

中国枢纽机场时间延误成本估算与航线影响分析及中美比较

杜欣儒^{1,2}, 路紫^{1,2*}, 李仁杰^{1,2}, 董雅晴^{1,2}, 高伟^{1,2}

(1. 河北师范大学资源与环境科学学院, 石家庄 050024; 2. 河北省环境演变与生态建设实验室, 石家庄 050024)

摘要: 论文借鉴欧洲控制研究中心以机型为基本单元的延误成本估算模型(简称EC估算模型)及其相关算法,以EC估算模型为基础,补充机型配置比和引入航班执行阶段作为影响参数,估算了24 h中国枢纽机场单位时长延误成本和时间延误总成本,进行了时间延误成本的航线影响分析及中美比较,得到如下结论:① 区域枢纽机场时间延误成本普遍低于复合枢纽机场,但前者中机型单位时长延误成本和登机口成本均高于后者,从中可透视出其分别与中国航线网络中心集聚、航空地理市场(机型配置)需求和航线网络模式应用的密切相关;枢纽机场空中维持成本在时间延误总成本中占比最大,说明中国空中廊道设置存在缺陷。② 枢纽机场间(航线)以及枢纽机场与非枢纽机场之间(航线)时间延误总成本的差异深受航线属性所影响,其根本又在于航空地理市场(机型配置)需求以及空中廊道参与机场位置。③ 中美枢纽机场和枢纽机场间(航线)时间延误成本均有较大差异,主要表现为中国空中维持成本远高于美国,这是由空中廊道特征路径宽度和航迹交叉点数量2个因素造成的。

关键词: 时间延误成本; 枢纽机场; EC估算模型; 空中廊道; 中国

目前中国面临严重的航班延误。据2017年《全球机场放行准点率报告》(<http://news.carnoc.com/list/391/391851.html>),世界10大延误率最高机场中中国占8个,其中温州龙湾机场全球最高(50.87%),昆明长水(国际航空运输协会三字代码KMG)、上海虹桥(SHA)和上海浦东(PVG)3个枢纽机场超过40%,由此引发国内业界和学界对航班延误特别是对空域管理决策至关重要的枢纽机场航班延误的关注。迄今为止,空中交通系统运行质量的考量仍主要依赖于经济反馈,航班延误成本即是其关键因素之一,枢纽机场航班延误成本估算已成为重要学术问题。

回顾延误成本估算研究可见,2000年以后已逐步由单条航线的燃料消耗指标^[1]向协同考虑一定时间周期内机场抵离航线的延误时长指标转变,即由燃料相关的延误成本估算向时间相关的延误成本估算转变,以防止通过降低航班飞行速度进而降低

燃料成本的做法,因为较慢的飞行又导致诸如空域资源占用和空中交通管理等其他成本的增加^[2]。实践证明,基于时间的延误成本估算不像基于燃料的延误成本估算那样具有随机和偶发的波动变化,且能捕捉到可控飞行时间内灵活空域使用(如航线更改)所产生的成本,这使延误成本描述方式更为合理,指示作用更为明确,并有助于促进航空公司延误管理的优化^[3]。自2014年Aktürk等^[4]提出时间延误成本的概念及系统探讨时间延误成本的循环累积效应以来,这一延误成本衡量标准的转变已成为导向性潮流。然而目前时间延误成本估算研究与实践中仍存在若干不足,如:① 多局限于航班地面等待延误估算并用以分析机场运营成本^[5-6],其难免存在枢纽机场间(航线)抵离航班延误成本的交叉重复计算;② 将超过航路最大容量限制却仍在执行飞行的航班预计为延误并进行延误成本归一化处理^[7],无法将有效规避受限空域且准时抵达的航班从延

收稿日期:2019-05-30; 修订日期:2019-09-24。

基金项目:国家自然科学基金项目(41671121)。[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41671121.]

第一作者简介:杜欣儒(1989—),女,山西晋中人,博士生,主要从事航空地理研究。E-mail: duxinru0224@126.com

*通信作者简介:路紫(1960—),男,北京人,教授,主要从事信息经济地理与空域科学研究。E-mail: luzi@hebtu.edu.cn

引用格式:杜欣儒,路紫,李仁杰,等.中国枢纽机场时间延误成本估算与航线影响分析及中美比较[J].地理科学进展,2020,39(7):1160-1171. [Du Xinru, Lu Zi, Li Renjie, et al. Estimation of time delay cost of hub airports in China, air routes effect and comparison with the United States. Progress in Geography, 2020, 39(7): 1160-1171.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2020.07.009

误成本估算中剔除,其时间延误成本估算不是针对事实延误时长进行的;③在航空运力供需平衡视角下的延误成本评估中,偏重航线距离和航班飞行频率增减^[8-9],忽略了机型(座位容量)的决定性作用;④基于航空公司运营成本中劳动力和资本双要素构建的航班延误成本经济模型,偏重生产要素影响变量^[10],不能反映航班执行阶段对时间延误成本各子环节的影响。

基于以上分析,本文借鉴欧洲控制研究中心以机型为基本单元的延误成本估算模型(简称EC估算模型)及其相关算法^[11],补充机型配置比和引入航班执行阶段作为影响参数,使用不同机型的事实延误时长替代预测延误时长,估算了中国枢纽机场的单位时长延误成本和时间延误总成本,尝试弥补以往时间延误成本估算的不足。进一步说,相对于大量应用航班时刻指标进行机场延误成本异质性的研究而言,用以表征整个航空网络系统运营状态的航线指标及其影响分析却被忽视了,鲜见研究成果。据此,本文以航线为单位对枢纽机场间(航线)和枢纽机场与非枢纽机场之间(航线)时间延误总成本进行空间分层异质性(spatial stratified heterogeneity)聚类分析,通过不同的聚类等级表述航线属性对时间延误成本空间差异的增强作用,从而揭示了中国枢纽机场时间延误成本的形成机理以及关键环节。在此基础上通过航迹数据比较中美枢纽机场时间延误成本的差异,为未来中国航线网络结构调整和空中大通道^①建设提供参考依据。

1 方法与数据

1.1 研究方法

1.1.1 模型选择与改进

鉴于机场和机场间(航线)时间延误成本估算中尚存在抵离交叉重复计算、非事实延误时长计算、弹性计算忽略机型影响和无区分航班执行阶段计算等缺陷,需要构建一种更加综合的方法,同时考虑循环累积效应以解决前述相关问题。基此,以EC估算模型为基础,以机场类型、O-D航线、航班计划/实际抵离时刻为基本输入项,分机型统计事实延误时长,包括繁忙机场盘旋延长飞行时间和拥堵航线绕飞(改变速差)减少飞行时间等^[3]以替代预测延

误时长。同时补充不同枢纽机场的机型配置比调整EC估算模型单位时长延误成本标准值,引入国际民用航空组织(ICAO)行业考核标准(Performance Review Unit)中的航班延误分类(登机口延误、滑行延误和空中维持延误)用于航班执行阶段划分^[12]。这样,即分离出2个与时间延误成本精准估算紧密相关的影响参数:机型配置比与航班执行阶段。

