

不确定条件下页岩气开发废水管理双层规划模型及应用

王建良*, 张兴达

中国石油大学(北京)经济管理学院, 北京 102249

* 通信作者, wangjianliang@cup.edu.cn

收稿日期: 2020-02-28

国家自然科学基金项目(71874201, 71503264, 71673297, 71874202)资助

摘要 页岩气资源的勘探开发已成为近年来能源领域关注度最高的话题之一, 并对世界天然气工业和天然气市场产生了显著影响。进一步, 作为最为清洁的化石燃料, 页岩气资源的开发也将在全球能源低碳化转型中扮演重要角色。在此背景下, 可以预期页岩气资源的开发规模将在未来越来越大。然而, 需要关注的是, 开发页岩气资源并不是一个对环境完全无害的过程。大量研究显示, 页岩气资源的开发活动会产生一些严重的环境影响, 例如甲烷泄露以及大量的水资源消耗等。在这些众多的环境影响中, 与水相关的问题被认为是最根本且对页岩气规模开发而言长期产生阻碍的一个话题。而最佳的水资源管理是应对水资源相关问题的最有效处理措施。

本文聚焦于页岩气开发中产出废水的分配与回用等水资源管理问题。进一步, 在产出废水的分配和回用过程中, 存在大量的不确定性因素, 且这些因素会对最终优化结果产生显著影响。因此, 本文首先对页岩气开发废水处理与回用流程及过程中的不确定因素进行了详细描述与分析; 然后以经济效益和环境效益分别作为双层规划模型的上下两层目标函数, 用模糊规划来处理产出废水的不确定性, 区间规划处理废水运输、处理、回用中的其他不确定性, 进而构建页岩气废水资源管理的不确定双层规划模型; 在模型构建之后, 基于满意度的交互式算法被用于模型的求解; 最后将模型应用于具体算例以论证模型的有效性。

研究结果表明: 对于每一个钻井点而言, 都存在一个主要的产出废水分配和回用方案, 且该方案主要受到经济因素、废水处理设施的处理能力以及上下层目标函数的相对位置影响。此外, 对于各类不确定性因素的考虑, 确实提高了优化过程的客观性, 且优化结果与实际也更加相符。进一步, 在求解过程中, 对产出废水量不确定性的合理容忍可以提高全局满意度, 这有助于给出更好的优化结果。最后, 通过对比本文建立的双层规划模型和传统的两个单目标模型显示, 本文的双层规划模型可以实现在经济效益和环境效益目标之间的权衡, 而这种权衡与现实更加匹配。

关键词 页岩气; 水力压裂; 废水管理; 不确定性; 双层规划; 模糊规划; 区间规划

Bi-level programming model of wastewater management in shale gas development while considering uncertainties

WANG Jianliang, ZHANG Xingda

School of Economics and Management, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

引用格式: 王建良, 张兴达. 不确定条件下页岩气开发废水管理双层规划模型及应用. 石油科学通报, 2020, 02: 277-289

WANG Jianliang, ZHANG Xingda. Bi-level programming model of wastewater management in shale gas development while considering uncertainties. Petroleum Science Bulletin, 2020, 02: 277-289. 10.3969/j.issn.2096-1693.2020.02.024

Abstract The exploration and exploitation of shale gas resources has been seen as a game changer in recent years which has affected the world natural gas industry and gas market significantly. Furthermore, as the relatively cleanest fossil energy, development of shale gas resources is expected to play an important role in the world's projected transition towards a low-carbon energy future. In this case, the large-scale extraction of shale gas resources could be inevitable in future. However, extracting shale gas resources is not an entirely environmental benign issue. Numerous studies have shown that shale gas development may have some serious environmental impacts, for example, methane leakage and huge water consumption. Of these, water-related issues are a fundamental and longer lasting obstacle. Better water resource management has been seen as one of the most effective measures for dealing with water-related issues.

This paper focuses on the management of wastewater allocation and reuse in shale gas development. Uncertainties in the process of wastewater allocation and reuse could affect the final optimization results considerably, therefore, this paper first gives a detailed description and analysis of the process of wastewater treatment and reuse and related uncertain factors. Secondly, a bi-level programming model with uncertainty is established for wastewater management for shale gas development, where economic and environmental benefits are upper-level and lower-level objectives respectively, fuzzy and interval programming is used to deal with uncertainties from the amount of produced wastewater and others in transportation, treatment, and reuse of produced wastewater. After the model is established, algorithms based on satisfaction and interaction are used for solving the model. Finally, the established model is used in a case study to show its effectiveness.

The results show that one main plan of wastewater allocation and reuse always exists for each drilling point, and this plan is mainly affected by economic factors, capacity of wastewater treatment facilities as well as the relative position of the upper and lower objective functions. Besides, the consideration of those uncertainties does make the result more objective and closer to reality. In addition, tolerance of the uncertainty in the amount of produced wastewater can improve the overall degree of satisfaction, which is good for providing the optimal results. Finally, a comparison of results from the established bi-level programming model and those from two traditional single objective programming models shows that the proposed model in this paper could achieve a trade-off between economic and environmental benefits, and this trade-off is more in line with reality.

Keywords shale gas; hydraulic fracturing; wastewater management; uncertainty; bi-level optimization; fuzzy programming; interval programming

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2020.02.024

0 引言

在美国页岩革命的推动下,页岩气已成为近年来非常规天然气领域关注度最高、产出规模扩张最快的天然气资源。而伴随着页岩气开发规模的迅速扩大,学界对其开发所造成的环境影响的关注也越来越多^[1-5]。在众多的环境问题当中,与水资源相关的水消耗与污染是关注度最高的环境问题,其被国际能源署认为是制约规模开发页岩气的最为根本且长期存在的环境因素^[6]。而水资源管理则被认为是应对和减缓页岩气开发对水资源影响的重要途径^[7]。

回顾国内外文献发现,以往对页岩气的研究主要集中在地质、工程、技术等方面^[8-11],而在2012年后,与水资源相关的话题成为了一个快速增长且极热的研究话题^[12]。此类话题可以分为三类:第一类是通过理论定性分析或数据统计实证分析揭示页岩气开发与水资源之间的关系^[13-16],属于发现或认识问题的研究范畴;第二类是通过量化评估方法来分析页岩气开发能够在多大程度上对水资源产生影响^[17-20],属于分析问题的研究范畴;第三类是通过数学规划方法来

研究页岩气开发中的水资源管理问题^[21,22],属于解决问题的研究范畴。与前两类研究相比,第三类研究不仅出现晚,且数量也非常少。第一份针对页岩气开发水资源管理的量化学术文章出现在2014年。在2014年, Yang等^[21]首次通过构建一个单目标混合整数线性规划模型,以水资源管理成本最小化为目标,对页岩气开发的水资源管理进行优化。之后, Lira-Barragán等^[22]、Li等^[23]、Gao和You^[24,25]等都采用了类似的分析思路,通过构建以成本最小化或水资源利用效率最大化为目标的单目标规划模型来优化页岩气开发中的新鲜水与废水管理问题。然而,上述研究存在的一个显著问题是针对单井需水量、返排废水量(或返排率)等参数都是预先给定的确定值,没有考虑水资源管理中的不确定性^[26],尽管不确定性的存在会对优化结果的可靠性产生重要影响^[27]。针对此,一些研究开始尝试在考虑不确定性的条件下进行页岩气开发水资源管理。例如, Lira-Barragán等^[28]建立了一个以成本最小化为目标函数的单目标数学规划模型来进行页岩气开发的水资源管理,在该模型中,考虑了页岩气压裂用水需求和返排率两个不确定因素,并假设其服从某种

