

郑龙飞, 顾伟男, 龙奋杰, 等. 不同流视角下的贵州省空间网络结构及形成机制分析 [J]. 地理科学, 2020, 40(6): 939-947. [Zheng Longfei, Gu Weinan, Long Fenjie et al. The urban network structure and influential mechanism of Guizhou Province from the perspective of various flows. Scientia Geographica Sinica, 2020, 40(6): 939-947.] doi: 10.13249/j.cnki.sgs.2020.06.009

不同流视角下的贵州省空间网络结构及形成机制分析

郑龙飞¹, 顾伟男^{2,3}, 龙奋杰^{1,4}, 张苏⁵

(1. 清华大学建设管理系/清华大学恒隆房地产研究中心, 北京 100084; 2. 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; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 石家庄铁道大学经济管理学院, 河北 石家庄 050043; 5. 贵州理工学院大数据学院, 贵州 贵阳 550003)

摘要: 基于手机通话和高速公路收费等实测大数据, 以贵州省县级行政区域为基本单元, 采用 C-value 和 T-value 分析、优势流分析和网络中心性分析的方法, 探究贵州省不同流空间下的控制结构、层级结构和核心-边缘结构及其网络的形成机制。结果表明: ① 贵州省在信息流和物质流空间下的控制结构大致相似, 但控制节点存在差异。② 在信息流和物质流空间下, 贵州省都形成了省会-地市(州)-县(市)的层级化网络结构。③ 与物质流空间相比, 信息流空间下贵州省空间结构的中心化趋势得到加强, 区域差异进一步的扩大。④ 区域间物质流和信息流都随距离的延伸而不断衰减, 且地理、文化、产业和组织距离对区域间物质流的阻碍作用显著大于信息流。经济发展水平、基础设施水平和人口规模等区域主体属性也会对区域间的要素联系强度产生影响。

关键词: 通信流; 交通流; 空间网络结构; 距离衰减; 贵州省

中图分类号: F127 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0690(2020)06-0939-09

19 世纪以来, 人类的交通运输方式发生翻天覆地的变化, 运输成本下降的同时, 运输速度却极大提升, 增强了城市间人流和物流的联系强度, 促进集聚经济的产生^[1]。21 世纪随着信息通讯技术的迅猛发展, 城市间的信息联系亦日趋紧密, 重新塑造区域和城市的空间结构, 传统的空间组织方式受到极大冲击^[2]。Castells 提出新的社会活动组织形态——流空间(Space of flows)^[3]。不同于传统的场所空间(Space of places)观念, 流空间概念认为社会活动是由人流、物流、信息流、资金流和技术流等要素所形成的一个网络化空间, 淡化甚至“消灭”地理距离的影响, 从而引发了区域和城市在空间形态、结构和功能上的变革^[4-6]。

理论研究中, 有学者提出“地理的终结(End of geography)”和“距离的消亡(Death of distance)”, 认为信息技术重塑了经济地理格局, 地理空间中

的“崎岖不平”和“摩擦的距离”正在被抹平^[7]。流空间相关实证研究主要关注于区域间相互作用和区域的空间结构形态与演化^[8-11]。基于公路交通流和信息流的相关研究受限于数据的可获得性, 多关注于区域和城市等中微观尺度。柯文前等人基于高速公路车流等流数据在省域层面对城市间联系的层级体系、城市网络的核心-边缘结构以及区域的空间组织模式进行了分析^[2,4,6,12-16]。此外, 也有学者对交通流和信息流视角下的空间网络结构的形成机制做相应探讨, 他们多认为经济属性、产业结构、人口规模等社会经济指标对交通流下的空间网络结果具有显著影响, 并且城市的功能定位、行政区划也会对城市间联系网络产生影响^[17,18]。Barnett^[19]等研究 OECD 内部的互联网信息流影响因素, 发现语言距离、物理距离对于信息流下的网络结构作用不明显。纵观这些实证研究, “流”数

收稿日期: 2019-05-21; 修订日期: 2019-08-20

基金项目: 国家社会科学基金项目(14AJY012)资助。[Foundation: National Social Science Foundation of China (14AJY012).]

作者简介: 郑龙飞(1995-), 男, 河南开封人, 博士研究生, 主要研究方向为大数据与区域经济学。E-mail: tjulongfei@163.com

通讯作者: 龙奋杰, 教授。E-mail: longfj@tsinghua.edu.cn

据的测度主要有模型估计、参量代替和实测分析 3 种方法。模型估计法是基于重力模型、断裂点模型等^[20],采用区域的经济社会指标来估计“流”数据,准确度有待提升^[21]。参量替代法主要通过一些相关的替代指标来测度区域间的“流”数据,如以网络指数代替信息流^[22,23],客运班次代表人流^[24,25]。相比于模型估计法,参量代替法的准确性有了大幅的提升,但仍然存在着一一定的缺陷。实测分析是指基于交通调查、高速公路车流、邮件和通话等数据获取区域之间真实的人流、物流和信息流数据,这种方法的数据获取难度是最大的,但准确度相对更高。