1.1.2 影响参数界定

依前所述,时间延误成本与某种机型的单位延误时长关系密切,以往研究证实,由单位延误时长指示的时间延误成本随机型有很大变化^[11]。本文拟参考ICAO和EC估算模型给定的某种机型的单位时长延误成本标准值,估算中国枢纽机场单位时长延误成本。该标准值是按机型累积多个成本(航空公司直接成本、空域资源占用成本等)而构成的,能被用于单位时长延误成本估算^[12];在此基础上对该标准值进行加权赋值,Edwards等^[13]曾给出6种机型加权系数:从大机型(B777-300ER和A333)至中机型(B777-800、A321、A320和A319)依次为0.30、0.25、0.15、0.15、0.10、0.05,表征大机型在航班延误传染扩散中的深刻影响。本文从飞常准App获得所有航班对应的机型,经机型合并^[14],如将B-5940、B-5917、B-5966、B-300Q等统一为A320,得到各枢纽机场6种机型的配置比,用于枢纽机场单位时长延误成本估算。

单位时长延误成本可被分解为地面等待(登机口和滑行)、空中维持不同航班执行阶段。按照EC估算模型的划分以及以往关于地面延误效益评估中揭示的飞行重路成本的差异^[15],本文对离港延误航班使用地面等待成本,显示登机口延误时长(T-gate)和滑行延误时长(T-taxi)所产生的成本;对抵港延误航班使用空降延误成本^[16],显示空中维持延误时长(T-airbone)所产生的成本(提前抵达航班计为零)。本文从FlightAware获得登机口阶段和滑行阶段的计划/实际抵离时刻,统计2个航班执行阶段延误时长,其与总延误时长之差即为空中维持延误时长,一同用于枢纽机场时间延误总成本估算。

1.2 数据与处理

枢纽机场时间延误成本估算的基础是航班延误时长统计。按《中国民用航空第十三个五年计划》确定的12个枢纽机场,即4个复合枢纽机场——北京

① 自于《国务院关于印发“十三五”现代综合交通运输体系发展规划的通知》,见 http://www.mot.gov.cn/zhengcejiedu/shisanwuxdzhtjstxfzgh/xiangguanzhengce/201703/t20170307_2172958.html。

首都(PEK)、上海虹桥(SHA)、上海浦东(PVG)、广州白云(CAN)和8个区域枢纽机场——重庆江北(CKG)、成都双流(CTU)、武汉天河(WUH)、郑州新郑(CGO)、沈阳桃仙(SHE)、西安咸阳(XIY)、昆明长水(KMG)、乌鲁木齐地窝堡(URC),避开星期二和周末效应的极端影响^[17],对2017年5月15日(星期一)24 h所有国内抵离航班,从中国枢纽机场官方网站、FlightAware 和飞常准 App 查询航班计划/实际抵离时刻,剔除共享航班、提前取消航班以及无标注机型的航班,统计得到中国枢纽机场共计2801架次航班事实延误时长数据集。其航班最低取消率为1%(CKG)、最高取消率为18%(URC),有效数据占比能支撑各机场时间延误成本的独立分析^[18]。

参考欧洲航空公司使用的衡量标准^②:(1)将枢纽机场间(航线)抵离交叉航班的延误时长统一划归入起飞机场,如将PEK离开、PVG抵达的航班计入PEK延误时长中,避免PVG航班的延误时长重复交叉计算;(2)只采集出发地和目的地的航班时刻,经停机场不做统计,即将中转航班划归为直航航班,这有利于记录一次完整的飞行单元且不影响时间延误成本估算;(3)大量国外研究,如Wilken等^[19]和Ferguson等^[12]均证实以航班延误时长超过15 min估算延误成本能明显增强指示效果,所以本文不依中国民航准点率统计标准(计划起飞时间30 min内完

成起飞),而是采用15 min延误时长估算枢纽机场时间延误成本。

为清晰显示24 h中国12个枢纽机场航班延误时长变化情况,并考虑到相同时间节点上存在多架次延误航班同时抵离,绘制航班延误时长变化散点图,再将各点相连表述延误时长波动变化态势,形成图1。由图1可见,复合枢纽机场和区域枢纽机场及其内部航班延误时长变化呈现多样性特征,复合枢纽机场航班延误时长整体高于区域枢纽机场。航班延误时长统计是后文单位时长延误成本和时间延误总成本估算的前提:机型配置比与EC估算模型中延误成本标准值相乘得到枢纽机场单位时长延误成本,单位时长延误成本与3个航班执行阶段(登机口/滑行/空中维持)的延误时长相乘得到枢纽机场时间延误总成本。

2 结果分析

2.1 时间延误成本估算

2.1.1 枢纽机场单位时长延误成本

以6种机型的配置比与其单位时长延误成本标准值相乘即得到中国12个枢纽机场3个航班执行阶段单位时长延误成本估算结果(表1)。表1显示:
①复合枢纽机场大机型配置比较高,3个航班执行

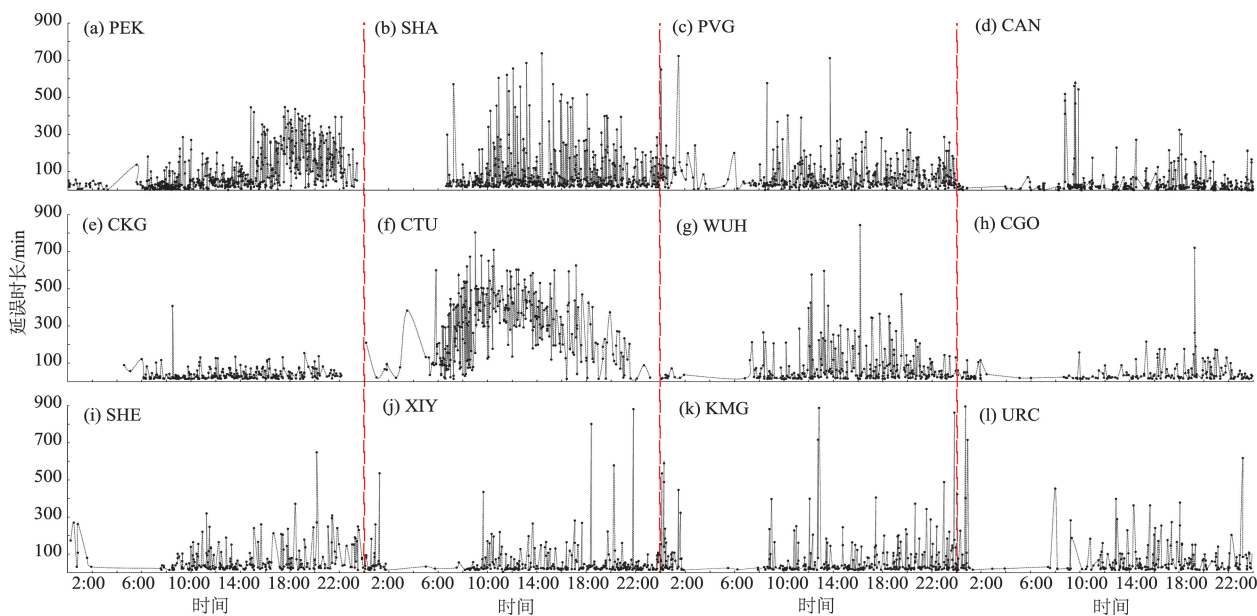


图1 24 h中国枢纽机场航班延误时长变化

Fig.1 24 hours flight delay time length in hub airports of China

② European airline delay cost reference values. <http://www.docin.com/p-619737190.html>. 2011-03-11.

