

DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2020-0283

邓欧, 李亦秋, 鲁春霞, 李若霜. 张家口市供用水结构时空演变及驱动力分析. 草业科学, 2020, 37(7): 1354-1361.

DENG O, LI Y Q, LU C X, LI R S. Spatio-temporal evolution analysis and underlying driving forces of water supply and consumption structures in Zhangjiakou, China. Pratacultural Science, 2020, 37(7): 1354-1361.

张家口市供用水结构时空演变及驱动力分析

邓欧¹, 李亦秋¹, 鲁春霞², 李若霜³

(1. 贵州师范大学地理与环境科学学院, 贵州 贵阳 550001; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;
3. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083)

摘要: 供用水结构时空演变及驱动力研究对于水资源进行合理配置、提高供用水效率和效益意义重大。本研究以张家口市气象、水资源供给利用、社会经济和水环境数据为基础, 借助数理和空间统计制图、信息熵与均衡度、灰色关联模型对供用水结构时空演变及驱动力进行研究。结果表明: 张家口市地表水源匮乏, 地下水供水比重在逐步增加, 供水总量总体呈现下降趋势, 且供水量的空间差异在扩大; 农业用水量最大, 但用水总量和比重都在降低, 而工业和生活用水的比重在增加; 生态与环境补水量近年来也增加明显, 但其用水总量和所占比重都不大; 用水总量呈下降趋势。2006–2011 年均衡度大幅下降, 用水结构极不均衡, 2011–2017 年用水均衡度快速增长, 用水结构朝着均衡方向发展, 信息熵和均衡度的数值均处于较低水平, 用水结构调整的空间仍然很大。从驱动力因子来看, 有效灌溉面积和第二产业增加值的关联强度等级为“强”, 其他因子的关联强度等级为“中”, 人口的增加、城市规模扩大和生态环境的改变, 使生活用水量和生态环境用水量增加, 成为用水结构的演变重要驱动因素。

关键词: 张家口市; 供用水结构; 县域尺度; 时空分异; 驱动力

文献标志码: A **文章编号:** 1001-0629(2020)07-1354-08

Spatio-temporal evolution analysis and underlying driving forces of water supply and consumption structures in Zhangjiakou, China

DENG Ou¹, LI Yiqiu¹, LU Chunxia², LI Ruoshuang³

(1. School of Geographic and Environments Sciences, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, Guizhou, China;

2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

3. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Studies involving the spatio-temporal evolution and underlying driving forces of water supply structures are of extremely important for implementation of rational allocation of water resources and improvement of water supply efficiency. Based on meteorological data, water supply and consumption data, social-economic data and water environmental data from Zhangjiakou City, China, the spatial and temporal evolution and driving forces affecting water supply structures were studied using multiple methods of mathematical and spatial statistical mapping, comentropy, equilibrium degree, and the grey correlation model. The results showed that, Zhangjiakou shortage of surface water, and the proportion of ground water supply continues to increase. Additionally, the results report increase in the total amount of water supply and widening of the spatial difference in water supply. Agricultural water consumption constitutes the greastest ues of water, but the total

收稿日期: 2020-05-26 接受日期: 2020-07-15

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2017ZX07101001); 贵州省科技基金专项 (黔科合基础 [2019]1222、[2019]1218); 贵州省科技重点基金 (黔科合基础 [2020]1Z031); 贵州师范大学资助博士科研项目 (GZNU2017]8、GZNU2017]9)

第一作者: 邓欧 (1973-), 男, 四川达县人, 讲师, 博士, 研究方向为资源环境与生态遥感. E-mail: cnfly@foxmail.com

通信作者: 李亦秋 (1973-), 女, 四川达县人, 教授, 博士, 研究方向为测绘与 3S 技术、资源环境与生态遥感. E-mail: yqiu.li@163.com

amount and proportion of agricultural water consumption continue to decrease, while the proportions of industrial and domestic water consumption continue to increasing. Ecological and environmental water supply has also increased significantly in recent years, but the total land proportion of water consumption represented by these sectors are not considerable. The total amount of water consumption showed a downward trend. From 2006 to 2011, the equilibrium degree dropped sharply, and the water consumption structure was extremely unbalanced. The water consumption equilibrium degree increased rapidly in 2011–2017, and the water consumption structure developed toward equilibrium, but entropy and equilibrium degree were both low, and there is plenty of room for structural adjustments. As for the driving forces, the correlation between effectively irrigated area and added secondary industry value is "strong", whereas the correlations between irrigated area and other factors are "medium". The increase in human population, the expansion of the city, and the changing of ecological environment have resulted in increased domestic and ecological water consumption, which have become the important driving factors affecting the evolution of water consumption structure.

