

Groundwater Pollution and Sustainable Development Direction in Shale Gas Mining Area at Home and Abroad

Zuyao Zhang^{1,2}, Najie Hu², Zhonghui Li²

¹Missouri University of Science and Technology, Rolla USA

²Yangtze University of China, Wuhan Hubei

Email: yaozuzhang@outlook.com

Received: Oct. 7th, 2019; accepted: Oct. 22nd, 2019; published: Oct. 29th, 2019

Abstract

This paper analyzes the pollution of groundwater caused by shale gas exploitation at home and abroad, and the corresponding pollution control measures taken by various countries at present, and expounds the hot research direction of sustainable development of shale gas in the field of water management and technology in China.

Keywords

Shale Gas Exploitation, Groundwater, Pollution, Current Situation, Countermeasures, Sustainable Development

国内外页岩气开采区地下水污染与可持续发展方向

张祖尧^{1,2}, 胡棚杰², 李忠慧²

¹美国密苏里科技大学, 美国 罗拉

²中国长江大学, 湖北 武汉

Email: yaozuzhang@outlook.com

收稿日期: 2019年10月7日; 录用日期: 2019年10月22日; 发布日期: 2019年10月29日

摘 要

页岩气作为一种新型能源, 越来越受到各个国家和地区的重视, 因此本课题研究的意义在于通过比较选

择出一种采气效果好且对环境污染小的技术。目前许多国家采页岩气的技术还比较落后,对地下水的污染很严重。分析了国内外页岩气开采过程对地下水造成的污染情况,以及目前各国采取的相应污染控制措施;并对我国页岩气可持续发展在水管理领域及技术领域的热点研究方向进行了阐述,通过研究表明纯液态CO₂压裂技术是目前开采页岩气的最佳技术。

关键词

页岩气开采,地下水,污染,现状,对策,可持续发展

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

页岩气是一种新型的、迅速增长的非常规天然气资源,是当前全球关注的焦点,同时正在成为改变国际能源格局的力量[1]。主要分布在北美、中亚、中国、拉美、中东、北非和前苏联地区。其中,美国资源量为 $28.6 \times 10^{12} \text{ m}^3$,加拿大为 $6.9 \times 10^{12} \text{ m}^3$,我国国土资源部公布的我国页岩气资源量为 $25 \times 10^{12} \text{ m}^3$ [2]。然而页岩气开采过程中会产生环境污染,如地表水污染,地下水污染,固废污染、大气污染及噪声污染等。其中最隐蔽也最难治理和恢复的可能是对开发区地下水造成的污染。地下水环境的破坏不仅仅影响人们的生产和生活,而且对页岩气的持续发展也会产生巨大的影响。

本文总结了国内外页岩气开采历史上地下水污染的状况,以及各国为减少污染采取的措施及效果;并在此基础上提出页岩气可持续开采的技术领域和管理领域的最新研究方向。

2. 国内外页岩气开采对地下水污染的状况 Groundwater Pollution by Shale Gas Exploitation at Home and Abroad

2.1. 国外页岩气开采对地下水污染的状况 Groundwater Pollution by Shale Gas Exploitation Abroad

石油和天然气一直是美国能源的主要来源,占2011年总能源消耗量的63%。石油生产,钻井作业和不当密封的废弃井已在许多州造成严重的当地地下水污染,包括位于俄克拉荷马州[3]。Osborn等[4]系统分析了Marcellus和Utica岩区块页岩气开发导致的饮用水的甲烷污染。在页岩气开发活跃区(页岩气开发的1 km以内),饮用水井中平均甲烷浓度和最大甲烷浓度分别为19.2 mg/L和64 mg/L,有潜在爆炸的危险。相反,在相邻的非开采区(页岩气开发的1 km以外),具有相似地质储层构造和水文条件的饮用水井中,其甲烷浓度仅仅有1.1 mg/L,但并没有确凿证据显示这些高浓度的甲烷来自页岩气井开发还是其他生物活动。2011年Jackson等[5]的研究则进一步证明了饮用水中的游离气确实来自页岩气井开发,他们分析了宾夕法尼亚北部141口私人饮用水井中的游离气浓度,并通过同位素示踪分析其来源。在调查的样本中,有82%的私人水井中检测到甲烷,且其平均浓度比页岩气井1 km以外水井的甲烷浓度高出6倍。乙烷含量比页岩气井1 km以外水井高23倍。丙烷则在10口井中检测到,他们都在页岩气井1 km之内。同位素示踪结果显示,这些饮用水井中的甲烷等游离气来源于邻近的页岩气井。