表1 中国枢纽机场6种机型配置比及3个航班执行阶段单位时长延误成本

Tab.1 Time delay cost per minute for six aircraft types and three flight stages in hub airports of China

机型/座位容量 (成本标准值/(€/min))*	A319/122 (0.6/2.6/7.1)	A320/158 (0.6/2.6/7.7)	A321/185 (0.7/3.0/9.5)	B737-800/162 (0.5/2.9/7.8)	A333/370 (1.8/4.5/27.6)	B777-300ER/300 (0.6/10.6/14.2)
PEK 配置比/%	2.93	17.59	23.28	23.62	20.34	12.24
PEK 延误成本/(€/min)	0.12/0.47/1.26	0.70/2.81/8.09	0.93/4.19/13.27	0.71/4.02/11.10	2.24/13.02/33.76	0.49/3.30/10.40
SHA 配置比/%	1.09	21.68	21.68	39.78	12.48	3.28
SHA 延误成本/(€/min)	0.04/0.17/0.47	0.87/3.47/9.98	0.87/3.90/12.36	1.19/6.76/18.70	1.37/7.99/20.72	0.13/0.88/2.78
PVG 配置比/%	3.47	30.11	24.09	25.36	6.20	10.77
PVG 延误成本/(€/min)	0.14/0.55/1.49	1.20/4.82/13.85	0.96/4.34/13.73	0.76/4.31/11.92	0.68/3.97/10.30	0.43/2.91/9.15
CAN 配置比/%	6.13	23.24	15.63	43.03	7.12	4.85
CAN 延误成本/(€/min)	0.25/0.98/2.64	(0.93/3.72/10.69)	0.63/2.81/8.91	1.29/7.31/20.22	0.78/4.56/11.82	0.19/1.31/4.12
CKG 配置比/%	19.12	51.39	13.94	13.94	1.2	0.40
CKG 延误成本/(€/min)	0.76/3.06/8.22	2.06/8.22/23.64	0.56/2.51/7.95	0.42/2.37/6.55	0.13/0.76/1.98	0.02/0.11/0.34
CTU 配置比/%	14.77	33.86	24.58	19.87	6.67	0.26
CTU 延误成本/(€/min)	0.59/2.36/6.35	1.35/5.42/15.57	0.98/4.42/14.01	0.60/3.38/9.34	0.73/4.27/11.07	0.01/0.07/0.22
WUH 配置比/%	4.55	21.21	6.44	66.29	0.76	0.76
WUH 延误成本/(€/min)	0.18/0.73/1.95	0.85/3.39/9.76	0.26/1.16/3.67	1.99/11.27/31.16	0.08/0.48/1.26	0.03/0.20/0.64
CGO 配置比/%	2.16	23.74	3.24	70.50	0.36	0
CGO 延误成本/(€/min)	0.09/0.35/0.93	0.95/3.80/10.92	0.13/0.58/1.85	2.12/11.99/33.14	0.04/0.23/0.60	0/0/0
SHE 配置比/%	4.33	47.99	14.86	31.58	0.62	0.62
SHE 延误成本/(€/min)	0.17/0.69/1.86	1.92/7.86/22.07	0.59/2.67/8.47	0.95/5.37/14.84	0.07/0.40/1.03	0.02/0.17/0.53
XIY 配置比/%	10.03	38.19	15.86	34.95	0.97	0
XIY 延误成本/(€/min)	0.40/1.61/4.31	1.53/6.11/17.57	0.63/2.85/9.04	1.05/5.94/16.43	0.11/0.62/1.61	0/0/0
KMG 配置比/%	5.99	26.65	3.31	62.40	1.65	0
KMG 延误成本/(€/min)	0.24/0.96/2.58	1.07/4.26/12.26	0.13/0.60/1.88	1.87/10.61/29.33	0.18/1.06/2.74	0/0/0
URC 配置比/%	19.71	24.42	15.12	37.21	2.33	1.16
URC 延误成本/(€/min)	0.79/3.16/8.50	0.98/3.91/11.23	0.60/2.72/8.62	1.12/6.33/17.49	0.26/1.49/3.86	0.05/0.31/0.99

注:*为EC估算模型标准值,来自参考文献[12];A333参考了B747-400(406座)的延误成本方案。

阶段单位时长延误成本均随座位容量而增加,呈现机型一成本线性上升趋势;区域枢纽机场3个航班执行阶段单位时长延误成本却以中机型B737-800(162座)为最大值,不同于复合枢纽机场。这可以归结为航空地理市场(机型配置)需求的固定影响^[20],在市场潜力不变的前提下仅依赖飞行频率和座位容量的调整来降低航班时间延误成本是较难实现的。② 枢纽机场6种机型3个航班执行阶段在单位时长延误成本占比中依次为空中维持成本、滑行成本和登机口成本,且空中维持成本(即空域资源占用成本)远高于后2个阶段(地面管理成本),说明了空中廊道的根本性制约作用。

2.1.2 枢纽机场时间延误总成本

由上述单位时长延误成本估算结果与3个航班执行阶段的延误时长相乘即得到不同航班不同执行阶段的时间延误成本,其相加后得到各枢纽机场时间延误总成本。中国枢纽机场时间延误总成本计算结果如图2,该图显示:① 复合枢纽机场时间延误总成本普遍高于区域枢纽机场,这是由中国航线网络结构的中心性特征^[21-23]造成的,基于此派生

出对航空网络传输效率的影响。② 区域枢纽机场中机型时间延误总成本却高于复合枢纽机场,尤以CTU和XIY为典型,仔细分析可见其均发生在与PEK的航线上,且PEK-XIY-CTU空中廊道内延误航班数量最多,在此假定是由中国空中廊道及空中交通拥堵所造成的,后文将讨论中国空中廊道设置存在的缺陷。③ 虽然2类枢纽机场滑行成本和登机口成本占比不大,且各枢纽机场滑行成本的差异也不大,但区域枢纽机场登机口成本仍较明显高于复合枢纽机场,表明区域枢纽机场航班时隙资源系统分配能力不足^[24]。乐美龙等^[25]曾模拟了中国枢纽机场时空收敛性与登机口成本的关联度,指出机场终端空域容量与航班流量的适应性以及航班时隙配置仍是解决登机口成本的门槛。④ 与单位时长延误成本的阶段特征相同,中国枢纽机场时间延误总成本中仍以空中维持成本占比最大,尤其是复合枢纽机场更明显,进一步佐证了前述关于空中维持能力的分析,这与以往追求地面管理有极大不同。本文认为时间延误成本的研究应向空域资源占用转变,未来空中交通系统运行质量有赖于空中基础

