

高速交通网络时空结构的阶段性演进及理论模型 ——以江苏省高速公路交通流网络为例

柯文前^{1,2,3}, 陆玉麒³, 陈 伟⁴, 丁毅辉⁵, 杨 青³

(1. 福建师范大学地理研究所, 福州 350007; 2. 湿润亚热带生态地理过程教育部重点实验室, 福州 350007;

3. 南京师范大学地理科学学院, 南京 210023; 4. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;

5. 苏州工业园区格网信息科技有限公司, 苏州 215000)

摘要: 高速交通网络作为地区社会经济联系空间结构塑造的显著力量, 具有关键指征作用。在江苏省内高速公路交通流网络 2004 年 1 月-2012 年 12 月连续时空尺度上的三维动态 OD 数据支撑下, 引入非负张量分解的时空分析方法, 对高速公路交通流网络阶段性演进特征和时空结构分析基础上, 尝试提炼其理论模型。结论如下: ① 江苏省高速公路交通流网络时间结构具有明显的三阶段特征, 分别为 2004 年 1 月-2005 年 4 月、2005 年 5 月-2008 年 6 月和 2008 年 7 月-2012 年 12 月, 对应的空间结构由倒“T”字型向倒“下”字型, 再向倒“不”字型演变。② 阶段性演进是整体演化过程的重要组成部分, 在长尺度上表现为趋势的分段而在小尺度上则为波动结构变化, 江苏省高速公路交通流网络现正处于网络提升充实阶段。③ 基于江苏省的实证, 归纳演绎了一个由路网离散分布—局部网络建构—区域初步连通—区域发育成网—网络提升充实—网络一体化的 6 阶段理论模型。

关键词: 理论模型; 阶段性演进; 时空结构; 高速公路网络; 江苏省

DOI: 10.11821/dlxb201602008

1 引言

地区相互作用联系的时空结构及演化机理(模式)是人文地理学研究的核心问题之一^[1]。受多种因素综合影响, 地区相互作用形成的网络在时空尺度上不断进行动态演化^[2]。当探求其一般规律性时, 人文地理学以多阶段抽象图形的动态理论模型予以表征, 诸如弗里德曼的核心边缘结构模式、塔夫的海港空间结构模式和点—轴空间结构系统理论等均有其相应的演化过程模型^[3-4]。显然, 多阶段抽象的理论模型表达是人文地理学对地球表层经济社会空间秩序的本质认知, 同时是指导区域空间开发、产业布局与规划实践的理论基础。

高速交通网络作为地区联系网络的一种, 是推动社会经济空间结构塑造的显著力量^[5-6]。随交通运输技术发展, 以高速公路、航空和高速铁路等为主体的高速交通网络已逐渐形成, 并成为现代交通运输体系的重要组成部分。作为三类主导城市关联的交通流形式, 各自承载的人流和货流在功能定位有显著的差异与互补关系^[7]。航空和高铁一般关注区际的长程联系, 人流以公务、旅游出行等为主, 而货流则是大规模的集中运输^[8-9]。总体上

收稿日期: 2015-04-01; 修订日期: 2015-08-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(41430635, 41571379, 41471319) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41430635, No.41571379, No.41471319]

作者简介: 柯文前(1988-), 男, 福建晋江人, 博士后, 研究方向为空间结构与交通地理学。E-mail: wqke2005@163.com

通讯作者: 陆玉麒(1963-), 男, 江苏张家港人, 教授, 博士生导师, 主要从事空间结构与区域发展研究。

E-mail: luyuqi@263.net

具有明确的目的性、计划性和易观测性。高速公路则有其明显特殊性：① 要素的长程和短程流动并存，且短程流动是有效识别城市关联结构的重要指征^[10]；② 要素的计划性与即时性流动共存，且对市场的波动更为敏感，对城市间社会经济活动响应也更为强烈；③ 要素的一次流动中，人流与货流混合流动较普遍，网络时空结构的挖掘较为复杂。以上独特性使得从高速公路网络的要素流动入手进行城市关联结构与演化理论模型研究缺乏有效的数据支撑。

受制于真实高速公路交通流时空数据获取上的困难，现有研究的现状与不足主要为：① 直接通过理论总结的演进过程模型，多以定性或半定量分析为主，与基于数据驱动提炼的模型之间，在逻辑上存在断层^[11]；② 选取离散时点的计划性（公路）客流班次数据所呈现的格局，在城市关联时空结构真实性的刻画上有待商榷^[12]；③ 基于空间相互作用模型和实体高速路网进行地区经济联系的模拟，在精细性的表达上仍显不足，致使理论模式分析面临困境^[13-14]。

聚焦特定空间尺度的区域，采集连续时空尺度上的高速交通流数据，并利用合适的建模方法对其进行特征解析与模式提炼是解决该问题的可行路径之一。基于此，拟以江苏省为案例区，获取省内高速公路网络2004年1月-2012年12月的连续OD数据为支撑，引入可对时空网络进行特征解析的非负张量分解方法，实现对阶段特征解析、结构分析及模型提炼。

2 数据处理与研究方法

2.1 江苏省高速公路建设与交通流数据预处理

江苏省地形以平原为主，东西相对较短，南北狭长。地跨长江，并且长江江苏段长达370 km，由西向东穿越江苏省，将其分为南、北两大区域。长江的存在使得江苏省南北沟通缺乏便捷运输通道，全省经济表现出明显的南北不协调。为打破长江天堑对南北两地的阻隔及经济发展的制约，江苏省对跨越长江的高速公路网及过江通道建设不断加快和完善。至2012年底，全省境内高速路网密度位居全国第一，已形成“四纵四横四联”格局，建设的过江通道已达10座，收费站节点间存在OD流量的收费站350个，基本覆盖整个区域（图1）。

