

文章编号:1671-6833(2021)01-0105-06

内地机场航空物流辐射范围及格局演变研究

李玉民, 刘 阳, 王显舜

(郑州大学 管理工程学院, 河南 郑州 450001)

摘 要: 为了合理测定机场航空物流辐射范围并研究区域内机场格局演变规律, 运用主成分分析法对内地 19 个机场 2007、2012、2017 年的航空物流综合实力进行评价, 接着采用基于断裂点模型的加权 Voronoi 图法对各机场 3 a 的航空物流辐射范围进行划分, 揭示其动态演变规律, 分析格局演变影响因素。研究发现: 我国内地机场在航空物流综合实力上呈现出“东南高, 西北低”的地域特征; 2007—2017 年间辐射范围呈扩张状态的机场大多位于我国中西部地区, 东南沿海、华北、东北地区机场的物流辐射范围大多无明显变化或呈收缩状态; 机场所在城市整体经济与外向型产业发展水平逐渐成为影响机场航空物流发展的关键因素。

关键词: 航空物流; 辐射范围; 格局演变; 主成分分析; 加权 Voronoi 图

中图分类号: F562 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2020.02.008

0 引言

航空物流在国民经济发展中扮演着重要角色, 航空物流产业被称作全球贸易与电商的驱动器, 2017 年空运货物的价值占到全球贸易金额的 34.6%。作为可以提供全球范围物流运输的交通方式, 航空物流对全球经济的贡献占全球 GDP 的 8%^[1-2]。机场航空物流辐射范围, 又被称作机场物流腹地, 指的是位于机场周围为机场提供航空货运量, 并且可以促进机场航空物流发展的最大地理范围和地域。机场作为航空物流发展的重要依托, 航空物流需求预测、航空公司货运航线规划等决策都与机场航空物流辐射范围密切相关^[3]。目前, 已有学者对机场与其所依附城市间的关系、机场航空物流发展影响因素、机场航空客运服务范围及可达性进行了一些研究^[2,4-6]: ①以往研究主要关注航空客运服务范围, 缺少有关航空物流辐射范围的研究; ②缺少考虑区域内机场的相互竞争力; ③以往研究对象多为单个或小范围区域内机场, 缺乏全国格局下机场辐射范围的划分及动态格局演变研究。

合理测定内地各大机场航空物流辐射范围是科学规划内地机场布局和航空货运网络布局的理

论基础和重要前提。在范围测定的基础上对近年来范围格局演变进行研究有利于揭示不同地区间产业经济发展程度与发展速度差异, 对区域经济和航空物流产业发展都有着重要的现实意义^[2]。基于以上分析, 将内地航空物流竞争力较强的机场作为研究对象, 选取 2007、2012、2017 年 3 个年份为研究时间节点, 构建综合评价指标体系, 采用主成分分析法对所选 19 个机场 3 a 的航空物流综合实力进行评价, 利用基于断裂点模型的加权 Voronoi 图法对机场航空物流辐射范围进行划分界定并进一步分析其演变规律, 探索影响机场航空物流格局演变的因素, 为制定机场物流相关规划提供理论依据, 为区域经济和航空物流产业发展提供决策参考。

1 研究对象、方法和数据来源

1.1 研究对象

研究对象包括 19 个机场: 三大门户复合枢纽机场——北京首都机场(IATA 代码: PEK)、上海浦东/虹桥机场(PVG/SHA)、广州白云机场(CAN); 8 大区域性枢纽机场——重庆江北机场(CKG)、成都双流机场(CTU)、武汉天河机场(WUH)、郑州新郑机场(CGO)、沈阳桃仙机场

收稿日期: 2019-10-17; 修订日期: 2019-12-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71501173); 河南省政府决策研究招标课题(2018B239)

作者简介: 李玉民(1969—), 男, 河南南阳人, 郑州大学教授, 博士, 主要从事物流与供应链管理研究, E-mail: li.yu.min@163.com。

(SHE)、西安咸阳机场(XIY)、昆明长水机场(KMG)、乌鲁木齐地窝堡机场(URC);此外还选取了 8 个具有较强航空物流实力的机场,分别为深圳宝安机场(SZX)、杭州萧山机场(HGH)、厦门高崎机场(XMN)、南京禄口机场(NKG)、天津滨海机场(TSN)、青岛流亭机场(TAO)、大连周水子机场(DLC)、海口美兰机场(HAK)。这 19 个机场的货邮吞吐量集中度高达 85%以上,同时也是近 10 a 内地航空货邮吞吐总量排名前 20 的机场(笔者将上海浦东和虹桥机场视为一个对象,研究对象实际为 19 个),代表了我国内地航空物流发展的最高水平。

