

基于信息熵原理的区域用水结构时空演变特征研究

易晶晶¹, 陈志和², 杨创鹏¹, 李远青¹

(1.广东省水文局佛山水文分局, 广东 佛山, 528000; 2.中山大学土木工程学院, 广东 广州, 512275)

摘 要:用水结构是社会经济发展对水资源需求差异的集中体现。选取广东省 1980~2015 年用水数据,运用信息熵理论研究该区域用水结构时空演变特征,并采用重心模型进行验证。研究表明:(1)1980~2015 年间,广东省用水结构信息熵总体呈上升趋势,用水系统的稳定性和均衡性增强;(2)用水结构空间演变呈现显著的区域性差异,用水结构信息熵重心逐步向珠三角地区转移。农业用水重心逐步向粤北地区转移,工业用水、生活用水和城镇公共用水重心逐步向珠三角地区转移。

关键词:用水结构;信息熵;重心模型;时空演变特征

中图分类号:TV213.4

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2019)04-0012-06

快速的城市化,伴随着经济总量和用水总量的持续增长、第二、三产业比重的增加、人口的不断聚集以及耕地林地的不断缩减^[1]。受到社会经济、用水效率、科技水平、资源禀赋、政策导向等多要素的交互作用,用水结构发生显著变化,不确定性突出。在城市化进程中的不同发展阶段,用水结构及其演变特征逐渐成为国内外学者的研究热点。

当前对于用水结构演变趋势的研究,经历了从定性分析到定量识别的发展过程。翟远征等^[2]通过分析近 30 年北京市社会经济各部门用水量和用水结构的变化,识别了用水量和用水结构变化驱动因素,并对未来用水量和用水结构的演变作出了预测。金菊良等^[3]通过构建山东省用水结构与用水总量之间的向量自回归模型,揭示了用水结构与用水总量间的动态变化关系;Wang 等^[4]引入信息熵作为综合指标对用水结构进行量化,研究得出中国海河流域用水结构趋于均衡和稳定。Zhang 等^[5]运用信息熵分析了天津市用水结构的演化规律并运用灰色关联度识别了驱动因子。部分学者利用灰色关联模型、集对分析定量研究了产业结构调整与用水结构的相互变动关系,为两者的协调发展提供了科学依据^[6-7]。国外学者则更加关注产业供需水预测以及可能的影响因素对水资源可持续利用的影响^[8-9]。

综上所述,众多学者在用水结构时间演变方面做了大量研究,但在空间演变过程相关成果较少。本文选取广东省 1980~2015 年的用水数据,采用信息熵作为指标分析用水结构不确定性的时空变化特征,并利用重心模型对研究结果进行验证,以期为指导最严格水资源管理,实现区域水资源可持续利用提供理论依据与技术方法。

1 研究区域与方法

1.1 区域概况

广东省(109°40'~117°20'E, 20°12'~25°31'N)是我国改革开放的前沿阵地,也是中国经济最发达的省份之一,囊括了珠江三角洲、粤东、粤西以及粤北四大片经济区域(见图 1)。长期以来,广东省经济按四大片区发展,区域空间的经济差异显著^[10]。研究表明,广东省产业结构发展水平已逐渐形成以珠三角为核心,依次向四周递减的空间格局^[11]。广东省三产结构从 1980 年的 33.2:41.1:25.7 调整为 2015 年的 4.6:44.6:50.8,支柱产业从第二产业向第三产业转变,第一产业所占比重下降到较低水平。随着用水对象发生显著变化,用水结构也发生变化,农业用水比例大幅下降,工业用水比例显著上升,全省的农业、工业、城镇公共、生活用水比例由 1980 年的 88.7:4.7:0.5:6.1 变化为 2015 年的

收稿日期:2018-09-06

基金项目:广东省自然科学基金项目(2014A030313102)