交通流数据来源于江苏省高速公路真实的车流量，每一条记录为每辆车的苏通卡号及进站和出站的收费站编号、时间等。分析需要，对每条记录以“进站编号—出站编号”相



图1 研究时段内江苏省高速公路收费站的空間分布
Fig. 1 Spatial distribution of Jiangsu province expressway toll stations in research period

同的情况实现月份尺度的汇总, 并删除可能的干扰和无效数据, 得到初步的结果为2004年1月-2012年12月连续的“进站—出站—月份”构成 $350 \times 350 \times 108$ 的三维OD流量矩阵。鉴于探讨县市层面上的交通流网络时空特征, 在已有矩阵结构基础上进一步汇总至城市节点 $59 \times 59 \times 108$ 的三维OD流量矩阵^①。考察的是江苏省区域内部的空间联系特征, 省界收费站流量数据不计算在内^②; 非技术因素, 个别桥隧如南京长江第二大桥及2011年4月和2012年10月整个网络流量数据存在部分缺失。

2.2 高维时空分析的非负张量分解方法

非负张量分解 (Non-negative Tensor Factorization, NTF) 是非负矩阵分解 (Non-negative Matrix Factorization, NMF) 向高维的推广。本文所用模型类似PARAFAC模型, 均是Rank-1分解, 但区别为PARAFAC是在整个数据空间做旋转, 得出结果可能为负的系数, 而本文模型通过对系数进行非负约束, 可更好表征数据内蕴的意义和结构, 实现对原始数据的近似逼近^[15-16]。

动态演化的高速公路交通流网络具备了高维时空数据的特性。本文中, 当城市 i 作为交通流的起始地 (流出地) 定义为 O_i ($O = \{o_1, o_2, \dots, o_m\}$), 当城市 j 作为交通流的目的地 (流入地) 定义为 D_j ($D = \{d_1, d_2, \dots, d_m\}$), 其中 $M = m = 59$ 个城市; 时间长度 k 定义为 T_k ($T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$), 其中 $N = n = 108$ 个月份。步骤如图2所示, 三维的非负张量表达式可表示为:

$$\chi_{ijk} = \sum_{r=1}^R O_{ir} \times D_{jr} \times T_{kr} \quad (r=1, 2, \dots, R) \quad (1)$$

式中: R 代表分解得到的组分数目; $O \in \mathbb{R}^{I \times R} = O \in \mathbb{R}^{M \times m}$; $D \in \mathbb{R}^{J \times R} = D \in \mathbb{R}^{M \times m}$; $T \in \mathbb{R}^{K \times R} = T \in \mathbb{R}^{N \times n}$; $\chi_{ijk} \in \mathbb{R}^{I \times J \times K} = \chi_{ijk} \in \mathbb{R}^{M \times M \times N}$ 。

上述表达式求解的原理是以 β -梯度下降法近似思想展开, 且当满足重构结果与原始数据间的标准误差 $RMSE$ 达到最小, 认为得到的主导结构和组分数目最优。表示为:

$$RMSE = \min \left\| \chi_{ijk} - \hat{\chi}_{ijk} \right\|_F^2, \quad s.t. \quad O_{ir} \geq 0, D_{jr} \geq 0, T_{kr} \geq 0 \quad (2)$$

式中: $\hat{\chi}_{ijk} \approx O_{ir} \otimes D_{jr} \otimes T_{kr}$ 代表的是重构后的高维张量^[17-18]。

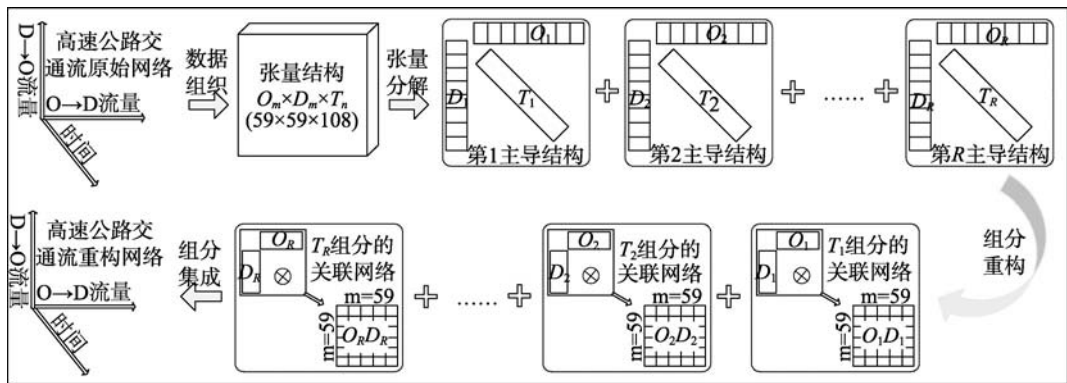


图2 非负张量分解与重构过程的流程示意图

Fig. 2 The process schematic graph of the decomposition and reconstruction of Non-negative Tensor Factorization method

① 由于在研究时段内高淳县、如东县、阜宁县和金湖县的高速收费站节点流量数据没有并入联网中心或没有收费站分布, 因此在该时段中不考虑这几个县的流量, 仅分析其余59个县域构成的城市交通流网络。

② 过境交通的要素流为非真正意义的OD, 对本区社会经济发展产生的作用与非过境交通差异较大。

3 高速公路交通流网络阶段性演进的时空特征与组成结构

3.1 高速公路交通流网络阶段性演进的时空特征

3.1.1 阶段性演进的时间特征 通过NTF方法对原始数据进行分解,在多次试验基础上将模态设定为6个可大致反映网络演化过程的时变特征及内在耦合关系(图3)。

江苏省高速公路交通流网络的演化过程由多种模态共同主导,且体现为明显的三阶段特征。表现在,网络相对流量曲线揭示出在2004年1月-2005年4月,数值较高的有第1、6、3、5主张量,而第2、4主张量的流量数值基本接近为0,由此该时段主导网络演化的模态可看成4个;在2005年5月-2008年6月,相对流量数值在0.5以上的曲线达到了5个,分别是第1、3、4、5、6主张量,而第2主张量仍维持在0附近的位置;在2008年7月-2012年12月,除去数据噪音外,相对流量数值在0.5以上的有6个主张量,在原有基础上增加了第2主张量,且其流量数值在该时期的变化区间在1~2之间。

