

开放条件下长江三角洲区域的 综合交通可达性空间格局

吴 威^{1,2,*}, 曹有挥^{1,*}, 曹 卫东^{1,2}, 梁双波^{1,2}

(1 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008; 2 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 本文基于区域经济系统的开放性, 以县域为研究单元, 采用加权平均旅行时间指标, 分析了长江三角洲区域公路、铁路、水运、航空等单方式交通可达性空间格局, 并以此为基础剖析了区域综合交通可达性格局: 公路交通可达性大致呈环状格局, 铁路交通大部分节点可达性较好, 台州市域南部节点和舟山可达性差, 水运形成了弧状条带分布格局, 航空可达性大致呈南北对称分布; 综合交通可达性以上海及周边节点为中心向外围呈不规则环状逐渐降低, 可达性较好区域大致构成“Z”字形。通过可达性系数分析, 公路交通可达性分布较为均衡, 综合交通和航空次之, 水运较差, 铁路最不均衡。文章的最后提出了区域交通可达性及其均衡性提高的针对性措施。

关键词: 可达性; 空间格局; 交通方式; 综合交通; 均衡性; 长江三角洲区域

文章编号: 1000-0585(2007)02-0391-12

1 前言

可达性 (accessibility) 亦称通达性, 是国内外学术界相关研究的一个重要方向。目前可达性概念表述尚未尽一致, 其内涵十分丰富, Mei-Po Lwan 等^[1]认为地理可达性可分为区位 (地方) 可达性和个人可达性。简言之, 区位可达性指的是利用特定的交通系统, 从某一区位到达指定活动区位的便捷程度^[1~3]。交通地理学和区域经济学上常用可达性作为评价交通网络和交通区位的综合性指标。欧洲学者 Javier Gutiérrez 等^[4~7]采用多项定量指标, 针对不同尺度、不同交通系统建设所引起的区域可达性格局变化进行了研究; Gabriel Dupuy 等^[8]对欧洲城市公路可达性及其等级体系进行了分析。国内学者李思明等、罗鹏飞等就交通基础设施建设对可达性的影响进行了预测^[9,10]; 更多的学者对交通网络及可达性空间格局演化进行了探究^[11~14]。

起点、终点和交通系统是可达性研究中的三个基本要素^[2]。目的地节点的选择对结果影响很大, 仅以研究区内经济活动中心作为目的地节点, 其结果揭示的是区域内部联系的便捷程度; 但节点的运输联系既包括区域内部节点间的联系, 也包括与区域外节点的联系。采用国家铁路行政区域间货物交流数据, 我们计算了 1999~2003 年上海、江苏、浙江一市两省范围内部货物交流量占其总货物交流量的比重, 借以反映区际运输联系变化趋

收稿日期: 2006-05-20; 修订日期: 2006-11-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40471030)

作者简介: 吴威 (1976-), 男, 安徽歙县人, 博士研究生。主要研究方向为区域经济与运输地理。

E-mail: wudp1976@163.com

* 通讯作者: 曹有挥 (1959-), 男, 江苏扬州人, 博士, 研究员, 博士生导师。主要从事运输地理和区域城市研究。

E-mail: yhciao@niglas.ac.cn

势, 结果显示, 研究期间区内货物交流量比重持续下降, 从 1999 年的 27.13% 降为 2003 年的 23.59%, 也即 5 年间区际联系比重上升了 3.54%^[15]。区际联系比重逐渐增大, 反映区域经济空间在不断开放^[16]。在经济全球化背景下, 区域对外联系愈显重要且复杂化, 既包括与国内其他区域的联系, 也包括国际联系, 2004 年, 上海、宁波和舟山港货物吞吐量中外贸吞吐量达 42%^[17]。由于对外联系的广泛性和复杂性, 确定联系目的地节点较为困难, 目前的实证研究主要集中于区域内部联系的可达性, 仅见罗鹏飞等^[10]的研究考虑了区外重要节点作为联系的目的地。但仅对区内联系进行的研究基于的是封闭的区域系统, 这与现实区域系统的开放性相去甚远; 开放条件下, 节点的可达性应为区内联系可达性和区外联系可达性的综合^[18]。

在区域综合交通系统中, 各种交通方式具有不同的特征, 在综合交通体系中承担着不同的功能, 这就使区域交通网络综合可达性研究具有一定的难度, 已有的研究大多是针对单一交通方式进行的, 部分学者所做的综合研究也仅限于陆路交通的综合。Javier Gutiérrez 等^[5,7]在研究马德里—巴塞罗那—法国边界高速铁路线及欧洲高速铁路网建设对可达性的影响时考虑了公路交通的集疏运, 曹小曙等^[11]在研究东莞陆路交通可达性演化过程中综合考虑了公、铁两种交通方式。

本文试图基于综合交通网络, 同时考虑节点的区内、区外联系, 对长江三角洲区域综合交通可达性空间格局作一较为详尽的剖析。长江三角洲区域目前已形成了客运以公路、铁路, 货运以水运、公路为主, 多种交通方式并存的综合交通体系^[15]。客货运输中, 航空运输所占比重虽然不大, 但其绝对量已不可忽视, 2004 年该区域航空客货运量分别达到 4990 万人次和 222 万吨, 在快速输送客流及货物的及时运输 (just in time) 中承担着不可或缺的作用。因此本文所指的综合交通包括公路、铁路、水运和航空运输四种方式。

2 研究方法

2.1 资料选取

以 2004 年底行政区划为基准, 选取长江三角洲区域 16 市及所辖各县级行政单位为研究单元, 将各研究单元行政中心所在地抽象为 73 个空间节点。公路交通网络以人民交通出版社 2005 年版《中国交通营运里程图集》为基础图件, 过江通道更新到 2005 年 5 月润扬大桥通车; 铁路网络根据铁道部铁路营运线路图 (2003) 并根据近几年长江三角洲区域新建通车铁路线更新; 水运港口根据交通部规模以上港口旅客、货物吞吐量统计数据确定; 航空机场根据民航总局《2004 年民航机场生产统计公报》确定。