作者简介:易晶晶(1993-),女,湖北宜昌人,硕士研究生,主要从事水文水资源研究。E-mail:pmzxmine@foxmail.com

51.2:25.4:6.5:15.7。

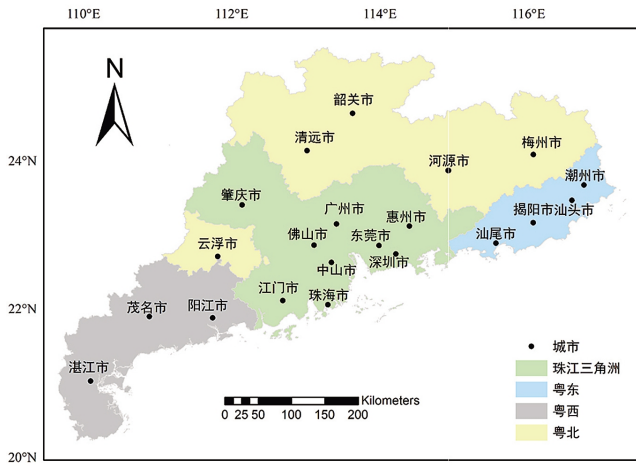


图1 广东省地理位置示意图

Fig.1 The map of Guangdong province

1.2 研究方法

1.2.1 信息熵理论

1948年,Shannon首次将热力学中的熵引入到信息论中,用以衡量系统的信息量、稳定程度和不确定性,表征复杂系统结构的演变特征^[12-14]。随着经济社会快速发展,我国用水结构发生了显著变化,从解放初期农业用水为主的初级阶段发展到农业、工业、生活用水趋于合理的高级阶段^[15]。为直观地反映这一演变过程,本文利用信息熵可以表征系统演变特征的原理,研究广东省用水结构的时空演化规律。

设在一定的时间尺度内,用水系统总用水量为 Q ,共有 N 种用水类型, q_i 为每种用水类型相应的用水量 $\{q_1, q_2, \dots, q_N\}$ ($N \geq 2$), p_i 为每种类型相应的用水比例 $\{p_1, p_2, \dots, p_N\}$ ($0 \leq p_i \leq 1, i=1, 2, \dots, N$),即 $p_i = q_i / Q$,并满足条件 $\sum_{i=1}^N p_i = 1$ 。则用水结构的信息熵 $H(\text{nat})$ 为:

$$H = - \sum_{i=1}^N p_i \ln p_i \quad (1)$$

当各计算单元用水类型相同,即 $p_1 = p_2 = \dots = p_N = 1/N$,系统结构达到最有序的状态且 $H_{\max} = \ln N$;相反,当只有一种用水类型的时候,系统处于极其简单的状态,得到其最小信息熵 $H_{\min} = 0$ 。但实际情况中,该情形不可能发生,因此用水结构信息熵总是遵循着这样的标准: $H_{\min} \leq H \leq H_{\max}$ 。对熵进行标准化,即可以得到均衡度指数 J 。均衡度 J 越大,各部门的用水量越趋于均衡,单一用水类别的优势度越小,用水系统的结构更加复杂和稳定,用水系统往良性循环的方向演化。

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

1.2.2 重心模型

重心概念源于物理学,是指在空间上存在某一点,在该点前后左右各方向上的力量保持相对均衡。为进一步揭示用水结构的时空演变特征,本文采用重心模型确定研究区域用水结构重心的空间位置以及其在时程上的空间移动方向,解析用水结构信息熵以及各部门用水比例变动的空间格局演变规律,揭示区域用水结构的变化轨迹和均衡程度^[16]。假设某一区域由 n 个平面单元组成,其中第 i 个平面单元的重心坐标为 (X_i, Y_i) , T_{ij} 为 j 年 i 区域的属性值。其重心坐标为:

$$X_j = \sum_{i=1}^n (T_{ij} * X_i) / \sum_{i=1}^n T_{ij} \quad (3)$$

$$Y_j = \sum_{i=1}^n (T_{ij} * Y_i) / \sum_{i=1}^n T_{ij} \quad (4)$$

式中:若属性值 T_{ij} 为空间单元面积,则 (X_j, Y_j) 为该区域的几何中心。同理,调整空间单元的属性值为用水比例,则表示为 i 区域第 j 年的用水重力坐标。重心的移动轨迹可以通过移动距离、移动方向来刻画。本文 n 为广东省21个地市。

