

DOI: 10.5846/stxb201802210374

陈宏坤, 杜显元, 张心昱, 吴 骞, 郭宇. 页岩气开发对植被和土壤影响研究进展. 生态学报, 2018, 38(18): - - .

Chen H K, Du X Y, Zhang X Y, Wu Q, Guo Y. Effects of shale gas development on vegetation and soil: a review. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(18): - - .

页岩气开发对植被和土壤影响研究进展

陈宏坤^{*}, 杜显元¹, 张心昱^{2,3}*, 吴 骞⁴, 郭 宇⁵

1 石油石化污染物控制与处理国家重点实验室/中国石油安全环保技术研究院, 北京 102206

2 中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101

3 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100190

4 哈尔滨师范大学地理科学学院, 哈尔滨 150025

5 沈阳农业大学土地与环境学院, 沈阳 110866

摘要:页岩气开发和生产过程影响水资源与水质、土地利用与植被覆盖、土壤侵蚀与土壤质量, 目前国际上未见页岩气开发对植被和土壤影响综述。综述了页岩气开发和生产过程可能存在的生态环境影响, 并重点评价了国际上不同区域页岩气开发和生产对土地利用和植被覆盖变化、景观破碎化的影响, 以及对土壤侵蚀和土壤质量的影响。研究发现页岩气开发平台、运输道路和管线占用农田、牧场、森林, 造成不同程度的景观破碎化, 在坡地开发页岩气会导致土壤侵蚀与沉积风险增大。截止 2015 年末, 在我国重庆涪陵焦石坝页岩气产建区 55.8% 的面积 (146.56 km²) 存在土壤侵蚀和石漠化生态风险。我国页岩气开发区水基钻井固相化填埋未对周边土壤造成污染。建议页岩气开发设计应考虑占地、景观破碎化的影响, 并及时开展页岩气开发暂时占地的复垦工作。

关键词:页岩气开发; 平台; 运输道路; 管线; 植被; 土壤

Effects of shale gas development on vegetation and soil: a review

CHEN Hongkun¹, DU Xianyuan¹, ZHANG Xinyu^{2,3}, WU Qian⁴, GUO Yu⁵

1 State Key Laboratory of Petroleum Pollution Control, China National Petroleum Corporation Research Institute of Safety and Environment Technology, Beijing 102206, China

2 Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

3 College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100190, China

4 College of Geographic Science, Harbin Normal University, Harbin 150025, China

5 College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161, China

Abstract: Shale gas development and production has potential ecological effects on water resources and quality, land use, vegetation cover, soil erosion, and soil quality. However, the ecological effects of shale gas development and production on vegetation cover and soil erosion have not been reviewed globally. In this paper, the ecological effects during shale gas development and production, including changes of land use and vegetation cover, landscape fragmentation, soil erosion, and soil quality were assessed. Crop, pasture, and forest lands were occupied by well pads, transportation roads, and pipelines and resulted in landscape fragmentation, whereas shale gas development has increased the risks of soil erosion and deposition in slope land. Until the end of 2015, about 55.8% (146.56 km²) of the region was classified as sensitive to soil erosion and Karst rocky desertification in the Fuling Jiaoshiba region, Chongqing, China. In the Chinese shale gas

基金项目:国家科技重大专项课题 (2016ZX05040-002); 中国石油天然气集团公司重大科技专项 (2016E-1205)。

收稿日期:2018-02-21; **修订日期:**2018-07-02

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangy@igsrr.ac.cn

development area, the solidification treatment technology of water-based drilling cuttings in shale gas wells did not pollute nearby soils. We suggested that plans for shale gas development should consider land occupation and landscape fragmentation. Furthermore, temporary occupied land by shale gas development should be reclaimed promptly.

Key Words: shale gas development; well pads; transportation roads; pipelines; vegetation; soil

页岩气是指赋存于富含有机质的泥岩、页岩及其夹层中,以吸附或游离状态为主要存在方式的非常规天然气,成分以甲烷为主,是一种清洁、高效的能源资源。我国是全世界页岩气储量最大的国家,技术可开采储量约 31.6 万亿 m^3 , 占全球储量的 15.4%, 主要分布在四川、塔里木、准噶尔、松辽盆地, 分别为 17.7、6.1、1.0、0.5 万亿 m^3 , 其余 6.3 万亿 m^3 分布在扬子台地、江汉和苏北盆地^[1-2]。由于水平钻井技术和大体积水力压裂技术的发展,页岩气开采面积逐步增加。过去 10 年里美国页岩气钻井呈指数增长,在 2005 年 Marcellus-Utica-upper Devonian 片区有 115 口页岩气井,到 2016 年底大约有 15519 口页岩气井^[3],宾夕法尼亚州允许开发的页岩气井有 16078 个^[4]。截至 2016 年 10 月底,中石油长宁-威远国家级页岩气示范区累计投产页岩气井 107 口,日产 644 万 m^3 ,累计产气超过 18.08 亿 m^3 ^[5]。