概率分布。Zhang等^[26,29]以废水处理成本最小化为目标函数，分别用模糊随机规划和两阶段随机规划来研究废水产量不确定性条件下的页岩气开发水资源管理。然而，上述几篇针对不确定性的研究一是对不确定性的考虑并不完备，仅仅考虑了需水量和废水返排(返排量或返排率)中的一个或两个不确定性因素，而现实中的废水运输成本、处理成本等也都存在不确定性；二是对于不确定性的考虑多是将其假设为某种概率分布，而在真实的水资源管理中，很多信息都是离散或不规则分布的，表现出来的多是一个区间范围，这意味着采用区间规划可能更符合实际。

除了对不确定性的考虑有待完善外，上述研究在目标函数设置中基本上都针对的是运营的经济效益，且经济效益仅考虑的是成本，通过成本最小化来实现对经济效益的优化^[21-23,28]。而事实上，水资源管理运营不仅有成本，而且还可能带来部分收益，例如废水处理再利用所带来的新鲜水的节约就是一种特殊的收益，尽管这部分收益可能比较小，但从完整性的角度也应当被考虑进运营的经济效益当中。另外，仅仅以水资源运营成本最小化作为目标，可能并不能实现对环境效益的合理考量，这是因为废水处理与回用成本往往高于废水直接的废弃成本，当仅考虑经济成本时，可能会导致更多的废水直接废弃，这意味着潜在的环境影响也会更大。因此，如何将环境效益也纳入到目标函数中，也是现有文献有待完善的地方。

基于此，本文的主要目的就是针对页岩气开发中的多种不确定因素，根据其特点选用合理的不确定考量方式，在同时考虑经济效益和环境效益的背景下，构建页岩气开发水资源管理优化模型，为页岩气开发水资源管理实践提供决策参考。

1 问题描述

页岩气开发的核心技术是水力压裂。而根据国内

外众多学者的研究，页岩气开发的水消耗和潜在污染主要来自水力压裂过程中压裂液(压裂液通常由水和各类化学添加剂等混合而成)的使用和返排液的不适当处理^[30]。因此，本文重点关注与水力压裂活动相关的水资源管理问题。从水资源供应和处理的视角来看，水力压裂活动所需水首先需要从各类可用水源地获取；然后被运输到井场后与各类化学添加剂混合成为压裂液，之后被注入井底压裂储层；而后在返排阶段和生产阶段，分别会有液体回流到地表(在完井返排阶段回流到地面的称之为返排水，生产阶段回流到地表的称之为生产水，而在本文中，两者统称为产出废水，产出废水量与注入液量的比例称之为返排率)；回流到地表的产出废水通常会被运输到不同的处理场地进行处理，其中部分产出废水经过特殊处理后可部分回用。一般而言，产出废水的处理有三种^[23,26]：一是在普通的污水处理厂处理；二是在专门设计的污水厂处理(HWTP)；三是通过废弃深井注入进行直接废弃处理(UID)。在这三种处理方式中，第一种处理的污染风险是最大的，因为其仅能处理普通污水，而对于水力压裂这种特殊废水并不能实现很好的处理，因此，目前国际上采用比较多的主要是后两种。在本文中，我们也假设后两种处理方式，且经过HWTP处理后的部分产出废水是可以被运回到井场再使用，这部分回用水量占所处理的产出废水量的比例称之为废水回用率。上述过程可以简化为图1所示流程。

在上述过程中，本文重点关注产出废水的管理问题，这是因为好的废水管理不仅可以直接实现污染风险的降低，而且也能间接减小对水资源的消耗(通过提高废水回用率)。在这一废水管理系统中，相关主体首先追求的是整个废水管理系统经济效益的最大化，而该系统的经济效益可以用废水回用带来的潜在收益、废水运输成本和废水处理成本等来表示；同时在环境要求日益严峻的趋势下，环境影响的最小化也是相关主体追求的目标之一，该目标可以通过最大化产出废

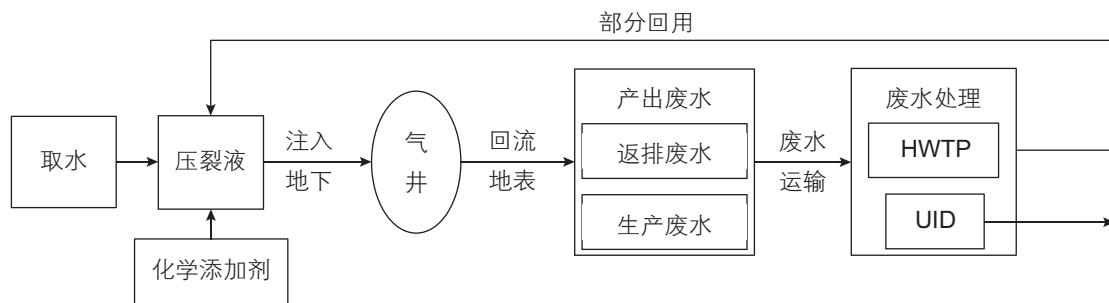


图1 页岩气开发过程中水资源流动图

Fig. 1 Water resources flow in the process of shale gas development

水的回用来实现(废水回用量的增加可以降低新鲜水的需求和向自然界排放的废水量)。在本文中,我们采用双层规划方法来对废水管理系统进行优化。具体而言,上层为经济效益模块,以生产废水的在不同处理方式间的分配量和经过HWTP处理后回用水量为决策变量,进而寻求经济效益最大或成本最小下的废水分配与回用方案;下层为环境效益模块,以经过HWTP处理后回用水量为决策变量,寻求环境最小化下的废水分配与回用方案。在双层决策过程中,上层优化结果会影响下层目标和约束条件,而下层优化结果也会反馈给上层决策者,从而实现上下层的最优。通常而言,追求经济效益最大是所有水资源管理的普遍目标,因此其优先级较高,作为上层目标^[31]。

需要关注的是,在上述废水管理系统中,存在着多个不确定性因素,例如:由于储层埋深、水平段长度、储层条件等差异导致的产出废水量(或返排率)的不确定;不同气井产出的单位废水运往不同处理或舍弃设施处的运输费用的不确定;不同处理或舍弃设施处理或舍弃费用的不确定;废水回用率或废水回用量的不确定;回用废水带来的收益的不确定;每口井开发过程所需水量的不确定等。从结果可靠性的角度出发,这些不确定性应当被合理的考虑进废水资源管理当中。

2 页岩气废水管理双层规划模型

2.1 双层规划模型

20世纪70年代,受Staclkelberg对市场经济中博弈模型研究的影响^[32],Bercken和Mcgill首次提出双层规划模型^[33]。该模型主要用于解决处于两个不同层级决策者的决策问题。其中引入满意度(λ)来衡量约束达到何种程度时目标达到其最佳值。上层决策者可以通过更新满意度的下限来达到满意的解决方案,以实现两个层级之间总体满意度的平衡。常见双层规划模型的形式如下:

$$\max_{(x \in X), y} f^U(x, y) = d_{11}x + d_{12}y \quad (1)$$

$$\text{s.t. } g^U(x, y) \leq 0 \quad (2)$$

$$y \in \arg \min_{x, (y \in Y)} f^L(x, y) = d_{21}x + d_{22}y \quad (3)$$

$$\text{s.t. } g^L(x, y) \leq 0 \quad (4)$$

其中, $f^U(x, y)$ 、 $f^L(x, y)$ 分别代表上层和下层目标函数; x 、 y 分别是上层和下层的决策变量;

d_{11} 、 d_{12} 、 d_{21} 、 d_{22} 分别是相应的常数向量; $g^U(x, y)$ 、 $g^L(x, y)$ 分别是上层和下层的限制条件; (X, Y) 是决策变量 (x, y) 的可行域。该问题的求解思路如下^[35-37]:

第一步:独立求解上下层目标,得到相应的上层解 (x_U, y_U, f_U) 和下层解 (x_L, y_L, f_L) ; 然后比较上下层求解结果,如果 $(x_U, y_U) = (x_L, y_L)$, 则得到最优解。但在现实当中,上下层目标往往是不同的,这就导致上述相等的结果很难实现。因此需要下列步骤来进行求解。

第二步:给上层决策变量 x 设定一个容忍阈值,基于此,可以构建如下的三角隶属度函数:

$$\varepsilon(x) = \begin{cases} \frac{x - (x_U - t)}{t} & x_U - t \leq x \leq x_U \\ \frac{(x_U + t) - x}{t} & x_U \leq x \leq x_U + t \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (5)$$

其中, $\varepsilon(x)$ 代表上层决策变量 x 的满意度; t 表示 x_U 周围的容忍阈值; $[x_U - t, x_U]$ 、 $[x_U, x_U + t]$ 分别表示变量 x 的左侧容忍区间和右侧容忍区间,两个容忍区间之外的决策是不可接受的。

第三步:对上层和下层目标函数分别设定一个容忍阈值,由于上层目标函数是求解最大化问题,所以假定 $f^U(x, y) > f_U$ 是绝对可接受的,而 $f^U(x, y) < f'$ 是绝对不可接受的,其中, f' 被假定为上层目标的最低容忍值。最低容忍值 f' 可以通过求解下层目标 (x_L, y_L) 并将其代入上层目标来确定,即 $f' = f^U(x_L, y_L)$, 因此,上层决策者的隶属度函数可以公式化如下:

$$\mu_f[f^U(x, y)] = \begin{cases} 1 & f^U(x, y) > f_U \\ \frac{f^U(x, y) - f'}{f_U - f'} & f' \leq f^U(x, y) \leq f_U \\ 0 & f^U(x, y) < f' \end{cases} \quad (6)$$

其中, $\mu_f[f^U(x, y)]$ 为上层目标函数的满意度。

下层目标函数的容忍阈值可通过假定最大容忍值 g' 来调整其目标值,同上层目标函数的容忍阈值设定类似,下层决策者的隶属度函数可以公式化如下:

$$\mu_g[g^L(x, y)] = \begin{cases} 1 & g^L(x, y) < g_L \\ \frac{g' - g^L(x, y)}{g' - g_L} & g_L \leq g^L(x, y) \leq g' \\ 0 & g^L(x, y) > g' \end{cases} \quad (7)$$

其中, $\mu_g[g^L(x, y)]$ 为下层目标函数的满意度。

第四步：引入满意度 λ 来同时衡量上下层目标的同时实现程度。 $\lambda = \min\{\varepsilon(x), \mu_f[f^U(x, y)], \mu_g[g^L(x, y)]\}$, λ 可以通过下面的公式求解。

$$\max \lambda \quad \text{s.t.} \begin{cases} \varepsilon(x) \geq \lambda \\ \mu_f[f^U(x, y)] \geq \lambda \\ \mu_g[g^L(x, y)] \geq \lambda \\ 0 \leq \lambda \leq 1 \end{cases} \quad (8)$$

如果上层决策者对 λ 的值满意，问题就解决了。否则，上层决策者应反复改变其隶属度函数，直到得到最优解。这样双层优化问题就可以得到满意的解。需要指出的是，双层规划仅仅是反映了系统的层次结构，但对不确定性的考虑不够。正如前一部分描述的那样，在页岩气的废水管理过程中存在多种不确定因素。通过对国内外文献的综述和现实情况的分析，本文用三角模糊数来反映产出废水量的不确定性，而对于其他类型的参数，根据其呈现出区间范围的特征，采用区间数的方式考虑其不确定性。

2.2 上下层目标函数及约束条件

2.2.1 上层模块

(1) 目标函数

上层决策者以废水管理系统的经济效益最大化为目标函数：

$$\max F_1^\pm = -\sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^3 (ht_{ij}^\pm + hc_j^\pm) x_{ij}^\pm + \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^2 (r_j^\pm - ht_{ij}^\pm) y_{ij}^\pm \quad (9)$$

其中， \pm 代表区间值； i 代表产出废水的来源，通常为钻井点(结合后文案例，我们这里将 i 设为1-5，代表5个钻井点)； j 代表产出废水的处理或舍弃设施(结合后文案例，我们这里将 j 设为1-3，其中 $j=1,2$ 代表两个专门设计的针对产出废水的污水处理厂，即HWTP1和HWTP2； $j=3$ 代表一个地下注入井的舍弃场地，即UID)； F_1^\pm 代表系统总经济效益，由产出废水回用收入扣减各类成本构成； ht_{ij}^\pm 代表从产出废水来源 i 到废水处理或舍弃设施 j 的单位废水运输成本(结合后文案例，单位为美元/桶，下同)； hc_j^\pm 代表设施 j 中产出废水的单位处理或舍弃成本(美元/桶)； x_{ij}^\pm 为连续决策变量，表示产出废水来源 i 中交付给废水处理或舍弃设施 j 的废水量(桶)； r_j^\pm 表示的是经过处理设施 $j(j=1,2)$ 处理后的单位废水回用收入(美元/桶)； y_{ij}^\pm 为决策变量，表示交给设施 $j(j=1,2)$ 的废水来源 i 的

废水经处理后回用的废水量(桶)。

(2) 约束条件

废水处理量约束：所有废水来源产出的运往废水处理或舍弃设施的废水量之和应等于所有来源的任何可能水平的废水产出总量。

$$\sum_{j=1}^3 (x_{ij}^\pm) = \overline{WWG}_i, \quad \forall i \quad (10)$$

地下注入井的容量限制：运输到UID进行舍弃的废水量不能超过规划范围内的可用容量。

$$\sum_{i=1}^5 (x_{i3}^\pm) \leq UIF \quad (11)$$

废水回用率约束：模型要求产出废水回用率限制在一定的范围内。

$$\eta_{j,\min} x_{ij}^\pm \leq y_{ij}^\pm \leq \eta_{j,\max} x_{ij}^\pm, \quad \forall i, j=1,2 \quad (12)$$

在上述公式中， WWG_i 为所有废水来源产出的总废水量； UIF 为规划期间内UID($j=3$)的可用容量(桶)； η_j 为经过HWTP处理后的废水回用率。

2.2.2 下层模块

(1) 目标函数

下层的目标是环境效益最大，本文以经过HWTP处理后的废水回用量最大化来作为目标函数，原因是此种方式不仅能够降低产出废水排放引起的环境污染，而且还能最小化新鲜水的使用：

$$\max F_2^\pm = \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^2 y_{ij}^\pm \quad (13)$$

其中， F_2^\pm 代表经过处理设施 $j(j=1,2)$ 处理后回用的废水总量(桶)。

(2) 约束条件

废水回用率约束：模型要求废水回用率保持在一定的范围内。

$$\eta_{j,\min} x_{ij}^\pm \leq y_{ij}^\pm \leq \eta_{j,\max} x_{ij}^\pm, \quad \forall i, j=1,2 \quad (14)$$

