基于非支配多目标优化方法的铀尾矿砂覆盖材料优选

邓年彪，丁德馨

（南华大学 资源环境与安全工程学院，湖南 衡阳 421001）

摘要：铀尾矿砂覆盖材料优化选择对铀矿山尾矿砂治理有着重要意义。通过构建铀尾矿砂覆盖层氡浓度分布模型，采用单层和三层覆盖层材料，以氡析出率和综合成本为决策目标构建了多目标决策模型，基于多目标非支配排序方法，寻找可行方案的最优解。对于铀尾矿砂，若采用单层覆盖材料，只有黏土、水泥砂浆和沥青 3 种材料能够在合理厚度范围内满足氡析出率国标限值要求；与单层覆盖材料相比，三层覆盖层材料外的氡析出率满足国标限值要求，且综合成本降低了 75.9%。

关键词：铀尾矿砂；覆盖材料；非支配多目标优化方法；氡析出率

中图分类号：TL77 **文献标志码**：A **文章编号**：1000-8063(2023)04-0047-06

DOI：10.13426/j.cnki.yky.2023.06.05

铀尾矿砂是铀矿石经过提取铀后产生的废弃物，其中富集了放射性元素铀和放射性衰变产物，可能对土壤、水体和空气造成放射性污染，需要对铀尾矿砂进行治理。铀尾矿砂的有效治理能够减少放射性污染对环境的影响，确保公共安全，实现水资源的可持续利用，提高矿山的效益和竞争力[1-2]。铀尾矿砂放射性核素的扩散，主要以氡析出为主，而减少氡析出量的最合理方法是覆盖[3]。覆盖材料的选择受环境因素和综合成本等影响[4]，是个多目标优化问题。如何通过合理设置覆盖层厚度筛选材料，达到对放射性污染物的最优控制目标，是覆盖降氡的主要研究课题之一。

目前国内外已在覆盖材料选择方面进行了相关研究[5-9]，但对多层覆盖层进行多目标优化的研究较少。多目标非支配排序方法可同时考虑多个目标函数，将多个目标函数的优化问题转化为非支配排序问题，通过确定非支配解集来找到最佳解决方案。该方法已被广泛应用于其他领域[10]，可将其用于优化选择铀尾矿砂覆盖材料。

笔者通过构建铀尾矿砂覆盖层氡含量分布模型，选择单层和三层覆盖层材料进行研究，以氡析出率和综合价值为研究对象，建立多目标研究模型，采用多目标非支配排序技术，寻求最佳可行方案。

1 覆盖材料氡浓度分布模型构建与优化控制

1.1 有限厚铀尾矿砂氡迁移模型

铀尾矿砂多层氡迁移数学模型见图 1。图中：h_n为第 n 层覆盖物质的厚度，m；C_n为第 n 层覆盖材料处的氡活度浓度，Bq/m^3；D_n为第 n 层覆盖材料中氡的扩散系数，m^2/s。

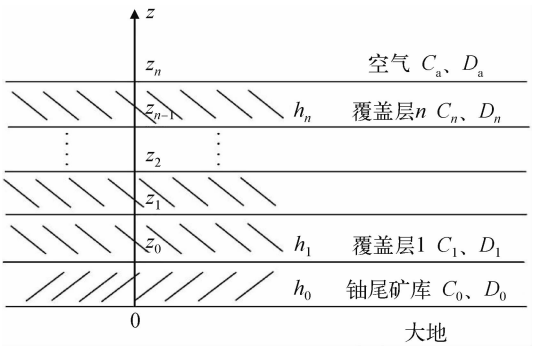


图 1 多层覆盖铀尾矿砂几何模型示意图

Fig. 1 Simplified geometric model of multi-layered covered uranium tailing sands

多层覆盖模型铀尾矿砂和各覆盖材料中氡浓度分布表示为[11]22

$$D_i \frac{d^2C_i}{dz^2} - v_i \frac{dC_i}{dz} - \lambda C_i + Q_i = 0,\ i = 0,1,2,\cdots,n, \quad (1)$$

