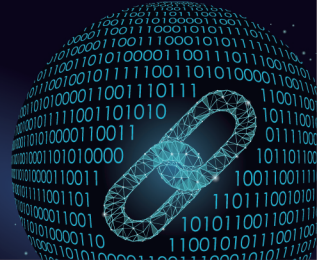




中国科技期刊卓越行动计划项目入选期刊

控制与决策

CONTROL AND DECISION



基于面板数据的灰色向量模关联模型及其应用

党耀国, 王一博, 王俊杰, 杨绍闻

引用本文:

党耀国, 王一博, 王俊杰, 杨绍闻. 基于面板数据的灰色向量模关联模型及其应用[J]. *控制与决策*, 2024, 39(10): 3451–3458.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2023.1020>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于Fisher Score与最大信息系数的齿轮箱故障特征选择方法

Fault feature selection method of gearbox based on Fisher Score and maximum information coefficient

控制与决策. 2021, 36(9): 2234–2240 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1770>

区间条件下基于GRA和TOPSIS的辐射源威胁评估

Combining TOPSIS and GRA for emitter threat evaluation with interval number

控制与决策. 2021, 36(6): 1516–1522 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1559>

基于WGRA-FCM样本相似性度量的转炉炼钢终点碳温软测量方法

End point carbon temperature measurement method based on WGRA-FCM for sample similarity measurement

控制与决策. 2021, 36(9): 2170–2178 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0128>

基于弱关联的自适应高维多目标进化算法

A weak association-based adaptive evolutionary algorithm for many-objective optimization

控制与决策. 2021, 36(8): 1804–1814 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1723>

面向分布式在线学习的共享数据方法

A sharing data approach oriented to distributed online learning

控制与决策. 2021, 36(8): 1871–1880 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1811>

基于面板数据的灰色向量模关联模型及其应用

党耀国, 王一博[†], 王俊杰, 杨绍闻

(南京航空航天大学 经济与管理学院, 南京 210016)

摘要: 针对现有面板数据灰色关联模型中不同几何特征的可比性问题, 以及关联序受对象排列顺序影响的问题, 从时间维和对象维两个方面构建基于面板数据的灰色向量模关联模型. 首先, 以向量的形式对面板数据进行表征, 进而定义指标多维度上的绝对变化量和相对变化量两种几何特征向量, 并基于特征向量对各几何特征进行相应的无量纲化处理; 然后, 在时间维度考虑指标的横向发展绝对量和相对量向量的模得到时间维灰色向量模关联度, 在对象维度考虑指标的纵向振荡绝对量和相对量向量的模得到对象维灰色向量模关联度, 对两维度加权平均得到面板数据的灰色向量模关联度; 其次, 对面板数据灰色向量模关联模型的性质如规范性、接近性、数乘变换保序性等进行讨论, 验证模型的实用性和有效性, 且模型不受对象排列顺序的影响; 最后, 利用所提出的模型对江苏省地区大气污染问题进行研究, 以期对江苏省大气污染防治工作提供理论支持.

关键词: 灰色系统; 灰色关联分析; 面板数据; 向量模; 大气污染

中图分类号: N941.5

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2023.1020

引用格式: 党耀国, 王一博, 王俊杰, 等. 基于面板数据的灰色向量模关联模型及其应用 [J]. 控制与决策, 2024, 39(10): 3451-3458.

Grey vector modulus incidence model based on panel data and its application

DANG Yao-guo, WANG Yi-bo[†], WANG Jun-jie, YANG Shao-wen

(College of Economics and Management, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Aiming at the comparability problem of different geometric features in the existing panel data grey incidence model, and the problem that the incidence order is affected by the order of objects, a grey vector modulus incidence model based on panel data is constructed. Firstly, the panel data is characterized in the form of vectors, and then two geometric feature vectors of absolute change and relative change in multi-dimension of the index are defined, and the corresponding dimensionless processing of each geometric feature is carried out based on the feature vector. Then, the time dimension grey vector modulus incidence degree is obtained by considering the modulus of the horizontal development absolute quantity and the relative quantity. The object dimension grey vector modulus incidence degree is obtained by considering the modulus of the vertical oscillation absolute quantity and the relative quantity. The grey vector modulus incidence degree of the panel data is obtained by two dimensions. The properties of the grey vector norm incidence model of panel data are discussed. Finally, the proposed model is used to study the air pollution problem in Jiangsu Province.

Keywords: grey system; grey incidence analysis; panel data; vector modulus; air pollution

0 引言

灰色系统理论是 1982 年由邓聚龙教授创立的一种针对少数据、贫信息不确定性问题的分析方法, 现已成为研究不确定性系统的最常用方法之一. 其中, 灰色关联分析是灰色系统理论的重要组成部分, 该方法弥补了采用数理统计方法进行系统分析所产生的不足, 能够适用于不同的数据量和数据规律的

情况, 相关成果在控制^[1]、评价^[2-3]、决策^[4]等领域均有应用. 灰色关联分析方法的基本思想在于: 根据序列曲线几何相似程度判断不同序列间的联系是否紧密. 自 Deng^[5] 首先基于序列点之间的欧氏距离提出了邓氏关联模型以来, 学者们基于不同的几何特征分析角度, 提出了大量新的灰色关联模型. 例如: Liu 等^[6] 基于序列间所夹面积提出了广义灰关联模型, 并

收稿日期: 2023-07-21; 录用日期: 2023-10-16.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (72001107, 72271120); 中国博士后科学基金项目 (2020T130297, 2019M660119).

责任编辑: 王光臣.

[†]通讯作者. E-mail: 1185013203@qq.com.

在后续进行改进^[7];Dang等^[8]基于序列曲线的斜率提出了灰色斜率关联模型;Wang等^[9]引入三角函数提出了灰色变趋势关联模型.除此之外还有基于数据的凸性提出的灰色凸关联模型^[10]等.近年来,为解决现实生活中大量复杂系统和应用难题,灰关联分析的对象逐渐由时间序列拓展到面板数据,面板数据灰色关联分析逐步成为研究热点.