从国内外相关研究的进展来看,模型估计和参量替代是最常用的“流”数据测度方法。基于实测分析的相关研究缺乏人流、物流、信息流等不同流视角下区域空间结构的对比分析。同时,以往的研究主要在探讨区域社会经济属性对区域空间网络结构的影响,缺乏不同维度距离(地理、产业、文化、组织等)对于区域空间网络结构的作用机制探究。因此,本文基于高速公路客货车通行和移动手机通话的实测数据,对比分析了不同流视角下贵州省空间网络结构的差异及形成机制,为流空间相关实证研究及流视角下的区域网络结构研究提供理论基础和科学依据。

1 研究区域、数据来源与研究方法

1.1 研究区域

贵州省地处中国西南腹地,现辖贵阳市、遵义市、六盘水市、安顺市、毕节市、铜仁市 6 个地级市和黔东南苗族侗族自治州、黔南布依族苗族自治州、黔西南布依族苗族自治州 3 个民族自治州,各市州共下辖 88 个县级行政单位(县、民族自治县、县级市、市辖区、特区)(图 1)。

贵州省存在区域内部联系较为松散,经济发展水平差异明显的现状。但随着近些年来大数据战略的实施,贵州省的信息产业已经走在了全国前列,各地区信息化水平也得到了极大地提升。然而,信息流对于贵州省空间网络结构的重塑作用,学术界尚未得出清晰的结论。本文基于高速公路和手机大数据,对不同流视角下贵州省的空间网络结构进行对比研究。

1.2 数据来源

本文以贵州省高速公路车流量来测度市县间

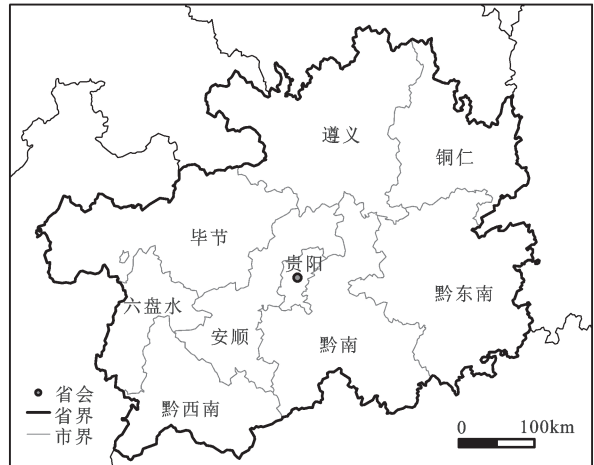


图 1 贵州省行政区划

Fig.1 Administration area of Guizhou Province

人员和货物流量,使用的数据涵盖 2016–2017 年贵州省全部 368 个高速公路收费站信息(交通运输部科学研究院, <http://www.motcats.ac.cn/>),共 457 020 787 条数据,其中 18.61% 为货车记录,81.39% 为客车记录。手机作为人们传递和接收信息最重要的媒介,可很好地表征信息流的往来。考虑到数据的可获得性、数据的处理能力(通话数据量较大)及数据的代表性(没有突发事件),本文使用中国移动通信集团贵州有限公司提供的手机通话数据,涵盖 2016 年 4 月 1~20 日贵州省所有用户的手机通话时长信息,共 491 761 768 条记录。

1.3 研究方法

点、线、面和网络是区域空间结构的基本要素。“流空间”下的空间网络结构是由城市节点、节点间的联系及其构成的网络在地理空间上映射形成^[12]。结合以往学者的研究^[25],本文基于“空间节点-空间联系-空间网络”的识别框架,从节点的控制结构、联系的层级结构和网络的核心-边缘结构 3 个维度来探究区域的空间结构。

1) 节点在流空间下的控制力(C -value)和影响力(T -value)分析。城市网络中节点的控制结构反映节点在网络中的影响力和控制力。借鉴董超等人对吉林省信息流网络格局的研究^[4],根据城市发送和接收信息量的差值,采用 C -value 和 D -value 这 2 个指标来反映城市在流空间下的控制力。但对于人流和物流来说,特别是基于高速公路车流量计算的人流和物流量,其流入和流出量一般是守恒的,这 2 个指标的效力得到极大地削弱。

因此, 本文将 D -value 替换为反映地区总体流量的 T -value 指标。

$$C = \ln(C_c/C_s) \quad (1)$$

$$T = \ln(C_c + C_s) \quad (2)$$

式中, C 值是一个地区发送和接收流量的差值, 体现该地区的影响和辐射能力; C_c 指一个地区发送的车流和信息流量; C_s 指该地区所接收的车流和信息流量。 C 、 T 值作为地区发出和接收流量的总和, 体现该地区与周边区域互动的频繁程度。这 2 个指标组合可很好反映一个地区在流空间下的控制力^[2]。本文 C_c 用地区的被叫通话时长和高速公路流入车辆数量表示, C_s 用地区的主叫通话时长和高速公路流出车辆数量表示。

2) 优势流分析。层级结构反映网络中节点间联系的等级分布, 常用分析方法是优势流(dominant flow)分析法, 是根据城市主要要素流的流向来分析其在城市网络中的层级地位。根据董超等人的研究^[4,23], 本文将贵州省的市县划分为 3 个层级: 主导型市县、次级主导型市县和从属型市县。其中, 主导型市县是指其最大通话流量或车流量流向一个与之相比规模较小的市县; 次级主导型市县是指其最大流量流向主导型市县, 同时有 2 个或以上市县最大流量流向该市县; 从属型市县是指其最大流量流向主导型或次级主导型市县, 没有一个规模较小的市县的流量流向该市县。