1.3 数据来源

本文采用的1980~2000年和2000~2015年用水资料分别来源于《广东省水资源综合规划》^[17]和《广东省水资源公报》^[18]。1980~2000年,广东省用水数据统计按“原口径”分类,即农业、工业、生活进行分类统计,且每5年一个数据;2000~2015年按生活、生产、生态(环境)3大类进行分类统计,为逐年数据。本文根据行业用水分析的需要,将1980~2000年的数据转换至新口径。

2 结果与讨论

2.1 用水结构演变特征分析

分析广东省36年来总用水量以及农业、工业、城镇公共、生活、生态五大类用水的变化情况(见图2)。广东省用水总量整体逐年增长,由1980年的 $324.78 \times 10^8 \text{m}^3$ 增加到2015年的 $443.07 \times 10^8 \text{m}^3$,年平均增长率为0.89%;用水结构在1980~2015年间发生了较大的变化,农业、工业、城镇公共、生活用水比例由1980年的88.7:4.7:0.5:6.1变化为2015年的51.2:25.4:6.5:15.7。农业用水比重大幅下降,工业用水比重增加,生活用水比重逐渐占据主要地位,各类用水比例趋于均衡。对于工业发达的珠三角地区,工业用水比例已超过农业用水比例。

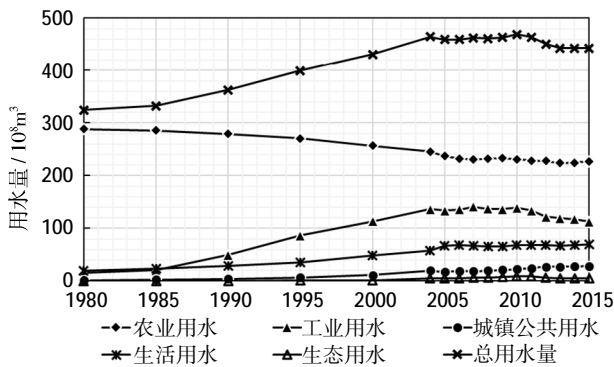


图2 广东省历年用水量变化过程

Fig.2 The annual water consumption of Guangdong province

2.2 用水结构时空演变特征

2.2.1 用水结构时间变化分析

分析 1980~2015 年间,广东省用水结构信息熵值变化特征(见图 3),广东省用水结构信息熵总体呈先持续增长后趋于稳定的变化趋势。用水结构信息熵、均衡度分别从 1980 年 0.451 和 0.280 增长到 2005 年 1.152 和 0.716,信息熵增长速率为 0.048/a;2005 年后信息熵值用水结构信息熵、均衡度缓慢增长为 1.212 和 0.753。根据信息熵值的概念,用水结构信息熵值越大,表明用水系统中单一用水结构占比下降,用水系统的均衡性和稳定性增强。分析广东省用水结构在

1980~2015 年间的变化情况,用水量由单一以农业用水为主逐步调整为各部门用水比较均匀,信息熵也相应逐步增大。

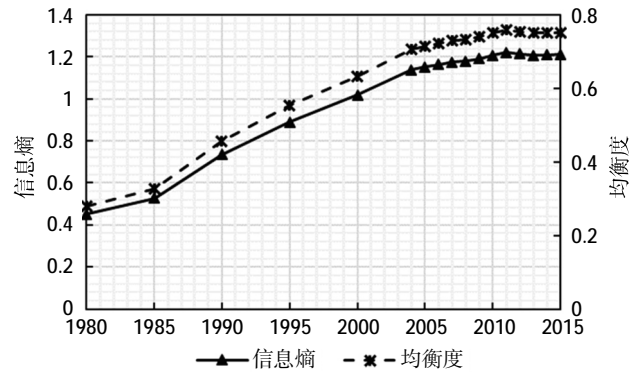


图3 广东省用水结构信息熵和均衡度

Fig.3 The information entropy and balance degree of water utilization structure in Guangdong province

