

# 四川盆地页岩气勘探开发过程中废物治理： 现实、主体行为与优化

杨 柳<sup>1\*</sup>, 李 娟<sup>1</sup>, 汪 刚<sup>2</sup>, 刘曼琴<sup>3</sup>, 彭新艳<sup>3</sup>, 孙钰涓<sup>3#</sup>

<sup>1</sup>四川长宁天然气开发有限责任公司, 四川 成都

<sup>2</sup>四川页岩气勘探开发有限责任公司, 四川 成都

<sup>3</sup>西南石油大学经济管理学院, 四川 成都

收稿日期: 2023年12月3日; 录用日期: 2023年12月18日; 发布日期: 2024年1月31日

## 摘 要

四川盆地是中国页岩气资源勘探开发的示范区, 随着勘探开发力度的加大, 生产过程中所产生废物不断增加, 对区域内的环境承载能力提出了挑战, 如何有效治理成为影响和制约页岩气资源勘探开发的关键。本文立足于四川盆地页岩气勘探开发过程中废物治理现状, 从指导思想、发展方式到治理能力方面分析了其产生的原因, 构建了政府、油田企业和第三方服务企业的三方演化博弈模型, 系统分析其行为演化规律, 提出治理优化对策。研究发现: 一是现有的页岩气勘探开发废物治理模式存在主导思想与绿色发展理念、发展方式与可持续发展思想、废物处理能力与现实需求的三重矛盾; 二是基于政府、油田企业、第三方废物治理企业三个关键主体行为博弈的最优稳定策略是(弱监管、积极治理、重视补贴)。因此, 树立正确的治理理念, 重塑科学治理方式, 创新治理技术将有利于四川盆地页岩气勘探开发废物治理效能的提高, 有利于资源开发与环境保护的统一。

## 关键词

页岩气勘探开发, 绿色发展理念, 废物治理, 三方博弈

# Waste Management during Shale Gas Exploration and Development in Sichuan Basin: Reality, Agent Behavior and Optimization

Liu Yang<sup>1\*</sup>, Juan Li<sup>1</sup>, Gang Wang<sup>2</sup>, Manqin Liu<sup>3</sup>, Xinyan Peng<sup>3</sup>, Yujuan Sun<sup>3#</sup>

\*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 杨柳, 李娟, 汪刚, 刘曼琴, 彭新艳, 孙钰涓. 四川盆地页岩气勘探开发过程中废物治理: 现实、主体行为与优化[J]. 可持续发展, 2024, 14(1): 251-262. DOI: 10.12677/sd.2024.141033

<sup>1</sup>Sichuan Changing Gas Development Company, Chengdu Sichuan

<sup>2</sup>Sichuan Shale Gas Exploration and Development Company, Chengdu Sichuan

<sup>3</sup>School of Economics and Management, Southwest Petroleum University, Chengdu Sichuan

Received: Dec. 3<sup>rd</sup>, 2023; accepted: Dec. 18<sup>th</sup>, 2023; published: Jan. 31<sup>st</sup>, 2024

## Abstract

Sichuan Basin is a demonstration area of shale gas exploration and development in China. With the increase of exploration and development efforts, the waste generated in the production process continues to increase, which poses a challenge to the environmental carrying capacity of the region. How to effectively control the waste has become the key to influence and restrict the exploration and development of shale gas resources. Based on the current situation of waste treatment during shale gas exploration and development in Sichuan Basin, this paper analyzes the causes of waste treatment from the aspects of guiding ideology, development mode and treatment ability, constructs a tripartite evolutionary game model of government, oilfield enterprises and third-party service enterprises, systematically analyzes the behavior evolution law, and proposes treatment and optimization countermeasures. The findings are as follows: First, the existing shale gas exploration and development waste management mode has three contradictions: the leading idea and the green development concept, the development mode and the sustainable development idea, the waste treatment capacity and the actual demand; The second is the optimal stabilization strategy based on the behavioral game of the three key entities of the government, oilfield enterprises and third-party waste treatment enterprises (weak supervision, active governance and emphasis on subsidies). Therefore, the establishment of correct governance concepts, reshaping scientific governance methods, and innovative governance technologies will be conducive to the improvement of waste management efficiency of shale gas exploration and development in Sichuan Basin, and will be conducive to the unification of resource development and environmental protection.

## Keywords

Shale Gas Exploration and Development, Green Development Concept, Waste Management, Three-Way Game

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

## 1. 引言

中国页岩气资源丰富，加大页岩气资源勘探开发是既定的能源发展战略。我国西部地区已探明的页岩气储量达到  $7.77 \times 10^{13} \text{ m}^3$ ，占据全国总量的 71% [1]。在国家相关政策的支持下，经过企业与地方政府之间的密切合作，四川盆地已建成超 300 亿立方米的年产能，累计生产页岩气  $507.8 \times 10^8$  立方米，已经发展成为中国页岩气勘探开发主战场。中国页岩气勘探开发起步晚，在以产量为主导的勘探开发思想指导下，页岩气勘探开发中产生的废物治理没有受到应用的重视，“先污染、后治理”不仅在一定程度上加重了页岩气资源勘探开发区域的环境风险，而且也背离了以人民为中心的发展思想、人与自然和谐共生的现代化目标，影响和制约着页岩气效益开发。理论上，页岩气勘探开发具有十分明显的环境外部性，

这客观上决定了其废物治理需要政府、企业和废物处理专业服务机构的共同努力，协同一致，既需要立足于污染源头最大限度地减少废物的产生，又需要严格执行环境法规和监管措施，确保废物能够得到及时有效的高效治理，其实质是多主体行为协同的问题，急需在对四川盆地页岩气勘探开发过程中废物治理基本现状总体把握的基础上，认识清楚其原因，聚焦关键主体的利益关系认识清楚其行为规律，从而形成具有中国特色的页岩气勘探开发废物治理模式，促进页岩气规模化效益开发。

