



国际水文地质学家协会

战略概念系列 能源生产与地下水

关键信息

- 应用水文地质学是水热能源可持续开发（特别是建筑制冷/供暖），以及核能领域的核电站选址和放射性废物处置的重要支撑
- 在不可再生油气资源开发过程中，重点关注浅层含水层受地层盐水、烃类化合物、水力压裂液以及“游离气”等潜在污染风险
- 油气井回注是烃类废物管理的重要环节，但缺少含水层与深部生烃地层中间过程的了解
- 在全球范围内，地下水开采—尤其是灌溉农业用水是重要能源消耗端。含水层枯竭和不合理井场设计导致的低效利用问题，仍有待进一步研究
- 为了保护城市地下水水源，实施有效的土地管理是当务之急，避免因去除污染物（如硝酸盐、农药和工业化学品）产生高昂的水处理成本

能源部门如何与地下水领域相互作用？

能源的产生、消耗和管理通过多种方式与地下水相互作用。需要水文地质科学作为支撑，来理解其内在联系，并进行风险评估和有效管理。为了便于讨论，本文将能源开发与地下水相互作用类型分为：

- 可再生能源的可持续发展
- 不可再生能源对地下水的影响
- 地下水开采和利用消耗的能源。

可再生能源的发展与地下水之间关系？

• 高焓地热资源

高焓地热资源通常位于地下深处，具有高温（ $>150^{\circ}\text{C}$ ）和高压特征。该类地热资源的形成主要与火山活动有关，分布范围有限。现有技术条件下，可以通过直接开采-发电的方式加以利用。需要通过水文地质调查，进行地热井场设计，以提

地热发电站





升流量和温度、以及地热资源开发的可持续性。

• 低焓水热资源

浅层低焓地热资源（大气压下 $<50^{\circ}\text{C}$ ）的开发利用发展势头强劲：

- 配合地源热泵技术，该类地热资源可用于冬季空间供暖和夏季制冷（回注含水层中的温水可供后期开采）
- 地下水直接用于空间冷却。

水文地质分析和建模是评估地热系统井间距、含水层性质和热突破特征的重要依据，也是优化井场建设，避免邻井干扰的重要依据。

鉴于现代办公楼具有较高的保温标准（以及变压器等热源的普遍存在），这类建筑通常取暖需求非常有限，全年制冷需求量大。与此相关的一个问题是，城市地下水普遍存在“热岛效应”。

• 核电站与废物处理

水文地质条件是核电站选址的关键考虑因素，地下水突水事故的可能性是必须评估的危害之一。核设施放射性核素释放的风险评估和管理依赖于对地下水流动、放射性核素的水文地球化学行为以及对生物受体的潜在影响。

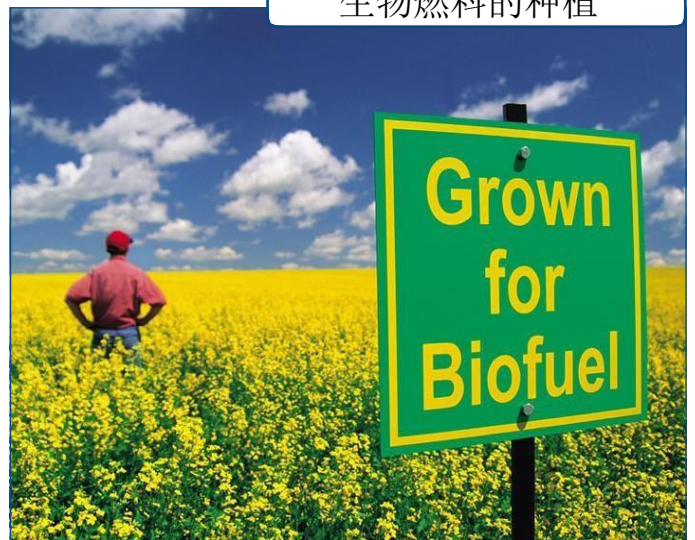
放射性废物管理不仅是核能发电，也是其他核能开发利用环节（包括医疗放射性核素使用、铀矿开采和加工）所面对的一项重要技术挑战。放射性废物的长期安全处置是最终目标，且人们普遍认为地质处置在气候和环境变化的背景下风险最低。

地下水既会影响核废物处置工程屏障的完整性，也会影响放射性核素释放的运输。在较大深度范围，评估主体围岩和邻近地层稳定性，是水文地质领域面临的一项重要挑战。深层低渗透系统的表征和建模对于评估放射性核素封存安全性和泄漏风险至关重要。