3) 网络中心性。网络的核心-边缘结构反映的是网络向单个节点集中的趋势, 最常见的指标是节点的中心度和网络的中心势。节点的中心度指的是与该节点直接相连的其他节点的数量和联系的强度, 网络的中心势则反映了整个网络向某个节点集中的趋势, 反映的是城市网络结构的单中心性。网络的中心势值越大, 代表网络不同节点的中心度差异越大, 网络向某个节点集中的趋势越明显。

2 不同流视角下的空间网络结构

2.1 控制结构

依据前文所述的 C -value 和 T -value 这 2 个指标定义, 可测度贵州省在物质流和信息流空间下的控制结构。通过对贵州省 79 个市县(由于贵阳市、遵义市部分市区没有设置高速公路收费口, 将其与最近邻的区县合并)的通话时长和高速公路

车流量统计汇总, 得出各市县 C -value 和 T -value, 并将它们按 T -value 从大到小排序(表 1)。

表 1 贵州省主要市县的 C -value、 T -value

Table 1 C -value and T -value of major cities (counties) in Guizhou Province

市县	信息流		市县	物质流	
	T -value	C -value		T -value	C -value
贵阳市	1029 128	0.083 5	贵阳市	94 769 952	0.023 8
遵义市	205 129	0.113 2	遵义市	44 700 927	-0.009 2
清镇市	174 153	-0.032 3	清镇市	33 111 773	-0.056 2
六盘水市	169 367	0.047 8	安顺市	17 873 098	0.001 5
凯里市	160 669	0.066 2	凯里市	14 766 611	0.002 6
安顺市	157 199	0.109 8	都匀市	14 548 557	0.006 9
毕节市	150 151	-0.090 0	桐梓县	13 869 929	0.007 3
大方县	148 908	-0.134 3	兴义市	12 945 096	-0.006 5
织金县	141 605	-0.162 5	毕节市	11 876 469	0.015 1
黔西县	131 302	-0.148 5	镇宁县	11 580 648	0.007 4

注: 表中地级市均只包含市辖区、不含下辖县和县级市。

表 1 看出, 无论是信息流空间还是物质流空间, 贵阳市都处于绝对的领先地位, 显示出很强的控制力和影响力; 凯里市和安顺市在 2 种流空间下都处于优势地位, 显示出较强的控制力和影响力; 遵义市仅在信息流空间下显现出较强的控制力, 毕节市则仅在物质流空间下显示出较强的控制力, 这与毕节等地区以矿产开发、新能源等第二产业为主导的产业结构有关; 清镇市作为贵阳下辖的县级市, 与贵阳市辖区联系密切, 在信息流和物质流空间下均具有很高的 T -value, 但从 C -value 来看, 清镇市并未表现出控制力。总的来说, 贵州省在信息流和物质流 2 种流空间下的控制结构大致相似, 都是以贵阳市为控制中心, 安顺市和凯里市等为控制节点的结构。

2.2 层级结构

基于贵州省各市县之间信息流和物质流的联系矩阵, 利用 ArcGIS10.1 软件呈现出各市县在不同流空间下最大要素流的流向分布情况(图 2)。在信息流空间下, 贵州省 79 个市县中 29 个市县的流量都流向贵阳市; 在物质流空间下, 有 16 个市县的流量都流向贵阳市。初步来看, 贵阳市在信息流空间下的中心地位没有得到削弱, 而是进一步的加强。

从信息流、物质流的最大优势流来看, 贵州省的网络层级结构都比较明显, 形成以贵阳市为核

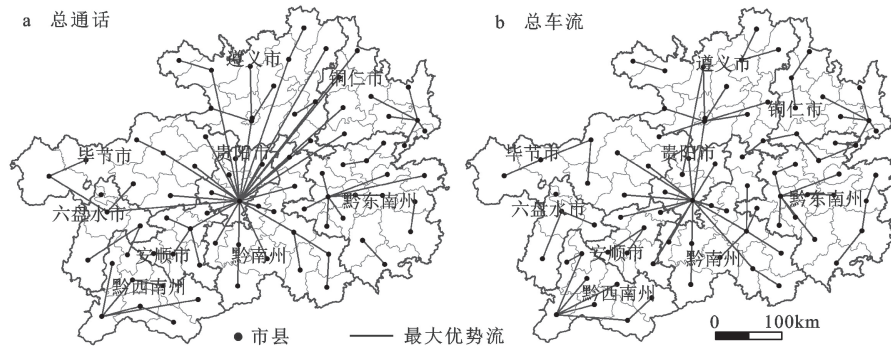


图2 贵州省主要市县最大优势流流向

Fig.2 The direction of the first dominant flows in major cities (counties) of Guizhou Province

心,凯里市、铜仁市、兴义市、安顺市等为主导,遵义市、都匀市等为次级主导,其他市县为从属的层级化网络结构(图3)。相比于物质流空间,信息流空间下主导型市县的数目由8个减少为6个,而次级主导型市县由3个增加为4个,从属型市县的数目由49个增加为53个。一个主导型市县就代表着一个相对独立的子层级网络,次级主导型和从属型市县的数目决定子层级网络的大小。相比于物质流空间,信息流空间下贵州省层级结构的子网络数量减少,但规模变大。对于从属型市县,其最大优势流除了流向贵阳市之外,多是流向上级地市(州)的政府驻地,如江口县、松桃县、印江县、玉屏县和桐梓县、绥阳县、仁怀市的最大通话流和车流都分别流向了铜仁市和遵义市,说明行政边界仍具有显著的阻碍作用。但与基于车流量