与开采传统天然气资源相比,页岩气开发水力压裂技术需水量大,在初期压裂时每口井需水 8000—50000 m^3 ,导致北美中部 2000—2012 年间用水量约 7.2—33.9 亿 m^3 ,该区域一半以上的钻井分布于高度或极端缺水区域,水力压裂生产页岩气可能会加剧其与农业、渔业、市政竞争用水^[6]。目前国际上对页岩气开发的水资源与水环境影响关注较多^[7-9],已有页岩气开采和压裂返排液对美国水资源和水质影响^[7,10]、页岩气开采压裂液废水处理^[11]、压裂返排液的生物杀虫剂使用、移动性、降解、毒性^[12] 方面的综述。

虽然页岩气开发对环境的影响引起了广泛的关注,但也有研究结果表明常规油气开发的水资源污染更大,以宾夕法尼亚州的开发区为例,这主要是由于在该区域常规油气开发点是页岩气点位的 10 倍(面积多 50%)^[13]。美国对 Marcellus 页岩气开发对地下水、饮用水井、地表水水质进行了评价,未发现页岩气压裂液污染地下水饮水层^[14]、但发现距离页岩气井 1 km 范围内的饮用水井中有甲烷升高的趋势^[15],而页岩气井下游河流总悬浮颗粒物升高、废弃物处理厂下游河水中有氯离子含量升高的现象^[16]。

与采煤、地表采矿相比,页岩气对地表土壤的破坏较小,但是与传统天然气开采相比(1200 m^2 /平台),页岩气平台占地较大(22000—27000 m^2 /平台),对地表土壤的扰动较大^[17]。但目前国际上对页岩气开采影响水资源综述较多,目前国际上未见页岩气开发对植被和土壤影响综述。我国页岩气资源分布在四川喀斯特、塔里木、准噶尔盆地、鄂尔多斯盆地等干旱与半干旱生态脆弱区,生态环境一旦破坏恢复难度大。为了借鉴国际经验,降低我国页岩气开发对生态环境的影响,本文综述了页岩气开发与生产过程可能对生态环境的影响,重点关注对植被、土壤影响,以期为我国页岩气开发的生态环境保护提供依据。

1 对生态环境潜在影响

页岩气开发可能对大气圈、水圈、人类圈、生物圈、岩石圈产生影响。对大气圈的影响包括温室气体、地表温度、气候变化;对水圈的影响包括淡水消耗、废水、蒸发和蒸腾、当地水文循环;对人类圈的影响包括页岩气平台、土地覆盖变化、土地利用改变、空气、水和土壤污染、噪声、劳动力移居、社区改变、经济增长;对岩石圈的影响包括地形地貌、风化和土壤、侵蚀和沉积、岩石组成、地震;对生物圈的影响包括生物化学循环、物种分布和多样性、生态生境、陆地生态系统^[10-11,18]。

页岩气不同的生产环节,包括勘探、开采、集输过程,可能对周边生态环境产生直接或间接影响^[19-20]。根据页岩气的生产流程,页岩气开发可以分为钻井和平台建设、生产阶段(返排液和产生水及废水处理、运输和机器的使用)、封井阶段^[19]。钻井和平台建设影响包括钻前井场平整,新建井口、废水池、压裂水池、放喷池、运输道路、集输管线、设备运输安装等活动(图 1)。水力压裂过程的机器、管线、运输材料和化学品等基础设

