引文格式：陈勇健,吴桂虎. 新兴煤炭城市空间与交通相互关系作用研究[J]. 地理空间信息, 2024, 22(5): 24-30. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2024.05.004

新兴煤炭城市空间与交通相互关系作用研究

陈勇健[1]，吴桂虎[2]
（1. 江苏省城市规划设计研究院有限公司，江苏 南京 210019；2. 广东省城乡规划设计研究院有限责任公司，广东 广州 510000）

摘　要：为厘清城市空间和交通在新兴煤炭城市中的发展模式，为阜康未来发展提供指引，基于阜康市空间结构与交通系统评价指标，运用“耦合协调度—响应度—灰色关联度”模型组，对二者在2008—2019年的相互作用关系及其关键因素进行探索。研究表明，阜康城市空间结构与交通系统之间的耦合协调关系经历了由中度失调到良好协调的过程；2008—2013年空间结构响应度整体小于交通系统响应度，2013年后，两个系统的响应度变化趋势已大致相同；在阜康空间结构和交通系统的各14项指标中，分别有9项和7项指标与对方有较强的关联作用。

关键词：新兴煤炭城市；阜康；耦合协调度；响应度；灰色关联度
中图分类号：P208　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2024）05-0024-07

Research on the Interrelationship Between Space and Transportation in Emerging Coal Cities

CHEN Yongjian[1], WU Guihu[2]
(1. Jiangsu Urban Planning and Design Research Institute Co., Ltd., Nanjing 210019, China;
2. Guangdong Urban and Rural Planning and Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510000, China)

Abstract: In order to clarify the development mode of urban space and transportation in emerging coal cities and provide guidance for the future development of Fukang, we explored the interrelationship and key factors between them from 2008 to 2019 based on the evaluation indicators of spatial structure and transportation system in Fukang City, using the model group of “coupling coordination-responsiveness-gray correlation degree”. The results show that the coupling and coordination relationship between Fukang’s urban spatial structure and transportation system has undergone a process from moderate imbalance to good coordination. The overall responsiveness of spatial structure was smaller than that of the transportation system from 2008 to 2013, and after 2013, the change trend of responsiveness of two systems had been roughly the same. In terms of interaction factors, 9 and 7 of the 14 indicators of Fukang spatial structure and transportation system had strong correlations with each other.

Key words: emerging coal city, Fukang, degree of coupling coordination, responsiveness, grey relevance

煤炭城市作为国家重要能源基地，在促进国民经济发展中发挥了重要作用[1]。随着东部煤炭城市相继进入转型阶段，中西部一批新兴煤炭城市由此出现，相较于前者，后者的经济增长更加倚重于煤炭产业[2]，城市发展也更容易陷入“资源陷阱”。对此，国家先后出台了《全国资源型城市可持续发展规划（2013—2020年）》《关于加强分类引导培育资源型城市转型发展新动能的指导意见》等多项政策，旨在围绕空间、交通、环境和产业等方面，为以新兴煤炭城市为典型的各类资源型城市建设提供新指南。其中，城市空间结构与交通系统存在动态互动关系，共生于城市发展中的各个历史阶段，相互影响、相互制约、相互协调[3]，空间结构决定了城市交通源、交通量、交通方式和路网布局，而交通系统则可引导城市空间结构的发展方向[4]，二者协同发展是城市良性循环的根本，更是构建新兴煤炭城市建设思路、实现可持续发展策略的关键手段。因此，适时研究新兴煤炭城市空间结构、交通系统的相互作用关系，不仅能为该类城市的空间结构优化、交通系统水平提高建言献策，更能为众多新兴资源型城市建设提供新思路，研究意义极大。

在空间结构与交通系统相互作用关系的研究中，国外学者专注于分析交通系统对空间结构的作用影响[5-6]以及从空间结构集约利用角度出发，探求具有高可持续性的交通利用模式[7-8]；而国内研究更倾向于探索实现空间结构、交通系统高水平协调策略，最大可能地实现二者的互促发展[9-11]。总体而言，国内外研究

收稿日期：2022-10-27。
项目来源：国家自然科学基金面上项目资助项目（51478389）。
第一作者简介：陈勇健（1996—），硕士研究生，助理工程师，主要从事城市空间和交通领域相关工作，E-mail：393421120@qq.com。

均从宏观视角出发，较少触及空间结构与交通系统相互作用机制、影响因素的专门探索；同时研究对象多集中在综合性大型城市，缺少对中小城市的针对性研究，对新兴资源型等特殊类型城市的研究更是匮乏。基于此，本文以新兴煤炭城市阜康为研究对象，在深入解析城市基本特征的基础上，构建城市空间结构和交通系统的指标体系；并运用耦合协调模型、响应模型和灰色关联模型，从宏观、中观、微观层面依次解析城市空间结构与交通系统的协调关系、作用程度和影响因素，旨在厘清空间结构与交通系统在新兴煤炭城市中的发展模式，为阜康未来建设提供指引，并希冀为其他新兴资源型城市综合水平跃升提供新思路。