## 2. 四川盆地页岩气勘探开发利用过程中废物治理现状分析

页岩气虽为化石能源，但相对于煤炭，页岩气却因其利用过程中的低碳、清洁、高效而被认为是实现碳达峰碳中和的主力能源。立足于能源供需的外在环境变化和能源安全，加大页岩气资源的勘探开发，实现其规模效益化生产，既是中国能源安全发展需要，也是能源结构调整优化需要。然而，受制于页岩气勘探开发生产工艺，页岩气勘探开发伴随着大量废液和固废的产生，具体包括钻井废水、洗井废水、压裂返排液、采气废水和大量固体废物(如图 1 所示)。其中，以水为分散介质配制钻井泥浆所产生的水基钻井泥浆和钻井岩屑属于一般固体废物，以矿物油为连续相配制钻井泥浆所产生的油基钻井泥浆和钻井岩屑，因其含有矿物油、重金属等有毒、有害物质，被列为危险废物，处理不当将对环境产生不利影响 [2]。如果以经济社会发展需要不断加大四川盆地的页岩气勘探开发，页岩气勘探开发又会产生大量的废液、固废为客观现实，那么在保证页岩气勘探开发前提下，如何对废液、固废进行有效治理，减少其对环境的不利影响就成为页岩气勘探开发过程中必须思考的问题，而这一问题的有效解决是以其基本现状认识为前提条件的。

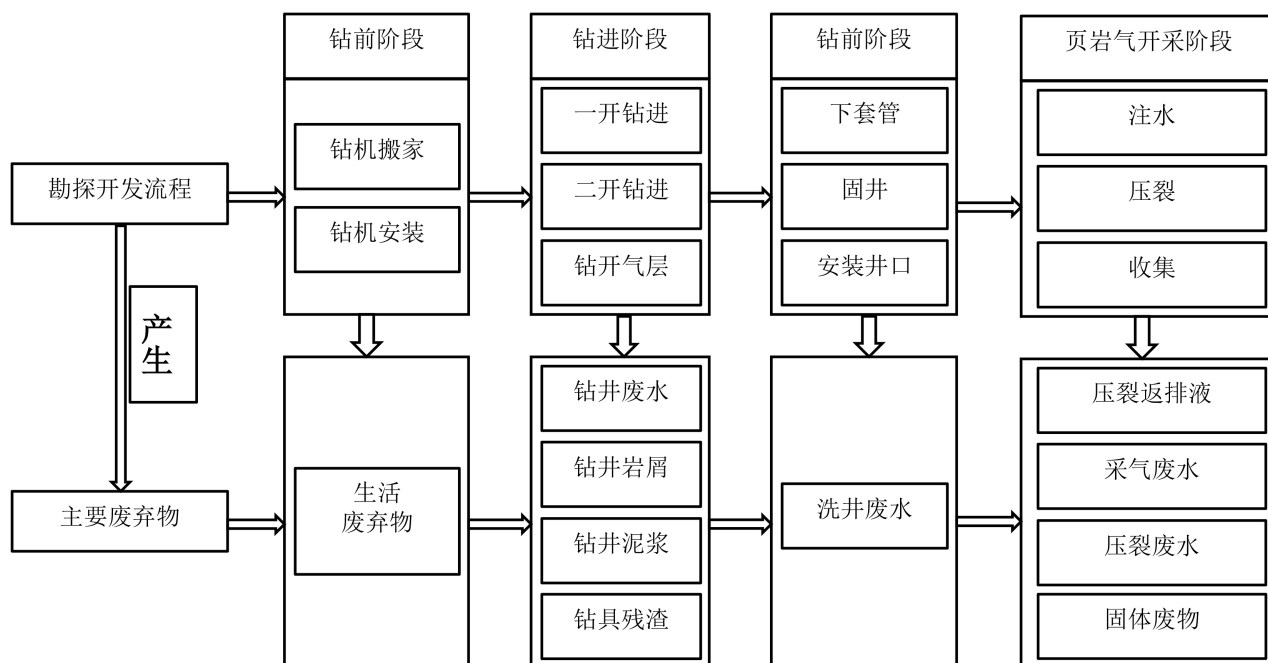


Figure 1. Major wastes during shale gas exploration and development

图 1. 页岩气勘探开发过程中的主要废物

### 2.1. 废物治理主导思想与绿色发展理念的矛盾

生产生活方式绿色转型、能源资源配置合理化、利用效率提高、主要污染物排放总量持续减少，生态环境持续改善，生态安全屏障更加牢固，城乡人居环境明显改善是“十四五”期间中国生态文明建设

的主要目标[3]。上述目标的实现本质上是将绿色发展理念落到具体实践过程之中。从实践层面看，绿色发展理念是经济与生态协同发展的实践经验总结，是关于人与自然和谐发展思想与中国具体国情相结合的产物[4]。从理论层面看，绿色发展理念具有丰富的理论内涵，不仅内含了人与自然是生命共同体的哲学意蕴，而且也隐含了人类应当尊重自然、顺应自然、保护自然的价值要求[5]。

如果以绿色发展理念去审视页岩气勘探开发过程中废物治理，我们不难发现其人类中心主义思想十分明显。人类中心主义认为人是整个世界的主体，人既是活动的中心，也是思考的中心，人类不仅是自然世界的主宰者，自然物理应是为了服务人类而存在，只有人类才具有内在价值，自然界的其他存在物只是作为工具而仅有使用价值。从页岩气勘探开发过程中的废物治理无不体现了人类中心主义思想。首先，人与自然之间的和谐关系被打破。以人类中心主义为主导思想意味着自身利益最大化将成为行为主体的行为准则，其必然结果是生态环境保护的重要性难以受到应有的重视，页岩气勘探开发过程中的外部不经济性将被忽视，页岩气产量目标必将成为行为主体主要价值追求。具体到页岩气资源勘探开发过程中，如果没有强有力的外部监督，页岩气勘探开发区域的环境容量极有可能被忽略，页岩气勘探开发区域内原有的生态平衡将被打破；其次，人与人之间的矛盾日渐凸显。传统的人类中心论认为人是孤立存在的，自身利益是个体行为选择的出发点和落脚点，他人利益往往被排斥在个体决策之外，其结果必然会导致个体之间的利益矛盾，从而引发人与人之间利益冲突；再次，人与社会之间的共生关系紧张。受传统人类中心主义思想的影响，主体在权衡个人利益和社会整体利益关系时，往往倾向于个人利益而忽视其相应的社会责任，危及社会整体利益，个体与社会的共生关系必将遭到破坏[6]。

