基于偏随机键遗传算法的放射性废物处置优化算法研究

刘兴伟　吕 涛　夏加国　陈杏子　李 昶　李星宇　王 馨

（中国核电工程有限公司　北京 100840）

摘要　放射性废物处置资源极其宝贵，其高效利用是当前处置场运营的核心挑战。为解决这一难题，本研究引入偏随机键遗传算法（Biased Random Key Genetic Algorithm，BRKGA），提出了一套适用于放射性废物包码放的智能优化算法。提出的算法结合了4个创新策略：设计了三段式基因编码方案，分别表征废物包的码放顺序、方向及核素活度信息；构建了兼顾空间利用率与辐射防护最优化的多目标适应度函数，并引入“序列递减优先原则”优化空间分配策略；实现了基于并行计算的算法加速。工程实例测试结果表明：该算法相较于人工设计方案，空间利用率显著提升6%以上，最高可达92.45%；算法收敛特性良好，平均可在342代获得高质量解；在32核并行环境下取得10.34倍的加速比，将计算耗时由数小时缩短至数分钟。本研究开发的放射性废物包智能码放算法及软件系统（Radioactive Waste Package Stacking system，RWPS）具有重要的工程应用价值。

关键词　放射性废物处置，偏随机键遗传算法，优化算法，空间利用，并行计算

中图分类号　TL942

DOI: 10.3724/j.0253-3219.2026.hjs.49.250398

CSTR: 32193.14.hjs.CN31-1342/TL.2026.49.250398

Research on radioactive waste disposal optimization algorithm based on biased random-key genetic algorithm

LIU Xingwei　LYU Tao　XIA Jiaguo　CHEN Xingzi　LI Chang　LI Xingyu　WANG Xin

(*China Nuclear Power Engineering Co*., *Ltd*., *Beijing 100840*, *China*)

Abstract　**[Background]** The resources for radioactive waste disposal are extremely valuable, and their efficient utilization represents a core operational challenge for current disposal facilities. **[Purpose]** This study aims to address this challenge by introducing a Biased Random Key Genetic Algorithm (BRKGA) to develop an intelligent optimization algorithm specifically designed for the layout planning of radioactive waste packages. **[Methods]** The proposed algorithm incorporates four key innovative strategies. First, a three-segment gene encoding scheme was designed to represent the placement sequence, orientation, and radionuclide activity information of the waste packages. Second, a multi-objective fitness function was constructed that balances spatial utilization efficiency with radiation protection optimization; this was coupled with the introduction of a "Decreasing Sequence Priority Principle" to enhance the spatial allocation strategy. Third, algorithm acceleration was achieved through parallel

放射性废物处置工程智能码放方案软件研发(No.KY22169)、放射性废物中等深度处置库总体设计关键技术研究(No.KY23097)资助

第一作者：刘兴伟，男，1990年出生，2018年于中国地质大学（北京）获博士学位，研究领域为放射性废物处置及安全评价

通信作者：吕涛，E-mail：lvtao@cnpe.cc

收稿日期：2025-11-11，修回日期：2026-01-21

Supported by Software Research and Development of Intelligent Stacking Scheme for Radioactive Waste Disposal Engineering (No. KY22169), Research on Key Technologies for Overall Design of Intermediate-Depth Radioactive Waste Disposal Repository (No.KY23097)

First author: LIU Xingwei, male, born in 1990, graduated from China University of Geosciences (Beijing) with a doctoral degree in 2018, focusing on radioactive waste disposal and safety assessment

Corresponding author: LYU Tao, E-mail: lvtao@cnpe.cc

Received date: 2025-11-11, revised date: 2026-01-21

computing implementation. **[Results]** Testing with an engineering case study demonstrated that the proposed algorithm significantly improves spatial utilization by over 6% compared to manual design approaches, achieving a maximum utilization rate of 92.45%. The algorithm exhibits excellent convergence characteristics, consistently obtaining high-quality solutions within an average of 342 generations. Furthermore, in a 32-core parallel computing environment, a speedup ratio of 10.34× was attained, reducing the computation time from several hours to just a few minutes. **[Conclusions]** The intelligent layout algorithm and the corresponding software system (Radioactive Waste Package Stacking system, RWPS) developed in this research hold significant value for practical engineering applications.

Key words Radioactive waste disposal, Biased Random-Key Genetic Algorithm (BRKGA), Optimization algorithms, Space utilization, Parallel computing

放射性废物安全处置是核能可持续发展的关键环节之一，鉴于放射性废物种类繁多、源项复杂[1-2]，其精准表征[3-5]与全过程管理对处置方案设计至关重要，而码放方案的优化设计正是实现这一目标的核心环节。如何高效利用现有处置空间，已成为处置场运营面临的关键挑战。当前在近地表放射性废物处置码放方案设计中，主要依靠人工使用计算机辅助设计（Computer-Aided Design，CAD）进行单一规格尺寸废物包码放布局[6]，极大地依赖工作人员的经验。难以高效应对放射性废物处置中不同规格、不同核素、不同活度及源项动态变化的现实问题[7-8]，导致处置空间利用率偏低。同时，现有方法未能将辐射剂量作为优化目标，使得最终码放方案在辐射安全方面存在优化空间[9]。

放射性废物处置的码放方案设计，其核心是一个具有多重复杂约束的三维装箱问题（3D Bin Packing Problem，3D-BPP）。该问题要求在确保安全与稳定性的前提下，在有限的处置容器空间内，高效放置不同尺寸的废物包，以最大化空间利用率。这类强约束下的三维布局优化问题已被证明属于非确定性多项式时间（Nondeterministic Polynomial time，NP）问题[10]。为求解此类问题，早期研究主要集中于精确算法，如分支定界法、动态规划及整数线性规划（Integer Linear Programming，ILP）模型[11-12]。这类方法虽能保证在有限范围内获得数学意义上的最优解，但其计算复杂度随问题规模呈指数级增长，难以应对工程实践中常见的大规模、多约束的复杂场景。为平衡求解效率与质量，研究者转向了以启发式与元启发式算法为代表的高效近似方法，如砌墙式启发式算法[13]、块装载算法[14]、拟人启发式和模拟退火算法[15]、遗传模拟退火和混合遗传算法等混合策略[16-20]，在工程中取得了良好效果。近年来，尽管深度强化学习等[21-23]人工智能技术为三维装箱问题注入了新活力，但在放射性废物处置这一特殊领域，由于源项数据（核素种类、活度、几何形态）的高度不确定性、高质量优化数据的稀缺性，以及严格满足辐射剂量场计算等复杂物理约束，共同制约了数据驱动模型的性能。因此，探索一种不依赖历史数据、兼具强大全局搜索能力与稳定性的优化算法，已成为提升放射性废物处置方案安全性与经济性的关键瓶颈。