施分布在平台,因此需要建设比常规天然气大的钻井平台。钻井和平台建设阶段需要改变原来的土地利用类型,使用大量水资源,产生含酸性、碱性、毒性或重金属等成分的返排液和固体废弃物,从而可能引起土地利用方式改变、地表植被破坏和生境退化、水土流失、生物多样性减少、土壤侵蚀、石漠化、土壤污染或退化、水污染、甲烷泄露、噪声与扬尘污染等生态风险。输气管线临时性占地、集气站及阀室等建设永久占地,也会导致区域地表植被破坏、土壤性质改变,影响农业、林业生态系统功能,减少动植物分布^[20]。例如在 Marcellus 一个 3700 m 的水平井,会产生 500 t 附加沉淀固体,导致盐、金属、二甲苯类、放射性化合物增加,导致盐化或酸化问题,在水力压裂阶段产生大量的返排液和产生水,大约 10%—40% 的注入压裂液需要返回地面^[22],这些水体中含有压裂阶段加入的化学物质,也可能含有页岩气形成过程中的悬浮物质,可能含有氯化物、溴化物、氟化物、锶、钡、天然放射性物质、以及其他有机和无机物质^[23]。



图 1 页岩气开发的一个钻井平台^[7,21]清除森林建设井场、管线、淡水池^[17]

Fig.1 Well pad of shale gas^[7,21], clearing forest for well pad, pipeline, fresh water pond^[17]

在页岩气生产阶段废水是主要的潜在污染环境风险源^[19,24]。这些废水可能原位循环使用,也可能需要污水处理厂处理后排放或者回注到地下。如果该环节处理不当,将会对环境和人类健康带来风险^[19]。钻井过程中如果有管线或机械发生泄露事故,压裂液中的化学物质会有环境健康风险^[24]。当产气井产量不足后将被废弃,需要根据要求使用水泥和机械堵头封井,如果操作得当,基本不会对淡水层产生污染风险^[25]。

2 对植被影响

随着过去十几年间页岩气开发的快速发展,页岩气开发平台、道路和管线占用土地和干扰植被状况逐渐受到关注(图 2)。利用 2000—2012 年高分遥感数据,发现北美中部因为油气开发导致井场、道路、储藏设施占地约 30000 km²;净初级生产力降低 10 Tg 干生物量(相当于 4.5 Tg 碳),其中牧场损失约 500 万头牲畜每月所需牧草,而农田损失生物量相当于 2013 年该区域小麦产量的 6%,占美国出口小麦的 13%,可能会引起畜牧业、农业、能源行业的不可预见矛盾^[6]。在美国宾夕法尼亚州华盛顿县 2011/2012 年 54 个页岩气钻井平台,平台占用土地利用类型为湿地>农田>草地>灌丛>林地>裸地>建设用地>开阔水面^[28]。在美国北部大平原的 Williston 盆地,油气开发占用的 129.9 km²土地中,49.5%是农田,47.4%是草地^[29]。在美国宾夕法尼亚州页岩气开发区,每个平台多数只有 1—2 口井,不到 10%的平台有 5 个以上井,大约 45%—62%平台占用农田,38%—54%占用林地,到 2011 年允许开发页岩气平台占用农田 6.44—10.72 km²,占用林地 5.36—8.94 km²,建设新道路至少 649 km^[30]。

页岩气管线建设在开发初期影响较大,随着井场发展影响逐渐减小。2001—2012 年间,美国德克萨斯州 Eagle Ford 页岩气片区的 La Salle 县,管线建设对区域影响高于钻井和注井平台,分别占扰动面积的 85%, 15%, 和 0.03%^[27]。在 Eagle Ford 页岩气开采区,从 2006—2014 年数据分析表明,每个井场钻井数较低(1.15—1.17 个),井场占地面积从 2008 年的 25.8 km²增加到 2014 年的 168 km²,增加了大约 5.24 倍,而管线影响逐渐减小,2008, 2010, 2012, 和 2014 年占总建设用地分别为 73%, 55%, 39%和 29%^[31]。

页岩气开发的井场、道路、集气管线在改变植被覆盖的同时,也会导致景观破碎化。在西维吉尼亚西北部的 Marcellus-Utica 页岩气盆地,页岩气开发导致森林景观破碎化和核心区域森林栖息地减少的生态影响更

