

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201803047



# 灰色关联理论在城市污水处理 影响因素分析中的应用

张文杰, 袁红平

(西南交通大学 经济管理学院, 四川 成都 610031)

**摘要:** 以灰色关联理论为基础,借助四川省 18 个地级市的统计数据,定量分析污水处理率与用水普及率、污水排放量、排水管道长度、城区面积、人均地区生产总值等指标的灰色关联度,深入研究影响城市污水处理的主要因素.研究表明:城市污水处理率与城市市区用水普及率的关联程度最为密切,与排水管道长度的关联程度最小.

**关键词:** 城市污水处理;灰色关联理论;灰色关联度;四川省

**中图分类号:** X 703.1; F 291.1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-5013(2018)05-0726-06

## Application of Grey Correlation Theory in Analyzing Factors Influencing Urban Sewage Treatment

ZHANG Wenjie, YUAN Hongping

(School of Economics and Management, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** Based on the grey correlation theory, and the data of 18 main cities in Sichuan Province, this paper quantitative analyzes the grey correlation degrees between sewage treatment ratio and water-using population ratio, sewage discharge volume, drainage pipe length, urban area, per capita gross domestic product, and also explores the main factors influencing the urban sewage treatment ratio. The study finds that the urban sewage treatment ratio has the maximum correlation to the water-using population ratio, and has the minimum correlation to the drainage pipe length.

**Keywords:** grey correlation theory; grey correlation degree; urban sewage treatment; Sichuan Province

城市污水主要包括生活污水、工业废水、降水三大类<sup>[1]</sup>.城市污水处理已成为影响城市设施规划的重要考虑因素.目前,相关研究主要涉及污水管理绩效评估<sup>[2]</sup>、收费制度<sup>[3]</sup>、处理工艺<sup>[4-5]</sup>、处理技术<sup>[6-7]</sup>等方面.近年来,为更好地应对城市污水处理,区域城市污水处理的影响因素成为学界关注的重要问题.赵泽斌等<sup>[8]</sup>采用相关分析研究影响东北地区城市污水处理效率的因素.黄亚宗等<sup>[9]</sup>采用数据包络分析法探讨污水处理设施与污水年处理量、污水处理人员数量、年耗电量等之间的关系. Abbott 等<sup>[10]</sup>探讨了澳大利亚不同城市污水处理效率与污水处理规模的相互影响关系.褚俊英等<sup>[11]</sup>利用因子分析法探讨城市不同污水处理效率与污水处理厂建设资金、运行费用、建设周期等因素的关系.在城市污水处理影

**收稿日期:** 2018-03-30

**通信作者:** 张文杰(1985-),男,博士研究生,主要从事合同能源管理、决策优化分析的研究. E-mail: zwenjie2016@126.com.

**基金项目:** 国家自然科学基金面上资助项目(71573216);四川省科技计划项目(2017ZR0150);四川省系统科学与企业发展研究中心重点项目(XQ17B04);四川省社会科学研究规划重大项目(SC17ZD09)

响因素相关性分析中,普遍采用层次分析法(AHP)、回归分析法、因子分析法、方差分析法、主成分分析法等. 这些方法虽然都可以进行因变量与自变量关系分析,但其局限性也很明显<sup>[12]</sup>. 灰色关联分析是一种多因素统计分析方法,它以各因素样本数据为依据,通过灰色关联度反映样本两因素间的关联情况<sup>[12]</sup>. 与其他相关性分析方法(如因子分析、主成分分析、方差分析等)相比,灰色关联分析方法往往对数据要求低,计算量小,对样本数量和特征无明确限制和要求,分析效果也更好<sup>[12-13]</sup>. 目前,灰色关联分析已被广泛应用于多个领域. 宋喜民等<sup>[14]</sup>利用灰色关联分析研究基础设施投资构成要素间的关联性. 李亚滨等<sup>[15]</sup>以黑龙江省 1984—2013 年暴雨灾害资料数据为基础,采用此方法研究了暴雨灾害和气象因子之间的相关性. 彭晓博等<sup>[16]</sup>将该方法用于农民健康保险需求影响因素分析,通过构建灰色关联模型,探讨影响农民健康保险需求的主要影响因素及其之间的关联性. 此外,灰色关联分析还被成功用于分析旅游业<sup>[17]</sup>、食品产业<sup>[18]</sup>、农地评价<sup>[19]</sup>、区域产业和经济发展<sup>[20-21]</sup>及 PM<sub>2.5</sub> 浓度影响因素<sup>[22]</sup>的因素相关性中. 文中所关注的城市污水处理问题的核心正是在少量数据的前提下,探讨城市污水处理率与各主要影响因素间的关联性. 基于此,本文选取灰色关联理论分析城市污水处理各影响因素相关性,并结合四川省 2015 年 18 个地级市城市污水处理相关统计数据,对其污水处理影响因素间的相关性进行实证研究.