2012年9月,美国EPA发布“水力压裂法对饮用水资源潜在影响研究”阶段性报告[6]。从报告案例分析中发现页岩气勘探开发区浅层地下水中甲烷浓度异常现象,得出水力压裂可能造成上层地下水甲

烷污染的结论。但是,页岩气开发引起的含水层潜在甲烷污染成因机理尚不明确,还处在研究阶段。目前国外关于页岩气开发引起含水层甲烷污染的机理有两种[7]:一是含水层中多种不同成因来源甲烷识别研究;二是含水层甲烷污染途径与迁移通道识别技术研究。

2017年 Brian E. Fontenot 等[8]对 Barnett 页岩层天然气开采区附近私人饮用水井的水质进行评估,结果发现在毗邻页岩气井 3 km 以内区域的一些私人饮用水井中砷、硒、镉和总溶解固体(TDS) (这些都是返排液的构成成分)显著超过美国环境保护署(EPA)饮用水污染物最高限量。同时,样本的 29%检测到甲醇和乙醇,也超过了 EPA 的规定。但是超过 EPA 规定水平的这些私人水井在空间上是随机分布的,反映出污染物浓度的增加可能是由多种因素导致的,如一些天然成分的运移,更低水层水文条件的变化,以及一些工业事故等,如页岩气完井中的封井失败等。

Rozell 和 Reaven [9]利用概率边界分析,评估了 Marcellus 页岩区块页岩气开采潜在的水污染,并识别了水污染的五种途径:运输管线泄漏、完井过程中的套管泄漏、压裂储层裂缝泄漏、钻井现场处理泄漏、废水处理泄漏。结果显示,即使在最佳实践情境下,一口井很有可能排放至少 200 m³ 的污染液体。因此,大规模开发页岩气,必须采取额外的措施来减少如此巨大的潜在污染液体泄漏。

除了美国,加拿大、澳大利亚、印度等国家也对页岩气进行商业化开采,开采页岩气对地下水污染也很大,主要通过压裂液或反排液经由井筒的裂缝的扩展进入之前相互独立的底层,从而污染地下水,操作失误、井筒的破裂也可能污染地下水。

2.2. 中国页岩气开采对地下水污染的状况 Groundwater Pollution by Shale Gas Exploitation in China

我国页岩气藏普遍埋藏较深,相对于国外需要消耗更多的水资源。且页岩气勘探开发的有利区域主要集中在华北平原(黄淮海平原)、辽宁、山西、天山及河西走廊等地区,而这些区域也正是我国重点缺水地区。因此,这些地区的页岩气开采需依靠地下水,这就极有可能造成地下水资源枯竭、含水层能力丧失及水质恶化等问题。

2.2.1. 对浅层地下水的污染研究 Study on Pollution of Shallow Groundwater

浅层地下水的地球化学特征对页岩气生产区的环境影响研究至关重要。2016年 Yiman Li [10]等研究了我国第一个商业规模的页岩气生产区-焦石坝地区的浅层地下水的地球化学和同位素特征,浅层地下水样本是从岩溶含水层的泉水中采集的,这些泉水也用于当地居民的饮用水供应。结果表明:浅层地下水的平均 pH 值为 7.5,总溶解固体(TDS)从 150 mg/L 到 350 mg/L 不等。由于岩溶含水层中碳酸盐的溶解平衡,主要水类型为 HCO₃-Ca 和 HCO₃-Ca·Mg。大多数主要离子浓度和典型毒性指标(Mn, Cr, Cu, Zn, Ba 和 Pb)均符合饮用水标准 GB5749-2006。一些样品中的高浓度 NO₃⁻,特别是土壤水样中的 NO₃⁻,归因于农业污染,与页岩气生产无关。浅层地下水由局部降水补给,并在垂直环流区流动。低 TDS,水同位素和高 3H 和 14C 的证据表明:该地区浅层地下水的循环速率很快,侧向浅层地下水具有很强的自我更新能力。一旦深层页岩气生产导致地下水污染,浅层地下水水质可以通过足够的降水很快恢复。

2.2.2. 对地下水环境评价的研究 Study on Groundwater Environmental Assessment

2018年李绍康[11]通过文献检索与实地调研,进行了页岩气开发地下水环境影响分析,确定出各阶段对地下水环境影响的主要污染物与污染源,并明确影响因子与地下水环境响应关系。对页岩气研究区地下水环境质量评价和地下水环境综合污染风险评价。评价结果表明:研究区内 I 类水质占整体水质的 8.33%、II 类水占 66.67%、III 类水占 8.33%、和 IV 类水占 16.67%;研究区三个井区平台地下水环境综合污染风险评价指数分别为 0.36427、0.559845、0.363349,均属于低污染风险等级,且到目前为止并未