收稿日期：2023-06-16

第一作者简介：邓年彪(1991—)，男，湖南衡阳人，博士，主要从事铀矿山系统工程研究。

通信作者简介：丁德馨(1958—)，男，湖南常德人，博士，教授，博士生导师，主要从事铀矿采冶及其污染治理技术研究。

式中：D_i为铀尾矿砂或某层覆盖材料中氡的扩散系数，m^2/s；C_i为铀尾矿砂或某层覆盖材料氡活度浓度，Bq/m^3；v_i为铀尾矿砂或某层覆盖材料中气体渗流速度，m/s；Q_i为铀尾矿砂或某层覆盖材料中产生可移动氡的能力，Bq/(m·s)。

如果地表本身的氡含量可忽略不计，则在$z=0$时，氡含量为0，此时可得出边界条件：

$$C_0=0, z=0。 \tag{2}$$

覆盖材料与相邻下层覆盖材料边界处的氡浓度和氡通量相等，由此可得2个边界条件：

$$\frac{C_{i-1}}{\eta_{i-1}}=\frac{C_i}{\eta_i},\ i=0,1,2,\cdots,n, \tag{3}$$

$$D_{i-1}\frac{\mathrm{d}C_{i-1}}{\mathrm{d}z}-v_{i-1}C_{i-1}=D_i\frac{\mathrm{d}C_i}{\mathrm{d}z}-v_iC_i,\ i=0,1,2,\cdots,n。 \tag{4}$$

式中：η_i为铀尾矿砂或某层覆盖材料中氡的孔隙度。

基于稳定状态下的覆盖材料中氡含量分布通解，根据对流弥散方程、Fick定律、分子扩散和对流迁移等理论，可得出最上一层覆盖材料的表面氡析出率(J)的计算公式

$$J=D_i(a_{i1}c_{i1}+a_{i2}c_{i2})-v_i\eta_iC_a, \tag{5}$$

式中：c_{i1}、c_{i2}为相关系数；a_{i1}、a_{i2}分别为氡在覆盖材料中扩散系数、覆盖材料孔隙度和氡在覆盖材料中渗流速度的函数，表示为[11]23

$$a_{i1},a_{i2}=f(D_i,\eta_i,v_i,h_i),\ i=0,1,2,\cdots,n。 \tag{6}$$

1.2 基于非支配多目标方法的多目标优化控制

1.2.1 多目标优化模型

覆盖材料的优化选择既要达到对环境危害最小，又要讲究经济性，它是考虑环境特性与成本因素的综合决策过程。覆盖材料优化研究的主要目标有2个：覆盖材料的综合成本(E)和覆盖材料外层的氡析出率(J)。

覆盖材料的综合成本包括建筑材料费、机械设备成本费和管理费等，构建的覆盖材料综合成本目标为

$$\min E=x\times S\times p, \tag{7}$$

式中：x—采用覆盖材料的厚度，m；S—铀尾矿砂的面积，m^2；p—材料综合单价，元/m^3。

覆盖材料最外层的表面氡析出率越低，说明覆盖材料的表面降氡效果越好，对周围环境的负面影响也越小。因此用氡析出速率(J)定量描述对环境的影响性能，min$J$ 即为 J 的优化目标。

综上，可以构建覆盖材料优化问题的多目标选化模型：

$$\min(E,\ J),$$

$$\text{约束条件：}x\leqslant x_0, p\leqslant p_D,$$

式中：x_0—材料厚度上限；p_D—综合单价的设计要求。

1.2.2 模型求解

在非归一化遗传算法优化过程中，采用非支配排序算法评估铀尾矿砂覆盖材料方案的适应性。根据方案所选择的材料性能相对优劣关系，对铀尾矿砂覆盖材料项目进行非支配排序。由于整个流程中没有介入人的主观因素，从而提高了最终铀尾矿砂覆盖材料方案的性能优势[12]。基于非支配排序的铀尾矿砂覆盖材料多目标优化方法流程见图2[13]，其中 P_t，Q_t分别为初始的父代种群和子代种群。