目前,关于面板数据的灰色关联模型研究主要包括针对三维几何特征、针对二维几何特征的拓展和针对混合特征的研究.第一,针对三维几何特征建模的研究:Zhang等^[11]用空间三角形组成的曲面簇对面板数据进行描述,基于曲面簇的有向体积提出了扩展绝对关联模型;吴鸿华等^[12]将矩阵分解并投射为空间四面体网格,提出了灰色四面体网格关联模型.这些方法使用三维几何特征的角度判断不同矩阵间的联系是否紧密.第二,将二维几何特征分析方法拓展到面板数据进行建模的研究:Liu等^[13]利用面板数据时间和对象维度的斜率构建了灰色网格关联模型;Wu等^[14]基于离散曲率思想提出了灰色曲率关联模型.这些方法将二维几何特征的度量方法拓展到面板数据.第三,针对混合特征,即综合多种几何特征进行建模的研究:Cui等^[15]利用发展速度指数和增长速度指数,提出了面板数据灰色矩阵相似关联模型;Qian等^[16]基于多指标面板数据的时空特征引入“水平”距离、“增量”距离、“变异”距离,提出了多指标面板数据灰色矩阵关联模型;Dang等^[17]在时间维上利用增量表征发展水平,在对象维上利用离差表征分布水平,提出了灰色指标关联模型;Zhai等^[18]将样本行为矩阵的二元指标子矩阵投射为空间中的点集并构建绝对离差矩阵,通过矩阵数据的平均值和离差提出了灰色点集关联分析模型.上述关于面板数据关联模型的研究,为灰色关联分析理论的发展和完善做出了重要贡献,但在建模过程中仍然存在一些问题亟待解决:

1) 现有的面板数据灰色关联模型在进行建模时多数仅考虑单一的几何特征,对混合特征灰色关联模型的研究较少.

2) 部分面板数据灰色关联模型在计算对象维度的灰色关联度时,将该维度数据视为有序序列进行处理,导致关联序受对象排列顺序的影响.

3) 面板数据的混合特征灰色关联模型可以综合多种几何特征,然而各几何特征量纲量级不同,导致特征间不具有可比性,容易导致结果失真.

为了解决现有面板数据灰色关联模型中几何特

征的可比性问题和对象排列顺序给关联序带来的影响,本文对面板数据的混合特征灰色关联模型研究进行拓展,通过对时间维度和对象维度几何特征的无量纲化处理及向量表征,构建基于面板数据的灰色向量模关联模型.首先,对面板数据进行向量表征,进而定义指标多维度上的绝对变化量和相对变化量两种几何特征向量,并基于特征向量对各几何特征进行相应的无量纲化处理,解决各几何特征的可比性问题.在时间维度综合考虑面板数据的横向发展绝对量和相对量向量的模得到时间维灰色向量模关联度,在对象维度综合考虑面板数据的纵向振荡绝对量和相对量向量的模得到对象维灰色向量模关联度,最终加权平均多维度的灰色关联度得到面板数据的灰色向量模关联度,并对模型的性质如规范性、接近性、数乘变换保序性等进行讨论,且证明该模型不受对象排列顺序的影响.最后,将所提出的关联模型应用于江苏省大气污染的分析研究中,并与其他灰色关联模型进行对比分析,以验证本文模型的实用性和有效性.

1 基于面板数据的灰色向量模关联模型的构建

面板数据包括截面数据和时间序列,是一个三维数据结构,通常包括时间、对象和指标3个维度.Zhang等^[11]在扩展灰色绝对关联模型中使用行为矩阵表示面板数据,简化了面板数据计算难度,现已得到广泛应用.设 $x_i(s,t)$ 表示指标 i 关于对象 s 在时间 t 上的数值.其中: $i = 1, 2, \dots, I$; $t = 1, 2, \dots, T$; $s = 1, 2, \dots, S$.

定义1 设 $X = \{X_1(s,t), X_2(s,t), \dots, X_I(s,t)\}$ 为面板数据指标行为矩阵序列,则称

$$X_i(s,t) = \begin{bmatrix} x_i(1,1) & x_i(1,2) & \dots & x_i(1,T) \\ x_i(2,1) & x_i(2,2) & \dots & x_i(2,T) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_i(S,1) & x_i(S,2) & \dots & x_i(S,T) \end{bmatrix} \quad (1)$$

为指标 i 面板数据的行为矩阵^[6].其中: $i = 1, 2, \dots, I$; $s = 1, 2, \dots, S$; $t = 1, 2, \dots, T$.

为了方便对时间维和对象维几何特征的计算和表征,本文引入行向量和列向量对面板数据进行表征.这里的行向量是一个由含有 T 个元素的行组成的 $1 \times T$ 的矩阵,而列向量是一个由含有 S 个元素的列组成的 $S \times 1$ 的矩阵.在这里首先定义面板数据的向量表征.

定义2 (面板数据的向量表征) 设第 i 个指标($1 \leq i \leq I$)的行为矩阵为 $X_i(s,t)$,设

$$\alpha_i(s) = [x_i(s,1), x_i(s,2), \dots, x_i(s,T)] \quad (2)$$

为指标 i 关于对象 s 的时间维行向量, 表征了指标 i 面板数据关于对象 s 的各时点值, 其中 $s = 1, 2, \dots, S$. 设

$$\beta_i(t) = [x_i(1, t), x_i(2, t), \dots, x_i(S, t)]^T \quad (3)$$

为指标 i 关于时间 t 的指标维列向量, 表征了指标 i 面板数据关于时间 t 的各对象值, 其中 $t = 1, 2, \dots, T$.

将指标 i 的行为矩阵 $X_i(s, t)$ 用行向量 $\alpha_i(s)$ 或列向量 $\beta_i(t)$ 表示, 即

$$X_i(s, t) = \begin{bmatrix} \alpha_i(1) \\ \alpha_i(2) \\ \vdots \\ \alpha_i(S) \end{bmatrix} = [\beta_i(1), \beta_i(2), \dots, \beta_i(T)], \quad (4)$$

可以得到面板数据行为矩阵的向量表征.

本文通过指标面板数据在两维度上的绝对变化量和相对变化量两种几何特征衡量指标间的关联程度. 然而, 两种量纲量级不同的几何特征显然不具有可比性, 为提高关联模型的有效性, 需要对多维度上的两种几何特征进行无量纲化处理.