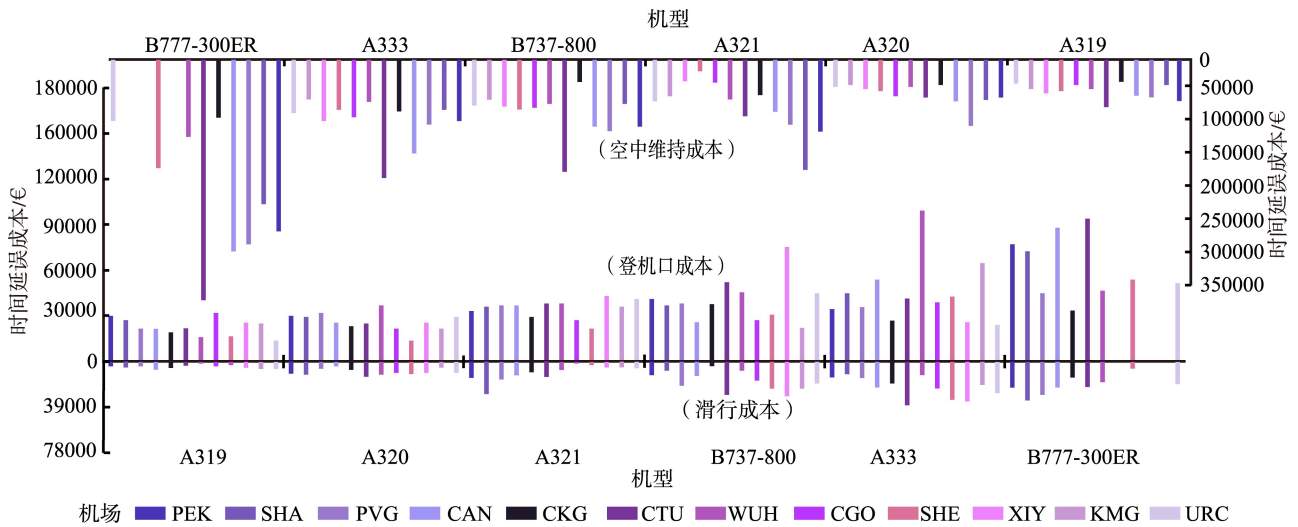


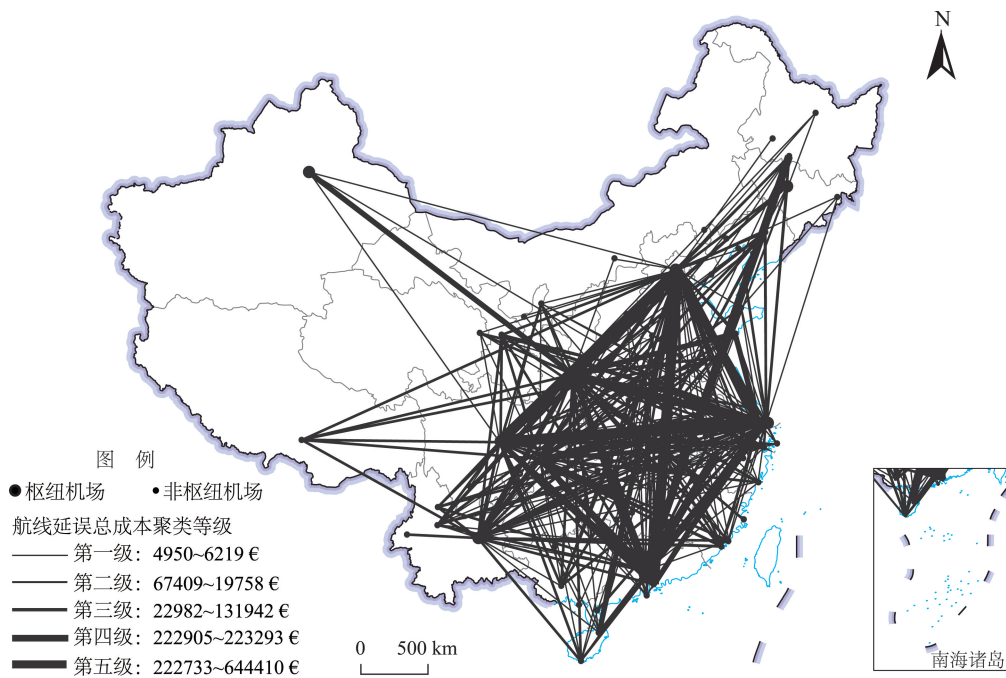
图2 中国枢纽机场6种机型3个航班执行阶段时间延误总成本
 Fig.2 Total time delay cost per minute for six aircraft types and three flight stages in hub airports of China

设施和空域资源开发利用的改善。

2.2 时间延误总成本的航线影响分析

时间延误总成本的航线影响分析可通过空间分层异质性进行阐述,这是一个应用各种分类算法将连续空间现象划分为离散层次的过程^[26]。参照以往枢纽机场空间分层异质性研究经验^[27-28],本文拟采用K-均值测量方法^[29],以航线为单位聚类分析枢纽机场间(航线)以及枢纽机场与非枢纽机场之间

(航线)的空间差异。首先根据10次迭代记录从低到高将中国枢纽机场时间延误总成本划分为5级,经ANOVA检验其具有较明显的空间分层异质性;然后通过层间变率最大化目标^[30]划出高聚类等级(第五级聚类 and 第四级聚类)和低聚类等级(第三级聚类、第二级聚类和第一级聚类)。图3显示:①时间延误总成本集中在93条枢纽机场间的延误航线上,其中62.50%的延误航线存在于高聚类等级中;



注:本图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为GS(2019)1823号的标准地图制作,底图无修改。下同。

图3 中国枢纽机场时间延误总成本聚类等级
 Fig.3 Clustering levels of total time delay cost among hub airports in China

复合枢纽机场间66.67%的延误航线存在于第五级聚类中,其中PEK-CTU、PEK-SHA、PEK-CAN三条航线时间延误成本最高,合占有所有航线时间延误总成本的9.22%,表明航空地理市场(机型配置)需求的增强作用,这与Pavlyuk^[31]对欧洲机场延误弹性的研究结论一致。② 枢纽机场与非枢纽机场之间的延误航线主要存在于低聚类等级中,但其中PEK-SZX(深圳宝安)和CTU-NKG(南京禄口)却属于第四级聚类,这与中国4大城市群(长三角、珠三角、京津、成渝)相对应并位于PEK-CAN和PEK-SHA空中廊道内,可以假设空中廊道参与机场位置(高流量航线汇聚的位置)强化了航线的延误总成本。可见,时间延误成本深受航线属性所影响,其根本又在于航空地理市场(机型配置)需求,还与空中廊道参与机场位置相关。

3 时间延误成本及影响的中美比较

3.1 枢纽机场时间延误成本比较

将以上中国案例研究结果与Ferguson等^[12]的美

国枢纽机场单位时长延误成本案例研究结果、Edwards等^[13]的美国复合枢纽机场联系强度案例研究结果汇总,形成表2。对比可见,① 中美枢纽机场单位时长延误成本均呈现为机型—成本线性上升趋势,但与美国不同,中国区域枢纽机场大机型(如B777-300ER)单位时长延误成本低于中机型(如B737-800),这导致中国枢纽机场中机型单位时长延误成本普遍高于美国。中国区域枢纽机场受航空地理市场(机型配置)需求制约,将主要业务集中于少数几种中机型以控制成本,如CGO、XIY和KMG均缺少大机型B777-300ER配置,而美国2类枢纽机场均以大机型为主^[12]。② 基于首位联系强度的影响,中国复合枢纽机场单位时长延误成本高于美国。中国位列前四的复合枢纽机场(PEK、CAN、SHA、PVG)首位联系强度合占78.89%,而美国位列前四的复合枢纽机场(ATL、PHL、JFK、ORD)仅合占43.37%^[13],这导致单位时长延误成本的差异,中国平均值为823.1€/min,美国为472.3€/min。首位联系强度不仅强化了复合枢纽机场的空中交通承载负荷,而且增加了单位时长延误成本。③ 中