2.2 研究方法

随着可达性研究的不断深入, 其量算方法日益丰富^[1~3], 目前常用的指标包括最短旅行时间、加权平均旅行时间、经济潜能及日常可达性等。不同指标反映了学者对可达性概念理解上的差异, 但大部分指标都考虑了节点间的旅行成本及目的地节点的吸引力^[5]。本文采用加权平均旅行时间 (weighted average travel times) 计算各节点单方式交通可达性, 并通过加权求和分析节点综合交通可达性。加权平均旅行时间可表达为^[4~7]:

据中国民用航空总局规划发展财务司《2004 年民航机场生产统计公报》整理。

16 市为: 上海、南京、扬州、泰州、南通、镇江、常州、无锡、苏州、杭州、嘉兴、湖州、绍兴、宁波、舟山、台州。为方便起见, 本研究将崇明县纳入上海市, 岱山县、嵊泗县纳入舟山市, 不再单独设为研究单元。

$$A_i = \frac{\sum_{j=1}^n (T_{ij} \times M_j)}{\sum_{j=1}^n M_j} \tag{1}$$

式中， A_i 为*i*节点在交通网络中的加权平均旅行时间，即节点*i*到选定目的地节点最短旅行时间的加权平均值，表征可达性的优劣，其值越低可达性越好； T_{ij} 为节点*i*到节点*j*的最短旅行时间，反映了节点间的旅行成本； M_j 为节点*j*的质量，比如人口、地区生产总值（GDP）或设定的权重等，反映了节点*j*的吸引力。

综合交通可达性由综合加权平均旅行时间表征，由公式（2）求得。

$$IA_i = \sum_x A_{ix} \times w_x \tag{2}$$

IA_i 为节点*i*的综合加权平均旅行时间， A_{ix} 为*i*节点*x*交通方式（*x*取值为1~4，分别代表公路、铁路、水运及航空四种运输方式）的加权平均旅行时间， w_x 为*x*交通方式在综合交通网络中的权重。

四种运输方式中公路交通有其特殊性，不仅独立承担着区内外一部分运输联系的任务，同时又承担着其他三种非普适性运输方式的集疏运功能，是其他各运输方式高效运营的基础。公路短途运输优势明显，而铁路、水运、航空的长途运输功能相对突出。基于此，尽管公路交通事实上既承担着区内联系功能，还在一定程度上承担着区外联系的任务，我们认为，随着高速公路网的建设和日益完善，区外联系的功能主要由高速公路承担，与高速公路互通口的接近程度对各节点区外联系便捷程度的影响较之各节点的相对位置更明显。在高速公路逐渐成为长江三角洲区域普适性交通方式的背景下，绝大部分节点能在较短时间内到达高速公路互通口，节点间的差异不会很明显，因此，本文对此不再做专门研究，公路交通仅考虑各节点到区内主要节点城市的可达性。计算方法如下：设定高速公路平均行车速度100km/h，国道和省道70km/h，其他道路40km/h；选取研究区域16个中心节点城市为目的地，利用ARCVIEW的网络分析功能，计算各节点到中心节点的最短旅行时间；为表现经济规模对中心节点吸引力的影响，以各中心节点地区生产总值（GDP）为权重计算加权平均旅行时间作为可达性指标，结果体现了区内联系的便捷程度。

一方面由于铁路、水运和航空运输的非普适性，另一方面这三种运输方式主要承担着长途区际运输功能，各节点区位引致的距离差异相对于区际长途运输距离影响不大，故可以认为各节点在这些运输方式上的可达性主要应该表现在对交通基础设施的接近程度。考虑到这三种运输方式站场等级对服务水平有较大的影响，在计算了各节点到不同等级站场的最短旅行时间后采用站场等级为赋权因子计算加权平均旅行时间作为可达性指标，结果能较好地反映节点区外联系的便捷程度。

首先对研究区域内的火车站点、港口、机场进行分级。本文对铁路交通可达性的研究仅考虑县级以上铁路站点，因此将铁路站点分为两个层次：第一层次为地市级及以上行政中心节点火车站点，第二层次为县市级节点火车站点。长江三角洲区域港口密布，本文仅考虑长江及沿海主要港口，根据港口吞吐量并结合《长江三角洲地区现代化公路水路交通规划》，将港口分为三个等级：上海港、宁波-舟山港为全国性枢纽港口；南京港、南

人民网杭州 2005 年 12 月 20 日电 (<http://politics.people.com.cn/GB/14562/3958191.html>)：宁波、舟山两港一体化取得突破性进展，2006 年 1 月 1 日起正式启用“宁波-舟山港”。

通港、镇江港、苏州港为区域性枢纽港口；台州港、江阴港、扬州港、嘉兴港、泰州港、常州港为地方性枢纽港口。航空运输体系主要体现在机场布局和航线分布上，长江三角洲区域目前民航机场共有 9 个（本研究将上海虹桥机场和浦东机场合为上海机场），是我国机场密度最大的区域之一。上海机场是我国最高一级的航空枢纽^[19]，杭州、南京和宁波均为国际机场，因此将机场分为三个层次：全国性枢纽机场——上海；区域性枢纽机场——杭州、南京、宁波；地方性机场——常州、无锡、舟山、台州、南通。站场分级后分别量算各节点到各等级站场的最短旅行时间，如果到高等级站场最短旅行时间低于到低等级站场最短旅行时间，则认为本应由此低等级站场提供的服务由高等级站场提供，舍去与低等级站场的联系，并将权重计入上一级站场。站场权重根据各等级站场在区域经济发展中的相对重要性赋值，火车站点取 0.6、0.4，港口与机场均取 0.4、0.4、0.2。