Keywords: Zhangjiakou; water supply and consumption structure; county scale; time and space differentiation; driving forces

Corresponding author: LI Yiqiu E-mail: yqiu.li@163.com

我国北方缺水形势严峻, 水资源供需矛盾加剧, 水资源过度开发利用已导致多种水环境问题, 严重制约着区域经济社会的稳定和发展^[1-2]。供用水结构时空演变及驱动力研究对于制定严格的水资源管理制度, 实现水资源的合理配置, 提高用水效率和效益意义重大。已有学者围绕供用水结构演变及驱动力进行了相关研究, 研究层次主要集中在国家、省市和流域层面^[3-5]。采用数理统计、生态位、信息熵、动态模型、洛伦兹曲线和基尼系数等方法研究供用水结构的演变^[6-9], 采用主成分分析、灰色关联分析、回归分析等方法对供用水结构演变的驱动力进行分析研究^[10-13]。这些研究为本研究奠定了相关研究基础, 但综合考虑自然条件、社会经济和生态环境驱动因子, 将数理统计与空间统计分析相结合, 基于县域尺度的供用水结构演变及驱动力的研究尚不多见。

张家口市位于河北省西北部, 地处半湿润半干旱过渡地带, 气候干旱, 水资源匮乏, 人均水资源不足全国人均的 1/5, 水资源严重短缺成为制约其社会经济发展与生态环境建设的主要瓶颈之一^[14]。张家口市地处京津冀的上风上水生态区, 是京津冀协同发展中的重要生态屏障和水源涵养区^[15]。在水资源十分紧缺的情况下, 把握张家口市供用水结构时空演变规律, 识别供用水结构变化的社会经济和自然环境驱动因子, 对于促进水资源的合理规划管理和有效利用具有重要意义。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源

本研究的主要数据源包括: 张家口市县级行政区划图(来源于张家口市基础地理信息数据库), 2005–2017年张家口市的气象数据[来源于中国气象科学数据共享网(<http://data.cma.cn/>)], 水资源及其供给利用数据(来源于2005–2017年河北省水资源公报和实地部门调研数据), 社会经济数据(来源于2005–2017年张家口年鉴), 水环境状况数据(来源于实地部门调研及其相关研究成果)等。

1.2 研究方法

1.2.1 信息熵与均衡度

采用信息熵与均衡度对张家口市用水结构演变进行定量分析。信息熵计算公式:

$$H = -P_i \ln P_i \quad (1)$$

式中: H 为信息熵; P_i 为用水类型的比重。

在信息熵 H 计算的基础上计算均衡度:

$$J = H/H_{\max} \quad (2)$$

式中: J 为均衡度; H_{\max} 为最大信息熵, $H_{\max} = \ln(n)$, n 为用水类型 X_i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$)。 J 值越大, 表明用水系统的均衡性越强, 系统越稳定, $J=1$ 时, 用水结构达到理想状态。

1.2.2 灰色关联度模型

用灰色关联度模型分析用水量与驱动因子的关

联度。将用水量作为参考序列:

$$X_0(k) = \{x_0(1), x_0(2), \dots, x_0(n)\}, k = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

将各个驱动因子作为比较序列:

$$X_i(k) = \{x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(n)\}, i = 1, 2, \dots, m \quad (4)$$

选用极差法对原始数据进行无量纲化处理, 将正相关指标称为“效益型指标”, 反相关指标称为“成本型指标”, 采用不同的公式分别计算:

$$Y_{j\text{成本}}(k) = \frac{X_{j\text{max}}(k) - X_j(k)}{X_{j\text{max}}(k) - X_{j\text{min}}(k)};$$

$$Y_{j\text{收益}}(k) = \frac{X_j(k) - X_{j\text{min}}(k)}{X_{j\text{max}}(k) - X_{j\text{min}}(k)}, j = 1, 2, \dots, m. \quad (5)$$

计算各驱动因子的关联系数:

$$\xi_i(k) = \frac{\min_i \min_k |y_0(k) - y_i(k)| + \theta \max_i \max_k |y_0(k) - y_i(k)|}{|y_0(k) - y_i(k)| + \theta \max_i \max_k |y_0(k) - y_i(k)|}. \quad (6)$$