1　研究区概况与数据来源

1.1　研究区概况

阜康市是新疆维吾尔自治区的县级市，位于新疆中北部，总面积为8 545 km^2，下辖3个街道、4个镇、3个乡，另设有3个农场。城市地貌特征由南向北可划分为南部山区、中部平原、北部沙漠3个单元，南部山区面积为1 793.8 km^2，海拔700~5 445 m，属天山山脉；中部平原面积为2 233.6 km^2；北部沙漠为古尔班通古特大沙漠的一部分。在阜康市境内准噶尔盆地南缘的前山丘陵地带，蕴藏着丰富的煤炭资源，煤炭远景储量为62.9亿t，位居新疆各县市之首，《煤炭工业“十二五”发展规划》就已确定将阜康打造成为新疆重要的煤电煤化工产业基地。依托资源禀赋带来的发展优势，阜康的城市建设也明确了新的目标，《阜康市城市总体规划（2012—2030）》规定，阜康将打造城市“一核心、两翼、多组团”的空间布局结构，并以低碳生态城市为目标，构建合理便捷的交通系统。

1.2　数据来源

根据数据的可获得性，本文涉及的数据年限为2008年，数据来源于《阜康统计年鉴》《阜康市国民经济和社会发展统计公报》《中国城市统计年鉴》《中国城市建设统计年鉴》和阜康市交通运输局内部资料。对于少量统计口径不一致的指标，本文以城市年鉴数据为准，少量缺失数据的年份则根据时间顺序以插值法进行补充。

2　研究方法

本文在已有研究的基础上，将耦合协调模型、响应模型和灰色关联模型相结合，对阜康市空间结构和交通系统的相互作用关系进行分析。3种模型分析的侧重点不同，可分别从宏观、中观和微观层面对两个系统相互作用关系进行研究，所得成果更加综合全面、具体清晰。研究方法框架见图1。

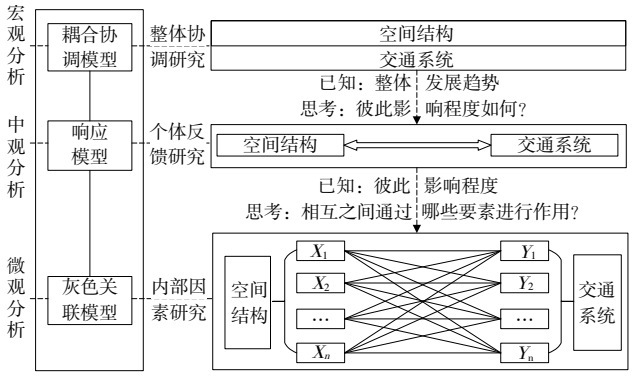


图1　研究方法框架

耦合协调度可反映两个系统之间的相互作用关系[12]。依据耦合协调度的高低，可明晰两个系统相互作用强度，判断它们在城市发展过程中是相互排斥、形成阻碍，还是彼此促进、协同发展。通常耦合协调度高，表明城市交通系统与空间结构之间呈和谐共生、共同进步的局面，反之亦然。然而，耦合协调模型只能反映二者关系变化的整体趋势，无法解读演变进程中彼此作用强度的变化情况。因此，为了更好地展现城市空间结构与交通系统之间的反馈水平，本文借鉴经济学中点弹性研究方法，通过计算二者的响应度，明确两个系统在发展过程中一方对于另一方变化所产生的响应状态。响应模型在耦合协调模型的基础上加深了对城市空间结构与交通系统演变关系的认知，但其探究角度依然停留在系统外部，若想充分剖析系统之间相互作用的关键因素，则还需借助灰色关联模型继续深化研究，通过揭示两个复杂、交错系统内部的要素相关性，更加深刻地认知二者的作用机制。

2.1　耦合协调模型

1）设定 S 为城市空间结构的综合序参量，则 S_{ij} 表示空间结构中第 i 个指标的第 j 个变量，其值为 $X_{ij}(i=1,2,\cdots,m;j=1,2,\cdots,n)$；$T$ 为城市交通系统的综合序参量，则 T_{ij} 表示交通系统中第 i 个指标的第 j 个变量，其值为 $Y_{ij}(i=1,2,\cdots,m;j=1,2,\cdots,n)$。那么，空间结构与交通系统的有序功效模型分别为：

$$\begin{cases} S_{ij}=\dfrac{X_{ij}-\min X_{ij}}{\max X_{ij}-\min X_{ij}}, & X_{ij}\text{具有正向功效} \\ S_{ij}=\dfrac{\max X_{ij}-X_{ij}}{\max X_{ij}-\min X_{ij}}, & X_{ij}\text{具有负向功效} \\ T_{ij}=\dfrac{Y_{ij}-\min Y_{ij}}{\max Y_{ij}-\min Y_{ij}}, & Y_{ij}\text{具有正向功效} \\ T_{ij}=\dfrac{\max Y_{ij}-Y_{ij}}{\max Y_{ij}-\min Y_{ij}}, & Y_{ij}\text{具有负向功效} \end{cases} \tag{1}$$

