

# 煤层气井抽排水处理站选址与运输的集成问题研究

吕博慧<sup>1</sup>, 严 政<sup>2</sup>

(1. 中央电视台财经频道, 北京 100020; 2. 长江大学 信息与数学学院, 湖北 荆州 434023)

**摘 要:**从煤层气井抽排水回收利用系统的整个系统出发,以煤层气井抽排水回水利用系统总成本最小为目标,考虑处理站选址数量,处理站处理能力和供需平衡等条件约束,建立煤层气井抽排水处理站选址与运输集成模型。同时,以晋城市某煤层气公司数据作为实际算例,采用 GAMS 软件对该集成模型进行求解,得到煤层气井抽排水处理站选址及运输问题的最优解以及总的系统最小成本,表明了建议模型的有效性和可行性。

**关键词:**煤层气井抽排水;处理站选址;运输问题

**中图分类号:**TD742 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-4824(2020)06-0084-05

煤层气指自生自储于煤层中的气体,其成分以甲烷为主,故又称煤层甲烷(coalbed methane, CBM)。我国是一个煤炭资源较丰富的大国,煤炭资源量位于世界前列,煤层中所伴生、吸附的煤层气资源量十分丰富。随着我国一次能源结构优化政策的推行,天然气等清洁能源在国民经济建设中的地位逐步提升,也使国内天然气开采行业蓬勃发展。一方面,煤层气开采为当地经济发展注入了增长动力,另一方面,开采过程中伴随的环境污染问题也日渐突出,其中,又以煤层气井抽排水污染最值得关注。通过对煤层气井抽排水进行一定的处理,使其达到耕地灌溉及生态用水的要求,不仅节约了灌溉用水,还解决了煤层气井排水对周边环境造成污染的问题,对实现生态环境保护具有重要意义<sup>[1]</sup>。

再生水主要指污水经过处理之后,达到一定的水质标准,可在一定范围内重复使用的非饮用水。根据再生水的使用类别,再生水可以分成五大类,即工业用水、农业用水、城市用水、景观用水和地下水回补用水<sup>[2]</sup>。针对再生水的利用,学者们的研究方向主要集中在两个方面:一方面是从处理站规划者的视角出发,通过对处理站的选址

问题进行优化,以期实现处理站的合理布局。张丽丽<sup>[3]</sup>以某市污水处理厂布局规划为例,在分析影响污水厂布局规划主要影响因素的基础上,根据布局规划现存问题,从费用函数的角度出发,提出一种优化方法,并基于污水集中与分散式建设的差异性,说明优化方法的可行性;周洁和朱丽<sup>[4]</sup>以包头市为例,通过计算临界距离的方式,进行了污水再生回用设施布局,即对各处理站的服务范围进行优化。另一方面是从再生水处理的整个流程出发,通过对再生水运输方式、处理站选址等问题的优化,以期达成一个系统级的目标,例如整体成本最小化或者回水利用率最大化。李家国<sup>[5]</sup>分别以整体回用成本最小,再生水输送路径最短,各用水地获取再生水水量最多为优化指标,从成本、距离和获取量的宏观角度建立起再生水利用优化模型,并且考虑了在再生水供给不足的条件下,实现优先供给策略;吕祥瑞<sup>[6]</sup>在分析再生水系统特点之后,以供水成本最小和尽可能保证用水需求为目标,建立了城市再生水系统供水配置的多目标非线性模型,使用了带精英策略的非支配排序遗传算法进行求解,并利用临界距离和再生水管网利用效率对模型进行校验;万金玲<sup>[7]</sup>等通过对

收稿日期:2020-09-15

基金项目:湖北省教育厅重点项目(D20191303)