网络大致有不变型、渐变型和突变型等三类典型的时变结构,且部分存在相互耦合特征。不变型为在研究时段内曲线基本维持同一水平,第3、5主张量相互耦合的模态分属此类;渐变型为曲线随时间演进呈逐步上升态势,第1、6主张量相互耦合的模态分属此类;而突变型则是曲线在演变过程的特定时刻或时段具有迥异的上升或下降的剧烈变动,第2、4主张量各自的模态分属此类,两者不存在耦合在于曲线的演变规律有差异。突变性的演进特征与过江大桥的修建密切相关,即第2、4主张量的流量曲线分别在2008年7月和2005年5月突然的显著剧烈上升,而这两时点对应于苏通大桥和润扬大桥建成通车后的第一个完整月份^③,通车后短时间内流量的剧烈上升可能与沿江南北两侧的强烈互补性需求密切相关。

3.1.2 阶段性演进的空间特征 不同阶段空间格局的分析是明晰整个网络时空特征的必要。NTF方法除直接展示重构的特征外,与原始格局的吻合性对比也是方法有效性的体

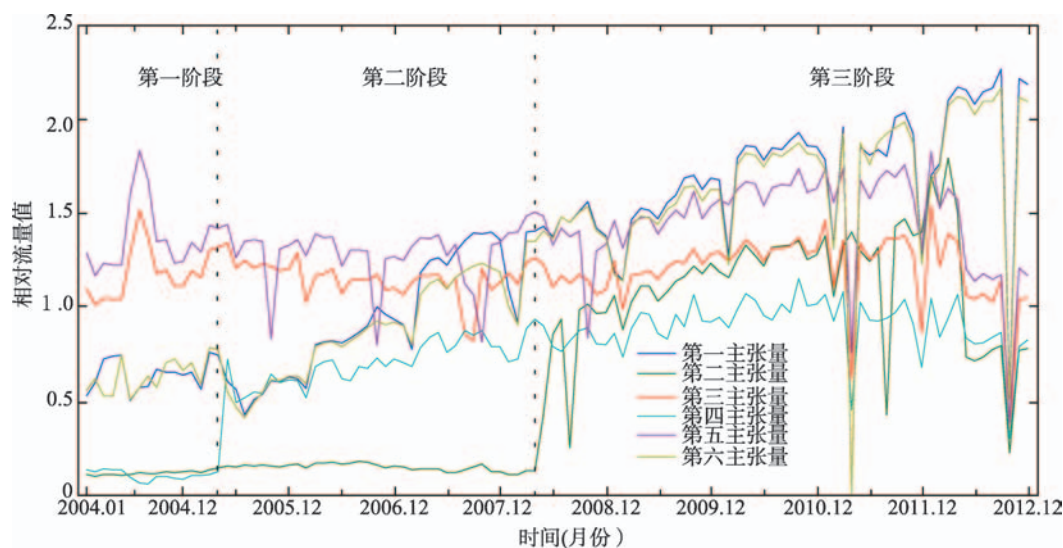


图3 NTF方法的江苏省高速公路交通流网络的时变特征

Fig. 3 Time-evolution characteristics of Jiangsu province expressway traffic flow network by Non-negative Tensor Factorization method

③ 2008年6月30日和2005年4月30日分别是其通车首日。

现, 反映重构结果的准确性 (图4)。

高层级点对联系的高吻合性刻画出重构网络与原始数据空间结构基本一致。重构后的第一、第二层级点对在凸显整体特征前提下, 相比于原始结构更为简洁。主要是突出了各时期干线通道作为主轴线的特征, 如第一阶段的沪宁高速和过江阴大桥往北延伸的京沪高速, 第二阶段增加了过润扬大桥为主联系通道的轴线, 而第三阶段在强化原有结构前提下, 进一步增加了过苏通大桥往沈海高速延伸的轴线。