2）设定 w_i 、 v_i 分别为城市空间结构和交通系统中第 i 个指标的权重，各指标权重采用熵值赋权法计算，则第 j 年空间结构和交通系统的指标总体综合评价水平模型分别为：

$$\begin{cases} S_j = \sum_{i=1}^{m} w_i \times S_{ij} \\ T_j = \sum_{i=1}^{m} v_i \times T_{ij} \end{cases} \tag{2}$$

3）城市空间结构和交通系统耦合度的计算公式为[13]（假定 $S>T$ ，若 $T>S$ ，则二者位置互换）：

$$C = \sqrt{\left[1-(S-T)\right] \times \frac{T}{S}} \tag{3}$$

4）由于耦合度只能代表二者相互作用的强弱，这便会导致出现两个系统都处于较低发展水平时耦合度依然较高的现象，因此引入耦合协调度来更好地表征二者的协同效应。

$$\begin{cases} D = \sqrt{C \times K} \\ K = a \times S + b \times T \end{cases} \tag{4}$$

式中，D 为二者的耦合协调度； K 为反映空间结构和交通系统整体协同效应的综合评价指数； a 、 b 为两个系统的重要程度系数，本文假设空间结构和交通系统具有同等的重要性，因此 $a=b=0.5$。

参考相关文献[14-15]，将两个系统的耦合协调度分为10个等级（表1）。

表1 耦合协调度分级

耦合协调度	协调等级	耦合协调度	协调等级
(0, 0.1]	极度失调	(0.5, 0.6]	勉强协调
(0.1, 0.2]	重度失调	(0.6, 0.7]	低度协调
(0.2, 0.3]	中度失调	(0.7, 0.8]	中度协调
(0.3, 0.4]	轻度失调	(0.8, 0.9]	良好协调
(0.4, 0.5]	濒临失调	(0.9, 1]	优质协调

2.2 响应模型

响应指数的计算公式为[16]：

$$\eta_S = \frac{\mathrm{d}S}{\mathrm{d}T}\frac{T}{S} \tag{5}$$

$$\eta_T = \frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}S}\frac{S}{T} \tag{6}$$

$$\theta = |\eta| \tag{7}$$

式中， η_S 为空间结构对交通系统的响应指数； η_T 为交通系统对空间结构的响应指数； θ 为响应度，值越大，表示响应度越高，反馈越明显，反之亦然。

2.3 灰色关联模型

1）确定两个系统各指标间的关联系数 $\xi_i(t)(j)$ [17]：

$$\xi_i(t)(j) = \frac{\min\limits_i \min\limits_t \left|N_i^X(j) - N_t^Y(j)\right| + \rho \max\limits_i \max\limits_t \left|N_i^X(j) - N_t^Y(j)\right|}{\left|N_i^X(j) - N_t^Y(j)\right| + \rho \max\limits_i \max\limits_t \left|N_i^X(j) - N_t^Y(j)\right|} \tag{8}$$

式中， $N_i^X(j)$ 为第 j 年城市空间结构指标的标准化值； $N_t^Y(j)$ 为第 j 年城市交通系统指标的标准化值； ρ 为分辨系数，本文取0.5。

2）将 $\xi_i(t)(j)$ 按照样本数 k 求平均值，得到关联度矩阵：

$$\gamma = \begin{vmatrix} \cdots & Y_1 & \cdots & Y_n \\ X_1 & \gamma_{11} & \cdots & \gamma_{1n} \\ \cdots & \cdots & \gamma_{it} & \cdots \\ X_m & \gamma_{m1} & \cdots & \gamma_{mn} \end{vmatrix}, \quad \gamma_{it} = \frac{1}{k}\sum_{j=1}^{k} \xi_i(t)(j) \tag{9}$$

3）以关联度矩阵为基础，计算各指标的平均关联度：

$$\begin{cases} \gamma_i = \frac{1}{n}\sum_{t=1}^{n} \gamma_{it} \\ \gamma_t = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m} \gamma_{it} \end{cases} \tag{10}$$