式中: $\xi_i(k)$ 关联系数, $y_0(k)$ 为无量纲化后的参考序列, $y_i(k)$ 为无量纲化后的比较序列, θ 为修正系数, 一般取 0.5。

计算各驱动因子的关联度:

$$\gamma_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k). \quad (7)$$

2 数据处理与结果分析

2.1 供用水量及供用水结构时空演变

张家口市供水来源分为地表水、地下水和其他水源 3 种类型, 其供水结构演变特征如图 1 所示。张家口市的供水主要来源于地下水, 占到总供水量的 70%左右, 随着时间的变化, 地下水的供水比重在增加, 为防止地下水水位大面积持续下降, 形成地下水区域下降漏斗, 产生环境问题, 需要在丰水季节和通过跨流域引水进行地下水回灌。张家口市的地表水源匮乏, 不足总供水量的 30%; 其他水源主要是污水处理回用和雨水利用, 早年以雨水利用为主, 近年来污水处理回用量逐年增加, 但仍不足 3%。2005–2017 年张家口市的供水总量线性拟合的一次项系数为 -2 032.20, 拟合优度的统计量确定系数 R^2 值为 0.867 4, 回归直线对观测值的拟合程度较好, 表明张家口市的供水总量总体呈现下降趋势。

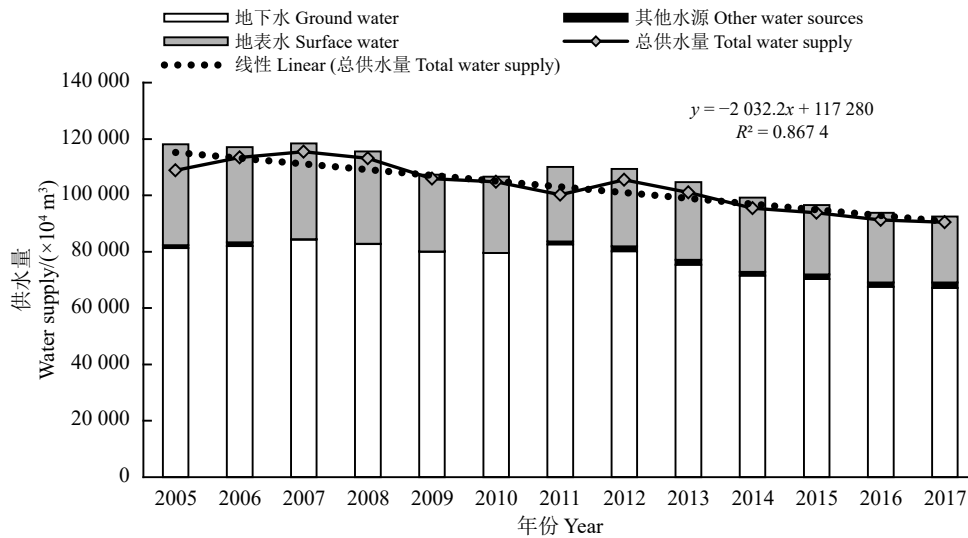


图 1 2005–2017 年张家口市供水结构演变特征

Figure 1 Evolution of water supply structure characteristics in Zhangjiakou City from 2005 to 2017

2.1.1 供水结构空间变化分析

根据张家口市 2005 年和 2017 年县域尺度的供水量、供水结构和空间分布 (图 2) 可知, 张家口市永定河流域尤其是市辖区及其周边区 (县) 单位面积的供水量较大, 是张家口市水资源量最为丰

富、社会经济也最为发达的区域。供水结构总体特征是以地下水为主, 地表水为辅, 其他水源极少。对比 2005 年和 2017 年的供水结构, 2005 年地表水的比重明显较高, 表明地表水资源愈发匮乏, 张北地区康保和沽源等区 (县) 2005 年还有