作者简介:吕博慧(1992-),女,湖北荆州人,中央电视台财经频道助理研究员,硕士。

严 政(1982-),男,湖北荆州人,长江大学信息与数学学院副教授,博士。

污水收集、处理以及再生水利用的过程进行分析,构建了再生水系统各部分的运行费用方程,建立了以再生水系统费用最小化为目标的数学模型,并通过混合遗传算法求解这一模型,得出城市处理站最优的服务面积和再生水的单位成本,最后利用这一方法处理广州市再生水规划问题;马明敏<sup>[8]</sup>等在投资利益最大化的目标下,考虑了处理站布局及规模对污水再生再利用率、厂站的投资建设及后期运行管理费用的影响,寻找在污水再生回用率相同下,费用最低的处理站规模和位置的最佳组合。

本文针对整个煤层气井抽排水回收利用问题,研究再生水运输再生水厂选址以及煤层气井抽排水的集成模型,在模型中以整个煤层气井抽排水回收利用成本最低作为目标函数并考虑处理站处理能力、供需水平衡等约束条件。

## 1 问题描述

煤层气井抽排水的回收利用如图 1 所示,主要处理流程分为三个部分:煤层气井抽排水的收集、处理和再生水的运输分配。煤层气井抽排水先通过收集运输的方式,转移至各个处理站。处理站根据用户使用点对于不同类型再生水的需求,将煤层气井抽排水处理成不同类型再生水,并统一调配至各个用户使用点。



图 1 煤层气井抽排水的回收利用

煤层气井在地理空间上分布于不同位置,所以如何将煤层气井抽排水通过车辆运输的方式,统一收集到处理站是我们需要首先考虑的问题。在模型中,本文假设处理站的选址存在确定数目的备用方案。并且对于煤层气井抽排水的单位距离运输成本,设定其包括了人员成本、车队运输费用和运营费用。因此,在煤层气井抽排水收集阶段,我们既需要确定处理站的选址,又要综合考虑各个煤层气井与处理站之间的运输成本,得到煤层气井抽排水到处理站的运输量,从而使得整体成本最低。

在煤层气井抽排水处理阶段,各个煤层气井抽排水处理站在自身处理能力的限制下,需要生产不同类型的再生水以满足用户需求。因此在抽

排水处理阶段,煤层气井抽排水处理站需要根据用户使用点对于不同类型再生水的需求,使用不同的处理工艺和标准,生产不同类型(标准)的再生水。其中,处理站的成本除了本身基础设施建设所需的固定投入外,还有一部分的运营成本,主要包括人员费用、药剂费用、设施折旧费用。

在完成对于煤层气井抽排水的净化处理之后,我们需要根据用户使用点的不同需求对不同类型再生水进行合理的配置。这时,我们需要处理如何进行再生水至对应使用点的调配问题,从而使得整个再生水的运输成本在满足用户用水需求的前提下最低。与煤层气井抽排水收集阶段相同,再生水的输送方式也考虑采用车辆运输的方式。另外本文假设各个用户使用点对于各类再生水的需求量之和小于等于各煤层气井抽排水的量之和。

为了综合长远效益和短期效果,本文考虑一年期内的系统运行情况,所有的建设成本(处理站建设)和设备成本(包括污水净化设备、运输车辆等)都根据其使用年限,折算为单位周期成本(年成本)。综上所述,模型从整个煤层气井抽排水回收利用系统的视角出发,考虑了再生水厂选址、处理站处理能力、供需水平衡等约束条件,并以整个煤层气井抽排水回收利用成本最低作为目标函数。该模型实质上是一个综合考虑处理站选址问题的运输问题集成模型。

## 2 数学模型的建立

### 2.1 符号的说明

- 记  $C_k$ :第  $k$  个处理站一年的建设成本;
- $E_k$ :第  $k$  个煤层气井抽排水处理站的处理能力;
- $C_{ik}$ :将第  $i$  口煤层气井的污水运至第  $k$  个煤层气井抽排水处理站的单位距离的运输成本;
- $C_n$ :将污水处理至  $n$  类再生水的单位成本;
- $C_{kj}$ :将第  $k$  个煤层气井抽排水处理站的再生水运至  $j$  个用户使用点的单位运输成本;
- $L_{ik}$ :第  $i$  口煤层气井到第  $k$  个煤层气井抽排水处理站的距离;
- $L_{kj}$ :第  $k$  个煤层气井抽排水处理站到第  $j$  个用户使用点的距离;
- $R_j^n$ :第  $j$  个用户需求点对于  $n$  类再生水的需求量;
- $N$ :处理站预选地址的个数。