γ_{it} 可反映城市空间结构中哪些指标与交通系统作用密切，同理，在城市交通系统中又有哪些指标与空间结构关联更大，值越大，说明指标之间的关联性越大、耦合作用越强；反之，则越小。指标间关联度分级为弱(0,0.35]、中等(0.35,0.65]、较强(0.65,0.85]和极强(0.85,1] [18]。

3 研究结果与分析

3.1 阜康市空间结构与交通系统评价指标

城市空间结构和交通系统之间的作用关系具有系统性和复杂性，因此筛选的指标应尽可能体现两个系统的基本特征[19]。城市空间结构的演进是一种平衡与非平衡状态循环交替的动态变化过程，受多方面因素的影响，其中最基本的3种作用力是社会力、经济力和政策力[20]。社会力、经济力可通过城市的人口、文化、经济发展水平等要素体现，而政策力主要是政府出台的法律、规章、条例等文本性的内容，主要是对城市土地使用提出要求，因此可将土地利用作为政策力的体现。城市中的社会、经济和土地利用要素相互作用、相互影响，共同推动空间结构的改变。

综合各项数据获取的完整性与难易程度，在空间结构的二级指标选取方面，社会由市辖区人口数、城镇居民人均可支配收入和城镇化率3项指标来衡量；经济由地区生产总值、固定资产投资总额、工业总产值、第二产业比重和第三产业比重5项指标来衡量；土地利用考虑到阜康煤炭城市的特征，较重视对于交通、初级加工、物流、存储等用地的需求，将建成区面积、人均城市建设用地面积、工业用地比例、物流仓储用地比例、道路交通设施用地比例和人均公园绿地面积6项指标作为衡量土地利用的要素。根据熵值法[21]，利用IBM SPSS Statistics 25计算城市空间结构指标体系的各指标权重，结果见表2。

表2　空间结构指标体系

一级指标	二级指标	指标权重
社会	市辖区人口数/人（X_1）	0.14
	城镇居民人均可支配收入/元（X_2）	0.06
	城镇化率/%（X_3）	0.02
经济	地区生产总值/亿元（X_4）	0.05
	固定资产投资总额/亿元（X_5）	0.09
	工业总产值/万元（X_6）	0.07
	第二产业比重/%（X_7）	0.05
	第三产业比重/%（X_8）	0.04
土地利用	建成区面积/km²（X_9）	0.12
	人均城市建设用地面积/km²（X_{10}）	0.04
	工业用地比例/%（X_{11}）	0.13
	物流仓储用地比例/%（X_{12}）	0.06
	道路交通设施用地比例/%（X_{13}）	0.05
	人均公园绿地面积/m²（X_{14}）	0.08

城市对于交通系统的投资可分为交通基础设施和交通管理，反映在发展水平上即为交通系统的建设水平（道路建设投入）和管理水平（道路运行效率和服务水平）[22]。交通管理能力呈现在对交通运输工具的数量管控以及城市资金投入和财政收入在交通领域的比重上。高水平的交通设施建设必然需要高质量的交通管理措施辅助，与此同时，后者的有效保障又能促进交通系统建设水平的进一步提高。在交通系统的二级指标选取方面，交通设施建设水平由公路总里程、建成区道路网密度和人均城市道路面积3项指标来衡量；由于阜康市的铁路只承担货物运输，且乌准铁路在阜康市内的货运量数据获取难度较大，因此引用乌准铁路的年货物发送量表征阜康城市铁路货物运输水平的变化，交通运输能力则由客运总量、货运总量、客运周转量、货运周转量和乌准铁路货物发送量5项指标来衡量；交通运输工具由民用汽车保有量、客运汽车数量、货运汽车数量和公交车数量4项指标来衡量；交通行业管理水平由邮电业务总量和交通运输、仓储邮政业投资两项指标来衡量。城市交通系统指标体系的各指标权重见表3。

煤炭城市需要通过运输原煤或经过加工后的煤炭制品为自身的经济发展创造条件，城市交通基础设施建设水平越高，城市的运输效能越高，越能推动城市其他经济领域的建设。交通网络密度是评价区域交通基础设施建设水平的关键指标[23]，本文通过对阜康市2008年、2019年路网以及路网密度进行空间分析，明晰研究期内城市道路建设的演变状况，加深对阜康市空间结构和交通系统相互关系的认知。