人类中心主义是一定时代的产物。人类社会发展到今天，以人类中心主义为主导的发展思想的不可持续性越来越明显，这正如美国的霍尔姆斯·罗尔斯顿在《环境伦理》一书中所提及的一样，自然是具有内在价值的，并且人类理应尊重自然的内在价值。在页岩气勘探开发过程中，只有正确处理好人类自身与自然间的主客体关系，在尊重自然的基础上兼顾他人利益，承担起相应的社会责任，才能从真正意义上处理好人与自然的矛盾关系，才能协调好企业与资源地的关系，才能有效缓解经济发展与环境保护的矛盾，促进页岩气可持续发展。

## 2.2. 废物治理方式与可持续发展相矛盾

正如马克思所说，意识来源于实践并对实践具有能动的反作用，意识可以指导并控制实践。页岩气勘探开发废物的有效治理是页岩气产业可持续发展的基本前提。产业可持续发展必须将可持续发展的思想贯穿于产业的整体演化过程中，以实现企业规模和效益的同步增长，持续提升其核心竞争力，最终目标是促使经济效益、社会效益与生态效益的整体最优化。就页岩气产业而言，可持续发展既要尽可能地延长产业的生命周期，还要在开发过程中做好废物治理工作，最大限度地减少对环境的不良影响、从而达到发挥资源价值、提升社会的整体效益的目标[7]。在四川盆地页岩气勘探开发过程中，如果没有正确的行动理念，那么页岩气勘探开发废物治理就会缺乏系统而全面的统筹规划，其结果必然是治理方式的粗放，形成与可持续发展方式之间的矛盾。一方面，页岩气勘探开发参与主体致力于追逐自身利益，缺乏有效的沟通和理解，造成行业内废物管理体制不顺，运行机制不畅，具体表现在审批程序复杂，主体间优势难以互补，废物处置规划布点与页岩气勘探开布局局不适应等，造成废物治理需求与供给不匹配。另一方面，企业一味地追求产量和经济效益，生产过程中的废物治理因不能产生直接的经济效益反而增加成本却可能被忽视，“先污染、后治理”的废物治理模式可能演化成为一种行业内的主流治理方式。如果以页岩气的大规模勘探开发、而相应废物治理又被忽视为基本背景，那么页岩气勘探开发进程中的废物必将难以得到有效治理，必将对区域内的环境保护形成新的压力，势必会影响到区域的可持续发展。



### 2.3. 废物治理能力与现实需求相矛盾

我国对页岩气资源勘探开发起步晚,废物治理能力仍受到制度安排、技术水平的限制。纵观整个页岩气产业链,废物治理存在于勘探开采、储运输配、分销利用的全生命周期内,涉及水资源占用、甲烷气体溢出、压裂液返排、钻井岩屑处理处置等。在钻井工程、压裂工程这两个关键阶段的施工作业过程中伴随大量的压裂返排液和固体废物[8]。以四川盆地为例,川南地区页岩气井大多采用“四开四完”方式进行钻井作业,单井返排液量可达 1000~1500 吨。其中,直井段采用水基钻井液钻井,水基岩屑产生量为 900~1000 吨/井;造斜段与水平段采用油基钻井液钻井,油基岩屑产生量为 600~700 吨/井[9]。按照国家能源局规划,2030 年~2035 年我国页岩气产量将达到 800~1000 亿方/年,其中四川盆地页岩气产量要达到 500~800 亿方/年,届时页岩气增量将达到我国天然气整体增量的 50%,为实现此目标,最终钻井数量需达到 12,800~16,000 口,为当前钻井数量的 8~10 倍。经初步测算,四川盆地要完成 500~800 亿方页岩气年产量,仅含油岩屑的年均产量将超过 100 万吨/年,对四川盆地的废物治理基础设施建设提出了新要求。根据调查可知,截至 2023 年 1 月,临近川南页岩气开发区域且持有《危险废物经营许可证》、能够处理含油岩屑的企业实际上仅有 5 家,年处理能力约 49 万吨,难以满足长宁、威远、泸州等片区产生的油基岩屑的治理需要。有资质、有能力的企业却远离页岩气生产区,需长途运输,治理能力不能有效满足页岩气勘探开发废物治理需求,缺乏有效竞争,事实上形成了废物治理的垄断局面。如果以国家强有力的环境督察为废物治理的政策环境,这进一步强化了废物处理企业的垄断地位,那么其结果是页岩气勘探开发企业处于不利地位,必然会增加页岩气勘探开发企业的废物处理成本,从而影响到其投资收益。在废物处理成本高且不可接受的市场环境条件下,一些页岩气勘探开发企业不得不选择将大量废物进行集中堆放,采取延缓治理策略,不仅增加了环境污染风险,而且也增加了页岩气勘探开发废物治理的管理成本,不利于页岩气产业的发展。