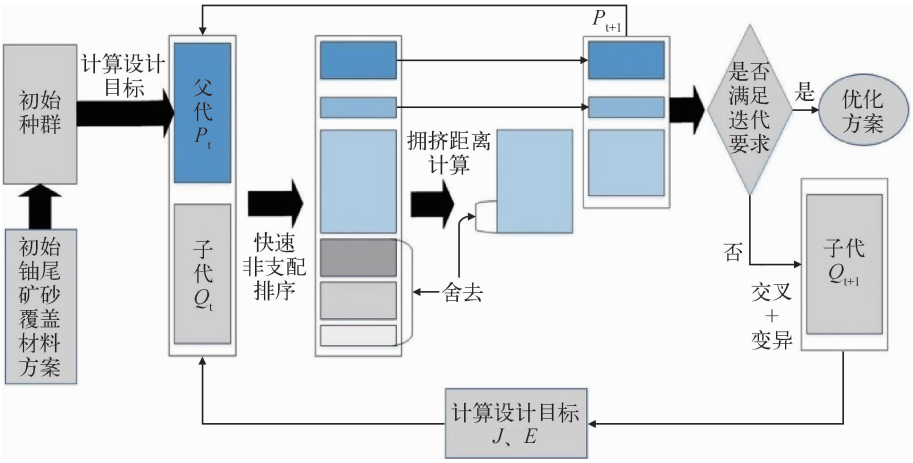


图2 基于非支配排序的铀尾矿砂覆盖材料多目标优化方法计算流程

Fig. 2 Calculation flow of multi-objective optimization method for uranium tailing sand cover materials based on non-dominated ranking

提出的覆盖材料方案首先需满足：覆盖材料外层的表面氡析出率(J)低于 0.74 Bq/(m^2 · s)(GB 14586—93 限值)，然后选择综合成本(E)最低的方案。

2　铀尾矿砂覆盖层材料优化实例分析

2.1　铀尾矿砂实例背景

某铀矿山调查的铀尾砂相关参数[14]：尾矿砂氡扩散系数为 3.85×10^{-6} m^2/s，尾矿砂废石孔隙率取 0.556，铀尾矿密度为 1.2×10^3 kg/m^3，尾矿砂面积为 1 000 m^2，射气介质产生可移动氡的能力(α)=11 Bq/(m^3 · s)。以黏土、亚黏土、砂土、亚砂土、黏土质砂土、坡积粗碎屑物、水泥砂浆和沥青等 8 种材料，作为尾矿砂覆盖处理的备选材料。8 种材料的相关参数见表 1[11]65。

为降低覆盖材料市场价格之外的费用对优选结果的影响，对几种覆盖材料的人工费、机械设备成本费、税金和不可预见费等均统一取值，从而可得到覆盖材料的市场综合价格(表 2)[15-17]。

表 1　8 种备选材料的相关参数[11]65

Table 1　Relevant parameters of the eight alternative materials

材料名称	扩散系数(D)/($10^{-6}m^2/s$)	土壤孔隙率(η)	材料名称	扩散系数(D)/($10^{-6}m^2/s$)	土壤孔隙率(η)
黏土	2.00	0.45	黏土质砂土	9.76	0.41
亚黏土	6.67	0.45	坡积粗碎屑物	18.92	0.37
砂土	15.38	0.39	水泥砂浆	0.57	0.05
亚砂土	9.30	0.43	沥青	1.59×10^{-2}	0.08

表 2　覆盖材料单价分析[11]60

Table 2　Unit price analysis of covering materials　　元/m^3

材料种类	人工费	材料费	机械设备成本费	税金和不可预测费	材料综合单价
黏土、亚黏土	8.0	5.0	15.4	1.1	29.5
砂土、亚砂土	8.0	8.3	15.4	1.1	32.8
黏土质砂土、坡积粗碎屑物	8.0	50.0	15.4	1.1	74.5
水泥砂浆	8.0	260.0	15.4	1.1	284.5
沥青	8.0	1 400.0	15.4	1.1	1 424.5

2.2　覆盖材料多目标优化选择分析

2.2.1　单层覆盖材料优化分析

单层覆盖材料的表面氡析出率随厚度的变化见图 3。覆盖层表面的氡析出率要求低于 0.74 Bq/(m^2 · s)，该限值在图 3 中用虚线表示。可以看出，若采用单层覆盖材料，只有黏土、水泥砂浆和沥青这 3 种材料能够在合理厚度范围内满足要求。

