

文章编号:1005-0523(2020)02-0135-08

基于格栅化方法的不规则临港产业区布局研究

彭广益^{1,3}, 季 婕^{1,2}, 蒋柳鹏¹, 封学军¹

(1. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 建银工程咨询有限责任公司江苏分公司, 江苏 南京 210000;
3. 江苏兴盐港航集团有限公司, 江苏 盐城 224000)

摘要:为了准确定量得到一片不规则临港产业区的产业布局方案,利用格栅化方法,将港区 and 目标产业用地划分为大小相同的正方形网格,以各产业之间、港区与各产业间的已知关联度确定各栅格之间的关联度,构建以所有栅格间综合关联度最大为目标的不规则临港产业区布局,最后基于栅格编号排序编写整数编码的多智能体进化算法,求得综合关联度最大的布局方案。以盐城滨海港为例,将滨海临港产业划分为50个栅格,根据规划面积确定拟发展的6种产业所占栅格数,利用MATLAB编写多智能体进化算法,设置智能体网格为20×20,以进化代数150代、200代和300代各运行10次,得到关联度最大的3种布局方案,综合关联度分别为549,550.8和555,遗传算法运行50 000代的最佳结果仅为520.8,表明在定量解决不规则临港产业区布局问题上,该模型和算法具有较强的优越性。

关键词:不规则临港产业区;格栅化;多智能体进化算法;布局优化;滨海港工业园区

中图分类号:U-6-9

文献标志码:A

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2020.02.019

港口作为国家关键基础设施,对所在的港口城市经济发展起着至关重要的作用,并对周边腹地城市有较强的辐射拉动作用。随着经济全球化进程的加快,港口的规划布局与城市的建设开发逐渐融为一体,并出现以临港产业为城市产业主体的发展新模式,临港产业的发展程度成为衡量区域经济发展的重要指标。因此,临港产业的布局合理与否直接影响了港口功能的发挥以及港口城市的发展潜力,以科学的理论和方法对临港产业布局进行研究具有重要意义。

临港产业区一般是指在港口后方陆域设立的与港口相关的产业集聚区。临港产业布局理论属于陆域产业布局理论的一个分支,是产业布局理论的重要组成部分。有关临港产业布局的研究方法主要以定性研究和定量研究为主,其中定性研究较为成熟,Zhang等^[1]提出点轴发展理论,港口作为增长极,必须与区域的工业化结合起来促进新的区域增长点的形成;Ma等^[2]、袁汝华等^[3]分别对环渤海港口群、韩国港口群进行研究,分析港口产业空间布局,提出产业区产业定位、空间布局、实施策略等,得出港口群区域临港区域开发利用依据。定量研究方法较少,封学军等^[4]基于多目标规划和系统布置设计方法,得出规则临港产业的布局方案;夏柳娟^[5]基于栅格布局原理建立了陆港物流园区功能区优化布局栅格模型,以16格方形标准栅格设计了遗传算法;孙刘诚等^[6]提出基于栅格数据结构,构建不规则物流园区功能区块布局的集合划分模型,设计了基于割树技术的变邻域搜索算法进行求解。从相关研究可以看出,临港产业布局规划方法趋势是定性分析和定量分析相结合,由粗放到精细,由单条件到多条件,对以精细化模型来研究不规则临港产业的布局具有重要价值。

在有关产业布局定量模型中,大多采用启发式算法进行组合优化的求解,主要包括遗传算法、模拟退火算法、粒子群算法及蚁群算法等,遗传算法在解决物流路径优化等方面具有较好的表现,杨婷等利用遗传算

收稿日期:2019-10-14

基金项目:国家自然科学基金项目(50909042)

