中国地质调查局水文地质环境地质调查中心
CENTER FOR HYDROGEOLOGY AND ENVIRONMENTAL GEOLOGY, CGS

规模化深部咸水含水层CO_2地质储存选址方法研究

Technical Method of CO_2 Geological Storage Sites Selection in Deep Saline Aquifers

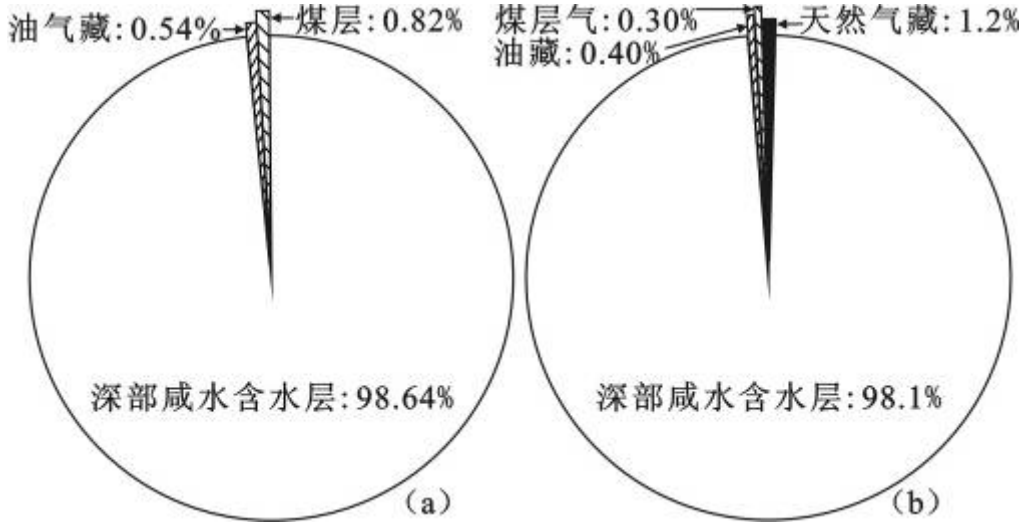
张森琦　　博士/教高
Prof. Senqi ZHANG

中国地质调查局水文地质环境地质调查中心
Center for Hydrogeology and Environmental geology
China Geological Survey
2011-7-12

汇报提纲
Outline

- 研究背景
- *Background*
- 深部咸水层CO_2地质储存属性界定
- *Attribute definition of CO_2 geological storage in deep saline aquifers*
- 选址原则
- *Site selection principles*
- 选址阶段划分
- *Site selection stages division*
- 选址指标体系及评价方法
- *Site selection index system and assessment method*

1. 研究背景 Background



- 2005，2010年，国土资源系统先后对中国CO_2地质储存潜力进行了估算，结果显示，深部咸水含水层是开展CO_2地质储存的主力
- The ministry of land and resources carried out CO2 geological storage potential evaluation in 2005 and 2010, which suggested that deep saline aquifers are the main force to carry out CO_2 geological storage

汇报提纲

- 研究背景
- 适宜规模化CO_2地质储存的深部咸水层属性界定
- 深部咸水层规模化CO_2地质储存选址原则
- 深部咸水含水层规模化CO_2地质储存选址工作阶段划分
- 深部咸水含水层规模化CO_2地质储存选址指标体系及评价方法
- 结 论

2. 适宜规模化CO_2地质储存的深部咸水层属性界定

深部咸水层CO_2地质储存水质属性

- 国标《水文地质术语》（GB/T 14157-93）依地下水矿化度大小将地下水类型划分为：地下淡水是指总矿化度小于1.0g/L的地下水；地下微咸水是指总矿化度在1.0～3.0g/L之间的地下水；地下咸水是指总矿化度在3.0～10.0g/L之间的地下水；地下卤水是指总矿化度大于50.0g/L的地下水。
- 出于工、农业多部门、多行业用水对矿化度要求较为宽泛和本着保护地下卤水资源等方面考虑，依据上述，确定深部咸水含水层地下水矿化度介于10～50g/L之间，该类地下水既不能作为工农业用水，也不满足地下卤水液体矿矿化度要求，当今技术、经济条件下“不可利用”的深部咸水含水层。

深部咸水含水层的水文地质属性

- 通常所谓的深层水是指埋藏于地壳较深部位岩层中承压水的统称。“深层”是相对浅层地下水而言的，在深度上与浅层地下水并无绝对的界限。在我国水文地质学研究领域，“深层”不是“深度”的概念，主要是指地下水有无补给或补给快慢而言的，以区别于积极参与现代水循环的浅层地下水。
- 深层地下水形成于地质历史时期特定的气候条件下，可以是沉积成因水（同生的或后生的），又可是古渗入成因水，而且可能有内生水的介入，甚至就是内生水，恢复更新速度极其缓慢、补给周期长、几乎不受气候波动影响的地下水。由于深层地下水多具承压性，有时又称作深层承压水。