定义 3 (特征无量纲化处理及向量表征) 设 $\alpha_i(s) (1 \leq i \leq I)$ 为指标 i 关于对象 s 的时间维行向量, 其中 $s = 1, 2, \dots, S$. 令

$$x'_i(s, t) = \frac{x_i(s, t+1) - x_i(s, t)}{t+1-t} = x_i(s, t+1) - x_i(s, t), \quad (5)$$

$$x''_i(s, t) = \frac{x'_i(s, t)}{x_i(s, t)} = \frac{x_i(s, t+1) - x_i(s, t)}{x_i(s, t)} \quad (6)$$

分别为指标 i 关于对象 s 在时间点 t 到时间点 $t+1$ 上发展的绝对变化量和相对变化量, 其中 $t = 1, 2, \dots, T-1$. 可以看出, 指标 i 在时间维的绝对变化量和相对变化量的量纲不同. 对其进行无量纲化处理, 定义

$$\bar{\alpha}'_i(s) = \frac{1}{T-1} \sum_{t=1}^{T-1} |x'_i(s, t)|, \quad (7)$$

$$\bar{\alpha}''_i(s) = \frac{1}{T-1} \sum_{t=1}^{T-1} |x''_i(s, t)| \quad (8)$$

分别为指标 i 关于对象 s 的时间序列上各时点绝对变化量和相对变化量绝对值的均值. 定义

$$\alpha'_i(s) = \left[\frac{x'_i(s, 1)}{\bar{\alpha}'_i(s)}, \frac{x'_i(s, 2)}{\bar{\alpha}'_i(s)}, \dots, \frac{x'_i(s, T-1)}{\bar{\alpha}'_i(s)} \right] \quad (9)$$

为指标 i 关于对象 s 的时间序列各时点上的无量纲绝对变化量组成的行向量, 其中 $s = 1, 2, \dots, S$.

$$\alpha''_i(s) = \left[\frac{x''_i(s, 1)}{\bar{\alpha}''_i(s)}, \frac{x''_i(s, 2)}{\bar{\alpha}''_i(s)}, \dots, \frac{x''_i(s, T-1)}{\bar{\alpha}''_i(s)} \right] \quad (10)$$

为指标 i 关于对象 s 的时间序列各时点上的无量纲

相对变化量组成的行向量. 通过这种处理, 将原本量纲不同的两种几何特征向量转换为无量纲向量. 同理, 设 $\beta_i(t)$ 为指标 i 关于时间 t 的对象维列向量, 其中 $t = 1, 2, \dots, T$. 令

$$\bar{x}_i(t) = \frac{x_i(1, t) + x_i(2, t) + \dots + x_i(S, t)}{S} \quad (11)$$

为指标 i 关于时间 t 的全部 S 个对象的均值. 令

$$\bar{x}'_i(s, t) = x_i(s, t) - \bar{x}_i(t), \quad (12)$$

$$\bar{x}''_i(s, t) = \frac{x'_i(s, t)}{x_i(s, t)} = \frac{x_i(s, t) - \bar{x}_i(t)}{x_i(s, t)} \quad (13)$$

分别为指标 i 关于时间 t 在对象维上相对于该时间点所有对象均值振荡的绝对变化量和相对变化量, 其中 $s = 1, 2, \dots, S$. 定义

$$\bar{\beta}'_i(t) = \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S |\bar{x}'_i(s, t)|, \quad (14)$$

$$\bar{\beta}''_i(t) = \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S |\bar{x}''_i(s, t)| \quad (15)$$

分别为指标 i 关于时间 t 在对象维的绝对变化量和相对变化量绝对值的均值. 定义

$$\beta'_i(t) = \left[\frac{\bar{x}'_i(1, t)}{\bar{\beta}'_i(t)}, \frac{\bar{x}'_i(2, t)}{\bar{\beta}'_i(t)}, \dots, \frac{\bar{x}'_i(S, t)}{\bar{\beta}'_i(t)} \right]^T \quad (16)$$

为指标 i 关于时间 t 的各对象的无量纲绝对变化量组成的列向量, 其中 $t = 1, 2, \dots, T$.

$$\beta''_i(t) = \left[\frac{\bar{x}''_i(1, t)}{\bar{\beta}''_i(t)}, \frac{\bar{x}''_i(2, t)}{\bar{\beta}''_i(t)}, \dots, \frac{\bar{x}''_i(S, t)}{\bar{\beta}''_i(t)} \right]^T \quad (17)$$

为指标 i 关于时间 t 的各对象的无量纲相对变化量组成的列向量, 其中 $t = 1, 2, \dots, T$.

定义 3 通过对几何特征进行无量纲化处理和向量表征, 得到了面板数据各维度绝对变化量和相对变化量的无量纲化向量, 解决了几何特征的可比性问题. 为了求解面板数据多维度上的关联程度, 本文基于所构建的特征向量, 将向量模的计算方法引入面板数据灰色关联系数的构造中, 通过计算特征差值向量的模对指标间的关联程度进行度量.

定义 4 (面板数据灰色向量模关联系数) 设指标 i 和指标 $j (1 \leq i \leq I, 1 \leq j \leq I, i \neq j)$ 的行为矩阵分别为 $X_i(s, t)$ 和 $X_j(s, t)$. 其中: $s = 1, 2, \dots, S; t = 1, 2, \dots, T$. 设指标 i 和指标 j 关于对象 s 的时间维无量纲绝对变化量组成的行向量分别为 $\alpha'_i(s)$ 和 $\alpha'_j(s)$, 指标 i 和指标 j 关于对象 s 的时间维无量纲相对变化量组成的行向量分别为 $\alpha''_i(s)$ 和 $\alpha''_j(s)$. 引入向量模的计算方法定义指标 i 和指标 j 关于对象 s 的时间维绝对量关联系数, 即

$$\gamma_{ij}(s) = \frac{1 + \|\alpha'_i(s)\| + \|\alpha'_j(s)\|}{1 + \|\alpha'_i(s)\| + \|\alpha'_j(s)\| + \|\alpha'_i(s) - \alpha'_j(s)\|}, \quad (18)$$

其中 $s = 1, 2, \dots, S$. 定义指标 i 和指标 j 关于对象 s

的时间维相对量关联系数为

$$\varepsilon_{ij}(s) = \frac{1 + \|\alpha_i''(s)\| + \|\alpha_j''(s)\|}{1 + \|\alpha_i''(s)\| + \|\alpha_j''(s)\| + \|\alpha_i''(s) - \alpha_j''(s)\|}, \quad (19)$$