HWTP处理能力约束：钻井点接受的经过HWTP处理后的回用废水量之和不超过HWTP的废水处理能力总和。

$$\sum_{i=1}^5 (y_{ij}^\pm) \leq WTP_j, \quad j=1,2 \quad (15)$$

废水来源(即钻井点)废水回用量限制：在规划期间，每个废水来源地能够接收的来自HWTP的回用废水量总和不应高于所有钻井点所需最大水量。

$$\sum_{j=1}^2 (y_{ij}^\pm) \leq DW_i^\pm, \quad \forall i \quad (16)$$

变量非负约束：要求模型中的决策变量都是大于等于零的。

$$y_{ij}^{\pm} \geq 0 \quad (17)$$

在上述公式中, $\eta_{j,\min}$ 、 $\eta_{j,\max}$ 分别为每个HWTP 废水回用率的最小值和最大值; WTP_j 代表专门设计的 废水处理厂($j=1,2$)的处理能力(桶); DW_i^{\pm} 代表废水 来源地(即钻井点) i 所需水量(桶)。

2.3 模型不确定性的求解

在本文所构建的模型中, 主要涉及两类不确定性 处理方式, 一是模糊规划, 二是区间规划, 对二者的 求解如下:

2.3.1 模糊规划与满意度

由于废水产量 \widetilde{WWG}_i 是三角模糊数, 约束条件 (10) 没有明确的意义, 需要使用基于期望区间(EI)的 模糊排序方法进行处理。 $\widetilde{WWG}_i = (w_1, w_2, w_3)$ 的模糊参 数的隶属函数 $\mu_w(x)$ 表示如下:

$$\mu_w(x) = \begin{cases} 0, & x \leq w_1 \text{ 或 } x \geq w_3 \\ f_w(x), & w_1 \leq x \leq w_2 \\ g_w(x), & w_2 \leq x \leq w_3 \\ 1, & x = w_2 \end{cases} \quad (18)$$

其中, 函数 $f_w(x)$ 和 $g_w(x)$ 分别是连续线性递增函数和 连续线性递减函数。三角模糊数 $\widetilde{WWG}_i = (w_1, w_2, w_3)$ 的 期望区间定义如下:

$$\begin{aligned} EI(w) &= [E_1^w, E_2^w] \\ &= \left[\int_0^1 f_w^{-1}(x) dx, \int_0^1 g_w^{-1}(x) dx \right] \\ &= \left[\frac{w_1 + w_2}{2}, \frac{w_2 + w_3}{2} \right] \end{aligned} \quad (19)$$

在此, 我们引入 $\alpha (0 \leq \alpha \leq 1)$ 来表示模糊约束的可 接受程度或可能的程度, 即决策者对于模糊约束能够 接受的满意度。因此, $(1-\alpha)$ 则意味着违反模糊约束的 风险, 反映了系统的可靠性。模糊等式约束可以转化为 两个等价的普通形式。

$$\sum_{j=1}^3 (x_{ij}^{\pm}) \leq (0.5\alpha E_1^w + (1-0.5\alpha) E_2^w) \quad (20)$$

$$\sum_{j=1}^3 (x_{ij}^{\pm}) \geq (0.5\alpha E_2^w + (1-0.5\alpha) E_1^w) \quad (21)$$

满意度 α 反映了决策者接受建模解决方案的偏好。 根据 Jiménez 等^[37] 等的描述, 确定了 11 个量级以区分 可行性水平, 包括: 0(不可接受), 0.1(实际上不可接 受), 0.2(几乎不可接受), 0.3(非常不可接受), 0.4(完 全不可接受), 0.5(均不可接受), 0.6(完全可接受),

0.7(非常可接受), 0.8(几乎可接受), 0.9(实际可接受) 和 1(完全可接受)。通常, 较高的满意度会导致目标 函数值较差或较为保守。在这项研究中, 为了增加结 果的确定性和避免目标函数值过于乐观, 决定使满意 度 α 处在较高的水平, 使用了从 0.5 到 1 的六个等级, 代表了不同解决方案的可接受性类别。

2.3.2 区间规划与交互式算法

区间规划模型可由交互式算法求解。引入交互式 算法后, 本文所构建的模型即可变化为两个子模型, 第一步先配制一个与上层目标函数值下界 F_1^- 和下层目 标函数上界 F_2^+ 相对应的子模型; 第二步是根据第一 子模型制定一个对应于上层目标函数上界 F_1^+ 和下层目 标函数下界 F_2^- 对应的子模型。在上述两个子模型中, x_{ij}^{\pm} 、 y_{ij}^{\pm} 是模型的决策变量。

对应于 F_1^- 和 F_2^+ 的子模型一表述如下:

$$\max F_1^- = \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^2 (r_j^- - ht_{ij}^+) y_{ij}^- - \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^3 (ht_{ij}^+ + hc_j^+) x_{ij}^+ \quad (22)$$

其满足:

$$\sum_{j=1}^3 x_{ij}^+ = \widetilde{WWG}_j^+, \quad \forall i \quad (23)$$

$$\sum_{i=1}^5 x_{i3}^+ \leq UIF \quad (24)$$

$$\eta_{j,\min} x_{ij}^+ \leq y_{ij}^+ \leq \eta_{j,\max} x_{ij}^+, \quad \forall i, j = 1, 2 \quad (25)$$

$$\max F_2^+ = \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^2 y_{ij}^+ \quad (26)$$

$$\sum_{i=1}^5 (y_{ij}^+) \leq WTP_j, \quad j = 1, 2 \quad (27)$$

$$\sum_{j=1}^2 (y_{ij}^+) \leq DW_i^+, \quad \forall i \quad (28)$$

$$x_{ij}^+ \geq 0, \quad \forall i, j \quad (29)$$

$$y_{ij}^+ \geq 0 \quad (30)$$

基于子模型一, 构建对应于 F_1^+ 和 F_2^- 的子模型二 如下:

$$\max F_1^+ = \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^2 (r_j^+ - ht_{ij}^-) y_{ij}^- - \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^3 (ht_{ij}^- + hc_j^-) x_{ij}^- \quad (31)$$

$$\sum_{j=1}^3 x_{ij}^- = \widetilde{WWG}_i^-, \quad \forall i \quad (32)$$

$$\sum_{i=1}^5 x_{i3}^- \leq UIF \quad (33)$$

$$\eta_{j,\min} x_{ij}^- \leq y_{ij}^- \leq \eta_{j,\max} x_{ij}^-, \quad \forall i, j = 1, 2 \quad (34)$$

$$\max F_2^- = \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^2 y_{ij}^- \quad (35)$$

$$\sum_{i=1}^5 (y_{ij}^-) \leq WTP_j, \quad j = 1, 2 \quad (36)$$

$$\sum_{j=1}^2 (y_{ij}^-) \leq DW_i^-, \quad \forall i \quad (37)$$

$$x_{ij}^- \geq 0, \quad \forall i, j \quad (38)$$

$$y_{ij}^- \geq 0 \quad (39)$$

通过求解子模型一，可以获得 F_1^- 、 F_2^+ 、 y_{ij}^+ 、 x_{ij}^+ 的最优解；求解子模型二，可获得 F_1^+ 、 F_2^- 、 y_{ij}^- 、 x_{ij}^- 的最优解。综合子模型一和二的解，即可获得以区间形式表示的模型的解。

3 数值算例

3.1 算例描述

Zhang 等^[26]基于美国宾夕法尼亚州等地的页岩气开发实践，提出了一个典型的、具有代表性的废水管理管理系统。在本文中，由于中国页岩气开发数据的稀缺性，我们也采用 Zhang 等^[26]所提出的案例。需要指出的是，从模型验证的角度来看，选择美国的例子和中国的例子并不会存在显著差异。