适宜CO_2地质储存的深部咸水含水层应该为稳定隔水层（盖层）底板800m深度以下，水交替缓慢或十分缓慢的半封闭、封闭型水文地质结构中的含水层。

- 在水动力条件上，深层水处于水交替缓慢或十分缓慢的半封闭、封闭型水文地质结构中；在水的物理性质及介质环境特性方面，浅层地下水温度较低，Eh值较高，为正值，一般处于氧化环境；而深层水则温度较高；Eh值较低，为负值；通常处于还原环境或氧化—还原环境的过渡带；在水化学成分组成上，深层地下水总矿化度普遍较高，但也有低至2～8g/L者。深层地下水中K、Mg、B、Li、Br、I等有用元素含量普遍较高，其浓度可达到或超过工业品位。深层地下水贫氧或缺氧，代之以H2S、N2（变质成因或生物成因）和烃类气体为主体成分。
- 欲实现CO_2地质储存必须满足CO_2以超临界状态储存于地下。CO_2的临界压力为7.38MPa，临界温度为31.1℃，也就是说理论埋藏深度必须≥800m。同时，在存储点附近必须有可供进行大规模CO_2存储的优质储层，储层之上必须有稳定的、区域性的盖层（或隔水层），以防止CO_2的直接泄漏。

深部咸水含水层的资源属性

- 在开发利用上，若深层水为淡水时，同样具有浅层水的利用价值。随着人口的增加，经济的发展，对地下水资源的需求越来越多。由于地表水开发利用程度接近极限或者因污染而不能利用，浅层地下水开采程度很高以至于疏干，或者因浅层地下水属于劣质水无法利用等种种原因，而当深层水隶属于一种淡的或较淡的地下水时，就可应用于工业、农业和民用供水。因此，深层地下水的开发利用越来越受到重视。
- 面对当前我国地下卤水品质下降、储量减少、地下卤水水位下降，正在成为困扰我国制盐业及其相关产业面临的巨大问题，作为液态沉积矿藏的地下卤水资源应予以保护。
- 从资源角度来看，适宜CO_2地质储存的深部咸水含水层应该为现今技术、经济条件下，不能满足工农业利用的水资源、地热资源，亦非赋存有液体矿矿水的含水层。

CO_2地质储存深部咸水含水层综合定义

- 适宜于规模化CO_2地质储存的深部咸水含水层是指顶板埋深在800m以下，具有一定分布面积，厚度大，含水介质孔隙度、渗透率高，顶、底板为隔水性良好、大厚度、稳定的泥、膏岩类隔水层/盖层，且无贯通性的盖层裂缝和活断裂发育，亦无畅通的废弃井，矿化度介于10～50g/L之间，既不适合工农业利用，更不适合人类饮用，也达不到地下卤水液体矿矿化度要求，当今技术、经济条件下不可利用的深部咸水含水层。

汇报提纲

- 研究背景
- 适宜规模化CO_2地质储存的深部咸水层属性界定
- 深部咸水层规模化CO_2地质储存选址原则
- 深部咸水含水层规模化CO_2地质储存选址工作阶段划分
- 深部咸水含水层规模化CO_2地质储存选址指标体系及评价方法
- 结 论

3 深部咸水层CO_2地质储存工程场地选址原则

- CO_2地质储存场地既有可灌注性良好、足以使用30 a以上的地下CO_2地质储存库系统，又有稳固的盖层，无断裂和废弃油气井等地质缺陷风险因素，确保CO_2安全封存1 000 a以上，且灌注场地地面工程不受外部不良地质因素影响，源汇匹配合理，成本相对较低，并符合当地工农业发展规划、相关法律政策和环境保护目标要求。

1. 目标储层具有可储存CO_2 30年以上、有效储存量大的原则

- 就现代电厂的平均使用寿命而言，深部咸水含水层CO_2地质储存场地合理使用年限一般应不少于30年。
- 深部咸水含水层CO_2地质储存场地使用年限是从注入CO_2开始至封场的时间。从理论上讲，使用时间越短，单位CO_2地质储存的费用就越高。因此，场地使用年限必须在选址时就必须给予充分考虑。

有效储存量

- 有效储存量是通过应用一定的技术条件（地质上的和工程上的）来限制储存量的评估范围，如储层的物理条件（孔隙度、渗透率、温度和压力）、埋深、盖层稳定性和安全性，以及该储存区域矿产资源的开发利用情况等。
- 为确定拟选场地有效储存量，须通过地球物理勘查、钻探、样品采集与测试、灌注试验、数值模拟与监测等手段，确定储层介质的几何形状、圈闭构造完整性、埋深、厚度、孔隙度、渗透率、非均质性、压力、温度、岩石矿物学特征、流体流动方向、咸水含水层的矿化度等等数据，筛选潜在储层，通过数值模拟明确场地有效储存量和使用年限。