3 单方式交通可达性空间格局

3.1 公路网络可达性空间格局

量算各节点到 16 个中心节点城市的最短旅行时间，以 2004 年 GDP 为权重求算各节点加权平均旅行时间，空间格局如图 1。

(1) 以最短路径为指标计算封闭环境中各节点间的可达性，其值一般由区域的几何中心向外围呈环状增高。本文计算的是各节点到 16 个中心城市的可达性，同时以加权平均旅行时间为指标，因此其值最低的地区（可达性水平最高）并不分布于区域的几何中心（环太湖地区）而稍偏于区域的北部和东部，集中在上海、苏州、嘉兴之间，大致成三角形。外围地区加权平均旅行时间较高，可达性较差，最差的节点集中分布于区域东南部的舟山和台州地区。这是长江三角洲区域公路网络、中心城市分布及其吸引力（GDP 规模）差异共同作用的结果。研究区域江苏境内已基本形成了纵横交错的高速公路网络，但浙江境内高

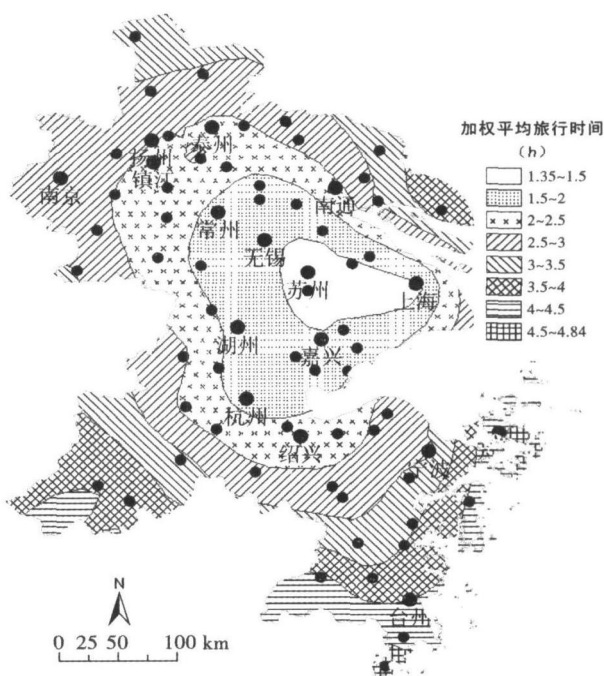


图 1 长江三角洲区域公路网络可达性空间格局

Fig 1 The pattern of highway transportation accessibility in Yangtze River Delta

速公路大体上还呈以杭州为中心的放射状格局，总体而言区域北部地区交通状况要优于南部；其次从中心城市的分布来看，北部中心城市密度高于南部，这将导致以中心城市为目的地的可达性最优区偏北分布；从 GDP 规模来看，北部中心节点城市总体上也高于南部，尤其是上海（含崇明县），其 2004 年 GDP 占 16 个中心节点城市 GDP 总值的 41%，故以 GDP 为权重分析的可达性最优区将偏向于上海。东南部地区中心节点城市较少，加之由于杭州湾的阻隔与上海及江苏部分节点的联系需绕道杭州湾，导致可达性差；而舟山的海

岛地形，与大陆的公路联系迄今依靠轮渡，大大影响该节点的公路可达性。

(2) 加权平均旅行时间以沪、苏、嘉为中心向外围逐渐增高，大致呈环状分布，但在不同方向上，等时线疏密有所差别。可达性最好的五个节点分别为上海、吴江、苏州、昆山、嘉兴，以此为核心，沿西北方向等时线分布较为稀疏，这一方向中心节点城市密集，交通发达，高速公路纵横交错，已初步形成以沪宁、沿江、京沪、宁通等高速公路为骨干的快速道路网络。但由图 1 不难发现，该方向上，扬州市加权平均旅行时间高于周边市县，可达性水平相对较差，在区域公路网络中有边缘化趋势。东北方向，由南通往东等时线分布较密，主要在于南通至今没有跨江大桥，与江南诸多中心节点城市联系不便；西南方向，由杭州往西南等时线较密主要原因在于该方向缺乏高速公路。从宁波往东到舟山，等时线较为密集则是由于舟山的海岛地形所致。

3 2 铁路站点可达性空间格局

长江三角洲区域目前主要的铁路线有沪宁线、沪杭线、杭甬线、宁启线、宣杭线、浙赣线、新长线等。本文铁路可达性由各节点到不同级别火车站点的加权平均旅行时间来表达，尽管节点可达性受公路交通的影响，但主要是铁路线路及站点分布的反映，与公路可达性格局呈现出明显不同的特征（图 2）。

加权平均旅行时间低值区呈面状广泛分布，高值区在边缘呈斑块状分布。大部分节点加权平均旅行时间小于 0.5h，这些节点广泛分布于沿江（长江）、环湖（太湖）和环湾（杭州湾）地区。一方面这一地区铁路线集中，同时大部分高等级铁路站点皆分布于此，另一方面公路交通发达，为铁路站点提供了快速集疏运条件。加权平均旅行时间大于 1.5h 的节点主要分布于舟山和台州部分地区。舟山和台州两市迄今没有铁路线，舟山虽和宁波具有地域临近性，但由于海峡阻隔，铁路站点可达性较差；台州北距杭甬铁路、西距浙赣铁路、南距温金铁路都有一定距离，可达性较差。另外从图上我们还发现浙赣铁路、宣杭铁路湖州以西沿线地区节点可达性并不优越，这是因为上述线路在区内缺乏高等级铁路站点，影响了沿线节点可达性。

铁路交通可达性格局也说明了尽管目前铁路交通在区域仍不是普适性的运输服务，但随着铁路网络及公路集疏运网络的不断建设和完善，台州和舟山可达性获得提高，将逐渐成为一种遍在性的运输方式。