### 2.2 决策变量的设定

- $x_{ik}$ :从第  $i$  口煤层气井运至第  $k$  个煤层气井

抽排水处理站的污水量;

$x_{kj}^n$ : 从第  $k$  个煤层气井抽排水处理站运至  $j$  地的  $n$  类再生水的数量;

$T_k$ :  $T_k = 1$  表示建设第  $k$  个煤层气井抽排水处理站, 反之, 则不建设第  $k$  个煤层气井抽排水处理站。因此,  $T_k$  为 0-1 变量。

### 2.3 目标函数的构建

考虑到目标函数中包含了处理站折算为一年周期的建设成本、污水的运输成本、污水的处理成本和再生水的运输成本, 其中运输成本包含了人员成本、运输设备建设成本以及运营成本, 污水处理成本包括了设备运营成本、药剂成本以及人员成本。于是, 可以构造如下的目标函数:

$$\min \left( \sum_k T_k C_k + \sum_i \sum_k C_{ik} x_{ik} L_{ik} + \sum_n C_n \left( \sum_k \sum_j x_{kj}^n \right) + \sum_k \sum_j \sum_n C_{kj} x_{kj}^n L_{kj} \right)$$

### 2.4 约束条件的设置

约束条件主要考虑三个方面: 一是考虑供需平衡, 即煤层气井抽排水之和与用户用水需求总量之间的平衡; 二是考虑处理站的处理能力约束, 即再生水的需求量之和小于等于处理站的处理能力之和; 三是考虑决策变量约束, 即运输量非负和选址变量为 0-1 变量。

#### a) 供需水平衡

$$\sum_k x_{ik} T_k = q_i, \forall i \quad (1)$$

$$\sum_i x_{ik} = \sum_j \sum_n x_{kj}^n, \forall k \quad (2)$$

$$\sum_k x_{kj}^n \leq R_j^n, \forall j, n \quad (3)$$

其中: 公式(1)表示煤层气井抽排水的产出量之和等于运送至不同煤层气井抽排水处理站的运输量之和, 公式(2)和公式(3)分别表示再生水一定被使用, 且运送至居民需求点的各类型再生水的量等于该点的需求量, 同时这两个约束条件保证了生成的煤层气井抽排水的量等于最后被使用的再生水量, 达到供需平衡。

#### b) 处理能力约束

$$\sum_k T_k \leq N \quad (4)$$

$$\sum_i x_{ik} \leq E_k T_k, \forall k \quad (5)$$

其中, 公式(4)表示建设煤层气井抽排水处理站的数量应该小于等于处理站预选厂址的总数; 公式(5)表示运至煤层气井抽排水处理站的煤层气井

抽排水量之和不能超过该再生水场的处理能力。

#### c) 决策变量约束

$$x_{ik} \geq 0, \forall i, k \quad (6)$$

$$x_{kj}^n \geq 0, \forall k, j, n \quad (7)$$

$$T_k = \begin{cases} 0, & \text{当不建设该处理站时} \\ 1, & \text{当建设该处理站时} \end{cases}, \forall k \quad (8)$$

其中, 公式(6)表示从第  $i$  口煤层气井运至第  $k$  个处理站的污水量应大于等于 0; 公式(7)从第  $k$  个煤层气井抽排水处理站运至  $j$  地的  $n$  类再生水的数量应大于等于 0; 公式(8)表示  $T_k$  是 0-1 变量, 当选择建设第  $k$  个煤层气井抽排水处理站时, 该变量取“1”, 当选择不建设第  $k$  个煤层气井抽排水处理站时, 该变量取“0”。