鉴于此，本研究将偏随机键遗传算法（Biased Random-Key Genetic Algorithm，BRKGA）引入放射性废物处置码放方案优化领域，利用其独特的有偏选择机制与精英保留策略，以及将通用框架与特定解码器分离的特性[24-26]，解决放射性废物处置码放这一多目标协同优化的难题。针对现有研究的不足，本文设计了一种三段式基因编码方案，统一表征废物包的码放顺序、方向与核素信息；构建了“序列递减优先原则”的多目标适应度函数；实现了基于并行计算的算法加速，显著提升求解效率；开发了放射性废物包智能码放软件（Radioactive Waste Package Stacking system，RWPS），并通过工程实例验证了算法的有效性，为放射性废物包码放方案设计提供智能化解决路径。

1 基于BRKGA的放射性废物处置码放优化算法设计

1.1 BRKGA算法简介

BRKGA算法[24]由Gonçalves与Resende于2011年提出，是在随机键遗传算法（Random Key Genetic Algorithm，RKGA）[27]基础上发展而来的一种高效元启发式方法。其核心改进在于引入了有偏选择机制与精英保留策略，从而显著提升了算法的搜索效率与收敛性能。该算法的一个关键优势在于其模块化架构，明确分离了问题无关的通用组件与问题相关的特定组件，这使得算法框架本身具有高度可复用性，研究者可聚焦于针对具体优化问题设计高效解码器。关于BRKGA的详细机制请参阅文献[24]，

其应用场景及性能综述可参见文献[26]。

BRKGA算法主要包括种群初始化编码方案设计、解码与评估、遗传算子设计几个方面，下面将对本次研究的实现策略进行介绍。

1.2 种群初始化及编码方案

本研究使用长度为3N的基因序列来表示放射性废物包的码放顺序、方向及核素信息，N为废物包的个数，其中，1~N位随机数用于确定码放顺序，由0~N之间的随机数（不含0和N，含1位小数）组成。该随机数的顺序与初始输入的放射性废物包的排列顺序相对应。如图1所示，假设N=5时单个染色体的基因编码。图中无颜色填充的染色体为初始编码，即第1位随机数2.1对应的初始放射性废物包为Cs，第2位随机数3.4对应的初始放射性废物包为Co，第3位随机数0.5对应的初始放射性废物包为Am，依次类推。第N+1至2N位指示码放方向。因为放射性废物包不允许倾倒，仅允许立放和水平旋转，因此仅存在两种旋转方向。本次使用1、2两个数字表示，其中1表示水平旋转90°，2表示不旋转。第2N+1至3N位，记录放射性核素的种类、尺寸和核素活度信息。第t代共创建P个染色体（个体），P的数量可以等于废物包的数量N，也可以是N的倍数。P的数量越大，越有可能尽早地发现相对最优解，但P的数量过多，则会影响繁衍的效率。将生成的0~N之间的随机数由大至小排列，同步调整废物包的码放顺序。在完成上述编码及排序后，形成第t代种群。废物包码放过程采用空间分割方法，且优先按照距离右上角点最远原则（Distance to the Front-Top-Right Corner-2，DFTRC-2）[25]算法码放。

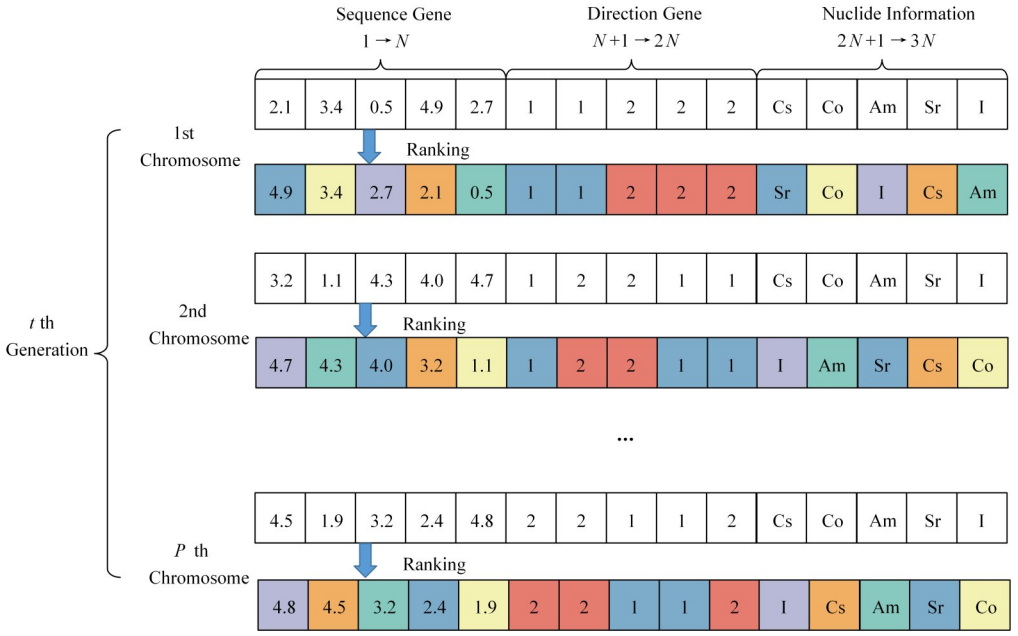


图1 码放方案染色体基因编码（彩图见网络版）

Fig.1 Gene encoding of chromosomes for stacking schemes (color online)

1.3 适应度函数设计

通过适应度函数对第t代种群中的每个染色体（个体）进行评价。本研究在适应度函数设计中考虑了两方面因素：1）放射性废物处置单元利用率；2）辐射防护最优化，以照射剂量率大小表示。空间利用率权重调节因子λ可由用户设定，默认时两者比重各占50%。完成适应度计算后，将适应度值按照从大到小排列，适应度值越高被选为精英个体的概率越大。评价函数如式（1）所示。

$$F = (1 - \lambda) \times f_{\text{space}} + \lambda \times f_{\text{dose}} \tag{1}$$

式中：F是适应度值，F越大表示综合性能越优；λ表示空间利用率权重调节因子，取0时仅考虑空间利用率，取0.5时兼顾空间利用率及辐射防护；f_{space}表示整体空间利用率，%；即所有处置单元中废物包实际体积与处置单元理论总体积的比值；f_{dose}表示照射剂量率，Sv·h^{-1}。

为进一步优化处置单元的空间分配策略，本研究在空间利用率适应度函数f_{space}的设计中引入了序列递减优先原则，确保编号较小的处置单元优先得到充分利用。该原则鼓励形成空间利用率沿编号递增方向递减的分布模式，从而引导算法生成“前密后疏”的处置单元布局。该策略可提升前期处置的空间利用率，也为后续处置预留弹性空间。具体通过式（2）实现。

$$f_{\text{space}} = \begin{cases} R_1 & \text{if } n = 1 \\ \sum_{i=1}^{n-1}(R_i - R_{i+1}) & \text{if } n > 1 \end{cases} \quad (2)$$