其中 $s = 1, 2, \dots, S$. 设指标 i 和指标 j 关于时间 t 的对象维无量纲绝对变化量组成的列向量分别为 $\beta_i'(t)$ 和 $\beta_j'(t)$, 指标 i 和指标 j 关于时间 t 的对象维无量纲相对变化量组成的列向量分别为 $\beta_i''(t)$ 和 $\beta_j''(t)$. 定义指标 i 和指标 j 关于时间 t 的对象维绝对量关联系数为

$$\gamma_{ij}(t) = \frac{1 + \|\beta_i'(t)\| + \|\beta_j'(t)\|}{1 + \|\beta_i'(t)\| + \|\beta_j'(t)\| + \|\beta_i'(t) - \beta_j'(t)\|}, \quad (20)$$

其中 $t = 1, 2, \dots, T$. 定义指标 i 和指标 j 关于时间 t 的对象维相对量关联系数为

$$\varepsilon_{ij}(t) = \frac{1 + \|\beta_i''(t)\| + \|\beta_j''(t)\|}{1 + \|\beta_i''(t)\| + \|\beta_j''(t)\| + \|\beta_i''(t) - \beta_j''(t)\|}, \quad (21)$$

其中 $t = 1, 2, \dots, T$.

本文通过引入向量模的计算方法对多维度上绝对量和相对量的关联系数进行构建, 取绝对量和相对量关联系数的权重为 $1/2$. 定义指标 i 和指标 j 关于对象 s 的时间维向量模关联系数为

$$E_{ij}(s) = \frac{\gamma_{ij}(s) + \varepsilon_{ij}(s)}{2}, \quad (22)$$

其中 $s = 1, 2, \dots, S$. 该关联系数表示指标 i 和指标 j 在第 s 个对象的时间序列上的发展关联程度. 定义指标 i 和指标 j 关于时间 t 的对象维向量模关联系数为

$$E_{ij}(t) = \frac{\gamma_{ij}(t) + \varepsilon_{ij}(t)}{2}, \quad (23)$$

其中 $t = 1, 2, \dots, T$. 该关联系数表示指标 i 和指标 j 在第 t 个时间点上各对象的振荡关联程度. 通过这种方法, 本文从多维度视角对面板数据发展和振荡的绝对量与相对量差异进行度量.

定义5 (时间维和对象维灰色向量模关联度) 设指标 i 和指标 j 的行为矩阵分别为 $X_i(s, t)$ 和 $X_j(s, t)$. 其中: $s = 1, 2, \dots, S$; $t = 1, 2, \dots, T$. 设 $E_{ij}(s)$ 和 $E_{ij}(t)$ 分别为指标 i 和指标 j 的时间维灰色向量模关联系数和对象维灰色向量模关联系数. 定义指标 i 和指标 j 的时间维灰色向量模关联度为

$$E_{ij}^t = \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S E_{ij}(s). \quad (24)$$

定义指标 i 和指标 j 的对象维灰色向量模关联度为

$$E_{ij}^s = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T E_{ij}(t). \quad (25)$$

E_{ij}^t 和 E_{ij}^s 的值越大, 指标 i 和指标 j 在时间维和对象维的关联程度越大, 反之则关联度越小.

定义6 (面板数据灰色向量模关联度) 设 E_{ij}^t 和 E_{ij}^s 分别为指标 i 和指标 j 时间维和对象维的灰色向量模关联度, 称

$$E_{ij} = \omega_1 E_{ij}^t + \omega_2 E_{ij}^s \quad (26)$$

为指标 i 和指标 j 的面板数据灰色向量模关联度, 其中 ω_1 和 ω_2 分别为指标 i 和指标 j 时间维和对象维关联度的权重, $\omega_1, \omega_2 \in [0, 1]$ 且 $\omega_1 + \omega_2 = 1$. 在实际应用中, 研究人员可以按照其重视程度对 ω_1 和 ω_2 进行取值, 一般情况下取 $1/2$.

综上所述, 基于面板数据的灰色向量模关联模型的计算步骤如下.

step 1: 根据定义2定义指标 i ($1 \leq i \leq I$) 关于对象 s 的时间维行向量 $\alpha_i(s)$ ($s = 1, 2, \dots, S$) 和指标 i 关于时间 t 的对象维列向量 $\beta_i(t)$ ($t = 1, 2, \dots, T$), 将面板数据以 $\alpha_i(s)$ 行向量和 $\beta_i(t)$ 列向量的形式表征;

step 2: 根据定义3计算指标 i 在时间维无量纲处理后的绝对变化量组成的向量 $\alpha_i'(s)$ 和相对变化量组成的向量 $\alpha_i''(s)$ 、在对象维无量纲处理后的绝对变化量组成的向量 $\beta_i'(t)$ 和相对变化量组成的向量 $\beta_i''(t)$;

step 3: 根据定义4、向量模计算指标 i 和指标 j 关于对象 s 的时间维绝对量关联系数 $\gamma_{ij}(s)$ 和相对量关联系数 $\varepsilon_{ij}(s)$ 以及时间维灰色向量模关联系数 $E_{ij}(s)$, 关于时间 t 的对象维绝对量关联系数 $\gamma_{ij}(t)$ 和相对量关联系数 $\varepsilon_{ij}(t)$ 以及对象维灰色向量模关联系数 $E_{ij}(t)$;

step 4: 根据定义5分别计算指标 i 和指标 j 的时间维灰色向量模关联度 E_{ij}^t 和对象维灰色向量模关联度 E_{ij}^s ;

step 5: 根据定义6计算指标 i 和指标 j 的面板数据灰色向量模关联度 E_{ij} .

2 面板数据灰色向量模关联模型的性质及定理

设指标 i 和指标 j 的行为矩阵分别为 $X_i(s, t)$ 和 $X_j(s, t)$, 矩阵中的元素分别为 $x_i(s, t)$ 和 $x_j(s, t)$. 其中: $1 \leq i \leq I$; $1 \leq j \leq I$; $s = 1, 2, \dots, S$; $t = 1, 2, \dots, T$; 且它们的面板数据灰色向量模关联度为 E_{ij} . 则有如下定理.