在 Zhang 等^[26]提出的案例中，共有 5 个钻井点作为产出废水的来源地，而每个钻井点又包括若干口井。由于产出废水的数量是废水管理中最为关键的因素，因此，在统计过程中，将可能产出的废水量分为高、中、低 3 个情况，假设其发生的概率分别为 20%、60%、20%，而对于每一种情况下的废水产量，考虑到不确定性，又以区间的形式表示，如表 1 所示。对于产出的废水必须根据环境和政府法规的要求进行处理或舍弃，共有三个处理或舍弃设施，包括两个专门设计的废水处理厂(HWTP1 和 HWTP2)和一个地下注入舍弃场(UID)。假设来自五个钻井点的所有产出废水都通过卡车运送到处理或舍弃设施。表 2 展示的是不同钻井点产出废水运往不同处理或舍弃设施的运输成本及不同处理或舍弃设施的处理与舍弃成本。进一步，考虑到实际情况，两个 HWTP 中的废水回用率被限定在一个特定区间之中，且其废水回用收入也以区间的形式展示，如表 3 所示。两个 HWTP 对废水处理能力的限制、一个 UID 舍弃处理能力的限制以及每个钻井点所能回用的废水量的限制如表 4 所示。在整个项目规划期内，决策者面临的问题是从整个系统的角度有效地规划产出废水的分配与回用量，从而实现经济效益与环境效益的最佳。

表 1 来自五个钻井点的废水产出量

Table 1 Volume of wastewater from five drilling points

钻井点	系数区间	产出废水量/(桶/天)	概率/%
i=1	低	[5490,5570]	20
	中	[5750,5900]	60
	高	[6000,6150]	20
i=2	低	[4220,4410]	20
	中	[4480,4620]	60
	高	[4690,4810]	20
i=3	低	[5080,5220]	20
	中	[5300,5410]	60
	高	[5490,5570]	20
i=4	低	[5840,5940]	20
	中	[6050,6130]	60
	高	[6200,6300]	20
i=5	低	[4970,5070]	20
	中	[5100,5210]	60
	高	[5240,5330]	20

表 2 不同废水处理设施的成本参数

Table 2 Cost parameters for different wastewater treatments

钻井点	处理或舍弃设施	运输费用/(美元/桶)
i=1	HWTP1(j=1)	[3.0,3.6]
	HWTP2(j=2)	[5.2,6.0]
	UID(j=3)	[2.1,2.8]
i=2	HWTP1(j=1)	[2.6,3.7]
	HWTP2(j=2)	[3.2,3.6]
	UID(j=3)	[6.2,6.8]
i=3	HWTP1(j=1)	[4.5,5.1]
	HWTP2(j=2)	[4.9,5.3]
	UID(j=3)	[3.9,4.5]
i=4	HWTP1(j=1)	[5.8,6.3]
	HWTP2(j=2)	[3.4,3.9]
	UID(j=3)	[2.5,3.0]
i=5	HWTP1(j=1)	[2.9,3.5]
	HWTP2(j=2)	[2.8,3.4]
	UID(j=3)	[6.8,7.3]
处理或舍弃设施		处理或舍弃成本/(美元/桶)
	HWTP1(j=1)	[3.5,4.3]
	HWTP2(j=2)	[2.9,3.7]
	UID(j=3)	[1.2,1.9]

表 3 废水回用相关参数

Table 3 Relative parameters for wastewater reuse

处理或舍弃设施	废水回用率/%	废水回用收益/(美元/桶)
HWTP1	[0.76, 0.81]	[1.1, 1.6]
HWTP2	[0.70, 0.76]	[0.9, 1.3]

需要注意的是,对于钻井点产生的产出废水量,因为其是区间的形式,因此可以将其上限和下限分开予以分别讨论。如以钻井点1为例,其高、中、低三种情况下产量区间的下限分别为5490桶/天、5750桶/天和6000桶/天,本文将这3个产出废水量分别作为产出废水量下限情景下的低值、最可能值和高值。这样就得到了钻井点1的三角模糊数形式的产出废水量下限表示,具体形式为 $F=(5490,5750,6000)$,

表4 HWTP处理产出废水量、UID处置产出废水量与钻井点可回用废水量约束参数

Table 4 Treatment and reuse capacity of HWTP, UID and drilling points

HWTP处理产出废水量的上限/(桶/天)	
WTP(HWTP1)	12 000
WTP(HWTP2)	11 400
UID处置产出废水量的上限/(桶/天)	
UID(UIF)	5753
钻井点可回用的废水量上限/(桶/天)	
DW_1^\pm	[3800, 3970]
DW_2^\pm	[2900, 3110]
DW_3^\pm	[3500, 3500]
DW_4^\pm	[4000, 4100]
DW_5^\pm	[3300, 3500]

表5 不同满意度的废水产出率(单位:桶/天)

Table 5 Wastewater output under different degree of satisfaction (Barrel per day)

废水量	满意度 α					
	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
WWG_1^-	[5683.75,5811.25]	[5696.5,5798.5]	[5709.25,5785.75]	[5722,5773]	[5734.75,5760.25]	5747.5
WWG_2^-	[4408.75,4526.25]	[4420.5,4514.5]	[4432.25,4502.75]	[4444,4491]	[4455.75,4479.25]	4467.5
WWG_3^-	[5241.25,5343.75]	[5251.5,5333.5]	[5261.75,5323.25]	[5272,5313]	[5282.25,5302.75]	5292.5
WWG_4^-	[5990,6080]	[5999,6071]	[6008,6062]	[6017,6053]	[6026,6044]	6035
WWG_5^-	[5068.75,5136.25]	[5075.5,5125.5]	[5082.25,5122.75]	[5089,5116]	[5095.75,5109.25]	5102.5
WWG_1^+	[5807.5,5952.5]	[5822,5938]	[5836.5,5923.5]	[5851,5909]	[5865.5,5894.5]	5880
WWG_2^+	[4565,4665]	[4575,4655]	[4585,4645]	[4595,4635]	[4605,4625]	4615
WWG_3^+	[5358.75,5446.25]	[5367.5,5437.5]	[5376.25,5428.75]	[5385,5420]	[5393.75,5411.25]	5402.5
WWG_4^+	[6080,6170]	[6089,6161]	[6098,6152]	[6107,6143]	[6116,6134]	6125
WWG_5^+	[5172.5,5237.5]	[5179,5231]	[5185.5,5224.5]	[5192,5218]	[5198.5,5211.5]	5205

以此类推,就得到了一组模糊数形式的各钻井点的产出废水量下限表示。同样,也可以得到产出废水量的上限表示。根据其隶属度的不同,每天的废水产出量就可以表示为区间的形式,如表5所示。

3.2 案例分析结果

根据2.2部分建立的模型,在Lingo软件中编写求解程序,输入3.1部分的参数,可分别求得给定不确定约束满意度 α 下(本文将 α 取值确定为0.5到1之间)不同钻井点产出废水在三种不同处理或舍弃设施之间的分配方案以及经处理后回用废水的分配方案,结果如表6所示。

我们以 $\alpha=0.5$ 的情况为例对结果进行分析描述。首先对每个钻井点的三种可能的废水处理方案进行观察,可以发现都存在一个最主要的废水处理方案(图2所示),且除了钻井点3之外,其它钻井点的主要处理方案都是运往HWTP。出现这种情况的主要原因是经济因素和处理容量的共同作用。在5个钻井点中,钻井点2和5废水运往HWTP的运输和处理费用相较于其运往UID的运输和处理费用而言,具有明显经济优势,因此,均首选运往HWTP进行处理。以钻井点5为例,运往HWTP1和HWTP2的运输和处理成本之和分别为[6.4,7.8]和[5.7,7.1],而运往UID的运输和处理成本之和为[8,9.2],前者明显小于后者。而对于其他3个钻井点,即钻井点1、3和4而言,尽管从运往UID进行舍弃处理相对于运往HWTP处理具有经济性,但由于UID的处理能力有限,仅有相对经济性最佳的