为了简化模型，令 $C_0=0$，不考虑覆盖层有可移动氡产生，根据 2.1 节中给出的铀尾矿砂相关参数及相关边界条件，可得单层优化目标函数的模型

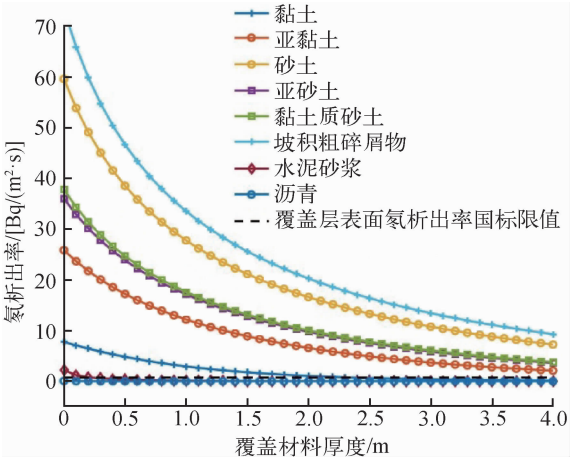


图 3　单层覆盖材料表面氡析出率随厚度的变化

Fig. 3　Variation of radon emanation rate on the surface of single-layer covering material with thickness

$$\min J=\frac{7.773\,7\times10^6}{\left(\frac{1}{x_3}+\frac{0.556}{x_2}\frac{10^3}{\sqrt{3.85\times x_3}}\right)e^{1.45\times10^{-3}\times x_1\sqrt{\frac{1}{x_3}}}+\left(\frac{1}{x_3}-\frac{0.556}{x_2}\frac{10^3}{\sqrt{3.85\times x_3}}\right)e^{-1.45\times10^{-3}\times x_1\sqrt{\frac{1}{x_3}}}},\quad(8)$$

式中：x_1—厚度；x_2—孔隙率(η)；x_3—扩散系数(D)。

优化目标函数单层综合成本(E)的模型为

$$\min E = x_i \times 1\ 000 \times p_i \tag{9}$$

式中：x_i—采用第 i 个材料时选择的厚度，m；p_i—采用第 i 个材料对应的综合单价，元/m^3。

约束条件：1)0.03 m$\leqslant x_i <$2 m，以工程施工的最薄厚度(0.03 m)为厚度下限；2)在上述 8 种材料中随机选择 1 种单层材料。

为了明显展示优化方案的迭代收敛变化，种群数目设置为 500 群，迭代次数分别设置为 1 代、50 代和 100 代，得到了氡析出率-综合成本两目标的收敛性结果(图 4～图 5)。可以看出，在迭代次数达到 50 次时，方案已基本收敛。对应最优方案的材料选择和厚度通过后端数据提取得到。采用厚度为 0.03 m 的沥青，氡析出率(J)=0.050 5 Bq/(m^2·s)，综合成本为42 732.6 元，为单层材料综合成本最低且满足限值要求的方案。

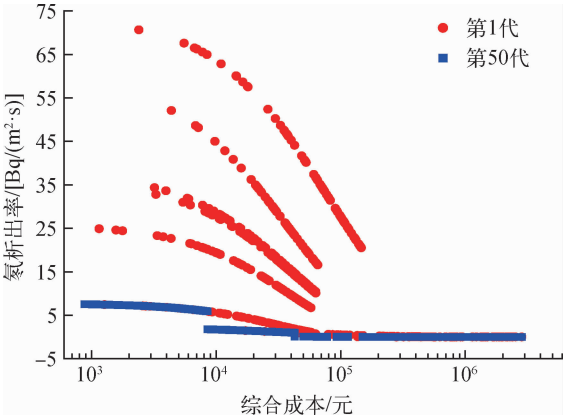


图 4 单层多目标优化氡析出率-综合成本的 1、50 代收敛结果

Fig. 4 The 1st and 50th generation convergence results of single-layer multi-objective optimization for radon emanation rate-integrated cost