定理1 基于面板数据的灰色向量模关联度 E_{ij} 具有如下性质:

- 1) 规范性: $0 < E_{ij} \leq 1$, 且 $E_{ij} = 1 \Leftrightarrow X_i(s, t) = X_j(s, t)$;
- 2) 接近性: $|x_i(s, t) - x_j(s, t)|$ 越小, E_{ij} 越大;

3) 对称性: $E_{ij} = E_{ji}$;

4) 数乘变换保序性: 若 $X_i^c(s, t) = c \cdot X_i(s, t)$, $c = \text{const}$, 则 $E_{(ci)j} = E_{ij}$.

证明 1) 根据定义 4 灰色向量模关联系数构建步骤及向量模的非负性可得时间维上的灰色向量模关联系数 $0 < \gamma_{ij}(s) \leq 1, 0 < \varepsilon_{ij}(s) \leq 1$, 则 $0 < E_{ij}(s) \leq 1$. 对象维上的灰色向量模关联系数 $0 < \gamma_{ij}(t) \leq 1, 0 < \varepsilon_{ij}(t) \leq 1$, 则 $0 < E_{ij}(t) \leq 1$. 可推知 $0 < E_{ij}^t \leq 1, 0 < E_{ij}^s \leq 1$. 由于 $E_{ij} = \omega_1 E_{ij}^t + \omega_2 E_{ij}^s$, 且 $\omega_1, \omega_2 \in [0, 1], \omega_1 + \omega_2 = 1$, 可知 $0 < E_{ij} \leq 1$. 当 $X_i = X_j$ 时, $\alpha_i(s) = \alpha_j(s), \beta_i(t) = \beta_j(t)$, 由灰色向量模关联系数的构建步骤可得 $E_{ij}^t = 1, E_{ij}^s = 1$.

可推知 $E_{ij} = \omega_1 E_{ij}^t + \omega_2 E_{ij}^s = \omega_1 + \omega_2 = 1$.

2) $|x_i(s, t) - x_j(s, t)|$ 越小, 则 $x_i(s, t) - x_j(s, t)$ 越趋近于 0, 根据定义 4 的灰色向量模关联系数构建步骤及向量模的非负性可知, $E_{ij}(s)$ 和 $E_{ij}(t)$ 越趋近于 1. 其中: $s = 1, 2, \dots, S; t = 1, 2, \dots, T$. 可推得指标 i 和指标 j 的面板数据越接近, 面板数据的灰色向量模关联度 E_{ij} 越大.

3) 根据面板数据的灰色向量模关联模型的推导过程可知, 在时间维上有

$$\|\alpha'_i(s) - \alpha'_j(s)\| = \|\alpha'_j(s) - \alpha'_i(s)\|,$$

$$\|\alpha''_i(s) - \alpha''_j(s)\| = \|\alpha''_j(s) - \alpha''_i(s)\|.$$

同理, 在对象维上有

$$\|\beta'_i(t) - \beta'_j(t)\| = \|\beta'_j(t) - \beta'_i(t)\|,$$

$$\|\beta''_i(t) - \beta''_j(t)\| = \|\beta''_j(t) - \beta''_i(t)\|.$$

性质 3 显然成立.

4) 令 $X_i^c(s, t) = c \cdot X_i(s, t), c = \text{const}$, 则

$$x_i^c(s, t) =$$

$$c \cdot x_i(s, t + 1) - c \cdot x_i(s, t) = c \cdot (x'_i(s, t)),$$

$$x_i^{c''}(s, t) =$$

$$\frac{c \cdot (x_i(s, t + 1) - x_i(s, t))}{c \cdot x_i(s, t)} = x''_i(s, t),$$

$$\bar{\alpha}_i^{c'}(s) = \frac{1}{T-1} \sum_{t=1}^{T-1} |x_i^c(s, t)| = c \cdot \bar{\alpha}'_i(s),$$

$$\bar{\alpha}_i^{c''}(s) = \frac{1}{T-1} \sum_{t=1}^{T-1} |x_i^c(s, t)| = \bar{\alpha}''_i(s).$$

可推得

$$\frac{x_i^c(s, t)}{\bar{\alpha}_i^{c'}(s)} = \frac{c \cdot (x'_i(s, t))}{c \cdot \bar{\alpha}'_i(s)} = \frac{x'_i(s, t)}{\bar{\alpha}'_i(s)},$$

$$\frac{x_i^{c''}(s, t)}{\bar{\alpha}_i^{c''}(s)} = \frac{x''_i(s, t)}{\bar{\alpha}''_i(s)}.$$

可证 $E_{(ci)j}^t = E_{ij}^t$, 同理易证 $E_{(ci)j}^s = E_{ij}^s$, 则 $E_{(ci)j} = E_{ij}$. \square

为解决绝对变化量和相对变化量可比性的问题, 对它们进行无量纲化处理. 推得关联模型还满足以下定理.

定理 2 面板数据的标准化处理不影响绝对变化量和相对变化无量纲化处理后的结果.

证明 以面板数据初值化算子、均值化算子、区间值化算子为例:

$$X_i^1(s, t) = X_i(s, t)d_1 = \frac{X_i(s, t)}{X_i(1, 1)},$$

则

$$x_i^{1'}(s, t) = x_i^1(s, t + 1) - x_i^1(s, t) = \frac{x'_i(s, t)}{x_i(1, 1)},$$

$$\frac{x_i^{1'}(s, t)}{\bar{\alpha}_i^{1'}(s)} = \frac{x'_i(s, t)/x_i(1, 1)}{\frac{1}{T-1} \sum_{t=1}^{T-1} |x'_i(s, t)|/x_i(1, 1)} = \frac{x'_i(s, t)}{\bar{\alpha}'_i(s)}.$$

故 $\alpha_i^{1'}(s) = \alpha'_i(s), s = 1, 2, \dots, S$. 同理可得 $\alpha_i^{1''}(s) = \alpha''_i(s), s = 1, 2, \dots, S; \beta_i^{1'}(t) = \beta'_i(t), t = 1, 2, \dots, T; \beta_i^{1''}(t) = \beta''_i(t), t = 1, 2, \dots, T$. 容易证得对面板数据进行均值化和区间值化处理同样不影响无量纲化处理后的结果. \square

定理 3 对于任意指标 i 和指标 j 的面板数据, 对象维度的排列顺序不影响 E_{ij} 的值.