表 6 不同满意度的废水分配(单位: 桶/天)

Table 6 Wastewater allocation under different degree of satisfaction (Barrel per day)

配水量	满意度 α					
	$\alpha=0.5$	$\alpha=0.6$	$\alpha=0.7$	$\alpha=0.8$	$\alpha=0.9$	$\alpha=1$
x_{11}	[4353.7,4691.4]	[4691.4, 4901.2]	[4691.4, 4901.2]	[4750, 4901.2]	[4750, 4901.2]	[4750, 4901.2]
x_{21}	[0, 2476.9]	[0, 2578.7]	[22.3, 2038.4]	[276.4, 2099.2]	[119.8, 2716.6]	[0, 2705]
x_{31}	[2202.9, 2344.5]	[2226, 2464.6]	[2144.2,2275]	[1903, 2285.1]	[2298.1, 2529.5]	[2312.4, 2549.8]
x_{41}	[0, 0]	[0, 0]	[0, 0]	[0, 0]	[0, 0]	[0, 0]
x_{51}	[0, 0]	[0, 0]	[0, 0]	[0, 0]	[0, 0]	[0, 0]
x_{12}	[0, 584.6]	[0, 0]	[0, 0]	[0, 0]	[0, 0]	[0, 0]
x_{22}	[1207.7,4092.1,]	[1096.3,4380.3]	[1687.7, 4178.3]	[1649.5, 3848.1]	[1009.3, 4071.6]	[1022.2, 4380.3]
x_{32}	[81.2, 87.7]	[0, 70.7]	[159.6, 244.2]	[259, 414.6]	[0,5.8]	[0, 0]
x_{42}	[5394.7,5405.4]	[5405.4, 5774.6]	[5405.4, 5540.5]	[5405.4, 5466.7]	[5540.5, 5555.6]	[5555.6, 5774.6]
x_{52}	[4459.5, 4605.3]	[4459.5, 4929.6]	[4459.5, 4729.7]	[4459.5, 4666.7]	[4583.3, 4729.7]	[4583.3, 4929.6]
x_{13}	[870.2 992.4]	[920.8, 1005.1]	[935.3,1017.9]	[949.8, 972]	[964.3, 984.8]	[978.8, 997.5]
x_{23}	[472.9, 724.1]	[194.7, 745.5]	[384.4 , 706.2]	[470.5, 695.3]	[413.6, 729.8]	[234.7, 740.3]
x_{33}	[2815.5, 3155.7]	[2787.4, 3140.8]	[2804, 3125]	[2768.9, 3102.5]	[2767.4, 3095.6]	[2742.7, 3090.1]
x_{43}	[584.6, 685.3]	[314.4, 593.6]	[557.5, 602.6]	[611.6, 640.3]	[470.4, 575.5]	[350.4, 479.4]
x_{53}	[567.2, 609.3]	[249.4, 616]	[455.8, 622.8]	[525.3, 629.5]	[468.8, 512.4]	[275.4, 519.2]
y_{11}	[3526.5,3800]	[3800, 3970]	[3800, 3970]	[3800, 3970]	[3800, 3970]	[3800, 3970]
y_{21}	[0,2006.3]	[0, 2088.7]	[18.1, 1651.1]	[223.9, 1679.3]	[97, 2173.3]	[0, 2164]
y_{31}	[1784.3, 1899]	[1803, 1996.3]	[1736.8, 1842.8]	[1541.4,1828.1]	[1861.5,2023.6]	[1873.1, 2039.8]
y_{41}	[0, 0]	[0, 0]	[0, 0]	[0, 0]	[0, 0]	[0, 0]
y_{51}	[0, 0]	[0, 0]	[0, 0]	[0, 0]	[0, 0]	[0, 0]
y_{12}	[0, 444.3]	[0, 0]	[0, 0]	[0, 0]	[0, 0]	[0, 0]
y_{22}	[893.7,3110]	[811.3, 3110]	[1248.9, 3091.9]	[1220.7, 2886.1]	[726.7, 3113]	[736, 3110]
y_{32}	[60.1, 66.6]	[0,50.2]	[118.1, 180.7]	[191.7, 310.9]	[0,4.2]	[0, 0]
y_{42}	[4000,4100]	[4000, 4100]	[4000, 4100]	[4000, 4100]	[4000, 4100]	[4000, 4100]
y_{52}	[3300, 3500]	[3300, 3500]	[3300, 3500]	[3300, 3500]	[3300, 3500]	[3300, 3500]

钻井点 3 可以将其作为主要处理方案，而钻井点 1 和 4 不得不选择经济性次之的 HWTP 作为主要处理方案。进一步，究竟运往 HWTP 中的哪一个进行处理则完全取决于经济性。以钻井 4 为例，HWTP1 和 HWTP2 的运输和处理成本之和分别为 [9.33,10.6] 和 [6.3,7.6]，因此废水主要运往 HWTP2。

其次，我们观察产出废水的处理方案，可以发现，既存在废水量的上下限差别很大的废水处理方案，也存在几乎没有差别方案，其中经济性的确定性程度是导致上述结果的主要原因。例如，钻井点 2 运往 HWTP2 的废水水量为 [1207.7,4092.1]，其上下限差异就很大，这是因为对于钻井点 2，从经济性的角度出发，其首选处理方式是 UID，但是由于 UID 容量有限，所以大量的废水必须通过 HWTP 进行处理，而 HWTP1

的运输与处理成本之和为 [6.1,8]，HWTP2 的运输和处理成本之和为 [6.1,7.3]，可以看出，虽然 HWTP2 总体上成本低于 HWTP1 的概率较高，但并不完全确定，仍有高于 HWTP1 的情况，受这种不确定性的影响，HWTP 无法成为绝对的最佳处理方式，因此运往 HWTP2 的废水水量差异较大。而反观钻井点 4 运往 HWTP2 的废水水量为 [5394.7,5405.4]，其上下限差异就非常小，其主要原因是对于钻井点 4 而言，HWTP1 的运输与处理成本为 [9.33,10.6]，而 HWTP2 的运输和处理成本为 [6.3,7.6]，可以看出，HWTP2 的成本无论如何变化，都绝对小于 HWTP1，这是一个确定的结果，也是运往 HWTP2 废水水量差异小的主要原因。

