覆） | 中等  （有压覆，相互影响程度较低） | 复杂  （有压覆，相互影响程度较大） | 可选 |
| 经济性 | 运输成本 | 距碳源距离  km | ≤50 | ＞50～≤100 | ＞100 | 必选（已明确碳源） |
| 勘探成本 | 地质研究程度 | 高 | 中 | 低 | 可选 |

表B.3 勘探阶段选址评价指标体系

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 指标类型 | 评价指标 | | | 适宜性等级评价准则 | | | 备注 |
| 一级指标层 | 二级指标层 | 三级指标 | 高 | 中 | 低 |
| 基础指标 | 储集条件 | 技术容量 | 单位面积探明技术容量  ×106 t/km2 | ≥1 | ≥0.5～＜1 | ＞0～＜0.5 | 必选 |
| 储层单层厚度m | ≥10 | ≥3～＜10 | ≥1～＜3 | 可选 |
| 可注入性 | 储层渗透率  ×10-3 μm2 | ≥50 | ≥10～＜50 | ≥1～＜10 | 必选 |
| 储层连续性 | 良好 | 中等 | 较差 | 必选 |
| 盖层封闭性 | 盖层岩石  封闭能力 | 直接盖层厚度m | ≥10 | ≥5～＜10 | ＜5 | 必选 |
| 盖层分布连续性 | 良好 | 中等 | 较差 | 必选 |
| 盖层岩性 | 泥岩、膏岩、盐岩、钙质泥岩 | 含砂泥岩、含粉砂泥岩、砂质泥岩、粉砂质泥岩 | 泥质粉砂岩、泥质砂岩、页岩、致密灰岩等 | 可选 |
| 盖层岩石CO2突破压力与储层原始压力的差值  Mpa | ≥5 | ≥2～＜5 | ＜2 | 可选 |
| 盖层力学稳定性 | 稳定 | 较稳定 | 不稳定 | 可选 |
| 盖层完整性 | 断层发育情况及性质 | 断层不发育，或极少发育 | 断层较发育，规模较小，挤压性质 | 断层极发育或规模较大，拉张性质 | 必选 |
| 5 km×5 km范围内贯穿盖层钻井数量 | 0 | ≥1～＜10 | ≥10 | 可选 |
| 贯穿储盖层钻井封闭性 | 全井段固井，固井质量良好 | 主力咸水层封存段已固井，固井质量较好 | 未固井，或者仅含油气层段固井，存在泄漏通道 | 可选 |
| 封存体  地质稳定性 | 地震活动性 | 地震动参数区划  g | 0.05 | 0.10 | 0.15 | 必选 |
| 附加指标 | 能源资源  开发互馈 | 矿权压覆  情况 | 矿权压覆情况 | 简单  （无压覆） | 中等  （有压覆，相互影响程度较低） | 复杂  （有压覆，相互影响程度较大） | 可选 |
| 经济性 | 运输成本 | 距碳源距离  km | ≤50 | ＞50～≤100 | ＞100 | 必选（已明确碳源） |
| 勘探成本 | 地质研究程度 | 高 | 中 | 低 | 可选 |

* 1. 适宜性评价方法

咸水层二氧化碳地质封存的远景区、靶区和场地可以利用矩阵法、加权平均法等方法开展适宜性评价获得，随着示范工程实践数据的不断丰富，可进一步结合人工神经网络、机器学习等方法提高适宜性评价的准确度。

* + 1. 矩阵法

矩阵法指通过矩阵及运算来进行预测和决策的方法，可同时适用于普查、详查和勘探阶段，其评价原则如下：

1. 遵循逐级评价、就低不就高原则。一级指标的适宜性评价结果采用二级指标单项最低评价结果，二级指标的适宜性评价结果采用三级指标单项最低评价结果。
2. 若未明确碳源，选址适宜性评价仅选取基础指标中的必选指标。
3. 若明确碳源，应在基础指标评价结果的基础上，进一步增加附加指标中的距离碳源距离评价。仅当附加指标评价结果为低、基础指标评价结果为高时，综合评价结果为中等；其他情况下，综合评价结果均采用基础指标评价结果。

以某一5 km×5 km评价单元勘探阶段为例，具体参数取值及单项适宜性评价结果见表B.4。

1. 在未明确碳源的情况下，运用基础指标开展适宜性评价筛选场地，适宜性综合评价结果为低。
2. 在明确碳源的情况下，综合基础指标和附加指标开展适宜性评价筛选场地，适宜性综合评价结果为低。

表B.4 某区域勘探阶段运用基础指标选址评价表（不考虑碳源）

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 指标类型 | 评价指标 | | | 参数取值 | 单项适宜性评价结果 |
| 一级指标层 | 二级指标层 | 三级指标 |
| 基础指标 | 储集条件 | 探明容量 | 单位面积探明技术容量  ×106t/km2 | 0.8 | 中 |
| 可注入性 | 储层渗透率  ×10-3μm2 | 9 | 低 |
| 储层连续性 | 良好 | 高 |
| 盖层封闭性 | 盖层岩石封闭能力 | 直接盖层厚度  m | 15 | 高 |
| 盖层分布连续性 | 良好 | 高 |
| 盖层完整性 | 断层发育情况及性质 | 断层不发育 | 高 |
| 封存体地质稳定性 | 地震活动性 | 地震动参数区划  g | 0.10 | 中 |
| 附加指标 | 经济性 | 运输成本 | 距碳源距离  km | 40 | 高 |

