

黄洁,王姣娥. 枢纽机场的航班波体系结构及其喂给航线的空间格局研究[J]. 地理科学, 2018, 38(11): 1750-1758. [Huang Jie, Wang Jiaoe. Wave-system Structures of Airport Hubs and Spatial Patterns of Possible Indirect Connections. Scientia Geographica Sinica, 2018, 38(11): 1750-1758.] doi: 10.13249/j.cnki.sgs.2018.11.002

# 枢纽机场的航班波体系结构及其 喂给航线的空间格局研究

黄洁<sup>1</sup>, 王姣娥<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所/中国科学院区域可持续发展分析与模拟重点实验室, 北京 100101;  
2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049)

**摘要:** 基于航班波的概念, 提出了航班波识别的技术流程和喂给航线的研究方法, 并对全国十大枢纽机场的航班波体系进行了研究与甄别。在此基础上, 进一步分析了拥有明显航班波体系的枢纽机场的喂给航线空间格局演化。研究发现: ①北京首都、上海浦东、广州白云和昆明长水机场拥有较为明显的航班波体系; 成都双流、深圳宝安、西安咸阳机场的航班波体系尚不清晰。②首位航空公司拥有足够的航班数量是机场构建航班波的必要但非充分条件, 时刻资源的优化配置更为关键。③北京首都、上海浦东和广州白云三大枢纽机场的国际喂给航线和国内喂给航线在空间上存在显著的差异, 且总体上与地理临近性无关, 更多地与首位航空公司的航线网络扩张相关。

**关键词:** 航班波; 航班波体系; 枢纽机场; 喂给航线; 时刻资源

**中图分类号:** K902   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1000-0690(2018)11-1750-09

枢纽机场是航空运输网络的重要组成部分, 主要功能可以概括为: 第一, 提供密集的航线和高质量的服务, 运送大量的旅客。因此, 一些研究从航线布局的角度出发, 构建轴辐网络的航空组织模式, 优化布局枢纽机场与支线机场<sup>[1,2]</sup>。第二, 有效运用高频率的航班为旅客提供便捷高效的中转航班, 形成喂给航线(feeder route)。枢纽机场形成喂给航线的关键是构建航班波体系(wave-system structure)。从航班时刻资源优化的角度出发, 部分研究围绕枢纽机场构建航班波体系展开, 以提升枢纽机场的航班连通性<sup>[3]</sup>。针对枢纽机场的两大功能, 第一部分研究侧重从空间的角度提升航空网络基础设施的连通效率, 而第二部分研究侧重从时刻资源和喂给航线的角度提升枢纽机场的连通性。在跑道、塔台、枢纽机场数量等基础设施资源有限的情况下, 构建航班波体系成为提升航空运输网络连通性的重要手段。可以说, 航班波的研究将航空运输网络的连通性从单一的空间维度转变为时间、空间的双重维度。

自2010年以来, 航空运输快速发展, 围绕枢纽机场均已形成了密集的航线网络, 航班数量逐渐达到饱和。鉴于此, 航班波的构建不仅能够从时间层面优化枢纽机场的航班时刻资源, 而且能够从空间层面提升喂给航线的连通性, 有利于提升整个航空运输网络的效率<sup>[4]</sup>。自1998年Bania等从理论上提炼出航班波的结构后, 学者将其理论运用到20多个枢纽机场时刻资源配置的研究上, 并且分析了枢纽机场的中转能力<sup>[5,6]</sup>。研究发现, 只有大型航空公司具备在枢纽机场构建航班波体系的能力。因此, 航班波的研究普遍聚焦到在枢纽机场航班数量最大的航空公司。例如, 德国汉莎航空公司、荷兰皇家航空公司就分别在慕尼黑机场、阿姆斯特丹机场形成了完整的“四进四出”航班波体系; 美国航空公司和美国联合航空公司均在芝加哥奥黑尔机场构建了各自的航班波体系<sup>[7,8]</sup>。

目前, 国际学者研究枢纽机场的中转能力主要分为两类: 一是聚焦在设施网络、航线布局和拓扑网络连通性研究<sup>[9,10]</sup>, 二是分析枢纽机场的时刻

收稿日期: 2017-11-20; 修订日期: 2018-03-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(41722103)资助。[Foundation: National Natural Science Foundation of China (41722103).]

作者简介: 黄洁(1988-), 女, 广西桂林人, 助理研究员, 主要从事交通地理与大数据研究。E-mail: huangjie@igsnr.ac.cn

资源配置、航班波体系和喂给航线连通性等<sup>[11-13]</sup>。相关研究普遍认为时刻资源配置与空间上的喂给航线布局应该是枢纽机场快速发展阶段提升连通性的重要因素。国内只有极少量的文献开始研究枢纽机场的中转能力和航班波体系<sup>[12-14]</sup>。大部分研究停留在空间层面,包括以轴辐理念设计枢纽机场与支线机场、航空网络结构特征、航空流的空间格局、航空联系与区域差异、航线网络演化等<sup>[15-27]</sup>。针对航班波与喂给航线的研究还罕有。并且,现有文献对于枢纽机场航班波的概念理解存在偏差,在研究中将航班数量在时刻上的分布波动(含波峰和波谷)误以为是航班波<sup>[16]</sup>,没有考虑航班之间中转的可能性。由于缺乏对航班波核心内涵的理解,目前的研究还不能解决枢纽机场航班波形成的关键问题。