作者简介:彭广益(1995—),男,硕士研究生,研究方向为水运经济与规划。

通讯作者:封学军(1975—),男,教授,博士,研究方向为水运经济与规划、现代物流系统。

法得出基于地铁的带时间窗地下物流最优路径^[7]。但其全局寻优能力和收敛稳定性都有待提高,因此有学者提出多智能体进化算法来解决相关组合优化问题,核心思想是将多个智能体与其邻展开竞争或合作或利用自身的知识进行自学习来增加能量。钟伟才等^[8]证明了多智能体进化算法的时间复杂度为 $O(n^a)$,全局收敛的概率为 1;袁志^[9]在此基础上提出整数编码的多智能体进化算法,该算法具有更好的全局寻优能力,而且对比遗传算法收敛稳定性更好。饶卫平等^[10]、周国雄等^[11]在无人机突防航线规划和 CA 林火空间扩散模型中应用多智能体进化算法都取得了较为满意的结果,通过借助多智能体之间相互影响来达到求解目的,可以借鉴到解决临港产业布局优化问题上。因此选择多智能体进化算法能够较为有效解决栅格化的临港产业布局问题。

鉴于此,本文从解决不规则临港产业区布局的角度出发,建立栅格化的不规则临港产业空间布局模型,并对其设计整数编码的多智能体进化算法进行求解。

1 模型建立

1.1 建模思路

把临港产业区按其面积大小划分为若干个完全相同的正方形栅格,并将港区及产业区内已有建筑物都按照各自面积大小也划分为相应数量的正方形栅格。如图 1 所示,按照“四舍五入”的方法将建模区域栅格化,即边缘区域面积不低于 $1/2$ 栅格的保留,否则不保留。

将各个产业按照其面积大小划分为相应数量的正方形栅格,把代表产业的每个栅格在临港产业区自由栅格(临港产业区内扣除已有建筑物的栅格)中随机摆放得到一种布局方案,计算每个产业区栅格与其相邻栅格之间的关联度,最后将所有产业区栅格与其相邻栅格之间的关联度求和得到产业区布局关联度的总和,关联度总和越大则布局方案越优。

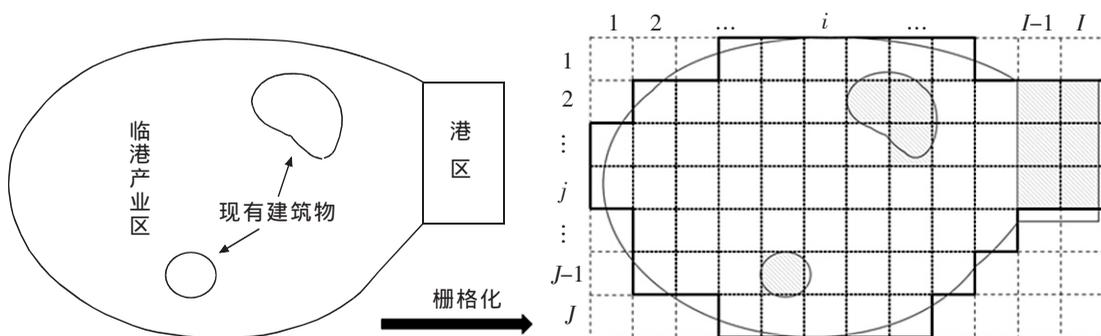


图 1 临港产业区栅格化示意图

Fig.1 Schematic diagram of gridding in port industrial zone

1.2 模型假设

临港产业区产业集聚可以带来一定的经济效益,根据循环经济的理念,关联度较大的产业靠近布置,同一产业的紧密度也应当大于与任意其他产业之间的关联度,产业区内道路和已有建筑物对产业布局也有一定影响,根据以下假设建立模型。

1) 临港产业区边界及总面积已知,港区、现有建筑物区的位置及面积已知,且根据其各自面积大小能划分为接近整数个栅格;

2) 产业区个数及各产业区面积已知,且每个产业区根据其面积大小能划分为接近整数个栅格,记为产业区栅格;

3) 各产业之间、产业与港口之间、产业与现有建筑之间的关联度均已知,且任意一个产业区栅格与其他栅格之间的关联度取值,等于该栅格所代表的产业与其他区块的关联度;

4) 相同产业区栅格之间也存在关联度,且该关联度为一固定常量,该常量大于任意两个不同产业区栅格之间的关联度;