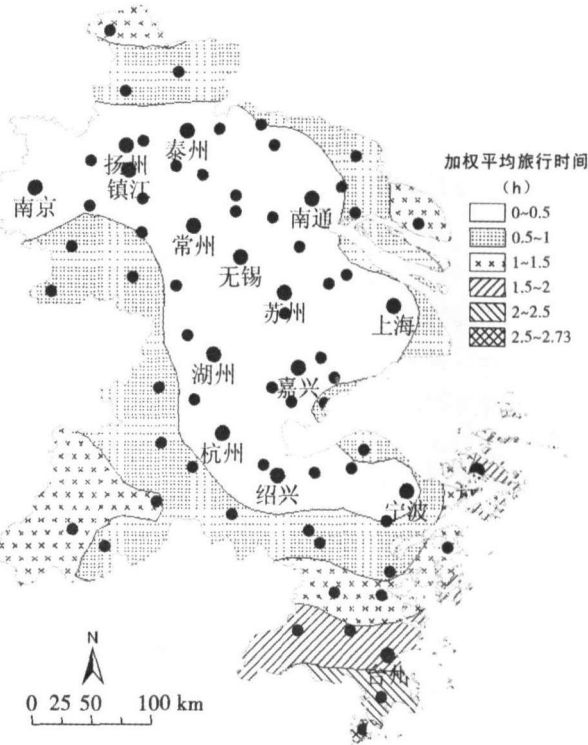


图 2 长江三角洲区域铁路站点可达性空间格局
Fig 2 The pattern of railway transportation accessibility in Yangtze River Delta

3.3 水运港口可达性空间格局

(1) 各节点到主要港口的可达性格局已形成以上海、宁波—舟山为核, 北部沿长江、南部沿海为低值轴, 向西南、北(东北)逐渐增高态势, 总体格局呈现弧形条带状分布(图3)。这种格局的形成主要是港口分布及港口等级体系共同作用的结果; 研究中考虑的港口集疏运方式为公路交通, 因此, 公路网络对这种格局也有一定的影响。本文仅考虑了沿江和沿海主要港口, 在区域港口体系中, 上海港和宁波—舟山港地位突出, 2004 年上海港和宁波港吞吐量分列全国第一、第二位, 集装箱吞吐量分列全国第一和第四位, 故上海和宁波、舟山成为区域水运可达性最好的地区。沿长江地区港口密布, 且与上海港有着便捷的陆路交通联系, 形成了可达性较好的一条轴, 向西一直延伸到南京。南部的浙江沿海除宁波—舟山港外还有台州港, 但在港口体系中等级较低, 因此从宁波往南延伸的

南部沿海可达性低值轴主要是由于和宁波的地域接近及甬台高速公路的快速集疏运形成的, 台州港的贡献较小。该低值轴线较之沿(长)江轴线要短得多, 可达性水平降低较快, 至台州可达性已经差于南京。长江以北的沿海地区水运可达性较差, 一方面是因为苏中沿海目前缺乏大型港口, 另一方面尽管启东、海门、如东等节点在地域上与上海相邻, 但受长江阻挡, 加之缺乏快速通道与南通等长江港口相通, 导致可达性较差。可达性最差的节点分布于区域的西南部, 主要包括杭州的桐庐、建德、淳安和湖州的安吉等县市。这些节点远离主要港口, 同时由于山地地形, 公路交通可达性较差, 难以便捷享受港口服务。

(2) 在弧形条带状总体格局下, 由于沪杭、杭甬高速公路为上海港和宁波—舟山港提供了快速集疏运条件, 沿线地区能更方便地享受两大枢纽港口的服务, 可达性优于两侧地区, 在格局图上表现为加权平均旅行时间等时线沿高速公路向杭州方向突出。由于杭州—临安高等级公路的影响, 等时线由杭州往临安方向突出, 致临安可达性较优。

3.4 航空机场可达性空间格局

与公路、铁路和水运可达性格局不同, 航空可达性除上海依托上海机场的全国枢纽地位形成了可达性最为优越的强中心外, 杭州、南京、宁波等三个城市分别依托其国际机场, 可达性优于周边地区, 形成了三个可达性较为优越的次中心, 呈现岛状分布格局(图4)。在三个次中心中, 杭州凭借其上海的地域临近优势, 可达性要优于南京和宁波。但总体上, 可达性格局大致呈南北对称分布。中部地区节点可达性较好, 可达性较差的节点

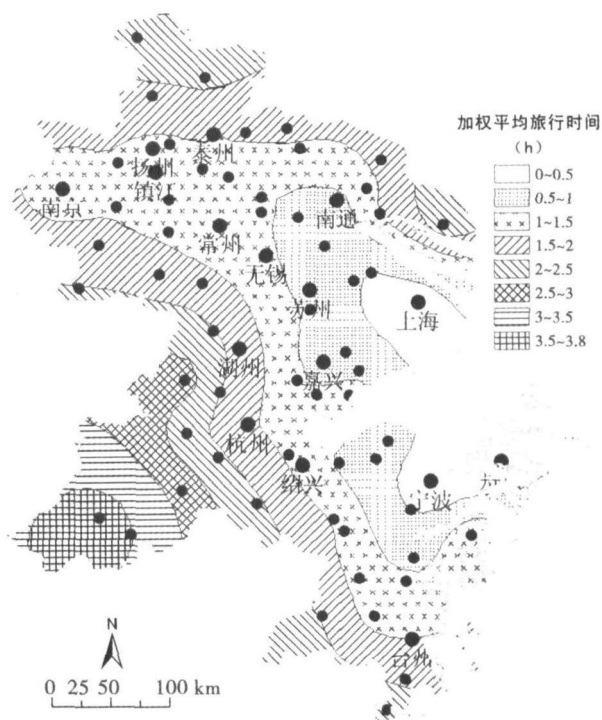


图3 长江三角洲区域水运港口可达性空间格局

Fig 3 The pattern of waterway transportation accessibility in Yangtze River Delta