1.2 研究方法

1.2.1 主成分分析法

主成分分析法可以将多个指标转化为少数不相关的综合性指标,在不损失指标价值的情况下对数据进行结构简化,可以克服主观赋值法客观性不足的缺点。拟采用主成分分析法对 19 个机场的航空物流综合实力进行评价。

1.2.2 基于断裂点模型的加权 Voronoi 图法

空间辐射范围测定通常采用的方法有引力模型法、断裂点法以及 Wilson 模型法等,但这些方法均无法完善地解决广区域多发生点的范围划分问题^[2,4-5]。基于扩展断裂点模型的加权 Voronoi 图法具有传统模型所不具备的划分不连续性问题能力,能够有效解决广区域多发生点范围划分问题^[6],故选用此方法对机场航空物流辐射范围进行测定。

(1)断裂点模型。断裂点模型是在“零售引力规律”基础上研究得出的理论^[5]。将断裂点模型应用到本文机场航空物流辐射范围研究中,其公式为

$$D_i = \frac{d_{ij}}{1 + \sqrt{Q_j/Q_i}} \text{ 或 } D_j = \frac{d_{ji}}{1 + \sqrt{Q_i/Q_j}} \quad (1)$$

式中: D_i 、 D_j 为相邻两机场 i 、 j 到断裂点的距离; d_{ij} 和 d_{ji} 表示两机场间欧氏距离; Q_i 、 Q_j 分别为两机场的规模。为能更好地反映出机场航空物流发展水平与潜力,采用机场航空物流综合实力对其进行评价,以综合实力代表机场规模。

设 a_i 、 a_j 为机场 i 、 j 的航空物流辐射范围扩张速度,由于 $d_{ij} = d_{ji}$, 则由式(1)可得

$$D_i/D_j = a_i/a_j = \sqrt{Q_i/Q_j} \quad (2)$$

则可知相邻两机场航空物流辐射范围扩张速度与其航空物流综合实力的平方根成正比,那么相邻两机场航空物流辐射范围可以看作是以自身航空

物流综合实力的平方根为权重不断扩张形成的。

(2)加权 Voronoi 图。Voronoi 图是一种重要的空间分析工具,功能为剖分平面空间^[7]。设平面上一个点集 $S = \{p_1, p_2, p_3, \cdots, p_n\}$, $n \in [3, +\infty)$, 且任意两点不共位、四点不共圆, d 为两点间的欧氏距离, x 为区域内任意点, 则有:

$$T_i = \{x: d(x, p_i) < d(x, p_j) \mid i \neq j\} \quad (3)$$

即在凸多边形 T_i 中,任意内点 x 到凸多边形发生点 p_i 的距离都小于 x 到其他发生点 p_j 的距离。

国外学者之后进行了拓展,提出了加权 Voronoi 图理论^[8-9]。加权 Voronoi 图将空间中不同发生点的权重引入模型中,其定义式为:

$$V_n(p_i, \lambda_i) = \bigcap_{i \neq j} \left\{ p \mid \frac{d(x, p_i)}{\lambda_i} \leq \frac{d(x, p_j)}{\lambda_j} \right\} \quad (4)$$

式中: $V_n(p_i, \lambda_i)$ 代表发生点 p_i 所在的空间区域; λ_i 、 λ_j 为 p_i 、 p_j 的权重($i = 1, 2, 3, \cdots, n$)。

综合以上分析,笔者提出将断裂点模型和加权 Voronoi 图结合,以机场航空物流综合实力的平方根为权重, $V_n(p_i, Q_i)$ 代表机场在 Voronoi 图中的航空物流辐射范围空间区域,则机场航空物流辐射范围划分模型可表示为

$$V_n(p_i, Q_i) = \bigcap_{i \neq j} \left\{ p \mid \frac{d(x, p_i)}{\sqrt{Q_i}} \leq \frac{d(x, p_j)}{\sqrt{Q_j}} \right\} \quad (5)$$