## 3. 页岩气勘探开发废物治理的三方演化博弈模型

### 3.1. 问题描述

页岩气勘探开发过程中的废物治理具有十分明显的外部性,涉及到政府、油田企业和第三方服务企业,其有效治理本质上是三个利益主体集体一致性行动的达成过程,与其行为选择本身是一个利益博弈过程。因此,立足于四川页岩气勘探开发过程中废物治理实际,从主体利益角度分析研究博弈行为成为有效治理的基础。在页岩气废物治理主体中,各自有着不同的角色,政府是主要政策制定者和核心监管者、石油企业是主要废物生产者、第三方专业服务企业是特许经营者。根据《中华人民共和国环境保护法》和《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》,石油企业对生产经营过程中产生废物负主要责任,须按照国家有关规定将生产经营活动中产生的固体废物进行分类收集,并将其交由符合国家规定条件的单位进行处理。第三方专业服务企业具有“经济人”和“生态人”双重属性[10],但受制于因政府管制而形成的进入壁垒,页岩气勘探开发过程中形成的废物仅能通过作为第三方专业服务企业进行治理才符合国家规范,通过委托协议对废物进行合作治理。对页岩气勘探开发企业而言,其策略空间(积极治理、消极治理),积极治理则意味着其会着眼于页岩气勘探开发全过程,严格按照 3R 原则,采用源头控制的方式以减少页岩气勘探开发过程中的废物总量,总量的减少,其委托给第三方专业服务机构的治理业务也会减少,相反地如果石油企业选择消极治理策略,则需要第三方专业服务企业处理的废物工作量会显著增加。如果石油企业采取积极策略而第三方专业服务就有可能获得的补贴不足,收益难以弥补其成本,则参与治理的积极性会受影响,从而使页岩气勘探开发废物治理陷入“囚徒困境”,导致社会福利受损,第三方专业服务企业而言,其策略空间为(重视补贴、轻视补贴)。政府作为政策制定者和监督者,基于绿

色、可持续发展理念以及社会、经济和环境的协同发展[11],可制定合理有效的监督和补偿机制,有效促进石油企业与第三方专业服务企业之间的合作,保证废物能够得到有效治理,从而有效提高页岩气勘探开发废物治理效能,其策略空间(严格监管、宽松监管),如图2所示。

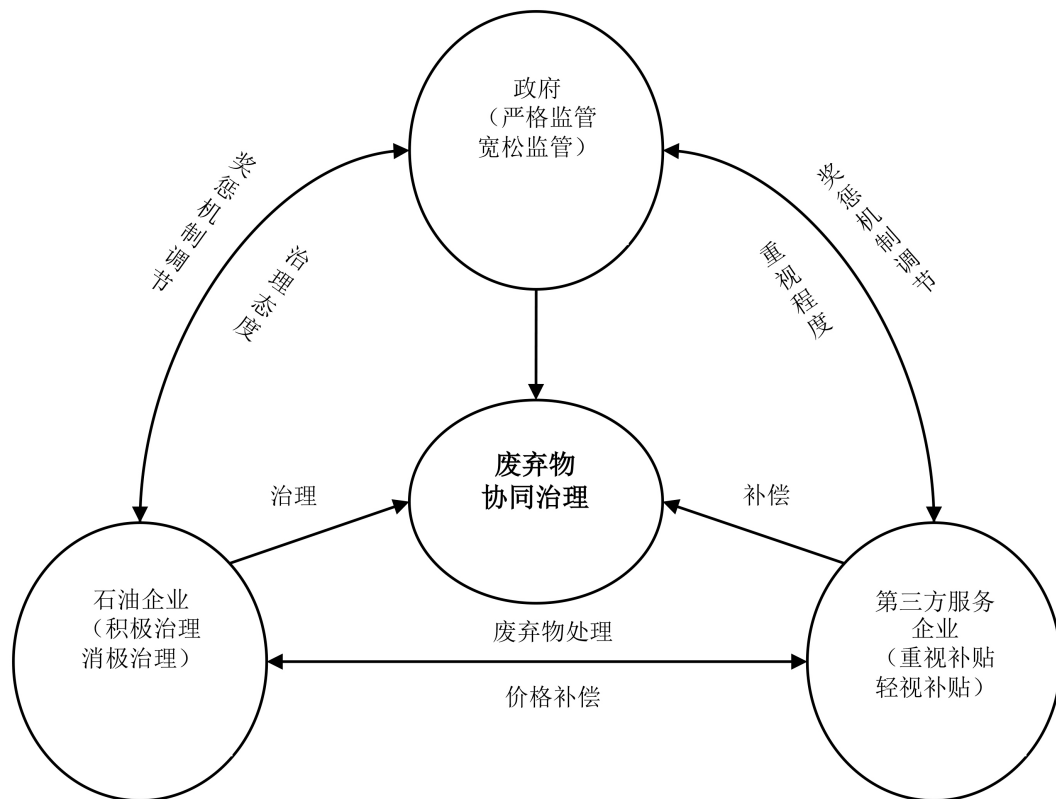


Figure 2. Collaborative governance mechanism of shale gas exploration and development waste  
图2. 页岩气勘探开发废物协同治理机制

### 3.2. 三方博弈模型假设与参数设定

根据《中华人民共和国环境保护法》、《四川油气田钻井废弃物无害化处理技术规范》等政策规范所明确的废弃物处理责任,结合四川页岩气勘探开发废物治理实际,现做出以下假设:

假设 1: 政府、石油企业和第三方专业服务企业三者均为有限理性的群体。博弈过程中,政府追求社会效益最大化;石油企业受社会责任和利益驱动,追求社会效益和经济效益最大化;第三方专业服务企业则希望在政府补贴基础上获得最大经济效益。

假设 2: 基于自身利益最大化各主体具有不同的策略空间,政府的策略为(严格监管,宽松监管),石油企业的策略空间为(积极治理,消极治理),第三方专业服务企业策略空间为(重视补贴,轻视补贴)。

假设 3: 石油企业若选择积极治理,则需要增加资金投入,能获得较好的环境收益和社会收益;石油企业若选择消极治理,虽能大幅降低石油企业的运营成本,但需承担废物治理不力而对环境污染损失和社会损失。