## 1 灰色关联分析

### 1.1 灰色关联公理

灰色关联分析的基本思路是通过线性插值的方法,将系统因素的离散行为观测值转化为分段连续折线,根据折线的几何特征构造测度关联模型,通过比较关联模型中的灰色关联度,对因变量与自变量的联系程度大小进行判断<sup>[12,23]</sup>.

根据文献[12,23],列出灰色关联公理,具体如下.

假设  $X_0 = (x_0^{(1)}, x_0^{(2)}, \dots, x_0^{(n)})$  表示为系统特征行为序列,且  $X_1 = (x_1^{(1)}, x_1^{(2)}, \dots, x_1^{(n)}), \dots, X_i = (x_i^{(1)}, x_i^{(2)}, \dots, x_i^{(n)}), \dots, X_m = (x_m^{(1)}, x_m^{(2)}, \dots, x_m^{(n)})$  表示为相关因素序列,给定实数  $\gamma(x_0^{(k)}, x_i^{(k)})$ ,若实数  $\gamma(X_0, X_i) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \gamma(x_0^{(k)}, x_i^{(k)})$  满足: 1) 条件 1,  $0 < \gamma(X_0, X_i) \leq 1, \gamma(X_0, X_i) \Leftarrow X_0 = X_i$ ; 2) 条件 2,  $|x_0^{(k)} - x_i^{(k)}|$  越小,  $\gamma(x_0^{(k)}, x_i^{(k)})$  越大,则称  $\gamma(X_0, X_i)$  为  $X_i$  与  $X_0$  的灰色关联度,  $\gamma(x_0^{(k)}, x_i^{(k)})$  为  $X_i$  与  $X_0$  在  $k$  点的关联系数,并称条件 1、条件 2 为灰色关联公理(或邓氏灰色关联度公理). 其中,  $\gamma(x_0^{(k)}, x_i^{(k)}) = \frac{\min_i \min_k |x_0^{(k)} - x_i^{(k)}| + \epsilon \max_i \max_k |x_0^{(k)} - x_i^{(k)}|}{|x_0^{(k)} - x_i^{(k)}| + \epsilon \max_i \max_k |x_0^{(k)} - x_i^{(k)}|}, \epsilon \in (0, 1)$ , 称为分辨系数<sup>[12,23]</sup>.

### 1.2 灰色关联度的计算步骤

根据文献[12-13,23],灰色关联度有如下 5 个计算步骤.

**步骤 1** 求各序列的初值像(或均值像),即  $X'_i = \frac{X_i}{x_i^{(1)}} = (X'^{(1)}_i, X'^{(2)}_i, \dots, X'^{(n)}_i), i = 0, 1, 2, \dots, m$ .

**步骤 2** 求  $X_0$  与  $X_i$  初值像(或均值像)对应分量之差的绝对值序列,即  $\Delta_i^{(k)} = |X'^{(k)}_0 - X'^{(k)}_i|, \Delta_i = (\Delta_i^{(1)}, \Delta_i^{(2)}, \dots, \Delta_i^{(n)}), i = 1, 2, \dots, m$ .