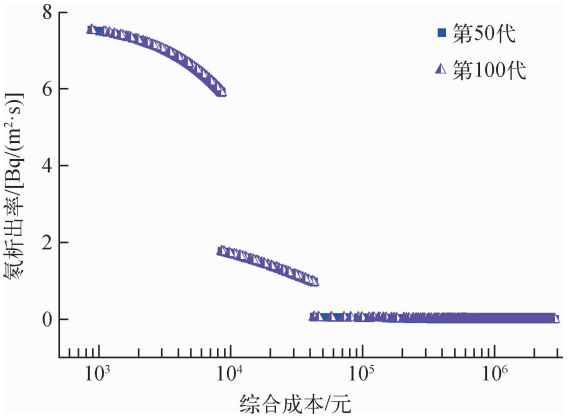


图 5 单层多目标优化氡析出率-综合成本的 50、100 代收敛结果

Fig. 5 The 50th and 100th generation convergence results of single-layer multi-objective optimization for radon emanation rate-integrated cost

2.2.2 三层覆盖材料优化分析

对 2.1 节给出的铀尾矿砂，考虑三层覆盖层材料。由图 3 可知，黏土、水泥砂浆和沥青能够在合理厚度下达到国标要求的降氡效果，故三层覆盖材料只在黏土、水泥砂浆和沥青中进行选取。采用非支配排序方法对三层覆盖层材料进行优化。

根据 2.1 节中给出的铀尾矿砂相关参数，可得三层优化目标函数的模型[11]68：

$$\begin{aligned}\min J = &-4Q\lambda\left(\sqrt{\frac{D_3}{D_0D_1D_2}}-\frac{1}{D_0}\sqrt{\frac{D_3}{D_1}}\right)\Big/\\
&\left\{\left[\left(\frac{\lambda}{\sqrt{D_1D_2}}+\frac{\eta_1\lambda}{\eta_2D_1}-\frac{\eta_0\lambda}{\eta_1\sqrt{D_0D_2}}-\frac{\eta_0\lambda}{\eta_2\sqrt{D_0D_1}}\right)e^{-\sqrt{\frac{\lambda}{D_1}}(z_1-z_0)-\sqrt{\frac{\lambda}{D_2}}(z_2-z_1)}+\right.\right.\\
&\left.\left(\frac{\lambda}{\sqrt{D_1D_2}}-\frac{\eta_1\lambda}{\eta_2D_1}+\frac{\eta_0\lambda}{\eta_1\sqrt{D_0D_2}}-\frac{\eta_0\lambda}{\eta_2\sqrt{D_0D_1}}\right)e^{\sqrt{\frac{\lambda}{D_1}}(z_1-z_0)-\sqrt{\frac{\lambda}{D_2}}(z_2-z_1)}\right]\\
&\left[\left(\frac{\eta_2}{\eta_3}\sqrt{\frac{\lambda}{D_2}}-\sqrt{\frac{\lambda}{D_3}}\right)e^{\sqrt{\frac{\lambda}{D_3}}(z_3-z_2)}-\left(\frac{\eta_2}{\eta_3}\sqrt{\frac{\lambda}{D_2}}+\sqrt{\frac{\lambda}{D_3}}\right)e^{\sqrt{\frac{\lambda}{D_3}}(z_3-z_2)}\right]+\\
&\left[\left(\frac{\lambda}{\sqrt{D_1D_2}}-\frac{\eta_1\lambda}{\eta_2D_1}-\frac{\eta_0\lambda}{\eta_1\sqrt{D_0D_2}}+\frac{\eta_0\lambda}{\eta_2\sqrt{D_0D_1}}\right)e^{\sqrt{\frac{\lambda}{D_2}}(z_2-z_1)-\sqrt{\frac{\lambda}{D_1}}(z_1-z_0)}+\right.\\
&\left.\left(\frac{\lambda}{\sqrt{D_1D_2}}+\frac{\eta_1\lambda}{\eta_2D_1}+\frac{\eta_0\lambda}{\eta_1\sqrt{D_0D_2}}+\frac{\eta_0\lambda}{\eta_2\sqrt{D_0D_1}}\right)e^{\sqrt{\frac{\lambda}{D_2}}(z_2-z_1)+\sqrt{\frac{\lambda}{D_1}}(z_1-z_0)}\right]\\
&\left.\left[\left(\frac{\eta_2}{\eta_3}\sqrt{\frac{\lambda}{D_2}}-\sqrt{\frac{\lambda}{D_3}}\right)e^{-\sqrt{\frac{\lambda}{D_3}}(z_3-z_2)}-\left(\frac{\eta_2}{\eta_3}\sqrt{\frac{\lambda}{D_2}}+\sqrt{\frac{\lambda}{D_3}}\right)e^{\sqrt{\frac{\lambda}{D_3}}(z_3-z_2)}\right]\right\}。\end{aligned}\tag{10}$$