最后，经济目标和环境目标所处上下层的位置对于分析结果具有重要影响。从回用废水的分配方案来

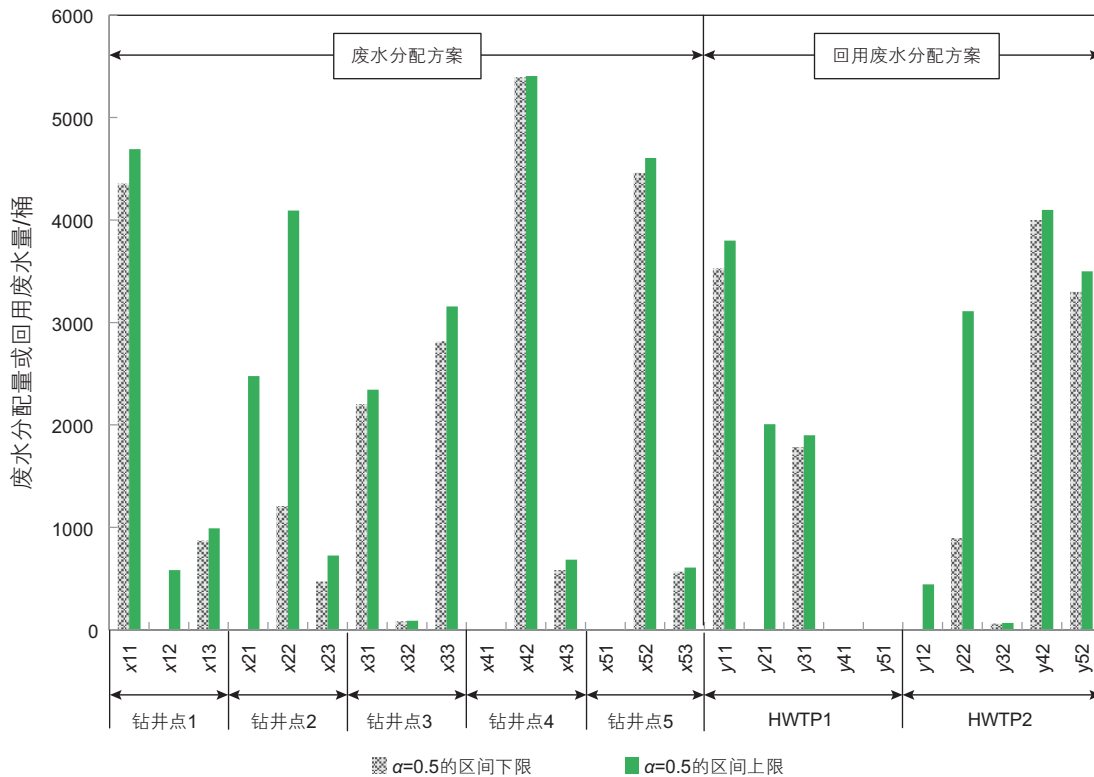


图2 不确定约束满意度 $\alpha=0.5$ 时的废水与回用水分配方案

Fig. 2 Allocation of wastewater and reused water when $\alpha=0.5$

看,其回用情况与运往该处理设施进行处理的废水量具有很强的一致性,以钻井点1和钻井点4为例,钻井点1运往HWTP1的废水量高,因此HWTP1回用于钻井点1的废水量也高,钻井点4运往HWTP2的废水量高,因此HWTP2回用于钻井点4的废水量高。而从表3可以看出,HWTP1比HWTP2的废水回用率要高,这意味着如果从环境保护的角度出发,应当将更多的废水运输到HWTP1,使其更多的予以回用。但从前文的描述来看,影响废水分配的主要原因是经济性而非HWTP的回用率(即环境保护)。这背后的一个重要原因是在本文的研究中,具有高优先级和其主导作用的上层目标函数是经济目标而非环境目标。

同时,在不同满意度 α 下废水管理系统的在整体经济成本、最终所回用的废水量以及模型最终得到的决策者对于结果的满意度 λ 也可获得,如表7所述。其中 α 的增加可以理解为每个钻井点产出废水量的不确定性在逐渐减小,当 $\alpha=1$ 时,不确定性完全消失。从表7可以看出,随着 α 的增加,系统整体的经济成本和废水回用量总体上均呈现出增加的趋势,前者的增加意味着经济效益变差,后者的增加表明环境效益变好,而系统的整体满意度 λ 也在不断降低,由[0.394, 0.449]最终下降为[0.363, 0.422]。这表明,

由于决策者对于不确定性的容忍度下降,使得经济成本(主要是废水处理费)与废水回用量之间的关系变得愈加难以协调,全局满意度 λ 作为权衡废水处理费用与废水回用量关系的重要因子也在下降。因此我们可以得出,对不确定性的合理容忍,可以有效提高全局满意度,使得双层规划模型的结果更好。

3.3 模型对比与决策方案分析

以本文所构建双层模型(B-M)中的上下层目标函数为主要目标函数,分别建立以经济效益为目标的不确定废水管理模型(M1)和以环境效益为目标的不确定废水管理模型(M2)的两个传统单目标优化模型。将其优化结果与本文的双层模型的优化结果进行对比,以 $\alpha=0.5$ 时为例,三种模型的结果比较见表8。从表8可以看出,M1由于仅从经济角度出发,所以得到了最低的经济成本、最低的废水回用量;M2由于仅从环境角度出发,所以得到最高的经济成本、最高的废水回用量;而B-M模型则兼顾了经济和环境目标,其经济成本和废水回用量均介于M1和M2之间,且两个HWTP的再利用率也最高。总体而言,M1方案适用于以经济成本为主要考量对象的情景,而M2方案适合于以环境效益为主要考量对象的情景,而当需要同

表 7 不同 α 值的上下层目标与满意度

Table 7 Objectives of upper and lower levels and their satisfaction under different values of α

	满意度 α					
	$\alpha=0.5$	$\alpha=0.6$	$\alpha=0.7$	$\alpha=0.8$	$\alpha=0.9$	$\alpha=1$
经济成本/美元	[189960.6, 250057.9]	[190365, 247906.6]	[191586.7, 248182.2]	[191949.4, 248588.1]	[191721.3, 248575.5]	[191967.1, 248853.6]
回用水量/桶	[15959.17, 16530.99]	[15996.3, 16533.24]	[16023.5, 16534.9]	[16019.73, 16532.3]	[16027.78, 16541.48]	[16039.81, 16553.1]
满意度 λ	[0.394, 0.449]	[0.384, 0.443]	[0.386, 0.437]	[0.374, 0.429]	[0.368, 0.425]	[0.363, 0.422]

表 8 $\alpha=0.5$ 时三种模型优化方案对比

Table 8 Results comparison of three optimization models

模型	经济成本/美元	回用水量/桶	HWTP1 的再利用率/%	HWTP2 的再利用率/%
B-M	[189960.6, 250057.9]	[15959.17, 16530.99]	81	74
M1	[177839.4, 235901.6]	[14959.2, 15186]	76	70
M2	[207222.7, 269335.8]	[17500, 18180]	81	70

时兼顾经济效益与环境效益时，本文所提出的 B-M 模型方案则是一种切实的选择。

4 结论

考虑页岩气开发中产出废水量、废水运输成本、处理成本等多个不确定因素，本文构建了同时考虑经济效益和环境效益的双层规划模型，进而获得所需费用小且回用废水量较大的废水分配与处理方案。为了验证模型的有效性，将模型应用于美国案例进行了验证分析，得到的结果如下：

一是，对于不同的钻井点而言，都存在一个主要的废水分配与处理方案，该方案主要受经济性、废水处理设施容量以及上下层目标函数相对位置等因素的影响。而对各类不确定性因素的考虑使得研究结果更加反映真实情况，也使得结果更加客观。

二是，在考虑不确定因素求解案例的过程中，本文发现对于页岩气生产过程中产生的废水量不确定性的合理容忍，即降低不确定约束满意度，会使得上层

经济效益目标和下层环境效益目标协调难度下降，进而提高全局满意度 λ ，使双层规划的结果更好。反之则全局满意度下降。

三是，通过与传统的单目标规划模型对比发现，本文提出的双层规划模型的经济效益和环境效益介于两个单目标规划模型结果之间，这表明双层规划模型能够实现一种在经济效益和环境效益之间的一种权衡，而这种权衡更加符合现实的情况。