式中：R_i表示第i个处置单元的空间利用率（$R_i = V_{\text{load},i}/V_{\text{bin},i}$），%；$V_{\text{load},i}$表示第$i$个处置单元内废物包的总体积，$m^3$；$V_{\text{bin},i}$表示第$i$个处置单元体积，$m^3$；$n$表示利用的处置单元数量。

$$f_{\text{dose}} = 1 - \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} D_{\text{norm},i} \quad (3)$$

式中：$D_{\text{norm},i}$表示第i个处置单元对所有废物包照射强度$D_{i,j}$归一化后照射剂量率，值越小表示照射剂量率越小，$Sv\cdot h^{-1}$；目标点的照射剂量率$D_{i,j}$计算如式（4）所示[28]：

$$D_{i,j} = \frac{A_{i,j}\Gamma_R}{r_{i,j}^{\ 2}} \quad (4)$$

式中：$D_{i,j}$表示第i处置单元中第j个废物包产生的照射剂量率，$Sv\cdot h^{-1}$，取辐射权重因子为1，1 $Gy\cdot h^{-1} \approx$ 1 $Sv\cdot h^{-1}$；$A_{i,j}$表示第i个处置单元中第j个废物包的活度，Bq；Γ_R表示废物包内核素R的照射量率常数，$Gy\cdot m^2\cdot(Bq\cdot s)^{-1}$；$r_{i,j}$表示第$i$个处置单元第$j$个废物包中心到达预定目标点的距离，默认取处置单元顶部，m。

在本算法模型中，我们对实际场景进行了两项关键简化：首先，由于废物包的承载能力远高于堆码产生的压力，故暂未引入重量约束；其次，将放射性废物包抽象为其几何中心的点源。基于此模型得出的码放方案，可在后续阶段导入如蒙特卡罗N粒子输运程序（Monte Carlo N-Particle transport code，MCNP）、Microshield等专业辐射模拟软件，进行精确的空间剂量计算与验证。

1.4 遗传算子设计

1.4.1 精英选择（P_e）

根据评价函数获取第t代各染色体的适应度值，根据适应度值对染色体个体进行降序排列，选取适应度高的前P_e个个体作为精英个体，如图2所示，P_e=3。P_e个个体直接进入t+1代中。P_e的取值可由算法设定，其大小直接影响搜索过程的收敛性与多样性：较大的P_e值有助于优良基因的传递，加快收敛速度，但也可能因精英个体主导种群而过早陷入局部最优；因此需结合交叉与变异算子协同调整。通常P_e为P数量的10%~25%[24]。其余$P-P_e$个个体作为非精英个体。精英个体与非精英个体都通过交叉算子参与下一代染色体的生成。

1.4.2 变异算子（P_m）

在本研究中，变异算子被用于引入全新的码放方案，以增强种群的多样性并帮助算法跳出局部最优。新个体的生成机制与编码方案保持一致，确保变异操作在可行解空间内进行。具体而言，在每一代的演化过程中，变异算子会在第t+1代直接生成P_m个新个体。P_m的数值决定了每一代通过变异引入的新码放方案的数量，其取值直接影响算法的探索能力，通常取10%~30%[24]。

1.4.3 交叉算子（P_c）

为了在一定程度保持原有码放方案的同时引入新的码放方案，本研究设置了染色体交叉算子对染色体进行修改。共生成P_c（$P_c = P - P_e - P_m$）个个体。首先随机从第t代精英个体中选出一个染色体，同时随机从非精英个体选出一个染色体，然后生成P_c组长度为$2N$的0~1的随机数，作为辅助染色体X。将辅助染色体X中的数值和评判因子ρ进行比较，ρ值通常取0.7[24]。这也是偏随机键遗传算法与传统遗传算法的显著不同之处。如果辅助染色体X对应基因位置的值大于0.7，第t+1代的染色体继承非精英个体该位置的基因，否则，则从精英染色体继承该位置的基因。如图2所示，分别从t代中选取了精英个体2和非精英个体5，同时生成辅助染色体X，X的第一位基因值为0.75大于0.7，则继承非精英个体第一位基因，第二位基因值为0.55小于0.7，则继承精英个体的第二位基因，以此类推。共进行$2N$次判断，形成1~$2N$段基因。第$2N$+1~$3N$段基因与精英个体保持一致，从而形成P_c个t+1代的个体。

1.5 并行设计

遗传算法迭代过程中的种群初始化、选择、交叉与变异等操作虽具有逻辑上的先后顺序，但其中针对每个个体的适应度评价操作彼此独立、无数据依赖，具备显著的并行计算潜力。为有效提升算法求解效率，本研究将并行计算策略聚焦于计算开销最大的个体适应度评价环节。

具体实现基于MATLAB并行计算工具箱，采用parfor并行循环结构，将待评估的个体种群动态分配至多个工作进程（Worker）中同时执行。其核心伪代码逻辑如下：Parfor i=1：population_Size；Fitness（i）=Fitness_Evaluation（Individual（i））；End。该并行策略可无缝应用于种群初始化、精英个体（Pe）、交叉个体（Pc）及变异个体（Pm）等所有涉及适应度计算的阶段。