表3　交通系统指标体系

一级指标	二级指标	指标权重
交通设施建设水平	公路总里程/km（Y_1）	0.03
	建成区道路网密度/(km/km²)（Y_2）	0.05
	人均城市道路面积/km²（Y_3）	0.05
交通运输能力	客运总量/万人（Y_4）	0.06
	货运总量/万t（Y_5）	0.08
	客运周转量/(万人/km)（Y_6）	0.05
	货运周转量/(万t/km)（Y_7）	0.07
	乌准铁路货物发送量/万t（Y_8）	0.12
交通运输工具	民用汽车保有量/辆（Y_9）	0.05
	客运汽车数量/辆（Y_{10}）	0.02
	货运汽车数量/辆（Y_{11}）	0.03
	公交车数量/辆（Y_{12}）	0.12
交通行业管理水平	邮电业务总量/亿元（Y_{13}）	0.07
	交通运输、仓储邮政业投资/亿元（Y_{14}）	0.20



图2　阜康市路网密变化

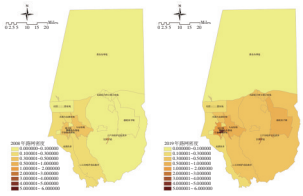


图3　阜康市路网密度变化

由图2、3可知，2008—2019年阜康市道路建设水平提升显著，路网密度的空间分布格局在城市南部非沙漠覆盖区域的变化较明显。具体而言，城市路网建设以强化区域南北联系为主要目的，纵向延伸方式与阜康城市形态相契合，路网密度增加最突出的地区是东南部的滋泥泉子镇以及西部主城区所在的博峰街办事处，两个区域路网密度在12年间均增长了10倍以上。由此可见，研究期内阜康市交通系统对空间结构的引领主要存在于城市南北方向上，通过路网密度的提升，增加各行政单元之间的可达性，同时城市用地空间的拓展也反作用于交通系统，决定了交通路网的建设速度和方向。

3.2　阜康市空间结构与交通系统耦合协调关系分析

根据耦合协调度公式，计算得到阜康市空间结构综合贡献值 S 、交通系统综合贡献值 T 以及二者的耦合度和耦合协调度，结果见表4、图4，可以看出，2008—2019年阜康市空间结构和交通系统的耦合协调度整体呈上升趋势，经历了从中度失调到良好协调6个阶段，表明两个系统之间具有密切的关联带动作用，相互作用水平较强。2008—2010年两个系统的耦合协调度处于中度失调水平，主要是由于这两年的交通发展水平较低，交通系统的贡献值甚至不到0.09，城市属于空间结构超前型。2011年的耦合协调度为

0.399 0，处于轻度失调阶段，该阶段交通系统综合贡献值的变化比空间结构更突出。整体看来，两个系统之间的发展水平虽未出现较大改变，但存在逐渐缩小的趋势，交通系统发展水平的提升十分明显。2012—2014年的耦合协调水平离开失调状态，处于勉强协调阶段，耦合协调度由失调转为协调的突破主要得益于交通系统综合贡献值的持续增长，2013年其数值首次超越空间结构，阜康开始进入交通超前型时期。2015—2016年的耦合协调度处于低度协调水平，两个系统发展水平稳步提升，交通系统的发展水平依然领先于空间结构。2017—2018年的耦合协调度水平达到中度协调阶段，交通系统的发展速度有所减缓，而空间结构综合贡献值提升了0.150 2，城市重新回到了空间结构超前型模式。2019年的耦合协调度为0.895 7，达到良好协调水平。从综合贡献值来看，交通系统综合贡献值在这一年猛增至0.915 6，高于空间结构，城市再次进入交通超前型模式，两个系统在2012年之后的变化幅度大致相同，具备较高协同特征，随着二者的进一步提升，预计达到优质协调水平指日可待。

表4 2008—2019年阜康市城市空间结构和交通系统耦合协调度

年份	S	T	耦合度	耦合协调度	协调等级
2008	0.175 0	0.059 2	0.570 6	0.258 5	中度失调
2009	0.313 3	0.067 8	0.342 3	0.255 4	中度失调
2010	0.340 9	0.081 3	0.387 1	0.285 9	中度失调
2011	0.351 2	0.137 0	0.652 1	0.399 0	轻度失调
2012	0.368 7	0.259 5	0.940 4	0.543 5	勉强协调
2013	0.306 3	0.321 4	0.998 8	0.559 9	勉强协调
2014	0.338 6	0.352 4	0.999 2	0.587 6	勉强协调
2015	0.402 4	0.418 2	0.999 3	0.640 3	低度协调
2016	0.441 9	0.514 1	0.988 6	0.687 4	低度协调
2017	0.539 6	0.536 9	0.999 9	0.733 6	中度协调
2018	0.698 8	0.593 6	0.986 8	0.798 6	中度协调
2019	0.730 3	0.915 6	0.974 8	0.895 7	良好协调