总体而言,国内学术界需要对航班波的基本概念进行更正,并且提炼航班波体系和喂给航线的基础理论,将枢纽机场连通性的研究从空间层面拓展到时空二维层面。实践上,国内学者需要提出可行的识别方法和技术流程,为快速发展的民航运输业、国际枢纽机场建设提供技术支持。因此,本文将提出航班波识别的技术方法与流程,并分析中国十大机场主要航空公司的航班波体系结构;针对识别出的航班波体系,解析枢纽机场的喂给航线空间布局,进而为枢纽机场连通性的提升提供建议。

## 1 航班波概念与识别方法

### 1.1 航班波和航班波体系

航班波(connection wave)是指航空公司在枢纽机场将进港航班和出港航班集中安排,实现到达波与离港波基本同步,促进到达航班与出发航班的有效衔接,进而确保中转航班衔接紧凑<sup>[1]</sup>。一个航班波由到达波和离港波组成。所谓到达波,即在指定的时间窗口有连续到达的航班。类似地,离港波是指在指定的时间窗口存在连续起飞的航班。时间窗口内的航班可以实现有效的转机,并形成航班之间的实质连通。时间窗口的划定由时间中心和转机时间来决定。时间窗口的时刻以时间中心 $t_c$ 为轴对称分布,如图1所示。考虑乘客转机所需的时间,一般假定有最小转机时间和最大转机时间,前者为保障乘客有足够的时间换乘,后者则为减少乘客等候的不确定性。假设国际航班(包括港澳台,下同)的最大转机时间为 $I_{\max}$ ,最小转机时间

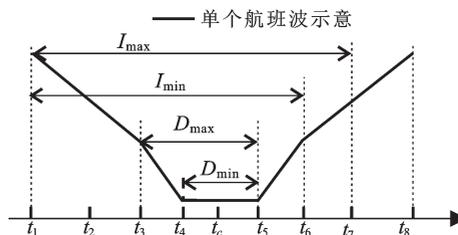


图1 航班波的时间窗口示意图

Fig. 1 Time windows of a connection wave

为 $I_{\min}$ ;国内航班的最大转机时间为 $D_{\max}$ ,最小转机时间为 $D_{\min}$ 。各个时刻的划定依据如下:最早一班国际到达航班在 $t_1$ 时刻,中转航班最早可在时刻 $t_6$ 出发、最晚可在时刻 $t_7$ 出发;与 $t_1$ 对称,设定 $t_8$ 。以 $t_c$ 为中心,最早一班国内到达航班在 $t_3$ 时刻,中转航班最晚可在时刻 $t_5$ 出发;以 $t_c$ 为中心,最晚一班国内到达航班在 $t_4$ 时刻,中转航班最早可在时刻 $t_5$ 出发。各个时间窗口的时刻由以下数学等式决定: $t_1=t_c+0.5I_{\min}-I_{\max}$ , $t_2=t_c-0.5I_{\min}$ , $t_3=t_c+0.5D_{\min}-D_{\max}$ , $t_4=t_c-0.5D_{\min}$ , $t_5=t_c+0.5D_{\min}$ , $t_6=t_c-0.5D_{\min}+D_{\max}$ , $t_7=t_c+0.5I_{\min}$ , $t_8=t_c-0.5I_{\min}+I_{\max}$ 。

由于国际航班和国内航班所需的转机时间不同,所以时间窗口的设定针对不同的航班类型有所区别。根据时刻的划定,可中转的航班有4种类型:① $t_1\sim t_2$ 时间窗口内的国际到达航班→转机→ $t_6\sim t_8$ 时间窗口内的国际出发航班; $t_3\sim t_4$ 时间窗口内的国内到达航班→转机→ $t_5\sim t_6$ 时间窗口内的国内出发航班。 $t_1\sim t_2$ 时间窗口内的国际到达航班→转机→ $t_6\sim t_8$ 时间窗口内的国内出发航班; $t_1\sim t_3$ 时间窗口内的国内到达航班→转机→ $t_7\sim t_8$ 时间窗口内的国际出发航班。

基于航班波的概念,航班波体系是指1 d之内航空公司在机场的所有航班形成的多个连续航班波。以 $T$ 分钟为2个时间中心的时间间隔,1 d之内的时间中心数量 $N=1440/T$ 。那么对于时间中心 $C_k$ ,可供选择的到达航班数量和出发航班数量分别记为 $A_k$ , $D_k$ ,其中 $k=1,2,\dots,N$ 。如果在多个连续的时间中心 $C_k$ 都存在足够数量可供乘客选择的到达航班 $A_k$ 和出发航班 $D_k$ ,那么可以认为一个航空公司在该机场航班波体系形成。

### 1.2 喂给航线和可中转航班

在航空运输中,喂给航线通常连接枢纽机场和它的主要支线机场,形成轴辐组织模式,类似于

航运中的“母港”和“喂给港”。喂给航线指枢纽机场与喂给机场之间存在一定数量的可中转航班,即在空间上和航班时刻上均与枢纽机场保持着高连通性。其中,可中转航班的数量越大,表示该条航线对于枢纽机场的“喂给”作用越大,乘客选择该中转航班的可能性越大。分析喂给航线有助于从空间上剖析枢纽机场的中转能力与范围。

可中转航班是指对于任意时间中心  $t_c$ , 在其时间窗口内可供乘客选择的中转航班数量。到达时间窗口内可供乘客选择的到达航班数量为  $A$ , 出发时间窗口内可供乘客选择的出发航班数量为  $D$ 。那么枢纽机场在以  $C$  为中心的时间窗口内可以为乘客提供  $A \times D$  个中转航班的选择,大大提升了乘客选择中转航班的可能性。乘客中转通常会选择同一航空公司的航班,因此航班波体系的研究需要精确到机场的不同航空公司。因此,本文将在机场航班数量最大的航空公司确定为首位航空公司。