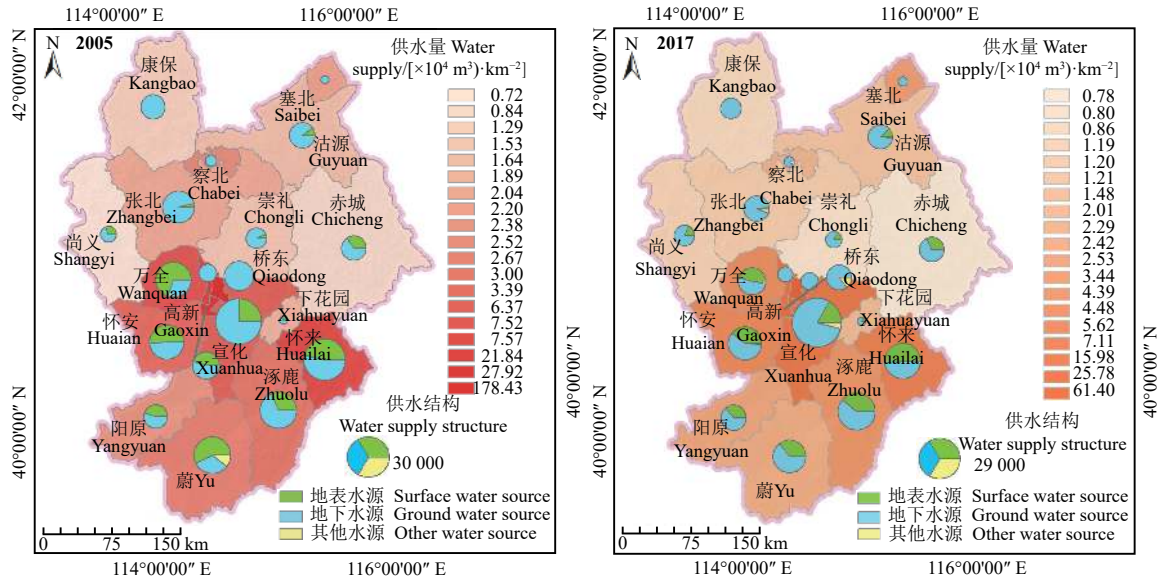


图 2 2005 和 2017 年张家口市单位面积供水量与县域尺度供水结构分布

Figure 2 Water supply per unit area and water supply structure at the county scale of Zhangjiakou City in 2005 and 2017

50%的水源依赖于地表水，到2017年几乎全靠地下水水源供给。供水量的空间差异扩大；其他水源的供给明显增加。

2.1.2 用水结构时间变化分析

张家口市的用水分为农业用水、工业用水、生活用水和生态与环境补水量 4 种类型，其用水结构演变特征如图 3 所示。张家口市的农业用水量最大，占到总用水量的 80%左右，随着时间的变化，农业用水的总量和比重都在降低，工业用水和生活用水的比重在增加。在 2005-2010 年的用水统计中，没有单独统计生态与环境补水量，但

生活用水中统计了城市环境和农村生态用水量，将其归入生态与环境补水量，以便与 2011-2017 年用水指标一致，生态与环境补水量近年来增加明显，但用水总量和所占比重都不大。2005-2017 年张家口市的供水总量线性拟合的一次项系数为 -2045.20，拟合优度的统计量确定系数 R² 值为 0.871 7，回归直线对观测值的拟合程度较好，表明张家口市的用水总量总体呈现下降趋势。

2.1.3 用水结构空间变化分析

根据张家口市 2005 年和 2017 年县域尺度的用水量和用水结构和空间分布 (图 4) 可知，张家口市

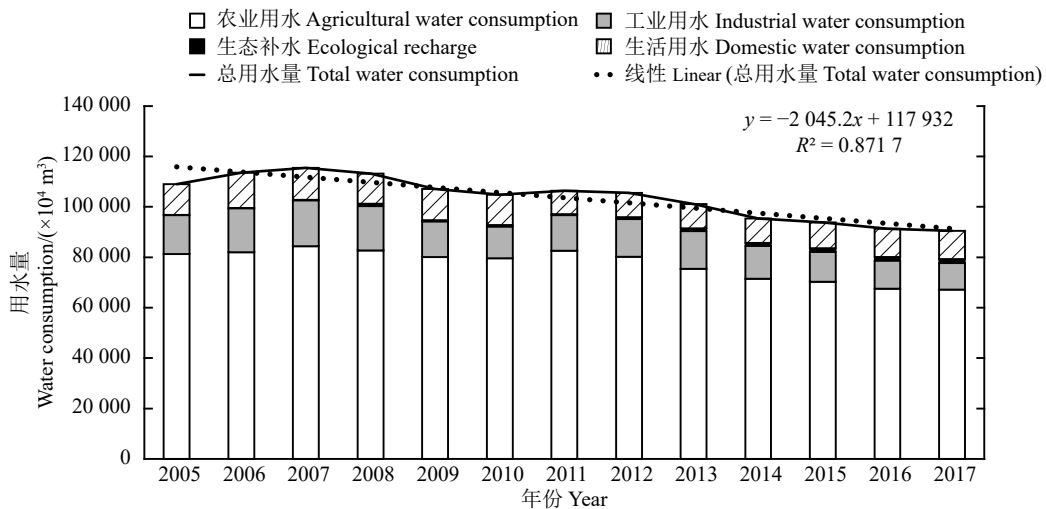


图 3 2005 - 2017 年张家口市用水结构演变特征

Figure 3 Evolution of water consumption structure characteristics in Zhangjiakou City from 2005 to 2017