5) 直接相邻的两个栅格之间的关联度等于栅格所代表的两个区块之间的关联度, 对角相邻的两个栅格之间的关联度等于栅格所代表的两个区块之间的关联度乘以一个小于 1 的比例系数;

6) 临港产业区内部道路、绿化面积等忽略不计,分摊到各个产业区内,但考虑其对各产业之间的关联度。

1.3 符号说明

1.3.1 变量

K 为产业区个数; L 为现有建筑区个数; A_k 为第 k 个区块栅格集合, $k=0,1,2,\dots,K,K+1,\dots,K+L,K+L+1$,其中: A_0 表示空白区块栅格集合, A_1,A_2,\dots,A_K 表示产业区块栅格集合, $A_{K+1},A_{K+2},\dots,A_{K+L}$ 表示现有建筑区块栅格集合, A_{K+L+1} 表示港口区块栅格集合; A 为规划区域所有区块栅格集合。

1.3.2 参数

I 为规划区域栅格地图列数, $i=1,2,\dots,I$; J 为规划区域栅格地图行数, $j=1,2,\dots,J$; a_{ij} 为栅格地图中第 i 列第 j 行的栅格; R_{a_i} 为栅格 a_{ij} 与其所有相邻栅格之间关联度之和; $r(a_{ij},a_{i'j'})$ 为栅格 a_{ij} 与栅格 $a_{i'j'}$ 之间的关联度, $|i-i'|+|j-j'|=1$ (栅格 a_{ij} 与栅格 $a_{i'j'}$ 直接相邻)或 $|i-i'|\cdot|j-j'|=1$ (栅格 a_{ij} 与栅格 $a_{i'j'}$ 间接相邻); A_{ka} 为栅格 a_{ij} 属于第 k 个区块栅格集合 A_k ; $r(A_{ka},A_{k'a'})$ 为栅格 a_{ij} 所属的第 k 个区块与栅格 $a_{i'j'}$ 所属的第 k' 个区块之间的关联度; α 为对角相邻系数; i_k 为第 k 个区块栅格集中任一栅格的列序号; j_k 为第 k 个区块栅格集中任一栅格的行序号; $card(A_k)$ 为第 k 个区块栅格集合 A_k 中的元素个数,即第 k 个区块所占栅格的数量。

1.4 建立模型

1.4.1 目标函数

本文的目标函数为各产业之间、各产业与港口、各产业与现有建筑物的综合关联度最大,即

$$\max f = \sum \sum R_{a_i} \tag{1}$$

其中:

$$a_{ij} \in A_k, k=1, 2, \dots, K \tag{2}$$

$$R_{a_i} = \sum_{(i',j') \in \tau} r(a_{ij}, a_{i'j'}), \tau = \{ (i', j') \mid |i-i'| + |j-j'| = 1 \text{ or } |i-i'| \cdot |j-j'| = 1 \} \tag{3}$$

$$r(a_{ij}, a_{i'j'}) = \begin{cases} r(A_{kaij}, A_{k'ai'j'}), & |i-i'| + |j-j'| = 1 \\ \alpha \cdot r(A_{kaij}, A_{k'ai'j'}), & |i-i'| \cdot |j-j'| = 1 \end{cases} \tag{4}$$

1.4.2 约束条件

1) 面积约束

$$A = A_0 \cup A_1 \cup A_2 \cup \dots \cup A_K \cup A_{K+1} \dots \cup A_{K+L} \cup A_{K+L+1} \tag{5}$$

式(5)表示各个区块栅格数之和等于规划区域总栅格数。

2) 唯一性约束

$$a_{ij} \in A_k, \forall i=1, 2, \dots, I, j=1, 2, \dots, J, k=0, 1, 2, \dots, K, K+1, \dots, K+L, K+L+1 \tag{6}$$

$$A_k \cap A_{k'} = \emptyset, \forall k, k'=0, 1, 2, \dots, K, K+1, \dots, K+L, K+L+1 \text{ 且 } k \neq k' \tag{7}$$