测度的物质流空间相比,行政区划对于通话流的负向影响相对弱一些。例如,威宁县和纳雍县行政上隶属于毕节市,但其最大通话流却都流向地理临近的六盘水市。总体而言,贵州省“十三五”规划《纲要》中提出的以贵阳为核心,培育遵义、六盘水、安顺、毕节、铜仁、兴义、凯里和都匀8个区域中心城市,形成“一圈、八级、四带、两廊”的区域发展格局,是符合贵州省信息流和物质流空间下的层级结构的。在信息流空间和物质流空间下,空间距离、行政区划和交通区位等因素塑造贵州省物质流空间下的层级结构,但这些因素在信息流空间下的影响作用得以削弱。

2.3 核心-边缘结构

本文计算物质流和信息流空间下各市县的中心度以及整个网络的中心势(表2),表中只显示节

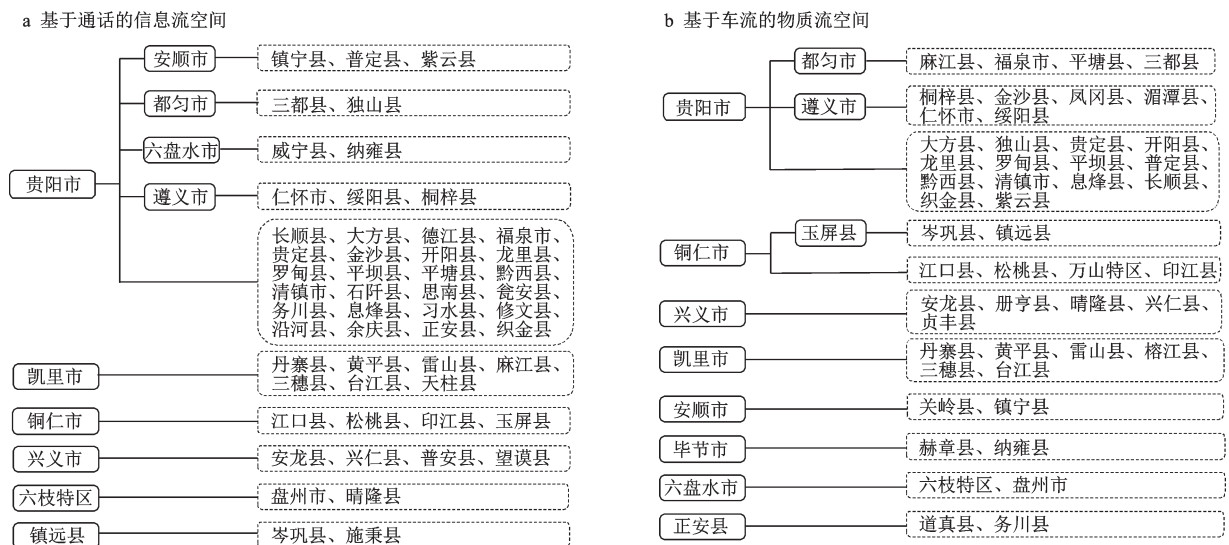


图3 贵州省主要市县基于最大优势流的层级结构

Fig.3 Hierarchical structure based on the first dominant flows of major cities (counties) in Guizhou Province

点中心度最高的 5 个市县和最低的 1 个市县。由于通话和车流的量纲不同, 原始值无法直接进行比较, 因此本文使用 Z-Score 的方法将数据进行标准化, 3~4 列显示标准化后的节点中心度和网络中心势。

表 2 贵州省主要市县通话流和车流网络分析结果

Table 2 Network analysis results of call flow and traffic flow of major cities (counties) in Guizhou Province

	总通话流	总车流	总通话流-标准化	总车流-标准化
网络中心势	13.88%	4.40%	14.02%	4.41%
节点中心度				
最大	贵阳市 (545 566)	贵阳市 (48 824 900)	贵阳市 (261.39)	贵阳市 (145.26)
第二	遵义市 (109 113)	遵义市 (22 797 648)	遵义市 (36.49)	遵义市 (61.98)
第三	清镇市 (90 996)	清镇市 (17 154 754)	清镇市 (27.16)	清镇市 (43.93)
第四	六盘水市 (89 154)	安顺市 (9 128 572)	六盘水市 (26.21)	安顺市 (18.25)
第五	凯里市 (83 291)	凯里市 (7 488 388)	凯里市 (23.19)	凯里市 (13.00)
最小	万山特区 (4 879)	瓮安县 (195 886)	万山特区 (-17.22)	瓮安县 (-10.33)

注: 地级市均只包含市辖区, 不含下辖的县和县级市; 括号内数值为各市县中心度。

可以看出, 通话网络和车流网络下中心度最高的 5 个市县表现出很高的一致性。在 2 个网络下贵阳市都处于核心地位, 其余 4 个市县都是前文识别出的在网络层级结构中占据主导或次级主导地位的市县, 2 个网络都呈现出显著的“核心-边缘”结构。相比于车流网络, 通话网络下贵阳市的中心度大幅提升, 区域中心城市地位有所下降。这从反映网络整体集中趋势的中心势指标可看出, 车流网络的中心势为 4.41%, 通话网络却达到 14.02%, 表明通话流向贵阳集中的趋势要明显强于车流网络。同时, 车流网络下中心度极差为 155.59; 而通话网络下极差达 278.61, 表明信息流空间下区域差异在进一步地扩大。