2. 安全原则

- 安全原则是深部咸水含水层CO_2地质储存选址的重要原则。
- CO_2大量泄漏可能产生以下环境问题：一是可能增大接纳水体的酸度，打破原有的地球化学和生态平衡，导致地下水污染；二是一旦发生大规模地层运动，大量的CO_2逃逸地表将给附近地区造成毁灭性的灾难，影响人群健康；此外，还可能诱发地震，产生地面变形等地质灾害。

CO_2泄露可能的环境风险

- 逃逸的CO_2对当地环境的影响主要表现在：一是可能增大接纳水体的酸度，打破原有的地球化学和生态平衡，导致地下水污染；二是一旦发生大规模地层运动，大量的CO_2逃逸地表将给附近地区造成毁灭性的灾难，影响人群健康；此外，还可能诱发地震，产生地面变形等地质灾害。
- 因此，在工程选址阶段必须开展相关资料搜集、遥感地质调查、场地综合地质调查、地球物理勘查选址方法、钻探、灌注试验和环境背景监测工作，以期查明CO_2储存库盖层封闭性质量，有无废弃钻井、断裂等等潜在CO_2逃逸通道。明确储层上部是否有可供工农业利用地下水含水层、与可利用地下水主要补给区的关系及距离、与河流、水库等地表饮用水水源的位置关系及距离、与固定居民点的距离、与固定居民点的主导风向关系以及与其他需要特别保护目标区的距离等基本数据。在选址阶段，排除因地质缺陷导致深部咸水含水层CO_2地质储存安全风险的产生。

3. 经济原则

- 以合理的技术、经济方案，以较少的投资，不过多额外地消耗其他化石能源，实现深部咸水含水层CO_2地质储存，是现阶段CO_2地质储存选址的基本原则。
- 对此，在工程选址阶段要查明CO_2气源分布和规模、碳源距离、基础设施（水、电、交通、通讯、医疗等），对场地征地、CO_2灌注工程建造等价格进行了解，对运输方式进行论证，提出最佳的经济方案。



4. 符合一般建设项目环境保护选址条件，不受外部不良地质因素影响的原则

- 目前，有关CO_2地质储存实践更多的是把CO_2作为工业废物来看待。由此界定，CO_2地质储存工程属环保型项目。同时，因为CO_2地质储存存在着泄露的风险，因此，在选址阶段就应其选址应符合一般建设项目环境保护选址条件的原则。



《危险废物填埋污染控制标准》（GB18598-2001）选址规定

- 标准规定，CO_2地质储存选址应处于一个相对稳定的区域，不会因自然或人为的因素而受到破坏；地表灌注设施必须位于百年一遇的洪水标高线以上，并在长远规划中的水库等人工蓄水设施淹没区和保护区之外；要求场地地质条件应位于地下水饮用水水源地主要补给区范围之外；地质结构相对简单、稳定，没有断层；应避开下列区域：破坏性地震及活动构造区；海啸及涌浪影响区；湿地和低洼汇水处；地应力高度集中，地面抬升或沉降速率快的地区；石灰溶洞发育带；废弃矿区或塌陷区；崩塌、岩堆、滑坡区；山洪、泥石流地区；活动沙丘区；尚未稳定的冲积扇及冲沟地区以及其他可能危及填埋场安全的区域。

