

DOI: 10.5846/stxb201801290230

孙涛, 孙然好, 陈利顶. 京津冀特大城市群地区影响城镇化的关键要素识别及交互作用研究. 生态学报, 2018, 38(12): - .

Sun T, Sun R H, Chen L D. Identification of key factors and mutual effects of urbanization and Eco-environment in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(12): - .

京津冀特大城市群地区影响城镇化的关键要素识别及交互作用研究

孙 涛¹, 孙然好¹, 陈利顶^{1,2,*}

1 中国科学院生态环境研究中心 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

2 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 中国的城镇化率随经济快速发展而迅速提高, 由此导致的生态环境问题不断涌现, 城镇化对区域生态环境的胁迫作用日益增加, 城市可持续发展受到严峻挑战。目前城镇化和生态环境交互关系的关键影响因子仍不明确, 而基于关键影响因子描述城镇化与生态环境要素交互胁迫作用的研究也较少。以京津冀特大城市群为研究区, 使用城镇化率描述城镇化发展过程, 使用相关分析初步总结了生态环境要素与城镇化过程的相关性, 基于灰色关联分析方法求取了生态环境要素与不同城市城镇化率的关联度, 使用方差分析法得到影响城镇化与生态环境交互胁迫的关键要素, 最后明确了城市和生态环境要素交互胁迫作用的显著性。结果表明, 水资源要素和生态要素与城镇化率相关性较弱; 居民用电与城镇化过程的关联度最大、生活用水关联度最小; 方差稳定性排名显示建成区面积关联度在各城市间最稳定, 常住人口最不稳定; 同类别要素间关联度差异不明显, 可以将 10 要素合并为 6 要素; 关联度的稳定性对识别关键要素有重要作用; 城市和生态环境要素同时对要素关联度分布具有影响, 二者存在显著的交互作用。本研究对明确生态环境对城镇化过程的影响模式, 分析生态环境对城市群发展的限制或支撑作用提供参考。

关键词: 城镇化; 关键要素; 交互作用; 灰色关联分析; 方差分析; 京津冀

Identification of key factors and mutual effects of urbanization and Eco-environment in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration

SUN Tao¹, SUN Ranhao¹, CHEN Liding^{1,2,*}

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: The Chinese urbanization ratio has increased as the economy has developed over the past 30 years. The rapid urbanization has caused increasingly unprecedented environmental problems, such as air pollution, water pollution, water resource shortages, encroachment of cultivated fields, and erratic regional climates. All these factors suggest that there are deeper interactions between the regional eco-environment and urbanization. Currently, most studies have focused on the total relationship between urbanization and the eco-environment through synthetic assessments. Although strong interactions have been determined, the key factors affecting urbanization and their interactions have not been identified and explored. Based on Beijing-Tianjin-Hebei (BTH) region, which is a large-scale urban agglomeration and important economic zone in China, this study identified key factors and assessed their interactions affecting urbanization and the eco-environment. We used the urbanization ratio to describe urban development; and used land use, water resources, and environmental,

基金项目:

收稿日期: 2018-01-29; 修订日期: 2018-05-07

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail:

ecological, and energy parameters to describe the eco-environment. This study assessed the impacts of eco-environmental factors on urbanization through a (1) correlation analysis to show the preliminary relationships and grey relation analysis (GRA) to rank the relations of each factor affected by urbanization, (2) significance analysis to merge homogeneous factors and determine the effect of interactions between cities and factors using a one-way ANOVA method. The results revealed that (1) total and household water consumption showed the lowest R^2 ; socio-economic parameters showed the best correlations; land use parameters showed a lower R^2 than socio-economic parameters; energy parameters showed the same level of accuracy as land use counterparts, and both were considerably more correlated than NDVI, which showed a higher R^2 than water consumption parameters; (2) GRA results were heterogeneous among both the 13 cities and factors of the BTH region. Furthermore, the GRA results were different for the same factors in different categories, such as for land use and socio-economic parameters. Together, the max GRA results showed the citizen electricity usage ranked the highest, and household water consumption ranked the lowest. The variance of GRA results showed that built-up area was the most stable and population was the least stable factor; (3) pairwise GRA value comparisons among the factors were conducted to determine homogeneous factors. The fisher-LSD results showed significance to be weak within a category and strong among categories. Based on the significant properties, the total factors were compressed from 10 to 6, which represented the original selected categories whilst maintaining the assessment accuracy; (4) an interaction assessment module was used in a one-way ANOVA to evaluate the interaction effect of factors. We found that the factors significantly represented the different aspects of the ecological-environment, and the cities also significantly represented the differences between each city caused by various industrial structures and different natural environments. The interactive effect between cities and factors was significant, which provided solid evidence to further explore the interactive mode and environmental effect of the factors with increasing urbanization. This work provides a foundation to determine the supportive and suppressive effects between the eco-environment and urbanization.

