

# 页岩气与伴生矿产协同开发的环境效应评估

刘紫龙

内蒙古第八地质矿产勘查开发有限责任公司 内蒙古 乌海 016000

**摘要:** 随着全球能源转型加速,页岩气作为清洁能源的战略地位日益凸显,煤系等地质层中与之伴生的矿产资源综合开发成为提升资源利用效率、降低环境成本的关键路径。本文基于中国矿业大学黄炳香教授团队在煤系伴生矿产协同开发领域的实践,结合页岩气开发的环境影响研究,系统评估协同开发模式在水资源保护、土壤修复、生态恢复及碳排放控制等方面的环境效应。研究表明,协同开发通过优化开采时序、共享基础设施、创新污染治理技术,可减少水资源消耗和土壤污染风险,同时降低甲烷泄漏,为能源开发与生态保护的协同共进提供理论支撑与实践范例。

**关键词:** 页岩气;伴生矿产;协同开发;环境效应;生态修复;可持续发展

## 1 能源革命与生态保护的双重挑战

在全球能源需求持续增长与碳中和目标相互冲突的大背景下,能源行业面临着在开发效率与生态保护之间寻求平衡的紧迫任务。中国作为全球页岩气资源大国,已探明储量超36万亿立方米,然而在开发过程中,一系列环境问题逐渐凸显,如水资源的大量消耗、土壤遭受污染以及甲烷泄漏等<sup>[1]</sup>。与此同时,煤系地层中赋存的煤层气、铀矿、铝土矿等伴生资源,在传统单矿种开发模式下,不仅造成了资源的严重浪费,还引发了生态环境的叠加破坏。以山西吕梁煤铝共生矿区为例,单一煤炭开采导致铝土矿资源损失率高达40%,而且重复钻孔使得地下水污染风险大幅提升3倍。

在此严峻形势下,协同开发模式应运而生。其核心在于通过多矿种统筹规划、技术集成创新以及全生命周期管理,实现“资源-环境-经济”效益的最大化。中国矿业大学黄炳香教授团队在山西吕梁、新疆伊犁等地的实践成果显著,协同开发可降低开采成本20%,减少土地占用15%,同时将生态修复周期缩短至传统模式的1/3<sup>[2]</sup>。本文将从水资源、土壤、大气、生态及碳排放五个维度,系统评估协同开发的环境效应,旨在为全球非常规能源开发提供具有借鉴意义的中国方案。

## 2 协同开发的技术路径与环境效应机制

### 2.1 技术集成:从“单点突破”到“系统创新”

协同开发的技术体系以“多场耦合理论”为基石,全面涵盖地质勘探、开采工艺、污染控制三大关键模块。在山西吕梁煤铝共生矿区,团队构建了“应力场-渗流场-化学场-生物场”四场耦合模型,深入揭示了煤铝协调开采对岩层裂隙演化的叠加影响规律。基于此,通过研发全断面脱水装配式充填挡墙装置,实现了铝土矿采

空区的即时充填,成功将地表沉降量控制在0.1米以内,相较于传统开采模式,降低了80%。新疆伊犁煤铀共生矿区的实践则聚焦于污染物协同控制。针对煤层气开采与地浸铀矿的含水层叠加问题,团队提出“隔水层稳定性控制技术”,运用注浆加固与裂隙自修复材料,使铀含水层与煤系含水层的隔离率达到95%以上。同时,开发中性CO<sub>2</sub>+O<sub>2</sub>地浸采铀工艺,将浸出液pH值精准控制在7.0-7.5,有效避免了酸性浸出对煤系地层的腐蚀。

### 2.2 环境效应机制:从“末端治理”到“源头防控”

协同开发的环境效益主要源自三大机制。首先是时空错配优化,通过统筹规划矿产开采时序,巧妙避免了多矿种开发对同一生态单元的叠加扰动。例如在鄂尔多斯盆地,采用“水-煤-气”协同开发模式,将页岩气压裂用水与煤炭洗选废水进行循环利用,使水资源重复利用率达到85%,较单矿种开发提升了40%。其次是基础设施共享,通过共享钻井平台、运输管道与监测系统,大幅减少了重复建设对土地的占用。中石化涪陵页岩气田采用“丛式井”设计,单平台井数从4口增加至8口,土地利用率提升100%,同时钻井成本降低30%。最后是污染协同控制,通过集成多矿种污染治理技术,形成了“气-液-固”全介质污染防控体系。在山西华兴铝业示范基地,针对煤下铝土矿开采,研发“逐巷充填与置换开采技术”,将铝土矿采出率从48%提升至78%,同时借助充填体吸附作用,使土壤中重金属含量降低60%。