2 实例测试与结果分析

2.1 软件实现与测试环境

为将上述BRKGA算法付诸工程应用，本研究

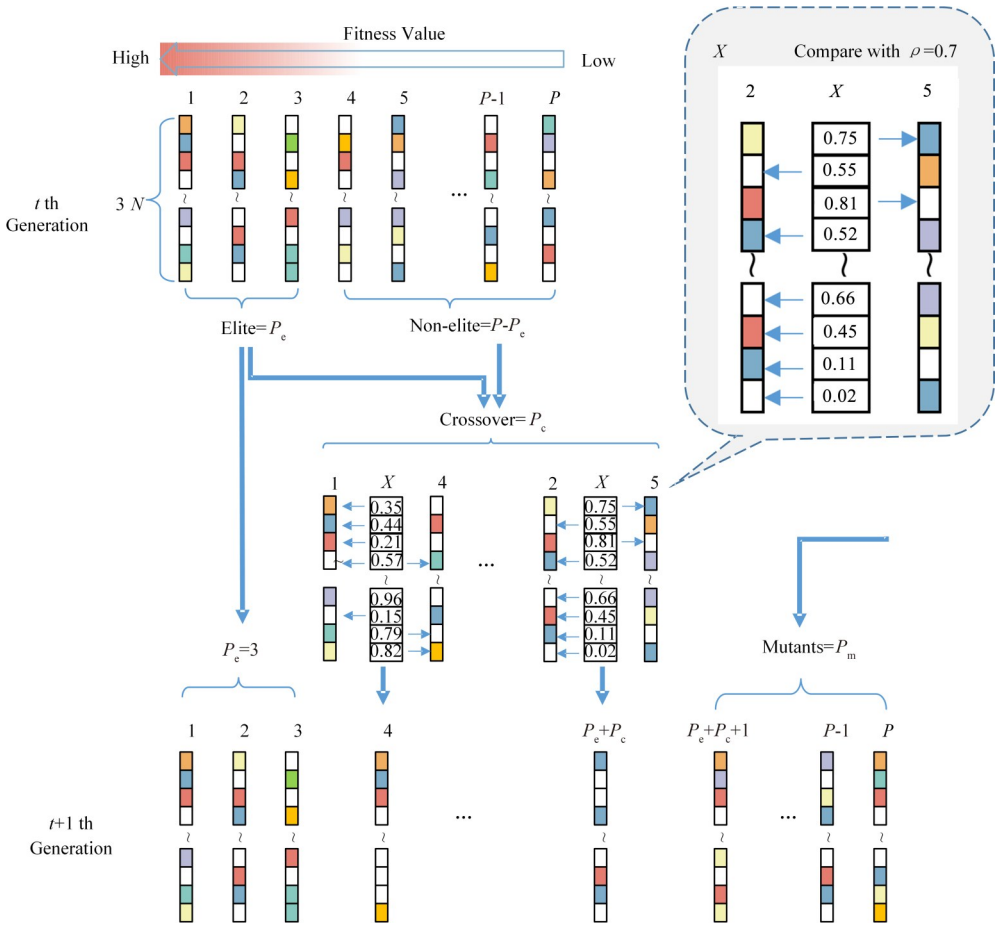


图2　基于BRKGA算法的放射性废物包遗传示意（示例中P_e=3，ρ=0.7）（彩图见网络版）

Fig.2　Genetic schematic of radioactive waste packages based on the BRKGA algorithm (with P_e=3 and ρ=0.7 in the example) (color online)

基于MATLAB App Designer开发了放射性废物包智能码放软件。该软件实现了从废物包参数输入、算法配置到优化结果可视化输出的完整功能（界面见图3），其核心计算逻辑遵循图4所示的算法流程，为实例测试提供了平台。

为验证算法的实用性和有效性，使用一台配置为Xeon Platinum 8268 @ 2.9 GHz的48个核心，256 GB内存，1 TB固态硬盘，Windows Server 2019操作系统的服务器进行测试。

本试验针对箱体类废物包的码放优化问题，案例基于国内某处置场的实际作业场景及典型废物包类型，选取该处置场常见的FA-III与FA-IV型钢箱作为试验对象，其参数见表1。废物包的放射性特征参照该处置场历史处置记录中的典型核素组成与活度分布，主要包括低放废物中常见的^{137}Cs、^{60}Co等，每箱的活度范围为10^7~10^9 Bq。码放作业在尺寸为10.0 m×6.0 m×5.4 m（有效容积324 m^3）的处置单元内进行，遵循废物包仅可水平旋转、不可倒放的约束。当一个单元填满后，启用新单元续接。为探究不同约束的影响，如表2所示，设置了4组对照试验（考虑/不考虑码放间距[6]及空间利用率权重因子）。类似参考文献[24]，本次测试选取10%作为精英个体，交叉算子ρ取0.7，变异比例因子设为15%。每组试验的迭代次数分别为100、200、300、400、500、1 000次，且均在1、4、8、16、32、48核心下并行计算，共进行144组试验。

2.2　空间利用率结果展示

为系统评估算法的有效性，本节首先将其优化

表1　待处置废物箱简要参数

Table 1　Summary parameters of waste containers scheduled for disposal

箱型 Package type	数量 Number of packages	长 Length / m	宽 Width / m	高 Height / m	单个废物包体积 Volume of single package / m^3	总体积 Total volume / m^3
FA-III	31	2.438	1.968	1.331	6.386	325.76
FA-IV	39	1.573	1.565	1.331	3.276	

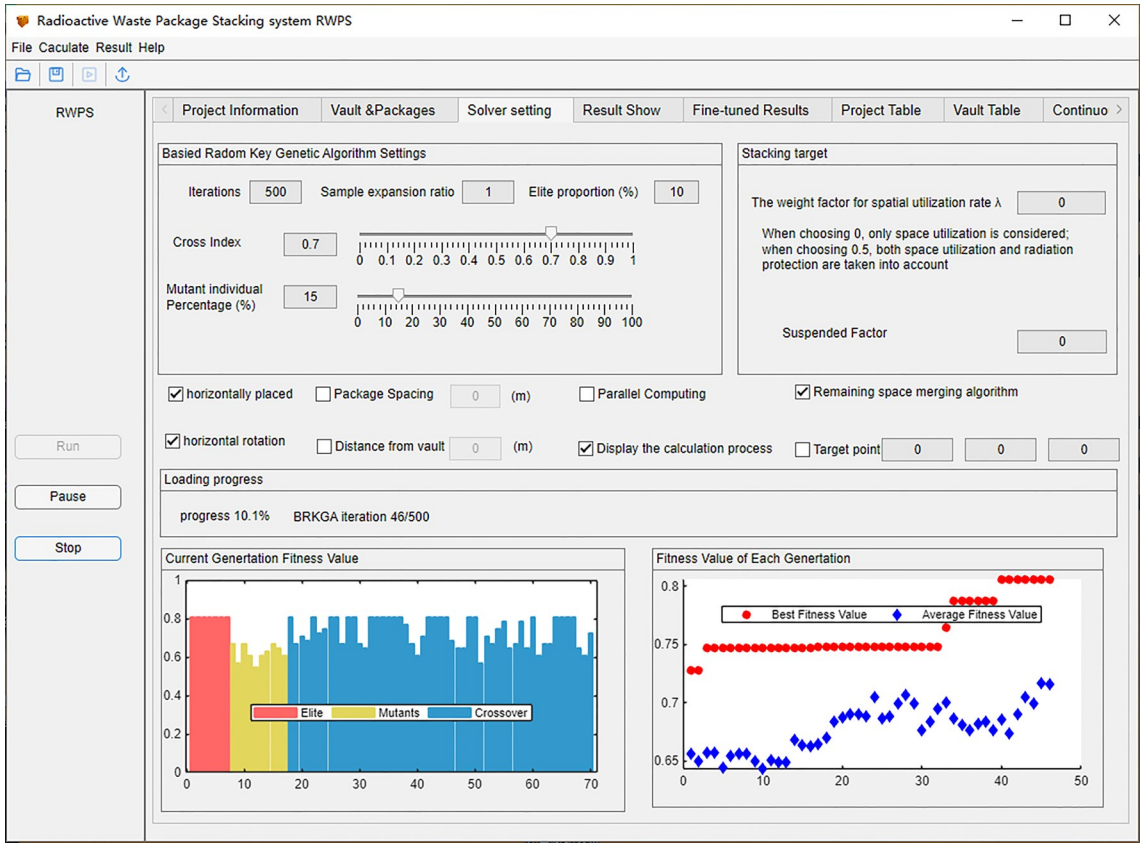


图3 软件算法设置界面展示(彩图见网络版)
Fig.3 Display of software algorithm setting interface (color online)