地下岩体作为核废料泄漏屏障和衰减重要屏障，其有效性需要结合地下水资源风险进行评估。实施组织和监管机构需要具备水文地质专业知识，确保：

- 获取特定地点的数据，分析地下水过程，评价水文地质条件和过程的不确定性
- 分析和评估非常规地下水环境中的长期过程
- 校准放射性核素迁移转化的地下水数值模型，用于“现实”和“最坏情况”情景下的预测。

生物燃料的种植



• 生物燃料作物利用

生物燃料作物的广泛种植，将使用大量化肥和杀虫剂，同时需要大量的灌溉和加工用水。例如，美国自1998年和2005年引入和扩大生物燃料补贴以来，大豆种植对地下水灌溉消耗量迅速增加。可采用其他土地利用方式对地下水资源的影响评估方法，评价生物燃料作物种植对地下水系统的影响。

• 太阳能捕获

在印度等国家，太阳能利用量大幅增加。政府鼓励农民使用太阳能为灌溉水井的水泵供电。干旱地区的太阳能电池板需要定期清洁，而地下水是首选水源。

不可再生能源会对哪些地下水产生影响？

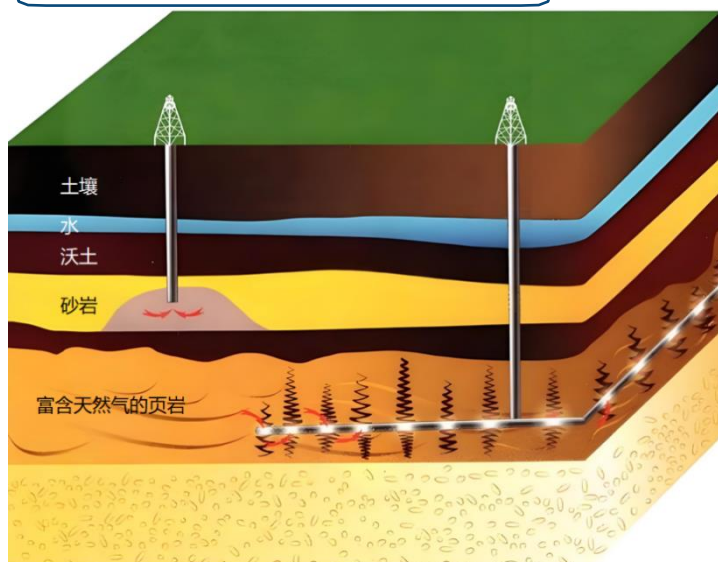
• 常规陆上碳氢化合物开采

碳氢化合物资源（石油和天然气）的开发需要大量消耗地下水资源：地层盐水和/或地表滞留池中碳氢化合物的渗透或渗漏而对浅层地下水水质构成重大风险。这些工程需要全面的水文地质风险评估，配套适当的环境监管，并实施动态的操作管控。目前在流程和程序方面全球已有较多经验。

• 非常规陆上油气开采

当前处于非常规油气开发的热潮，尤其是页岩气（包括页岩油）开发领域，常采用定向钻井技术，在1500-2000米深度的水平气井段进行高压（ $>2000 \text{ kg/cm}^2$ ）注液，以产生裂缝（通常 <300 米长度）。该技术被称为“水力压裂”，注入流体

常规与非常规天然气井的井下完井



的体积可达 $8000-30000 \text{ m}^3$ ，流体中含有90%水砂混合物，以及乙二醇等添加剂。“返排液”（压裂液、地层水，可能还有浸出的盐和放射性物质）在压裂后从页岩气井中提取出来，储存在地面，然后进行再利用或深井处理。

多年来，人们一直在垂直气井中开展水力压裂施工。水平气井段（通常 >1 公里）中使用水力压裂技术，需要更大的流体体积和更复杂的添加剂。尽管发电厂使用天然气可以大大减少其供水需求，但有人提出了以下担忧：