## 3 协同开发的环境效应实证评估

### 3.1 水资源保护:从“高耗低效”到“循环利用”

页岩气开发单井用水量巨大,达2-4万立方米,而煤系地层中赋存的地下水往往与矿产共生。传统开发模式导致水资源浪费率超过30%,且压裂液泄漏引发地下水污

染的风险高达15%。协同开发通过多种路径有效实现了水资源保护。在水循环系统构建方面,鄂尔多斯盆地建立了“压裂返排液-煤炭洗选废水-页岩气开发用水”闭环系统,使单井用水量降至1.2万立方米,废水回用率达到90%。针对煤系地层敏感性,开发低损害压裂液,其破胶后残渣含量低于0.1%,较传统化学压裂液降低90%,有效减少了对地下水的污染。此外,在山西吕梁矿区安装分布式光纤传感器,部署智能监测网络,实时监测地下水水位与水质,使污染事件响应时间从72小时缩短至2小时。山西华兴铝业示范基地的实践数据显示,协同开发使矿区地下水水位年均下降幅度从0.8米降至0.2米,水质达标率从65%提升至92%。

### 3.2 土壤修复:从“被动治理”到“主动防控”

页岩气开发过程中,钻井液泄漏、压裂液残留及固体废弃物堆放等问题,导致土壤重金属超标率达到20%-30%。协同开发通过一系列技术有效降低了土壤污染风险。采用防渗层一体化设计,在钻井平台底部铺设复合土工膜与膨润土垫,使钻井液泄漏率从5%降至0.5%,土壤中苯系物含量降低85%。针对压裂液中的有机污染物,应用微生物修复技术,筛选耐盐嗜碱菌株,构建“生物刺激-生物强化”修复体系。在新疆伊犁矿区,土壤中多环芳烃降解率达90%,修复周期从3年缩短至1年<sup>[1]</sup>。此外,将煤矸石与页岩气钻井岩屑混合,制备地质聚合物材料,用于矿区道路铺设与充填开采,使固废综合利用率达80%,减少土地占用面积50%。中石化涪陵页岩气田采用“井工厂”模式后,单井占地从4亩降至2亩,土壤侵蚀模数从5000吨/平方公里·年降至1500吨/平方公里·年。

### 3.3 大气污染控制:从“末端排放”到“全过程减排”

页岩气开发中的甲烷泄漏、挥发性有机物(VOCs)排放及柴油设备尾气,是区域空气污染的主要来源。协同开发通过多项措施实现了大气污染控制。在甲烷泄漏监测与修复(LDAR)方面,山西吕梁矿区部署激光甲烷遥测仪与无人机巡检系统,使甲烷泄漏量从0.5%降至0.1%,年减排量达10万吨二氧化碳当量。针对压裂返排液中的挥发性有机物,开发“吸附-催化氧化”一体化装置,处理效率达95%,较传统活性炭吸附法提升40%。同时,在页岩气井场推广电动钻机与天然气发电机组,使氮氧化物排放量降低70%,颗粒物排放量降低90%。与美国页岩气开发甲烷泄漏率1.2%相比,中国协同开发模式将该指标控制在0.3%以下,达到国际领先水平。

### 3.4 生态恢复:从“碎片化修复”到“系统性重建”

页岩气开发导致的地表植被破坏、生物多样性丧失及景观破碎化,是生态恢复的难点。协同开发通过多种策略实现了生态系统性重建。在生态廊道规划方面,在矿区周边构建“乔木-灌木-草本”立体植被带,使动物迁徙通道连通率从40%提升至85%。例如,新疆伊犁矿区种植耐盐碱植物沙棘与柽柳,形成宽50米的生态缓冲带,有效阻隔了采矿活动对核心区的干扰。针对压裂废渣堆放场,采用“客土置换+微生物接种+植物修复”技术,使土壤肥力恢复至开发前水平的80%,植物多样性指数从1.2提升至2.5。利用卫星遥感与地面传感器网络,构建“天空地一体化”监测体系,实时评估生态恢复效果。在山西吕梁矿区,该系统使生态修复方案调整周期从1年缩短至3个月。中石油长宁页岩气田协同开发项目区,经过5年生态修复,鸟类物种数从15种增至28种,土壤有机质含量提升30%,生态系统服务价值恢复率达75%。