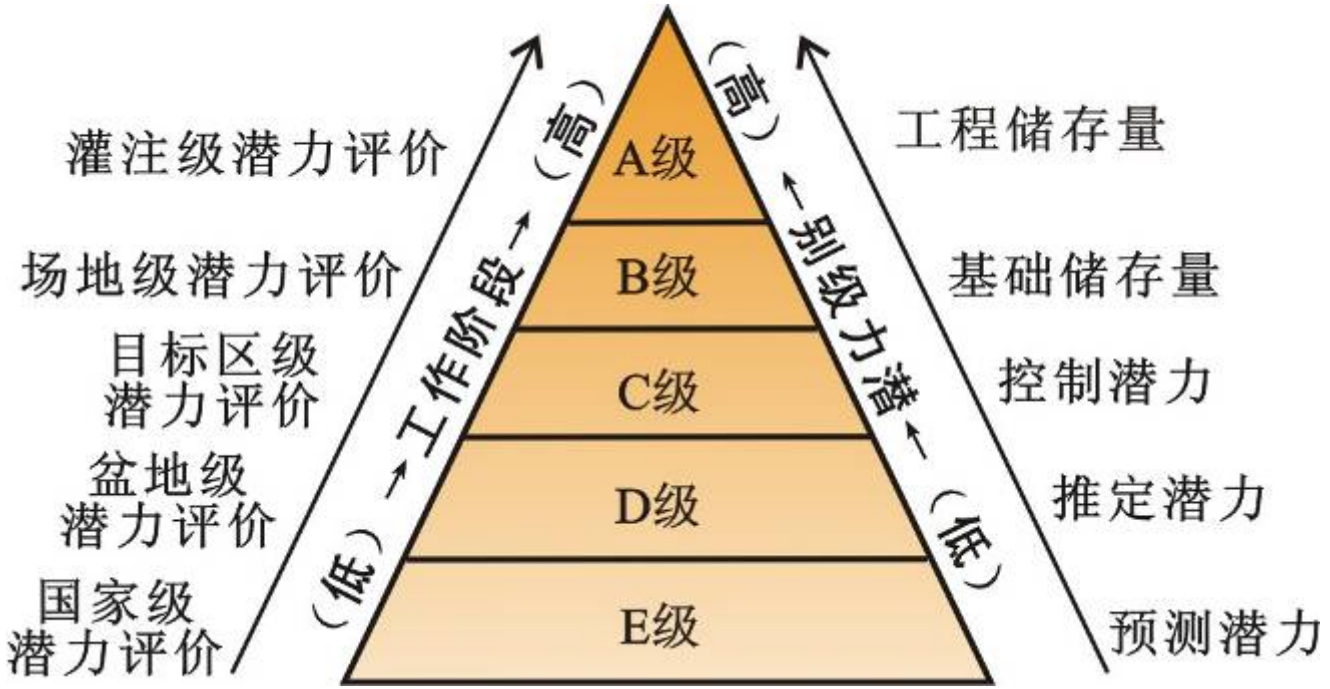
汇报提纲

- 研究背景
- 适宜规模化CO_2地质储存的深部咸水层属性界定
- 深部咸水层规模化CO_2地质储存选址原则
- 深部咸水含水层规模化CO_2地质储存选址工作阶段划分
- 深部咸水含水层规模化CO_2地质储存选址指标体系及评价方法
- 结 论

4 深部咸水层规模化CO2地质储存选址工作阶段原则

- **4.1 工作阶段划分**
- 基于我国多年来地下水资源和矿产资源勘查实践，本文认为我国CO_2地质储存地质工作是一个分阶段、循序渐进式的专业技术工作。全国CO_2地质储存潜力与适宜性评价工作阶段依次为：国家级预测潜力评价阶段（第一阶段）、盆地级推定潜力评价阶段（第二阶段）、目标区级控制潜力评价阶段（第三阶段）、场地级基础储存量评价阶段（第四阶段）和灌注级工程储存量评价阶段（第五阶段），基本思路是基于从盆地到圈闭和储层评价，遵循循序渐进的地质工作原则，开展选址工作。

中国CO_2地质储存工作阶段与潜力分级图



多尺度目标逼近选址阶段

- 多尺度目标逼近即按照“中国CO_2地质储存潜力与适宜性评价”工作阶段进行，基本思路是基于从盆地—圈闭—注入层评价循序渐进开展选址工作的。CO_2地质储存选址包括规划选址和工程选址两大阶段。

选址阶段		研究对象	潜力/储量级别	目的、任务
规划选址	国家级潜力评价	全国陆域沉积盆地	预测潜力（E级）	以单个盆地为单元进行适宜性评价，对沉积盆地进行适宜性排序，淘汰部分盆地，选择出适宜的盆地。
	盆地级潜力评价	盆地一级构造单元	推定潜力（D级）	以盆地一级构造单元为单元，进行适宜性评价，评价出盆地中CO_2地质储存远景区。
	目标区级潜力评价	盆地圈闭级构造单元	控制潜力（C级）	制定CO_2地质储存目标靶区选择标准，在圈闭内，比选出CO_2地质储存目标靶区。
工程选址	场地级储量评价	工程场地	基础储存量（B级）	开展CO_2地质储存场地勘查，对场地作出勘查评估，指导CO_2灌注工程的设计。
规模性灌注	灌注级储量评价	正式开展CO_2灌注工程的场地	工程储存量（A级）	开展CO_2灌注工程的监测，根据灌注工程的运行状况，对灌注场地CO_2灌注量及场地风险进行评估。

规划选址阶段

- 深部咸水含水层CO_2地质储存规划选址的第一阶段是国家级潜力评价阶段；第二阶段为盆地级一级构造单元潜力评价阶段；第三阶段为CO_2地质储存目标靶区级（圈闭）评价阶段；第四阶段即工程选址阶段。
- 其中，前两个阶段主要是对国家级和盆地级CO_2地质储存潜力进行评价，第三阶段，重点是在选择出可供CO_2地质储存圈闭或地区的基础上，对圈闭内各地质时代形成的储、盖层做精细描述和刻画，通过圈闭内物化探资料、井筒资料和综合研究资料，采用综合评价方法，对圈闭CO_2地质储存条件进行评价，优选出CO_2地质储存目标靶区。