分布于区域的南北部，且愈向边缘地区加权平均旅行时间愈高，可达性水平愈低。2h 等时线在北部通过泰州、南通一线，在南部则通过桐庐、新昌、宁海，折向北通过宁波的北仑到舟山西部。泰州南通以北以东地区由于长江以北缺乏枢纽机场，同时这一地区距上海机场和南京机场较远或受长江阻隔从而导致可达性较差。尽管台州、舟山均有机场分布，但由于在机场体系中等级较低，且远离上海机场，因此可达性依旧较差。西南部的淳安和建德一方面距离上海机场较远，另一方面还受较为落后的公路交通状况制约。

在中部可达性较好地区，观察 1.5h 等时线，除南京和宁波岛状突起外，有从上海沿沪宁线和沪杭线向外延伸的特征，这一方面与高速公路的快捷集疏运有关，同时还受到机场分布的影响。沿沪宁线一直延伸到常州，而沿京沪线延伸的范围要小得多，因为无锡机场和常州机场加大了这种延伸的势能；沿沪杭线延伸到临安，这也与杭州国际机场的区域性枢纽地位分不开。

4 综合交通可达性空间格局及均衡性对比分析

4 1 综合交通可达性空间格局

目前对综合交通体系中各交通方式权重的研究较为鲜见，金凤君等在对我国区域交通通信基础设施发展作定量评价时，基于各方式对经济发展及投资环境的影响确定权重，略突出了铁路和海港的地位^[20]。本文尝试从区域运输结构入手，结合运输方式对区域经济发展及投资环境的影响确定权重。通过对 2000~ 2004 年间上海、江苏、浙江客货运量的统计分析，在铁路、公路、水运三种主要运输方式中，公路客运量占 93.34~ 94.25%；货运量中公路占 63.67~ 65.99%，水运占 28.50~ 32.28%。相比较而言，长江三角洲区域综合运输格局中公路占主导，水运地位也较为突出。考虑到公路运输量中为其他运输方式的集疏运量占到一定的比重，同时在计算其他运输方式可达性的过程中叠加了公路的影响，本文适当降低公路交通的权重。尽管在区域运输结构中，航空运输客货运量相对较小，但随着科学技术的发展，其在经济社会发展中的地位日益重要^[21]，不仅提高了经济交往中的效率和效益，同时还改变着区域社会经济联系的空间格局^[22]，在航空网络中有

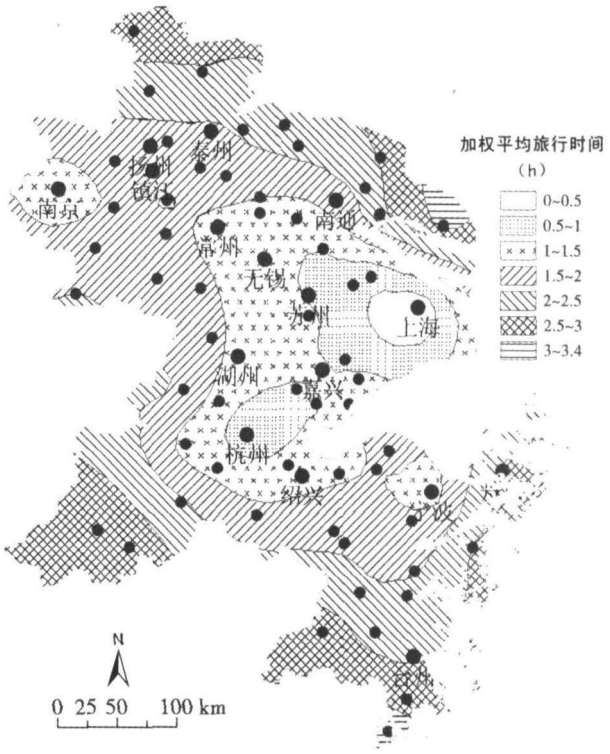


图 4 长江三角洲区域航空机场可达性空间格局

Fig. 4 The pattern of civil aviation transportation accessibility in Yangtze River Delta

据上海市、江苏省、浙江省 2005 年统计年鉴整理。

着良好连接的节点能够提高所在区域的竞争优势^[23]。基于以上考虑, 我们设定权重为: 公路 0.3、铁路 0.2、水运 0.3、航空 0.2, 以此计算节点的综合加权平均旅行时间 (IA_i), 结果如表 1、图 5。

表 1 长江三角洲区域节点综合加权平均旅行时间

Tab 1 The weighted average travel time of integrated transportation in Yangtze River Delta									
节点	IA_i	节点	IA_i	节点	IA_i	节点	IA_i	节点	IA_i
上海	0.40	桐乡	1.13	海盐	1.38	仪征	1.61	海安	1.94
太仓	0.81	杭州	1.15	南京	1.44	姜堰	1.66	高邮	2.01
昆山	0.82	常州	1.16	宜兴	1.49	溧阳	1.70	海门	2.04
嘉兴	0.83	江阴	1.17	泰兴	1.49	临安	1.70	天台	2.04
苏州	0.84	靖江	1.22	德清	1.49	如皋	1.73	三门	2.07
嘉善	0.95	上虞	1.30	扬州	1.50	通州	1.75	高淳	2.09
常熟	0.95	丹阳	1.32	奉化	1.52	嵊州	1.76	如东	2.14
吴江	0.97	镇江	1.33	泰州	1.53	溧水	1.76	安吉	2.19
无锡	1.04	绍兴县	1.33	金坛	1.54	扬中	1.76	临海	2.22
海宁	1.08	南通	1.34	江都	1.56	富阳	1.77	兴化	2.22
平湖	1.11	绍兴	1.34	慈溪	1.56	新昌	1.80	舟山	2.25
张家港	1.11	余姚	1.38	长兴	1.58	宁海	1.83	桐庐	2.44
宁波	1.12	湖州	1.38	句容	1.60	诸暨	1.85	宝应	2.45