### 1.3 航班波识别技术流程

综上所述,本文提出航班波体系的研究方法,如图2。由于机场拥有较大规模的旅客吞吐量是构建航班波的重要基础,因此本文将旅客吞吐量作为确定研究对象的关键指标之一。首先,选取旅客吞吐量排名前10位的机场,再筛选其首位航空公司的所有航班,确定时间间隔  $T$ , 通过 Matlab 编程划定每个时间中心的时间窗口并计算可中转航班数量  $A_k$ 、 $D_k$ , 实现航班波可视化,进而甄别航班波体系。针对识别出航班波体系的枢纽机场, Matlab 编程识别每个中转航班的出发、中转和到达机场,分析该机场为其他机场提供的可中转航班数量及其空间分布规律。

本文以每隔 5 min 确定一个时间中心,在给定时间窗口内搜索可中转航班的数量,进而识别枢纽机场的航班波体系。将国际航班的转机类型的最小转机时间设置为  $I_{\min} = 90 \text{ min}$ , 最大转机时间  $I_{\max} = 210 \text{ min}$ ; 将国内航班的转机类型的最小转机时间设置为  $D_{\min} = 60 \text{ min}$ , 最大转机时间为  $D_{\max} = 150 \text{ min}$ 。

## 2 枢纽机场及首位航空公司确定

### 2.1 研究时段

本文将选取 2010 年和 2015 年作为研究时段。首先,部分枢纽机场在这一时段开始面临设计容量不足而旅客吞吐量日益增长的问题。其

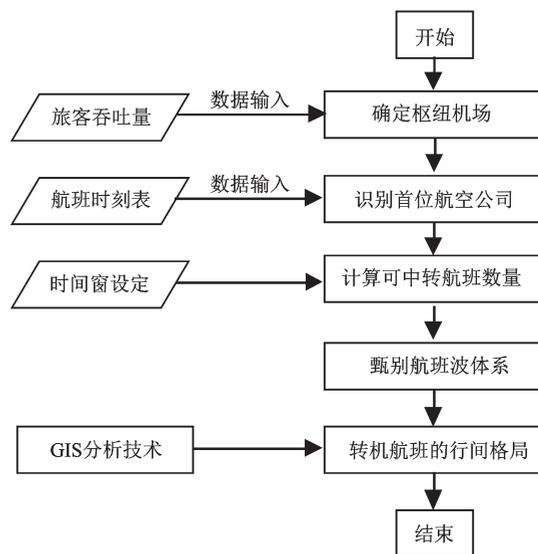


图2 航班波体系的研究方法

Fig.2 Research framework of wave-system structures

次,航空公司在这期间开始逐步构建航班波体系。比如,东方航空公司在2011年提出要在上海浦东机场构建“四进四出”的航班波。

### 2.2 研究对象

为确定枢纽机场和首位航空公司,本文整理了2010年和2015年全国(不含港澳台)航班计划数据(来源于OAG)、中国城市统计年鉴、从统计看民航、各地交通统计公报等数据。OAG数据库由每年的航班计划表组成,包括航班号、航空公司、出发时刻、到达时刻、每年航班频率、每周运营日期、座位数等信息。由于周六是各个机场一周中最繁忙的一天,起降航班数量最大。因此,本文以周六的航班时刻表作为研究数据。在处理数据时,将共享航班号的航班进行了合并。

本文以旅客吞吐量为基准,确定排名前10位的机场,如表1所示。整体来看,2010年和2015年的前10位枢纽机场基本保持不变,只在小范围内浮动。从航班数量占比分析,中国国航(简称“国航”)、中国东方航空(简称“东航”)、中国南方航空(简称“南航”)是中国民航运输业的“三大巨头”。2010年三大航空公司的航班数量占全国的62.95%,2015年下降至56.4%。三大航空公司占据主要枢纽机场首位航空公司的位置。其中,国航在北京首都、南航在广州白云、东航在上海虹桥机场的航班数量占比均保持在50%左右。从航班占比分析,除上海浦东机场外,其余前9位机场的

表1 枢纽机场的首位航空公司

机场	旅客吞吐量排名		首位航空公司	航班数量占比 (%)	
	2010年	2015年		2010年	2015年
北京首都	1	1	国航	43.85	41.26
上海浦东	3	2	东航	45.60	43.02
广州白云	2	3	南航	48.90	48.88
成都双流	6	4	国航	36.97	33.19
深圳宝安	5	5	国航	37.53	31.54
上海虹桥	4	6	东航	59.23	54.83
昆明长水	7	7	东航	51.76	48.91
西安咸阳	8	8	东航	35.44	34.91
重庆江北	10	9	国航	25.24	21.83
杭州萧山	9	10	国航	23.86	21.34

表2 枢纽机场的航班波体系结构及变化

枢纽机场	航空公司	航班波体系	
		2010年	2015年
北京首都	国航	不清晰	四进四出
上海浦东	东航	四进四出	三进三出
广州白云	南航	二进二出	四进四出
成都双流	国航	不清晰	不清晰
深圳宝安	国航	不清晰	不清晰
上海虹桥	东航	不清晰	不清晰
昆明长水*	东航	不清晰	三进三出
西安咸阳	东航	不清晰	不清晰
重庆江北	国航	无	无
杭州萧山	国航	无	无