**步骤 3** 求  $\Delta_i^{(k)} = |X'^{(k)}_0 - X'^{(k)}_i|, k = 1, 2, \dots, n; i = 1, 2, \dots, m$ , 及其最大值与最小值,分别记  $M = \max_i \max_k \Delta_i^{(k)}, m = \min_i \min_k \Delta_i^{(k)}$ .

**步骤 4** 计算关联系数.  $\gamma(x_0^{(k)}, x_i^{(k)})$  为  $X_i$  与  $X_0$  在  $k$  点的关联系数,记作  $\gamma_{0,i}(k)$ ,有  $\gamma_{0,i}(k) = \frac{m + \epsilon M}{\Delta_i^{(k)} + \epsilon M}, \epsilon \in (0, 1), k = 1, 2, \dots, n; i = 1, 2, \dots, m$ .

该关联系数公式中,早期灰色理论研究学者通常取  $\epsilon = 0.5$ . 随着灰色系统理论的深入发展,越来越多学者在灰色理论的实际应用中发现  $\epsilon = 0.5$  的不足. 例如,对于分辨系数  $\epsilon = 0.5$  的不合理性<sup>[24-25]</sup>,申卯兴等<sup>[24]</sup>经过数学推导和论证,得出分辨系数  $\epsilon = 0.05$  时更符合实际,并能提高灰色关联分析的分辨率,且得到了众多学者的支持. 基于此,取分辨系数  $\epsilon = 0.05$ .

步骤 5 计算灰色关联度,有  $\gamma(X_0,X_i)=\frac{1}{n}\sum_{k=1}^n\gamma_{0,i}(k),i=1,2,\cdots,m.$

2 实证分析

2.1 指标选取及数据收集

选取四川省 18 个地级市污水处理相关统计数据作为算例,所用数据均来自《四川统计年鉴(2015)》已经发布的面板数据.研究范畴限定为城市市区(不含各地级市所辖县、州等).在灰色关联理论中,选取能够反映系统行为特征的数据是开展灰关联分析的基础<sup>[11]</sup>.  
为了更准确地反映一个城市市区污水处理情况的关键特征指标,在关于城市污水处理影响指标相关研究的基础上<sup>[1-2,8-9,11]</sup>,征询了城市污水处理方面的专家意见后,选取污水排放量、用水普及率(用水普及率=城市用水的非农业人口数/城市非农业人口总数×100%)、排水管道长度、城区面积、人均地区生产总值 5 个指标作为自变量.变量指标如表 1 所示.

表 1 变量指标  
Tab.1 Variable indexes

变量指标	变量代码	单位	主要反映内容	变量类型
污水处理率	$X_0$	%	污水处理程度	因变量
用水普及率	$X_1$	%	用水情况	自变量
污水排放量	$X_2$	万 m <sup>3</sup>	污水排放情况	自变量
排水管道长度	$X_3$	km	污水处理设施完善情况	自变量
城区面积	$X_4$	km <sup>2</sup>	城区面积大小	自变量
人均地区生产总值	$X_5$	元	城区发达程度	自变量

根据以上 6 项变量指标,对《四川统计年鉴(2015)》已经发布的 2014 年四川省 18 个地级市面板数据进行汇总、整理,其结果如表 2 所示.

表 2 2014 年四川省 18 个地级市市区污水处理相关数据  
Tab.2 Data of sewage treatment in 18 cities of Sichuan Province in 2014