(1) 可达性水平最高、区位条件最优越的节点为上海, 其周边的太仓、昆山、嘉兴、苏州、嘉善、常熟、吴江等节点次之。这一地区公路、铁路、航空和水运交通都非常便捷, 多条高速公路纵横交织构成高速公路网; 沪宁线、沪杭线是区域铁路主干道; 上海又是全国性航空枢纽和水运枢纽, 综合交通优势突出。可达性最差的节点主要分布于区域的南北部边缘地区, 主要包括台州市域的玉环、温岭、仙居、台州等节点, 杭州市域西南部的淳安、建德及南通市域东部的启东等节点。从公路交通可达性角度, 本研究是以区域内 16 个中心城市为目的地计算的加权平均旅行时间, 边缘地区可达性较差; 而从铁路、水运和航空角度, 这些地区或者缺乏该类基础设施, 或者基础设施站点等级较低, 对提高节点可达性贡献不大。

(2) 可达性的总体格局北部地区优于南部, 东部地区优于西部。若以浙江和江苏、上海行政边界, 将长江三角洲区域分

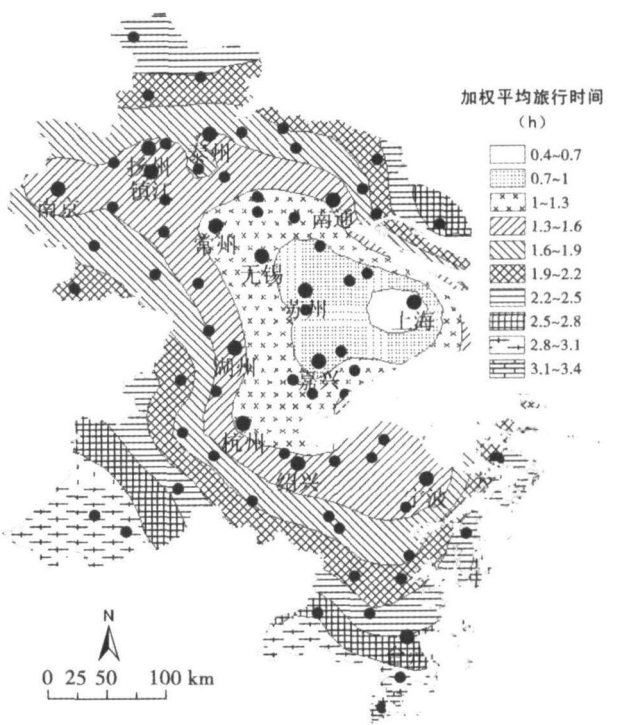


图 5 长江三角洲区域综合交通可达性空间格局
Fig 5 The pattern of integrated transportation accessibility in Yangtze River Delta

为北部和南部, 则北部有节点 37 个, 综合加权平均旅行时间均值为 1.52h, 南部有节点 36 个, 其均值为 1.82h, 较之北部地区均值高出近 20%。北部地区不仅综合交通较之南部地区发达、中心节点城市数量也多于南部。

(3) 综合加权平均旅行时间以上海及其邻近地区为低值中心向外围呈不规则环状逐渐增高, 但 1.6h 等时线变形非常明显。一是在扬中附近形成了明显的内凹, 主要由于该节点公路可达性较之周边节点为差 (如 2.1 节分析), 导致其综合交通可达性劣于其周边节点。二是在于 1.6h 等时线沿长江西延明显, 一直沿江延伸至南京以西区域边缘。这是沿江各节点综合交通可达性较为优越的反映。尽管由于其边缘位置, 南京及周边沿江节点公路交通可达性一般, 但沿江地区铁路交通发达、水运便利, 同时南京机场等级较高, 周边还有常州机场, 航空可达性较为优越, 综合交通可达性较好。

(4) 可达性低值区由可达性低值中心沿区域交通主轴向外呈“Z”字形延伸。以上海为核, 低值区沿西北方向向南京延伸, 沿西南方向向杭州延伸, 在杭州转向东南继续向宁波延伸。这与区域交通主轴分布及城市连绵区格局相一致。长江三角洲区域“Z”字形交通轴线及城镇带已得到公认。交通轴线由多种运输方式构成了综合运输通道。上海与南京之间已形成主要由高速公路、铁路、长江水运以及航空运输构成的综合运输通道, 随着过江通道建设的快速发展, 这一轴线已跨越了长江阻隔; 上海与杭州及宁波也形成了主要由高速公路、铁路和水运构成的综合运输通道。这一“Z”字形交通轴线内集中了长江三角洲区域绝大部分的中心节点城市, 成为区域综合交通可达性较为优越的一个条带。

(5) 开放条件下, 由于考虑了区际联系, 门户区位及附近节点可达性优势得以体现。与参考文献 [14] 相比, 门户区位较为集中的沿江地区及环杭州湾地区可达性提升明显。

4.2 可达性空间格局的均衡性对比分析

可达性系数 (accessibility coefficient) 指网络内各节点加权平均旅行时间与其均值的比值, 是衡量各节点相对可达性状况的重要指标, 其数学表达式为^[12]:

$$A_{di} = \frac{A_i}{\sum A_i/n} \quad (3)$$

式中 A_{di} 为节点 i 的可达性系数, n 为网络中节点数。可达性系数消除了加权平均旅行时间数值大小的影响, 可用于各交通方式间的对比。统计学中常用样本的标准方差来衡量对象分布的均衡性, 本文通过可达性系数的标准方差, 结合可达性系数极值差、特定数值段节点个数等指标, 对比分析综合交通及各单方式交通可达性空间格局的均衡性。