式(6)(7)保证了每一栅格属于且仅属于一个区块。

3) 相对集中连续性约束

$$\left| i_k - i_{k'} \right|_{\max} \text{ and } \left| j_k - j_{k'} \right|_{\max} \leq 1.5 \cdot \left[\sqrt{\text{card}(A_k)} \right], k=1, 2, \dots, K \tag{8}$$

式(8)保证了同一产业区块中的栅格分布是相对集中的,不会过度狭长。

2 求解算法

理论上,可利用穷举法在产业区布局的具有有限个可行解中找到最优解,但是实际上这样是不可行的,当栅格划分得越细,可行解的数量就越多,会出现组合爆炸的情况。因此,求解产业区布局这类 NP 问题,一般采用遗传算法进行求解,但是传统的启发式算法在全局寻优能力和收敛稳定性都有一定缺陷。本文采用多智能体进化算法求解所建模型,一方面基于整数编码的多智能体进化算法编码与解码较为方便,收敛的解较一般算法优秀,另一方面符合解决问题的实际需要。

多智能体进化算法是将能够感知环境并反作用于环境的物理的或虚拟的实体作为智能体,多个智能体为达到特定目的进行相互作用而形成的计算系统模型。在解决排列最优问题上,通常的做法是将随机产生的多智能体固定在多智能体网格中,每个智能体为了增加自身能量而与周围的智能体展开竞争,竞争中处于能量低的智能体通过跟周围能量高的智能体结合提升自身能量,竞争的同时,周围能量最高的智能体通过自学习来增加能量,从而提升整个系统的最高能量,达到求解目标。该算法主要包括竞争、淘汰和自学习3个主要操作,算法流程如图2所示。