Key Words: urbanization; key factors; interactive effects; grey relationship analysis (GRA); ANOVA; Beijing-Tianjing-Hebei

21 世纪以来,中国城镇化的规模和速度均位于世界前列,城镇化进程和经济发展共同推动了中国社会发展和人民生活水平提高,特大城市群作为城镇化的主体形态,是中国推进新型城镇化的重要组成部分^[1]。随着城市群数量和规模的不断发展,城市群与区域生态环境的交互作用日益深刻。京津冀城市群地处华北平原,是我国的政治核心,也是主要经济核心之一,在我国城镇化建设过程中具有示范意义^[2]。京津冀城市群在发展过程中面临越来越严峻的生态环境问题,如建设用地过度扩张、耕地流失、水资源短缺、大气和土壤污染加剧等^[3-5],这些问题已经影响到京津冀城市群的可持续发展,城市发展和生态环境相互胁迫的作用和机理亟待明确。

城镇化过程与社会经济和生态环境的变化密切相关。社会经济要素和生态环境要素的变化可以衡量城镇化的进程、水平和质量。社会经济要素一般包括人口、经济、工业、社会、民生等指标,生态环境要素一般包括水资源、土地资源、气象气候、生态、能源、环境等方面^[6]。城镇化过程导致土地利用变化、水资源短缺、城市热岛、植被退化等生态环境问题,而生态环境则从地形、地下水、自然气候等方面支撑或限制城镇化的发展。在确定生态环境对城镇化的影响方面,目前主要是综合性研究较多,包括社会经济要素的演化对城镇化过程的影响和生态环境综合指标与城镇化的联系。主要研究方法是基于多要素的社会经济和生态环境要素指标体系,通过耦合模型得到城镇化综合指标和生态环境综合指标的耦合度,判断研究区城镇化与生态环境的关系。主要研究内容有社会经济要素分布的空间异质性^[7],基于人口素质和政府作用等因素的城镇化影响效应^[8]以及根据地区特征来选择影响因素的实证研究^[9]等。而城镇化与生态环境的关系方面,主要集中在城镇化发展趋势理论推演^[10]、城镇化过程与生态环境要素时空分析^[11-12]和城镇化综合过程与生态环境综合指

标耦合度计算^[6,13-14]等方面。综合评价研究明确了城镇化与生态环境的综合关系,但不能明确具体哪些要素与城镇化过程的关联度更高,并且选择不同的要素指标体系对评价结果具有一定影响。当前基于某一类别要素时的研究主要探讨要素的时空特征和城镇化发展对要素的影响,往往集中于土地、气温、植被等某一类生态环境要素,对不同类别的要素与城镇化过程的关联性则少有研究。主要研究内容包括基于社会经济指标体系所反映的城镇化 Kuznets 规律^[15]、土地利用变化对城镇化过程的表达^[16]、城市热环境特征及气象要素变化规律^[17]、能源、经济、排放与城镇化进程的动态规律^[18]、城市发展与水资源利用^[19]、植被物候在城市-郊区的变化特征^[20]、城镇化过程对水质的影响等^[21]。

综合以上研究,城镇化过程与生态环境要素的综合关系研究已较为充分,针对水、土等要素也有部分研究,但是从生态环境的水、土、气、生层面,哪些类别的要素在城镇化与生态环境的交互胁迫中起主要作用讨论较少,即影响交互胁迫作用的关键要素尚不明确;针对要素的关联度,城市和要素间是否存在显著的交互作用仍需进一步确定,以上问题是判定城市和生态环境要素交互胁迫模式、进一步确定不同要素生态环境效应的基础。针对以上问题,本研究从影响城镇化的关键要素入手,结合已有研究成果,基于生态环境要素与城镇化过程的相关关系,重点研究不同类别的要素与城镇化过程的关联度,为进一步明确城镇化与生态环境的交互胁迫模式提供参考。

1 研究区与方法

1.1 研究区概况

京津冀城市群地处华北平原,地势西北高东南低,位于 113.45°—119.88°E, 35.93°—42.72°N 之间,是中国的核心经济区和关键交通枢纽之一(图 1)。京津冀行政范围包含北京、天津以及河北省全境,共 13 市。根据京津冀协同发展规划,京津冀的空间布局划分为四个功能区:即中部核心功能区、东部滨海发展区、南部功能拓展区和西北部生态涵养区^[22]。京津冀区域自然环境类别多样,兼有高原、山地、丘陵、平原、湖泊以及海滨,自然资源丰富,动植物种类多样,其生态环境的空间分布差异显著,既可以提供多样化的生态系统功能,亦具备良好的生态系统服务价值和科学研究价值。

1.2 数据收集及标准化

城镇化过程导致土地利用的变化,城市的发展对水资源的需求,对自然植被的破坏以及对能源的利用强度也逐步增强,因此本研究从土地、水资源、生态资源、能源方面描述生态环境要素的变化,从人口和经济方面描述社会经济的变化。具体地,社会经济要素包括常住人口、城镇人口、市级 GDP 总量和固定资产投资;土地要素包括建成区面积和公园绿地面积,能源要素包括用电总量和居民用电总量,水资源要素包括用水总量和生活用水,生态要素包括归一化植被指数。