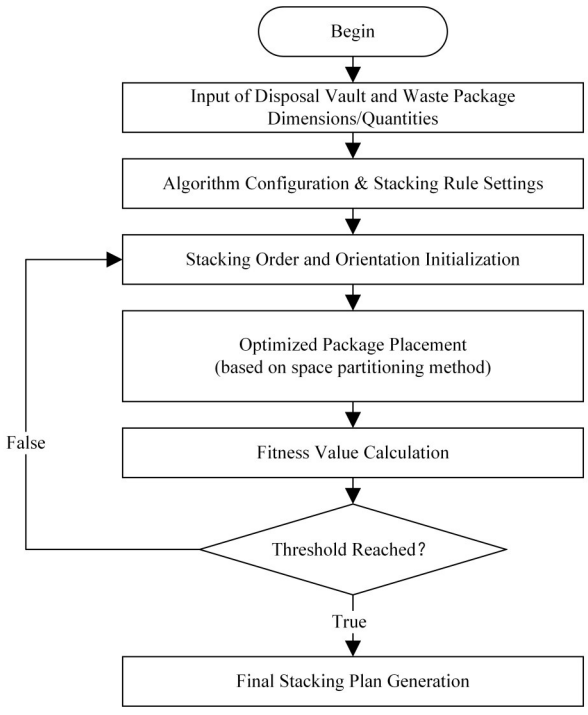


图4 放射性废物包码放软件工作流程图
Fig.4 Workflow diagram of radioactive waste package stacking software

结果与传统人工码放方案进行对比分析。人工码放方案采用最简单的设计方案,因涉及不同核素种类及活度,人工码放方案暂不考虑码放废物包间距及辐射防护最优化要求。首先码放体积偏大的FA-III型钢箱,然后在其上部或空余空间码放FA-IV型钢箱。本次测试放射性废物包的高度相同,均为1.331 m。仅考虑平面布置,码放结果平面图为图5。

处置单元1空间利用率为:R_1=(6.386×31+3.276×25)/324=86.37%;

处置单元2空间利用率为:R_2=(3.276×14)/324=14.15%。

表3所示的RWPS算法的优化结果展现了算法在空间利用与辐射防护多目标权衡上的显著优势。结果表明,算法并非简单地追求所有指标的同步下降,而是依据全局最优原则,实现对辐射风险的策略性分布调整。在空间利用率方面,所有RWPS方案均表现出优于人工设计的均衡性与效率,其首个处置单元的空间利用率最高可达92.45%(B-2方案)(图6)。进一步对比B-1(仅空间优化)与B-2(兼顾空间与辐射)两组试验可以发现,当引入辐射防护目标后(λ=0.5),空间利用率得到了进一步提升,B-2方案的整体空间利用率(92.45%)甚至略高于B-1方案(91.54%),验证了多目标优化并未削弱空间利用率。

在辐射剂量分布方面,算法体现出明显的全局

表2　测试方案设计
Table 2　Design of test experiment

试验组序号 Experimental group ID	空间利用率权重调节因子 The weight factor for spatial utilization rate λ	废物包最小间距 Minimal spacing / m	说明 Comment
B-1	0	0	空间利用率最优化，不考虑码放间距 Optimization of space utilization without considering stacking spacing
B-2	0.5	0	兼顾空间利用率与辐射防护最优化，不考虑码放间距 Balancing the optimization of space utilization and radiation protection without considering stacking spacing
B-3	0	0.04	空间利用率最优化，考虑码放间距 Optimization of space utilization with considering stacking spacing
B-4	0.5	0.04	兼顾空间利用率与辐射防护最优化，考虑码放间距 Balancing the optimization of space utilization and radiation protection with considering stacking spacing

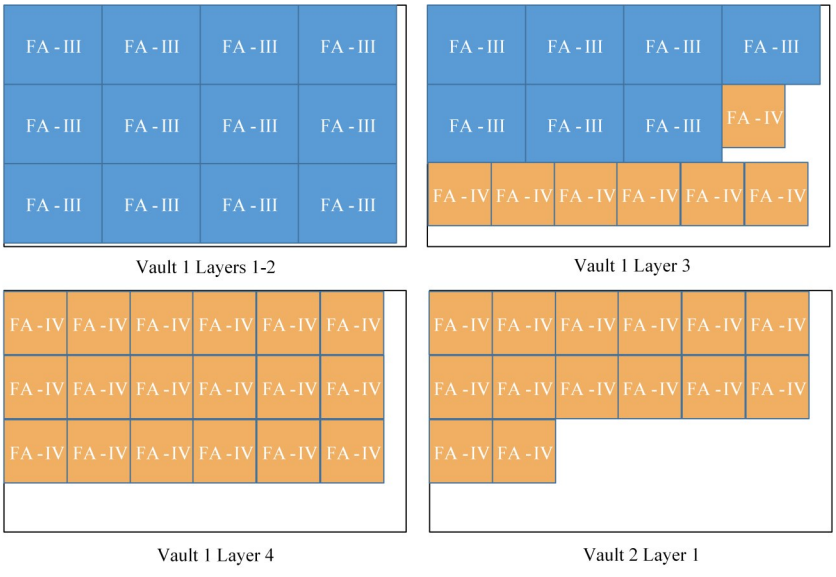


图5　人工码放方案平面布置图（彩图见网络版）
Fig.5　Plan layout of manual stacking scheme (color online)

表3　不同方案下空间利用率与顶部照射剂量率对比
Table 3　Comparison of space utilization and top irradiation dose rate under different schemes

试验组序号 Experimental group ID	空间利用率权重调节因子 The weight factor for spatial utilization rate λ	废物包最小间距 Minimal spacing / m	最优空间利用率 Best space utilization rate / %		顶部照射剂量率 Dose rate at top / $Sv \cdot h^{-1}$	
			单元1 Vault 1	单元2 Vault 2	单元1 Vault 1	单元2 Vault 2
人工方案 Manual Scheme	0	0	86.37	14.15	—	—
B-1	0	0	91.54	9	1.70×10^{-3}	2.13×10^{-4}
B-2	0.5	0	92.45	8.09	1.77×10^{-3}	1.39×10^{-4}
B-3	0	0.04	86.59	13.95	1.70×10^{-3}	2.17×10^{-4}
B-4	0.5	0.04	87.45	13.1	1.80×10^{-3}	1.19×10^{-4}

优化特征。B-2方案中处置单元1顶部照射剂量率从 1.70×10^{-3} $Sv \cdot h^{-1}$ 微增至 1.77×10^{-3} $Sv \cdot h^{-1}$（增幅约4.1%），而处置单元2的照射剂量率则从 2.13×10^{-4} $Sv \cdot h^{-1}$ 显著降低至 1.39×10^{-4} $Sv \cdot h^{-1}$，降幅34.7%。该分布策略符合近地表处置场的实际运营逻辑：处置单元1作为优先填满并浇筑封闭的单元，