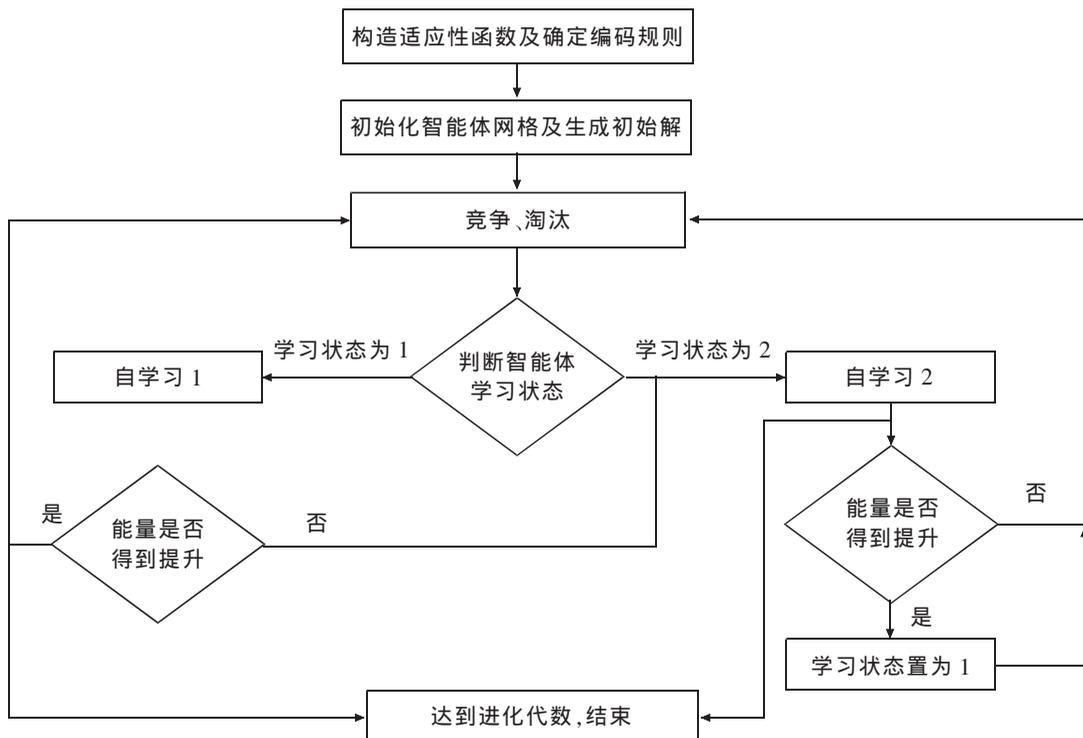


图2 多智能体进化算法流程示意图

Fig.2 Flow chart of multi-agent evolutionary algorithm

竞争:指网格中每一个智能体与其领域内的智能体竞争,将智能体网格看做一个球面,竞争域为与该智能体距离不超过1的8个智能体网格。

淘汰:根据多智能体竞争的结果,从竞争域中寻找能量最大的智能体,如果当前智能体不是竞争域中能量最大的智能体,则执行淘汰算子,即取竞争域中能量最大智能体的随机位置的随机长度的编码,在当前智能体中删除相应的编码,再将截取的编码部分插入到该智能体的相应位置。如果当前智能体是竞争域中能量最大的智能体,不执行淘汰算子。

自学习:每一个智能体的竞争域中能量最大的智能体会获得自学习的机会,来试图提高能量。自学习分为两种学习模式,当智能体学习状态为1时,采取第一种学习模式,即通过遍历交换编码来提升智能体能量,当智能体学习状态为2时,在第一种学习模式无法再提高智能体能量时,转入到第二种学习模式,即进

行随机长度编码换位来提升智能体能量。

初始时所有的智能体学习状态置为 1。第一种学习模式的操作步骤为:① 通过遍历交换两位编码,一旦交换后智能体能量得到提升,则退出学习;② 如果全部编码遍历后不能提升能力,则将智能体的学习状态置为 2,转入第二种学习模式。

第二种学习模式的操作步骤为:① 通过随机生成一个新的全排列 N , 设置标记 $flag=1$;② 从智能体的 N ($flag$) 位置开始,取出一段随机长度的编码,置于随机位置,得到新的智能体;③ 如果能量得到提升,转为步骤④,否则将 $flag$ 加 1,继续执行步骤②;④ 将智能体的学习状态置为 1,退出自学习。

3 实证分析

本文选取盐城滨海港工业园区为案例,根据相关规划,计划发展 6 种临港主导产业,总面积为 120 km²,其中 I1 为电力、热力的生产和供应业,规划用地 29.3 km²;I2 为专用设备制造业,规划用地 23.7 km²;I3 为化学原料和化学制品制造业,规划用地 16.4 km²;I4 为汽车制造业,规划用地 30.1 km²;I5 为有色金属冶炼和压延加工业,规划用地 12.8 km²;I6 为废弃资源综合利用业规划用地 7.7 km²;其余为预留用地。通勤路作为主干道 x ,新州路作为主干道 y 。各主导产业之间关联度如表 1。关联度值代表一产业区块(港口、道路)与另一产业区块(港口、道路)之间的关联程度,越大则表示之间的关联度越高,为 0 则没有关联度,为负值即为两产业(港口、道路)之间排斥。

表 1 滨海港工业园区主导产业及关联度
Tab.1 Leading industries and relevance degree of Binhai port industrial zone

关联度	港区	I1	I2	I3	I4	I5	I6	预留用地	主干道 y	主干道 x
港区	5	1	1	2.5	2.5	3	0.5	0	0	0
I1	1	5	0	-0.5	0	2.5	1.5	0	1	0
I2	1	0	5	-0.5	2	0	0.5	0	1	0.5
I3	2.5	-0.5	-0.5	5	0	0	0.5	0	1	1
I4	2.5	0	2	0	5	2.5	0.5	0	3	2.5
I5	3	2.5	0	0	2.5	5	1	0	1	0
I6	0.5	1.5	0.5	0.5	0.5	1	5	0	0.5	0.5
预留用地	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0
主干道 y	0	1	1	1	3	1	0.5	0	0	0
主干道 x	0	0	0.5	1	2.5	0	0.5	0	0	0

将临港产业区栅格化处理,如图 3 所示,把临港产业区划分为 50 个完全相同的正方形栅格,各主导产业按面积大小划分为相应数量的栅格,即 I1 产业 11 格,I2 产业 8 格,I3 产业 6 格,I4 产业 11 格,I5 产业 5 格,I6 产业 3 格,预留用地 6 格。