本研究时间范围为 2000—2015 年,社会经济、水、土地等统计数据来自京津冀各省市的《经济统计年鉴》、《中国城市统计年鉴》等。数据在收集时统一了量纲单位,保证其绝对值可比。本研究使用城镇化率衡量城镇化的发展过程,基于城镇人口与常住人口的比值法得到^[23]。本研究使用 MODIS MOD13A3 v6 月度植被指数产品作为 NDVI 数据源,并且根据产品手册提取了最高质量的像元,其余像元使用 ArcGIS 软件进行掩膜处理。研究对处理后的月度 NDVI 产品进行算数平均得

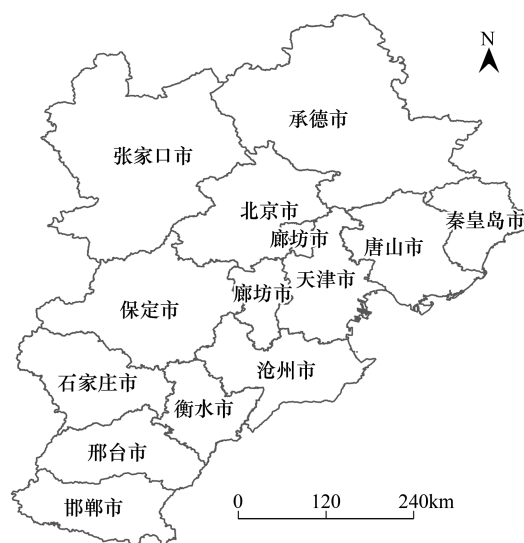


图 1 京津冀研究区示意图

Fig. 1 Research area of Beijing-Tianjing-Hebei megapolis group

到年度平均值。

本研究对数据进行了标准化,去除了数据量纲,保证数据间的可比性。研究采用 Z-score 法进行处理^[24],核心公式如下(公式 1):

$$z = \frac{x - \text{mean}(X)}{\text{std}(X)} \quad (1)$$

式中, x 为数据值, X 表示某一类别整个数据集, $\text{mean}(X)$ 和 $\text{std}(X)$ 分别表示该数据集的算数平均值和标准差。Z-score 表示原始数据偏离均值的距离长短,而该距离度量的标准是标准差。

1.3 数据分析方法

1.3.1 灰色关联分析

本研究通过灰色关联分析得到不同要素对城镇化率的影响。灰色关联分析以要素数据列作为依据,从数据列形态来研究要素间的几何对应关系,用关联度排序来确定要素间关系的强弱^[25]。结合本研究数据,方法基本步骤如下:

(1) 确定数据的参考序列和比较序列,本研究以城镇化率作为参考序列 x_0 ,其余要素作为比较序列 x_i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$)

(2) 数据的无量纲处理。

(3) 分别求取参考序列和比较序列之间的差值,进一步求取差值列中的最大值、最小值(二级差),再计算二级差序列中的最大值和最小值:

$$\begin{aligned} \Delta_{0,i}(k) &= |x_0(k) - x_i(k)| \\ \max_{i(k)} &= \max(|x_0(k) - x_i(k)|) \\ \min_{i(k)} &= \min(|x_0(k) - x_i(k)|) \\ \max_{j(i)} &= [\max_{i(k)}] \\ \min_{j(i)} &= [\min_{i(k)}] \end{aligned} \quad (2)$$

其中,公式 2 表示参考数列和比较数列的差值列 $\Delta_{0,i}(k)$,公式 4—5 为差值列的最大值 $\max_{i(k)}$ 和最小值 $\min_{i(k)}$,公式 5—6 进一步计算了前式序列中的最大值 $\max_{j(i)}$ 和最小值 $\min_{j(i)}$ 。

(4) 关联系数计算

$$\xi_k = \frac{\min_{j(i)} + \rho \cdot \max_{j(i)}}{\Delta_{0,i}(k) + \rho \cdot \max_{j(i)}} \quad (3)$$

式中,基于最大值和最小值,结合比较数列进行关联系数计算,根据其他研究结论^[26],对 ρ 取值 0.5,得到关联系数矩阵。

(5) 关联度计算

$$\gamma_{0,i} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \xi_k \quad (4)$$

式中,对关联系数矩阵进一步优化,对数据列 x_i 的关联系数矩阵求取算数平均值,得到每个要素类别 i 的关联度 $\gamma_{0,i}$ 。

(6) 关联度排序

对各类别要素的关联度进行排序,得到各要素 i 对城镇化率的影响。

1.3.2 方差分析

基于关联分析结果,本研究采用方差分析法进行要素与城市的交互作用分析。方差分析(ANOVA)用于两个及两个以上样本均数差别的显著性检验,是广泛应用的统计分析方法^[27],其基本思想是通过分析不同来源的误差(随机误差和实验误差)对总变异的贡献大小确定不同因素对研究结果的影响。本研究使用单因素方差分析以及交互作用模块进行要素间显著性对比以及要素和城市的交互作用分析,要素显著性对比采用

Fisher-LSD 方法。方差分析计算过程复杂,本研究使用 SPSS 实现,其原理概述如下:

(1) 建立检验假设;