其对工作人员的长期辐射影响将随着封闭活动的完成而迅速减弱。而处置单元2在较长时间内仍处于开放和作业状态，是人员潜在照射的主要区域。因此，降低处置单元2的照射剂量率水平对提升整体运营安全具有更重要的意义。

对比有无码放间距要求的试验组（B-1与B-3、B-2与B-4）可知，当引入0.04 m的码放间距这一现实约束后，算法的空间利用率出现了预期内的合理下降（如B-2方案的92.45%降至B-4方案的87.45%）。这一结果符合物理规律，同时也表明算法能够准确地将工程约束条件纳入优化模型，并在此基础上给出满足实际要求的解，增强了其在复杂工程场景下的适用性和可靠性。

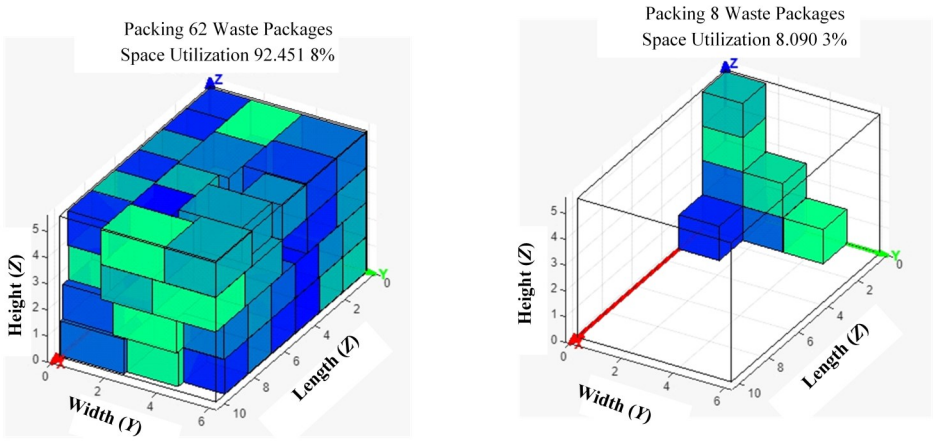


图6　RWPS软件码放结果展示（彩图见网络版）
Fig.6　Display of stacking results by the RWPS software (color online)

2.3　算法收敛性与求解稳定性分析

为量化算法在不同工况和并行规模下的收敛效率，统计了达到99%最优解（即适应度值达到稳定值的99%）所需的迭代次数，如表4所示。结果表明，算法整体收敛性能优异，最快可在17代获得高质量解（B-3工况32核），平均收敛代数为342代。

表4　不同工况与收敛代数统计表
Table 4　Statistical table of different working conditions and convergence generations

试验组序号 Experimental group ID	核心数 Number of cores						平均值 Average
	1	4	8	16	32	48	
B-1	61	874	291	778	50	302	392.7
B-2	763	221	388	759	238	204	428.8
B-3	141	369	718	471	17	18	289.0
B-4	58	150	310	77	831	118	257.3
平均 Average							342.0

从工况复杂度看，收敛难度排序为B-2（428.8代）>B-1（392.7代）>B-3（289.0代）>B-4（257.3代）。同时考虑空间利用与辐射防护（B-2）的收敛难度最高，甚至超过了纯空间优化（B-1）和最复杂的B-4工况。这说明多目标权衡（λ=0.5）比单纯的物理约束（如间距d=0.04）更增加搜索的复杂性。而B-4工况平均收敛最快，可能是因为其最严格的间距约束大幅缩减了可行解空间，反而加速了搜索过程。

进一步分析算法收敛过程，以B-4组8核心的1 000代数据为例。图7展示了算法在1 000代演化过程中的最优适应度值与平均适应度值变化曲线。可以清晰地观察到，算法的收敛过程呈现出显著的“两阶段”特征。第一阶段为快速探索与收敛期（1~162代），最优适应度值从初始的0.737 83迅速跃升至0.793 48，其间伴随着两次关键的质量提升（1~21代，137~162代）。这表明算法通过精英保留策略与高效的交叉算子，能够在演化初期快速定位并锁定高质量解区域。第二阶段为稳定维持与精调期（163~1 000代），最优适应度值在达到0.807 65后便保持高度稳定。

在分析最优解收敛的同时，种群的动态稳定性是评估算法鲁棒性的另一核心指标。一个值得关注

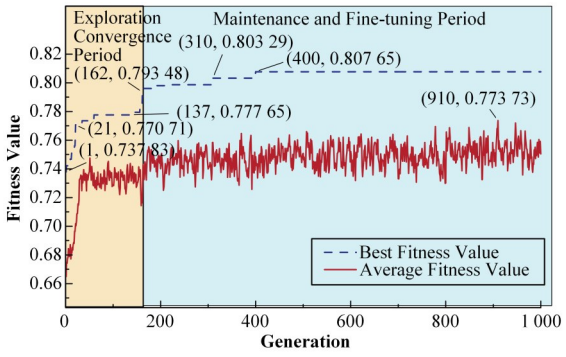


图7 适应度值随遗传代数的变化曲线（彩图见网络版）
Fig.7 Variation curve of fitness value with different generations (color online)

的现象是，最优适应度值在第400代完全稳定后，种群的平均适应度值并未随之收敛或趋于稳定，而是在0.73~0.77的宽区间内持续动态波动，在演化后期（如第910代）出现了0.773 73的峰值。这说明BRKGA算法的精英保留与多样性维持策略在放射性废物处置领域能够发挥积极作用。

变异操作不断在种群中生成全新的个体，交叉操作则在保留一定精英个体的同时微调获取新的个体，这样就实现了稳定的同时还继续生成质量多样的个体。有效避免了传统遗传算法常见的“早熟”收敛问题。平均适应度值的宽幅波动，尤其是在后期仍持续活跃，表明算法即使在找到全局最优解后，仍在探索其邻域内的多个高质量解。这种特性对于放射性废物处置这类复杂的工程优化问题至关重要。

2.4 并行计算效率分析

为评估算法并行能力，本节对其并行化实现的效率与可扩展性进行定量分析。采用加速比（S_p）与并行效率（η）作为核心评价指标，如式（5）和（6）所示[29]。

$$S_p = \frac{T_1}{T_p} \tag{5}$$

$$\eta = \frac{S_p}{p} \tag{6}$$

式中：S_p表示加速比；T_1表示1核心串行运行耗时，s；T_p表示p核心下运行耗时，s；η表示并行效率，%；p表示核心数。

为评估并行效率，以B-4组1 000次迭代的计算任务为例，不同核心数下的计算耗时如图8所示。结果显示，在1~32核范围内，计算耗时随核心数的增加显著下降，从单核心的5 376.02 s降至32核的519.72 s，达到了10.34倍的显著加速。然而，当核心数增至48时，耗时反而上升。其原因是，随着核心数的增加，单代遗传时间由5.3 s缩短至0.5 s，但进程间通信与同步的开销也随之增长。在48核时，通信开销的增加已超过并行计算带来的收益，导致并行效率下降。