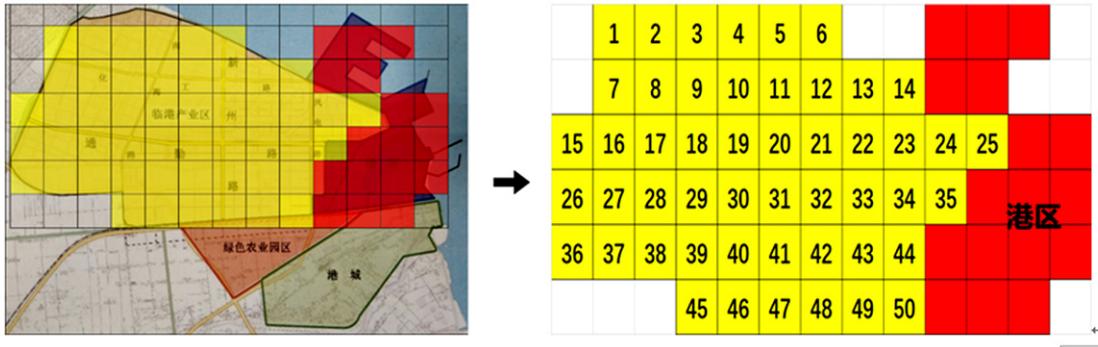


图3 滨海港工业园区栅格化处理

Fig.3 Gridding treatment of Binhai port industrial zone

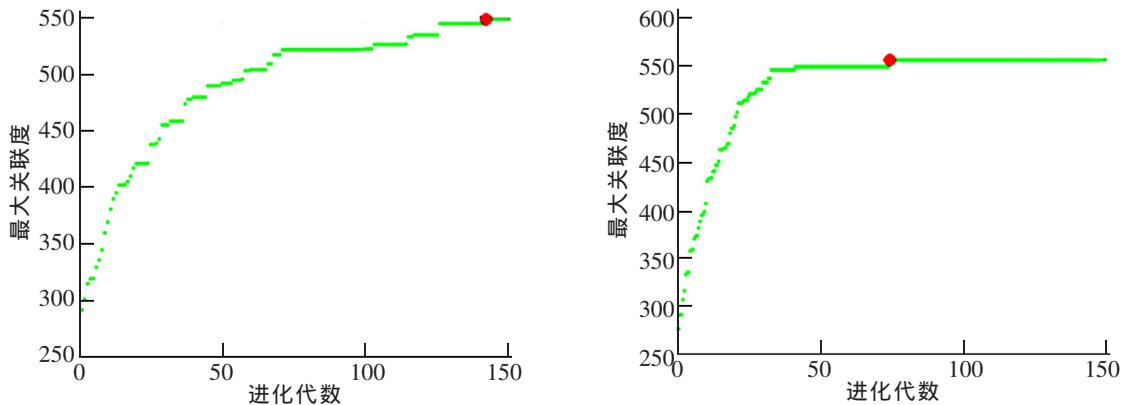
通过 MATLAB 编写多智能进化算法和遗传算法,设置多智能体进化算法的智能体网格为 20×20,以进化代数 150 代、200 代和 300 代各运行 10 次;设置遗传算法的种群规模为 500,交叉概率为 0.8,变异概率为 0.4,以遗传代数 5 000 代、10 000 代和 50 000 代各运行 10 次。运算初始将 50 个栅格随机排列,以 1~11 位的数作为 I1 产业,12~19 为 I2 产业,以此类推,保证 50 个栅格属于且仅属于一种产业,在此基础上计算当代关联度,随着进化代数或遗传代数的不断增加,最终达到较高的综合关联度,运行结果比较如表 2 所示。