证明 对于指标 i 和指标 j 在时间 t 上的对象维列向量 $\beta_i(t) = [x_i(1, t), x_i(2, t), \dots, x_i(m, t)]^T, \beta_j(t) = [x_j(1, t), x_j(2, t), \dots, x_j(m, t)]^T$. 令 $\beta_i^N(t) = [x_i^N(1, t), x_i^N(2, t), \dots, x_i^N(m, t)]^T, \beta_j^N(t) = [x_j^N(1, t), x_j^N(2, t), \dots, x_j^N(m, t)]^T$ 分别为 $\beta_i(t)$ 和 $\beta_j(t)$ 随机排列的向量, 通过定义 4 的计算步骤可得

$$\|\beta_i^N(t)\| = \|\beta_i(t)\| \|\beta_i^{N''}(t)\| = \|\beta_i''(t)\|,$$

$$\|\beta_j^N(t)\| = \|\beta_j(t)\| \|\beta_j^{N''}(t)\| = \|\beta_j''(t)\|,$$

其中 $t = 1, 2, \dots, T$. 易推得 $E_{ij}^N = E_{ij}$. \square

3 实例分析

近年来, 我国大气环境污染问题逐渐受到国家和人民的重视. 在国务院印发的《“健康中国 2030”规划纲要》中, 已明确将“全面实施城市空气质量达标管理, 促进全国城市环境空气质量明显改善”作为主要任务. 在此背景下, 有必要识别出大气污染的主要影响因素及大气污染物之间的耦合关联性.

2012 年, 我国出版了《环境空气质量标准》(GB3095-2012), 以保障人体健康和生态环境为目标, 对大气中的各种污染物允许含量进行限制规定, 经过 3 次修订后, 设置了包括细颗粒物 (PM_{2.5})、可吸入颗粒物 (PM₁₀)、二氧化硫 (SO₂)、二氧化氮 (NO₂)、一氧

化碳(CO)和臭氧(O₃)共6种常规污染物^[19],并设置了前4种污染物的年均浓度限值.考虑到数据的可获取性,选取全市环境空气质量未达到二级均值化的天数,简称为YSPD(yearly statistics polluted days),即年度污染天数统计(单位:天)作为特征指标,年度污染天数指一个城市一年内达到中度及以上污染的天数,表征该地区的大气污染程度,以细颗粒物(PM_{2.5})、可吸入颗粒物(PM₁₀)、二氧化硫(SO₂)、二氧化氮(NO₂)的年平均浓度(单位:μg/m³)作为行为指标.

本文以江苏省作为主要研究区域,江苏省位于中国经济持续快速发展的长三角区域,因其丰富的能源、钢铁、化工行业、交通运输网络,以及高速增长的城市人口,成为易发生大气污染的代表性省份之一.选择南京、连云港、常州、无锡、苏州5个城市作为研究对象,考虑到信息的时效性和可获取性,本文选取的数据来源于2018~2022年5个城市的环境公报,具体如表1所示,部分数据由计算得到.

表1 江苏5市2018~2022年空气污染指标

指标	城市	2018年	2019年	2020年	2021年	2022年
YSPD/(μg/m ³)	南京	114	110	62	65	74
	连云港	81	99	69	59	60
	常州	126	110	70	76	84
	无锡	107	102	67	65	77
	苏州	82	77	58	59	66
PM _{2.5} /(μg/m ³)	南京	43	40	31	29	28
	连云港	44	42	37	32	30
	常州	50	44	39	35	33
	无锡	43	39	33	29	28
	苏州	42	36	31	28	28
PM ₁₀ /(μg/m ³)	南京	75	69	56	56	51
	连云港	67	66	55	57	54
	常州	73	69	61	60	55
	无锡	75	69	56	54	49
	苏州	65	62	50	48	44
SO ₂ /(μg/m ³)	南京	10	10	7	6	5
	连云港	15	13	10	10	7
	常州	14	10	9	9	7
	无锡	12	8	7	7	8
	苏州	8	9	8	6	6
NO ₂ /(μg/m ³)	南京	44	42	36	33	27
	连云港	31	30	28	27	22
	常州	44	37	35	35	28
	无锡	43	40	35	34	26
	苏州	48	37	34	33	25

近些年来,大气污染导致的危害逐渐引起人们的重视,江苏省在2015年通过了《江苏省大气污染防治条例》,并在此之后,制定了大气污染物排放总量控制制度,对污染物排放企业及生产运营单位进行管控和升级,逐步削减了重点大气污染物排放的总量,使污染物年均浓度逐渐趋于达标.

由表1可以看出,随着污染防治条例的严格执行,苏南地区年均污染天数和几大污染物浓度在2018~2022年的数据大体上随时间呈下降趋势:2020~2022年,江苏地区几大城市普遍出现了年污染天数锐减的情况,受疫情解封影响,2022年污染物浓度虽然继续下降,但年均污染天数回升.由于严格的颗粒物排放管控政策,苏南地区的颗粒物年均浓度出现了较大幅度的下降,相比之下,其他污染物管控力度较为宽松,浓度下降较为平缓.

3.1 江苏省大气污染程度关联分析

为了分析江苏5市大气污染程度与主要污染物年均浓度之间的关系,本文使用所提出的灰色向量模关联模型,分别计算表征大气污染程度的年度污染天数(YSPD)和细颗粒物(PM_{2.5})、可吸入颗粒物(PM₁₀)、二氧化硫(SO₂)、二氧化氮(NO₂)在时间维度和对象维度的灰色向量模关联度以及面板数据灰色向量模关联度,且时间维和对象维的权重都为0.5,计算结果见表2.

由表2可以看出,大气污染程度与污染物在时间维的关联序为PM₁₀ > PM_{2.5} > SO₂ > NO₂,对象维关联序为PM₁₀ > PM_{2.5} > NO₂ > SO₂,综合的关联序为PM₁₀ > PM_{2.5} > NO₂ > SO₂.根据分析结果显示,江苏地区在2018~2022年期间大气污染严重程度主要受PM₁₀、PM_{2.5}污染物的影响.具体而言,PM₁₀和PM_{2.5}是苏南地区近几年空气污染的主要来源,PM₁₀颗粒物是大气中直径小于等于10 μm的颗粒物,来源于工业排放、交通排放和建筑工地扬尘等.由于其悬浮性较高且停留时间较长,导致大气中的PM₁₀颗粒物较多,进而对大气污染天数影响更大.PM_{2.5}颗粒物是直径小于等于2.5 μm的颗粒物,与PM₁₀类似,但其直径更小,更容易传播和进入人体呼吸系统,同样对大气污染天数影响较大.NO₂是主要由汽车尾气和工业排放产生的氮氧化物,在高温条件下与其他大气污染物反应形成臭氧和细颗粒物,因此,NO₂的存在直接或间接地导致大气污染天数增多.而SO₂则主要由燃煤和石油燃烧排放产生,对人体健康和环境具有危害,但近年来江苏省在硫化物排放监管控制方面相对严格,因此其与大气污染天数的关联性较低.