用水量与供水量相对应，永定河流域尤其是市辖区及其周边区县单位面积的用水量较大。用水结构总体特征是农业用水量最大，工业用水量次之，生活用水最小，但具体到各区县，市辖区各区县的工业用水比重大于居民生活用水比重，其他外围区县居民生活用水比重大于工业用水比重。对比 2005 年和 2017 年的供水结构空间分布，工业用水的比重各区县均有减少，而工业产值却在增加，这是因为随着技术革新，单位产值耗水量在减少。

2.2 用水结构的信息熵和均衡度分析

根据张家口市 2005–2017 年的各用水类型用水量比重数据，利用前述公式 (1) 和 (2)，计算得到各个年份的信息熵和均衡度数值，绘制出张家口市 2005–2017 年用水结构的信息熵和均衡度统计图 (图 5)。

张家口市 2006–2011 年均衡度大幅下降，说明用水结构极不均衡，这是源于 2011 年以前生态环境用水量远小于农业、工业和生活用水，并且农业用水比重增加，工业用水比重减少，用水结

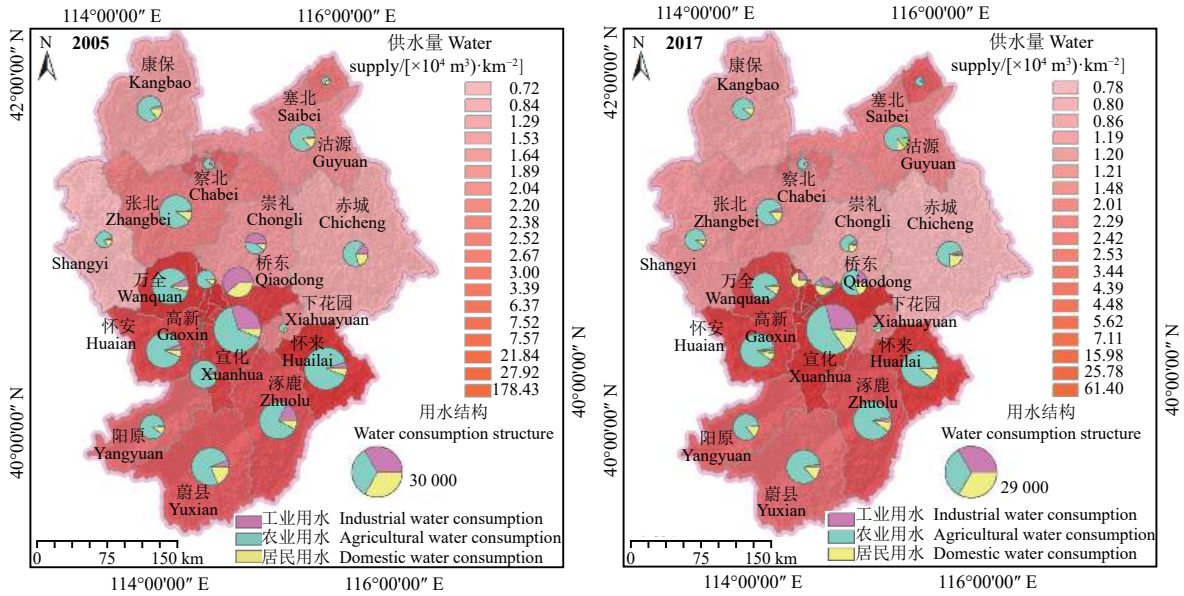


图 4 2005 和 2017 年张家口市单位面积用水量与县域尺度用水结构分布

Figure 4 Water consumption per unit area and water consumption structure at the county scale of Zhangjiakou City in 2005 and 2017