## 3 算例分析

晋城市是全国范围内煤层气储量最为丰富的地区之一, 20 世纪 90 年代初有关部门在此地区进行了煤层气开发勘探试验工作, 证实了该区块煤层气储量丰富, 具有良好的开发潜力特别是近年来随着煤层气开发技术和工艺的日益成熟, 该地区煤层气开发成为全省乃至全国最活跃、热点地区之一, 现阶段该区域已形成一定规模的煤层气开采产业链。本文以某煤层气井公司为例来研究煤层气井抽排水回水利用算例分析, 收集了该公司 48 口井的相关数据, 如表 1 所示。

考虑在煤层气井抽排水蓄水池蓄满后, 通过车辆运输方式将煤层气井抽排水运送到处理站进行处理, 经过一系列处理工序的煤层气井抽排水生成再生水, 根据达标情况, 分为生活用水、市政用水、工业用水和农业用水, 并且考虑运输成本最小化, 采用车辆运输的方式将再生水运送至周边村镇使用, 实现水资源的循环利用。所有需求点的相关信息如表 2 所示。

这里假定煤层气井抽排水的运输成本为 3 元/ $\text{m}^3 \cdot \text{km}$ , 生活用水的运输成本为 2 元/ $\text{m}^3 \cdot \text{km}$ , 市政用水、工业用水和农业用水的运输成本为 1.5 元/ $\text{m}^3 \cdot \text{km}$ 。煤层气井抽排水的运输距离  $L_{ik} = 2 * \arcsin$

$$\sqrt{\sin^2 \frac{x_k - x_i}{2} + \cos(x_i) + \cos(y_i) * \sin^2 \frac{y_k - y_i}{2}} * 6.3781,$$

式中: 第  $i$  个气井的坐标为  $(x_i, y_i)$ , 拟建设的煤层气井抽排水处理站的坐标为  $(x_k, y_k)$ 。再生水运

$$\text{距离 } L_{kj} = 2\arcsin$$

$$\sqrt{\sin^2 \frac{x_j - x_k}{2} + \cos(x_k) + \cos(y_k) * \sin^2 \frac{y_j - y_k}{2}}$$

\* 6.3781, 其中拟建设的煤层气井抽排水处理站的坐标为  $(x_k, y_k)$ , 第  $j$  个再生水需求点的坐标分别为  $(x_j, y_j)$ 。

假定拟建设的煤层气井抽排水处理站都是在已有的煤层气处, 根据年产水量, 本文考虑选取煤层气井抽排水年产水量较大的煤层气井最为候选

的煤层气井抽排水处理站点。候选的煤层气井抽排水处理站及其相关参数如表 3 所示。依据煤层气井抽排水的水量以及各个候选煤层气井抽排水处理站的处理能力, 假设煤层气井抽排水处理站至多建设 3 个。