工程选址阶段

- 第四阶段即工程选址阶段，应在3处以上预选场地中，进行比较排序，权衡利弊，从中选择出CO_2地质储存优选场地，最后给出选定场地。选址的基本思路是在初步制定的深部咸水含水层CO_2地质储存选址评价指标体系的基础上，筛选出最佳CO_2地质储存场地，通过选址范围由大到小的多尺度分析，使选址目标逐步逼近。进而通过场地遥感调查、综合地质调查、地球物理勘探、钻探与灌注试验、室内物理模拟与数值模拟，查明场地CO_2地质储存地质条件，计算场地有效储存量，制定合理的CO_2灌注方案，为CO_2灌注工程施工图设计提供依据。

工程选址程序

- 深部咸水含水层CO_2地质储存工程选址程序包括：
- CO_2地质储存目标靶区（圈闭或地区）确定阶段
- 综合地质调查阶段（资料搜集、遥感调查、现场实地综合地质调查、地球物理勘查）
- 钻探及灌注试验阶段（钻探、样品采集与测试、灌注试验、数值模拟）
- 选定场地综合评价阶段
- 各阶段排序选出的场地依次称预选场地、优选场地和选定场地。

4.2 CO_2地质储存预选场地比选评价阶段

- 相当于地质工作的普查阶段，地质工作程度为1：5万。以沉积盆地三级构造单元内的圈闭为研究对象和评价单元，通过圈闭级CO_2地质储存适宜性评价，提出3处以上CO_2地质储存预选场地。
- 该阶段工作以盆地三级构造单元为研究对象，对800～3500m深度区间各地质时代形成的储、盖层做进一步详细概化，通过三级构造单元内钻孔、地震地球物理、储、盖层和流体资料等资料的搜集、遥感解译、野外实地调查、综合研究，丰富CO_2地质储存潜力计算参数，计算有效储存量，对储、盖层进行评价。本着**“地下决定地上，地下顾及地上”**的原则提出3处以上CO_2地质储存预选场地。
- CO_2地质储存预选场地评价结束后应提交预选场地的可行性研究报告，目的是利用充足的资料说明场地具有可选性。

4.3 综合地质调查与优选场地筛选阶段

- 该阶段工作相当于地质工作的详查阶段，工作程度为1：1万，每处预选场地工作面积相当于一个1：5万国际标准图幅。目的是通过场地综合地质调查、地震地球物理勘探查明预选场地CO_2地质储存地质条件，计算有效储存量。开展储、盖层地层岩性、地质构造、活动断裂、地壳稳定性、地质灾害、社会经济、气象水文和矿产资源等专项调查，对预选场地进行排序，筛选出2处以上优选场地。综合地质调查阶段采取的主要手段有资料搜集、遥感调查、综合地质调查和地球物理勘查等。

评价技术报告

- 综合地质调查结束后，应编制优选场地综合地质条件评价技术报告。报告应详细说明各预选场地的综合地质条件，详细描述各预选场地的不利和有利因素，对预选场地进行综合评价与排序，筛选出优选场地，并对下一步工作提出建议。以报告的形式提出并报请项目主管单位，再由主管单位报请官方审批，列入国家或地方的计划项目，使CO_2地质储存工程项目从可行性研究阶段进入正式计划内的工程项目阶段，从而可以履行一切计划工程项目的手续。
- 优选场地综合地质条件评价技术报告是CO_2地质储存选址的关键依据和工程立项依据，标志着CO_2地质储存项目由选址阶段正式过渡到工程阶段。该报告也是场地进入钻探及灌注试验阶段的依据。如果场地得到不可选的结论，选址工作则又要重新回到第一或第二阶段工作，进行重新选址。

4.4 选定场地钻探及灌注试验阶段

- 通过优选场地钻探及CO_2地质储存灌注试验工作，对优选场地进行全面评价。目的是全面系统地论证优选场地的可接受性和优化性；通过确钻探、灌注试验、数值模拟说明优选场地的可灌注性、使用年限等关键问题，提出CO_2地质储存选定场地。
- 该阶段工作相当于地质工作的勘探阶段，工作手段以钻探、钻孔样品采集与测试、灌注试验、CO_2环境背景值与灌注试验CO_2监测和数值模拟为主。
- 钻探及灌注试验场结束后，应编写“二氧化碳地质储存场地勘查与场地选定报告”。报告应详细说明选定场地的综合地质条件，评价选定场地CO_2可灌注性，安全及环境影响、经济合理性等。如符合CO_2地质储存的要求则转入工程性实际灌注，选址结束。