城市	$X_0/\%$	$X_1/\%$	$X_2/\text{万 m}^3$	$X_3/\text{km}$	$X_4/\text{km}^2$	$X_5/\text{元}$
成都市	94.64	98.44	70 601	7 013.52	808.72	70 019
自贡市	90.56	70.03	7 080	125.48	778.32	39 145
攀枝花市	81.77	95.06	10 853	639.86	326.66	70 646
泸州市	85.03	90.85	5 638	931.15	411.38	29 655
德阳市	91.00	98.19	5 009	477.85	74.01	43 091
绵阳市	92.37	99.07	8 150	1 893.54	465.00	33 558
广元市	86.43	93.29	2 882	584.41	216.70	22 117
遂宁市	96.11	82.66	4 192	790.52	302.78	24 691
内江市	88.78	93.17	2 825	321.58	278.93	31 024
乐山市	79.73	96.38	3 395	604.40	166.73	37 125
南充市	85.58	97.22	6 110	1 311.00	420.00	22 639
眉山市	85.62	82.60	3 130	581.33	71.58	31 664
宜宾市	36.31	77.00	5 412	571.87	111.71	32 318
广安市	91.74	98.98	1 720	267.00	141.81	28 489
达州市	47.24	71.88	5 398	88.20	159.00	24 411
雅安市	67.45	99.09	1 748	286.60	196.89	30 052
巴中市	80.26	93.07	1 950	258.00	160.29	13 756
资阳市	86.73	98.74	1 778	305.50	186.87	33 592

2.2 各指标去量纲化处理

各指标单位不同,无法进行直接比对或关联分析.因此,为了便于对各指标建立关系,需要对表 2 中的指标进行去量纲化处理.主要通过求各指标与指标均值的比实现各指标的去量纲化.具体有如下 2 个实现过程.

1) 计算序列(指标)  $X_0 \sim X_5$  的算数平均值, 可得到  $\bar{X}_0 = 81.52, \bar{X}_1 = 90.87, \bar{X}_2 = 8\,215.06, \bar{X}_3 = 947.32, \bar{X}_4 = 293.19, \bar{X}_5 = 34\,332.89$ .

2) 由  $X_i^{(k)} = \frac{X_i^{(k)}}{\bar{X}_i}, i=0,1,\cdots,5; k=1,2,\cdots,18$ , 计算表 2 各指标均值像, 计算结果如表 3 所示.

表 3 2014 年四川省 18 个地级市市区污水处理相关数据的均值像  
Tab. 3 Mean fingers of sewage treatment in 18 cities of Sichuan Province in 2014

城市	$X'_0$	$X'_1$	$X'_2$	$X'_3$	$X'_4$	$X'_5$	城市	$X'_0$	$X'_1$	$X'_2$	$X'_3$	$X'_4$	$X'_5$
成都市	1.16	1.08	8.59	7.40	2.76	2.04	自贡市	1.11	0.77	0.86	0.13	2.65	1.14
攀枝花市	1.00	1.05	1.32	0.68	1.11	2.06	泸州市	1.04	1.00	0.69	0.98	1.40	0.86
德阳市	1.12	1.08	0.61	0.50	0.25	1.26	绵阳市	1.13	1.09	0.99	2.00	1.59	0.98
广元市	1.06	1.03	0.35	0.62	0.74	0.64	遂宁市	1.18	0.91	0.51	0.83	1.03	0.72
内江市	1.09	1.03	0.34	0.34	0.95	0.90	乐山市	0.98	1.06	0.41	0.64	0.57	1.08
南充市	1.05	1.07	0.74	1.38	1.43	0.66	眉山市	1.05	0.91	0.38	0.61	0.24	0.92
宜宾市	0.45	0.85	0.66	0.60	0.38	0.94	广安市	1.13	1.09	0.21	0.28	0.48	0.83
达州市	0.58	0.79	0.66	0.09	0.54	0.71	雅安市	0.83	1.09	0.21	0.30	0.67	0.88
巴中市	0.98	1.02	0.24	0.27	0.55	0.40	资阳市	1.06	1.09	0.22	0.32	0.64	0.98

2.3 各指标均值像分析

由各指标均值像可知: 所选 5 个自变量指标与因变量指标变化趋势大体接近, 这表明所选的指标能较好地反映四川省各城市市区的污水处理情况. 但成都市的各指标明显有别于四川省其他 17 个地级市各指标, 属于异常值. 这主要与成都市的城市规模、国家投入、西南区域中心位置、国家地区中心定位等有关. 因此, 成都市市区污水处理相关情况需要单独进行考虑. 为了提高对比区分度, 删除出现异常值的成都市数据, 得到四川省 17 个地级市市区污水处理相关数据的折线图, 如图 1 所示.