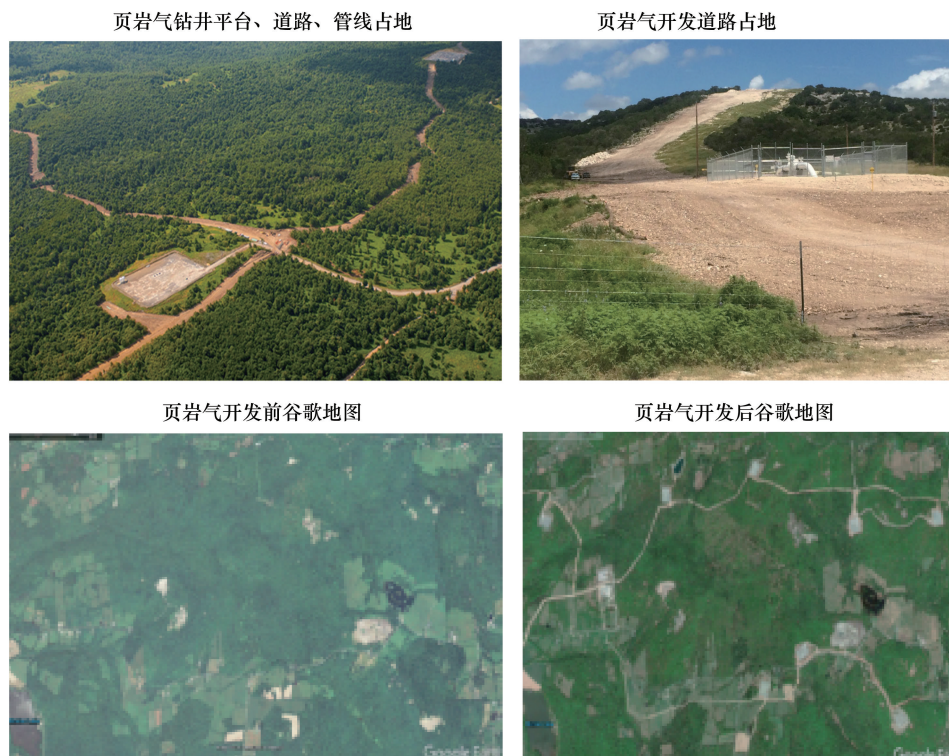


图 2 页岩气平台、道路和管线分布^[26-27]、页岩气开发区谷歌地图中影像^[18]

Fig 2 Shale-gas well pads, roads and pipelines^[26-27], and Google Earth images of shale gas developing area^[18]

大^[32]。在 Marcellus 片区的 Lycoming 县,2016 年页岩气主要开发在私有土地(74%平台),但是私有土地每个平台上的钻井数却低于公有土地(3.5 个/平台和 5.4 个/平台),私有和公有土地核心森林面积分别减少了 4.3%和 2.0%,公有土地上较好的管理措施降低了景观破碎化^[33]。在阿肯色州 Fayetteville 页岩气开发区,从 2001/2002 年到 2012 年间,总计开发了 2%自然区域,增加了 1067 km 的线性边界,这种森林栖息地的减少和景观破碎化会对内部森林栖息动物带来负面影响,但是也会增加喜欢边界栖息的动物^[34]。

不同的页岩气规划方案会影响景观破碎化程度。在 Utica 页岩气区域是否考虑井场、管线、道路对生态环境影响的两种情景中,对森林覆盖率影响低于 1%,但是不考虑生态环境的情景下森林斑块数量增加 13%—21%,管线影响远大于道路^[35]。Milt 等对美国宾夕法尼亚州 Marcellus 4 种页岩气选址方法进行了评价,包括井场靠近道路、集气管线,基础设施远离水源、自然生境,发现页岩气开发的影响多数是互相促进的,但是避免森林破碎化可能会导致其他环境影响加剧^[36]。页岩气开发可以通过多投入 20% 优化基础设施空间分布资金,获得降低 38%的环境影响^[26]。利用模型评价 2015—2030 年间北部波兰波罗的海盆地页岩气开发的影响,发现井场不同的分布格局显著影响占地,变化范围为区域土地的 7%—12%,开发速率、井场分布密度、现存的土地利用方式和地质条件会影响景观破碎化,通过立法限制开发自然保护区和水源地能够降低对环境影响^[37]。

3 对土壤影响

页岩气开发扰动土壤会导致土壤侵蚀风险增加。在美国 Allegany 高原北部,使用 GIS 调查了宾夕法尼亚州已有和被允许开发页岩气平台的地形和土壤特性,发现大约 60%现存和被允许开发页岩气平台在坡地上,存在地表水迁移和侵蚀风险,土壤侵蚀和沉积问题是高原坡地页岩气开发平台主要生态风险^[38]。在美国东德克萨斯州两个间歇性河流建设了两个 14000 m²和 11000 m²天然气钻井平台,2009 年监测的泥沙量为 13972 kg hm⁻² a⁻¹和 714 kg hm⁻² a⁻¹,高于森林砍伐后采用最佳管理措施泥沙产量(111—224 kg hm⁻² a⁻¹),表明土壤