H_0 : 多个样本总体均值相等:

$$\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \cdots = \mu_k$$

H_1 : 多个样本总体均值不相等或不全等。

$$\text{计算每组均值 } \bar{X}_j = \sum_{i=1}^{n_j} \frac{x_{ij}}{n_j} \quad (x_{ij} \text{ 为第 } j \text{ 组的第 } i \text{ 个样本}) \quad (5)$$

$$\text{每组方差 } s_j^2 = \left[\sum_{i=1}^{n_j} (x_{ij} - \bar{x}_j)^2 \right] / (n_j - 1) \quad (6)$$

若 k 个样本来自同一总体,则总体均值等于所有样本个体之和除以总体数量,即:

$$\mu = \frac{\sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} x_{ij}}{\sum_{j=1}^k n_j} \quad (7)$$

因此,组间的方差估计为

$$\text{MSTR} = \frac{\sum_{j=1}^k (\bar{x}_j - \mu)^2 \times n_j}{k - 1} \quad (8)$$

组内的方差估计为($n_T - k$ 为自由度,指取值不受限制的变量个数。通常记做 $df = n - k$ 。其中 n 为样本数量, k 为被限制的条件数或变量个数:

$$\text{MES} = \frac{\sum_{j=1}^k (n_j - 1) \times s_j^2}{(n_T - k)} \quad (9)$$

(2) 计算检验统计量的 F 分布:

$$F = \frac{\text{MSTR}}{\text{MSE}} \quad (10)$$

(3) 基于 F 分布确定 P 值并作出推断结果,检验水准为 0.05,表明对假设的置信区间为 95%,如果 $P < 0.05$,则拒绝 H_0 假设,表明样本组间存在差异。

2 结果

2.1 要素与城镇化的相关性分析

要素与城镇化的正负相关性直接影响关联分析的可靠性,明确要素和城镇化的相关关系是进行关联分析的基础。相关分析中,城镇化率为因变量,各类别要素为自变量。从图 2 看到,除水资源要素和生态要素外,其余要素与城镇化率均呈指数关系。NDVI 变化与城镇化率线性相关,而水资源与城镇化率的关系较为模糊。从相关性上,城镇化率与 GDP、固定资产投资等社会经济要素相关性较高,拟合系数 R^2 在 0.85 以上,并且 $\text{RMSE} < 0.38$,离散度较小。其次是与能源要素的相关性较好,与用电总量和城乡居民用电的拟合系数大于 0.82, $\text{RMSE} < 0.42$ 。与建成区面积和公园绿地面积的拟合系数大于 0.79, $\text{RMSE} < 0.46$ 。与 NDVI 的拟合系数较低,仅为 0.43, $\text{RMSE} = 0.76$,离散度较大。相关性最差的是水资源要素,与生活用水和用水总量的 R^2 均小于 0.15,并且 $\text{RMSE} > 0.97$,该类别要素的离散度最大。

2.2 要素与城镇化的关联度分布

为了进一步确定各类要素对城镇化率的影响,本研究使用灰色关联分析方法对要素关联度进行计算和排名(图 3)并统计了值域和方差(表 1)。图 3 显示要素类别间和要素类别内部,与城镇化率的关联度都存在不同程度的差异。具体地,在土地方面,建成区面积关联度整体较高,城市间差异小;公园绿地面积比建成区面