由图 1 可知: 2014 年四川省 17 个地级市市区的污水处理率与用水普及率、污水排放量、排水管道长度、城区面积、人均地区生产总值等变量指标间存在密切联系.

通过灰色关联分析模型, 计算污水处理率与其他 5 个自变量之间的灰色关联度, 通过比较灰色关联度大小, 确定所选取的 5 个自变量因素与因变量的关联度大小.

2.4 灰色关联度计算

由各指标均值像(成都市除外), 求解  $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5$  与  $X_0$  均值像对应分量之差的绝对值序列  $\Delta_i^{(k)}, i=1,2,\cdots,5$ . 由  $\Delta_i^{(k)} = |X_0^{(k)} - X_i^{(k)}|, \Delta_i = (\Delta_i^{(1)}, \Delta_i^{(2)}, \cdots, \Delta_i^{(n)}), i=1,2,\cdots,m$  可得

$$\Delta_1 = (0.34, 0.05, 0.04, 0.04, 0.04, 0.03, 0.27, 0.06, 0.08, 0.02, 0.14, 0.40, 0.04, 0.21, 0.26, 0.04, 0.03),$$

$$\Delta_2 = (0.25, 0.32, 0.35, 0.51, 0.14, 0.71, 0.67, 0.75, 0.57, 0.31, 0.67, 0.21, 0.92, 0.08, 0.62, 0.74, 0.84),$$

$$\Delta_3 = (0.98, 0.32, 0.06, 0.62, 0.87, 0.44, 0.35, 0.75, 0.34, 0.33, 0.44, 0.15, 0.85, 0.49, 0.53, 0.71, 0.74),$$

$$\Delta_4 = (1.54, 0.11, 0.36, 0.87, 0.46, 0.32, 0.15, 0.14, 0.41, 0.38, 0.81, 0.07, 0.65, 0.04, 0.16, 0.43, 0.42),$$

$$\Delta_5 = (0.03, 1.06, 0.18, 0.14, 0.15, 0.42, 0.46, 0.19, 0.10, 0.39, 0.13, 0.49, 0.30, 0.13, 0.05, 0.58, 0.08).$$

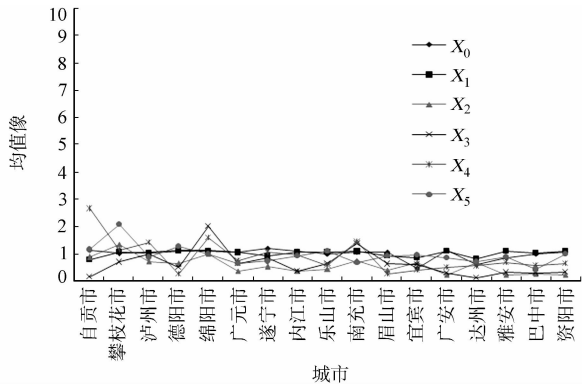


图 1 2014 年四川省 17 个地级市市区污水处理相关数据折线图

Fig. 1 Line chart of sewage treatment in 17 cities of Sichuan Province in 2014

找出  $\Delta_i^{(k)} = |X_0^{(k)} - X_i^{(k)}|, k=1, 2, \dots, 17; i=1, 2, \dots, 5$ , 以及其最大值与最小值, 分别记  $M = \max_i \Delta_i^{(k)}, m = \min_i \min_k \Delta_i^{(k)}$ .

由此可知:  $M = \max_i \max_k \Delta_i^{(k)} = 1.54, m = \min_i \min_k \Delta_i^{(k)} = 0.02$ .

由  $\gamma_{0,i}(k) = \frac{m + \epsilon M}{\Delta_i^{(k)} + \epsilon M}, \epsilon \in (0, 1), k=1, 2, \dots, n; i=1, 2, \dots, m$ , 分别求出相应的关联系数 (选取  $\epsilon = 0.05$ ). 因篇幅关系, 各关联系数的计算结果简略.