1.3 数据来源

机场相关指标数据来源于中国民用航空局全国机场生产统计公报、各机场官方网站和相关规划;机场所在城市相关指标数据来源于《中国统计年鉴》及相应城市的统计年鉴、国民经济和社会发展统计公报。

2 机场航空物流综合实力评价

2.1 指标体系构建

结合航空物流特点,从机场所在城市社会经济环境、周边交通运输条件、机场规模及物流水平方面选取 12 个指标构建机场航空物流综合实力评价指标体系^[4-6,10],具体如表 1 所示。

2.2 综合实力评价

运用 SPSS 22.0 软件对指标数据进行标准化处理,然后进行主成分分析。为更直观地反映各机场综合实力,对直接计算出的数值进行转换,使其变为正值。为确保原得分的大小排序不变,对原得分在 $[1, 10]$ 上进行变换^[11]:

$$Z'_i = \frac{Z_i - Z_{\min}}{Z_{\max} - Z_{\min}} \times 9 + 1 \quad (6)$$

式中: Z'_i 代表第 i 个机场的十分制综合实力得

表 1 机场航空物流综合实力评价指标体系

Table 1 The factors of comprehensive strength evaluation for aviation logistics of airport

目标层	准则层	基础指标层
机场航空物流综合实力	机场所在城市社会经济环境类	GDP/亿元
		人均 GDP/元
		进出口总额/亿元
		社会消费零售总额/亿元
		邮电业务总量/亿元
	机场周边交通运输条件类	高速公路密度/($\text{m}\cdot\text{km}^{-2}$)
		铁路网密度/($\text{m}\cdot\text{km}^{-2}$)
		机场航空货邮吞吐量/万吨
		航空货运周转量/亿吨公里
机场规模及物流水平类		班次密度/(班次/周)
		航线数量/条
		机场枢纽等级

注:①上海机场的机场规模及物流水平类指标数据通过综合考虑浦东和虹桥机场实际情况进行处理;②机场周边交通运输条件类中不选择水路运输指标原因在于航空运输的货物一般不适合进行水运。

分; Z_{\max} 为折算前综合实力得分中的最大值; Z_{\min} 为折算前综合实力得分中的最小值。经计算得到各机场综合实力和排名如表 2 所示。

表 2 各机场航空物流综合实力得分与排名

Table 2 The score of comprehensive strength and the ranking of aviation logistics of each airport

机场简称	2007 年		2012 年		2017 年	
	综合得分	排名	综合得分	排名	综合得分	排名
北京首都	9.64	2	8.91	2	8.58	2
上海浦东/虹桥	10.00	1	10.00	1	10.00	1
广州白云	8.67	3	7.42	3	7.09	3
重庆江北	3.92	7	4.21	6	4.45	6
成都双流	4.01	5	4.27	5	4.52	5
武汉天河	2.12	15	2.62	12	3.21	11
郑州新郑	1.92	17	2.51	14	3.64	8
沈阳桃仙	2.27	14	2.29	15	2.25	15
西安咸阳	3.36	9	3.51	8	3.62	9
昆明长水	3.97	6	3.58	7	3.36	10
乌鲁木齐地窝堡	1.76	18	2.02	17	2.12	17
深圳宝安	5.39	4	5.41	4	5.50	4
杭州萧山	2.94	11	3.38	9	3.71	7
南京禄口	2.61	12	2.67	11	2.72	13
厦门高崎	3.01	10	2.55	13	2.20	16
天津滨海	3.61	8	2.95	10	2.77	12
青岛流亭	2.12	16	2.16	16	2.26	14
大连周水子	2.46	13	1.98	18	1.90	18
海口美兰	1.00	19	1.00	19	1.00	19

航空物流综合实力不仅可以反映机场的发展势头,同时也反映出机场所在城市及地区的经济实力与发展潜力。由表 2 可知,内地机场在航空物流发展方面具有显著的地域分布不均衡特征,2007—2017 年间综合实力相对较强的机场大多分布在东南沿海地区,也有个别在中西部地区,东北地区机场综合实力相对较弱,总体呈现出“东南高,西北低”的分布规律。

3 航空物流辐射范围与格局演变分析

通过 Arcgis10.2 软件计算并划分 2007、2012、2017 年内地各机场的航空物流辐射范围,可以得到具体划分及格局演变情况。

通过像素填充法对分区加权 Voronoi 图面积进行计算^[12],得到各机场航空物流辐射范围面积及其占陆地国土空间的比重,具体结果及变化趋势如表 3 所示。

3.1 辐射范围分析

按 2017 年机场的航空物流辐射范围大小可将机场分为 4 类:

I 类机场的航空物流辐射范围较广,该类机场占陆地国土面积的比重均在 5% 以上,包括北京首都机场、乌鲁木齐地窝堡机场、成都双流机场、广州白云机场、沈阳桃仙机场和西安咸阳机场。

II 类机场的航空物流辐射范围中等,占陆地国土面积 1%~5%,该类包括重庆江北机场、郑州新郑机场、杭州萧山机场、武汉天河机场、昆明长水机场、南京禄口机场和厦门高崎机场。

III 类机场虽然航空物流综合实力很强,但是航空物流辐射范围较小,该类包括上海浦东/虹桥机场和深圳宝安机场。以上海浦东/虹桥机场为例进行说明,其航空物流综合实力虽位于内地首位,但辐射区域却相对较小,分析认为,导致该现象主要有两方面原因:首先,长三角地区机场密度较大,区域内存在许多航空物流实力强劲的机场,一定程度上限制了上海浦东/虹桥机场在内地的物流辐射范围扩张^[2];其次,上海位于东部沿海地区,加权 Voronoi 图法暂时无法测量其辐射范围在陆地空间以外的部分。深圳宝安机场原因与此类似,不再进行单独说明。

IV 类机场的航空物流综合实力较弱,航空物流辐射范围较小,包括青岛流亭机场、天津滨海机场、大连周水子机场和海口美兰机场。

通过机场综合分析可知,机场航空物流辐射范围与其综合实力密切相关,但并不完全是

正相关关系,如东南沿海地区多数机场的综合实力并不弱,但辐射范围却相对较小,说明除航空物流综合实力外,辐射范围还受到机场地理区位、所处区域机场密度及周围机场竞争关系的影响。

表 3 各机场 2007、2012、2017 年航空物流辐射范围占内地陆地国土空间比重
Table 3 The proportion of the radiation range of aviation logistics to land area in 2007, 2012, 2017

机场简称	辐射范围占比/%			2017 年比 2007 年辐射范围增减情况/%	变化趋势
	2007 年	2012 年	2017 年		
北京首都	17.33	15.77	14.95	-13.73	递减
上海浦东/虹桥	0.79	0.76	0.68	-13.92	递减
广州白云	5.54	5.21	4.84	-10.83	递减
重庆江北	3.03	3.31	3.37	11.22	递增
成都双流	17.13	19.62	20.61	20.31	递增
武汉天河	2.16	2.52	2.81	30.09	递增
郑州新郑	1.67	2.02	2.49	49.10	递增
沈阳桃仙	8.03	8.09	8.19	1.99	递增
西安咸阳	5.88	6.25	6.31	7.31	递增
昆明长水	8.10	5.40	4.55	-43.83	递减
乌鲁木齐地窝堡	23.94	24.86	25.17	5.14	递增
深圳宝安	0.31	0.31	0.32	3.26	递增
杭州萧山	1.41	1.40	1.46	3.55	先减后增
南京禄口	1.49	1.43	1.25	-16.11	递减
厦门高崎	1.09	1.04	0.97	-11.01	递减
天津滨海	1.04	0.89	0.85	-18.27	递减
青岛流亭	0.55	0.61	0.65	18.18	递增
大连周水子	0.17	0.17	0.17	0	基本不变
海口美兰	0.34	0.34	0.35	2.94	递增

注:“-”代表减少。

2007 年以来,郑州新郑机场、武汉天河机场、成都双流机场、重庆江北机场、西安咸阳机场、乌鲁木齐地窝堡机场、青岛流亭机场的航空物流辐射范围呈现不断扩张的趋势。其中郑州新郑机场是内地航空物流辐射范围扩张速度最快的机场,其辐射范围在近 10 a 间扩张了约 50%。

而上海浦东/虹桥机场、北京首都机场、广州白云机场、天津滨海机场、昆明长水机场、厦门高崎机场、南京禄口机场的航空物流辐射范围则呈现缩小状态。这些辐射范围呈现缩小状态的机场中不乏我国内地航空物流发展中的“领头羊”,由于近 10 a 来它们的航空物流发展速度慢慢地被周围地区机场超越,导致其航空物流辐射范围不断缩小。此外,通过 3 个时间点的对比发现,近年来深圳宝安机场、海口美兰机场、大连周水子机场、沈阳桃仙机场、杭州萧山机场的航空物流辐射范围虽有些许扩张或收缩趋势,但总体上几乎无变化。