注:\*2010年数据来源于昆明巫家坝机场。

第二大航空公司均为南方航空。

### 3 枢纽机场的航班波体系结构演变

#### 3.1 航班波体系现状

航班波体系的形成通常是到达波和离港波同步,规律地出现波峰和波谷。截至2015年,全国只有8个机场开始出现航班波体系,仅北京首都、广州白云、上海浦东和昆明长水的航班波体系结构相对较为清晰(表2)。其中,北京首都、广州白云机场呈现出“四进四出”航班波体系,波峰和波谷从早上9点到晚上9点呈现出周期性连续分布规律(图3)。并且,上海浦东和昆明长水机场构建了“三进三出”的航班波体系。上海浦东机场的航班波分布在上午9~12点、下午4~6点和晚上8~10点之间。昆明长水机场的航班波分布在早、中、晚3个时段。成都双流、深圳宝安、上海虹桥和西安咸阳机场虽然呈现出一定数量的航班波,但是航班波体系结构并不清晰,无法识别波峰、波谷,航班波体系结构还不完善。

#### 3.2 航班波体系结构演变

航班波体系的提升可以表现为航班波密度的增加。2010~2015年,广州白云机场和昆明机场的航班波体系提升最为明显。广州白云机场由“二进二出”变为“四进四出”的航班波体系结构,航班波布局更紧凑和数量的增加提升了机场中转航班的运转效率。2010年,昆明巫家坝机场的航班波体系并不清晰。如图3 m,东方航空在昆明巫家坝机场提供给中转航班的离港航班数量在16点的时候接近0,即“航班波不连续”现象。2015年,新建

成的昆明长水机场规模远小于北京、上海、广州等机场,但是该机场通过构建“三进三出”航班波体系(图3n),航班波经历了从无到有的质变。

航班波体系的提升还可以表现为波峰和波谷的数量差异增大。上海浦东机场的航班波体系从“四进四出”变成“三进三出”,但是航班波体系结构更加明显。2010年,该机场的到达波和离港波都存在波峰和波谷差异小、可供选择的航班不集中等问题。2015年,波峰和波谷的差距明显增加,有助于到达航班和出发航班集中安排以形成航班波,形成机场周期性运转。这种时刻资源的集中布置有利于机场减少航班的平均运营成本,并且在更短的时间内提供更多的转机选择。

#### 3.3 航班波构建与航班数量关系

构建航班波体系需要航空公司在单个枢纽机场有足够数量的航班,因此全国只有旅客吞吐量排名前8的机场开始构建了航班波体系,这些机场的首位航空公司在一天之内的航班数量均大于150班。由于航班数量的限制,国航在重庆江北机场、杭州萧山机场尚未形成航班波体系。此外,成都双流、深圳宝安、上海虹桥和西安咸阳机场面临的主要问题是可供中转的出发航班、到达航班数量不足,在多数时刻低于10班航班。截至2015年,北京首都、上海浦东、广州白云和昆明长水机场已呈现出较为清晰的航班波体系,其首位航空公司的航班数量均大于350班/d。