图4 空间结构和交通系统综合贡献值与耦合协调度变化趋势

3.3 阜康市空间结构与交通系统响应关系分析

对阜康市2008—2019年空间结构综合贡献值和交通系统综合贡献值进行曲线估计分析，得到二者的最优响应方程，即

$$S=0.334-0.861T+3.587T^2-2.361T^3,\ R_S^2=0.838 \quad (11)$$

$$T=0.001-0.444S+4.482S^2-3.28S^3,\ R_T^2=0.793 \quad (12)$$

根据响应度公式，计算得到2008—2019年阜康市空间结构对交通系统的响应度和交通系统对空间结构的响应度，结果见表5、图5，可以看出，2008—2019年两个系统的响应度变化趋势截然不同，空间结构对交通系统的响应度整体波动幅度不大，常年维持在1以下；而交通系统对空间结构响应度则是剧烈波动后逐渐趋于平稳。2013年后，虽然交通系统的响应度始终高于空间结构，但二者变化整体趋于一致，说明两个系统已形成相对稳定的影响状态，开始步入发展的成熟期。空间结构对交通系统的响应度在研究期内基本均小于1，说明阜康市空间结构在发展过程中受交通系统的影响较小。具体而言，2008—2011年的空间结构响应度很低，这是由于城市交通系统在2011年之前发展缓慢，而城市空间结构水平较高，空间结构对交通系统改变做出的反馈不明显；2011—2016年空间结构对交通系统改变的反馈程度开始增强，这是由于阜康市逐渐加强了交通系统建设，城市资源运输和管理能力的提升也为城市空间结构的优化重组奠定了基础；2016年后，二者的相互作用程度逐渐下降，表明各自系统内部发展日趋完善，彼此影响开始进入相对平衡的状态。交通系统对空间结构的响应度在研究期内先上升后下降，最后趋于平稳，2008—2011年交通系统对空间结构作用力的反馈十分明显，这是由于阜康市当时的空间结构成熟度高于发展缓慢的交通系统，后者受前者的影响较大；2011—2013年响应度持续下降，2009年末乌准铁路的开通和发展，为阜康市货物运输系统带来了新动力，同时全市汽车保有量、公交车辆等交通设施水平的提升也为交通系统

表5 阜康空间结构与交通系统响应度

年份	η_S	η_T
2008	0.156	2.434
2009	0.088	6.463
2010	0.077	6.153
2011	0.004	3.820
2012	0.369	2.165
2013	0.748	1.314
2014	0.820	1.405
2015	0.936	1.511
2016	1.111	1.372
2017	0.944	1.536
2018	0.766	1.195
2019	0.289	0.681

在该时期的迅速发展奠定了基础；2013年以后，两个系统的相互作用进入成熟阶段，虽然交通系统的响应度依然小于空间结构，但二者之间的差距已远小于之前水平，且对对方发展改变所呈现的反馈趋势也大致相同。



图5　阜康市空间结构与交通系统的响应度变化趋势

3.4　阜康市空间结构与交通系统内部作用因素分析

根据灰色关联公式，对阜康市城市空间结构与交通系统内部作用因素进行关联性分析，结果见表6。为更加方便直观地观察各指标的关联强度，将空间结构与交通系统内部具有较强和极强作用水平的因素绘制成和弦图（图6）。阜康市空间结构各指标中，与交通系统关联强度最大的是建成区面积，关联强度最小的是工业用地比例（0.497）；其中建成区面积（0.747）、固定资产投资总额（0.740）、工业总产值（0.738）、城镇居民人均可支配收入（0.731）、地区生产总值（0.720）、人均公园绿地面积（0.719）、第三产业比重（0.703）、市辖区人口数（0.698）和人均城市建设用地面积（0.680）等9项指标与交通系统具有较强关联，其余5项指标均与交通系统具有中等关联。阜康市交通系统各指标中，与空间结构关联强度最大的是公交车数量，关联强度最小的是建成区道路网密度（0.598），其中公交车数量（0.696）、货运周转量（0.692）、邮电业务总量（0.687）、货运总量（0.682）、人均城市道路面积（0.668）、乌准铁路货物发送量（0.667）和民用汽车保有量（0.653）等7项指标与空间结构具有较强关联，其余7项指标均与空间结构具有中等关联。