3.2 格局演变与趋势分析

通过对比 2007、2012、2017 年物流辐射范围及表 3 辐射范围占比变化可以发现,内地机场的航空物流辐射范围格局近年来总体上变化并不显著,但局部地区存在较为明显的变化。

通过对这些机场区位及变化趋势进行综合分析发现,航空物流辐射范围呈扩张态势的机场多数位于我国中西部地区,而东南沿海、华北、东北地区机场航空物流发展速度相对中西部地区较为缓慢,这些地区机场航空物流辐射范围多呈现收缩或者变化不明显的状态。

3.3 格局演变影响因素分析

在机场航空物流综合实力测算中,通过对因子荷载矩阵与主成分贡献率分析发现,2007 年对机场航空物流综合实力影响最大的三因素分别为机场航空货邮吞吐量、货运周转量与高速公路密度;2012 年影响最大的三因素变化为机场航空货邮吞吐量、高速公路密度、进出口总额;2017 年影响最大的三因素又变化为进出口总额、GDP、机场航空货邮吞吐量。这说明机场航空物流发展的核心影响因素已逐渐由起初机场的自身航空物流基础条件、周边交通网络状况转变为机场所依附城市的整体经济与外向型产业发展水平。

中西部地区航空物流发展态势良好,是因为近年来随着“一带一路”、西部大开发及长江经济带等国家重大战略的提出和实施,中西部地区的区位和政策优势逐渐显现,中西部经济发展迎来黄金时期。与此同时,近 10 a 来我国内地机场的航空物流货运已深度融入全球产业链与供应链之中,作为内陆地区对外开放的桥头堡,中西部地区机场及其周边区域的外向型、航空亲和性产业发展较快。而东南沿海地区、华北地区及东北地区的大多数城市 2007—2017 年处于产业转型、企业转移时期,这些地区的整体发展速度与发展稳定性稍落后于中西部地区,导致机场航空物流辐射范围也随之呈现出相对稳定或缩小的态势。

4 结论

(1)我国内地机场在航空物流发展方面具有显著的地域分布不均衡特征,综合实力相对较强的机场大多分布在东南沿海地区,个别在中西部地区,而东北地区机场综合实力相对较弱,总体呈现出“东南高,西北低”的分布规律。

(2)我国内地机场按航空物流辐射范围面积可划分为 4 类,其中北京首都机场、乌鲁木齐地窝堡机场、成都双流机场、广州白云机场、沈阳桃仙机场和西安咸阳机场的航空物流辐射范围最广。

(3)2007—2017 年中西部地区大部分机场的航空物流辐射范围呈现扩张趋势;而东南沿海地区、华北地区、东北地区的机场航空物流发展速度与发展稳定性稍落后于中西部地区,大部分机场的航空物流辐射范围相对稳定或缩小。

(4)机场所在城市整体经济与外向型产业发展水平逐渐成为影响我国内地机场航空物流发展的关键因素,同时也在时刻影响着内地机场航空物流辐射范围格局的变化。

(5)机场航空物流辐射范围的大小与自身航空物流综合实力的强弱并不完全成正相关,辐射范围还受到机场自身地理区位、所在地区机场密度和周围机场发展情况的影响。

此外,采用基于断裂点模型的加权 Voronoi

图法划分得到机场航空物流辐射范围,从方法的应用角度来看合理性较强,但该方法暂时无法测定机场航空物流辐射范围在陆地国土空间以外的部分,得到的辐射范围有时并不完全反映机场的实际情况,有待进一步研究与完善。

参考文献:

[1] 李艳华. 民航运输对于经济增长关系的再实证: 2002~2012 年[J]. 工业技术经济, 2015, 34(6): 10-16.

[2] 潘竞虎, 从忆波. 中国民用机场可达性与服务范围测度[J]. 经济地理, 2015, 35(2): 46-53.

[3] 马庚华, 杜牧青, 张小丽. 不确定因素下的综合运输网络容量可靠性分析[J]. 郑州大学学报(工学版), 2018, 39(1): 1-6.