表2 中美复合枢纽机场6种机型3个航班执行阶段单位时长延误成本和首位联系强度比较

Tab.2 Comparison of time delay cost per minute for six aircraft types and three flight stages in hub airports between China and the United States and degree of association intensity

比较内容	美国				中国			
	机型/机场	单位时长延误成本/(€/min)			机型/机场	单位时长延误成本/(€/min)		
		登机口	滑行	空中维持		登机口	滑行	空中维持
机型	A319	0.6	2.6	7.1	A319	0.3	1.3	3.4
	A320	0.6	2.6	7.7	A320	1.2	4.8	13.8
	A321	0.7	3.0	9.5	A321	0.6	3.2	8.4
	B737-800	0.5	2.9	7.9	B737-800	1.2	6.6	18.4
	A333	1.9	4.62	27.8	A333	0.6	2.8	8.7
	B777-300ER	0.6	10.6	14.3	B777-300ER	0.1	0.8	14.3
	复合枢纽机场	ATL	179.6	176.8	55.9	PEK	71.9	280.1
PHL		117.0	77.4	66.8	CAN	77.2	253.8	357.4
JFK		201.6	98.1	88.6	SHA	66.9	146.2	291.4
ORD		118.4	132.4	104.3	PVG	76.3	112.9	310.5
机场首位联系强度	ATL	CLT(19)、JFK(11)、PHL(21)、DFW(21)、ORD(25)、DEN(20)/16.58%*			PEK	SHA(59)、PVG(20)、CAN(42)、WHU(15)、CTU(33)、XIY(43)、SHE(23)、URC(18)/32.4%		
	PHL	JFK(7)、ORD(16)、DEN(10)、LAS(6)、LAX(9)、SFO(8)/11.56%			CAN	SHA(60)、PVG(25)、WUH(23)、CTU(60)、KMG(18)、CKG(25)、URC(21)、XIY(2)、SHE(12)/25.6%		
	JFK	DFW(6)、ORD(9)、ATL(10)、LAX(37)/7.72%			SHA	CTU(38)、KMG(15)、CGO(4)、WUH(79)、CKG(18)、SHE(43)、URC(16)/14.72%		
	ORD	CLT(15)、DFW(26)、ORD(2)、PHX(12)/7.51%			PVG	KMG(15)、WUH(21)、XIY(36)、URC(3)/6.17%		

注:美国6种机型单位时长延误成本引自参考文献[12];美国时间延误成本前四位枢纽机场分别为ATL(亚特兰大机场)、PHL(费城机场)、JFK(纽约肯尼迪机场)、ORD(芝加哥奥黑尔机场),联系机场分别为CLT(夏洛特机场)、DFW(达拉斯机场)、DEN(丹佛机场)、LAX(洛杉矶机场)、SFO(旧金山机场);*为联系机场(数量)/占比。

国枢纽机场空中维持成本占比远大于美国,如PEK占比达到54.68%;而美国枢纽机场地面等待成本占比高于中国,如ATL占比为86.44%(43.55%和42.89%)。这一方面是由于美国颁布有严苛的乘客权利法案,另一方面是由于美国空中廊道具有较强的航空流组织能力。

3.2 枢纽机场间(航线)时间延误成本比较

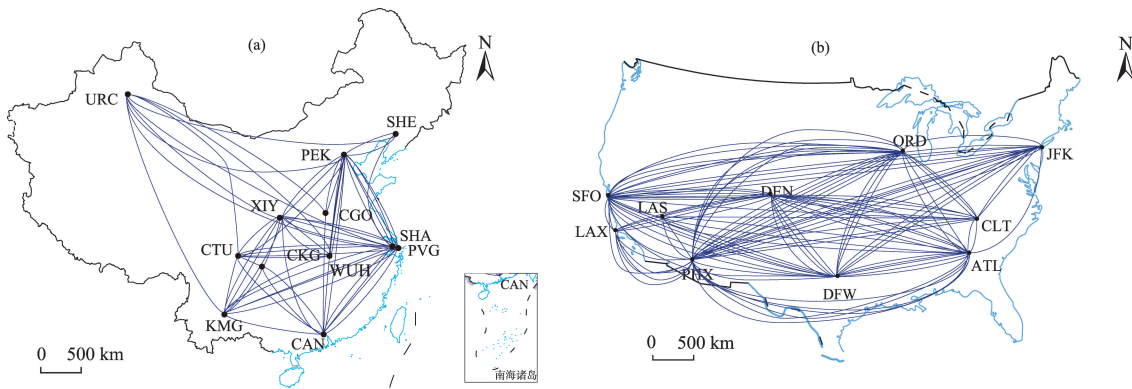
应用航班航迹数据通过流量合并可生成航空流集簇用以表述枢纽机场间实际飞行航线和比较空中维持成本的差异。从Flightradar24获得24h中国12个枢纽机场间329条航线的航班航迹数据(所有机型1min分辨率),按照“航线间偏差直线距离小于25海里(1海里=1.852km),则删除该条航线并将其交通流合并于另一航线”的做法^[32],生成中国枢纽机场间81条航空流集簇;又依据Ren等^[32]给出

的美国年客运流量前10位O-D航线的173条航空流集簇,计算得到中美枢纽机场间(航线)时间延误总成本(表3)。该表显示:①中国枢纽机场间(航线)时间延误总成本普遍高于美国,这主要是复合枢纽机场空间“交互强度”^[33]的贡献。中国时间延误总成本较高的航线多存在于高聚类等级中且集中与4个复合枢纽机场相连,而美国时间延误总成本较高的航线则存在于多个不同枢纽机场间。②进一步分析,中美枢纽机场间(航线)时间延误总成本的差异还与航线网络模式使用有关(图4)。中国较多应用点对点航线网络模式^[24],对复合枢纽机场的依赖(如第五级聚类中的航线都与之相连)削弱了航线的可组合性,增加了空中交通拥堵^[34],而美国则较多应用中心—辐射航线网络模式,具有更大的可变性和过流次数^[35]。加之前述的中美区域枢纽机场机

表3 中美前10位枢纽机场间(航线)3个航班执行阶段时间延误总成本比较

Tab.3 Comparison of time delay cost for six aircraft types and three flight stages in the top 10 hub airports between China and the United States (€)