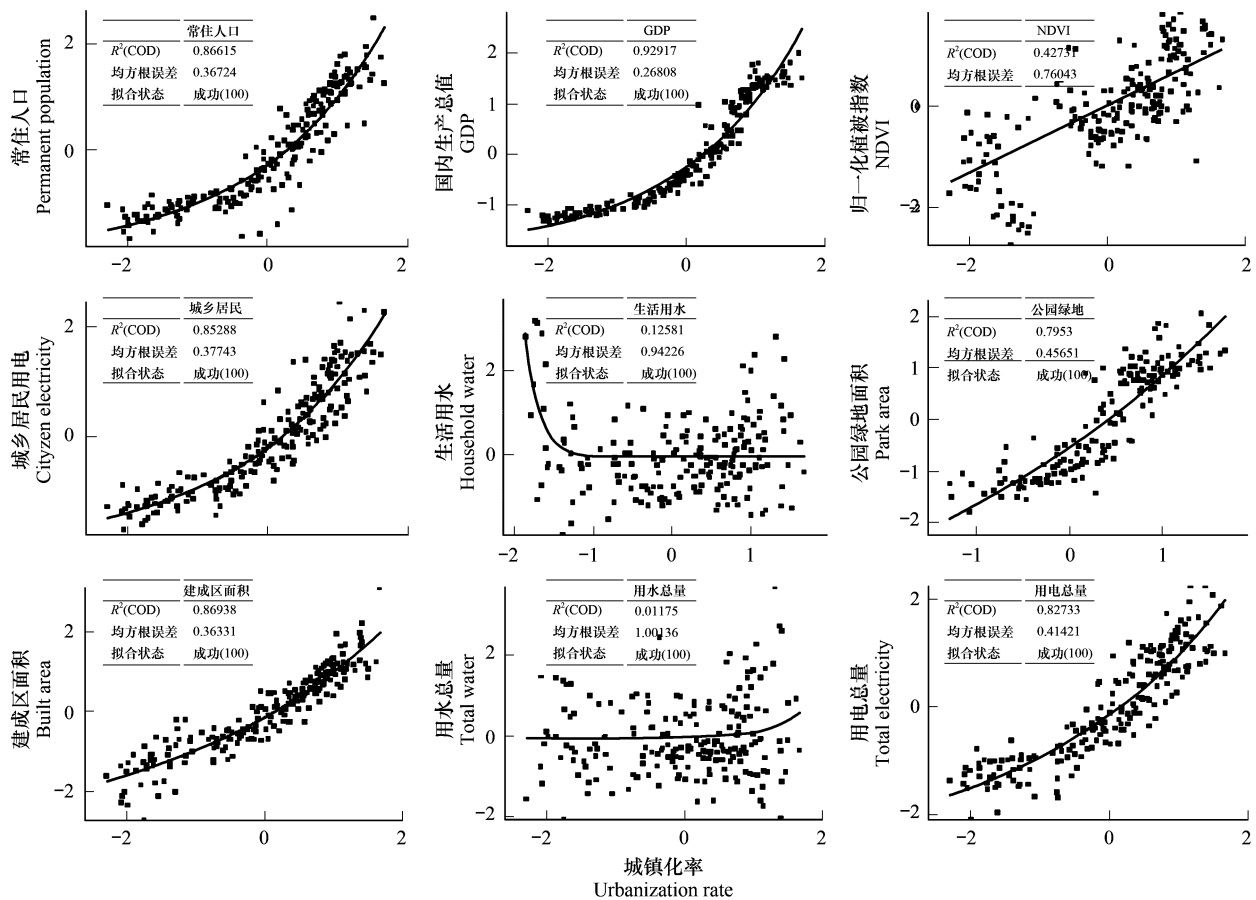


图2 城镇化率与社会经济及生态环境要素的相关关系

Fig.2 Correlation between urbanization ratio and factors

固定资产与 GDP 趋势类似未列出,每个要素均包含 2000—2015 年在 13 个地市的数据

积关联度整体偏小,城市间差异较大,这表明京津冀地区各城市对城镇化过程中的绿地面积建设有较大差异;能源方面,居民用电和用电总量均有较高的关联度,其中居民用电分布更加离散,表明用电总量对城镇化的表征意义更强。但是图中显示邯郸的用电总量关联度较弱,经检查是由于邯郸地区数据量偏少所致。水资源要素方面,关联度整体低于能源和土地要素,并且用水总量的关联度整体较生活用水高,表明用水总量能更好地描述京津冀地区城镇化过程;社会经济要素方面,关联度整体较高,但是承德在常住人口方面关联度较低,经检查是由于承德行政区划变动导致的人口统计变化所致。值得注意的是沧州地区社会经济要素与城镇化的关联性均不高。生态要素方面,关联度均处于 0.75 以上,分布也较为集中,表明 NDVI 可以较好地表达区域植被与城镇化过程的关系。

关联度极值和方差分布体现要素的稳定性,本研究结合绝对值和稳定性来综合评价要素对城镇化过程的影响。如表 2 所示,关联度值域和方差最小的要素是建成区面积,分别仅为 0.055 和 0.0004,表明该要素在京津冀的各个地市中对城镇化的影响不仅高,并且稳定。值域及方差最大的是常住人口,其值分别为 0.383 和 0.0107,结合较高的关联度极大值(0.92),表明常住人口要素虽然对京津冀部分地区的影响较大,但承德和沧州的影响而不稳定。从关联度极值上看,生活用水极大值最低(0.787),说明生活用水对城镇化率的影响整体偏低。需要指出的是,虽然 NDVI 的关联度极大值为 0.847,低于建成区面积、用电总量以及固定资产等要素,但方差仅为 0.0009,在稳定性上仅次于建成区面积,说明本研究中 NDVI 虽然在关联度上处于中等水平,但稳定性好,优于相同关联度水平的固定资产、用水总量和公园绿地要素。

根据关联度结果,公园绿地、用水总量以及生活用水要素在京津冀所有地市上稳定性较弱。常住人口在

承德和沧州结果偏低,GDP 总量和固定资产要素在沧州偏低,城镇化过程在使用相应的关联度或稳定性较低的要素描述时需要数据的连续性和完整性进行检查。研究分别按照绝对值和稳定性对要素关联度进行了排名:首先,按照关联度最大值由大到小排名为:城乡居民用电>常住人口>建成区面积>用电总量>GDP 总量>固定资产>公园绿地>NDVI>用水总量>生活用水;按照方差从大到小排名为:常住人口>固定资产>生活用水>用水总量>GDP 总量>用电总量>公园绿地>城乡居民用电>NDVI>建成区面积。