- 地层水和/或压裂液的地表渗透导致浅层地下水受到污染
- 有毒有害从气井中泄漏

为了减少这些风险，需要水文地质学家和油气工程师密切合作，运用水文地质知识和方法，指导工程设计和施工，明确含水层潜在污染源和污染路径。

页岩气水力压裂作业



其他非常规油气开发技术也是如此，例如：

- 煤层气开采，一般深度较浅（ < 1000 米），可以采用氮气进行水力压裂
- 煤层气气化，涉及注入含氧蒸汽，将煤转化为气流。

• 地下废水注入

油气井废液回注是石油行业一种有效的废物处置手段，但相关风险仍然了解不足。随着需要处理的废水量大幅增加，风险也日益凸显，涉及的井数量不断增加。例如，在加拿大西部的70万口井中已有7%用于注入作业。累计注入量超过地下水天然补给量，成为深层含水层补给的主要来源，进一步促进地下水流动模式发生。

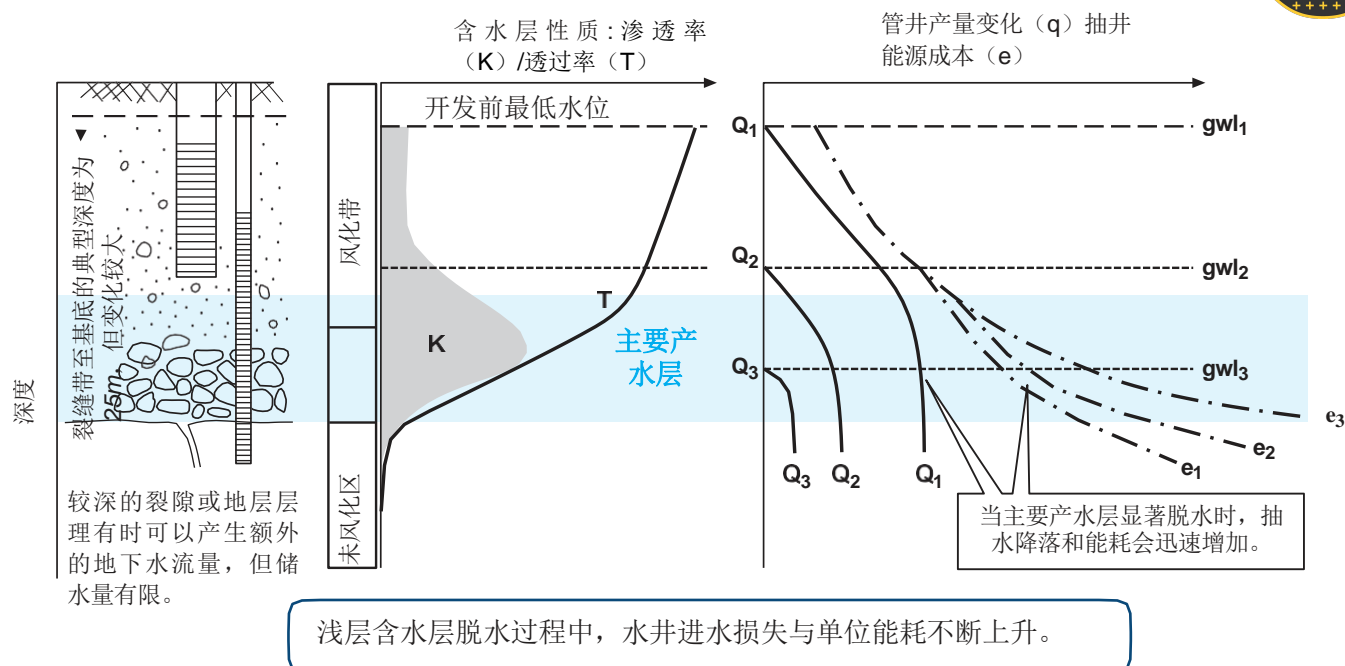
此外，注入盐水去向不明，深层含水层的隔水层分布及性质表征精度差，导致盐水可能向上迁移至浅层地层。许多地区缺乏注入基础设施，预测地下响应和饮用水含水层污染风险的经验不足。

• 煤矿排水与地下水位回弹的影响

许多地区大型露天或地下煤矿仍是火力发电厂的主要燃料。煤矿开采过程中涉及大规模地下水排水以保障安全开采，进而改变区域地下水流系统。该类工业需要基于水文地质知识进行规划，同时在矿井关闭后水位回升的监管也需要依赖水文地质知识。如果管理和处理不当，很可能出现不可预测的高酸性泉水排放，且其中可能含有高浓度重金属。在这方面存在大量历史遗留问题，已成为重大的环境挑战。

煤矿水位回升引起的酸性泉涌





• 传统发电站的碳捕集与封存

在未来几十年内, 对部分化石燃料的持续依赖仍然不可避免。需要寻找减少其碳足迹的方法。一种选择是对使用烃类能源的常规发电厂采用碳捕集与封存技术, 这需要更好地理解其水文地质原理, 尤其是将压缩二氧化碳 (液态) 注入目标含水层 (深度 >650 米), 驱替原有地下水, 在隔水层下累积, 并保障在极长的时间尺度 (>10,000 年) 内, 不会通过地质断层或井筒逸出。

地下水开采对能源消耗有何影响?