2.2.2 用水结构空间变化分析

广东省各片区用水结构信息熵在不同时间点(1980 年,1990 年,2000 年,2005 年,2010 年,2015 年)的空间分布见图 4。1980~2000 年,广东省各片区用水结构信息熵普遍较低,主要由于农业用水比重大,而其他部门用水比例较小;2000~2015 年,四个片区用水结构信息熵值逐步增大,尤其是珠江三角洲和

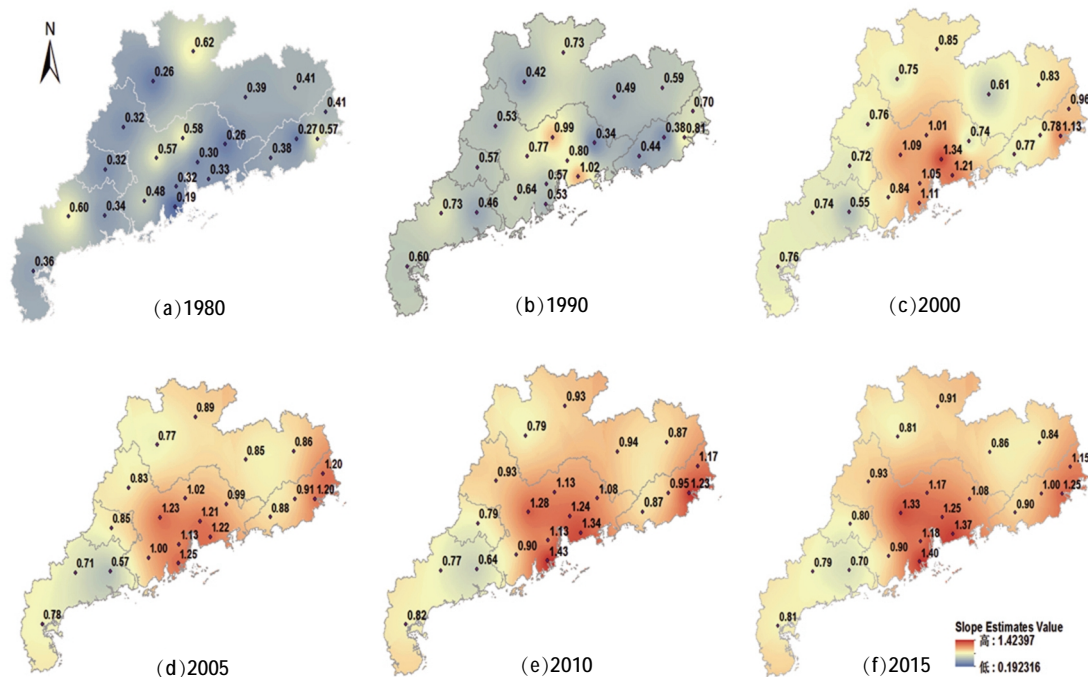


图4 广东省用水结构信息熵空间分布图

Fig.4 The distribution of the information entropy of the water utilization structure in Guangdong province

粤东部分地区用水结构信息熵进入高值区。相比之下,粤北和粤西用水结构信息熵增长幅度较小,低值区主要集中在这两个区域,且区域范围长期处于相对稳定的状态;到2015年,珠三角和粤东地区用水结构信息熵大于1,分别为1.339和1.091,粤东和粤西地区的用水结构信息熵值分别为0.859和0.782。分析原因,珠三角地区农业用水比例不断下降,工业用水比例上升后维持在稳定状态,生活用水比重和城镇公共用水比重持续上升,农业用水比例从1980年的88.5%下降到2015年的32.2%,工业用水比例从5.5%增长到2015年的38.1%,各部门用水比重逐步趋于均衡;粤东地区人口总量较大,生活用水比例较高,从1980年的8.3%上升到2015年的20.9%,用水比例相对均衡;粤西、粤北地区农业用水比例依然占支配地位,工业用水比例较小,2015年两大片区的农业用水比例为76.9%和72.9%,工业用水比例为6.5%和14.6%,用水结构信息熵值相对较低。