侵蚀明显增加^[39]。2001—2012 年间,美国德克萨斯州 Eagle Ford 页岩气片区的 La Salle 县,大约 51% (57.9 km²) 的受干扰区域有土壤侵蚀风险,88% (100.2 km²) 受干扰区域具有风蚀风险,估计每年约有 200 万 t 土壤有被侵蚀的潜在风险^[27]。

页岩气开发区复垦有暂时复垦与最终复垦两个阶段。当页岩气平台还在产气时,平台外不再需要的工作区域可以进行暂时复垦。暂时复垦区域要求至少 70% 的永久植被覆盖,其植被密度可以防止侵蚀和沉积^[40]。在非生长季,可临时覆盖秸秆等措施控制侵蚀。由于不清楚页岩气生产会延续多久,最终复垦可能需要 15—20 年以后,因此临时复垦的措施能够长期显著的影响平台及周边的土壤功能与生态系统服务。2010 年美国 Allegany 高原北部的页岩气开发区航片分析表明,小部分井区已经进行复垦种草,农业用地复垦种植了农作物,但是复垦需要克服土壤结皮、压实、剖面不连续、排水不畅、干旱、养分缺乏等问题^[38]。

目前国际上对页岩气开发后对土壤质量影响研究较少。对美国宾夕法尼亚州页岩气开发平台复垦后土壤调查发现,由于复垦时土壤压实,以及土壤贮存时增加了土壤有机质分解、氮矿化、土壤混合等,复垦 5 年后土壤剖面表现出刚发育土壤特征,无土壤有机质层(图 3),并且土壤容重仍然很高,土壤总有机碳和总氮含量较低^[17]。该研究认为,页岩气开发区土壤复垦的土壤生产力不可能与邻近土壤相同,但是实施有效的复垦措施可以修复土壤部分特征,减少土壤质量恢复所需的时间^[17]。

我国对页岩气开发的土壤侵蚀、土壤质量进行了初步分析。重庆涪陵焦石坝页岩气产建区生态评价结果表明,该页岩气产建区钻井数量快速增加,截止 2015 年末,该区域 55.8% 的面积(146.56 km²)为中、高生态风险区,存在土壤侵蚀和石漠化生态风险^[20]。通过室内培养模拟实验,利用人工合成的代表第 1 天、14 天、90 天返排液,分析返排液对松辽盆地 4 种农业土壤潜在影响,发现土壤酶活性对返排液最敏感,返排液显著降低了土壤脱氢酶和磷酸单酯酶活性^[41]。以威远-长宁页岩气开发井场 H6 平台为例,分析了场外受污染土壤、污水池附近、工作区域、雨水渗漏区、生活区的土壤特征,发现土壤中 Cu、Pb、Cr 含量均符合《土壤环境质量标准》^[42]中三级标准限值,但部分区域土壤中 Ni、Cd 含量超过阈值,不适合农作物种植,但是受页岩气开发影响的土壤碳较高,有利于土著微生物进行原位修复^[43]。

水基钻屑是页岩气钻井过程中产生的主要固体废物,表面粘附一部分的添加剂(膨润土、润滑剂、氯化钾、纯碱等物质),附着大量的 NaCl、NaOH、Na₂CO₃,含有重金属化合物,存在一定的环境风险,固化时采用水泥配以不同辅助剂和催化剂的现场固化方式^[44]。对四川 5 个井场的固化体浸出液分析表明,各井场固化体浸出液除 pH 值有不同程度的超标,其余指标均能满足《污水综合排放标准》^[45]中的一级排放标准,而周边井场泥浆池周边土壤偏弱碱性,Cu、Pb、Cr 含量达到《土壤环境质量标准》^[42]中的一级标准^[46]。在我国西南某页岩气 3 处代表性的井场,对水基钻屑固化填埋池周边土壤进行监测,发现土壤重金属指标均满足《土壤环境质量标准》二级标准^[42],石油类含量均低于《农用污泥中污染物控制标准》限值^[47],说明水基钻屑固化填埋未对周边土壤造成影响,短期内水基钻屑的固化填埋效果较好^[44]。