• 水井抽水的能源消耗

绝大多数地下水供应 (除了泉源和溢出的自流水井) 抽水需要相当大的能源 (但用于处理的能源远少于地表水来源)。大部分的能源消耗来自灌溉水井 (约占全球能源消耗的15%), 对公共供水安全是一大威胁。由于抽水过程中能量主要消耗于水的举升, 因为抽水技术的改进是降低能耗

的关键。水井结构的设计以及水井空间位置的优化可以在相同供水能力条件下减缓水位的下降。

地下水开采的能源消耗是国家和地方能源需求端的重要组成, 需要在相关能源政策中进行评估。印度有超过1000万公顷农田依赖地下水灌溉, 其中70%使用电动泵, 消耗了高达87,000千兆瓦时的电力 (其余由柴油驱动)。在农村电气化覆盖率较高的地区 (古吉拉特邦、马哈拉施特拉邦、安得拉邦和泰米尔纳德邦), 农民主要使用电动泵, 并通过“统一电价”获得大量补贴 (实际支付的电费不到消耗量的 20%)。在地下水含水层迅速枯竭的地区 (如印度半岛大部分地区), 由于井口损失和泵摩擦损失较大, 单位质量地下水抽取能耗很高。



战略概念系列

能源生产与地下水

农村能源补贴对农民使用地下水的态度有重大影响。需要政策协调，为节能提供明确激励。此外，还需加强对水井效率的严格评估与改进，降低含水层枯竭风险。

引入太阳能电池板为水井泵提供动力，是降低不可再生能源消耗的重要途径，但使得控制地下水资源过度开采的过程更加复杂。需要制定合理的激励措施，鼓励农民将多余的太阳能发电返还给国家电网，而不是进一步增加地下水的开采。

• 地下水供应处理和海水淡化

地表水中硝酸盐、农药和/或工业化学品去除和处理消耗大量电能，通过地下水资源协同保护可以有限降低水处理成本。

与海水相比，微咸地下水盐度较低且无沉积物，更加易于淡化处理，进而降低咸水淡化的能源消耗和运营成本。水文地质分析是微咸地下水抽取和利用的必要条件。

延伸阅读

- Banks D 2009 An introduction to 'thermogeology' and the exploitation of ground source heat. Quarterly Journal of Engineering Geology & Hydrogeology 42
- Chapman N 2009 A geological disposal facility for the UK's radioactive wastes. Proceedings of Institution of Civil Engineers 162
- Delgado A et al 2015 Thirsty energy - understanding the linkages between energy and water. World Bank Live Wire Series 94655 (Washington DC)
- Ferguson G 2015 Deep injection of waste-water in the Western Canada Sedimentary Basin. Ground Water 53
- Hazeldine R S 2009 Carbon capture and storage – how green can black be? Science 325
- Jackson R E et al 2013 Groundwater protection and unconventional gas extraction: the critical need for field-based hydrogeological research. Ground Water 51
- Scanlon B R 2014 Will water scarcity in semi-arid regions limit hydraulic fracturing of shale plays. Environmental Research Letters 9
- Younger P L 2014 Hydrogeological challenges in a low-carbon economy. Quarterly Journal of Engineering Geology & Hydrogeology 47

优先行动

- 低焓水热能源开发对地下水系统影响的长期监测与模拟，评估地热-水资源协同开发的可持续性并优化设计。
- 在政治决策层和公众中建立起对水文地质科学能够指导放射性废物安全地质处置库选址能力的信心。
- 陆上油气资源开采需要进行全面的水文地质风险评估、制定适当的环境法规，并实施严格的操作管理。
- 加强水文地质学家与油气藏工程师的合作与联合研究，以检测和评估页岩气储层水力压裂及液体注入并对地下水的影响。
- 严格评估地下水资源过度开发导致的能源消耗，并制定跨部门协调政策，以限制地下水开采能耗并保护含水层储水量。
- 需要通过有效的土地管理加强对饮用水地下水源的保护，以避免因去除硝酸盐、农药和工业化学品而产生的高昂供水处理能耗。