较高频率的航班数量是构建航班波体系的必要而非充分条件。2010年,国航在北京首都机场

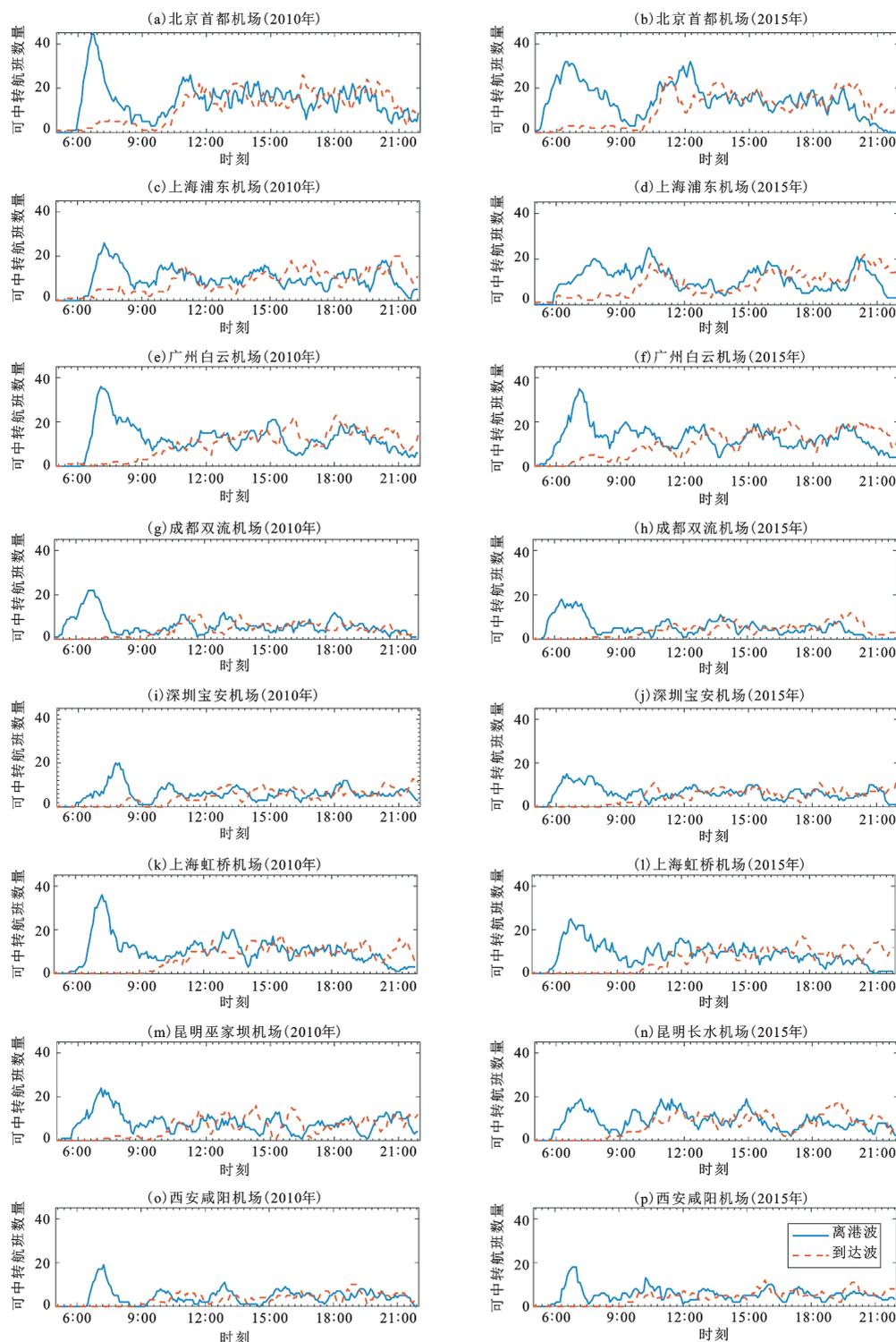


图3 主要枢纽机场的航班波体系(2010年和2015年)

Fig. 3 Wave-system structures of major airport hubs in 2010 and 2015

的航班数量是610班/d,形成了连续密集的出发波和到达波。虽然每个时刻可供中转乘客选择的出发航班和到达航班数量保持在15~20班,但是其航班波体系并不清晰。如上文所说,波峰和波谷无

法识别,中转航班没有形成周期性运转。2015年,国航在首都机场的航班数量下降到580班/d,但时刻资源利用更加优化,集中布局了到达波和出发波,航班波体系反而变得清晰了,并初步形成“四

进四出”结构,提升了中转航班的效率。因此,航班波体系的形成不是简单的航班数量提升,航班时刻资源的优化更为重要。

## 4 枢纽机场的喂给航线空间格局及演化

航班波体系是构建喂给航线的基础。航班波体系不完善的情况下,枢纽机场的喂给航线将呈现密度低、空间格局不明显的特点。航班波体系结构清晰的情况下,喂给航线将反应枢纽机场的连通方向、中转能力和功能。2010~2015年,只有北京首都机场、上海浦东机场和广州白云机场均构建了航班波。其他枢纽机场暂未配置完整的航班波体系。

### 4.1 国际喂给航线

从国际喂给航线的现状分析,三大机场的喂给航线数量接近;上海浦东机场的喂给航线提供的国际中转航班数量占比最高。①北京首都机场喂给航线的覆盖范围最广。2015年,北京首都机场的喂给航线覆盖了19个国家和地区的30个城市,主要服务于北美、欧洲和少数东南亚国家和地区;前3位喂给航线与洛杉矶、法兰克福和新加坡的机场构建联系,均超过130班。②上海浦东机场的喂给航线集中在东南亚国家和地区。2015年,覆盖了21个国家和地区的38个城市,其中,主要与曼谷、大阪、仁川、香港等机场构建了喂给航线,均超过了180班。上海浦东机场喂给航线提供的国际可中转航班数量占其可中转航班总数的34.67%,是北京首都机场和广州白云机场的两倍。③广州白云机场的喂给航线也集中在东南亚地区;前3位喂给航线分别是新加坡、加德满都、曼谷,在120~140班范围内浮动。

从空间分布的变化来看,三大枢纽机场的喂给航线拓展范围呈互补形势;北京的重点是北美航线,上海的重点是东南亚航线,广州的喂给航线分布兼顾北美和东南亚区域。2010~2015年,北京首都机场新建喂给航线11条,重点开拓了欧美市场,在休斯顿、斯德哥尔摩、巴黎等城市分别构建了近90班;上海浦东机场新建喂给航线10条,集中在东南亚地区,主要集中在普吉岛、那霸等;广州白云机场新建喂给航线13条,分布在东南亚和北美地区,与马累、暹粒等城市分别构建了至少50班喂给航线;与纽约和温哥华等城市分别构建了

近20班喂给航线。

从喂给航线的可中转航班数量变化分析,三大机场的空间互补性更为明显。北京首都机场在逐渐加强与欧美城市的联系,洛杉矶(+84班)、莫斯科(+55班)、伦敦(+33班);减少了与东南亚地区的可中转航班,分别在仁川、大阪等减少超过100班。相反地,上海浦东增加了出发或者到达韩国和日本多个城市的可中转航班;减少了出发或者到达洛杉矶、纽约、巴黎、法兰克福等城市的可中转航班。广州白云机场的可中转航班增加量集中在日本、泰国等国家,并少量增加了与澳大利亚部分城市的可中转航班;减少量则分布在越南、马来西亚等国家。

### 4.2 国内喂给航线

三大枢纽机场的喂给航线的空间格局存在明显差异(图4)。北京首都机场的重点是西南地区与东南沿海的主要城市;广州白云机场主要与中国南部的城市构建喂给航线;上海浦东机场的喂给航线空间分布均匀。北京首都机场喂给航线主要分布成都、深圳、杭州、重庆等城市(表3)。成都、深圳、杭州的乘客均可以通过北京中转到达100多个城市。类似地,重庆的乘客可以在北京中转飞往其他90多个城市。上海浦东机场前4位喂给航线分别来源武汉、沈阳、西安、大连。这些城市的乘客均可以通过上海中转到达其他50多个城市。广州白云机场的喂给航线主要来源于海口、三亚、杭州。这些城市的乘客均可以通过广州中转飞往其他60~80个目的地城市。