表 1 某公司煤层气井相关数据

| 编号  | 纬度      | 经度       | 年产水( $\text{m}^3$ ) | 编号  | 纬度      | 经度       | 年产水( $\text{m}^3$ ) |
|-----|---------|----------|---------------------|-----|---------|----------|---------------------|
| #01 | 35.6417 | 112.4909 | 689.64              | #25 | 35.5894 | 112.4088 | 2095.88             |
| #02 | 35.6421 | 112.4891 | 86.94               | #26 | 35.5894 | 112.4087 | 909.4               |
| #03 | 35.6232 | 112.4641 | 2018.64             | #27 | 35.5893 | 112.4087 | 3386.51             |
| #04 | 35.6518 | 112.4886 | 880.43              | #28 | 35.5877 | 112.4522 | 12418.88            |
| #05 | 35.6480 | 112.4791 | 601.87              | #29 | 35.5877 | 112.4523 | 452.4               |
| #06 | 35.6197 | 112.4544 | 1627.16             | #30 | 35.5869 | 112.4375 | 1542.93             |
| #07 | 35.6201 | 112.4523 | 6244.94             | #31 | 35.5868 | 112.4375 | 445.58              |
| #08 | 35.6212 | 112.4540 | 2021.49             | #32 | 35.6330 | 112.4569 | 325.22              |
| #09 | 35.6320 | 112.4942 | 186.54              | #33 | 35.6327 | 112.4568 | 1291.66             |
| #10 | 35.6321 | 112.4942 | 546.12              | #34 | 35.6301 | 112.4556 | 795.17              |
| #11 | 35.6312 | 112.4933 | 116.09              | #35 | 35.6149 | 112.4490 | 374.51              |
| #12 | 35.6283 | 112.4631 | 1383.25             | #36 | 35.6139 | 112.4509 | 660.09              |
| #13 | 35.6282 | 112.4632 | 833.2               | #37 | 35.6158 | 112.4560 | 4200.59             |
| #14 | 35.6280 | 112.4629 | 719.68              | #38 | 35.6157 | 112.4562 | 1852.99             |
| #15 | 35.6282 | 112.4633 | 950.55              | #39 | 35.6234 | 112.5813 | 2912.7              |
| #16 | 35.6339 | 112.5823 | 485.01              | #40 | 35.6146 | 112.4498 | 1064.05             |
| #17 | 35.6339 | 112.5823 | 3321.71             | #41 | 35.6146 | 112.4499 | 330.59              |
| #18 | 35.6437 | 112.5792 | 508.35              | #42 | 35.6147 | 112.4499 | 927.26              |
| #19 | 35.6437 | 112.5793 | 4668.49             | #43 | 35.6147 | 112.4500 | 797.57              |
| #20 | 35.6432 | 112.5923 | 812.54              | #44 | 35.6147 | 112.4484 | 1449.21             |
| #21 | 35.6590 | 112.5907 | 2977.39             | #45 | 35.6147 | 112.4482 | 1998.15             |
| #22 | 35.6590 | 112.5907 | 3621.42             | #46 | 35.6147 | 112.4481 | 218.45              |
| #23 | 35.6590 | 112.5907 | 3779.5              | #47 | 35.6466 | 112.5909 | 1276.9              |
| #24 | 35.6597 | 112.5929 | 882.44              | #48 | 35.6464 | 112.5909 | 738.17              |

表 2 需求点位置及需水量信息

| 需求点   | 生活用水量 | 市政用水量 | 工业用水量 | 农业用水量 |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| 需求点 1 | 8000  | 9600  | 12000 | 6400  |
| 需求点 2 | 14000 | 6000  | 7800  | 14200 |

表 3 拟建设的煤层气处理站的相关参数

| 拟建设处理站 | 井号  | 坐标位置    |          | 处理能力  | 建设成本  | 处理成本  |
|--------|-----|---------|----------|-------|-------|-------|
|        |     | 纬度      | 经度       |       |       |       |
| 站 #1   | #7  | 35.6201 | 112.4523 | 32000 | 719.6 | 2.553 |
| 站 #2   | #19 | 35.6437 | 112.5793 | 21000 | 449.6 | 2.553 |
| 站 #3   | #23 | 35.6590 | 112.5907 | 25000 | 519.6 | 2.553 |
| 站 #4   | #28 | 35.5877 | 112.4522 | 36000 | 639.2 | 2.553 |
| 站 #5   | #37 | 35.6158 | 112.4560 | 21000 | 469.6 | 2.553 |

其中煤层气井处理站建设成本包括厂房建设费用和设备购置费用, 处理成本包括药剂费用, 处理材料及人工费用, 电费, 具体成本核算如表 4 所示。

表 4 处理成本参数

|      | 建设成本     |                | 处理成本(元/m <sup>3</sup> ) |      |       |       |
|------|----------|----------------|-------------------------|------|-------|-------|
|      | 厂房建设(万元) | 设备购置<br>单价(万元) | 数量                      | 药剂   | 材料及人工 | 电费    |
| 站 #1 | 700      | 19.6           | 1                       | 0.21 | 0.84  | 1.503 |
| 站 #2 | 430      | 19.6           | 1                       | 0.21 | 0.84  | 1.503 |
| 站 #3 | 500      | 19.6           | 1                       | 0.21 | 0.84  | 1.503 |
| 站 #4 | 600      | 19.6           | 2                       | 0.21 | 0.84  | 1.503 |
| 站 #5 | 450      | 19.6           | 1                       | 0.21 | 0.84  | 1.503 |