2.3 用水结构重心转移过程

为了进一步验证广东省用水结构在时空上的演变过程,本文计算了广东省用水结构信息熵、农业、工业、生活、城镇公共用水的年重心以及重心移动的距离和方向并绘制了重心移动轨迹图(见图5)。

(1)1980~1995年间,广东省用水结构信息熵重心逐步向南转移,表明该阶段南部信息熵值增长较快,各部门用水比重逐步均衡。广东省南部珠江三角洲用水结构信息熵从1980年的0.46增长到1995年的0.98,这与改革开放初期,珠三角地区大力发展工业,工业用水量急剧增加,农业用水量减少有关。1980~1995年间,珠三角工业用水比例从5.5%增长到31.4%,农业用水比例从88.5%下降到57.9%(见表1);到1995~2005年,用水结构信息熵重心折返北移。这与珠三角的珠海、东莞、佛山、中山等城市产业升级、技术革新以及人口聚集,优化产业空间结构的整体布局有关^[9]。农业用水比例从57.9%下降到45.0%,工业用水比例从31.4%上升到39.4%。2005年之后,用水结构信息熵重心再次南移且在此区域保持相对稳定。珠三角、粤东、粤西、粤北四大片区用水结构信息熵值从2005年的1.21、1.06、0.72和0.85增长到2015年的1.34、1.09、0.78和0.86,变化幅度减弱。主要原因是2005年后广东省产业结构优化调整主要表现为工业内部升级加快、服务业加速发展。农业用水比例从51.6%下降到51.2%,工业用水比例从29.2%下降到25.4%,城镇公共用水比例从3.7%上升到6.5%。可见,用水信息熵重心在不同年代间的空间转移,较好揭示了各区域各部