4 建议

目前国际上主要是美国的研究结果表明,页岩气开发会占用农田、草地、森林等,造成植被破坏,森林景观

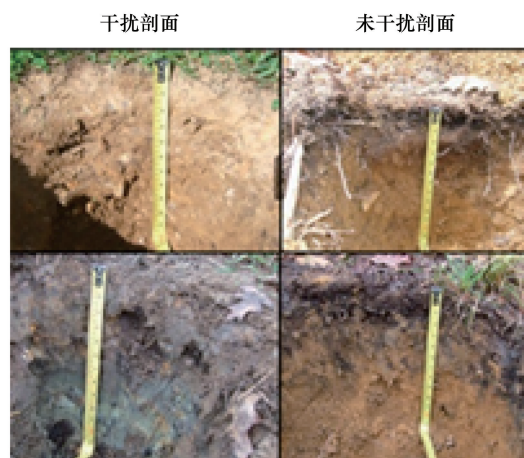


图 3 页岩气开发复垦 5 年内干扰与未受干扰土壤剖面对比图,干扰剖面表现出无有机质层,或者氧化还原形态^[17]

Fig.3 Reclaimed disturbed soil profiles within 5 years and undisturbed soil profiles for two unconventional sites, disturbed soil profiles have no surface organic horizons or shows redoximorphic features^[17]

破碎化,导致土壤侵蚀风险加剧。不同情景页岩气区域规划结果表明,没有统一准则可以避免所有影响,在多种环境因素敏感区域,应该综合考虑页岩气选址。在页岩气井场、管线布局中,增加每个井场的钻井数量、及时进行管线的植被复垦,从而降低页岩气开发对植被的影响^[31];井场建设在已有管线附近,而管线应该与其他基础设施统筹考虑^[33];政府和页岩气公司共同参与降低页岩气开发对生态方面的影响,例如将井场分布在已有人类活动改变的区域、将管线沿着森林外围分布,以减少对大片森林的破坏^[34];当地政府采取建设能源廊道措施,将钻井平台、道路分布在能源廊道,从而有效降低未来能源开发的潜在生态影响^[29]。

页岩气开发要综合考虑能源开发效益,坚持能源与生态可持续发展理念。我国页岩气开发要开展平台、道路、管线合理规划,综合考虑对土地利用、景观格局、人类生活状况影响,在经济条件允许的情况下,降低对生态环境影响;及时监测、评估页岩气开发对生态环境影响,包括应用遥感影像、地面调查、样品分析技术,评估页岩气开发对区域植被、土壤、水体影响;及时进行土地复垦,根据气候和环境条件,制定适合当地条件的复垦计划,及时总结适合当地土地复垦的实践经验和措施,保持当地的可持续发展^[23]。在四川昭通-长宁页岩气开发区,部分平台分布在喀斯特山地,应注重水土保持,防止滑坡、泥石流等地质灾害、土壤侵蚀问题。

我国在“十三五”通过了国家科技重大专项立项,开展“页岩气等非常规油气开发环境监测与保护关键技术”国家油气重大专项研究,研究内容包括页岩气等非常规油气开发环境影响评估与环境效益综合评价技术、地下水及生态环境监测与保护技术、固体废弃物处理与利用技术、逸散放空监测评价及回收利用技术、环境保护技术集成及管件装备。该项目的研究成果在页岩气开发和生产中的应用,会对页岩气开发的生态环境监测与保护提供有效的技术支撑。

参考文献 (References):