假设 4: 一般地,第三方专业服务企业根据废物治理量、政府补贴而进行处理能力决策,高额补贴有利于石油企业,低幅度的补贴对石油企业不利;第三方服务企业对废物处理受到废弃物种类和总量的影响,与石油企业的策略选择有关。

假设 5: 若石油企业选择积极治理且第三方专业服务企业重视政府补贴, 在付出一定合作成本后将形成高效协同治理机制, 则废物治理的整体成本较低, 补贴和环境收益较高, 政府获得额外的环境协同收益, 而石油企业与第三方专业服务企业社会声誉也会得到正面激励。

根据上述假设, 设定相关参数(如表 1)。

**Table 1.** Parameters summary

**表 1.** 参数汇总

行为主体	参数	含义
政府	$C_g$	严格监管成本
	$\theta_1$	宽松监管时的监管力度( $0 \leq \theta_1 < 1$ )
	$C_g\theta_1$	宽松监督时成本
	$R_1$	给予积极治理石油企业的奖励
	$R_2$	给予重视补贴的第三方专业服务企业的奖励
	$F_1$	给予消极治理的石油企业的罚款
	$F_2$	给予轻视补贴的第三方服务企业的罚款
	$x$	严格监管的概率( $0 \leq x \leq 1$ )
	石油企业	$C_{L1}$
$\theta_2$		消极治理的治理力度( $0 \leq \theta_2 < 1$ )
$\theta_2 C_{L1}$		消极治理的治理成本
$PR_1$		石油企业积极治理时环境收益
$PR_2$		石油企业消极治理时环境收益
$CR$		双方合作治理时的环境协同收益
$C_S$		石油企业合作交易成本
$P_1$		消极治理石油企业退还给重视补贴型第三方专业服务企业的补偿金
$y$		积极治理的概率( $0 \leq y \leq 1$ )
第三方专业服务企业		$K_h$
	$K_L$	重视时给消极治理石油企业的补贴金
	$\theta_3$	轻视补贴力度( $0 \leq \theta_3 < 1$ )
	$\theta_3 K_H$	轻视时给石油企业的补贴金
	$M$	双方合作治理时正面的社会声誉
	$C_h$	石油企业消极治理时第三方服务企业的废物治理成本
	$C_L$	石油企业积极治理时第三方服务企业的废物治理成本
	$\Delta C$	双方合作治理时废物治理成本的减少值
	$C_X$	第三方专业服务企业合作交易成本
	$P_2$	轻视补贴型第三方服务企业给积极治理型石油企业的额外补贴金
$P_3$	重视补贴型第三方服务企业给积极治理型石油企业的额外补贴金	
$z$	重视补贴的概率( $0 \leq z \leq 1$ )	

### 3.3. 支付矩阵构建

基于以上假设和相关参数设定，可得到页岩气勘探开发废物协同治理三方博弈支付矩阵(如表 2)。

**Table 2.** Tripartite game payment matrix of government, oil companies and third-party professional service companies

**表 2.** 政府、石油企业和第三方专业服务企业的三方博弈支付矩阵

策略组合	政府收益	石油企业收益	第三方服务企业收益
(严格监管, 积极治理, 重视补贴)	$-C_g - R_1 - R_2 + CR$	$K_h - C_{L1} - C_s + PR_1 + CR + P_3 + R_1$	$-K_h - C_L + \Delta C - C_X + M - P_3 + R_2$
(严格监管, 积极治理, 轻视补贴)	$-C_g - R_1 + F_2$	$K_h\theta_3 - C_{L1} + PR_1 + P_2 + R_1$	$-K_h\theta_3 - C_L - P_2 - F_2$
(严格监管, 消极治理, 重视补贴)	$-C_g - R_2 + F_1$	$K_L - \theta_1 C_{L1} + PR_2 - P_1 - F_1$	$-K_L - C_h + P_1 + R_2$
(严格监管, 消极治理, 轻视补贴)	$-C_g + F_1 + F_2$	$K_h\theta_3 - \theta_2 C_{L1} + PR_2 - F_1$	$-K_h\theta_3 - C_h - F_2$
(宽松监管, 积极治理, 重视补贴)	$-C_g\theta_1 - \theta_1(R_1 + R_2) + CR$	$K_h - C_{L1} - C_s + PR_1 + CR + \theta_1 P_3 + \theta_1 R_1$	$-K_h - C_L + \Delta C - C_X + M - \theta_1 P_3 + \theta_1 R_2$
(宽松监管, 积极治理, 轻视补贴)	$-C_g\theta_1 - \theta_1 R_1 - \theta_1 F_2$	$-K_h\theta_3 - C_{L1} + PR_1 + \theta_1 P_2 + \theta_1 R_1$	$-K_h\theta_3 - C_L - \theta_1 P_2 - \theta_1 F_2$
(宽松监管, 消极治理, 重视补贴)	$-C_g\theta_1 - \theta_1 R_2 + \theta_1 F_1$	$K_L - \theta_2 C_{L1} + PR_2 - \theta_1 P_1 - \theta_1 F_1$	$-K_L - C_h + \theta_1 P_1 + \theta_1 R_2$
(宽松监管, 消极治理, 轻视补贴)	$-C_g\theta_1 + \theta_1(F_1 + F_2)$	$K_h\theta_3 - \theta_2 C_{L1} + PR_2 - \theta_1 F_1$	$-K_h\theta_3 - C_h - \theta_1 F_2$