4.5 选定场地综合评价阶段

- 通过前三个阶段的工作，对选定场地进行技术、经济、安全和环境等方面综合评价，充分论证其合理性，并作为工程竣工验收的重要组成部分。
- 采用的综合评价方法有层次分析—模糊综合评判法、专家系统法和地理信息系统（GIS）等。其中，GIS（Geographical Information System）技术贯穿CO_2地质储存选址全过程。该方法的第一步就是决定场地可选性的限制因素，并将收集的一系列因子利用计算机绘制成各种图表，并在图中突出那些限制性因素的作用。在计算机上把这些图相互叠加和对比，以便明显查找出不受限制性因素制约的具有可选性的预选场地的空间位置，同时也可对比出各预选场地条件的优、劣等级。而层次分析法能综合处理具有递阶层次结构的场地适宜性影响因素之间的复杂关系，又易于操作，得到比较量化的结果，相对准确。

汇报提纲

- 研究背景
- 适宜规模化CO_2地质储存的深部咸水层属性界定
- 深部咸水层规模化CO_2地质储存选址原则
- 深部咸水含水层规模化CO_2地质储存选址工作阶段划分
- 深部咸水含水层规模化CO_2地质储存选址指标体系及评价方法
- 结 论

5 深部咸水层规模化CO_2地质储存选址指标体系及评价方法

- **5.1 选定评价指标体系构成**
- 场地选址是深部咸水含水层CO_2地质储存工程的第一步，也是最关键的一步。CO_2地质储存场地选址受到自然地理、气象水文、地形地貌、地质构造、储盖层组合及其物性、社会经济、源汇匹配、交通运输以及工程技术条件等诸多因素制约。尽管如此，可将其归纳为选址技术、安全性、经济适宜性和地面地质—社会环境条件四个方面建立层次分析结构的选址评价指标体系。

指标层	指标亚层	指 标 组 成
技术指标层	储层宏观特征	埋深、厚度、地层压力系数、沉积环境、地层组合与砂厚比、水文地质条件、矿化度、水头状态
	储层物性参数	孔隙度、渗透率、非均质性
	储层储存前景	有效储存量、使用年限
	地热地质特征	地表温度、地温梯度、大地热流值
	灌注试验评价	注入指数、有效封存系数
	灌注控制技术	注入井作业压力、注入井注入量、注入井注入速度
安全性评价指标层	盖层宏观特征评价指标	盖层的岩性、盖层单层厚度、盖层累计厚度、盖层分布连续性
	盖层微观封闭能力评价指标	盖层封气指数、主力盖层之上的小盖层数量
	二次截留条件评价指标	主力盖层之上次级盖层和储层的数量和质量
	断裂通道评价指标	断裂和裂缝发育情况
	人为通道评价指标	场地100km^{2}范围内是否有其他钻井及废弃井
	地壳稳定性评价指标	地震动峰值加速度、场地地震安全性、场地25km半径范围内是否有活动断层
经济评价指标层		碳源规模、碳源距离、运输方式、社会环境、基础设施、蕴矿状况、成本
地面地质—社会环境选址指标层	场地地质环境影响因素	地质灾害易发性、是否在采矿塌陷区、岩溶塌陷区、是否在地面沉降区、是否在沙漠活动状况区、是否在火山活动状况区、是否低于江河湖泊、水库最高水位线或洪泛区
	可能的CO_2泄露通道	场地及周边是否有废弃钻井、现有技术条件下未被发现的断裂
	对作业人员的影响	CO_2灌注场地地形地貌、CO_2灌注场地有无主导风向
	所在地区的性质	是否符合城市和区域发展总体规划、是否在农业保护区、自然保护区、风景名胜区、文物保护区、生活饮用水源保护区、供水远景规划区、矿产资源储备区和其他需要特别保护的区域以及植被状况
	与饮用水源的关系和距离	CO_2储层上部是否有可供工农业利用地下水含水层、是否在饮用地下水主要补给区内、距离河流、水库等地表饮用水水源的距离
	与敏感区的关系和距离	与固定居民点的距离、与固定居民点的主导风向关系、与其他需要特别保护目标区的距离

5.2 主要选址地质评价指标的涵义

- (1) 地形地貌和主导风向：由于CO_2的密度比空气重近50%，当CO_2逃逸地表后，将在重力和大气流的作用下，沿地表在洼地处聚集，使局部CO_2浓度增高。如果人或动物在此区域活动，危险也随之产生。因此，不宜将CO_2灌注场地置于地势低洼，缺乏主导风向的地区，避免对对作业人员和其他人员的影响。据此可确定拟选场地地形高凸开阔，有主导风向时，场地为“好”；地形开阔—较浅洼地，主导风向不明时，为“一般”；地形低洼、复杂，缺乏主导风向时，为“差”。