以上分析结果表明, 信息流空间下每个地区都可以瞬时与网络中心取得联系, 贵州省空间结构的单中心趋势得到了进一步的加强, 核心城市贵阳市的中心度变大, 首位度进一步提升; 区域中

心城市遵义市、凯里市的中心度减小, 形成“去中介”效应。在物质流空间下, 地市(州)等区域中心城市与周边从属型市县有密切的人流和物流联系, 并且这些区域中心城市通往贵阳市的交通基础设施较为发达, 发挥着贵阳市与众多从属型市县进行联系的“中介”作用。

3 形成机制分析

地区之间的相互作用强度是流空间下区域空间结构的重要判断依据, 区域间实测的通话流、人流和车流等流量作为区域之间信息和物质联系的表现形式, 可很好表征区域间相互作用强度。因此, 本节通过建模分析对其影响要素和形成机制进行识别与分析。

3.1 模型设定

空间相互作用会随着距离的延伸而不断衰减, 并且相互作用的衰减速度对区域的空间结构有着重要的影响^[26,27]。因此, 本文基于重力模型框架来探究贵州省市县之间人流、物流和通信流交互强度的影响因素, 公式如下:

$$\ln G_{ij} = \ln k + \alpha \ln P_i + \gamma \ln P_j - \beta \ln d_{ij} \quad (3)$$

式中, G_{ij} 是两地的空间交互强度, 本文用两地间的通话流量和车流量来计算; k 是截距项; P_i 和 P_j 是表示 i 和 j 地区规模的变量; α 和 γ 为其对应的回归系数; d_{ij} 是两地的距离; β 为距离衰减系数, 其值越大, 表示两地之间的人流、物流或通信流随着距离的增加衰减的越快。

3.2 变量选取

空间相互作用强度的影响要素众多, 以往的研究已经充分探讨了单一要素流随着距离衰减的规律。但它们多关注于狭义的地理距离, 缺乏对广义的文化、产业、组织等距离的关注^[28]。基于前人的研究^[27,28], 结合贵州省的发展现状, 本文从市县主体属性和市县之间的距离 2 个层面来探究区域之间物质流和信息流的分布规律及影响因素。其中, 市县主体属性包括经济发展水平、人口规模、产业兴旺度和基础设施水平; 市县之间的距离分为地理、文化、产业和组织距离(表 3)。

3.3 回归结果分析

为保证回归结果的可靠性, 本文首先进行了多重共线性检验, 6 个模型的方差膨胀因子(VIF)值都小于 10, 表明变量间不存在多重共线性。同

表3 贵州省主要市县相互作用强度模型
变量的定义及测度方法

Table 3 Definition and measurement of variables in the model in Guizhou Province

变量类型	变量	含义与测度
因变量	总通话	用市县间的通话时长表示(h)
	总车流	用市县间的总车流量表示(万辆)
自变量: 市县间距离	地理距离	地理空间的距离, 用行政中心的直线距离表示(km)
	文化距离	生活习俗的相似程度, 用是否同属一个民族表示
	产业距离	产业结构的相似程度, 用产业结构相似系数的相反数表示 ^[28]
	组织距离	规章制度及行为的相似度, 用是否同属一个地市(州)表示
自变量: 市县主体属性	经济发展	用人均GDP表示(元)
	人口规模	用年末常住人口数表示(万人)
	产业兴旺度	用规模以上工业总产值表示(亿元)
控制变量	基础设施	用固定资产投资额表示(亿元)
	居民收入	用城镇居民可支配收入表示(元)
	消费水平	用社会消费品零售总额表示(亿元)

注:各变量的观测样本个数均为3 081。

时为防止异方差问题, 本文依据式(3), 使用最小二乘+稳健标准误的估计方法对市县间通话和车流联系进行回归分析(表4)。

无论是地理距离, 还是文化、产业和组织距离, 衰减系数几乎都为显著负值。表明随着地理、文化、产业和组织距离延伸, 区域间要素联系逐渐减弱。其中影响最大的是地理距离, 其距离衰减系数在信息流和物质流空间下分别达 1.48 和 2.111, 且均通过 1% 显著性测试。产业和组织距离对通话流和车流均有显著阻碍作用, 并对车流的阻碍作用强于通话流。对文化距离, 其仅对车流具有显著阻碍作用, 但对于通话流的阻碍作用并不显著。这是由于同一民族生活习俗较为相似, 人们有更强烈的需求和意愿一起居住和娱乐, 尤其在民族传统节日时期, 这种需求是手机通话所不能满足的。对比看, 通话流和车流都会随着距离的增加而衰减, 但信息流的衰减速度要显著小于车流。这是由于通信流的载体是无线电波, 传播速度为光速, 其流动的时间和货币成本都很低, 几乎不受距离影响; 而人流和物流则需要通过高速公路等交通基础设施进行流通, 具有较高的成本。