[4] 陈思宇. 成都双流机场发展潜力分析[D]. 成都: 西南财经大学, 2013.

[5] 陈雨亭, 曾小舟, 王进贤. 基于改进 Wilson 模型的机场辐射范围研究[J]. 华东交通大学学报, 2017, 34(5): 56-64.

[6] 冯社苗. 基于加权 Voronoi 图的民航机场空间服务范围研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2013, 13(5): 140-144.

[7] 刘梦丽, 王伟, 刘静玉, 等. 中原城市群城市引力范围界定及演变格局[J]. 地域研究与开发, 2017, 36(4): 49-54.

[8] OKABE A, SATOH T, FURUTA T, et al. Generalized network Voronoi diagrams: concepts computational methods, and applications[J]. International journal of geographical information science, 2008, 22(9): 965-994.

[9] WILEBORE B, COOMES D. Combining spatial data with survey data improves predictions of boundaries between settlements[J]. Applied geography, 2016, 77: 1-7.

[10] 李玉民, 郭利利, 刘旻哲. 基于 AHP-TOPSIS 的物流园区综合竞争力评价模型研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2014, 35(6): 125-128.

[11] 马占新. 数据包络分析模型与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 50-110.

[12] 马立玲, 张有会. 分区加权 Voronoi 图的性质及其面积计算[J]. 计算机科学, 2011, 38(2): 195-198.

**Delimitation and Evolution Pattern of Chinese Airports' Aviation
Logistics Space Radiation Scopes**

LI Yumin, LIU Yang, WANG Xianshun

(School of Management Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: It was significant to delimit reasonably the space radiation scope of airport aviation logistics and to study on the evolution pattern of airports in the development and decision-making of airport. The principal component analysis method was used to evaluate the aviation logistics comprehensive strength of 19 large airports in 2007, 2012 and 2017 in China. On the basis of this, the weighted Voronoi diagram method based on the breaking point model was adopted to divide the aviation logistics radiation scope of each airport, which revealed their evolution pattern and influencing factors of evolution in recent years. The paper drew the following conclusions: China's eastern and southern airports had strong comprehensive strength in aviation logistics, that of western and northern regions was weak. In recent years, most of the airports that their aviation logistics radiation ranges expanded, were located in the central and western regions of China. Most of the airports that their radiation ranges shrank and had no significant change were located in the southeast coast, north and northeast of China. The overall economic and export-oriented industry development of the city where the airport was located had gradually became key factors affecting the development of airport aviation logistics.

Key words: aviation logistics; space radiation scope; evolution pattern; principal component analysis method; weighted Voronoi diagram

(上接第 14 页)

**Multimodal Multi-objective Differential Evolution Algorithm Based
on Two-stage Search**

WANG Shenwen^{1,2}, ZHANG Jiaying^{1,2}, CHU Xiaokai^{1,2}, LIU Hong³, WANG Hui⁴

(1. School of Information Engineering, Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, China; 2. Laboratory of Artificial Intelligence and Machine Learning, Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, China; 3. Tel Terminal Laboratory, China Academy of Information and Communication, Beijing 100191, China; 4. School of Information Engineering, Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330099, China)

Abstract: In multimodal multi-objective optimization problem, the same position of Pareto front often corresponded to multiple Pareto optimal solutions in decision space. However, the existing multi-objective optimization algorithms could only obtain one of the Pareto optimal solutions. Therefore, in this paper, a two-stage search multimodal multi-objective differential evolution algorithm was proposed, which divided the optimization process into two stages: elite search and partition search. In the elite search stage, elite mutation strategy was used to generate high-quality individuals to ensure the search accuracy and efficiency of the population. In the stage of partition search, the decision space was divided into several subspaces, and the detected population was used to explore each subspace in depth, so as to reduce the complexity of the problem and to improve the expansion and uniformity of the population in the decision space. The performance of the algorithm was compared with five classical algorithms NSGAI, MO_Ring_PSO_SCD, DN-NSGAI, Omni-Optimizer, MMODE on 18 multimodal and multi-objective optimization test functions, such as MMF1. Experimental results showed that there were 16 test functions in the performance index of Pareto approximation (PSP) of the proposed algorithm, which were better than the other five comparison algorithms.

Key words: multimodal multi-objective optimization; differential evolution; two-stage search; elite variation; partition search