(2) 水文地质条件

- 依CO_2地质储存与水文地质条件的关系分为，水力运移逸散作用、水力封闭作用和水力封堵作用3种水文地质控气作用。其中，前一种作用将导致CO_2逃逸，后两种则有利于深部咸水含水层CO_2地质储存。
- 水力运移逸散控气作用常见于导水性强的断层构造发育地区，通过导水断层或裂隙，沟通储层与含水层，水文地质单元的补、径、排系统完整，含水层富水性与水动力强，含水层与CO_2地质储存储层水力联系较好，在地下水的运动过程中，地下水可携带CO_2运移而逃逸地表，进入大气环境。
- 水力封堵控气作用常发生于不对称向斜或单斜中，在一定压力差作用下，CO_2从高压力区向低压力区渗流，如果含水层地表接受补给，顺层由浅部向深部运动，则CO_2向上扩散时将被地下水封堵，致使CO_2得以封存。

- 水力封闭控气作用发生于断裂不甚发育的宽缓褶皱或单斜中，而且断裂构造多为不导水性断裂，特别是一些边界断层，具有挤压、逆掩性质，成为隔水边界，储层上部和下部存在良好的隔水层（盖层），深部咸水含水层与上覆、下伏含水层以封闭的盖层相隔离，无水力联系，区域水文地质条件简单，含水层水动力较弱，地下水径流缓慢甚至停滞，以静水压力和重力驱动方式流动。水力封闭控气作用一般发生在深部，地下水通过压力传递作用而构成水力封闭。
- 据上述水动力控气作用机理分析，可确定拟选场地水文地质条件为水力封闭控气作用时，场地为“好”；水文地质条件为水水力封堵控气作用时，为“一般”；水文地质条件为水力运移逸散控气作用时，为“差”。

(3) 深部咸水含水层水头状态

- 由于深部咸水含水层多为深层承压水含水层。如果将CO_2注入到承压水头高出场地地面的深部咸水含水层中，不仅注入压力大、不经济；而且一旦井口装置失效，注入的CO_2会随承压自流水不断溢出地表，成为安全隐患。基于这一考虑，将深部咸水含水层水头低于地面时的场地为“好”；与地面大体一致的场地为“一般”；高出地面的场地为“差”。

(4) 储层非均质性

- 储层非均质性制约着CO_2在储层中的流动状况。储层的非均质性越严重，CO_2波及的范围越小，从而影响CO_2的地质储存能力。储层的非均质性评价可选择层间非均质性和层内非均质性两个指标评价。层间非均质性采用平面非均质性评价。平面非均质性包括储层砂体的几何形态、砂体展布与连续性、物性的平面变化等方面的研究内容。砂体连续性一般分为五级：一级为砂体延伸超过2000m，连续性极好；二级为砂体延伸1200～2000m，连续性好；三级为砂体延伸600～1200m，连续性中等；四级为砂体延伸300～600m，连续性差；五级为砂体延伸小于300m，连续性极差。层内非均质性重点是研究层内纵向上渗透率的变化。非均质性主要指高孔渗段所处的位置、渗透率级差和渗透率的非均质性、层内垂向渗透率与水平方向渗透率的比值，常用渗透率变异系数、渗透率突进系数和渗透率级差等参数对层内非均质性进行评价。

(5) 盖层岩性

- 理论上讲，任何类型的岩石都可作为封盖层。实际上，油气田勘探证实最常见的盖层有泥质岩（泥岩、页岩）和蒸发岩（石膏、盐岩），其次为碳酸盐岩（泥灰岩、泥质白云岩、致密灰岩、致密白云岩）和冰冻成因盖层，而燧石层、煤层、致密火山岩及侵入岩盖层偶见。世界334个大油气田统计资料表明（H . P . 克莱姆，1977），泥质岩盖层占65%，蒸发岩盖层占33%，致密灰岩盖层占3%，结合CO_2地质储存机理，综合现有盖层岩性评价标准，可给出盖层岩性评价等级。

(6) 断裂和裂缝发育情况

- 断裂和裂缝的发育会影响盖层的完整性和连续性，进而影响对CO_2的封闭能力。一般情况下，断裂作用对盖层的封闭性起着破坏性作用，尤其是当断层断距大于盖层厚度或断裂带呈开启状态时，断裂可使盖层完全丧失封闭能力，对CO_2的储存十分不利。



(7) 场地及周边是否有废弃井

- 废弃井是CO_2地质储存主要的人为泄露途径之一。随着各类地下勘探开发的深入，废弃井的数量越来越多。如果这些废弃井无封堵处理，将成为CO_2人为逃逸通道。因此，在深部咸水含水层规模化CO_2地质储存选址阶段，应查明场地100km^{2}范围内是否有废弃井和断裂构造存在，并采取措施避免通过废弃井发生逃逸。