航线	美国				航线	中国			
	登机口	滑行	空中维持	总计		登机口	滑行	空中维持	总计
DEN-CLT	14499	71972	76086	162557	PEK-KMG	16547	62979	169572	249098
LAX-JFK	43668	167542	156062	267272	PEK-SHA	29592	34487	173140	337219
SFO-DEN	22719	52593	31354	106666	PEK-CAN	17641	68828	241567	328036
ATL-DFW	50207	70232	27704	148143	PEK-CTU	24352	59329	248979	332660
CLT-ORD	30354	111835	187679	229868	PEK-XIY	47983	41140	133639	222762
JFK-CLT	23588	265200	45255	334043	CTU-CAN	21095	29069	201833	251997
JFK-SFO	27699	125408	156253	309360	CTU-SHA	40611	56130	145523	242264
ATL-DEN	55128	145523	6169	206820	CTU-WUH	29554	55115	75821	160490
ATL-PHL	35457	174688	35380	245525	KMG-XIY	11007	14764	181690	207461
LAX-ORD	11536	11823	17632	130991	CAN-SHA	28323	44707	91317	164347



注:资料来源于参考文献[32],有修改。

图4 中美枢纽机场间航线网络模式比较

Fig.4 Detailed network flow patterns in China and the United States

型配置比的差异,降低了中国区域枢纽机场航线效率,增加了航班延误。③中国枢纽机场间(航线)时间延误总成本中空中维持成本占比较大,如PEK-SHA达到72.99%;而美国则相对较小,如SFO-DEN仅占28.39%^[32]。结合前述中国枢纽机场单位时长延误成本中空中维持成本的较大占比可见,讨论空中维持成本产生原因很有必要。

4 关于空中维持成本与空中廊道设置的讨论

以往基于航线网络与流量管理的延误成本研究普遍认为机场延误主要是由管理缺失造成的,如Cook等^[35]和Vespignani^[36]在量化网络拥堵和延迟度量后均指出其原因在于系统容量管理滞后。然而本文研究却发现,中国复合枢纽机场航班延误总时长普遍高于区域枢纽机场。而事实上中国复合枢纽机场相对而言均已具备更高的航空运输管理水平,因此应该另有其他原因。上文分析了中心性(首位联系强度)、航空地理市场(机型配置)需求、空中廊道参与机场位置、航班执行阶段以及航线网络模式等。在此拟集中讨论中国枢纽机场时间延误总成本构成中占比最大的空中维持成本问题及其与空中廊道设置的关系。因为不仅中国复合枢纽机场时间延误总成本高于区域枢纽机场主要是由空中维持成本造成的,而且中美枢纽机场单位时长延误成本和枢纽机场间(航线)时间延误总成本的最大差异也表现在空中维持阶段。此外,以往航班延误研究较多关注地面等待而缺乏与空中的结合,也难以以为空域资源充分开发利用提供依据。可以说,

空中维持阶段是时间延误成本的关键环节。

应用中枢纽机场间(航线)航迹数据,可从空中廊道特征路径宽度(航迹活动范围)和航迹交叉点数量(集聚或解聚点)两方面评估枢纽机场间(航线)航空流的效率。美国空中廊道特征路径宽度均大于中国,最短特征路径宽度分别为54.60海里和25.29海里^[32];美国航迹交叉点数量均低于中国,美国灵活的航迹流模式使得空中廊道内不存在交叉点,中国则存在一个或多个交叉点。当2个枢纽机场间抵离航线表现出不同航迹时,说明空中廊道特征路径变宽,航迹交叉点数量减少,单位时间过流增大。为更好地对比中美枢纽机场间(航线)空中廊道特征路径宽度、航迹交叉点数量与空域资源利用之间的关系,选取中国CAN-CTU与美国DFW-ORD进行比较(图5),这2对航线直线距离和日内航班次数相似(CAN-CTU26架次和DFW-ORD34架次),然而两者可用性差别很大,其特征路径宽度分别为269.63 km和395.25 km,美国在55.25 km范围外均无航迹交叉点^[37],中国则在距CTU 305.72 km范围外还存在航迹交叉点。当航线选择性较低以及网络异常(如机场临时关闭)时就有可能出现拥堵。对比中国“N”字型空中廊道^[38]上的PEK-CTU和PVG/SHA-CTU还发现,其较CAN-CTU而言宽度更窄且航迹交叉点数量更多。美国相对于短距离空中廊道(如LAS-PHX)而言,其长距离空中廊道(如LAX-DFW)特征路径宽度更宽^[32],降低空中维持成本的能力更强。

以往给出的航班延误成本破解方案聚焦于完善机场体系,包括增加机场数量/培育新的枢纽机场^[39]、增加航线数量^[40]、扩大机场基础设施建设^[41]等,但这些对策同时也会影响空域资源充分开发利用

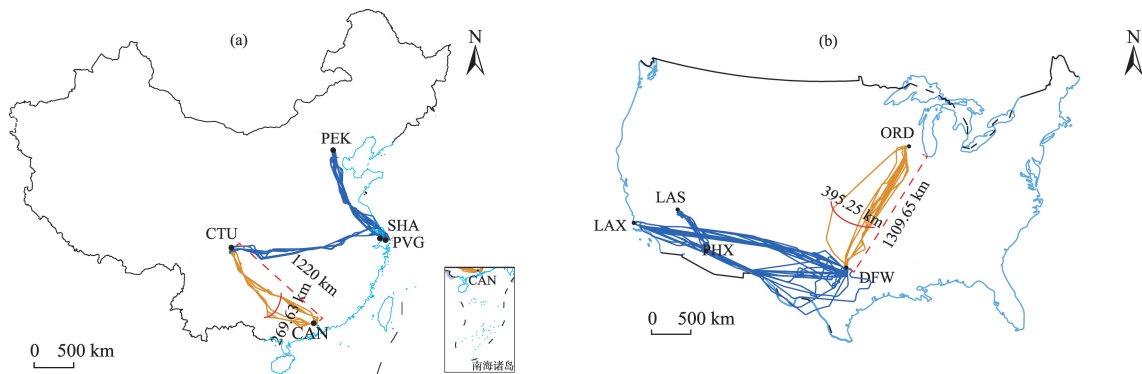


图5 中美空中廊道特征路径宽度和航迹交叉点数量对比

Fig.5 Comparison of the air corridors' width and the number of crossing points between China and the United States

用^[42]。因此,在认同空域管理改革^[43-44]、航空流网络优化^[45]等以外,本文认为构建空中廊道、增加额外参与机场配以航班时刻调整^[46]应成为一种首选方案,以动态干预空域资源分配。莱茵河—阿尔卑斯空中廊道发展议程已证明采用多样化空中廊道网络利用模式在不同时段实施不同策略可降低延误成本^[47]。未来中国在航空网络改革中应重点加强高聚类等级枢纽机场间的空中廊道建设。

5 结论与展望

(1) 中国复合枢纽机场延误时长、单位时长延误成本和时间延误总成本整体高于区域枢纽机场,且表现为机型—成本线性上升趋势。中心性特征和首位联系强度是其主要原因;区域枢纽机场中机型时间延误成本以及登机口成本较高,是由航空地理市场(机型配置)需求和航线网络模式应用造成的,并与航班时隙资源分配有关。