三大枢纽机场喂给航线的空间格局变化如图5所示,都在向空间均衡布局发展。首先,北京首都机场提升了与经济欠发达地区的联系,与小城市增加了可中转航班数量或者新建了喂给航线,降低了与东南沿海经济发达区域的可中转航班联系。上海浦东机场减少了与西安、长春、成都、重庆等优势喂给航线的可中转航班数量。再次,广州白云机场主要减少了与南部临近机场的可中转航班数量,提高了与哈尔滨、青岛、遵义等空间距离较远喂给航线的可中转航班数量。喂给航线的空间分布与地理临近性的相关性较弱,因为出发地与目的地距离越远,乘客选择该航线中转的经济效益越大。构建远距离的喂给航线可以大幅度提升乘客选择的可能性,进而扩大广州白云机场的空间辐射能力和中转航班的服务范围。

从喂给航线的变化来看,北京、上海、广州3座

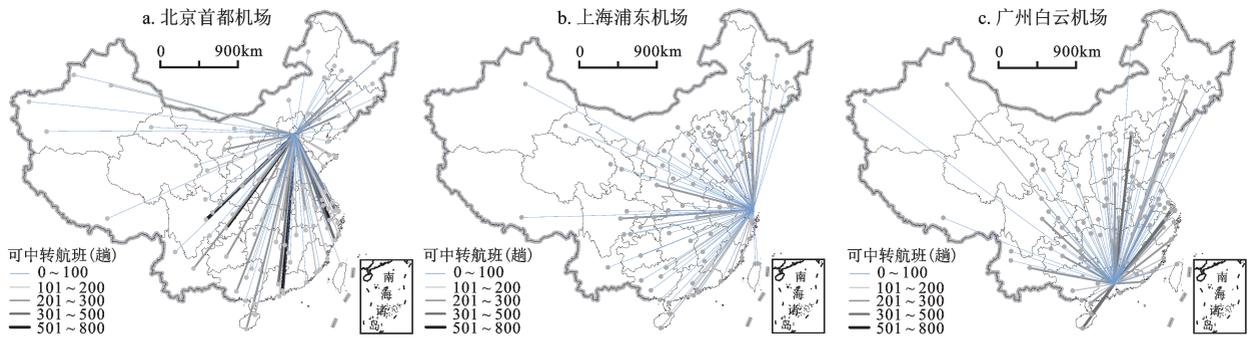


图4 2015年三大枢纽机场喂给航线的空间分布  
Fig. 4 Feeder routes of top 3 airports in 2015

表3 枢纽机场前10位喂给航线的城市列表

Table 3 Top 10 feeder routes of Capital Airport (Beijing), Pudong Airport (Shanghai), Baiyun Airport (Guangzhou)

排序	北京首都机场		上海浦东机场		广州白云机场	
	2010年	2015年	2010年	2015年	2010年	2015年
1	成都	成都	西安	武汉	海口	北京
2	深圳	深圳	成都	沈阳	北京	海口
3	重庆	杭州	武汉	西安	三亚	三亚
4	杭州	重庆	长春	大连	杭州	杭州
5	上海	上海	沈阳	哈尔滨	南京	上海
6	沈阳	西安	重庆	成都	上海	昆明
7	广州	广州	哈尔滨	桂林	武汉	成都
8	长春	温州	大连	温州	揭阳	南京
9	西安	哈尔滨	厦门	福州	长沙	湛江
10	哈尔滨	长春	温州	重庆	湛江	贵阳

城市之间的航空联系较为紧密,但是联系强度存在下降趋势(图5)。2010~2015年,北京首都机场喂给航线的第5位均是上海虹桥机场,分别可以提供400班以上;广州白云机场保持在第7位,分别可以提供450班以上。类似地,广州白云机场的喂

给航线始终与北京首都机场保持着强联系,分别可以提供450班左右;上海虹桥机场保持在前6位,分别可以提供300班以上。虽然上海浦东机场提供的可中转航班没有集中配置在北京首都机场和广州白云机场,但是上海虹桥机场提供大量的可中转航班与北京首都机场和广州白云机场联系。虹桥机场可以提供出发或者到达在北京首都机场、广州白云机场的可中转航班数量保持在400班以上,弥补了浦东机场喂给航线空间布局的盲点。

### 5 结论与讨论

本文重新解读了枢纽机场航班波和喂给航线的理论概念,提出了枢纽机场航班波体系的研究方法,并将其应用到中国枢纽机场的时刻资源空间配置研究中。主要结论如下:①轴辐式网络不仅需要航线网络的空间布局以增加城市对的覆盖面,更需要在枢纽机场构建航班波和喂给航线以吸引更多的旅客。目前,中国航空公司在枢纽机场的航班波体系尚处于起步阶段,只有北京首都、上海浦东、广州白云构建了较为明显的航班波体