## 4. 三方演化博弈模型分析

### 4.1. 复制动态方程

从以上假设和三方博弈收益支付矩阵可知，政府行为在整个页岩气勘探开发废物治理中具有关键作用，为此，我们将三方博弈进行精炼，具体分析政府可选择略的博弈均衡条件。当政府选择严格监管和宽松监管时，其收益期望值分别是：

$$U_{11} = yz(-C_g - R_1 - R_2 + CR) + z(1-y)(-C_g - R_2 + F_1) + y(1-z)(-C_g - R_1 + F_2) + (1-y)(1-z)(-C_g + F_1 + F_2) \tag{1}$$

$$U_{12} = yz[-\theta_1 C_g - \theta_1(R_1 + R_2) + CR] + z(1-y)(-\theta_1 C_g - \theta_1 R_2 + \theta_1 F_1) + y(1-z)(-\theta_1 C_g - \theta_1 R_1 - \theta_1 F_2) + (1-y)(1-z)[- \theta_1 C_g + \theta_1(F_1 + F_2)] \tag{2}$$

通过计算可得到政府的复制动态方程为：

$$F(x) = \frac{dx}{dt} = x(1-x)[-y(1-\theta_1)(R_1 + F_1) - z(1-\theta_1)(R_2 + F_2) + (1-\theta_1)(F_1 + F_2 - C_g)] \tag{3}$$

$$F(y) = \frac{dy}{dt} = y(1-y)\{xz(1-\theta_1)(P_1 + P_3 - P_2) + x(1-\theta_1)(R_1 + F_1 + P_2) + z[-C_s + CR + \theta_1(P_1 + P_3 - P_2) + K_h - K_L] - (1-\theta_1)C_{L1} + \theta_1(R_1 + F_1 + P_2) + PR_1 - PR_2\} \tag{4}$$



$$F(z) = \frac{dz}{dt} = z(1-z) \{ xy(1-\theta_1)(P_2 - P_1 - P_3) + x(1-\theta_1)(R_2 + F_2 + P_1) + y[-C_x + \Delta C + M + \theta_1(P_2 - P_1 - P_3) + K_L - K_h] + \theta_1(R_2 + F_2 + P_1) + \theta_3 K_h - K_L \} \quad (5)$$

### 4.2. 三方演化稳定策略求解

根据复制动态方程的稳定性定理可知，要使政策策略调整过程趋于稳定即博弈各方的比例保持在一个稳定不变的水平，就需要令  $F_x(x, y, z) = 0$ 、 $F_y(x, y, z) = 0$  和  $F_z(x, y, z) = 0$ ，可得到  $E_1 = (1, 1, 1)$ 、 $E_2 = (1, 1, 0)$ 、 $E_3 = (1, 0, 1)$ 、 $E_4 = (0, 1, 1)$ 、 $E_5 = (0, 0, 1)$ 、 $E_6 = (0, 1, 0)$ 、 $E_7 = (1, 0, 0)$ 、 $E_8 = (0, 0, 0)$  和  $E_9 = (x, y, z)$  等 9 个均衡点，纯策略下均衡点主要包括  $E_1 \sim E_8$  这 8 个点， $E_9$  是混合策略下的局部平衡点。在三方动态演化博弈中，纯策略均衡为严格纳什均衡，即演化稳定均衡[12]。根据假设要求  $x$ 、 $y$ 、 $z$  只能在三维空间  $V = \{(x, y, z) | 0 \leq x \leq 1, 0 \leq y \leq 1, 0 \leq z \leq 1\}$  中取值，因此，平衡解需从  $E_1 \sim E_8$  所包含的进行寻找。为此对相关过程做以下简化，令：

$$\begin{cases} a_1 = -(1-\theta_1)(R_1 + F_1) \\ a_2 = (1-\theta_1)(P_1 + P_3 - P_2) \\ a_3 = (1-\theta_1)(P_2 - P_1 - P_3) \\ b_1 = -(1-\theta_1)(R_2 + F_2) \\ b_2 = (1-\theta_1)(R_2 + F_1 + P_2) \\ b_3 = (1-\theta_1)(R_2 + F_2 + P_1) \\ c_1 = (1-\theta_1)(F_1 + F_2 - C_g) \\ c_2 = -C_s + CR + \theta_1(P_1 + P_3 - P_2) + K_h - K_L \\ c_3 = -C_x + \Delta C + M + \theta_1(P_2 - P_1 - P_3) + K_L - K_h \\ d_2 = -(1-\theta_2)C_{L1} - \theta_1(R_1 + F_1 + P_2) + PR_1 - PR_2 \\ d_3 = \theta_1(R_2 + F_2 + P_1) + \theta_3 K_h - K_L \end{cases} \quad (6)$$

**Table 3.** Eigenvalues and asymptotic stability conditions of each equilibrium point  
**表 3.** 各均衡点特征值和渐进稳定条件

平衡点	不同情况下特征值			行列式正负情况	稳定性
	$\&_1$	$\&_2$	$\&_3$		
$E_1 = (1, 1, 1)$	$R_1 + R_2 + C_g$	$-(a_2 + b_2 + c_2 + d_2)$	$-(a_3 + b_3 + c_3 + d_3)$	+	不稳定
$E_2 = (1, 1, 0)$	$a_1 + b_1 + c_1$	$-(c_2 + d_2)$	$-(c_3 + d_3)$	×	鞍点
$E_3 = (1, 0, 1)$	$-(b_1 + c_1)$	$a_2 + b_2 + c_2 + d_2$	$-(b_3 + d_3)$	×	鞍点
$E_4 = (0, 1, 1)$	$-(a_1 + c_1)$	$-(b_2 + d_3)$	$a_3 + b_3 + c_3 + d_3$	×	鞍点
$E_5 = (0, 0, 1)$	$b_1 + c_1$	$c_3 + d_2$	$-d_3$	×	鞍点
$E_6 = (0, 1, 0)$	$a_1 + c_1$	$-d_2$	$c_3 + d_3$	×	鞍点
$E_7 = (1, 0, 0)$	$-c_1$	$d_2$	$b_3 + d_3$	-	ESS
$E_8 = (0, 0, 0)$	$c_1$	$d_2$	$d_3$	×	鞍点