(2) 中国枢纽机场空中维持成本在时间延误总成本的占比远大于地面等待成本,且中国和美国枢纽机场单位时长延误成本和枢纽机场间(航线)时间延误总成本的差异也主要表现于航班执行阶段的占比上。中国枢纽机场空中维持成本占比远大于美国,其原因是空中廊道特征路径宽度狭窄和航迹交叉点数量增多。空中廊道过流能力影响枢纽机场空中维持成本,进而影响时间延误成本。这一研究结论找到了时间延误成本发生的关键环节,与以往关于改善机场交通管理水平的认知以及追求地面管理有很大不同。

(3) 在航空地理市场(机型配置)需求和空中廊道参与机场位置共同作用下,产生了枢纽机场间(航线)以及枢纽机场与非枢纽机场之间(航线)时间延误总成本的空间分层异质性。前者基本存在于高聚类等级,而后者普遍存在于低聚类等级,复合枢纽机场间(航线)聚类等级最高。聚类等级的差异既体现在复合枢纽机场与区域枢纽机场之间,也体现在枢纽机场与非枢纽机场之间,两者一同指示了航线属性的增强作用。

(4) 以上延误成本估算与航线影响分析以及中美比较反映了中国枢纽机场和枢纽机场间(航线)时间延误成本产生的相关特殊原因,其对枢纽机场延误干预具有积极意义。未来的研究工作应进一步聚焦空域资源充分开发利用:一是以枢纽机场中心

性和航空网络离散性为视角,探讨中国航空网络利用模式(航空流的时段分布)对时间延误成本的影响;二是以节点连接性和航迹连通性为视角,揭示中国空中廊道内各参与机场间的航迹欧氏距离和特征路径宽度对时间延误成本的影响。

参考文献(References)

- [1] DeJonge M K, Syblon W H. Application of cost index to fleet hub operation [R]. 1984 American Control Conference. San Diego, USA, 1984: 179-183. doi: 10.23919/ACC.1984.4788373.
- [2] Burrows G, Brown C A, Thom T W, et al. Real-time cost management of aircraft operations [J]. *Management Accounting Research*, 2001, 12(3): 281-298.
- [3] Cook A, Tanner G, Williams V, et al. Dynamic cost indexing-managing airline delay costs [J]. *Journal of Air Transport Management*, 2009, 15(1): 26-35.
- [4] Aktürk M S, Atamtürk A, Gürel S. Aircraft rescheduling with cruise speed control [J]. *Operations Research*, 2014, 62(4): 829-845.
- [5] Serhan D, Lee H, Yoon S W. Minimizing airline and passenger delay cost in airport surface and terminal airspace operations [J]. *Journal of Air Transport Management*, 2018, 73(8): 120-133.
- [6] Yan C, Vaze V, Barnhart C. Airline-driven ground delay programs: A benefits assessment [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2018, 89(4): 268-288.
- [7] Murça M C R. Collaborative air traffic flow management: Incorporating airline preferences in rerouting decisions [J]. *Journal of Air Transport Management*, 2018, 71(6): 97-107.
- [8] Mohammadian I, Abareshi A, Abbasi B, et al. Airline capacity decisions under supply-demand equilibrium of Australia's domestic aviation market [J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2019, 119(1): 108-121.
- [9] Wang C, Wang X Y. Airport congestion delays and airline networks [J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2019, 122(2): 328-349.
- [10] 杨秀云, 王全良, 何建宝. 航班延误问题的研究动态, 演化趋势及启示 [J]. *经济经纬*, 2013, 30(4): 76-82. [Yang Xiuyun, Wang Quanliang, He Jianbao. A dynamic research on commentary of flight felay and evolutionary trends. *Economic Survey*, 2013, 30(4): 76-82.]
- [11] Pérez-Rodríguez J V, Pérez-Sánchez J M, Gómez-Déniz E. Modelling the asymmetric probabilistic delay of air-

- craft arrival [J]. *Journal of Air Transport Management*, 2017, 62(5): 90-98.
- [12] Ferguson J, Kara A Q, Hoffman K, et al. Estimating domestic US airline cost of delay based on European model [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2013, 33(8): 311-323.
- [13] Edwards H A, Dixon-Hardy D, Wadud Z. Aircraft cost index and the future of carbon emissions from air travel [J]. *Applied Energy*, 2016, 164(4): 553-562.
- [14] Picard P M, Tampieri A, Wan X. Airport capacity and inefficiency in slot allocation [J]. *International Journal of Industrial Organization*, 2019, 62(1): 330-357.
- [15] Wu C L, Law K. Modelling the delay propagation effects of multiple resource connections in an airline network using a Bayesian network model [J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2019, 122(2): 62-77.
- [16] Zou B, Hansen M. Impact of operational performance on air carrier cost structure: Evidence from US airlines [J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2012, 48(5): 1032-1048.
- [17] Aydemir R, Seymour D T, Buyukdagli A, et al. An empirical analysis of delays in the Turkish Airlines network [J]. *Journal of Air Transport Management*, 2017, 65(9): 76-87.
- [18] Santos G, Robin M. Determinants of delays at European airports [J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2010, 44(3): 392-403.
- [19] Wilken D, Berster P, Gelhausen M C. New empirical evidence on airport capacity utilisation: Relationships between hourly and annual air traffic volumes [J]. *Research in Transportation Business & Management*, 2011, 1(1): 118-127.
- [20] Xiao Y B, Fu X W, Oum T H, et al. Modeling airport capacity choice with real options [J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2017, 100(6): 93-114.
- [21] 莫辉辉, 金凤君, 刘毅, 等. 机场体系中心性的网络分析方法与实证 [J]. *地理科学*, 2010, 30(2): 204-212. [Mo Huihui, Jin Fengjun, Liu Yi, et al. Network analysis on centrality of airport system. *Scientia Geographica Sinica*, 2010, 30(2): 204-212.]
- [22] 丁金学, 金凤君, 王成金, 等. 中国交通枢纽空间布局的评价、优化与模拟 [J]. *地理学报*, 2011, 66(4): 504-514. [Ding Jinxue, Jin Fengjun, Wang Chengjin, et al. Evaluation, optimization and simulation of the spatial layout of transport hubs in China. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(4): 504-514.]
- [23] 曹小曙, 廖望. 全球多机场区域空间格局与类型划分 [J]. *地理科学进展*, 2018, 37(11): 1473-1484. [Cao Xiaoshu, Liao Wang. Spatial pattern and classification of the worldwide multi-airport regions. *Progress in Geography*, 2018, 37(11): 1473-1484.]
- [24] 王姣娥, 景悦. 中国城市网络等级结构特征及组织模式: 基于铁路和航空流的比较 [J]. *地理学报*, 2017, 72(8): 1508-1519. [Wang Jiao'e, Jing Yue. Comparison of spatial structure and organization mode of inter-city networks from the perspective of railway and air passenger flow. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(8): 1508-1519.]
- [25] 乐美龙, 李星灿, 高金敏. 机场到达时刻数量决策随机模型 [J]. *系统工程理论与实践*, 2017, 37(11): 2948-2954. [Le Meilong, Li Xingcan, Gao Jinmin. Stochastic model of determining airport arrival slots number. *Systems Engineering: Theory & Practice*, 2017, 37(11): 2948-2954.]
- [26] Wang J F, Li X H, Christakos G, et al. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun Region, China [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2010, 24(1): 107-127.
- [27] Pels E, Nijkamp P, Rietveld P. Inefficiencies and scale economies of European airport operations [J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2003, 39(5): 341-361.
- [28] Yu M M. Measuring physical efficiency of domestic airports in Taiwan with undesirable outputs and environmental factors [J]. *Journal of Air Transport Management*, 2004, 10(5): 295-303.
- [29] Merkert R, Mangia L. Efficiency of Italian and Norwegian airports: A matter of management or of the level of competition in remote regions? [J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2014, 62(4): 30-38.
- [30] Li L F, Wang J F, Cao Z D, et al. An information-fusion method to identify pattern of spatial heterogeneity for improving the accuracy of estimation [J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2008, 22(6): 689-704.
- [31] Pavlyuk D. Implication of spatial heterogeneity for airports' efficiency estimation [J]. *Research in Transportation Economics*, 2016, 56(2): 15-24.
- [32] Ren P, Pavlyuk L. Characterizing air traffic networks via large-scale aircraft tracking data: A comparison between China and the US networks [J]. *Journal of Air Transport Management*, 2018, 67(2): 181-196.
- [33] Ha H K, Wan Y, Yoshida Y, et al. Airline market structure