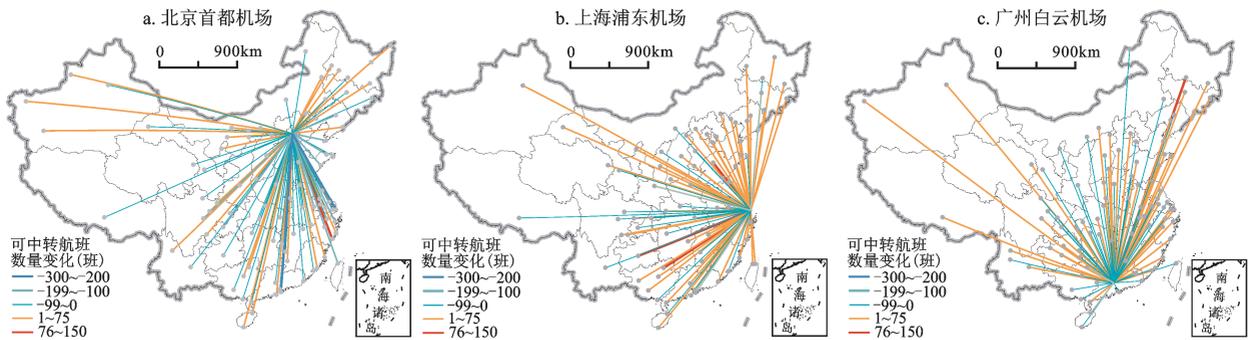


图5 2010~2015年枢纽机场喂给航线的空间格局变化  
Fig. 5 Variations of feeder routes at top 3 airports in 2010-2015

系,昆明长水机场的航班波体系初步形成。②由于航班数量是构建航班波体系的必要而非充分条件,因此,大型枢纽机场和其他枢纽机场在构建航班波体系上面临着不同的问题。大型枢纽机场需要解决合理安排连续密集的出发航班和到达航班;其他枢纽机场主要需要集中安排离港波和到达波,以解决可中转的到达航班和出发航班数量不足问题。③国际喂给航线可以成为研究枢纽机场国家化的角度之一。从国际喂给航线占其喂给航线总量的比例来看,上海浦东机场具有绝对优势,北京首都机场和广州白云机场平分秋色。从空间角度来看,北京首都机场的重点在北美市场,上海浦东机场的重点在东南亚地区,广州白云机场兼顾北美和东南亚地区。④从国内喂给航线的空间分布来看,三大枢纽可中转航线的空间分布都在向更均匀的趋势发展。北京首都机场在缩小经济发达地区和经济欠发达地区可中转航线的数量差距;上海浦东机场排名前十的喂给航线都降低了可中转航班数量,而大多数可中转航班数量规模较小的喂给航线都有增加。在市场因素的驱动下,广州白云机场减少了与近距离喂给航线的可中转航班数量,增加了与远距离喂给航线的可中转航班数量。

航班波体系是研究枢纽机场喂给航线的关键。在研究航班波体系的基础上,分析喂给航线的空间分布有助于更好地配置枢纽机场的时刻资源。本文系统地研究了2010~2015年中国十大枢纽机场的航班波体系,与航线网络的轴辐网络组织模式互为补充,丰富了航空运输网络的解读视角。从提供的可中转航班数量初步来看,三大枢纽机场均与成都双流机场保持着较强的联系。但是,该机场的航班波构建还处于起步阶段,本文没有深入分析成都双流机场、昆明长水机场等的喂给航线分布情况。在后续研究中可以收集更新年份的数据,探讨中国西部地区的航空枢纽布局问题。

## 参考文献(References):

- [1] 金凤君,王成金.轴辐侍服理念下的中国航空网络模式构筑[J].地理研究,2005,24(5):774-784. [Jin Fengjun, Wang Chengjin. Hub and spoke system and China aviation network organization. Geographical Research, 2005, 24(5):774-784.]
- [2] 王法辉,金凤君,曾光.中国航空客运网络的空间演化模式研究[J].地理科学,2003,23(5):519-525. [Wang Fahui, Jin Fengjun, Zeng Guang. Geographic patterns of air passenger transport in China. Scientia Geographica Sinica, 2003, 23(5):519-525.]
- [3] Cook G N, Goodwin J. Airline networks: A comparison of hub-and-spoke and point-to-point systems[J]. Journal of Aviation/Aerospace Education & Research, 2008, 17(2): 52-54.
- [4] Bania N, Bauer P W, Zlatoper T J. US air passenger service: A taxonomy of route networks, hub locations, and competition[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 1998, 34(1):53-74.
- [5] Burghouwt G, De Wit J. Temporal configurations of European airline networks[J]. Journal of Air Transport Management, 2005, 11(3):185-98.
- [6] Huang J, Wang J. A comparison of indirect connectivity in Chinese airport hubs: 2010 vs. 2015[J]. Journal of Air Transport Management, 2017, 65:29-39.
- [7] Danesi A. Measuring airline hub timetable co-ordination and connectivity: definition of a new index and application to a sample of European hubs[J]. European Transport/Trasporti Europei, 2006, 34:54-74.
- [8] Burghouwt G. Airline network development in Europe and its implications for airport planning[J]. London: Routledge, 2016.
- [9] Guimerà R, Mossa S, Turtschi A et al. From the Cover: The worldwide air transportation network: Anomalous centrality, community structure, and cities' global roles[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2005, 102(22):7794-7799.
- [10] Reynolds-Feighan A, Mclay P. Accessibility and attractiveness of European airports: a simple small community perspective[J]. Journal of Air Transport Management, 2006, 12(6):313-323.
- [11] Paleari S, Redondi R, Malighetti P. A comparative study of airport connectivity in China, Europe and US: which network provides the best service to passengers? [J]. Transportation Research Part E Logistics & Transportation Review, 2010, 46(2):198-210.
- [12] Redondi R, Malighetti P, Paleari S. New routes and airport connectivity[J]. Networks & Spatial Economics, 2011, 11(4): 713-725.
- [13] Barthélemy M. Spatial networks[J]. Physics Reports, 2013, 499 (1):1-101.
- [14] 孙宏.应用网络流模型解决航班衔接问题[J].西南交通大学学报, 2002, 37(2):223-226. [Sun Hong. Solving flight conflict problem with network flow model. Journal of Southwest Jiaotong University, 2002, 37(2):223-226.]
- [15] 李雯.枢纽机场航班波构建方法研究[D].南京:南京航空航天大学民航学院, 2010. [Li Wen. A method to construct flight bank for hub airports. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010.]
- [16] 王伟,王成金.枢纽机场航班时刻资源配置的时空网络模式——以北京首都国际机场为例[J].地理学报, 2013, 68(6): 762-774. [Wang wei, Wang Chengjin. Temporal-spatial network of flight schedule in hub airport: A case study of Beijing International Airport. Acta Geographica Sinica, 2013, 68(6): 762-774.]
- [17] 王姣娥,莫辉辉,金凤君.中国航空网络空间结构的复杂性[J].地理学报, 2009, 64(8):899-910. [Wang Jiaoe, Mo Huihui, Jin