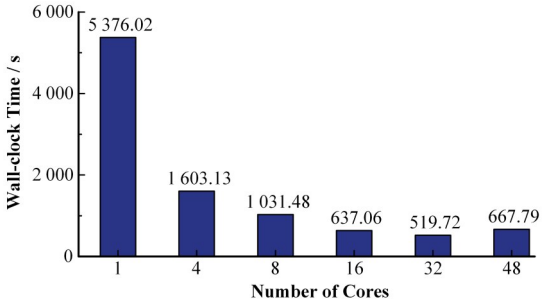


图8 不同核心数下计算耗时
Fig.8 Wall-clock time with different number of cores

尽管并行化带来了显著的性能增益，但其效率并非随核心数无限增长（图9）。通过分析加速比与并行效率的变化趋势可以发现，当核心数从1个增至32个时，加速比呈现良好的线性增长趋势；但当核心数由32增加至48个时，加速比反而回落至8.05。并行效率则从32核时的32.33%下降至48核时的16.77%，这一性能瓶颈符合阿姆达尔定律的预测，即算法中固有的串行部分（如种群初始化、精英个体迁移与数据同步等）以及处理器间的通信开销，成为了限制并行性能进一步提升的关键因素。因此，针对本研究所涉及的问题规模，16~32核为兼顾计算效率与硬件成本的最佳配置区间。

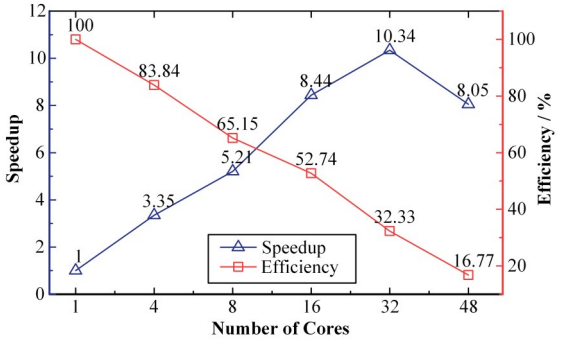


图9 并行加速及效率曲线（彩图见网络版）
Fig.9 Parallel speedup and efficiency curves (color online)

3 结语与展望

针对近地表放射性废物处置中人工码放方案效率低、适应性差，且难以兼顾辐射安全优化的工程难题，本研究将偏随机键遗传算法（BRKGA）引入放射性废物处置码放方案优化领域，提出了一种兼顾处置空间利用率与辐射防护的智能码放算法，并配套开发了RWPS软件。通过理论分析、算法设计与实例验证，主要得出以下结论。

1）提出了三段式基因编码方案，成功将废物包的码放顺序、方向及核素信息整合于遗传繁衍策略。构建了兼顾空间利用率和辐射剂量为核心的双目标适应度函数，并通过引入序列递减优先原则，引导算法生成更符合工程实际的前密后疏型处置模式，有效解决了空间利用与辐射安全协同优化的难题。

2）实例测试结果表明，相较于传统人工设计，本算法的空间利用率显著提升 6% 以上，最高可达 92.45%。这标志着方案设计实现了从“经验驱动”到“智能决策优化”的工作模式转变，在放射性废物码放这一复杂场景中，可靠地达成了空间利用与辐射安全的自动协同优化。

3）算法具备良好的收敛特性，平均可在 342 代内收敛至 99% 的最优解，最快可在 17 代内获得高质量解，展现出较好的全局搜索能力与稳定性。

4）通过并行计算策略，在 32 核下获得了 10.34 倍的加速比，将计算耗时从数小时缩短至数分钟，极大提升了复杂场景下的工程适用性与响应效率。

综上所述，本研究在放射性废物智能码放方面取得了一定成果，但由于放射性废物处置问题的复杂性，仍存在进一步深化和拓展的空间。未来可将算法与蒙特卡罗（如 MCNP）或确定性程序（如 MicroShield）进行深度耦合，实现布局优化与高精度剂量计算的一体化。同时，引入重量分布与堆码力学稳定性等多物理场约束，进一步提升方案的工程实用性。

作者贡献声明　刘兴伟负责算法设计、软件开发、试验设计及撰写论文；吕涛负责算法设计构思、提供测试资源、论文指导；夏加国负责试验测试、文章校核；陈杏子负责试验数据整理；李昶负责软件测试；李星宇负责试验数据分析；王馨负责文章审阅。

参考文献

1　曾正魁, 陈思泽, 余慧莺, 等. 基于中国聚变工程试验堆的双功能液态铅锂包层活化分析和废物处理[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2021, **39**(6): 061207. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2021.rrj.39.061207.
ZENG Zhengkui, CHEN Size, YU Huiying, *et al*. Activation analysis and waste management for dual functional lithium-lead blanket of the China Fusion Engineering Test Reactor[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2021, **39**(6): 061207. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2021.rrj.39.061207.

2　Gao J K, Lv A Y, Zhao Z R, et al. Research advances on adsorption materials for the purification of radioactive wastewater[J]. Research & Design of Nuclear Engineering, 2025, **1**: 2025003. DOI: 10.1051/rdne/2025003.

3　Yang H, Zhang X Y, Gu W G, *et al*. A novel method for gamma spectrum analysis of low-level and intermediate-level radioactive waste[J]. Nuclear Science and Techniques, 2023, **34**(6): 87. DOI: 10.1007/s41365-023-01236-w.

4　Leng Y C, Feng J C, Jiang Q, *et al*. Investigation of co-transport behavior of strontium and bentonite colloids in granite disposal environment[J]. Nuclear Science and Techniques, 2025, **36**(9): 160. DOI: 10.1007/s41365-025-01700-9.

5　高凡, 白怀勇, 阳黎升, 等. 桶装放射性废物中子测量系统探测效率校正方法研究[J]. 核技术, 2025, **48**(9): 090402. DOI: 10.11889/j. 0253-3219.2025. hjs. 48. 240530. CSTR: 32193.14. hjs. CN31-1342/TL. 2025.48. 240530.
GAO Fan, BAI Huaiyong, YANG Lisheng, *et al*. Study on efficiency correction method of neutron measurement system for waste drum[J]. Nuclear Techniques, 2025, **48**(9): 090402. DOI: 10.11889/j. 0253-3219.2025. hjs. 48. 240530. CSTR: 32193.14. hjs. CN31-1342/TL. 2025.48. 240530.

6　王杰, 高彦锋, 圣锋, 等. 某近地表处置场废物处置码放工艺优化研究[J]. 辐射防护, 2021, **41**(2): 157－164.
WANG Jie, GAO Yanfeng, SHENG Feng, *et al*. Research on waste stacking optimization of disposal process in a near surface disposal site[J]. Radiation Protection, 2021, **41**(2): 157－164.

7　冀东, 杜娟, 张贺飞, 等. 我国伴生放射性废渣特点及处置案例[J]. 核技术, 2023, **46**(1): 010005. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.010005.
JI Dong, DU Juan, ZHANG Hefei, *et al*. Characteristics and disposal cases of associated radioactive waste residues in China[J]. Nuclear Techniques, 2023, **46**(1): 010005. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.010005.