- and airport efficiency: Evidence from major Northeast Asian airports [J]. *Journal of Air Transport Management*, 2013, 33(8): 32-42.
- [34] Tsekeris T. Greek airports: Efficiency measurement and analysis of determinants [J]. *Journal of Air Transport Management*, 2011, 17(2): 140-142.
- [35] Cook A, Blom H A P, Lillo F, et al. Applying complexity science to air traffic management [J]. *Journal of Air Transport Management*, 2015, 42(1): 149-158.
- [36] Vespignani A. Modelling dynamical processes in complex socio-technical systems [J]. *Nature Physics*, 2012, 8(1): 32-39.
- [37] Murça M C R, Hansman R J, Li L, et al. Flight trajectory data analytics for characterization of air traffic flows: A comparative analysis of terminal area operations between New York, Hong Kong and Sao Paulo [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2018, 97(12): 324-347.
- [38] 董雅晴, 路紫, 刘媛, 等. 中国空中廊道划设与时空拥堵识别及其航线流量影响 [J]. *地理学报*, 2018, 73(10): 2001-2013. [Dong Yaqing, Lu Zi, Liu Yuan, et al. The design of China's corridors-in-the-sky and the influence of air routes traffic on the identification of space-time congestion. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(10): 2001-2013.]
- [39] Bush H, Starkie D. Competitive drivers towards improved airport/airline relationships [J]. *Journal of Air Transport Management*, 2014, 41(8): 45-49.
- [40] Starkie D. European airports and airlines: Evolving relationships and the regulatory implications [J]. *Journal of Air Transport Management*, 2012, 21(4): 40-49.
- [41] Jacquillat A, Odoni A R. A roadmap toward airport demand and capacity management [J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2018, 114(8): 168-185.
- [42] 路紫, 杜欣儒. 国外空域资源开发利用的理论基础、方法论变革与实践 [J]. *地球科学进展*, 2015, 30(11): 1260-1267. [Lu Zi, Du Xinru. The theoretical sources, innovation of methodologies and practice of exploitation and utilization of airspace in western countries. *Advances in Earth Science*, 2015, 30(11): 1260-1267.]
- [43] 王姣娥, 莫辉辉. 航空运输地理学研究进展与展望 [J]. *地理科学进展*, 2011, 30(6): 670-680. [Wang Jiao'e, Mo Huihui. *Geography of air transportation: Retrospect & prospect*. *Progress in Geography*, 2011, 30(6): 670-680.]
- [44] 叶倩, 吴殿廷, 戴特奇, 等. 中美航空客运网络层次结构和地域系统对比分析 [J]. *地理研究*, 2013, 32(6): 1084-1094. [Ye Qian, Wu Dianting, Dai Teqi, et al. A comparative analysis of hierarchy and regional system of domestic air passenger transport network between China and USA. *Geographical Research*, 2013, 32(6): 1084-1094.]
- [45] 徐敏政, 许珺, 陈娱. 基于最多叶子生成树的中国航空网络轴辐结构构建 [J]. *地理学报*, 2014, 69(12): 1847-1857. [Xu Minzheng, Xu Jun, Chen Yu. Construction of Chinese aviation hub-spoke structure based on maximum leaf spanning tree. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(12): 1847-1857.]
- [46] 吴文婕, 张小雷, 杨兆萍, 等. 乌鲁木齐国际机场时刻资源与航线布局的时空网络模式分析 [J]. *干旱区地理*, 2015, 38(6): 1290-1299. [Wu Wenjie, Zhang Xiaolei, Yang Zhaoping, et al. Temporal-spatial network analysis on time resource and airline layout of Urumqi international airport. *Arid Land Geography*, 2015, 38(6): 1290-1299.]
- [47] Mandel B N, Schnell O. An 'Open Sky' Scenario for Hamburg Airport and Germany [J]. *Journal of Air Transport Management*, 2001, 7(1): 9-24.

Estimation of time delay cost of hub airports in China, air routes effect and comparison with the United States

DU Xinru^{1,2}, LU Zi^{1,2*}, LI Renjie^{1,2}, DONG Yaqing^{1,2}, GAO Wei^{1,2}

(1. School of Resource and Environment Sciences, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050024, China;

2. Hebei Key Laboratory of Environmental Change and Ecological Construction, Shijiazhuang 050024, China)

Abstract: Based on the European Control (EC) estimation model and using aircraft configuration ratio and flight stages as impact parameters, this study estimated the time delay cost and the total time delay cost of Chinese hub airports in 24 hours with the improved EC estimation model. Then the air routes effect of time delay cost was analyzed and a comparison with the United States was carried out. The conclusions are as follows: 1) Time delay cost of the compound hub airports is generally higher than that of the regional hub airports while per minute delay cost and gating cost of regional hub airports are higher. This is caused by the centrality of the network structure of air routes, the need of aero geographic market, and the influence on the transmission efficiency of the aviation network in China. The air maintenance cost of hub airports accounts for the largest proportion of the total cost of time delay, which indicates that there are defects in the configuration of air corridors in China. 2) The spatial heterogeneity of the total cost of time delay between hub airports (air routes) and hub airport to non-hub airport (air routes) is caused by air route attributes, which are determined by the joint action of geographic market demand and the location of participating airports in air-corridors in the sky. The specific performance is affected by the difference of clustering levels: the hub and non-hub airports (air routes) generally exist in the low level, and the hub airports (air routes) basically exist in the high level. There is a significant difference in the total cost of time delay between the compound hub airports and the regional hub airports. The three routes in the fifth level clustering connect PEK, SHA, CAN, which is dominated by the aero geographic market, and the total cost of time delay accounts for 9.22% of the total cost of all routes in 24 hours. Among the total cost of time delay between hub airport and non-hub airport (air routes), PEK-SZX is the highest, followed by SHA-NKG. 3) The difference in time delay cost of hub airports and air routes between China and the United States is mainly manifested in the different proportion of the flight stages, which is determined by the width of characteristic path and the number of track intersections in air corridors in the sky.

Keywords: time delay cost; hub airports; EC estimation model; air corridors; China