- Fengjun. Spatial structural characteristics of Chinese aviation network based on complex network theory. *Acta Geograica Sinica*, 2009, 64(8):899-910.]
- [18] 郭文炯, 白明英. 中国城市航空运输职能等级及航空联系特征的实证研究[J]. *人文地理*, 1999, 14(1):27-31. [Guo Wenjiong, Bai Mingying. A positive research on functional hierarchy of urban air transport and features of air transport relationship in China. *Human Geography*, 1999, 14(1): 27-31.]
- [19] 金凤君. 中国航空客流网络发展及其地域系统研究[J]. *地理研究*, 2001, 20(1):31-39. [Jin Fengjun. A study on network of domestic air passenger flow in China. *Geographical Research*, 2001, 20(1): 31-39.]
- [20] 周一星, 胡智勇. 从航空运输看中国城市体系的空间网络结构[J]. *地理研究*, 2002, 21(3):276-286. [Zhou Yixing, Hu Zhiyong. Looking into the network structure of Chinese urban system from the perspective of air transportation. *Geographical Research*, 2002, 21(3): 276-286.]
- [21] 王海江, 苗长虹. 中国航空联系的网络结构与区域差异[J]. *地理科学*, 2015, 35(10):1220-1229. [Wang Haijiang, Miao Changhong. Network structure and regional difference of aviation links in China. *Scientia Geographica Sinica*, 2015, 35(10):1220-1229.]
- [22] Chou Y H. Airline deregulation and nodal accessibility[J]. *Journal of Transport Geography*, 1993, 1(1):36-46
- [23] Oum T, Yu C, Zhang A. Global airline alliances: international regulatory issues[J]. *Journal of Air Transport Management*, 2001, 7(1):57-62
- [24] 王成金, 王伟, 王姣娥. 基于航空公司重组的枢纽机场航班配置网络演变——以北京、上海和广州为例[J]. *地理研究*, 2015, 34(6):1029-1043. [Wang Chengjin, Wang Wei, Wang Jiaoe. Pattern of schedule network in hub airports: from the view of airlines reorganization. *Geographical Research*, 2015, 34(6): 1029-1043.]
- [25] 杜超, 王姣娥. 南方航空网络空间格局及市场范围[J]. *地理研究*, 2015, 34(7):1319-1330. [Du Chao, Wang Jiaoe. Spatial pattern of China Southern Airlines' network and its market coverage. *Geographical Research*, 2015, 34(7):1319-1330.]
- [26] 金凤君, 孙炜, 萧世伦, 等. 中国航空公司重组及其对航空网络结构的影响[J]. *地理科学进展*, 2005, 24(2):59-68. [Jin Fengjun, Sun Wei, Xiao Shilun et al. China's airline reorganization and its effect on network structure. *Progress in Geography*, 2005, 24(2):59-68.]
- [27] 莫辉辉, 胡华清, 王姣娥. 中国货运航空企业发展过程及航线网络演化格局[J]. *地理研究*, 2017, 36(8):1503-1514. [Mo Huihui, Hu Huaqian, Wang Jiaoe. Air cargo carriers development and network evolution: A case study of China. *Geographical Research*, 2017, 36(8):1503-1514.]

## Wave-system Structures of Airport Hubs and Spatial Patterns of Possible Indirect Connections

Huang Jie<sup>1</sup>, Wang Jiaoe<sup>1,2</sup>

(1. *Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Key Laboratory of Regional Sustainable Development Modeling, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100101, China*; 2. *College of Resources and Environment University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

**Abstract:** It is important for airport hubs to establish wave-system structures in optimizing scheduling and enhancing operational efficiency so that airport hubs can significantly increase the number of passengers and intensify flight connectivity. Hence, this article proposed a research method that can be employed in the study of wave-system structures. With the research method, we surveyed wave-system structure for top 10 airports. This article then investigated spatial patterns of possible indirect connections for airport hubs whose wave-system structures were explicit. Some conclusions can be summarized. First, Capital Airport (Beijing), Pudong Airport (Shanghai), Baiyun Airport (Guangzhou) and Changshui Airport (Kunming) have adopted clear wave-system structures. But wave-system structures of Shuangliu Airport (Chengdu), Baoan Airport (Shenzhen) and Xianyang Airport (Xi'an) were not clear. Second, the large number of flights is a necessary, but not sufficient condition for the establishment of wave-system structures. It is important for airport hubs to optimize connection waves so that they can better utilize their temporal recourse. Third, possible indirect connections of Capital Airport (Beijing), Pudong Airport (Shanghai) and Baiyun Airport (Guangzhou) were spatially different. In general, their spatial patterns did not follow the rule of geographic proximity, but they were related to the network expansion of flights.

**Key words:** connection wave; wave-system structure; airport hub; feeder route; temporal resource