系统的局部均衡点数量已经确定, 根据 Lyapunov 稳定性理论[13], 均衡点的演化稳定特点可由雅可比矩阵的局部稳定性分析得到, 根据结果中平衡点的特征值大小可以发现系统演化稳定策略的均衡点。当特征值均小于 0 时为均衡点[14]。通过局部稳定性分析得到各均衡点特征值和稳定渐进条件(如表 3)。

以上对于演化博弈模型均衡点的稳定性分析, 求得了政府、石油企业和第三方专业服务企业三方主体的 7 个演化稳定及条件, 而  $E_7 = (1, 0, 0)$  (宽松监管、积极治理和重视补贴)的组合是最优演化稳定策略。

## 5. 四川盆地页岩气勘探开发废物治理优化

随着页岩气勘探开发力度的加大和快速上产, 加强废物治理势在必行, 事关协调发展和绿色发展。页岩气勘探开发废物治理需要发挥政府、石油企业、第三方服务企业的作用, 构建起多元协同治理模式, 实现由“先污染、后治理”向“预防为主、综合治理”的协同治理模式转变, 有效促进四川盆地页岩气规模化效益开发并为贵州、云南等地的页岩气勘探开发提供有益经验。页岩气勘探开发过程中的废物治理也需要内生动力和外部约束, 且两者相互促进才能形成政府、石油企业、第三方服务企业的统一集体行动, 废物才能得以有效治理, 资源开发与环境保护才能实现有机统一。

### 5.1. 进一步健全绿色发展的制度体系

绿色发展制度体系可以有效激励和约束各主体行为, 健全的绿色发展制度体系是规范页岩气勘探开发废物治理的基本保障。首先, 完善绿色政策体系。目前, 我国绿色政策体系尚不完善, 针对页岩气产业的政策支持与管制力度均十分有限。根据页岩气产业绿色发展的需要, 应进一步明确相关的法律规范, 增强法律的可操作性和执行力度, 促进产业的绿色发展。其次, 制定行业技术标准。以页岩气勘探开发过程中产生的油基岩屑为例, 由于我国尚未出台对应的钻井岩屑检验标准, 在实际操作过程中相关机构仍需参考城镇污泥的各项指标进行检验, 适应性明显不够, 影响其治理。因此, 根据页岩气勘探开发过程中废物治理实际, 制定符合页岩气产业废物治理的技术标准, 为废物治理提供技术支持, 促进其规范发展。再次, 改革环境监管体制。一方面, 为页岩气开采企业建立环保档案, 定期开展环保工作检查及风险评估工作; 另一方面, 健全生态绩效考评体系, 将环境效益作为考核领导干部工作成绩的重要指标, 并完善生态责任追究制度, 加强责任追究力度, 延长责任追究时限, 因地制宜推行环保责任终身制, 切实提高监管人员及单位的监督效力[15]。

### 5.2. 营造绿色发展良好的社会舆论氛围

绿色发展离不开良好的社会氛围, 而良好的社会氛围的形成与社会舆论有关。社会舆论通过对被评价者进行正面或负面评价, 相应地对其行为形成激励或抑制, 从而引导被评价者的后续活动向绿色发展方向转变。正确地发挥社会舆论积极引导作用是一项社会系统工程, 相对于法律所具有的强制执行力, 社会舆论以柔性管理的方式发挥环境影响评价, 在潜移默化中将组织的意志转化为人们的自觉行动。首先, 需要建立健全环境舆论问题的管理机制, 为收集、监督、反馈工作提供有效的平台, 以便对涉及生态环境的有关舆情能够进行及时有效的应答和高效处理。其次, 需要充分发挥媒体的传播监督作用, 媒体具有传播范围广、速度快的优势, 有利于扩大舆论影响, 可以利用媒体对贯彻绿色发展理念的先进事迹进行褒奖和鼓励, 而对违背绿色发展理念的利己行为予以通报批评, 从而达到规范人们行为的作用。

### 5.3. 不断增强废物治理能力

当前, 制约四川盆地页岩气勘探开发废物治理是供需的不均衡, 需要进一步简化行政审批程序, 不断理顺管理体制, 优化其勘探开发机制, 以不断提高其废物的整体治理效能。首先, 简化页岩气废物治理审批程序, 尽快形成废物治理能力。目前, 按照相关规定, 第三方专业服务企业若要开展页岩气危废

治理业务，其必须具备《危险废物经营许可证》，具体申请流程繁琐，需办理环评审批、环保自主验收备案、技术评估和行政审批等一系列手续后才能向省生态环境保护厅申请办理经营许可证，且每隔 3~5 年需重新申请。显然地，现有的环评和技术评估审批操作交叉重叠，影响和制约着废物治理能力建设。因此，优化服务流程，对持有撬装式装置、从事危废处理的企业，在完成作业点环评的前提下，适度放宽《危险废物经营许可证》的经营空间范围，以尽快形成与页岩气勘探开发规模相匹配的废物治理能力，以满足其规模化发展的需要。其次，整合不同主体的资源优势，加强废物治理能力建设。页岩气钻井岩屑特别是油基岩屑的处理工作对场地、技术、资金、市场、人才等要素要求高，而国家对申领《危险废物经营许可证》的主体资格要求是单一法人，这就造成单一主体很难同时具备全部要素，形成了较高的行业门槛，废物治理能力不能满足页岩气产业发展需要，导致废物治理市场价格高，影响页岩气勘探开发的投资收益，降低了企业的投资积极性。再次，发挥政府规划作用，合理布局废物治理能力。针对危废处置规划布点与页岩气勘探开发布局不匹配的矛盾，应在充分调研的基础上，政府有关部门应根据危废处理企业的服务半径和页岩气产业化发展实际，动态调整危险废物处理设施，鼓励有设施和场地的企业进行设备改造和技术创新，以满足页岩气勘探开发废物治理动态匹配的需要。