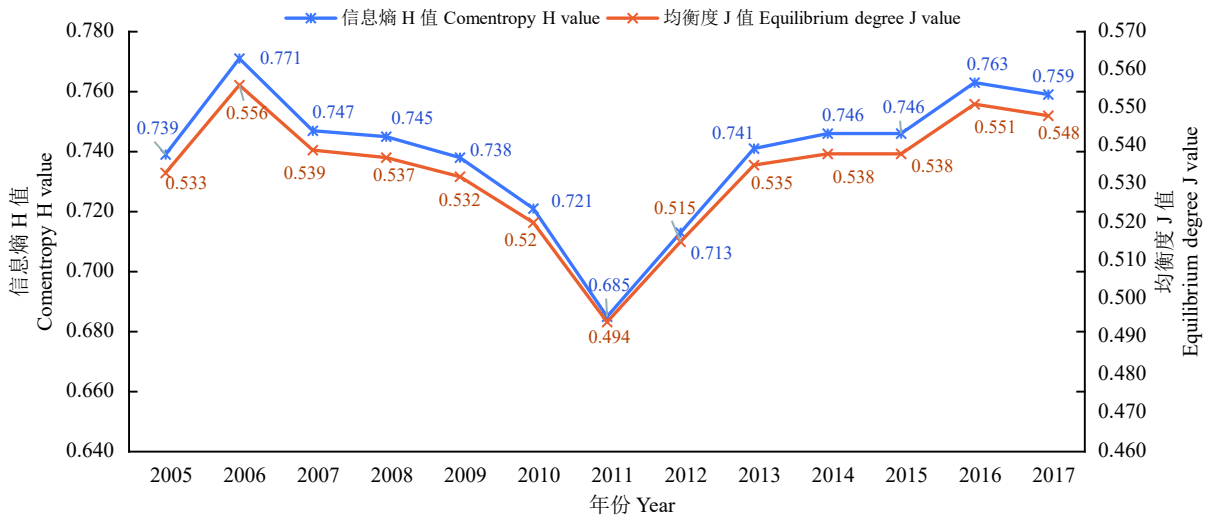


图 5 2005–2017 年张家口市用水结构信息熵和均衡度统计

Figure 5 Entropy and equilibrium degree of water structure in Zhangjiakou City from 2005 to 2017

构失衡。2011–2017 年用水均衡度快速增长，用水结构朝着均衡方向发展，2017 年的用水结构均衡度 J 值为 0.548，远小于 J 值为 1 时系统稳定的理想状态，用水结构调整的空间仍然很大。

2.3 用水结构时空演变驱动力分析

供用水条件受到自然条件约束，同时也受到经济社会和生态环境的影响^[1]。从自然条件、经济社会和生态环境方面选取具有代表性的驱动子因子，采用灰色关联分析方法定量分析张家口市用水结构演变的驱动力。根据用水量时间序列和驱动子因子时间序列取值，按照前述公式 (5) 极差化法标准化，计算各驱动子因子的关联系数和关联度，并把关联度强度分为 3 个等级：0~0.35 为弱关联度，0.35~0.65 为中关联度，0.65~1.0 为强关联度 (表 1)。

从单个因子来看，有效灌溉面积和第二产业增加值的关联强度等级为“强”，其他驱动子因子的关联强度等级为“中”。有效灌溉面积的关联度最大，

灰色关联度 γ 值为 0.688 2，农业用水是张家口市的用水大户，而又以灌溉用水最为突出，虽然农业用水的总量和比重都在降低，但由于节水灌溉技术的发展，有效灌溉面积呈增长趋势。随着第二、三产业的比重增大，产业结构调整对用水结构演变的驱动力增强，用水结构演变与第二产业增加值的关联度 γ 值为 0.667 4。生活用水驱动因子中的总人口数、农业用水驱动因子中的农作物总播种面积和粮食产量等驱动子因子、自然条件因子中的年降水量也表现出较高的关联度，其灰色关联度分别为 0.648 9、0.636 6、0.616 6 和 0.619 5。生态环境因子中的园林绿地面积和公园绿地面积与用水结构演变的关联度也较高。人口的增加、城市规模扩大和生态环境的改变，使生活用水量和生态环境用水量增加，进而影响到用水结构的演变。另外，随着供需矛盾的日益突出，用水定额和灌溉定额将对用水结构的演变起到越来越重要的影响。

表 1 用水结构演变驱动因子及灰色关联度
Table 1 Driving force and Grey correlation degree of water consumption structure evolution