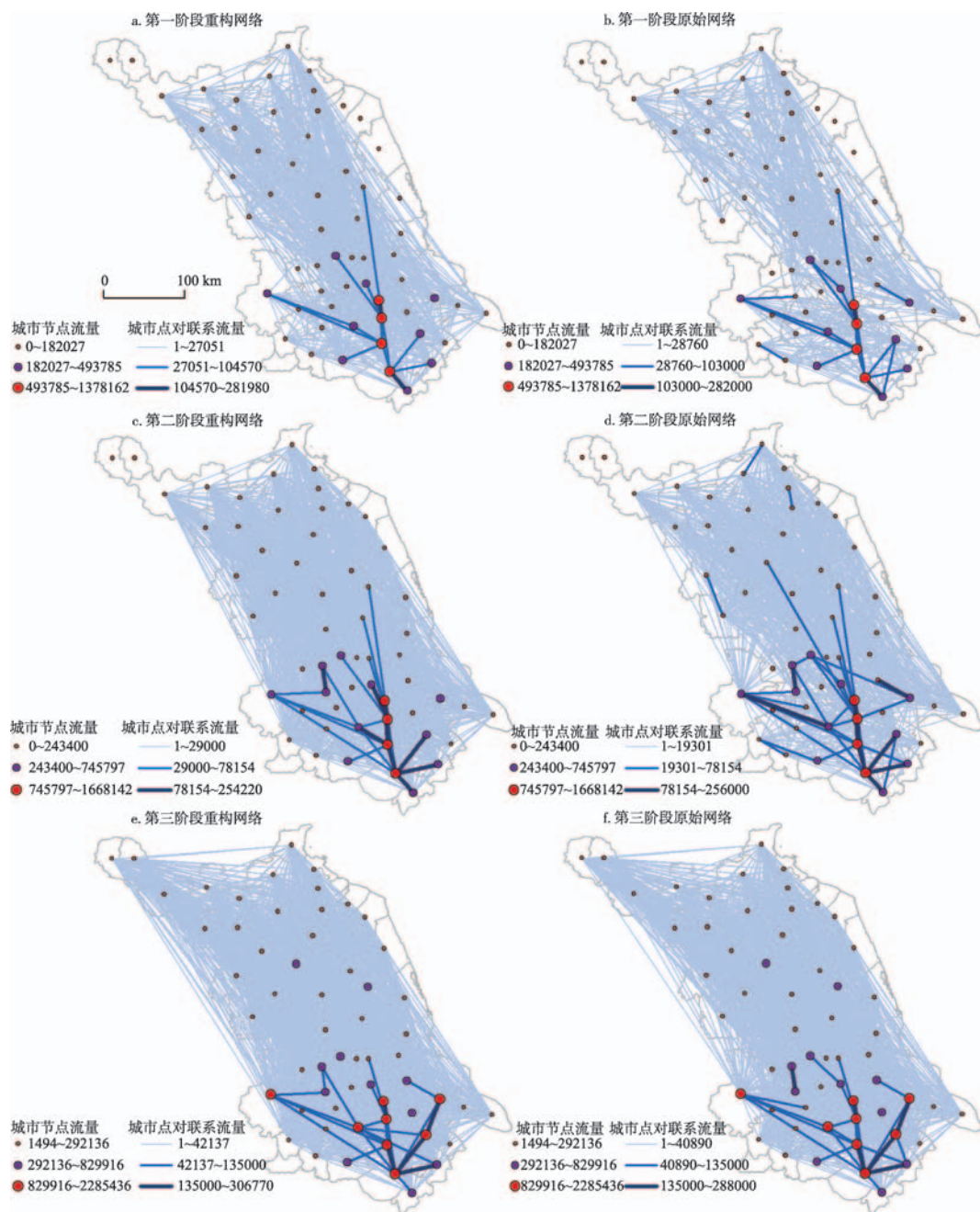


图4 不同阶段江苏省高速公路交通流网络的重构结果与原始数据

Fig. 4 Reconstruction results and the origin data of Jiangsu expressway traffic flow network in different stages

重构网络与原始数据共同揭示出整体网络的空间特征由倒“T”字型向倒“下”字型,再向倒“不”字型结构演化。第一阶段,整体结构由沪宁线串联苏南城市组成的横向网络,与以江阴大桥为通道沿京沪线延伸的纵向网络,两者共同组成倒“T”字型结构;第二阶段,除强化已有的结构外,“扬州—镇江”高层级点对联系的嵌入,使得整体网络呈现为倒“下”字型结构;第三阶段,则大致上形成了由沪宁线为横轴、以过润扬大桥沿扬溧线、过江阴大桥沿京沪线和过苏通大桥沿沈海线为纵轴组成的倒“不”字型结构。

江苏省高速公路交通流网络空间格局有其特殊性,在于格局形成受区外上海的影响很大,可看作是以上海为中心的放射状轴线;流量最为集中的轴线沿国家主干道串联不同地区和城市的交通大动脉分布。而全国尺度的研究则缺乏或掩盖了对这一区域特征的透视^[10]。两者关系昭示,大尺度的特征勾绘了整体格局的轮廓,中小尺度的特征解析则刻画了局部细节。

3.2 高速公路交通流网络阶段性演进的组成结构

对三个不同时期的网络利用NTF进行再次分解,一方面可明确各阶段网络的内在组织方式,另一方面可明晰引致网络动态演化的潜在驱动力(图5)。

各阶段所有主张量子网络空间特征的组合大致构成整体网络的空间特征。组成第一阶段整体网络的沿沪宁线横向子网络与过江阴大桥沿京沪线纵向子网络中,沪宁线子网络包括以无锡为核心的系统、以“南京—常州”关联的系统及以苏州为核心的系统;京沪线子网络则以“靖江—江阴”为双核心的江阴大桥系统构成。第二阶段除强化已有子网络外,“扬州—镇江”双核心系统也嵌入,形成由三大子网络组成的基本格局。其中,以苏州为核心的系统,更强调与宁、锡、常等的联系,“南京—常州”系统扩展为“南京—常州—无锡”系统;“靖江—江阴”双核心的江阴大桥系统向北进一步延伸;“扬州—镇江”系统凸显了润扬大桥的通道作用。苏通大桥建成的第三阶段,整体结构由四大子网络组成。表现在,“苏—锡—常—宁”系统的紧密网络化基本成型,“常熟—南通”的苏通大桥系统、“靖江—江阴”的江阴大桥系统及“扬州—镇江”的润扬大桥系统等过江大桥建构的双核心系统特征突出。

不同阶段整体空间特征的改变与新增过江大桥的建成通车密切相关,且新的格局均是脱胎于原有格局。润扬大桥通车带来“扬州—镇江”双核心系统直接关联的第二阶段,网络主体结构由倒“T”字型转变为倒“下”字型;苏通大桥通车引致“南通-常熟”双核心系统嵌入的第三阶段,网络主体结构则进一步向倒“不”字型演化。分析显示,关键位置上过江通道的定位与功能差异是流量空间分异及网络格局塑造的重要影响因素。流量的波动及部分局域网络的密集化同时表明,除受到过江大桥建设(可看为破除空间阻隔)带来的驱动作用外,整体结构的演进也受到诸如地区间要素流动的发展需求、区域发展政策、行政原则、投融资结构等多重因素的共同影响。