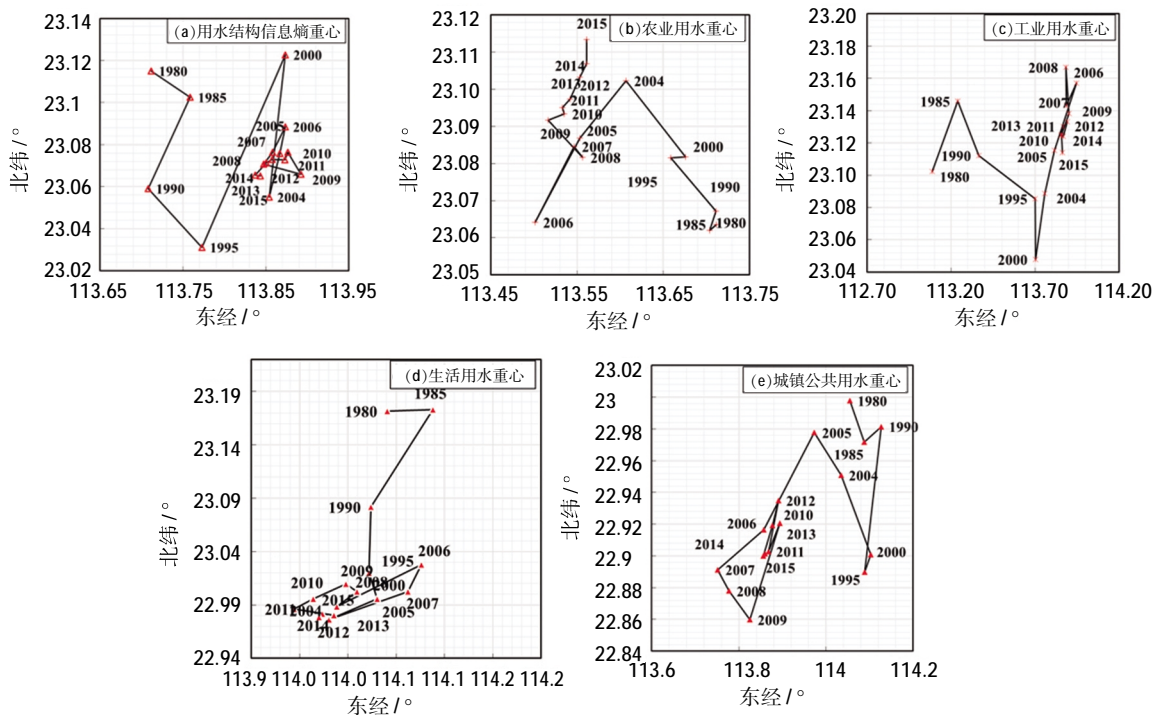


图5 1980~2015年广东省用水结构信息熵、农业、工业、生活和城镇公共用水重心转移轨迹图

Fig.5 The gravity center migration plots for the information entropy, agriculture, industrial, domestic and urban public water percentages in Guangdong province from 1980 to 2015

表1 1980~2015年广东省四大片区用水比例和信息熵

Table1 The proportions of water utilization and information entropy of the four regions in Guangdong province from 1980 to 2015

年份	珠江三角洲				粤东				粤西				粤北			
	用水比例			信息熵 (nat)	用水比例			信息熵 (nat)	用水比例			信息熵 (nat)	用水比例			信息熵 (nat)
	农业	工业	生活		农业	工业	生活		农业	工业	生活		农业	工业	生活	
1980	0.88	0.05	0.05	0.46	0.90	0.01	0.08	0.40	0.88	0.06	0.06	0.48	0.89	0.04	0.06	0.43
1985	0.86	0.07	0.06	0.54	0.87	0.02	0.10	0.48	0.86	0.08	0.06	0.54	0.86	0.06	0.08	0.51
1990	0.71	0.21	0.07	0.83	0.83	0.04	0.12	0.59	0.81	0.10	0.08	0.64	0.83	0.08	0.08	0.60
1995	0.58	0.31	0.08	0.98	0.73	0.12	0.13	0.84	0.77	0.12	0.09	0.74	0.79	0.12	0.08	0.69
2000	0.45	0.40	0.11	1.12	0.69	0.12	0.16	0.92	0.79	0.09	0.10	0.71	0.75	0.15	0.09	0.78
2005	0.33	0.46	0.15	1.21	0.60	0.14	0.22	1.06	0.79	0.06	0.13	0.72	0.72	0.16	0.10	0.85
2010	0.31	0.44	0.16	1.30	0.59	0.15	0.20	1.14	0.77	0.07	0.13	0.77	0.70	0.19	0.10	0.88
2015	0.32	0.38	0.18	1.34	0.59	0.15	0.21	1.09	0.77	0.07	0.13	0.78	0.73	0.15	0.09	0.86

门用水比重的时空变化特征。

(2) 图 5 进一步分析了各年代用水结构信息熵值与农业、工业、生活、城镇公共用水的重心转移关系。可以看出, 广东省用水结构信息熵和工业用水重心转移轨迹较为一致。1980~2005 年间, 工业用水重心和用水结构信息熵均先向南后向北偏移; 2005 年之后, 都向南偏移并保持在相对稳定的区域, 分别处在 $113^{\circ}49' \sim 113^{\circ}56'$ 、 $23^{\circ}6' \sim 23^{\circ}10'$ 和 $113^{\circ}50' \sim 113^{\circ}53'$ 、 $23^{\circ}3' \sim 23^{\circ}5'$ 的范围。这是由于珠三角工业用水比例从 1980 年的 5.5% 上升到 2015 年的 38.1%, 远远高于粤东、粤西和粤北, 加上对全国人才和经济投入形成虹吸效应, 带动生活用水比例和城镇公共用水比例同步增加, 2015 年珠江三角洲 GDP 占全省的 79.2%, 人口占全省的 54.2%, 珠三角地区用水结构达到较为均衡的状态, 用水结构信息熵重心向珠三角地区偏移。