优化目标函数三层综合成本（E）的模型如下：

$$\min E = x_i \times 1\,000 \times p_i + x_{i+1} \times 1\,000 \times p_{i+1} + x_{i+2} \times 1\,000 \times p_{i+2}, \quad (11)$$

式中：x_i—采用第 i 个材料时选择的厚度，m；p_i—采用第 i 个材料对应的综合单价，元/m^3。

约束条件：1）$x_i + x_{i+1} + x_{i+2} < 2$ m；2）$x_i \geqslant 0.03$ m，$x_{i+1} \geqslant 0.03$ m，$x_{i+2} \geqslant 0.03$ m；3）每层材料在黏土、水泥砂浆和沥青中 3 选 1。

选择氡析出率小于 0.74 Bq/(m^2 · s)，综合成本最低的方案。为了能展示优化方案的迭代收敛变化，种群数目设置为 500，按照迭代次数分别设置为 1 代、50 代和 100 代，给出了氡析出率-综合成本两目标的收敛性结果（图 6～图 7）。

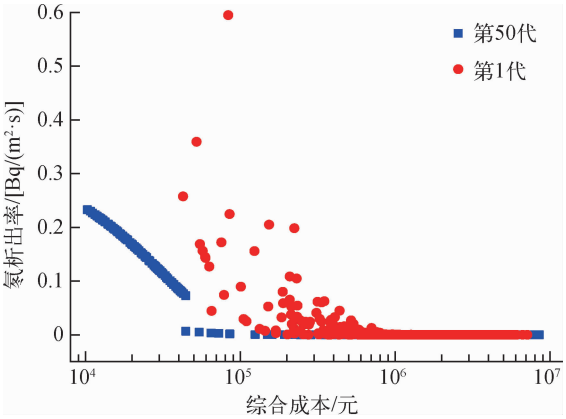


图 6　三层多目标优化氡析出率-综合成本 1,50 代收敛结果

Fig. 6　The 1st and 50th generation convergence results of three-layer multi-objective optimization for radon emanation rate-integrated cost

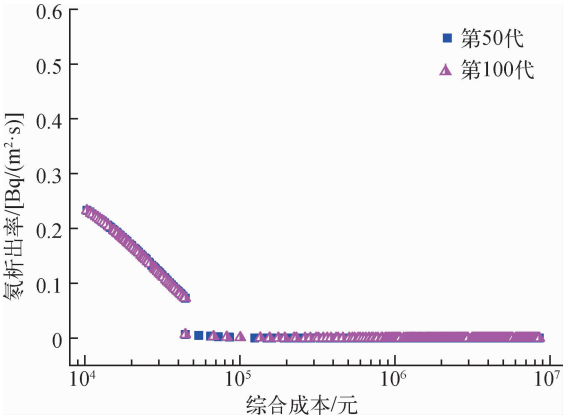


图 7　三层多目标优化氡析出率-综合成本 50,100 代收敛结果

Fig. 7　The 50th and 100th generation convergence results of three-layer multi-objective optimization for radon emanation rate-integrated cost

从图 6～图 7 可知：在迭代次数达到 50 次时，优化方案已基本收敛。对应优化方案的材料选择和厚度通过后端数据提取，得到的优化方案为：三层厚度均为 0.03 m，材料从第一层到第三层（顶层）分别为黏土、黏土和水泥砂浆。该优化方案的氡析出率为 0.232 8 Bq/(m^2 · s)，综合成本为 10 297.8 元。

与单层优化方案相比，覆盖层材料经过三层优化，综合成本由单层最优的 42 732.6 元降低到了 10 297.8 元，成本降低了 75.9%；覆盖层外的氡析出率虽然由 0.050 5 Bq/(m^2 · s) 增加到 0.232 8 Bq/(m^2 · s)，但仍满足要求。