综上,本文得出大气污染物与大气污染程度的关联序PM₁₀ > PM_{2.5} > NO₂ > SO₂,符合江苏省地区大气污染的实际情况,模型具有全面性和实用性,所得关联序具有稳定性.

表 2 江苏 5 市大气污染程度关联分析

指标	时间维关联系数					时间维关联度	对象维关联系数					对象维关联度	综合关联度
	南京	连云港	常州	无锡	苏州		2018	2019	2020	2021	2022		
YSPD-PM _{2.5}	0.811 6	0.724 2	0.723 9	0.746 1	0.749 9	0.751 2	0.729 3	0.785 8	0.829 6	0.739 2	0.679 2	0.752 6	0.751 9
YSPD-PM ₁₀	0.769 8	0.734 0	0.752 5	0.745 9	0.761 0	0.752 6	0.830 1	0.879 7	0.781 2	0.743 0	0.658 6	0.778 5	0.765 6
YSPD-SO ₂	0.755 3	0.665 0	0.683 0	0.702 6	0.655 8	0.692 3	0.659 9	0.646 2	0.703 8	0.655 0	0.643 5	0.661 7	0.677 0
YSPD-NO ₂	0.682 6	0.656 6	0.661 1	0.647 0	0.644 2	0.658 3	0.683 8	0.649 9	0.590 5	0.737 7	0.865 7	0.705 5	0.681 9

3.2 江苏省大气污染物关联分析

由大气污染影响因素的关联分析结果可知, PM₁₀ 与年均污染浓度关联度最大, 考虑到大气污染物之间的耦合性, 污染物共同对年污染天数造成影

响。

在此将其作为特征指标, 其他污染物作为行为指标, 计算 PM₁₀ 与其他污染物的灰色向量模关联度, 计算结果如表 3 所示。

表 3 江苏 5 市大气污染物关联分析

指标	时间维关联系数					时间维关联度	对象维关联系数					对象维关联度	综合关联度
	南京	连云港	常州	无锡	苏州		2018	2019	2020	2021	2022		
PM ₁₀ -PM _{2.5}	0.871 2	0.717 9	0.811 6	0.839 8	0.778 9	0.803 9	0.664 1	0.743 6	0.742 7	0.797 0	0.765 1	0.742 5	0.773 2
PM ₁₀ -SO ₂	0.822 8	0.786 1	0.774 6	0.696 0	0.686 6	0.753 2	0.661 4	0.616 0	0.641 6	0.745 0	0.653 5	0.663 5	0.708 4
PM ₁₀ -NO ₂	0.810 6	0.715 9	0.780 6	0.802 7	0.728 6	0.767 7	0.654 4	0.677 1	0.645 3	0.614 6	0.628 9	0.644 1	0.705 9

由表 3 可以看出, 各污染物与 PM₁₀ 在时间维的关联序为 PM_{2.5} > NO₂ > SO₂, 在对象维的关联序为 PM_{2.5} > SO₂ > NO₂, 综合关联序为 PM_{2.5} > SO₂ > NO₂. 大气污染是一个复杂的系统, 受到多种因素的影响, 而大气污染物之间本身存在着一定的关联性. PM_{2.5} 与 PM₁₀ 同为颗粒物, 其年均浓度间的关联性较大; SO₂ 在大气中容易发生湿沉降或与其他气体发生反应形成细颗粒物, 与 PM₁₀ 关联度较高; 而 NO₂ 主要来源于汽车尾气和工业废料的排放, 与其他污染物不同, 主要以气体形式存在, 对 PM₁₀ 的形成影响较

小, 关联度相对较低. 由此可知, 本模型所得关联序结果符合江苏地区大气污染的实际情况, 模型具有一定的应用价值。

3.3 模型检验与对比

为检验模型的性能, 本文将原本数据表中对象排列顺序(南京 → 连云港 → 常州 → 无锡 → 苏州)调整为(无锡 → 常州 → 连云港 → 苏州 → 南京), 将本文的结果和其他相关的灰关联模型的结果进行对比, 包括灰色矩阵相似关联模型^[15]、灰色网格关联度模型^[13]、面板数据灰色 B 型关联模型^[20], 结果如表 4 所示。

表 4 面板数据灰色关联模型对比分析

指标	文献[15]		文献[13]		文献[20]		本文	
	原顺序	交换顺序	原顺序	交换顺序	原顺序	交换顺序	原顺序	交换顺序
YSPD-PM _{2.5}	0.669 9	0.669 9	0.363 2	0.451 5	0.720 6	0.720 6	0.751 9	0.751 9
YSPD-PM ₁₀	0.825 9	0.825 9	0.315 8	0.358 4	0.711 7	0.711 7	0.765 6	0.765 6
YSPD-SO ₂	0.481 1	0.481 1	0.088 7	0.174 9	0.630 4	0.630 4	0.677 0	0.677 0
YSPD-NO ₂	0.644 4	0.644 4	0.410 0	0.358 9	0.626 6	0.626 6	0.681 9	0.681 9
数乘变换保序性		否		否		否		是
鲁棒性		高		低		高		高
对象变换保序性		是		否		是		是

由表 4 可知: 文献[15]考虑发展水平差异和动态增长情况使其关联结果具备较高的鲁棒性, 但其未考虑面板数据对象维的信息. 文献[13]考虑了对象维的关联度, 将对象维也看作序列进行与时间维相同的计算, 它存在两方面的问题: 1) 对象序列本身无意义, 模型可解释性差; 2) 关联序受对象排列顺序变换的影响. 而文献[20]根据传统的一维灰色 B 型关联模型进行拓展, 在横向测度面板数据的总体位移差、一

阶和二阶斜率差, 在纵向测度面板数据的纵向变换速率, 考虑对象维的同时具有较高的鲁棒性, 同时也具有对象变换保序性, 但横向各几何特征差异的量纲量级存在差异, 不具有可比性. 相比之下, 本文提出的面板数据灰色向量模关联模型在多维度的视角上, 同时兼顾了绝对变化量和相对变化量两种几何特征, 并对特征进行了无量纲化处理, 使其具有可比性. 该模型关联序的鲁棒性较高, 具备数乘变换保序性和对象变

换保序性等优良性质,具有较好的应用价值.