- [1] Tollefson J. China slow to tap shale-gas bonanza. *Nature*, 2013, 494(7437): 294-294.
- [2] U.S. Energy Information Administration. Technically recoverable shale oil and shale gas resources: an assessment of 137 shale formations in 41 countries outside the United States. (2013-06-13) [2018-02-21]. <https://www.eia.gov/analysis/studies/worldshalegas/pdf/fullreport.pdf>.
- [3] MCOR (Marcellus Center for Outreach and Research), Tri-state unconventional shale wells (PA, WV, OH). (2017-07-19) [2018-02-20]. <http://www.marcellus.psu.edu/resources/images/tristate-static-2016.jpg>.
- [4] MCOR (Marcellus Center for Outreach and Research), PA shale permitting activity. (2017-07-19) [2018-02-20]. <http://www.marcellus.psu.edu/resources/images/pa-animated-permit-map.gif>.
- [5] 国家发展和改革委员会经济运行调查局. 中石油长宁-威远国家级页岩气示范区累计产气超 18 亿方. (2016-10-30) [2018-02-20]. http://yxj.ndrc.gov.cn/mtzhgl/201610/t20161030_824688.html.
- [6] Allred B W, Smith W K, Twidwell D, Haggerty J H, Running S W, Naugle D E, Fuhlendorf S D. Ecosystem services lost to oil and gas in North America. *Science*, 2015, 348(6233): 401-402.
- [7] Vidic R D, Brantley S L, Vandenbossche J M, Yoxtheimer D, Abad J D. Impact of shale gas development on regional water quality. *Science*, 2013, 340(6134): 1235009.
- [8] Yang H, Flower R J, Thompson J R. Shale-gas plans threaten China's water resources. *Science*, 2013, 340(6138): 1288.
- [9] Krupnick A, Wang Z M, Wang Y S. Environmental risks of shale gas development in China. *Energy Policy*, 2014, 75: 117-125.
- [10] Vengosh A, Jackson R B, Warner N, Darrah T H, Kondash A. A critical review of the risks to water resources from unconventional shale gas development and hydraulic fracturing in the United States. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(15): 8334-8348.
- [11] Estrada J M, Bhamidimarri R. A review of the issues and treatment options for wastewater from shale gas extraction by hydraulic fracturing. *Fuel*, 2016, 182: 292-303.
- [12] Kahrilas G A, Blotvogel J, Stewart P S, Borch T. Biocides in hydraulic fracturing fluids: a critical review of their usage, mobility, degradation, and toxicity. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(1): 16-32.
- [13] Slonecke T E, Milheim L E. Landscape disturbance from unconventional and conventional oil and gas development in the Marcellus shale region of Pennsylvania, USA. *Environments*, 2015, 2(2): 200-220.
- [14] Llewellyn G T, Dorman F, Westland J L, Yoxtheimer D, Grieve P, Sowers T, Humston-Fulmer E, Brantley S L. Evaluating a groundwater supply contamination incident attributed to Marcellus Shale gas development. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112(20): 6325-6330.

- [15] Jackson R B, Vengosh A, Darrah T H, Warner N R, Down A, Poreda R J, Osborn S G, Zhao K G, Karr J D. 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*, 2013, 110(28): 11250-11255.
- [16] Olmstead S M, Muehlenbachs L A, Shih J S, Chu Z Y, Krupnick A J. Shale gas development impacts on surface water quality in Pennsylvania. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110(13): 4962-4967.
- [17] Fink C M, Drohan P J. Dynamic soil property change in response to reclamation following northern Appalachian natural gas infrastructure development. *Soil Science Society of America Journal*, 2015, 79(1): 146-154.
- [18] Meng Q M. The impacts of fracking on the environment: a total environmental study paradigm. *Science of the Total Environment*, 2017, 580: 953-957.
- [19] Annevelink M P J A, Meesters J A J, Hendriks A J. Environmental contamination due to shale gas development. *Science of the Total Environment*, 2016, 550: 431-438.
- [20] 张虹, 张代钧, 卢培利. 涪陵焦石坝页岩气开采区土地损毁的生态风险评价. *生态学报*, 2017, 37(17): 5807-5817.
- [21] Li Q, Zhang Y L, Wang A G, Hu C C, Geng X J. Influence of shale gas development on Land. *Resources and Sustainable Development*, 2013, 734-737: 251-256.
- [22] Gregory K B, Vidic R D, Dzombak D A. Water management challenges associated with the production of shale gas by hydraulic fracturing. *Elements*, 2011, 7(3): 181-186.
- [23] Lampe D J, Stolz J F. Current perspectives on unconventional shale gas extraction in the Appalachian Basin. *Journal of Environmental Science and Health, Part A: Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, 2015, 50(5): 434-446.
- [24] Vandecasteele I, Rivero I M, Sala S, Baranzelli C, Barranco R, Batelaan O, Lavalley C. Impact of shale gas development on water resources: a case study in northern Poland. *Environmental Management*, 2015, 55(6): 1285-1299.
- [25] King G E. Hydraulic Fracturing 101: What Every Representative, Environmentalist, Regulator, Reporter, Investor, University Researcher, Neighbor and Engineer Should Know about Estimating Frac Risk and Improving Frac Performance in Unconventional Gas and Oil Wells. The Woodlands, Texas, USA: Society of Petroleum Engineers, 2012.
- [26] Milt A W, Gagnolet T D, Armsworth P R. The costs of avoiding environmental impacts from shale-gas surface infrastructure. *Conservation Biology*, 2016, 30(6): 1151-1158.
- [27] Pierre J P, Abolt C J, Young M H. Impacts from above-ground activities in the Eagle Ford shale play on landscapes and hydrologic flows, La Salle County, Texas. *Environmental Management*, 2015, 55(6): 1262-1275.
- [28] Meng Q M. Modeling and prediction of natural gas fracking pad landscapes in the Marcellus Shale region, USA. *Landscape and Urban Planning*, 2014, 121: 109-116.
- [29] Preston T M, Kim K. Land cover changes associated with recent energy development in the Williston Basin; Northern Great Plains, USA. *Science of the Total Environment*, 2016, 566-567: 1511-1518.
- [30] Drohan P J, Brittingham M, Bishop J, Yoder K. Early trends in landcover change and forest fragmentation due to shale-gas development in Pennsylvania: a potential outcome for the Northcentral Appalachians. *Environmental Management*, 2012, 49(5): 1061-1075.
- [31] Pierre J P, Young M H, Wolaver B D, Andrews J R, Breton C L. Time series analysis of energy production and associated landscape fragmentation in the Eagle Ford shale play. *Environmental Management*, 2017, 60(5): 852-866.
- [32] Farwell L S, Wood P B, Sheehan J, George G A. Shale gas development effects on the songbird community in a central Appalachian forest. *Biological Conservation*, 2016, 201: 78-91.
- [33] Langlois L A, Drohan P J, Brittingham M C. Linear infrastructure drives habitat conversion and forest fragmentation associated with Marcellus shale gas development in a forested landscape. *Journal of Environmental Management*, 2017, 197: 167-176.
- [34] Moran M D, Cox A B, Wells R L, Benichou C C, McClung M R. Habitat loss and modification due to gas development in the Fayetteville Shale. *Environmental Management*, 2015, 55(6): 1276-1284.
- [35] Racicot A, Babin-Roussel V, Dauphinais J F, Joly J S, Noël P, Lavoie C. A framework to predict the impacts of shale gas infrastructures on the forest fragmentation of an agroforest region. *Environmental Management*, 2014, 53(5): 1023-1033.
- [36] Milt A W, Gagnolet T, Armsworth P R. Synergies and tradeoffs among environmental impacts under conservation planning of shale gas surface infrastructure. *Environmental Management*, 2016, 57(1): 21-30.
- [37] Baranzelli C, Vandecasteele I, Barranco R R, Rivero I M, Pelletier N, Batelaan O, Lavalley C. Scenarios for shale gas development and their related land use impacts in the Baltic Basin, Northern Poland. *Energy Policy*, 2015, 84: 80-95.
- [38] Drohan P J, Brittingham M. Topographic and soil constraints to shale-gas development in the northcentral Appalachians. *Soil Science Society of America Journal*, 2012, 76(5): 1696-1706.