### 3.5 碳排放控制:从“能源开发”到“负碳实践”

页岩气开发全生命周期碳排放强度为38千克二氧化碳当量/兆焦,较煤炭低50%,但仍需进一步优化。协同开发通过多种路径实现了低碳转型<sup>[4]</sup>。集成CCUS技术,在煤系地层中,将页岩气开发与二氧化碳驱替煤层气(ECBM)技术结合,实现二氧化碳地质封存与甲烷增产双赢。新疆准东矿区实践显示,该技术使甲烷采收率提升20%,二氧化碳封存量达0.3吨/吨煤。在页岩气井场部署光伏发电系统,满足30%的用电需求,年减排二氧化碳1.2万吨。例如,中石化胜利油田页岩气项目,通过“气光互补”模式,使碳排放强度降低15%。建立绿色供应链管理,制定低碳采购标准,优先选用低碳钢材、环保压裂液等材料,使单井碳排放量从1.2万吨降至0.8万吨。中国《页岩气开发“十四五”规划》明确提出,到2025年,协同开发项目碳排放强度需较传统模式降低20%,为全球能源行业低碳转型提供标杆。

## 4 挑战与对策:迈向可持续的协同开发

### 4.1 技术挑战:多场耦合模拟与智能装备研发

协同开发面临地质条件复杂、多矿种相互作用机制不明等难题。复杂的地质条件使得开采过程中的风险和不确定性增加,而多矿种间的相互作用机制不明,则难以实现资源的高效协同利用。为应对这些挑战,需加强相关技术研发。其一,开展高精度地质建模。融合地震勘探、微震监测与大数据分析技术,构建“透明矿区”数字孪生平台。该平台能实时模拟矿区地质变化,实现开采扰动实时预测,为协同开发提供精准的地质依据,降低开采风险。其二,推进智能装备国产化<sup>[5]</sup>。目前,全断面脱水充填装置、耐高温高压钻井机器人等关键装备

依赖进口，成为制约协同开发的“卡脖子”问题。突破这些技术瓶颈，实现关键装备的国产化，不仅能降低设备成本，还能提高装备的适用性和可靠性。其三，升级生物修复技术。筛选高效降解菌株，开发基因编辑微生物，提升在极端环境下对污染的治理能力，保障协同开发过程中的生态环境安全。

#### 4.2 政策挑战：法规衔接与利益分配机制

现行矿产资源法规多针对单一矿种，协同开发在实施中面临矿业权整合难、税费计算复杂等问题。矿业权整合涉及多方利益，协调难度大；税费计算复杂则增加了企业的运营成本和管理难度。为解决这些问题，要完善协同开发法规，制定《共伴生矿产协同开发管理条例》，明确资源权属、利益分配与生态补偿标准，为协同开发提供法律保障<sup>[6]</sup>。建立跨部门协调机制，成立由自然资源、生态环保、能源等部门组成的联合工作组，统筹审批与监管流程，提高政策执行效率。创新经济激励政策，对协同开发项目给予税收减免、绿色信贷支持，将生态修复成本纳入资源税抵扣范围，激发企业参与协同开发的积极性。

#### 4.3 社会挑战：公众参与与社区共建

协同开发可能引发土地权属争议、就业结构调整等社会问题。土地权属争议易引发社会矛盾，影响开发的顺利进行；就业结构调整则可能使部分居民面临失业风险。为构建和谐社会环境，需建立信息公开与协商平台，利用矿区三维可视化系统，向公众实时展示开发计划与生态修复进展，增强透明度，让公众了解开发情况，减少误解和矛盾。开展社区能力建设，为当地居民

提供技能培训与创业扶持，帮助他们转型为生态修复工程师、绿色能源管理员等新职业，实现就业结构的平稳过渡。注重文化保护与融合，在开发规划中融入地域文化元素，如将废弃井场改造为工业遗产公园，实现“开发-保护-传承”良性循环，提升社区居民对开发的认同感和归属感。

#### 结语

页岩气与共伴生矿产协同开发通过技术集成创新、政策协同优化以及社会深度参与，成功实现了环境效益与经济效益的有机统一。实证研究表明，该模式可使水资源利用效率提升、土壤污染风险降低、甲烷泄漏量减少，同时推动矿区生态系统服务价值恢复。展望未来，随着数字孪生、人工智能与生物技术的深度融合，协同开发将朝着“智能化、零排放、全修复”的方向加速演进，为全球能源转型与生态文明建设提供可复制、可推广的中国方案，引领能源革命迈向新的发展阶段。

#### 参考文献

- [1]页岩气开采技术2025年环境影响与效益评估及可持续发展报告
- [2]煤系共伴生矿产协同开发——记中国矿业大学黄炳香教授国家重点研发计划项目最新进展
- [3]宁夏回族自治区油气、页岩气、铀矿共生关系与资源综合调查研究
- [4]我国煤系共伴生矿产资源综合利用研究进展
- [5]页岩气开发与生态环境保护的协同发展策略探析
- [6]中石化涪陵页岩气田绿色开发实践报告