发现页岩气开发对周边地下水环境造成明显污染现象。

2017 年常蓓[12]针对页岩气开发后水环境的质量问题，基于地统计学及回归分析等方法作出相应的评估和研究。借助 GS+和 ArcGIS 软件对研究区域内水环境地下水污染物的监测数据进行结构性分析、空间自相关分析和模拟分析等，获取研究区域水环境中污染物的模拟分布图；其次，对研究区域多种可溶性污染物进行相关分析和回归分析，探讨污染物间的相关关系。研究结果表明：1) 研究区域内 pH、钙离子、氯离子和镁离子四种可溶性污染物的高浓度区域为西南部和东北部，且最高值已超过安全浓度范围；2) 两两污染物间的相关性分析结果显示有两组污染物存在显著的线性关系，即镁离子和钙离子以及氯离子和镭 228；3) 多种污染物间的相关性分析均存在显著的线性关系，均能够用线性方程表示，决策者可以通过分析结果对未知污染物的浓度进行估测，即时掌握各种污染物的浓度，减少不必要的监测步骤。

3. 页岩气清洁生产技术进展 Progress in Cleaner Production Technology of Shale Gas

3.1. 压裂技术的发展趋势 Development Trend of Fracturing Technology

水力压裂技术耗水量大，因此对水资源的需求量以及对地表水和地下水的威胁也较大。为了改变这一现状，可以探索新的压裂技术，如用水量少的混合压裂技术以及纤维压裂、通道压裂、干法压裂及液化石油气压裂等无水技术[13]。这些压裂技术能够解决水资源匮乏、压裂液处理技术繁琐等问题，还能在施工时减少清水压裂铺砂不到位、强滤失、易脱砂等问题，提高页岩气的产量。尤其是液化石油气压裂，具有携砂量大、造缝能力强、对地层无伤害、返排时间短及完全返排等特点[14]，应重点研究。在必须使用水力压裂的情况下，研究绿色无害化的化学添加剂，可以降低压裂液对水体的危害。

当前，水基压裂液的发展趋势是：减少化学添加剂品种，并要求采用“清洁”添加剂，包括使用可以进行生物降解的，且不会产生非生物降解积累效应的胍胶和淀粉基化学品。美国 Chesapeake 公司宣称将通过其“绿色压裂液计划”，取消应用于页岩气井水基压裂液化学添加剂品种中的 25% [10]。我国渤海钻探井下技术服务公司成功应用绒囊暂堵液生物胶压裂液体系，对长庆油田苏东 29-44 井实施储层改造——将普通胍胶压裂液更换为环保型压裂液泵入地层，让绿色环保施工延“深”至地层 3000 米之下。渤海钻探井下技术服务公司积极应用低摩阻、易返排、可回收、无污染的 EM50 压裂液体系。通过过滤、除杂、再配置，成功在长庆油田双 20-24C9 井等 18 口井，实现了返排液再利用至下个层段或下口井，累计循环使用压裂液近 2 万立方米，有效解决了返排液的运输处理难题，施工后的地层深处实现了同步“清洁”，为绿色压裂提供了新的技术支撑[15]。

3.2. 常用压裂技术的选择 Selection of Common Fracturing Technology

当前，无水压裂技术大致分为三种，即 LPG 压裂，N₂ 泡沫压裂，CO₂ 干法压裂。将三种技术达到的效果、适用条件进行及优缺点进行比较，从而选择开采页岩气的最佳技术。

	LPG 压裂	N ₂ 泡沫压裂	CO ₂ 干法压裂
适用条件	由部分单井向大盆地或区块发展	需要在地表提供较高的泵注压力	低渗、低压、高水敏油层
实际应用	有特定需求的油气区块	处于起步阶段	长庆油田
优点	对地层无伤害 无需添加杀菌剂等化学品	对地层伤害小， 滤失量低，携砂能力强。	不对地层造成水敏、 水锁伤害、无残渣伤害、经济有效
缺点	短期成本高、技术不够成熟 存在一定的安全隐患	只能应用于水敏性地层 和埋深较浅的页岩气井	压裂设计较困难

通过比较可以看出, CO₂干法压裂技术是适用于低渗、低压、高水敏油层的最经济有效的改造方法, 环保且节约了大量的水资源, 因此 CO₂干法压裂技术具有更加广阔的发展前景。