- [39] McBroom M, Thomas T, Zhang Y L. Soil erosion and surface water quality impacts of natural gas development in east Texas, USA. *Water*, 2012, 4 (4): 944-958.
- [40] PACode. 2012. 102. 22. Erosion and sediment control and post construction storm water management BMPs, Site Stabilization. Pennsylvania Code, Harrisburg, PA. (2018-03-31) [2018-06-05]. <https://www.pacode.com/secure/data/025/chapter102/s102.22.html>.
- [41] Chen S S, Sun Y Q, Tsang D C W, Graham N J D, Ok Y S, Feng Y J, Li X D. Potential impact of flowback water from hydraulic fracturing on agricultural soil quality: Metal/metalloid bioaccessibility, Microtox bioassay, and enzyme activities. *Science of the Total Environment*, 2017, 579: 1419-1426.
- [42] 国家环境保护局, 国家技术监督局. GB 15618—1995 土壤环境质量标准. 北京: 中国标准出版社, 1995.
- [43] 朱天菊, 解艺平, 吴波, 张起荣, 许倩. 页岩气开发井场污染土壤可生化性研究. *广州化工*, 2017, 45(3): 60-62.
- [44] 张春, 金吉中, 张思兰, 郭涛, 肖广全, 梅绪东, 王朝强. 水基钻屑固化填埋对周边土壤环境的影响. *油气田环境保护*, 2017, 27(2): 40-42.
- [45] 国家环境保护局. GB 8978—1996 污水综合排放标准. 北京: 中国标准出版社, 1996.
- [46] 乔川, 欧阳峰, 刘了, 张亚会. 钻井泥浆固化处置对土壤环境的影响. *油气田环境保护*, 2013, 23(5): 41-43.
- [47] 城乡建设环境保护部. GB 4284—1984 农用污泥中污染物控制标准. 北京: 中国标准出版社, 1984.