综上结论在证明模型有效性的同时，也向页岩气开发相关管理方表明，合适的水资源管理确实能够对页岩气开发中的废水排放与潜在污染实现经济有效地防控。因此，我们建议中国的环境监督部门和页岩气开发商应当积极正视页岩气开发中存在的潜在污染，然后借用本文所提出的水资源管理工具，对页岩气开发进行水资源管理，实现经济效益、环境效益的双赢。当然，为了更好的支撑中国页岩气开发水资源管理实践，需要将本文的模型工具应用于中国自身案例，以便得到更具有指导性的建议，这也将成为未来研究的重点方向之一。

参考文献

[1] HOWARTH R W, INGRAFFEA A. Natural gas: Should fracking stop?[J]. Nature, 2011, 477(7364): 271-275.
 [2] VIDIC R D, BRANTLEY S L, VANDENBOSSCHE J M, et al. Impact of shale gas development on regional water quality [J]. Science, 2013, 340(6134): 1235009.
 [3] HEATH G A, O'DONOUGHUE P, ARENT D J, et al. Harmonization of initial estimates of shale gas life cycle greenhouse gas emissions for electric power generation [J]. PNAS, 2014, 111(31): 3167-3176.
 [4] GOODWIN S, CARLSON K, KNOX K, et al. Water intensity assessment of shale gas resources in the Wattenberg field in northeastern

- Colorado[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(10): 5991–5995.
- [5] HILL E, MA L. Shale gas development and drinking water quality [J]. *American Economic Review*, 2017, 107(5): 522–25.
- [6] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). *World energy outlook 2015* [R]. November, 2015.
- [7] GUERRA O J, REKLAITIS G V. Advances and challenges in water management within energy systems [J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2018, 82: 4009–4019.
- [8] 张金川, 徐波, 聂海宽, 等. 中国页岩气资源勘探潜力[J]. *天然气工业*, 2008, 28(6): 136–140. [ZHANG J C, XU B, NIE H K, et al. Exploration potential of shale gas resources in China[J]. *Natural Gas Industry*, 2008, 28(6): 136–140.]
- [9] 黄维安, 邱正松, 岳星辰, 等. 页岩气储层损害机制及保护水基钻井液技术[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2014, 38(3): 99–105. [HUANG W A, QIU Z S, YUE X C, et al. Damage mechanism and water-based drilling fluid protection technology for shale gas reservoir[J]. *Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science)*, 2014, 38(3): 99–105.]
- [10] HAO F, ZOU H, LU Y. Mechanisms of shale gas storage: Implications for shale gas exploration in China [J]. *AAPG bulletin*, 2013, 97(8): 1325–1346.
- [11] BAI B, ELGMATI M, ZHANG H, et al. Rock characterization of Fayetteville shale gas plays [J]. *Fuel*, 2013, 105: 645–652.
- [12] WANG Q, LI R. Natural gas from shale formation: A research profile [J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2016, 57: 1–6.
- [13] REINS L. The shale gas extraction process and its impacts on water resources [J]. *Review of European Community & International Environmental Law*, 2012, 20(3): 300–312.
- [14] MAUTER M S, ALVAREZ P J J, BURTON A, et al. Regional variation in water-related impacts of shale gas development and implications for emerging international plays [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(15): 8298–8306.
- [15] ROZELL D J, REAVEN S J. Water pollution risk associated with natural gas extraction from the Marcellus shale [J]. *Risk Analysis*, 2012, 32(8): 1382–1393.
- [16] 冯连勇, 邢彦姣, 王建良, 等. 美国页岩气开发中的环境与监管问题及其启示 [J]. *天然气工业*, 2012, 32(9): 102–105. [FENG L Y, XING Y J, WANG J L, et al. Shale gas development in the terms of environmental and regulatory issues[J]. *Natural Gas Industry*, 2012, 32(9): 102–105.]
- [17] NICOT J P, SCANLON B R. Water use for shale-gas production in Texas, US [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(6): 3580–3586.
- [18] JIANG M, HENDRICKSON C T, VAN BRIESEN J M. Life cycle water consumption and wastewater generation impacts of a Marcellus shale gas well [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(3): 1911–1920.
- [19] KONDASH A J, ALBRIGHT E, VENGOSH A. Quantity of flowback and produced waters from unconventional oil and gas exploration [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 574: 314–321.
- [20] WANG J, LIU M, BENTLEY Y, et al. Water use for shale gas extraction in the Sichuan Basin, China [J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 226: 13–21.
- [21] YANG L, GROSSMANN I E, MANNO J. Optimization models for shale gas water management [J]. *AIChE Journal*, 2014, 60(10): 3490–3501.
- [22] LIRA-BARRAGAN L F, PONCE-ORTEGA J M, SERNA-GONZALEZ M, et al. Optimal reuse of flowback wastewater in hydraulic fracturing including seasonal and environmental constraints [J]. *AIChE Journal*, 2016, 62(5): 1634–1645.
- [23] LI H, AN H, FANG W, et al. A theoretical cost optimization model of reused flowback distribution network of regional shale gas development [J]. *Energy Policy*, 2017, 100: 359–364.
- [24] GAO J, YOU F. MILFP model and algorithms for network design and long-term planning of water management system for shale gas production [J]. *Chemical Engineering Transactions*, 2015, 43: 1423–1428.
- [25] GAO J, YOU F. Optimal design and operations of supply chain networks for water management in shale gas production: MILFP model and algorithms for the water-energy nexus [J]. *AIChE Journal*, 2015, 61(4): 1184–1208.
- [26] ZHANG X, SUN A Y, DUNCAN I J, et al. Two-stage fracturing wastewater management in shale gas development [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2017, 56(6): 1570–1579
- [27] GUERRA O J, CALDERON A J, PAPAGEORGIU L G, et al. An optimization framework for the integration of water management and shale gas supply chain design [J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2016, 92: 230–255.
- [28] LIRA-BARRAGAN L F, PONCE-ORTEGA J M, GUILLEN-GOSALBEZ G, et al. Optimal water management under uncertainty for shale gas production [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2016, 55(5): 1322–1335.
- [29] ZHANG X, SUN A Y, DUNCAN I J. Shale gas wastewater management under uncertainty [J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, 165: 188–198.
- [30] 王建良, 冯连勇. 页岩气开发水资源影响及温室气体排放研究评述[J]. *中国矿业*, 2016, 25(4): 61–67. [WANG J L, FENG L Y. A review of the impacts of shale gas development on water resources and GHG emissions[J]. *China Mining Magazine*, 2016, 25(4): 61–67.]

- [31] 陈义忠, 卢宏伟, 李晶, 等. 基于不确定性的水资源配置双层模型及其实证研究[J]. 环境科学学报, 2016, 36(6): 2252–2261. [CHEN Y Z, LU H W, LI J, et al. Empirical research on bi-level allocation model of water resources under uncertainty [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, 36(6): 2252–2261.]
- [32] STACKELBERG H. The theory of the market economy [M]. London: Oxford University Press, 1952.
- [33] BRACKEN J, MCGILL J. Mathematical programs with optimization problems in the constraints [J]. Journal of Operational Research, 1973, 21(1): 37–44.
- [34] SHIH H S, LAI Y J, LEE E S. Fuzzy approach for multi-level programming problems[J]. Computers & Operations Research, 1996, 23(1): 73–91.
- [35] SINHA S. Fuzzy programming approach to multi-level programming problems[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2003, 136(2): 189–202.
- [36] CALVETE H I, CARMEN G. On linear bilevel problems with multiple objectives at the lower level [J]. Omega, 2011, 39(1): 33–40.
- [37] JIMENEZ M, ARENAS M, BILBAO A, et al. Linear programming with fuzzy parameters: an interactive method resolution [J]. European Journal of Operational Research, 2007, 177(3): 1599–1609.

(编辑 付娟娟)