表 2 多智能体进化算法与遗传算法运行对比

Tab.2 Comparison of multi-agent evolutionary algorithms and genetic algorithms

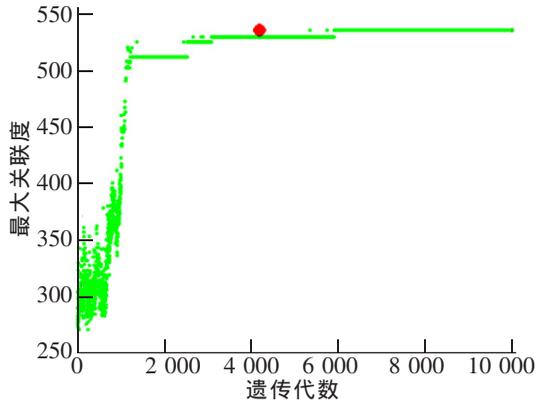
算法	代数	平均收敛代数	最少收敛代数	最大关联度	收敛至 500 以上概率/%
多智能体进化算法	150	141	121	547.6	100
	200	163	128	549	100
	300	186	145	555	100
遗传算法	5 000	3 212	2 813	492.6	0
	10 000	5 238	3 124	505.5	20
	50 000	31 454	21 453	520.8	40

对 50 格不规则临港产业区栅格模型,用 20×20 的智能体网格运算,在 30 次运算内最大关联度全部进化到 500 以上,而对于遗传算法,收敛能力和全局性明显不如多智能体进化算法,多智能体进化算法和遗传算法的最优收敛曲线比较如图 4。

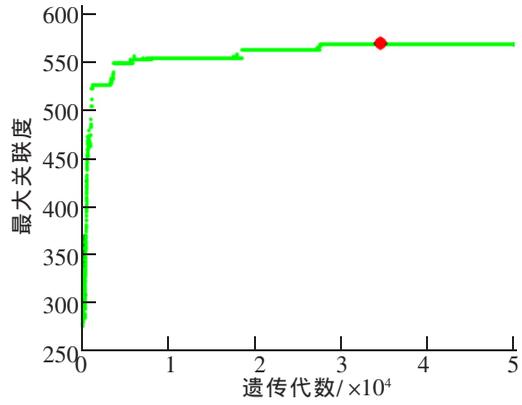


(a) 150 代多智能体进化算法收敛曲线

(b) 300 代多智能体进化算法收敛曲线



(c) 10 000 代遗传算法收敛曲线

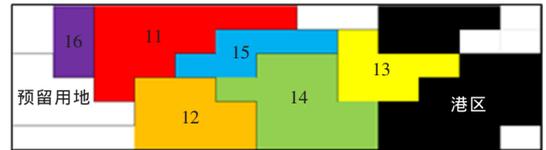


(d) 50 000 代遗传算法收敛曲线

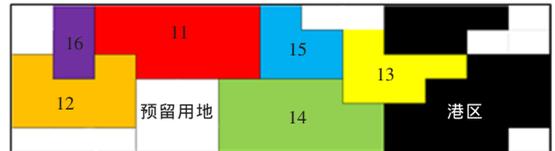
图 4 多智能体进化算法与遗传算法对比

Fig.4 Comparison between multi-agent evolutionary algorithm and genetic algorithm

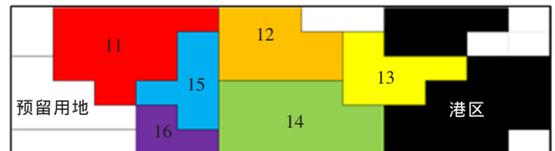
取最好的 3 次布局方案如图 5 所示,3 个方案的目标函数值分别为 549,550.8 和 555,相差较小,说明算法的稳定性和有效性。对比 3 个布置方案发现,区块 I3 化学原料和化学制品制造业、I4 汽车制造业临近港口较近,且与 I2 专用设备制造业和 I5 有色金属冶炼和压延加工业贴近主干道,制造业靠近港口和道路,有利于大量货物出口运输,I1 电力、热力的生产和供应业和 I6 废弃资源综合利用业位于产业园西部入口处,煤炭、天然气等产业原材料可较为方便地运送至产业区,且处理废弃资源更为方便。3 个方案可以供规划人员结合实际情况进行比选。