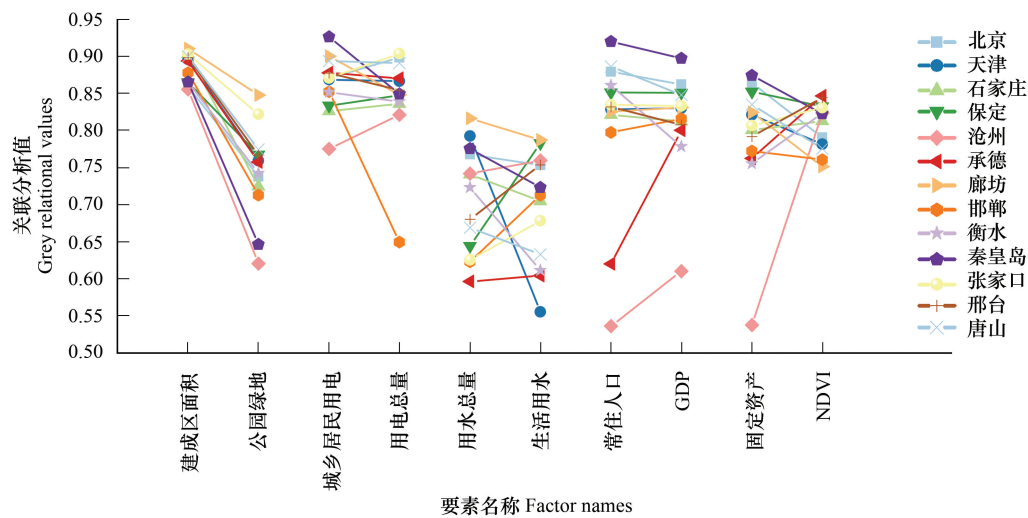


图 3 灰色关联分析结果

Fig.3 Results of grey relation analysis in 13 cities

表 1 灰色关联分析结果值域和方差

Table 1 Range and variance of GRA results

要素名称 Factor name	最小值 Min	最大值 Max	极值差 Range	方差 Variance
建成区面积 Built area	0.856	0.911	0.055	0.0004
公园绿地 Park area	0.621	0.848	0.227	0.0035
城乡居民用电 Citizen electricity	0.776	0.927	0.151	0.0013
用电总量 Total electricity	0.65	0.904	0.254	0.0037
用水总量 Total water	0.597	0.817	0.22	0.0048
生活用水 Household water	0.556	0.787	0.231	0.0052
常住人口 Permanent population	0.537	0.92	0.383	0.0107
国内生产总值 GDP	0.611	0.898	0.287	0.0043
固定资产 Fixed assets	0.538	0.875	0.337	0.0067
归一化植被指数 NDVI	0.752	0.847	0.095	0.0009

2.3 影响城镇化的关键要素提取

城镇化过程的复合性导致部分要素间有较强联系,研究基于要素关联度结果,通过评价要素间的差异区别要素的同质性,在此基础上对要素进行合并,从而得到影响城镇化过程的关键要素。研究使用单因素方差分析方法,基于 3 种统计分析软件对数据相互印证 (SPSS, EXCEL 以及 Origin pro),确保统计结果可靠。

表 2 显示了两两要素间的差异显著性水平。其中建成区面积和公园绿地面积差异显著,用电总量和居民用电差异不显著,用水总量和生活用水差异不显著,常住人口、GDP 总量以及固定资产两两之间差异不显著。而在不同要素类别之间,差异显著增强,例如居民用电和公园绿地,用水总量和用电总量,常住人口和生活用水差异均为显著。NDVI 与社会经济要素的差异均不显著,除用电总量外,与其余要素差异显著。如果要素间差异不显著,则说明所选要素本质上含义类同,可以合并使用;如果差异显著,则二者的含义不同,需要分别使用。通过对类别内差异不显著的要素进行合并,将原有的 10 个要素缩减为 6 个,如表 3:

表 2 要素两两差异显著性检验

Table 2 Significance differences between each otwo factors

要素名称 Factor name	公园绿地 Park area	城乡居 民用电 Citizen electricity	用电总量 Total electricity	用水总量 Total water	生活用水 Household water	常住人口 Permanent population	国内生 产总值 GDP	固定资产 Fixed assets	归一化植 被指数 NDVI
建成区面积 Built area	1	0	0	1	1	1	1	1	1
公园绿地 Park area		1	1	0	1	1	1	1	1
城乡居民用电 Citizen electricity			0	1	1	1	1	1	1
用电总量 Total electricity				1	1	0	0	1	0
用水总量 Total water					0	1	1	1	1
生活用水 Household water						1	1	1	1
常住人口 Permanent population							0	0	0
国内生产总值 GDP								0	0
固定资产 Fixed assets									0
归一化植被指数 NDVI									

其中 1 表示差异性显著,0 表示差异不显著

表 3 合并后要素描述统计

Table 3 Statistics of merged factors

要素名称 Factor name	分析数量 Number	均值 Mean	标准差 Std	均方根误差 RMSE
建成区面积 Built area	13	0.88453	0.01958	0.00543
公园绿地 Park area	13	0.74502	0.06146	0.01705
用电量 Electricity use	26	0.8542	0.05213	0.01022
用水量 Water use	26	0.70258	0.07212	0.01414
社会经济 Social-economy	39	0.80472	0.08664	0.01387
归一化植被指数 NDVI	13	0.80785	0.03181	0.00882