对于市县的主体属性, 经济发展水平和基础

表4 贵州省主要市县间不同要素流的回归结果

Table 4 Regression results of the various flows between counties (cities) of major cities (counties) in Guizhou Province

	总通话	总车流	总通话	总车流
地理距离	-1.5940*** (0.0442)	-2.1730*** (0.0786)	-1.4800*** (0.0349)	-2.1110*** (0.0714)
文化距离	0.1030** (0.0484)	-0.4020*** (0.0855)	-0.0520 (0.0343)	-0.5400*** (0.0801)
产业距离	-0.0756* (0.0440)	-0.3430*** (0.0768)	-0.0762** (0.0316)	-0.2650*** (0.0707)
组织距离	-0.9260*** (0.0801)	-0.9960*** (0.1400)	-1.3540*** (0.0571)	-1.4530*** (0.1200)
经济发展水平			0.1760*** (0.0445)	0.3670*** (0.1270)
人口规模			0.8400*** (0.0658)	0.0157 (0.1140)
产业兴旺度			-0.0252 (0.0203)	0.1400*** (0.0415)
基础设施水平			0.7690*** (0.0445)	0.7210*** (0.1240)
控制变量	无	无	有	有
R ²	0.465	0.344	0.810	0.601
样本数量	3081	3081	3081	3081

注: 列(1)~(2)是没有加入反映市县主体属性和控制变量的结果; 列(3)~(4)是包含所有变量回归结果; *, **, ***分表代表在10%, 5%, 1%水平上显著; 括号内数值为估计系数的稳健标准误差; 空白表示模型中没有放入该变量。

设施水平的系数为显著的正值, 且在 4 个模型中均通过了 1% 的显著性测试。经济发展和基础设施水平较高的市县, 其经济活动较为繁荣, 往往具有更加频繁的要素流动, 通话流量和车流量也越多。通话流是个体之间的直接信息往来, 一般来说, 人口越多其通话往来总量也越大, 因此通话流量与市县的人口规模具有很强的正相关性。而车流量, 尤其是货车流量, 多是企业之间的货物往来, 更多反映的是产业的发展状况, 因此产业兴旺度与车流量具有很强的正相关性。

4 结论与讨论

4.1 结论

本文基于移动通话和高速公路收费大数据, 采用 C-value 和 T-value 分析、优势流分析和网络中心性分析, 从控制结构、层级结构和核心-边缘结构 3 个维度分析贵州省物质流和信息流视角下

网络空间结构的差异及其形成机制, 主要结论如下:

1) 物质流和信息流空间下区域控制结构大致相似, 但控制节点存在差异。通过 C -value 和 T -value 分析, 贵州省在信息流和物质流空间下都是以贵阳市为控制中心, 安顺市和凯里市等为控制节点的结构。但具体来看, 由于产业结构不同, 2 种流空间下的控制节点也存在一定差异。

2) 物质流和信息流空间下贵州省都形成省会-地市(州)-市县的层级化网络结构。通过最大优势流分析发现在信息流和物质流空间下, 贵州省的网络层级结构都形成了以贵阳为中心, 凯里、铜仁、遵义、都匀等地市(州)政府驻地为主导和次级主导, 其他市县为从属的层级化网络结构。与物质流空间相比, 信息流空间下贵州省层级结构的子网络数量减少, 但规模却变大。

3) 与物质流空间相比, 信息流空间下贵州省的单中心趋势进一步强化, 区域差异进一步地扩大。节点中心度和网络中心势的计算结果表明, 与物质流空间相比, 信息流空间下贵州省的单中心趋势进一步强化, 通话流向贵阳集中的趋势要明显强于车流的集中趋势, 同时区域的差异得到了进一步的扩大。信息技术虽然使得人类的生产活动更加分散, 但路径依赖依然存在, 资源和财富依然集聚在少数区域, 信息技术在一定程度上甚至还促进了资源和财富的集聚。

4) 市县间的地理、文化、产业和组织距离, 其衰减系数都为显著的负值, 表明这 4 种距离对于区域间的要素联系均具有显著的阻碍作用, 并且对物质流的阻碍作用要显著强于信息流。在区域间相互作用强度的影响因素中, 经济发展水平、基础设施水平、人口规模和产业兴旺度等市县主体属性均对要素联系强度有正向影响, 其中产业兴旺度仅对车流量具有显著影响。

4.2 讨论

本文基于手机通话和高速公路收费等实测大数据, 对贵州省各市县在人流、物流和信息流空间下的空间结构进行了对比分析, 得到了一些新的发现。但是, 本文还存在以下缺陷: 首先, 研究区域局限于贵州省。贵州省作为中国西南地区的山地省份, 其研究结论是否具有代表性, 需要进一步的探究。其次, 区域之间的要素联系有人员、货物、信息、资金和技术五大类, 本文只涉及了前 3 类要素流, 未能呈现贵州省流空间的全貌。未来的研究

还需不断拓宽数据来源, 更新分析方法, 扩大研究范围, 涵盖不同经济发展阶段的区域, 从而更准确地分析不同流空间下区域结构的差异。

参考文献(References):