(a) 方案一布局



(b) 方案二布局



(c) 方案三布局

图 5 滨海港工业园区布局方案

Fig.5 Layout scheme of Binhai port industrial zone

4 结论

以栅格化方法为基础,构建了不规则临港产业园区功能区块布局的栅格化模型,突破了只能用规则矩形布置主导产业的限制,并将港区内已有建筑物和道路纳入到模型中,设计了可以应用于排列组合优化模型的整数编码多智能体进化算法,对模型进行求解,并以盐城滨海港工业园区布局规划为研究案例,验证了模型和算法的可行性,能更好地解决港口临港产业的布局的定量分析问题,具有较强的推广性。

参考文献:

[1] ZHANG H,ZHAO X. Quantitative analysis of organizational behavior of container shipping in the upper and middle reaches of the yangtze river based on hub-and-spoke network[J]. Journal of Coastal Research,2015,73(4):119-125.
 [2] MA Y,LUAN W,ZHANG R,et al. Research on the size and layout of iron ore wharf in bohai rim region based on freight demand [C]//International Conference on Logistics Engineering, Management and Computer Science, 2015.

- [3] 袁汝华,张长宽,林康,等. 江苏滩涂围区功能及产业布局分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2011,39(2):220-224.
- [4] 封学军,季婕,蒋柳鹏,等. 临港产业空间布局模型[J]. 河海大学学报(自然科学版),2017,45(5):419-424.
- [5] 夏柳娟. 陆港物流园区功能区布局优化及仿真研究[D]. 长沙:中南大学,2013.
- [6] 孙刘诚. 不规则物流园区功能区布局模型与算法[J]. 交通运输系统工程与信息,2017,17(2):168-175.
- [7] 杨婷,郑长江,马庚华. 基于地铁的带时间窗地下物流路径优化研究[J]. 华东交通大学学报,2019,36(4):67-74.
- [8] 钟伟才,刘静,刘芳,等. 组合优化多智能体进化算法[J]. 计算机学报,2004,27(10):1341-1353.
- [9] 袁志. 解排列优化的整数编码多智能体进化算法[J]. 软件,2011,32(5):24-26.
- [10] 饶卫平,杨任农,雷晓义,等. 基于多智能体遗传算法的无人机突防航线规划[J]. 计算机仿真,2015,32(4):39-43.
- [11] 周国雄. 基于多智能体算法的 CA 林火空间扩散模型[J]. 系统仿真学报,2018,30(3):824-830.

Study on Layout of Irregular Port Industrial Zone Based on Grid Method

Peng Guangyi^{1,3}, Ji Jie^{1,2}, Jiang Liupeng¹, Feng Xuejun¹

(1. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. CCB Engineering Consulting Co., Ltd., Nanjing 210000, China; 3. Jiangsu Xingyan Port & Shipping Group Co., Ltd, Yancheng 224000, China)

Abstract: In order to accurately and quantitatively obtain an industrial layout scheme of an irregular port–vicinity industrial zone, the harbor area and the target industrial land were divided into square grids of the same size by the grid method in this study. The relevancy degree between grids is determined by the known relevancy degree among industries, harbor areas and industries, and the irregular port–vicinity industry with the goal of maximizing the comprehensive relevancy degree among all grids is constructed. Finally, an integer–coded multi–agent evolutionary algorithm is compiled based on grid number sorting to obtain the layout scheme with the greatest comprehensive correlation. Taking the Yancheng Binhai Port as an example, the coastal port industry is divided into 50 grids. According to the planned area, the grids occupied by six industries to be developed are determined. The multi–agent evolutionary algorithm is compiled by MATLAB. The agent grids are set to 20×20 to run 10 times for 150, 200 and 300 generations of evolutionary algebra, and three layout schemes with the greatest correlation degree are obtained. The comprehensive correlation degree is 549, 550.8 and 550 respectively. The best result of running 50 000 generations of genetic algorithm is only 520.8, which shows that the model and algorithm have strong superiority in solving the problem of irregular layout of port–vicinity industrial zones quantitatively.

Key words: irregular port industrial zone; gridding; multi–agent evolutionary algorithm; layout optimization; Binhai port industrial zone