4 高速公路交通流网络的演化阶段与理论模型

4.1 高速公路交通流网络的演化阶段

区域系统演化一般有渐变型和突变型两种模式,且渐变型具普遍性。已有研究根据不同的实践,总结了高速路网演进具有多类型的理论模型^[17, 19-20]。江苏省的分析表明,虽部分遵循已有规律,但某些潜在驱动因素的独特性及对网络演化的重要性并未得到关注。① 破除空间阻隔成为驱动高速交通网络演进的一大动因,即诸多自然和行政因素,

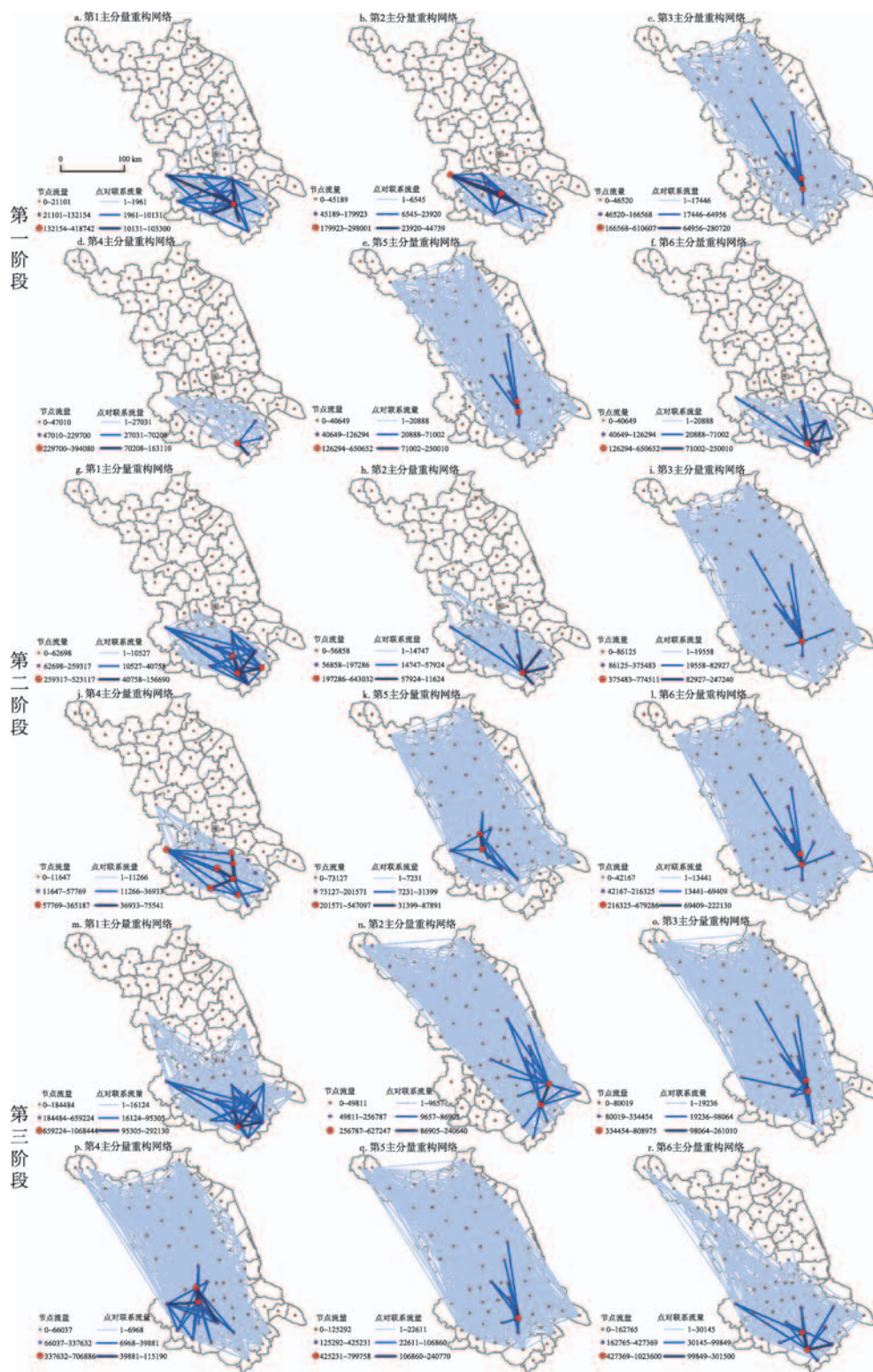


图5 不同阶段江苏省高速公路交通流网络各主张量的重构结果

Fig. 5 Reconstruction results of every principal tensor component of Jiangsu expressway traffic flow network in different stages

包括高大山系、大川大河、严苛地质条件（如冻土、高原、喀斯特等）、极端气象气候条件、行政区经济等均会对网络的演化产生重要影响；② 地区间联系的需求对交通流网络演化具有显著引导功能。一般认为，交通设施对区域系统演进有“从属”和“引导”两大功能，但地区间要素流动需求的强烈性可能会导致“引导”功能高于“从属”功能并发挥效应。③ “突变”规律对于网络的阶段性演进可能更为重要。虽然有研究认为高速公路网络演进符合“渐变—突变”规律^[19]，但显然“突变”规律在交通流网络的演进中更具关键指征作用。

基于上述思想及江苏省实践，将网络演化过程划分为6个阶段，包括路网离散分布、局部网络建构、区域初步连通、区域发育成网、网络提升充实和网络一体化，并给出对应的特征说明（表1）。为呈现完整演化过程，路网离散分布和局部网络建构两个阶段的划分依据阐述如下：首先，对于“路网离散分布阶段”的界定主要是在1996年10月以前该区域内没有任何高速路网，参考国内外对于航空网络、水运路网、铁路网络和高速公路路网及区域空间系统理论演化模式的结果，基本上均确定这一时段城镇节点分布、区域经济系统等较为分散；其次，“局部网络建构阶段”的界定主要从江阴大桥在整个区域流量的总体表现，并参照润扬大桥、苏通大桥通车的特征及对网络的塑造等综合判断给出，即认为江阴大桥在1999年10月通车前后江苏省南北路网由局部建构走向全网网络。