4 结论

本文针对面板数据灰色关联模型的现存问题,对面板数据几何特征进行了向量表征和相应的无量纲化处理,并通过计算特征向量的模,在时间维度考虑面板数据的横向发展绝对量和相对量,在对象维度考虑面板数据的纵向振荡绝对量和相对量,构建了基于面板数据的灰色向量模关联模型,并对模型的性质进行了研究.该模型不仅克服了关联模型中几何特征的可比性问题,且关联序结果不受对象排列顺序变换的影响.最后,将该模型应用于江苏省大气污染分析研究中,并与其他关联模型进行了对比分析,验证了该模型的实用性和有效性.尽管基于面板数据的灰色向量模关联模型克服了许多模型的不足,但仍存在一些局限需要改进.如何对面板数据几何特征的差异进一步分析,构造更符合面板数据不同维度特点的混合特征灰色关联模型是未来进一步研究的问题.

参考文献(References)

- [1] 唐少虎,刘小明,朱伟,等.基于多学科设计优化的路网交通分布式协同控制[J].控制与决策,2019,34(9): 1867-1875.
(Tang S H, Liu X M, Zhu W, et al. Distributed cooperative control of road network traffic based on multidisciplinary design optimization[J]. Control and Decision, 2019, 34(9): 1867-1875.)
- [2] Yang K, Ding Y, Zhu N, et al. Multi-criteria integrated evaluation of distributed energy system for community energy planning based on improved grey incidence approach: A case study in Tianjin[J]. Applied Energy, 2018, 229: 352-363.
- [3] Feng Y, Dang Y G, Wang J J, et al. A novel grey projection incidence model for assessing the relationships between cardiovascular diseases and air pollutants[J]. ISA Transactions, 2023, 135: 398-409.
- [4] Wang L P, Zou D Y, Liu Y P, et al. Decision model applied in IoT for green buildings based on grey incidence analysis and ANN[J]. Wireless Communications and Mobile Computing, 2022, 2022: 3134201.
- [5] Deng J L. The grey control system[J]. Journal of Huazhong University of Technology, 1982, 10(3): 9-18.
- [6] Liu S F, Yang Y J, Wu L F. Grey system theory and its application[M]. The 7th edition. Beijing: Science Press, 2014: 75-83.
- [7] 刘思峰,谢乃明, FORREST Jeffery. 基于相似性和接近性视角的新型灰色关联分析模型[J]. 系统工程理论与实践, 2010, 30(5): 881-887.
(Liu S F, Xie N M, Jeffery F. On new models of grey incidence analysis based on visual angle of similarity and nearness[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2010, 30(5): 881-887.)
- [8] Dang Y G, Liu S F, Liu B, et al. Improvement on degree of grey slope incidence[J]. Engineering Science, 2004, 6(3): 41-44.
- [9] Wang J J, Hipel K W, Dang Y G. An improved grey dynamic trend incidence model with application to factors causing smog weather[J]. Expert Systems with Applications, 2017, 87: 240-251.
- [10] Wu L F, Wang Y N, Liu S F. Grey convex relation and its properties[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2012, 32(7): 1501-1505.
- [11] Zhang K, Liu S F. Extended clusters of grey incidences for panel data and its application[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2010, 30(7): 1253-1259.
- [12] 吴鸿华,刘思峰,方志耕.基于面板数据的灰色四面体网格关联分析模型及应用[J].控制与决策,2022,37(11): 3033-3041.
(Wu H H, Liu S F, Fang Z G. Grey tetrahedral grid incidence analysis model based on panel data and its application[J]. Control and Decision, 2022, 37(11): 3033-3041.)
- [13] Liu Z, Dang Y G, Qian W Y, et al. Grey grid incidence model based on panel data[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2014, 34(4): 991-996.
- [14] Wu H H, Qu Z F. The grey curvature incidence model based on panel data[J]. Control and Decision, 2020, 35(5): 1072-1076.
- [15] Cui L Z, Liu S F. Grey matrix similar incidence model for panel data and its application[J]. Chinese Journal of Management Science, 2015, 23(11): 171-176.
- [16] Qian W Y, Wang Y H, Dang Y G, et al. Grey matrix relational modeling and its application based on multivariate panel data[J]. Systems Engineering, 2013, 31(10): 70-74.
- [17] Dang Y G, Shang Z J, Wang J J, et al. Grey incidence model for relationship between indicators of panel data and its application[J]. Control and Decision, 2019, 34(5): 1077-1084.
- [18] Zhai Y L, Luo G G. Grey point set association analysis model based on panel data[J]. Control and Decision, DOI: 10.13195/j.kzyjc.2022.2044.
- [19] Kan H D. Ambient air quality averaging(GB3095-2012) Fine particulate matter(PM_{2.5}) mean value interpretation[J]. Chinese Journal of Preventive Medicine, 2012, 46(5): 3.
- [20] 罗党,张曼曼.基于面板数据的灰色B型关联模型及其应用[J].控制与决策,2020,35(6): 1476-1482.
(Luo D, Zhang M M. Grey incidence model of B-mode based on panel data and its application[J]. Control and Decision, 2020, 35(6): 1476-1482.)

作者简介

党耀国(1964—),男,教授,博士生导师,从事灰色系统理论、数量经济等研究, E-mail: iamdangyg@163.com;

王一博(1999—),男,硕士生,从事灰色系统理论的研究, E-mail: 1185013203@qq.com;

王俊杰(1988—),男,副教授,博士生导师,从事灰色系统理论、数量经济等研究, E-mail: wangjj@nuaa.edu.cn;

杨绍闻(1994—),男,博士生,从事灰色系统理论的研究, E-mail: ysw00886@nuaa.edu.cn.