3　结论

通过构建铀尾矿砂覆盖层氡浓度分布模型，考虑单层和三层覆盖层材料，以氡析出率和综合成本为决策目标构建多目标决策模型，基于多目标非支配排序方法，得出以下结论：

1）对于被研究铀尾矿砂实例，若采用单层覆盖材料，在考虑的 8 种覆盖材料中，只有黏土、水泥砂浆和沥青这 3 种材料能够在合理厚度范围内满足氡析出率国标限值要求。

2）覆盖层材料经过三层优化，在满足覆盖层外氡析出率国标限值要求的前提下，由黏土、黏土和水泥砂浆组成的三层覆盖材料的综合成本（10 297.8 元）比单层最优方案的综合成本（42 732.6 元）降低了 75.9%。

参考文献：

[1]　王洪涛. 多孔介质污染物迁移动力学[M]. 北京：高等教育出版社，2008

[2]　李娜，任理. 连续时间随机游动理论模拟多孔介质中溶质运移的研究进展[J]. 水科学进展，2012，23(6)：881-886.

[3]　IAEA. Decommissioning of facilities for mining and milling of radioactive ore and closeout of residues, technical reports series No. 362[R]. Vienna：IAEA，1994.

[4]　周长春，殷国富，胡晓兵，等. 面向绿色设计的材料选择多目标优化决策[J]. 计算机集成制造系统，2008(5)：1023-1028＋1035.

[5]　李旭彤. 铀尾矿库覆盖层厚度的最优化分析[J]. 铀矿冶，2001，20(1)：28-34.

[6]　谭凯旋，胡寒桥，刘泽华，等. 不同覆盖物抑制铀尾矿氡析出的效果[J]. 矿物学报，2012，32(2)：

233-237.
[7] 谢腾飞,李君利,王玲.铀尾矿库覆盖降氡黏土参数优化[J].辐射防护,2013,33(4):243-248.
[8] 戴剑勇,汪敏,邹树梁.铀尾矿堆覆盖材料混合智能优化选择研究[J].原子能科学技术,2016,50(7):1329-1335.
[9] 班改革,戴剑勇.铀尾矿堆黏土覆盖治理数值模拟研究[J].工业安全与环保,2019,45(1):83-86.
[10] 高媛.非支配排序遗传算法(NSGA)的研究与应用[D].杭州:浙江大学,2006.
[11] 班改革.多场耦合作用下铀尾矿覆盖材料优选研究[D].衡阳:南华大学,2018.
[12] WANG R. An improved nondominated sorting genetic algorithm for multiobjective problem[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2016:1-7.
[13] 王丽萍,丰美玲,邱启仓,等.偏好多目标进化算法研究综述[J].计算机学报,2019,42(6):1289-1315.
[14] 汪敏.铀尾矿堆放射性污染物混合智能优化控制研究[D].衡阳:南华大学,2016.
[15] 丁士昭.建设工程施工管理[M].北京:中国建筑工业出版社,2015:39-127.
[16] 张华,鹿爱莉.砂石资源的价值、价格与所有者权益[J].中国矿业,2018,27(1):63-65.
[17] 周鸿锦,冯帅.2017 年水泥价格行情展望[J].工程造价管理,2017(2):91-94.

Preferential Selection of Uranium Tailing Sand Cover Material Based on Non-dominated Multi-objective Optimization Method

DENG Nianbiao, DING Dexin
(School of Resource Environment and Safety Engineering, University of South China, Hengyang 421001, China)

Abstract: The optimal selection of uranium tailings sand cover materials is of great significance to the management of tailings sand in uranium mines. By constructing a radon concentration distribution model for uranium tailings sand cover layer, using single-layer and three-layer cover materials, constructing a multi-objective decision model with radon emanation rate and comprehensive cost as decision objectives, and finding the optimal solution of feasible solutions based on multi-objective non-dominated ranking method. For uranium tailing sand, if single-layer covering material is used, only three materials, namely clay, cement mortar and asphalt, can meet the national standard limit value of radon emanation rate within a reasonable thickness range; compared with single-layer covering material, the radon emanation rate outside the three-layer covering material meets the national standard limit value requirement and the comprehensive cost is reduced by 75.9%.

Key words: uranium tailing sand; cover material; non-dominated multi-objective optimization method; radon emanation rate