根据模型,选择采用 GAMS 软件中的 CPLEX 求解器对该问题进行求解,得到如下结果。

1)处理站选择:备选的煤层气井抽排水处理站共有五个,根据结果可知,选择的处理站为站 #1,站 #2,站 #4。

2)煤层气井抽排水运输:煤层气井 #1, #3, #4, #6, #7, #8, #12, #13, #14, #15, #20, #29, #33-34, #37, #38, #40, #43, #44, #45 运送至煤层气井抽排水处理站 #1;煤层气井 #17, #19, #21, #22, #23 以及 #39 中的 2631.490 m<sup>3</sup> 抽排水运送至煤层气井抽排水处理站 #2;煤层气井 #2, #5, #9, #10, #11, #16, #18, #20, #24, #25, #26, #27, #28, #30, #31, #32, #35, #36, #41, #42, #46, #47, #48 以及 #39 中的 281.210 m<sup>3</sup> 抽排水运送至煤层气井抽排水处理站 #4。

3)再生水运输:煤层气井抽排水处理站 #1 向需求点 1 运送生活用水 8000 m<sup>3</sup>,市政用水 8063.67 m<sup>3</sup>,工业用水 12000 m<sup>3</sup>;煤层气井抽排水处理站 #2 向需求点 2 运送生活用水 14000 m<sup>3</sup>,农业用水 7000 m<sup>3</sup>;煤层气井抽排水处理站 #4 向需求点 1 运送市政用水 1536.33 m<sup>3</sup>,农业用水 6400 m<sup>3</sup>,向需求点 2 运送市政用水 6000 m<sup>3</sup>,工业用水 7800 m<sup>3</sup>,农业用水 7200 m<sup>3</sup>。

求得最小系统总成本为 1945.18 万元。

## 4 结论与展望

本文从总系统成本最小角度出发,建立煤层气井抽排水选址运输模型,综合考虑了煤层气井

抽排水处理站选址,煤层气井抽排水运输和再生水回用运输的路径选择,模型满足煤层气井抽排水选址建设数量约束,煤层气井抽排水与再生水需求总量平衡等条件。最后,以晋城市某煤层气公司数据为例,运用 GAMS 软件对该考虑选址的运输问题集成模型进行求解,得到了煤层气井抽排水处理站选址情况以及最优的运输路径。后续研究考虑结合煤层气井抽排水产水规律,从经济成本角度采用车辆和管道协同运输方式,更切合实际地解决煤层气井抽排水处理站点选址与运输集成问题。

### [参 考 文 献]

- [1] 管桂玲,卢发周,果利娟,等.基于组合预测法的城市需水预测[J].江苏水利,2019(3):6-8.
- [2] 宋杨.西安市再生水推广利用体系研究[D].西安:西安理工大学,2009.
- [3] 张丽丽.城市污水处理厂集中式和分散式建设的对比研究[D].合肥:合肥工业大学,2009.
- [4] 周洁,朱丽.城市污水再生回用优化研究——以包头市为例[J].阴山学刊(自然科学版),2016,30(3):78-80.
- [5] 李家国.再生水回用优化决策模型的建立及系统的实现[D].北京:首都师范大学,2007.
- [6] 吕祥瑞.城市再生水系统优化配置的研究[D].天津:天津大学,2010.
- [7] 万金玲.辽宁省供需双控条件下的经济适应性需水预测[J].黑龙江水利科技,2019,47(4):16-19.
- [8] 马明敏,马之光,奚晓伟,等.再生水厂布局优化的经济评估数学模型[J].广东化工,2018,45(24):17-19.

(责任编辑:熊文涛)