- [1] Long F J, Zheng L F, Song Z D. High-speed rail and urban expansion: An empirical study using a time series of nighttime light satellite data in China[J]. *Journal of Transport Geography*, 2018, 72: 106-118.
- [2] 姚文萃, 周婕, 陈虹桔, 等. 基于互联网公共信息流的区域网络空间结构研究[J]. *经济地理*, 2017, 37(10): 10-16. [Yao Wencui, Zhou Jie, Chen Hongju et al. Spatial structure of regional network based on internet public information flow. *Economic Geography*, 2017, 37(10): 10-16.]
- [3] Castells M. The rise of the network society[J]. *Contemporary Sociology*, 1996, 38(26): 389-414.
- [4] 董超, 修春亮, 魏冶. 基于通信流的吉林省流空间网络格局[J]. *地理学报*, 2014, 69(4): 510-519. [Dong Chao, Xiu Chunliang, Wei Ye. Network structure of space of flows in Jilin Province based on telecommunication flows. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(4): 510-519.]
- [5] 王垚, 钮心毅, 宋小冬. “流空间”视角下区域空间结构研究进展[J]. *国际城市规划*, 2017, 32(6): 27-33. [Wang Yao, Niu Xinyi, Song Xiaodong. Research progress of regional spatial structure under the perspective of space of flow. *Urban Planning International*, 2017, 32(6): 27-33.]
- [6] 叶磊, 段学军, 吴威. 基于交通信息流的长三角地区网络空间结构及其效率研究[J]. *地理研究*, 2016, 35(5): 992-1002. [Ye Lei, Duan Xuejun, Wu Wei. Spatial structure and efficiency of the urban network within the Yangtze River Delta based on traffic and information flow. *Geographical Research*, 2016, 35(5): 992-1002.]
- [7] Friedman T L. The world is flat: A brief history of the twenty-first century[M]. London: Macmillan, 2005.
- [8] 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.]
- [9] Wang J E, Mo H H, Wang F H. Evolution of air transport network of China 1930-2012[J]. *Journal of Transport Geography*, 2014, 40: 145-158.
- [10] 冯兴华, 修春亮, 刘志敏, 等. 东北地区城市网络层级演变特征分析——基于铁路客运流视角[J]. *地理科学*, 2018, 38(9): 1430-1438. [Feng Xinghua, Xiu Chunliang, Liu Zhimin et al. Characteristics of urban network hierarchy evolution based on the perspective of railway passenger transport in Northeast China. *Scientia Geographica Sinica*, 2018, 38(9): 1430-1438.]
- [11] Murca M C R, Hansman R J, Li L et al. Flight trajectory data analytics for characterization of air traffic flows: A comparat-