可达性系数的标准方差较为综合地反映了可达性分布的均衡性, 极值差及极端节点个数则从极端节点角度体现了可达性分布的均衡性。事实上, 由表 2, 长江三角洲区域综合交通及各单方式交通在可达性系数极值差、 < 0.5 及 > 1.5 的极端节点个数之和、标准方差三指标的排序上呈现了很好的一致性, 公路交通各指标最低, 其次是综合交通和航空, 再次是水运, 铁路各指标最高。由此可以认为公路交通可达性分布均衡性最好, 综合交通和航空次之, 水运较差, 铁路可达性分布最为不均衡。在本文研究的四种交通方式中, 公路交通是唯一提供遍在性服务的运输方式, 尽管受到路网布局、公路等级、经济中心分布及其经济规模的影响, 可达性水平以沪苏嘉为中心向外围逐渐降低, 但其可达性格局依旧是四种交通方式中最均衡的。长江三角洲区域机场密度大, 且分布较为均衡, 尤其是一些边缘节点城市也有机场分布, 如南通、舟山、台州等, 尽管这些机场等级较低, 但在地方性航空可达性的提高中也起着重要作用, 因此航空可达性分布也较为均衡。水运交通与公

路和航空相比较，港口分布受自然条件的制约更大些，加之本文仅考虑了区域内沿江和沿海的主要港口，其可达性分布均衡性较差。铁路交通正逐渐成为遍在性运输方式，大部分地区都能在 0~ 0. 5h 内享受铁路服务，但浙江的舟山和台州两个市目前仍没有铁路线分布，可达性相对很差，可达性系数极值之差高达 4 482，< 0. 5 及> 1. 5 的极端节点数之和高达 41 个，故其格局呈高度不均衡分布状态。由于多种交通方式之间的互补作用，综合交通可达性系数标准方差为 0. 3558，可达性分布较为均衡。

表 2 长江三角洲区域各运输方式可达性系数分布统计表

Tab 2 The distribution of accessibility coefficient of different transportation models in Yangtze River Delta		综合	公路	铁路	水运	航空
极 值	最低值	0 2461	0 5227	0	0	0
	最高值	2 056	1 8782	4 482	2 6376	1 9089
	差值	1 8099	1 3555	4 482	2 6376	1 9089
特定数值段节点 个数统计	< 0. 5 节点个数	4	0	27	8	4
	< 1 节点个数	41	39	44	39	39
	> 1. 5 节点个数	7	8	14	8	8
	< 0. 5 及> 1. 5 节点数之和	11	8	41	16	12
标准方差		0. 3558	0. 32	0. 9414	0. 4839	0. 3706

本文还统计了可达性系数< 1 的节点数，结合极端节点数，以期更为详细地揭示可达性分布的均衡性特征。表 2 显示，综合交通及各单方式交通可达性系数小于 1 的节点数均超过了总节点数的一半（37），表明可达性水平优于平均水平的节点个数稍占多数，同时反映出可达性劣于平均水平的节点其可达性状况总体更差。分析可达性系数极端节点（可达性系数< 0. 5 和可达性系数> 1. 5）的个数，公路、综合交通和航空三者可达性好的极端节点数都小于可达性差的极端节点数，由此说明可达性分布的不均衡主要是由于可达性差的节点数量较多而造成的。水运可达性好和差的极端节点个数相等，且其和大于公路、综合交通和航空，因此认为由于两个极端节点数都较大，导致可达性分布均衡性较差。铁路交通可达性好的极端节点数大大多于可达性差的极端节点数，且其和高达 41，位居第一，由此认为铁路可达性高度不均衡状态主要是由于绝大部分节点可达性良好，从而拉大了与部分没有铁路线分布的节点可达性水平的差异而造成的。

5 结论与讨论

（1）长江三角洲区域各种交通方式可达性格局呈现不同特征：公路交通可达性水平形成了以沪苏嘉为中心，向外围呈环状逐渐降低格局，东南部边缘节点可达性最差；铁路交通大部分节点可达性较好，集中分布于沿江（长江）、环湖（太湖）和环湾（杭州湾）地区，可达性差的节点集中于台州市域南部和舟山；水运形成了弧状条带分布格局，以上海、宁波、舟山为核，北部沿长江、南部沿海形成了加权平均旅行时间低值轴，向西南、北（东北）逐渐增高，可达性水平下降；航空可达性大致呈南北对称分布，可达性水平较高节点集中于中部，上海形成了可达性最优的强中心，杭州、南京和宁波可达性优于周边节点，在中部地区形成了岛状突起；上海及周边节点是综合交通可达性最好的地区，以此为中向外围呈不规则环状逐渐降低，可达性较好区域大致成“Z”形，与区域交通主轴分布及城市连绵区格局相一致，南北边缘地区节点可达性较差，总体上北部可达性优于南

部, 东部优于西部。

(2) 对比长江三角洲区域公路、铁路、航空、水运及综合交通可达性分布的均衡性, 公路交通分布较为均衡, 综合交通和航空次之, 水运较差, 铁路交通可达性分布最不平衡。总体而言, 长江三角洲区域各交通方式总体可达水平及其分布均衡性的提高都有赖于低可达水平节点可达性的提高。

(3) 从区域一体化角度分析, 未来长江三角洲区域综合交通网络建设的重点在于边缘节点可达性的提高。公路交通建设重点应放在过江通道、宁波舟山跨海通道及边缘地区中心节点城市与其所辖县级节点快速道路等的建设上。铁路交通可达水平及均衡性的提高一方面依托铁路网建设与完善来实现, 关键在于沿海铁路建设, 实现台州市域铁路线路覆盖; 另一方面有赖于公路集疏运网络的完善, 以提高铁路建设受限地区节点可达性, 重点在于宁波舟山跨海公路通道建设, 提高舟山到宁波火车站的通达水平。航空和水运可达性的提高则主要依托集疏运网络的完善来实现。目前长江三角洲区域机场和港口体系布局已基本定型, 在短时间内不会有较大的变动, 快速集疏运通道的建设和网化是低可达水平节点提高可达性的主要途径。

参考文献:

- [1] Mei Po Lwan, Alan T. Murray, Morton E. O' Kelly, Michael Tiefelsdorf. Recent advances in accessibility research: Representation, methodology and applications. *Journal of Geographical Systems*, 2003, (5): 129~ 138
- [2] 李平华, 陆玉麒. 可达性研究的回顾与展望. *地理科学进展*, 2005, 24(3): 69~ 77
- [3] 杨家文, 周一星. 通达性: 概念、度量及应用. *地理学与国土研究*, 1999, 15(2): 61~ 66
- [4] Javier Gutiérrez, Gabriel Gómez. The impact of orbital motorways on intra-metropolitan accessibility: the case of Madrid's M-40. *Journal of Transport Geography*, 1999, 7(1): 1~ 15
- [5] Javier Gutiérrez. Location, economic potential and daily accessibility: an analysis of the accessibility impact of the high-speed line Madrid-Barcelona-French border. *Journal of Transport Geography*, 2001, 9(4): 229~ 242
- [6] Javier Gutiérrez, Paloma Urbano. Accessibility in the European Union: the impact of the transeuropean road network. *Journal of Transport Geography*, 1996, 4(1): 15~ 25
- [7] Javier Gutiérrez, Rafael González, Gabriel Gómez. The European high-speed train network: predicted effects on accessibility patterns. *Journal of Transport Geography*, 1996, 4(4): 227~ 238
- [8] Gabriel Dupuy, Vaclav Stransky. Cities and highway network in Europe. *Journal of Transport Geography*, 1996, 4(2): 107~ 121
- [9] Siming Li, Yiman Shum. Impacts of the National Truck Highway system on accessibility in China. *Journal of Transport Geography*, 2001, 9(1): 39~ 48
- [10] 罗鹏飞, 徐逸伦, 张楠楠. 高速铁路对区域可达性的影响研究——以沪宁地区为例. *经济地理*, 2004, 24(3): 407~ 411
- [11] 曹小曙, 闫小培. 经济发达地区交通网络演化对通达性空间格局的影响——以广东省东莞市为例. *地理研究*, 2003, 22(3): 305~ 312
- [12] 金凤君, 王娇娥. 二十世纪中国铁路网扩展及其空间通达性. *地理学报*, 2004, 59(2): 293~ 302
- [13] 徐昶, 陆玉麒. 高等级公路网建设对区域可达性的影响——以江苏省为例. *经济地理*, 2004, 24(6): 830~ 833
- [14] 吴威, 曹有挥, 曹卫东, 等. 长江三角洲公路网络的可达性空间格局及其演化. *地理学报*, 2006, 61(10): 1065~ 1074
- [15] 中国交通年鉴编委会. 中国交通年鉴 2000~ 2004. 北京: 中国交通年鉴社, 2000~ 2004
- [16] 周一星, 杨家文. 九十年代我国国际货流联系的变动趋势. *中国软科学*, 2001, (6): 85~ 89
- [17] 中华人民共和国交通部. 2004 中国航运发展报告. 北京: 人民交通出版社, 2005
- [18] 陆玉麒, 俞勇军. 区域双核结构模式的数学推导. *地理学报*, 2003, 58(3): 406~ 414
- [19] 金凤君, 王成金. 轴-辐侍服理念下的中国航空网络模式构筑. *地理研究*, 2005, 24(5): 774~ 784

- [20] 金凤君, 王缉宪. 中国交通通信基础设施的发展类型研究. 地理科学, 1998, 18(4): 335~ 341.
- [21] 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. 地理科学, 2003, 23(5): 519~ 525.
- [22] 金凤君. 我国航空客流网络发展及其地域系统研究. 地理研究, 2001, 20(1): 31~ 39.
- [23] 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. 地理研究, 2002, 21(3): 276~ 286.

On the patterns of integrated transportation accessibility in the Yangtze River Delta under opening conditions

WU Wei^{1, 2}, CAO You-hui¹, CAO Wei-dong^{1, 2}, LIANG Shuang-bo^{1, 2}

(1 Nanjing Institute of Geography and Limnology, CAS, Nanjing 210008, China;

2 Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Choosing weighted average travel times as indicator, county as research unit, this paper analyses the accessibility patterns of highway, railway, waterway and civil aviation respectively in the Yangtze River Delta under opening conditions, with these results, the accessibility patterns of integrated transportation are elaborated. The accessibility of highway takes on a layered pattern with Shanghai, Suzhou and Jiaxing as the center, which implicates the transport convenience of nodes within the region. Most nodes are better but those located in the south of Taizhou and Zhoushan (Zhejiang province) are worse in railway accessibility. In waterway transport, the accessibility shows an arc belt pattern, with better accessibility, in the center composed of Shanghai, Ningbo and Zhoushan, the belt along the Yangtze River in the north and along the East China Sea in the south but it decreases southwestwards and northwards (northeastwards). The accessibility of civil aviation takes on a south-north symmetry pattern approximately, having nodes with better accessibility concentrated in the middle part. Shanghai is the best node in civil aviation accessibility, Hangzhou, Nanjing and Ningbo are better than those nodes around them, which form the "islands-shaped" pattern. As to integrated transportation, Shanghai and nodes around it are best in accessibility, centered around this area, the accessibility decreases to the periphery, and the area with better accessibility forms "Z-shaped" pattern, which is consistent with the regional transport and megalopolis pattern, and the accessibility of the nodes in the south and north edge are worse, as a whole, the north is better than the south and the east is better than the west in accessibility. According to the analysis of accessibility coefficient, the highway is the best one in equilibrium of accessibility distribution, integrated and civil aviation transportation takes the second place, waterway is worse, and railway is the worst. For the sake of integration of this region, the consummation of integrated transportation system should be focused on improving the accessibility of the edge nodes in the future.

Key words: accessibility; pattern; transportation model; integrated transportation; equilibrium; Yangtze River Delta