江苏省高速公路交通流网络演化阶段划分结果看，不同阶段的间隔短，有其自身的特殊性，主要与其驱动因素和机制变迁有关。江苏省经济发展快速、工业化进程快、地区间要素流动的特征和需求强、打通地区间联系障碍及政府均衡化政策推动等因素是导致其短时间内阶段快速演进的主因。另外，交通流网络本身时空特征、驱动机制与实体路网不同也是阶段间隔短的一个原因。总而言之，江苏省高速公路交通流网络演化的阶段划分为普适性理论模型构建提供了可参考的样板，但受多种因素影响，在时间节点和时段变迁等与其他地区可能有差异。

表1 高速公路交通流网络演进的阶段划分

Tab. 1 Stage division of expressway traffic flow network evolution

演化阶段	高速公路网络建设与完善	江苏省交通流网络演化的对应时段与特征
路网离散分布	地区间以普通的公路或铁路为主，没有现代高速交通网络进行区域间便捷联系的引导。	(-1996年10月)：无高速公路时期，江苏省内部城市间快速联系较弱，城镇分布处于相对离散状态，路网对社会经济空间结构的构建也仅对苏南少数中心城市起作用。
局部网络建构	无跨越阻隔的便捷通道，主要是经济较发达地区成路网建设重点区域，为其间的快速连通提供支撑。	(1996年11月-1999年9月)：沪宁高速通车，苏南地区主要中心城市间要素流动便捷化，经济快速发展，促进了该地区资源的开发和城镇的建设，内部网络逐步成型。
区域初步连通	建设跨越阻隔的通道，破除空间阻隔对地区联系的障碍，打通局部区域分离的现状。	(1999年10月-2005年4月)：江阴大桥跨江咽喉建成，打通了江苏南北地区，要素流动逐渐上升并趋于频繁，网络由原来南北分割向区域连通跨越。
区域发育成网	打通多个跨越阻隔的要道，并建设内地地区高速公路，扩充主要中心城市核心腹地范围。	(2005年5月-2008年6月)：润扬大桥建成使得苏中的扬州及内陆苏北县市进入苏锡核心区和南京都市圈的辐射范围；沿海高速贯通带来沿海县市连成一体。
网络提升充实	围绕主要中心城市、内地中心、中间节点等建设高速路网并促进路网密度快速增长，完善区域联系。	(2008年7月-)：多座跨江大桥，特别是苏通大桥建成后，苏中、沿海、内陆苏北进入苏南地区和长三角核心区腹地范围，提升了要素流动的效率和速率。
网络一体化	纵横交错的高速路网连接区域内大小不一的中心地，主干和支线分工明确，系统形成有机体。	(中远期)：规划的多类型、分布式密集过江通道及复线建成后，将全方位带来区域要素流动的畅通化，网络内部组织趋于合理高效化，实现一体化整合。

4.2 高速公路交通流网络的理论模型

根据上述划分的演化阶段进一步提炼高速公路交通流网络理论模型(图6), 对各阶段特征与驱动机制分述如下:

(1) 路网离散分布阶段: 由于地区间快速联系需求较弱和高速路网的限制, 城镇和居民点的空间分布离散, 仅本地即可实现充分“自给自足”, 沿江/沿海的中心腹地仍较为有限。

(2) 局部网络建构阶段: “自上而下”的区域政策和行政原则等“推力”主导下, 采用“最小努力”原则, 高速路网率先在发达的中心地间串联, 空间阻隔则成制约大规模发展的重要因素。

(3) 区域初步连通阶段: 随空间联系需求的增长, 沿江/沿海中心地与内地重要城镇或资源富集区连通, 打破了空间阻隔的限制, 且因网络的渠化作用沟通了众多中小型经济增长点。

(4) 区域发育成网阶段: 工业化中期, 地区间要素流动的旺盛需求, 沿江/沿海与内地跨越阻隔的多纵向通道及内地横向网络架构, 使得为数众多的内地城镇快速联系相继出现。

(5) 网络提升充实阶段: 工业化中后期, 多元化投融资结构、区域发展战略及互补性需求的联合驱动, 完善的内地联系渐显, 内地中心、中间节点与沿江/沿海的高速路网迅速增长。

(6) 网络一体化阶段: 工业化后期的高端消费时代, 在需求占主导兼顾多种因素的综合驱动下, 纵横交错的高速交通网络系统将高低等级的中心地联系起来, 主干通道凸显发展轴功能, 支线发挥有效辅助, 网络形成有机统一体。