表6　阜康空间结构与交通系统内部作用因素关联性

	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y_6	Y_7	Y_8	Y_9	Y_{10}	Y_{11}	Y_{12}	Y_{13}	Y_{14}	平均值	关联强度
X_1	0.611	0.621	0.696	0.621	0.812	0.618	0.770	0.842	0.642	0.576	0.612	0.782	0.730	0.845	0.698	较强
X_2	0.685	0.545	0.760	0.729	0.768	0.718	0.807	0.736	0.748	0.668	0.703	0.857	0.833	0.681	0.731	较强
X_3	0.579	0.610	0.547	0.567	0.518	0.573	0.561	0.493	0.581	0.634	0.630	0.513	0.570	0.453	0.559	中等
X_4	0.688	0.541	0.706	0.731	0.739	0.749	0.792	0.709	0.746	0.675	0.719	0.797	0.820	0.661	0.720	较强
X_5	0.631	0.547	0.773	0.717	0.829	0.740	0.850	0.801	0.711	0.618	0.691	0.881	0.826	0.751	0.740	较强
X_6	0.674	0.542	0.774	0.751	0.781	0.757	0.815	0.751	0.759	0.663	0.667	0.849	0.858	0.694	0.738	较强
X_7	0.498	0.692	0.501	0.475	0.592	0.472	0.583	0.558	0.476	0.520	0.552	0.473	0.483	0.547	0.530	中等
X_8	0.754	0.540	0.765	0.680	0.696	0.667	0.743	0.667	0.761	0.705	0.696	0.786	0.762	0.618	0.703	较强
X_9	0.739	0.494	0.834	0.752	0.784	0.740	0.761	0.773	0.765	0.713	0.599	0.896	0.871	0.741	0.747	较强
X_{10}	0.720	0.571	0.747	0.690	0.667	0.686	0.692	0.641	0.707	0.718	0.653	0.718	0.730	0.585	0.680	较强
X_{11}	0.471	0.696	0.441	0.449	0.497	0.460	0.483	0.531	0.446	0.507	0.596	0.419	0.399	0.567	0.497	中等
X_{12}	0.488	0.667	0.486	0.490	0.575	0.489	0.540	0.568	0.457	0.498	0.555	0.464	0.434	0.574	0.520	中等
X_{13}	0.569	0.753	0.501	0.555	0.513	0.581	0.516	0.544	0.602	0.630	0.598	0.456	0.483	0.542	0.560	中等
X_{14}	0.671	0.547	0.827	0.689	0.772	0.679	0.770	0.725	0.736	0.639	0.630	0.855	0.815	0.704	0.719	较强
平均值	0.627	0.598	0.668	0.635	0.682	0.638	0.692	0.667	0.653	0.626	0.636	0.696	0.687	0.640		中等
关联强度	中等	中等	较强	中等	较强	中等	较强	较强	较强	中等	中等	较强	较强	中等	中等	

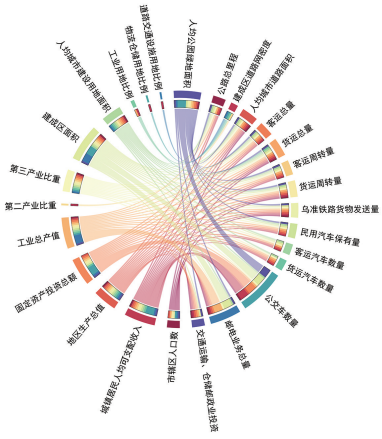


图6　空间结构与交通内部因素关联度和弦图

4　结　语

本文以新兴煤炭城市阜康为例，分别构建空间结构和交通系统评价指标，利用耦合协调模型、响应模型对2008—2019年二者的相互作用进行研究，并借助灰色关联模型分析两个系统相互作用的关键因素，最终得到以下结论：

1）2008—2019年阜康城市空间结构与交通系统之间的耦合协调水平整体呈上升趋势，由0.258 5增至0.895 7，耦合协调度等级经历了中度失调、轻度失调、勉强协调、低度协调、中度协调和良好协调6个阶段。

2）2008—2019年阜康市空间结构和交通系统之间的响应情况存在较大差别。空间结构对交通系统的响应度发展态势较稳定，研究期内数值基本小于1；而交通系统对空间结构的响应度则经历了一段较大波动后再逐渐趋于平缓。2013年以后，两个系统的响应度变化趋势已大致相同，相互作用关系进入平衡状态。

3）阜康空间结构的14项指标中，有9项指标与交通系统具有较强关联，关联度最大和最小的指标分别是建成区面积和工业用地比例；交通系统的14项指标中，有7项指标与空间结构具有较强关联，关联度最大和最小的指标分别是公交车数量和建成区道路网密度。

本文探讨了阜康城市空间结构与交通系统相互作用关系的时间变化特征，全面认识了其耦合协调发展状态，厘清了两个系统彼此反馈的差异和转变方式，揭示了二者演变过程中的关键因素，有助于更加具体、深刻地认识阜康在城市建设和可持续发展中的问题；同时基于物理学模型、经济学模型和数学模型的组合分析方式，为城市空间和交通的研究提供了新范式，以综合学科的视角看待问题，也更加有利于把握事物演变发展的规律和机制。