合并后要素的关联度排名比合并前更加体现了类别之间的差异性(表 3)。例如,建成区面积的均值最大,标准差和 RMSE 最小;用水总量的均值最小,RMSE 和标准差均处于较大的水平。从合并后关联度均值、标准差和 RMSE 综合对比下,得到合并后要素对城镇化过程的影响排名:建成区面积>用电量>NDVI>社会经济>公园绿地>用水量。这一排名排除了同质要素,更清晰地代表了不同类别要素对城镇化过程的影响。这一排名显然与要素稳定性排名更加接近,这说明在识别关键影响要素的过程中,仅从绝对值的分布判定要素的影响大小是不全面的,要素关联度的稳定性与关联度真实排名更加相关。

2.4 城市与要素的交互作用判定

针对要素关联度排名后的分布情况,研究进一步计算了要素和城市的交互作用(表 4)。表中 P 值越小表

表 4 要素与城市的显著性及交互作用

Table 4 Significance of factors, cities and mutual effects

结果列表 Results	自由度 DF	平方和 Quadratic sum	均方根误差 RMSE	F	P
要素 Factors	5	0.45542	0.09108	40.93026	0.000
城市 City	12	0.07208	0.00601	2.69915	0.00665
交互 Interaction	60	0.2796	0.00466	2.09409	0.00361
模型 Model	77	0.885	0.01149	5.16481	0.000
误差 Error	52	0.11572	0.00223	—	—
修正整体 Fix	129	1.00071	—	—	—

明交互作用关系越显著。结果表明研究所选择的要素存在极显著差异(P 远小于 0.05),说明各类要素不仅可以代表各自类别,并且要素间具有良好的正交性。不同城市间关联度也存在显著差异($P=0.00665$),即不同城市要素的影响不尽相同。最后,城市和要素的交互作用也呈现出显著的结果($P=0.00361$),说明要素贡献的关联度变化不仅与要素有关,同时还与城市类型有关,即关联度的分布受到要素和城市特征的共同影响。

3 讨论

本研究基于相关关系和灰色关联分析方法评价了水资源、土地、生态、能源以及社会经济要素与城镇化过程的联系。首先,在相关关系上,NDVI 和水资源要素与城镇化率的相关性都不高,可能由于本文的 NDVI 是取区域均值,这一范围比城镇化过程发生的主要范围大,因此相关性较低。水资源方面,用水总量和生活用水虽然有一定的趋势,但受到京津冀各地区水资源总量限制和节水政策影响,导致水资源要素波动性很大,很难与平滑的城镇化率匹配,因此相关性较差。

其次,同一要素的关联分析结果在城市间具有显著差异,主要与地区经济发展水平、产业结构、自然环境等有关。例如,公园绿地的时空变化与各个城市发展水平、各个城市对绿地建设的重视程度有密切关系,随城市发展表现出较强的异质性;而要素类别内,总量要素(例如用水总量,用电总量)比细分要素与城镇化率的关联度高,说明总量要素在关键要素的研究上需要重点考虑。用水量方面,河北省缺水情况较为严重,地区水资源不平衡显著^[28],导致其水资源要素关联度明显小于北京和天津。人口方面,秦皇岛常住人口与承德、沧州关联度差异很大,表明秦皇岛地区人口结构以及增长均比较稳定,并且行政区划在研究时间段内变化很小。承德由于行政区划变动影响人口统计数据导致常住人口要素影响不稳定。本研究发现城市和各类要素在关联度上存在显著的交互作用。同一要素对城镇化的贡献可能在城市间具有差异,因此要素和城市间的交互作用强弱和交互作用的模式需要进一步研究。

4 结论

针对城镇化过程与生态环境要素交互胁迫作用的关键影响因子尚不明确的问题,本研究基于相关关系和灰色关联分析法从水、土、能源等方面初步识别了关键影响因子,对关联度进行了排名和稳定性检验,基于方差分析明确了生态环境要素和城市交互胁迫作用的显著性。研究得到以下主要结论:(1)要素对城镇化过程的影响排名依次为建成区面积、用电量、NDVI、社会经济、公园绿地、用水量;(2)仅考虑关联度的关键要素识别存在缺陷,本研究证明关键要素排名与关联度的稳定性更加相关;(3)同类要素间同质化较强,不同类别要素间同质化较弱。(4)城市和生态环境要素的交互作用非常显著。本文初步明确了与城镇化过程相关的不同类别要素的影响,但是目前选择的生态环境要素偏少,应该从类别上和要素数量上进行更加全面的评估,部分要素资料的收集具有一定困难,需要从更多资料中总结。另外本文对行政区划变动引起的要素异常变化尚未考虑,因此需要更加深入理解要素特性、在更多尺度基础上对研究方法和研究结论进一步验证。本研究对研究城镇化过程的生态机理、城镇化过程与生态环境间的相互关系等工作提供了参考。

参考文献(References):