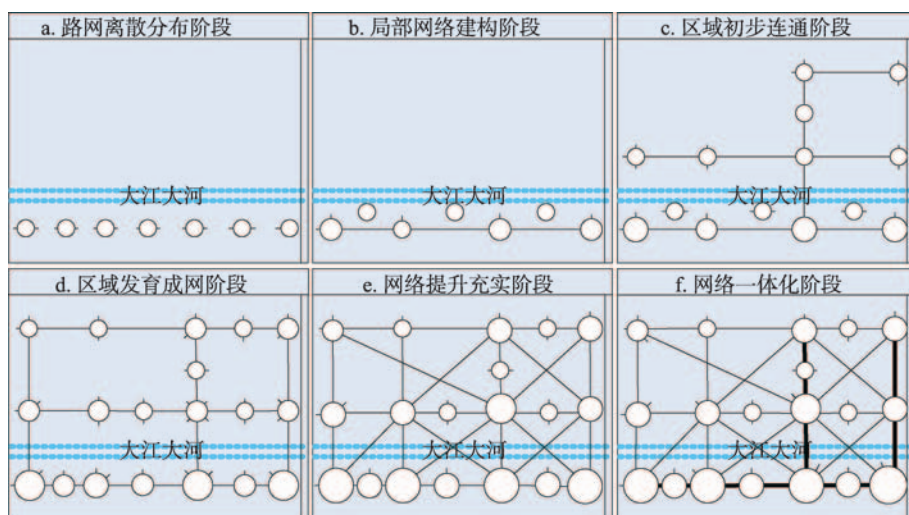


图6 高速公路交通流网络空间演化理论模型

Fig. 6 Theoretical model of expressway traffic flow network spatial evolution

5 结论与讨论

5.1 结论

以“数据驱动+分析方法”的定量视角进行交通网络时空特征解析, 并基于此从定性

角度进行理论的抽象正逐渐成为当前交通地理与区域发展研究的重要手段。在江苏省内高速公路交通流网络2004年1月-2012年12月连续时空尺度上的动态OD数据及非负张量分解方法的共同支撑下,展开阶段特征解析、时空结构分析及理论模型提炼。结果表明:

(1) 网络时空结构具有明显的三阶段演进特征,且每个阶段整体结构有多个子网络组成。时间结构上有不变型、渐变型和突变型三种模态,且由少到多演进;空间结构,由沿沪宁线横向子网络与过江阴大桥沿京沪线纵向子网络共同组成倒“T”字型结构,向以“扬州—镇江”双核心系统嵌入的倒“下”字型结构演进,再向由沪宁线横向子网络叠加过润扬大桥沿扬溧线、过江阴大桥沿京沪线和过苏通大桥沿沈海线的三大纵向子网络组成的倒“丄”字型结构演变。

(2) 网络的演进过程在经历区域发育成网阶段后,现正处于网络提升充实阶段。网络阶段性演进是其整体演化过程的重要组成部分,在长尺度上表现为趋势的分段,在小尺度上表现为波动结构的变化,主要受空间阻隔、地区间联系需求、区域发展政策、行政原则、投融资结构等因素共同影响。

(3) 基于江苏省的实证,归纳演绎了一个由路网离散分布—局部网络建构—区域初步连通—区域发育成网—网络提升充实—网络一体化的6阶段高速公路交通流网络一般演化理论模型。

5.2 讨论

以江苏省高速公路交通流网络为实证对特征的解析与模型的总结虽有一定意义,但以下问题仍需进一步讨论:① 全国层面研究的可行性探讨。首先,模型提炼上,要素在高速公路的流动以中短距离为主,在大区域层面的流量递减迅速,以省区或经济区为地域单元进行理论模型提炼的适用性可能高于全国;其次,数据和方法上,高速公路的特性决定了直接利用全国的OD流进行分析可能挖掘的效果不是特别明显,而具备全国层面的高铁和航空OD流短时段更多是较单一的渐变特征,对连续时空数据的长时段累积要求高。② 高速交通网络在模型构建的代表性与普适性。区别于传统交通运输网络理论模型构建中以均质平原假设起步,且网络连接最先由发达地区向不发达腹地扩散的特征,高速交通网络对格局的塑造最先实现的是发达地域间的串联,这在诸多地区均可找到。而以此的假设起步,如何构建起包含高速交通网络的理论模型,本文的尝试提供了一种可能。但高速交通网络的多样性及现代运输体系的综合性,使得不同类型、区域或空间尺度上网络时空特征和驱动机制有差异,其普适性意义和应用价值仍有赖于多类型、多尺度实证研究的深入。

致谢: 南京师范大学地理科学学院俞肇元副教授在论文写作中给予的帮助,南京大学地理与海洋科学学院硕士生赵珍珍同学对部分数据的预处理,两位匿名审稿专家对本文提出的建设性修改建议,在此一并感谢!

参考文献(References)

- [1] Li Shan, Wang Zheng, Zhong Zhangqi. Gravity model for tourism spatial interaction: Basic form, parameter estimation, and applications. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(4): 526-544. [李山, 王铮, 钟章奇. 旅游空间相互作用的引力模型及其应用. *地理学报*, 2012, 67(4): 526-544.]
- [2] Liu Y, Kang C, Gao S, et al. Understanding intra-urban trip patterns from taxi trajectory data. *Journal of Geographical Systems*, 2012(4): 463-483.
- [3] Lu Yuqi. The major objectives and implementation methods for human geography toward the tendency of physical science. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(12): 1587-1596. [陆玉麒. 人文地理学科学化的总体目标与实现路径. *地理学报*, 2011, 66(12): 1587-1596.]