3 结论

受社会经济发展、资源禀赋、科技水平、政策导向等影响, 区域用水结构演变存在较强不确定性。本文以广东省为研究区域, 利用 1980~2015 年用水数据, 基于信息熵理论研究了研究区用水结构的时空演变特征, 并利用重心模型进行验证, 结果表明:

(1) 1980~2015 年间, 广东省农业用水量 and 用水比例大幅下降, 工业用水及用水比例上升, 生活用水、城镇公共用水比例缓慢增加, 用水结构信息熵总体呈上升趋势, 用水比例逐步趋于均衡稳定。

(2) 广东省用水结构空间演变呈现显著的区域性差异, 受珠江三角洲经济辐射的影响, 用水结构形成以珠三角为核心的聚集区。用水结构信息熵重心逐步向

高值中心珠三角地区转移, 农业用水重心逐步向粤北地区转移, 工业、生活和城镇公共用水重心逐步向珠三角地区转移。

参考文献:

- [1] 鲍超. 中国城镇化与经济增长及用水变化的时空耦合关系[J]. 地理学报, 2014, 69(12): 1799-1809. (BAO Chao. Spatio-temporal coupling relationships among urbanization, economic growth and water use change in China [J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(12): 1799-1809. (in Chinese))
- [2] 翟远征, 王金生, 郑洁琼, 等. 北京市近 30 年用水结构演变及驱动力[J]. 自然资源学报, 2011, 26(4): 635-643. (ZHAI Yuanzheng, WANG Jinsheng, ZHENG Jieqiong, et al. Evolution and driving forces of water consumed structure in Beijing during the past 30 years [J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(4): 635-643. (in Chinese)).
- [3] 金菊良, 崔毅, 杨齐祺, 等. 山东省用水总量与用水结构动态关系分析[J]. 水利学报, 2015, 46(5): 551-557. (JIN Juliang, CUI Yi, YANG Qiqi, et al. Dynamic relationship analysis between total water consumption and water utilization structure in Shandong province based on the VAR model [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(5): 551-557. (in Chinese))
- [4] Wang X J, Zhang J Y, Yang Z F, et al. Historic water consumptions and future management strategies for Haihe River basin of Northern China [J]. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 2015, 20(3): 371-387.
- [5] Zhang C, Dong L, Liu Y, et al. Analysis on impact factors of water utilization structure in Tianjin, China [J]. Sustainability, 2016, 241: 1-11.
- [6] 贾程程, 张礼兵, 徐勇俊, 等. 基于信息熵的山东省用水结构与产业结构协调性分析[J]. 水电能源科学, 2016, 34(5): 17-19. (JIA Chengcheng, ZHANG Libing, XU Yongjun, et al. Study on water consumption structure and industrial structure harmony of Shandong Province based on information entropy [J]. Water Resources and Power,