- [1] 樊杰. 城镇化为何以城市群为主体形态. 资源环境与发展, 2014, 15(2): 16-17.
- [2] 陆大道. 京津冀城市群功能定位及协同发展. 地理科学进展, 2015, 34(3): 265-270.
- [3] 张盛, 王铁宇, 张红, 李奇锋, 周云桥, 宋帅. 多元驱动下水生态承载力评价方法与应用——以京津冀地区为例. 生态学报, 2017, 37(12): 4159-4168.
- [4] 彭建, 刘志聪, 刘焱序, 陈昕, 赵会娟. 京津冀地区县域耕地景观多功能性评价. 生态学报, 2016, 36(8): 2274-2285.
- [5] 吴健生, 王茜, 李嘉诚, 涂媛杰. $PM_{2.5}$ 浓度空间分异模拟模型对比: 以京津冀地区为例. 环境科学, 2017, 38(6): 2191-2201.
- [6] 刘耀彬, 李仁东, 宋学锋. 中国城市化与生态环境耦合度分析. 自然资源学报, 2005, 20(1): 105-112.
- [7] 曹广忠, 王纯洁, 齐元静. 我国东部沿海省区城镇化水平影响因素的空间差异. 地理研究, 2008, 27(6): 1399-1406.
- [8] 马孝先. 中国城镇化的关键影响因素及其效应分析. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(12): 117-124.

- [9] 张丽琴, 陈烈. 新型城镇化影响因素的实证研究——以河北省为例. 中央财经大学学报, 2013, (12): 84-91.
- [10] 方创琳, 杨玉梅. 城市化与生态环境交互耦合系统的基本定律. 干旱区地理, 2006, 29(1): 1-8.
- [11] 谭俊涛, 张平宇, 李静, 刘世薇. 吉林省城镇化与生态环境协调发展的时空演变特征. 应用生态学报, 2015, 26(12): 3827-3834.
- [12] 郭庆宾, 刘静, 王涛. 武汉城市圈城镇化生态环境响应的时空演变研究. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(2): 137-143.
- [13] 崔木花. 中原城市群9市城镇化与生态环境耦合协调关系. 经济地理, 2015, 35(7): 72-78.
- [14] 张云峰, 陈洪全. 江苏沿海城镇化与生态环境协调发展量化分析. 中国人口·资源与环境, 2011, 21(S1): 113-116.
- [15] Zhao Y B, Wang S J, Zhou C S. Understanding the relation between urbanization and the eco-environment in China's Yangtze River Delta using an improved EKC model and coupling analysis. *Science of the Total Environment*, 2016, 571: 862-875.
- [16] Bajocco S, Ceccarelli T, Smiraglia D, Salvati L, Ricotta C. Modeling the ecological niche of long-term land use changes: the role of biophysical factors. *Ecological Indicators*, 2016, 60: 231-236.
- [17] Mohan M, Kandya A. Impact of urbanization and land-use/land-cover change on diurnal temperature range: A case study of tropical urban airshed of India using remote sensing data. *Science of the Total Environment*, 2015, 506-507: 453-465.
- [18] Ali H S, Law S H, Zannah T I. Dynamic impact of urbanization, economic growth, energy consumption, and trade openness on CO_2 emissions in Nigeria. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(12): 12435-12443.
- [19] Walker J J, de Beurs K M, Henebry G M. Land surface phenology along urban to rural gradients in the U.S. Great Plains. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 165: 42-52.
- [20] Chaudhuri S, Ale S. Long-term (1930-2010) trends in groundwater levels in Texas: Influences of soils, landcover and water use. *Science of the Total Environment*, 2014, 490: 379-390.
- [21] Borges R C, dos Santos F V, Caldas V G, Lapa C M F. Use of geographic information system (GIS) in the characterization of the Cunha Canal, Rio de Janeiro, Brazil: effects of the urbanization on water quality. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 73(3): 1345-1356.
- [22] 黄金川, 林浩曦, 漆潇潇. 空间管治视角下京津冀协同发展类型区划. 地理科学进展, 2017, 36(1): 46-57.
- [23] 朱孔来, 李静静, 乐菲菲. 中国城镇化进程与经济增长关系的实证研究. 统计研究, 2011, 28(9): 80-87.
- [24] Cheadle C, Chochung Y S, Becker K G, Vawter M P. Application of z-score transformation to Affymetrix data. *Applied Bioinformatics*, 2003, 2(4): 209-217.
- [25] 谭学瑞, 邓聚龙. 灰色关联分析: 多因素统计分析新方法. 统计研究, 1995, 13(3): 46-48.
- [26] 曹广忠, 刘涛. 中国省区城镇化的核心驱动力演变与过程模型. 中国软科学, 2010, (9): 86-95.
- [27] 邱宏, 金国琴, 金如锋, 赵伟康. 水迷宫重复测量数据的方差分析及其在 SPSS 中的实现. 中西医结合学报, 2007, 5(1): 101-105.
- [28] 张利平, 夏军, 胡志芳. 中国水资源状况与水资源安全问题分析. 长江流域资源与环境, 2009, 18(2): 116-120.