4. 页岩气开采可持续发展方向 Sustainable Development Direction of Shale Gas Exploitation

我国非常规油气资源非常丰富, 目前水力压裂是实现效益开发的主要手段。但是, 我国又是一个水资源严重缺乏的国家, 因此, 研究和发展无水压裂技术, 对我国非常规油气资源的可持续开发具有重大意义。无水压裂技术的开发将是我国页岩气开采今后的发展方向。

全世界来看, 仍有许多国家或者局部地区因环境污染问题以及水资源消耗问题而禁止进行页岩气生产。无水压裂技术能最大限度的避免页岩气开采对地下水和地表水的污染, 节约水资源, 因此未来无水压裂等页岩气清洁开采技术上的突破, 将会给全世界页岩气开发带来新一轮的生机, 是该领域可持续发展的重要保障。

5. 结语 Conclusion

尽管我国的页岩气可采量非常丰富, 居于世界第一, 但我国的开采技术仍需提高, 因页岩气开采技术的不成熟导致地下水污染问题还比较严重, 还需深入的研究, 通过页岩气开采技术的改进和国家政策的约束达到降低环境污染的目标。

基金项目

中石化石油工程技术服务有限公司科技攻关项目涪陵地区页岩气示范区石油工程集成技术(编号: SG1305-05K)。

参考文献

- [1] Nakano, J., Pumphrey, D., Price, R., *et al.* (2012) Prospects for Shale Gas Developments in Asia. Center for Strategic and International Studies, Indonesia, 8.
- [2] 天星. 非常规天然气: 异军突起[J]. 中国石油企业, 2010(5): 52-54.
- [3] Kharak, Y.K., Thordsen, J.J., Conaway, C.H. and Thomas, R.B. (2013) The Energy-Water Nexus: Potential Groundwater-Quality Degradation Associated with Production of Shale Gas. *Procedia Earth and Planetary Science*, **7**, 417-422.
- [4] Osborn, S.G., Vengosh, A., Warner, N.R., *et al.* (2011) Methane Contamination of Drinking Water Accompanying Gas-Well Drilling and Hydraulic Fracturing. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **108**, 8172-8176. <https://doi.org/10.1073/pnas.1100682108>
- [5] Jackson, R.B., Vengosh, A., Darrah, T.H., Warner, N.R., Down, A., Poreda, R.J., Osborn, S.G., Zhao, K.G. and Karr, J.D. (2013) Increased Stray Gas Abundance in a Subset of Drinking Water Wells near Marcellus Shale Gas Extraction. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **110**, 11250-11255. <https://doi.org/10.1073/pnas.1221635110>
- [6] EPA (Environmental Protection Agency) (2012) Study of the Potential Impacts of Hydraulic Fracturing on Drinking Water Resources. EPA, Washington DC.
- [7] 郑昭贤, 陈宗宇, 苏晨. 页岩气勘查开发对含水层潜在甲烷污染成因机理[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(6): 116-121.
- [8] Fontenot, B.E., Hunt, L.R., Hildenbrand, Z.L., *et al.* (2013) An Evaluation of Water Quality in Private Drinking Water Wells near Natural Gas Extraction Sites in the Barnett Shale Formation. *Environmental Science & Technology*, **47**, 10032-10040.
- [9] Rozell, D.J. and Reaven, S.J. (2012) Water Pollution Risk Associated with Natural Gas Extraction from the Marcellus Shale. *Risk Analysis*, **32**, 1382-1393. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2011.01757.x>
- [10] Li, Y.M., Huang, T.M., Pang, Z.H., Wang, Y.C. and Jin, C. (2016) Geochemical Characteristics of Shallow Ground-

water in Jiaoshiba Shale Gas Production Area: Implications for Environmental Concerns. *Water*, **8**, 552.
<https://doi.org/10.3390/w8120552>

- [11] 李绍康. 页岩气开发对地下水环境污染及评价模型研究[D]: [硕士学位论文]. 石家庄: 河北地质大学, 2018.
- [12] 常蓓. 页岩气开发区域地下水污染物的特征分析[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2017.
- [13] 李庆辉, 陈勉, 金衍, 等. 新型压裂技术在页岩气开发中的应用[J]. 特种油气藏, 2012, 19(6): 1-7.
- [14] 韩烈祥, 朱丽华, 孙海芳, 等. LPG 无水压裂技术[J]. 天然气工业, 2014, 34(6): 48-54.
- [15] 邢英霞. 渤海钻探绿色压裂液助力“生态油田”[J]. 中国石油报, 2017(11): 112.