- 2016,34(5):17-19. (in Chinese)
- [7] 刘珊,吴成国,潘争伟,等. 基于集对分析的区域产业结构与用水结构协调评价[J]. 水资源保护, 2016,32(3):64-68. (LIU Shan, WU Chengguo, PAN Zhengwei, et al. Coordinate assessment of regional industrial structure and water utilization structure based on set pair analysis [J]. Water Resources Protection, 2016,32(3):64-68. (in Chinese))
- [8] Behera U K, Panigrahi P, Sarangi A. Multiple water use protocols in integrated farming system for enhancing productivity [J]. Water Resources Management, 2012,26(9):2605-2623.
- [9] Kumar V, Del V L, Valls A, et al. Adaptation strategies for water supply management in a drought prone Mediterranean River basin: Application of outranking method [J]. Science of the Total Environment, 2016,540:344-357.
- [10] 刘冬平. 广东珠三角与粤东西北地区经济发展水平比较 [J]. 经济研究导刊, 2014,(34):35-36. (LIU Dongping. Comparison of economic development level between the Pearl River Delta and the east-west-north of Guangdong Province [J]. Economic Research Guide, 2014,(34):35-36. (in Chinese))
- [11] 赖文凤,骆晨. 广东省产业结构发展水平的空间格局研究[J]. 地域研究与开发, 2017,36(2):29-34. (LAI Wenfeng, LUO Chen. Spatial pattern of the development level of industrial structure in Guangdong Province[J]. Areal Research and Development, 2017,36(2):29-34. (in Chinese))
- [12] Liu B, Chen X, Lian Y, et al. Entropy-based assessment and zoning of rainfall distribution [J]. Journal of Hydrology, 2013,490(1):32-40.
- [13] Rodrigues D S V P, Belo Filho A F, Rodrigues Almeida R S, et al. Shannon information entropy for assessing space-time variability of rainfall and streamflow in semiarid region [J]. Science of the Total Environment, 2016,544:330-338.
- [14] 王栋,朱元胜. 信息熵在水系统中的应用研究综述 [J]. 水文, 2001,21(2):9-14. (WANG Dong, ZHU Yuansheng. Information entropy and the state-of-the-art of its application in hydrology, water resources and water environment[J]. Journal of China Hydrology, 2001,21(2):9-14. (in Chinese))
- [15] 吴丹. 中国经济发展与水资源利用的演变态势、“脱钩”评价与机理分析—以中美对比分析为例[J]. 河海大学学报(哲学社会科学版), 2016,18(1):47-53. (WU Dan. An analysis of evolution trend and decoupling evaluation mechanism of economic development and water utilization in China based on comparative analysis of China and America [J]. Journal of Hohai University (Philosophy and social sciences), 2016,18(1):47-53. (in Chinese))
- [16] Zhou H, Huang J, Yuan Y. Analysis of the spatial characteristics of the water usage patterns based on ESDA-GIS: An example of Hubei Province, China [J]. Water Resources Management, 2017,31(5):1-14.
- [17] 中山大学水资源与环境研究中心,广东省水文局,广东省水利电力勘测设计研究院. 广东省水资源综合规划 [R]. 广州: 广东省水利厅, 2009. (Water Resources and Environment Research Center of Sun Yat-sen University, Hydrology Bureau of Guangdong Province, Guangdong Water Conservancy and Electric Power Survey and Design Institute. Water resources comprehensive planning for Guangdong province [R]. Guangzhou: Water Resources Department of Guangdong Province, 2009. (in Chinese))
- [18] 广东省水利厅. 广东省水资源统计公报 (2004-2015) [R]. 2015. (Water Resources Department of Guangdong Province. Guangdong water resources bulletin (2004-2015) [R]. 2015. (in Chinese))
- [19] 林先扬. 广东产业结构调整历程与对策探讨 [J]. 广东经济, 2010, (5):40-44. (LIN Xianyang. Discussion on the course and countermeasure of industrial structure adjustment in Guangdong province [J]. Guangdong Economy, 2010,(5):40-44. (in Chinese))

Analysis of Spatiotemporal Characteristics of Regional Water Utilization Structure Based on Information Entropy

YI Jingjing¹, CHEN Zhihe², YANG Chuangpeng¹, LI Yuanqing¹

(1. Foshan Hydrology Bureau of Guangdong Province, Foshan 528000, China;

2. School of Civil Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 512275, China)

Abstract: Water utilization structure is a concentrated reflection of the demand difference in socioeconomic development on water resources. Based on the water consumption data of Guangdong Province during 1980-2015, this paper studied the spatiotemporal patterns of water utilization structure by information entropy and verified the results by gravity center model. The results show that: (1) The information entropy of water utilization structure in Guangdong Province shows an overall upward trend. The water use system tends to be more stable and balanced. (2) The evolution of water utilization in Guangdong Province shows significant regional differences, which reflects in the gravity center of information entropy gradually migrated toward the Pearl River Delta. In addition, the gravity center of industrial, domestic and urban public water use gradually migrate toward the Pearl River Delta region, while the gravity center of agricultural water utilization gradually migrate toward the north Guangdong.

Key words: water utilization structure; information entropy; gravity center model; spatiotemporal characteristics