本文也存在一些有待深入解决的问题。首先，目前针对煤炭城市的研究多集中于探讨城市资源利用和可持续发展，较少触及空间结构和交通系统，因此对新兴煤炭城市空间和交通发展特殊性的挖掘是本文有待提高的方面，今后应更全面地了解新兴煤炭城市的演变特征，提高研究内容的特殊性。其次，本文对评价指标的构建考虑了阜康市受资源束缚、工业发展突出等特征，但受数据获取渠道较少、关键数据缺失等条件限制，指标体系的全面性和代表性还有待进一步完善，后续研究应当丰富数据搜集方式，综合考虑新兴煤炭城市的资源、环境、社会、用地、交通等多方面因素，构建更具表征性的评价指标。最后，由于不同区域的城市建设条件和资源禀赋有所差异，导致新兴煤炭城市之间的发展水平也存在一定差距，阜康市虽是典型的新兴煤炭城市，但自身的演变过程具备独特性，因此仅以阜康市为例进行研究无法充分明晰新兴煤炭城市空间与交通之间的影响历程，还需进一步增加考察对象，全面探索两个系统的相互作用关系。

参考文献

[1] 刘学,董春游,曹志国,等. 基于不确定性理论的煤炭城市可持续发展评价模型[J]. 中国矿业,2012,21(4):37-40

[2] 邵帅,杨莉莉. 自然资源丰裕、资源产业依赖与中国区域经济增长[J]. 管理世界,2010,26(9):26-44

[3] 纪铮翔,杨欣,易法彬,等. 面向空间战略协同的二线省会城市综合交通规划实践[J]. 交通与运输,2020,33(增刊2):1-5

[4] 马清裕,张文尝,王先文. 大城市内部空间结构对城市交通作用研究[J]. 经济地理,2004,24(2):215-220

[5] Schaeffer K H,Scalar E. Access for All: Transportation and Urban Growth[M]. England: Penguin Books,1975

[6] Knight R L,Trygg L L. Land Use Impacts of Rapid Transit Systems: Implications of Recent Experience[J]. Energy Planning Policy and Economy,1977(12):268-271

[7] Frank L,Pivo G. Impacts of Mixed Use and Density on Utilization of Three Modes of Travel: Single-occupant Vehicle, Transit and Walking[J]. Transportation Research Record,1994,1 466:44-52

[8] Heart B, Jennifer B. The Smart Growth-climate Change Connection[M]. Conservation Law Foundation,2000

[9] 王树盛. 交通与土地利用一体化分析技术及其应用:以昆山城市总体规划为例[J]. 城市规划,2010,34(增刊1):130-135

[10] 张润朋,刘玮. 广州城际轨道网络与城市空间结构规划适应性分析及协调策略[J]. 规划师,2019,33(12):117-123

[11] 叶玉瑶,张虹鸥,许学强,等. 面向低碳交通的城市空间结构:理论、模式与案例[J]. 城市规划学刊,2012(5):37-43

[12] 王娟,张仲伍. 山西省城镇化协调发展空间演化研究[J]. 地理空间信息,2021,19(6):109-114

[13] 王淑佳,孔伟,任亮,等. 国内耦合协调度模型的误区及修正[J]. 自然资源学报,2021,36(3):793-810

[14] 刘金金,屈磊,马瑛,等. 基于Matlab的交通运输与空间结构耦合响应研究[J]. 计算机与数字工程,2019,47(4):762-768

[15] 赵卓文,吴勤书,张时智. 江苏省城镇化质量与规模协调性空间格局[J]. 地理空间信息,2021,19(2):116-120

[16] 陈伟莲,张虹鸥,吴旗韬,等. 珠江三角洲城镇群产业结构演变的城镇空间响应强度[J]. 热带地理,2014,34(4):544-552

[17] 赵成义. 干旱区土壤生态系统主导因子的灰色关联识别[J]. 干旱区地理,1992,15(4):66-70

[18] 储雪俭,钱赛楠. 基于耦合协调度和灰色关联度的中国物流业与金融业协调发展研究[J]. 工业技术经济,2019,38(7):93-100

[19] 焦华富,杨显明. 煤炭资源型城市产业结构演替与空间形态演变耦合:以安徽省淮南市为例[J]. 地理学报,2016,71(6):998-1 009

[20] 耿慧志. 论我国城市中心区更新的动力机制[J]. 城市规划汇刊,1999(3):27-31

[21] 杨显明,焦华富,许吉黎. 煤炭资源型城市空间结构演化过程、模式及影响因素:基于淮南市的实证研究[J]. 地理研究,2015,34(3):513-524

[22] 郭秀芝,陆化普. 城市交通系统整体发展水平综合评价指标体系及方法[J]. 交通标准化,2003(8):53-55

[23] 韩增林,杨荫凯,张文尝,等. 交通经济带的基础理论及其生命周期模式研究[J]. 地理科学,2000,20(4):295-300