- [4] Lu Yuqi. Research on Spatial Structure in Regional Development. Nanjing: Nanjing Normal University Press, 1998. [陆玉麒. 区域发展中的空间结构研究. 南京: 南京师范大学出版社, 1998.]
- [5] Wang Jiao'e, Jiao Jingjuan, Jin Fengjun. Spatial effects of high-speed rails on interurban economic linkages in China. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(12): 1833-1846. [王姣娥, 焦敬娟, 金凤君. 高速铁路对中国城市空间相互作用强度的影响. 地理学报, 2014, 69(12): 1833-1846.]
- [6] Wang Chengjin, Ding Jinxue, Yang Wei. Policy and spatial effect of expressway planning network in China. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(8): 1076-1088. [王成金, 丁金学, 杨威. 中国高速公路规划网的空间效应与政策机制. 地理学报, 2011, 66(8): 1076-1088.]
- [7] Black W R. Transportation: A Geographical Analysis. New York: Guilford Press, 2003.
- [8] Wu Wenjie, Dong Zhengbin, Zhang Wenzhong. Spatio-temporal evolution of the China's inter-urban organization network structure: Based on aviation data from 1983 to 2006. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(4): 435-445. [武文杰, 董正斌, 张文忠. 中国城市空间关联网络结构的时空演变. 地理学报, 2011, 66(4): 435-445.]
- [9] Wang Haijiang, Miao Changhong. Railway passenger transport spatial contacts and their structure Tupu (array) of central cities in China. *Geographical Research*, 2015, 34(1): 157-168. [王海江, 苗长虹. 中国中心城市铁路客运的空间联系及其结构图谱. 地理研究, 2015, 34(1): 157-168.]
- [10] Wang Chengjin. Regional impact and evolution of express way networks in China. *Progress in Geography*, 2006, 25(6): 126-137. [王成金. 中国高速公路网的发展演化及区域效应研究. 地理科学进展, 2006, 25(6): 126-137.]
- [11] Lu Yuqi. The mechanism of the model of dual-nuclei structure. *Acta Geographica Sinica*, 2002, 57(1): 85-95. [陆玉麒. 区域双核结构模式的形成机理. 地理学报, 2002, 57(1): 85-95.]
- [12] Luo Zhendong, He Heming, Geng Lei. Analysis of the polycentric structure of Yangtze River Delta based on passenger traffic flow. *Urban Planning Forum*, 2011(2): 16-23. [罗震东, 何鹤鸣, 耿磊. 基于客运交通流的长江三角洲功能多中心结构研究. 城市规划学刊, 2011(2): 16-23.]
- [13] Zhou Kai. Expressway network accessibility analysis and structured change of urban system in Yangtze Delta Megalopolis. *Progress in Geography*, 2010, 29(2): 241-248. [周恺. 长江三角洲高速公路通达性与城镇空间结构发展. 地理科学进展, 2010, 29(2): 241-248.]
- [14] Shi Benlin, Meng Deyou, Wan Nianqing. The impact of highway network construction on the spatial pattern of urban spatial field in Henan province. *Economic Geography*, 2014, 34(1): 1-7. [史本林, 孟德友, 万年庆. 高速公路网构建对河南城市辐射场空间格局的影响分析. 经济地理, 2014, 34(1): 1-7.]
- [15] Luo Wen, Yuan Linwang, Yu Zhaoyuan, et al. Principal tensor-based spatial-temporal structure linkage visualization. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2013, 21(2): 276-286. [罗文, 袁林旺, 俞肇元, 等. 基于主张量的时空数据特征驱动可视化方法. 应用基础与工程科学学报, 2013, 21(2): 276-286.]
- [16] Yu Zhaoyuan, Yuan Linwang, Lv Guonian, et al. Coupling characteristics of zonal and meridional sea level change revealed by satellite altimetry data and their response to ENSO events. *Chinese Journal of Geophysics*, 2011, 54(8): 1972-1982. [俞肇元, 袁林旺, 闫国年, 等. 卫星测高揭示的海面变化经纬向耦合特征及其对 ENSO 事件响应. 地球物理学报, 2011, 54(8): 1972-1982.]
- [17] Wang J, Gao F, Cui P, et al. Discovering urban spatio-temporal structure from time-evolving traffic networks. *Beijing City Lab. Working Paper*, 2014(39): 1-12.
- [18] Cichocki A, Zdunek R, Phan A H, et al. Nonnegative Matrix and Tensor Factorizations: Applications to Exploratory Multi-way Data Analysis and Blind Source Separation. USA: John Wiley & Sons (Online) Press, 2009.
- [19] Mo Huihui, Wang Jiao'e. Complex Transport Network: Structure, Process & Mechanism. Beijing: Economy & Management Publishing House, 2012. [莫辉辉, 王姣娥. 复杂交通网络: 结构、过程与机理. 北京: 经济管理出版社, 2012.]
- [20] Niu Shuhai. The study on effect of time-space astringency of expressway network: A case of Henan province. *Human Geography*, 2005, 20(6): 106-110. [牛树海. 高速公路网络化的时空收敛效应研究: 以河南省为例. 人文地理, 2005, 20(6): 106-110.]

Evolutionary stages and theoretical model of high-speed traffic network spatio-temporal structure:

A case study of expressway traffic flow network in Jiangsu province

KE Wenqian^{1,2,3}, LU Yuqi³, CHEN Wei⁴, DING Yihui⁵, YANG Qing³

(1. Institute of Geography, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China; 2. Key Laboratory of Humid Subtropical Eco-geographical Process (Fujian Normal University), Ministry of Education, Fuzhou 350007,

China; 3. College of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China;

4. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Beijing 100101, China;

5. Grid Information Technology Company, Suzhou Industrial Park, Suzhou 215000, Jiangsu, China)

Abstract: High-speed traffic network, as a significant power in molding the spatial structure of regional interaction, has the key indications. In this paper, we constructed a three-dimension matrix of "Origin- Destination- Time" time- evolving network data, which consists of expressway traffic flow among 59 counties and time-evolving series from January 2004 to December 2012 in Jiangsu, a coastal province in China. Supported by the data, we introduce the Non-negative Tensor Factorization (NTF) method to analyze its evolutionary stages and spatio-temporal structure, and then attempt to extract the abstract theoretical model. The conclusions can be drawn as follows: (1) The temporal structure of Jiangsu expressway traffic flow network has three obvious evolutionary stages, namely, January 2004 to April 2005, May 2005 to June 2008, and July 2008 to December 2012. The corresponding spatial structure in three stages are reversed "T" structure, reversed "下" structure and reversed "不" structure, respectively. (2) The stage evolution of high-speed traffic network has always been a key component of the whole spatio-temporal evolution process, which displays the tendency phase division in the long term and the fluctuant variations in the short term. In terms of the evolutionary stages of expressway traffic flow network, Jiangsu has entered the network promotion enrichment stage. (3) Based on the empirical study of Jiangsu's experience, the evolution process theoretical model of expressway traffic flow network can be divided into six stages, i.e., the network scattered distribution stage, the local network construction stage, the regional preliminary connected stage, the network development into a net stage, the network promotion enrichment stage and the network integration stage.

Keywords: theoretical model; evolutionary stage; spatio-temporal structure; expressway network; Jiangsu province