- ive analysis of terminal area operations between New York, Hong Kong and Sao Paulo[J]. *Transportation Research Part C-Emerging Technologies*, 2018, 97: 324-347.
- [12] 柯文前, 陈伟, 杨青. 基于高速公路流的区域城市网络空间组织模式——以江苏省为例[J]. *地理研究*, 2018, 37(9): 1832-1847. [Ke Wenqian, Chen Wei, Yang Qing. Uncovering spatial organization patterns of regional city networks from expressway traffic flow data: A case study of Jiangsu province, China. *Geographical Research*, 2018, 37(9): 1832-1847.]
- [13] 柯文前, 陈伟, 陆玉麒, 等. 基于高速公路流的江苏省城市网络空间结构与演化特征[J]. *地理科学*, 2019, 39(3): 405-414. [Ke Wenqian, Chen Wei, Lu Yuqi et al. Extracting spatial structures and evolutionary characteristics of city networks in Jiangsu Province based on the expressway traffic flow. *Scientia Geographica Sinica*, 2019, 39(3): 405-414.]
- [14] 王钊, 杨山, 龚富华, 等. 基于城市流空间的城市群变形结构识别——以长江三角洲城市群为例[J]. *地理科学*, 2017, 37(9): 1337-1344. [Wang Zhao, Yang Shan, Gong Fuhua et al. Identification of urban agglomerations deformation structure based on urban-flow space: A case study of the Yangtze River Delta Urban Agglomeration. *Scientia Geographica Sinica*, 2017, 37(9): 1337-1344.]
- [15] 孙阳, 姚士谋, 张落成. 中国沿海三大城市群城市空间网络拓展分析——以综合交通信息网络为例[J]. *地理科学*, 2018, 38(6): 827-837. [Sun Yang, Yao Shimou, Zhang Luocheng. Spatial expansion of urban network for the three coastal agglomerations of China: A study based on integrated traffic information network. *Scientia Geographica Sinica*, 2018, 38(6): 827-837.]
- [16] Shanmukhappa T, Ho I W, Tse C K. Spatial analysis of bus transport networks using network theory[J]. *Physica A- Statistical Mechanics and Its Applications*, 2018, 502: 295-314.
- [17] 冯兴华, 修春亮, 白立敏, 等. 基于公路交通流视角的吉林省城镇中心性及影响因素[J]. *经济地理*, 2019, 39(1): 64-72. [Feng Xinghua, Xiu Chunliang, Bai Limin et al. Urban centrality and influencing factors in Jilin Province from the perspective of highway traffic flow. *Economic Geography*, 2019, 39(1): 64-72.]
- [18] 郭卫东, 钟业喜, 冯兴华, 等. 长江中游城市群县域公路交通网络中心性及其影响因素[J]. *经济地理*, 2019, 39(4): 34-42. [Guo Weidong, Zhong Yexi, Feng Xinghua et al. County-level highway network centrality of urban agglomerations and its influencing factors in the middle reaches of the Yangtze River. *Economic Geography*, 2019, 39(4): 34-42.]
- [19] Barnett G A, Chon B, Rosen D. The structure of the Internet flows in cyber space[J]. *Netcom*, 2001, 15(1/2): 61-80.
- [20] 金彪, 颜丽玲, 沙晋明, 等. 中国省域信息流、资金流强度的空间差异——以2015年京东手机交易为例[J]. *地理科学*, 2018, 38(2): 223-232. [Jin Biao, Yan Liling, Sha Jinming et al. The spatial difference of the intensity of information and capital flow in Chinese provincial region: A case study of mobile phone transactions in Jingdong mall in 2015. *Scientia Geographica Sinica*, 2018, 38(2): 223-232.]
- [21] 赵梓渝, 魏冶, 杨冉, 等. 中国人口省际流动重力模型的参数标定与误差估算[J]. *地理学报*, 2019, 74(2): 203-221. [Zhao Ziyu, Wei Ye, Yang Ran et al. Gravity model coefficient calibration and error estimation: Based on Chinese interprovincial population flow. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(2): 203-221.]
- [22] 叶磊, 段学军, 欧向军. 基于交通信息流的江苏省流空间网络结构研究[J]. *地理科学*, 2015, 35(10): 1230-1237. [Ye Lei, Duan Xuejun, Ou Xiangjun. The urban network structure of Jiangsu Province based on the traffic and information flow. *Scientia Geographica Sinica*, 2015, 35(10): 1230-1237.]
- [23] 程利莎, 王士君, 杨冉. 基于交通与信息流的哈长城市群空间网络结构[J]. *经济地理*, 2017, 37(5): 74-80. [Cheng Lisha, Wang Shijun, Yang Ran. The urban network structure of Ha-Chang Urban Agglomerations based on the traffic and information flow. *Economic Geography*, 2017, 37(5): 74-80.]
- [24] Liu X, Ben D, Wu K. Measuring polycentric urban development in China: An intercity transportation network perspective[J]. *Regional Studies*, 2015, 50(8): 1302-1315.
- [25] 陈伟, 刘卫东, 柯文前, 等. 基于公路客流的中国城市网络结构与空间组织模式[J]. *地理学报*, 2017, 72(2): 224-241. [Chen Wei, Liu Weidong, Ke Wenqian et al. The spatial structures and organization patterns of China's city networks based on the highway passenger flows. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(2): 224-241.]
- [26] 龙奋杰, 郑龙飞, 石朗, 等. 基于公路大数据的黔中城市群一体化研究[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2019, 53(2): 307-314. [Long Fenjie, Zheng Longfei, Shi Lang et al. Regional integration of Qianzhong cities using highway big data. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2019, 53(2): 307-314.]
- [27] 刘承良, 管明明, 段德忠. 中国城际技术转移网络的空间格局及影响因素[J]. *地理学报*, 2018, 73(8): 1462-1477. [Liu Chengliang, Guan Mingming, Duan Dezhong. Spatial pattern and influential mechanism of interurban technology transfer network in China. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(8): 1462-1477.]
- [28] 贺灿飞, 金璐璐, 刘颖. 多维邻近性对中国出口产品空间演化的影响[J]. *地理研究*, 2017, 36(9): 1613-1626. [He Canfei, Jin Lulu, Liu Ying. How does multi-proximity affect the evolution of export product space in China. *Geographical Research*, 2017, 36(9): 1613-1626.]

The Urban Network Structure and Influential Mechanism of Guizhou Province from the Perspective of Various Flows

Zheng Longfei¹, Gu Weinan^{2,3}, Long Fenjie^{1,4}, Zhang Su⁵

(1. Department of Construction Management and Hang Lung Center for Real Estate, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Key Laboratory of Regional Sustainable Development Modeling, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. School of Economic & Management, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, Hebei, China; 5. School of Big Data, Guizhou Institute of Technology, Guiyang 550003, Guizhou, China)

Abstract: The flows of passengers, goods and information are important expressions of interaction between regions, and it is a new attempt to analyze the differences of urban network structure in the space of various flows. Based on the actual big data, such as mobile phone call detail records and highway toll data, the various flows between the county-level administrative areas of Guizhou Province are measured. This study comprehensively analyzes the control structure, hierarchical structure and core-periphery structure of urban network in Guizhou Province, through the methods of *C*-value and *T*-value analysis, dominant flow analysis and network centrality analysis. Then, the key factors influencing various flows between cities (counties) were identified, and the results show that: 1) The control structure of Guizhou Province in the space of information and material flows are similar, but there are differences in control nodes. 2) In the space of information and material flows, Guizhou Province has formed a hierarchical network structure of provincial city-prefecture-county. 3) Compared with the space of material flow, the degree of centralization of the spatial network structure of Guizhou Province in the space of information flow has been further strengthened, and the gaps between cities (counties) have been further expanded. 4) The material and information flows between regions will decrease significantly as distance increases, and the geographical, cultural, industrial and organizational distances have a greater hindrance to the material flows between regions than the information flows. The regional attributes, such as economic development level, infrastructure level and population size also have significant impacts on the various flows between cities (counties).

Key words: information flow; traffic flow; spatial structure; distance attenuation; Guizhou Province