通过对各关联系数的加总平均, 可计算灰色关联度, 即

$$\begin{aligned}\gamma(X_0, X_1) &= \frac{1}{17} \sum_{k=1}^{17} \gamma_{0,1}(k) = 0.6374, \\ \gamma(X_0, X_2) &= \frac{1}{17} \sum_{k=1}^{17} \gamma_{0,1}(k) = 0.2175, \\ \gamma(X_0, X_3) &= \frac{1}{17} \sum_{k=1}^{17} \gamma_{0,1}(k) = 0.2107, \\ \gamma(X_0, X_4) &= \frac{1}{17} \sum_{k=1}^{17} \gamma_{0,1}(k) = 0.3024, \\ \gamma(X_0, X_5) &= \frac{1}{17} \sum_{k=1}^{17} \gamma_{0,1}(k) = 0.3902,\end{aligned}$$

则有  $\gamma(X_0, X_1) > \gamma(X_0, X_5) > \gamma(X_0, X_4) > \gamma(X_0, X_2) > \gamma(X_0, X_3)$ .

由以上灰色关联度计算结果可知: 2014 年四川省 17 个地级市市区的污水处理率与所在市区的水普及率关联度最大; 与所在市区人均地区生产总值关联度次之; 与所在市区城区面积关联度再次之; 与所在市区污水排放量关联度又次之; 与所在市区排水管道长度关联度最小.

因此, 在对四川省除成都市外的 17 个地级市污水处理影响因素进行决策分析时, 应重点关注该城区居民用水普及率指标, 其次是该地区人均地区生产总值指标, 之后依次是城区面积指标、污水排放量指标及排水管道长度指标.

### 3 结 论

- 1) 四川省 17 个城市市区的污水处理率与所在城市污水排放量、排水管道长度、城区面积、人均地区生产总值等存在密切关联.
- 2) 灰色关联分析方法可以有效应对城市污水处理问题中数据少、数据不全的现实问题, 是分析城市污水处理影响因素及其关联性的一种有用工具.
- 3) 实证研究结果表明: 2014 年四川省 17 个城市市区污水处理率与所在市区水普及率关联度最大; 与所在市区人均地区生产总值关联度次之; 与所在市区城区面积关联度再次之; 与所在市区污水排放量关联度又次之; 与所在市区排水管道长度关联度最小.

### 参考文献:

[1] 王京光. 潍坊市城市雨水和生活污水分类处理与中水回用实施研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2009.

[2] 宋国君, 韩冬梅. 中国城市生活污水处理绩效评估研究[J]. 中国软科学, 2012(8): 75-83. DOI:1002-9753(2012)08-0075-09.

[3] 邓敏贞. 公私合作背景下污水处理收费制度走向何处[J]. 环境保护, 2012(18): 45-47. DOI:10.14026/j.cnki.0253-9705.2012.18.006

[4] LIU Yongjun, LIU Zhe, WANG Fukun, *et al.* Regulation of aerobic granular sludge reformulation after granular sludge broken: Effect of poly aluminum chloride (PAC)[J]. Bioresour Technol, 2014, 158: 201-208. DOI:10.1016/j.biortech.2014.02.002.

[5] PRONK M, DE KREUK M K, DE B B, *et al.* Full scale performance of the aerobic granular sludge process for sewage treatment[J]. Water Reserch, 2015, 84(1): 207-217. DOI:10.1016/j.watres.2015.07.011.

[6] LONG Bei,YANG Changzhu,PU Wenhong,*et al.* Tolerance to oergetic loading rate by aerobic granular sludge in a cyclic aerobic granular reactor[J]. Bioresour Technol,2015,182:314-322. DOI:10. 1016/j. biortech. 2015. 02. 029.

[7] KONG Qiang,WANG Zhibin,LI Shu,*et al.* Characterization of the extracellular polymeric substances and microbial community of aoerbic granulation sludge exposed to cephalixin[J]. International Biodeterioration and Biodegradation,2015,102:375-382. DOI:10. 1016/j. ibiod. 2015. 04. 020.