* + 1. 加权平均法

加权平均法是多指标综合评价的基本方法，通过获得各评价指标的单因素指数值，计算出各指标的权重系数，即可求得各指标对待评判目标的贡献值，最终获取综合评分值后进一步判定其适宜性等级，其模型公式见式B.1：

(B.1)

式中：

——每个评价单元的综合评分值；

——单因素指数；

——指标权重系数，可以利用专家评判或层次分析法计算获得；

——为指标个数。

以某一5 km×5 km评价单元勘探阶段为例，具体参数取值及单项适宜性评价结果见表B.5，其权重由专家评判获得。

该勘探场地综合得分=0.09×9+0.09×5+…+0.03×5=6.28，根据表B.6适宜性综合评价结果等级划分，可认为该评价单元的适宜性等级为中。

表B.5 某区域勘探阶段选址评价表

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 指标类型 | 评价指标及权重 | | | | | | 三级指标参数 | 三级指标  单项取值 |
| 一级指标层  及权重 | | 二级指标层  及权重 | | 三级指标层及权重 | |
| 基础指标 | 储集条件 | 0.30 | 技术容量 | 0.18 | 单位面积探明技术容量  ×106 t/km2 | 0.09 | 2 | 9 |
| 储层单层厚度  m | 0.09 | 8 | 5 |
| 可注入性 | 0.12 | 储层渗透率  ×10-3μm2 | 0.06 | 12 | 5 |
| 储层连续性 | 0.06 | 中等 | 5 |
| 盖层封闭性 | 0.30 | 盖层岩石  封闭能力 | 0.15 | 直接盖层厚度  m | 0.045 | 12 | 9 |
| 盖层分布连续性 | 0.03 | 中等 | 5 |
| 盖层岩性 | 0.015 | 砂质泥岩 | 5 |
| 盖层突破压力与储层原始压力的差值  Mpa | 0.015 | 4 | 5 |
| 盖层力学稳定性 | 0.045 | 稳定 | 9 |
| 盖层完整性 | 0.15 | 断层发育情况及性质 | 0.06 | 断层较发育，规模较小，挤压型 | 5 |
| 5 km×5 km范围内贯穿盖层钻井数量 | 0.03 | 2 | 5 |
| 贯穿储盖层钻井封闭性 | 0.06 | 部分段固井，存在泄漏通道 | 1 |
| 封存体  地质稳定性 | 0.20 | 地震活动性 | 0.20 | 地震动参数区划  g | 0.20 | 0.05 | 9 |
| 附加指标 | 能源资源  开发互馈 | 0.10 | 矿权压覆  情况 | 0.10 | 矿权压覆情况 | 0.10 | 中等 | 5 |
| 经济性 | 0.10 | 运输成本 | 0.07 | 距碳源距离  km | 0.07 | 80 | 5 |
| 勘探成本 | 0.03 | 地质研究程度 | 0.03 | 高 | 5 |

表B.6 适宜性综合评价结果等级划分表

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 适宜性评价等级 | 高 | 中 | 低 |
| 综合得分 | ＞7 | ＞4～≤7 | ≤4 |

1. （资料性）  
   咸水层二氧化碳地质封存选址××（阶段）成果报告提纲

第一章 序言

说明任务的来源及要求，简述碳源概况及对规划封存工程规模。

第二章 自然地理与社会经济

论述勘查工作区范围内自然地理概况，以及社会经济条件等；详查和勘探阶段应简述国土空间“三区三线”情况。

第三章 区域地质条件

详细论述区域构造、区域地层岩性、沉积环境与沉积相、区域水文地质，以及活动断裂与地震活动性等条件。

第四章 深部资源赋存与开发情况

论述勘查工作区范围内深部煤炭、石油、天然气、页岩气等矿产资源赋存及开发情况，探明阶段应详细掌握矿产资源矿权、开发深度和层位等。

第五章 储盖层预测

详细论述潜在目标储层的储集条件、盖层封闭性条件，结合封存体地质稳定性与能源资源开发互馈，预测储盖层组合。

第六章 封存技术容量评价

计算勘查阶段相应级别的技术容量；探明阶段需构建精细地质模型，开展不同二氧化碳注入方案情景下的数值模拟，预测获取的探明技术容量。

第七章 选址综合评价

开展咸水层二氧化碳地质封存选址综合评价，优选适宜远景区、靶区或场地。

第八章 结论和建议

概述选址结论，提出后续工作建议或需要注意的问题。

附图

主要包括重要成果图件。

附件

主要包括地球物理、钻探、实验测试等重要原始资料或专题成果报告。

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 17741 工程场地地震安全性评价
4. GB 18598 危险废物填埋污染控制标准
5. GB/T 25283 矿产资源综合勘查评价规范
6. GB/T 33583 陆上石油地震勘探资料采集技术规程
7. SY/T 7620 随钻测井资料处理与解释规范
8. 中国21世纪议程管理中心，中国地质调查局水文地质环境地质调查中心. 中国二氧化碳地质封存选址指南研究[M]. 北京: 地质出版社，2012.
9. 黄晶. 第四次气候变化国家评估报告—中国碳捕集利用与封存技术评估报告[M]. 北京: 科学出版社，2021.