因子类别 Factor type	驱动子因子 Driving subfactor	灰色关联度 γ_i	Grey correlation degree γ_i	关联强度 Correlation strength
自然条件因子 Natural factor	年降水量 Annual precipitation/mm	γ_1	0.619 5	中 Medium
	年蒸发量 Annual evaporation/mm	γ_2	0.607 9	中 Medium
	农作物总播种面积 Total sown area of crops/1 000 hm ²	γ_3	0.636 6	中 Medium
农业用水驱动因子 Agricultural water driving factor	有效灌溉面积 Effective irrigation area/1 000 hm ²	γ_4	0.688 2	强 Strong
	肉类总产量 Total meat production/t	γ_5	0.607 1	中 Medium
	粮食产量 Grain yield/t	γ_6	0.616 6	中 Medium
社会经济因子 Socioeconomic factor	第二产业增加值 Secondary industry added value/hundred million RMB	γ_7	0.667 4	强 Strong
	工业废水排放量 Industrial wastewater discharge/10 ⁴ t	γ_8	0.555 4	中 Medium
	总人口数 Total population/Ten thousand	γ_9	0.648 9	中 Medium
生活用水驱动因子 Domestic water driving factor	城镇人口比重 Proportion of urban population/%	γ_{10}	0.555 4	中 Medium
	园林绿地面积 Garden green area/hm ²	γ_{11}	0.607 8	中 Medium
	公园绿地面积 Park green area/hm ²	γ_{12}	0.607 8	中 Medium
生态环境因子 Eco-environmental factor	城市污水排放量 Urban sewage discharge/10 ⁴ t	γ_{13}	0.578 5	中 Medium

3 结论

本研究以张家口市气象数据、水资源及其供给利用数据、社会经济数据和水环境状况数据为基础,借助于数理统计和空间统计制图、信息熵与均衡度、灰色关联模型对供用水结构时空演变及驱动力进行研究,结果表明:

1)张家口市地表水源匮乏,占到总供水量比例少于30%。随着时间的变化,地下水的供水比重在逐步增加。近年来污水处理回用量和雨水利用逐年增加,但仍不足3%。张家口市的供水总量总体呈现下降趋势,且供水量的空间差异在扩大。

2)张家口市农业用水量最大,占到总用水量的80%左右,随着时间的变化,农业用水的总量和比重都在降低,工业用水和生活用水的比重在增加,生态与环境补水量近年来也明显增加,但其用水总量和所占比重都不大。张家口市的用水总量总体上呈现下降趋势。对比2005年和2017年的供水结构空间分布,工业用水的比重各区

(县)均有减少,而工业产值却在增加,随着技术革新,单位产值耗水量减少了。

3)张家口市2006–2011年均衡度大幅下降,说明用水结构极不均衡。2011年以前生态环境用水量远小于农业、工业和生活用水,并且农业用水比重增加,工业用水比重减少,用水结构失衡。2011–2017年用水均衡度快速增长,用水结构朝着均衡方向发展,信息熵和均衡度的数值均处于较低水平,用水结构调整的空间仍然很大。

4)从单个因子来看,有效灌溉面积和第二产业增加值的关联强度等级为“强”,其他驱动子因子的关联强度等级为“中”;生活用水驱动因子中的总人口数、农业用水驱动因子中的农作物总播种面积和粮食产量等驱动子因子、自然条件因子中的年降水量也表现出较高的关联度;生态环境因子中的园林绿地面积和公园绿地面积与用水结构演变的关联度也较高。人口的增加、城市规模扩大和生态环境的改变,使生活用水量和生态环境用水量增加,成为用水结构的演变重要驱动因素。

参考文献 References:

- [1] 何国华. 我国北方地区水土资源空间优化及其生态效应系统评价. 北京: 中国水利水电科学研究院博士学位论文, 2019.
HE G H. Evaluation of spatial optimization of land and water resources in northern China and its ecological effects. PhD Thesis. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2019.
- [2] 翟远征, 王金生, 郑洁琼, 郇环. 北京市近30年用水结构演变及驱动力. *自然资源学报*, 2011, 26(4): 635-643.
ZHAI Y Z, WANG J S, ZHENG J Q, HUAN H. Evolution and driving forces of water consumed structure in Beijing during the past 30 years. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26(4): 635-643.
- [3] 刘晶, 鲍振鑫, 刘翠善, 王国庆, 刘悦, 王婕, 管晓祥. 近20年中国水资源及用水量变化规律与成因分析. *水利水运工程学报*, 2019(4): 31-41.
LIU J, BAO Z X, LIU C S, WANG G Q, LIU Y, WANG J, GUAN X X. Change law and cause analysis of water resources and water consumption in China in past 20 years. *Hydro-Science and Engineering*, 2019(4): 31-41.
- [4] 金菊良, 崔毅, 杨齐祺, 吴成国, 潘争伟. 山东省用水总量与用水结构动态关系分析. *水利学报*, 2015, 46(5): 551-557.
JIN J L, CUI Y, YANG Q Q, WU C G, PAN Z W. Dynamic relationship analysis between total water consumption and water utilization structure in Shandong Province based on the VAR model. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2015, 46(5): 551-557.
- [5] 胡德秀, 熊江龙, 刘铁龙, 李立, 张艳. 基于生态位及其熵值模型的陕西省渭河流域用水结构特征. *水利水电技术*, 2018, 49(11): 137-143.
HU D X, XIONG J L, LIU T L, LI L, ZHANG Y. Ecological niche and its entropy model-based characteristics of water consumption structure of Weihe River Basin in Shaanxi Province. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2018, 49(11):

- 137-143.
- [6] 鲍超. 中国城镇化与经济增长及用水变化的时空耦合关系. *地理学报*, 2014, 69(12): 1799-1809.
BAO C. Spatio-temporal coupling relationships among urbanization economic growth and water use change in China. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(12): 1799-1809.
- [7] LU S B, ZHANG X L, BAO H J, Martin Skitmore. Review of social water cycle research in a changing environment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 63: 132-140.
- [8] 陈园, 孔祥任, 王通, 张金涛. 基于洛伦兹曲线和基尼系数的惠州市用水结构分析. *人民珠江*, 2020, 41(3): 37-41, 65.
CHEN Y, KONG X Q, WANG T, ZHANG J T. Analysis of water utilization structure in Huizhou based on Lorenz Curves and Gini Coefficients. *Renmin Zhujiang*, 2020, 41(3): 37-41, 65.
- [9] 易晶晶, 陈志和, 杨创鹏, 李远青. 基于信息熵原理的区域用水结构时空演变特征研究. *水文*, 2019, 39(4): 12-17.
YI J J, CHEN Z H, YANG C P, LI Y Q. Analysis of spatiotemporal characteristics of regional water utilization structure based on information entropy. *Journal of China Hydrology*, 2019, 39(4): 12-17.
- [10] 张志彬, 胡继连. 山东省用水结构演变及驱动因子分析. *山东农业大学学报(社会科学版)*, 2019(4): 60-65.
ZHANG Z B, HU J L. Evolution of water consumption structure and analysis of driving factors in Shandong Province. *Journal of the Shandong Agricultural University (Social Science Edition)*, 2019(4): 60-65.
- [11] 陈秀芬. 基于信息熵的厦门市用水结构演变及其驱动力的灰色关联分析. *水资源与水工程学报*, 2013, 24(2): 188-191.
CHEN X F. Analysis of grey relation degree based on water utilization evolution and driving force of information entropy in Xiamen. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2013, 24(2): 188-191.
- [12] 雷欢, 张鑫. 陕西省近 10 年用水结构演变及驱动力分析. *水资源与水工程学报*, 2012, 23(4): 125-128.
LEI H, ZHANG X. Analysis on water use structure change and its driving forces during last 10 years in Shaanxi Province. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2012, 23(4): 125-128.
- [13] 马黎华, 康绍忠, 粟晓玲. 西北干旱内陆区石羊河流域用水结构演变及其驱动力分析. *干旱地区农业研究*, 2008(1): 125-130.
MA L H, KANG S Z, SU X L. Study on evolution and its driving forces of water utilization structure of Shiyang River Basin in Northwest arid areas. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2008(1): 125-130.
- [14] 张良, 原彪, 原莉颖. 张家口市水资源状况及开发利用建议. *海河水利*, 2009(12): 20-22.
ZHANG L, YUAN B, YUAN L Y. Water resources situation and development and utilization suggestion of Zhangjiakou. *Haihe Water Resources*, 2009(12): 20-22.
- [15] 李庆旭, 张彪, 史芸婷, 郑好. 张承地区生态系统服务及其区域关联分析. *生态与农村环境学报*, 2017, 33(1): 38-46.
LI Q X, ZHANG B, SHI Y T, ZHENG H. Key ecosystem services and their regional flow in Zhangjiakou-Chengde region. *Journal of Ecology and rural Environment*, 2017, 33(1): 38-46.

(执行编辑 苟燕妮)