[8] 赵泽斌,安实,马放. 我国东北地区城市污水处理效率研究[J]. 哈尔滨工业大学学报,2010,42(4):588-591. DOI: 0367-6234(2010)04-0588-04.

[9] 买亚宗,卢佳馨,马中,等. 城镇污水处理设施运行效率及其规模效应研究[J]. 中央财经大学学报,2016(4):122-128. DOI:1000-1549(2016)04-0122-07.

[10] ABBOTT M,COHEN B,WANG Weichun. The performance of the urban water and wastewater sectors in australia [J]. Utilities Policy,2012,20(1):52-63. DOI:10. 1016/j. jup. 2011. 11. 003.

[11] 褚俊英,陈吉宁,邹骥,等. 中国城市污水处理厂资源配置效率的比较[J]. 中国环境科学,2004,24(2):242-246. DOI:1000-6923(2004)02-0242-05.

[12] 刘思峰,杨英杰,吴利丰. 灰色系统理论及其应用[M]. 7 版. 北京:科学出版社,2014.

[13] 邓聚龙. 灰理论基础[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2002.

[14] 宋喜民,王丽华,马卫华,等. 基于灰色关联的基础设施投资构成分析[J]. 统计与决策,2005(9):67-69. DOI:10. 13546/j. cnki. tjyc. 2005. 18. 025.

[15] 李亚滨,胡瑞卿. 基于灰色关联度的黑龙江省暴雨事件灾害评估和预评估模型研究[J]. 灾害学,2016,31(2):78-83. DOI:10. 3969/j. issn. 1000-811X. 2016. 02. 016.

[16] 彭晓博,孙祁祥. 中国农民健康保险需求影响因素的灰色关联分析[J]. 保险研究,2012,10(3):39-46. DOI:10. 13497/j. cnki. is. 2012. 10. 003.

[17] 郑仕华. 基于灰色关联理论的旅游业额影响因子分析:以浙江省为例[J]. 城市问题,2012(4):63-66. DOI:10. 13239/j. bjsshkxy. cswt. 2012. 04. 014.

[18] 李佳俐,程涛. 基于区间灰色关联度的食品产业集群发展评价方法[J]. 统计与决策,2016(4):84-87. DOI:10. 13546/j. cnki. tjyc. 2016. 04. 023.

[19] 汪权方,晏群,徐慧,等. 基于灰色关联度的 AHP 权重矩阵构建方法改进及在农地评价中的应用[J]. 地理科学进展,2016,35(10):1249-1257. DOI:10. 18306/dlkxjz. 2016. 10. 008.

[20] 王英. 基于灰色关联理论的 FDI 和中国区域经济发展差距研究[J]. 系统工程理论与实践,2010,30(3):426-430. DOI:1000-6788(2010)03-0426-05.

[21] 陈晨,修春亮. 基于灰色关联理论的哈大巨型城市走廊产业结构趋同性[J]. 城市发展研究,2014,21(7):23-31. DOI:1006-3862(2014)07-0023-09.

[22] 贺祥,林振山,刘会玉,等. 基于灰色关联模型对江苏省 PM<sub>2.5</sub> 浓度影响因素的分析[J]. 地理学报,2016,71(7): 1119-1129. DOI:10. 11821/dlxb201607003.

[23] 刘思峰,党耀国,方志耕. 灰色系统理论及其应用[M]. 5 版. 北京:科学出版社,2010.

[24] 申卯兴,薛西锋,张小水. 灰色关联分析中分辨系数的选取[J]. 空军工程大学学报(自然科学版),2003,4(1):68-70. DOI:1009-3516(2003)01-0068-03.

[25] 刘震宇. 灰色系统分析中存在的两个基本问题[J]. 系统工程理论与实践,2000,20(9):123-124. DOI:1000-6788 (2000)09-0123-02.

(责任编辑:钱筠

英文审校:刘源岗)