#### 5.4. 促进废物治理的产业化发展

为了最大效率地控制废物治理对页岩气可持续发展的不利影响，应该树立系统观念，做好产业发展规划、生态系统建设和服务体系建设。一是做好产业规划。规范页岩气勘探开发废物治理活动，使之形成环境产业，在省级层面做好废物产业化发展、资源化利用的规划，以指导四川盆地页岩气废物治理的健康发展。二是形成规模效应。围绕页岩气废物治理，在页岩气勘探、开发相对集中的主产区设立页岩气废物治理产业园，构建处理设备制造、技术开发、资源化利用产品开发和市场推广的全产业生态系统，形成集聚效应和规模经济。三是完善服务体系。围绕产业园区的快速成长，做好入园企业的技术、管理服务工作，对入园企业进行适当的税收优惠和金融支持，激励其进行技术创新，形成规模化治理页岩气勘探开发废物的绿色循环经济产业园。

#### 5.5. 不断提高废物治理技术水平

页岩气的高效开发利用是建立在技术进步基础上。绿色技术创新将生态学思想引入技术创新过程，既要保证技术的创新性和实用性，又要追求技术手段的清洁环保、绿色高效，其目标是实现经济价值和生态价值的提升。页岩气勘探开发绿色技术创新的主要内容包含废物源头削减技术、循环再利用技术、清洁处理技术等，以此实现无害化勘探开发或少害化勘探开发。页岩气产业的绿色技术创新应当秉持在保护中开发，在开发中保护的原则，推动自身发展方式由粗放型向集约型转变。首先，构建技术创新联合体。由政府部门牵头，全面整合企、校人才资源、学科、信息、技术、资本等要素优势，联合国内外高校、科研院所和企业，成立页岩气勘探开发废物治理技术研发中心，开展科学研究、人才培养、成果转化，实现产学研用一体化，解决页岩气勘探开发废物减量化、无害化和资源化利用等治理处置难题。其次，开展关键技术攻关。设立专项技术资金，通过科研项目立项的方式，在国内外进行科研项目招标，实施“揭榜挂帅”，开展页岩气开采过程中废物，尤其是油基岩屑处理技术中的科学问题和关键技术攻关，尽快形成废物治理的配套工艺技术。

加大中国丰富的页岩气资源的勘探开发对保障我国能源安全具有重要的现实意义。受勘探开发阶段和既有的勘探开发技术的影响和制约，页岩气勘探开发过程中的废物治理面临着理念、方式、能力与新发展阶段新发展理念、高质量发展之间的矛盾，需要立足于废物治理的基本属性，在认识清楚利益相关主体行为模式基础上，构建起多主体参与的协同治理模式。基于以上认识，本文在对四川盆地页岩气勘

探开发过程中的废物治理主导思想、治理方式、治理能力进行系统分析基础上,以废物有效治理决定于政府监管、油田企业积极参与、第三方废物治理企业协同为基本命题,构建起三方博弈模型,系统研究其社会福利最大化的均衡条件,研究发现政府弱监管、油田企业积极治理、第三方企业重视补贴是利益相关者的最优策略。因此,在进一步完善相关制度体系,通过宣传教育营造良好的社会氛围的前提条件下,不断增强治理能力、提高治理水平,促进其产业化发展,将有利于四川盆地页岩气资源的高效开发。

## 基金项目

“十三五”国家油气重大专项项目(2016ZX05037-006-002)。

## 参考文献

- [1] 朱永楠, 苏健, 王建华, 等. 西部地区油气资源开发与水资源协同发展模式探索[J]. 中国工程科学, 2021, 23(3): 129-134.
- [2] 吴娜, 聂志强, 李开环, 等. 页岩气开采钻井固体废物的污染特性[J]. 中国环境科学, 2019, 39(3): 1094-1100.
- [3] 新华社. 中国共产党第十九届中央委员会第五次全体会议公报[EB/OL]. [http://www.gov.cn/xinwen/2020-10/29/content\\_5555877.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2020-10/29/content_5555877.htm), 2023-12-10.
- [4] 贺善侃. 马克思关于人与自然和谐发展的思想及其在当代中国的发展与实践[J]. 上海师范大学学报(哲学社会科学版), 2021, 50(5): 37-45.
- [5] 刘湘溶, 曾晚生. 绿色发展理念的生态伦理意蕴[J]. 伦理学研究, 2018(3): 17-22.
- [6] 陈世永. 当代人类中心主义视野中的可持续发展研究[J]. 理论与改革, 2014(3): 5-7.
- [7] 孟兆磊. 我国天然石墨行业可持续发展问题研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京科技大学, 2021.
- [8] 饶维, 刘文士, 黄庆, 等. 四川页岩气开发压裂返排液和油基岩屑处理处置探析[J]. 环境影响评价, 2019, 41(1): 15-19.
- [9] 于劲磊, 蒋国斌, 王红娟, 等. 川南页岩气钻井固体废物污染防治问题及对策初探[J]. 石油化工应用, 2020, 39(10): 25-29.
- [10] 熊晓青. 多元共治视阈下的三峡清漂长效机制研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2019, 29(10): 30-36.
- [11] 李正升, 王俊程. 基于政府间博弈竞争的越界流域水污染治理困境分析[J]. 科学决策, 2014(12): 67-76.
- [12] 杨苏, 林浩东. 考虑公众参与的公共工程项目应急管理演化分析[J]. 运筹与管理, 2021, 30(5): 95-101.
- [13] 王仁超, 陈宏运, 毛三军, 等. 长江大保护工程建设主体策略选择演化博弈研究[J]. 水资源与水工程学报, 2023, 34(1): 110-120.
- [14] 高攀, 杜汪苗, 赵旭. 大中型水电工程库区漂浮物协同治理的多元主体博弈研究[J]. 水资源与水工程学报, 2023, 34(5): 32-42+51.
- [15] 秦书生, 胡楠. 中国绿色发展理念的理论意蕴与实践路径[J]. 东北大学学报(社会科学版), 2017, 19(6): 631-636.