8　李峰, 王洪祖, 朱杰, 等. 关于放射性废物中等深度处置的若干见解[J]. 辐射防护, 2025, **45**(3): 273－278.
LI Feng, WANG Hongzu, ZHU Jie, *et al*. Several viewpoints on medium-depth disposal of radioactive waste [J]. Radiation Protection, 2025, **45**(3): 273－278.

9　王雅霄, 李卓然, 王炳衡, 等. 低放废物处置场辐射防护设计关键问题研究[J]. 辐射防护, 2023, **43**(S1): 99－105.
WANG Yaxiao, LI Zhuoran, WANG Bingheng, *et al*. Research on key issues of radiation protection design for low-level radioactive waste disposal sites[J]. Radiation

Protection, 2023, **43**(S1): 99 – 105.

10 Chernov N, Stoyan Y, Romanova T. Mathematical model and efficient algorithms for object packing problem[J]. Computational Geometry, 2010, **43**(5): 535 – 553. DOI: 10.1016/j.comgeo.2009.12.003.

11 do Nascimento O X, Alves de Queiroz T, Junqueira L. Practical constraints in the container loading problem: Comprehensive formulations and exact algorithm[J]. Computers & Operations Research, 2021, **128**: 105186. DOI: 10.1016/j.cor.2020.105186.

12 de Azevedo Oliveira L, de Lima V L, de Queiroz T A, *et al*. The container loading problem with cargo stability: a study on support factors, mechanical equilibrium and grids [J]. Engineering Optimization, 2021, **53**(7): 1192 – 1211. DOI: 10.1080/0305215X.2020.1779250.

13 张德富, 韩水华, 叶卫国. 求解矩形Packing问题的砌墙式启发式算法[J]. 计算机学报, 2008, **31**(3): 509 – 515. DOI: 10.3321/j.issn: 0254-4164.2008.03.017.
ZHANG Defu, HAN Shuihua, YE Weiguo. A bricklaying heuristic algorithm for the orthogonal rectangular packing problem[J]. Chinese Journal of Computers, 2008, **31**(3): 509 – 515. DOI: 10.3321/j.issn: 0254-4164.2008.03.017.

14 张德富, 彭煜, 张丽丽. 求解三维装箱问题的多层启发式搜索算法[J]. 计算机学报, 2012, **35**(12): 2553 – 2561. DOI: 10.3724/SP.J.1016.2012.02553.
ZHANG Defu, PENG Yu, ZHANG Lili. A multi-layer heuristic search algorithm for three dimensional container loading problem[J]. Chinese Journal of Computers, 2012, **35**(12): 2553 – 2561. DOI: 10.3724/SP. J. 1016.2012. 02553.

15 张德富, 魏丽军, 陈青山, 等. 三维装箱问题的组合启发式算法[J]. 软件学报, 2007, **18**(9): 2083 – 2089.
ZHANG Defu, WEI Lijun, CHEN Qingshan, *et al*. A combinational heuristic algorithm for the three-dimensional packing problem[J]. Journal of Software, 2007, **18**(9): 2083 – 2089.

16 张德富, 彭煜, 朱文兴, 等. 求解三维装箱问题的混合模拟退火算法[J]. 计算机学报, 2009, **32**(11): 2147 – 2156. DOI: 10.3724/SP.J.1016.2009.02147.
ZHANG Defu, PENG Yu, ZHU Wenxing, *et al*. A hybrid simulated annealing algorithm for the three-dimensional packing problem[J]. Chinese Journal of Computers, 2009, **32**(11): 2147 – 2156. DOI: 10.3724/SP. J. 1016.2009. 02147.

17 刘瑞瑞. 基于遗传模拟退火算法的三维离线装箱优化问题研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
LIU Ruirui. Research on three-dimensional offline Bin packing problem based on genetic simulated annealing algorithm[D]. Changchun: Jilin University, 2014.

18 朱莹. 基于混合遗传算法的集装箱船三维装箱问题研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
ZHU Ying. Container ship three-dimensional loading problem based on hybrid genetic algorithm[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016.

19 代爱民. 基于混合免疫遗传算法的半在线三维装箱问题研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
DAI Aimin. Hybrid immune genetic algorithm for semi-online three-dimensional packing problems[D]. Chongqing: Chongqing University, 2018.

20 智阳光. 三维装箱与选箱算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2021. DOI: 10.27389/d. cnki. gxadu. 2021. 001844.
ZHI Yangguang. Research on the algorithm of three-dimensional Bin packing and selecting[D]. Xi'an: Xidian University, 2021. DOI: 10.27389/d. cnki. gxadu. 2021. 001844.

21 Zhao H, Zhu C Y, Xu X, *et al*. Learning practically feasible policies for online 3D Bin packing[J]. Science China Information Sciences, 2021, **65**(1): 112105. DOI: 10.1007/s11432-021-3348-6.

22 Yang S, Song S, Chu S L, *et al*. Heuristics integrated deep reinforcement learning for online 3D Bin packing[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2024, **21**(1): 939 – 950. DOI: 10.1109/tase.2023.3235742.

23 张长勇, 姚凯超, 张宇浩. 求解在线三维装箱问题的启发式深度强化学习算法[J]. 计算机工程与应用, 2025, **61**(17): 329 – 336.
ZHANG Changyong, YAO Kaichao, ZHANG Yuhao. Heuristic deep reinforcement learning algorithm for solving online 3D Bin packing problem[J]. Computer Engineering and Applications, 2025, **61**(17): 329 – 336.

24 Gonçalves J F, Resende M G C. Biased random-key genetic algorithms for combinatorial optimization[J]. Journal of Heuristics, 2011, **17**(5): 487 – 525. DOI: 10.1007/s10732-010-9143-1.

25 Gonçalves J F, Resende M G C. A biased random key genetic algorithm for 2D and 3D Bin packing problems [J]. International Journal of Production Economics, 2013, **145**(2): 500 – 510. DOI: 10.1016/j.ijpe.2013.04.019.

26 Londe M A, Pessoa L S, Andrade C E, *et al*. Biased random-key genetic algorithms: a review[J]. European

Journal of Operational Research, 2025, **321**(1): 1 – 22. DOI: 10.1016/j.ejor.2024.03.030.

27 Bean J C. Genetic algorithms and random keys for sequencing and optimization[J]. ORSA Journal on Computing, 1994, **6**(2): 154 – 160. DOI: 10.1287/ijoc.6.2.154.

28 潘自强. 辐射安全手册[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
PAN Ziqiang. Radiation safety manual[M]. Beijing: Science Press, 2011.

29 Liu X W, Zhang Q L, Cheng T P. Accelerating contaminant transport simulation in MT3DMS using JASMIN-based parallel computing[J]. Water, 2020, **12**(5): 1480. DOI: 10.3390/w12051480.