(8) 压覆矿产资源

- 是指因CO_2地质储存工程实施后导致矿产资源不能开发利用的现象。但是建设项目与矿区范围重叠而不影响矿产资源正常开采的，不作压覆处理。矿产资源是指国家规划矿区、对国民经济具有重要价值的矿区和《矿产资源开采登记管理办法》附录中34个矿种的矿床规模在中型以上的矿产资源。评价的理念是CO_2地质储存场地越不影响矿产资源开发利用，越适宜CO_2地质储存。因此，在深部咸水含水层CO_2地质储存选定场地评价阶段，应委托具有地质勘查资质的单位进行压覆区的矿产资源的评估。

(9) 场地地质灾害易发性

- 地质灾害是指包括自然因素或者人为活动引发的危害人民生命和财产安全的山体崩塌、滑坡、泥石流、地面塌陷、地裂缝、地面沉降等与地质作用有关的灾害（国务院令第394号）。地质灾害易发区是指具有地质灾害形成的地质地貌条件和在自然、人为等营力作用下，容易产生地质灾害的区域。
- 《地质灾害防治条例》（国务院令第394号）和各省（自治区）地质灾害危险性评估规程规定，在地质灾害易发区内进行工程建设，必须在可行性研究阶段或者在申请核准、备案前进行地质灾害危险性评估。因此，在CO_2地质储存选址阶段，需委托有资质的单位对场地进行地质灾害危险性评估。在此选择地质灾害易发性进行评价。通常根据地质灾害易发性划分为高易发、中易发、低易发和不易发。

层次分析基础上的多因子排序选址方法

- (1) 确定评价矩阵。
- (2) 层次分析法计算客观权重
- (3) 指标同向化
- (4) 评价矩阵无量纲化处理
- (5) 确定加权数据矩阵
- (6) 确定理想样本和负理想样本
- (7) 计算每个评价对象与理想样本和负理想样本的距离
- (8) 计算评价对象与最优样本相对接近度
- (9) 排序



指标层	权重	指标亚层	权重	评价因子
选址技术因素	0.40	储集体条件	0.51	孔隙度，渗透率，……
		储存潜力	0.26	有效储存量，储存年限，……
		地层压力	0.13	地温梯度，大地热流值，……
		地层温度	0.03	注入层压力，……
		灌注技术	0.07	注入指数，注入量，注入速度，……
地质安全性因素	0.35	盖层封闭性	0.63	盖层宏观发育特征，盖层定量封闭指数，……
		地壳稳定性	0.26	活动断裂发育情况，地震安全性，……
		地面地质灾害易发性	0.11	崩塌，滑坡，泥石流，……
经济因素	0.20	灌注成本	0.06	CO_2成本，……
		源汇匹配	0.26	碳源规模，碳源距离，……
		基础设施	0.12	运输方式，交通条件，……
		压占资源情况	0.56	煤层、油气、地热，……
地面环境保护条件因素	0.05	公众社会环境	0.67	人口密集程度，公众认可程度，……
		场地地理条件	0.33	地理位置，与敏感区的距离，……

汇报提纲

- 研究背景
- 适宜规模化CO_2地质储存的深部咸水层属性界定
- 深部咸水层规模化CO_2地质储存选址原则
- 深部咸水含水层规模化CO_2地质储存选址工作阶段划分
- 深部咸水含水层规模化CO_2地质储存选址指标体系及评价方法
- 结 论

6 结论

- 中国沉积盆地深部咸水含水层CO_2地质储存潜力远远大于油气藏、煤及煤层气藏等其他地质储存介质，是实现规模化CO_2地质储存的主力介质类型。
- 研究表明，适宜规模化CO_2地质储存的深部咸水含水层是指顶板（盖层）埋深在800m以下，具有一定分布面积，厚度大，含水介质孔隙度、渗透率高，顶、底板为隔水性良好、大厚度、稳定的泥、膏岩类隔水层，且无贯通性的裂缝和活断裂发育，矿化度介于10～50g/L之间，既不适合工农业利用，更不适合人类饮用，也达不到地下卤水液体矿矿化度要求，当今技术、经济条件下不可利用的深部咸水含水层。

- 本文提出的选址原则宜坚持目标储层具有可储存CO_2 30年以上，有效储存量大的原则、安全原则、经济原则和符合一般建设项目环境保护选址条件，不受外部不良地质因素影响的原则四项。选址工作阶段依次为，CO_2地质储存预选场地比选评价阶段、综合地质调查与优选场地筛选阶段、选定场地钻探及灌注试验阶段和选定场地综合评价阶段四个阶段。
- 建立了选址技术、安全性、经济适宜性和地面地质—社会环境条件四个指标层，60余个指标的选址评价指标体系，提出了基于层次分析（*AHP*）的多因子排序选址评价方法。

中国地质调查局水文地质环境地质调查中心
CENTER FOR HYDROGEOLOGY AND ENVIRONMENTAL GEOLOGY, CGS

谢谢！

敬请提出宝贵意见！