

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2021.0009

陈美琳, 陈磊, 夏琳琳, 等. 广东省生产用水结构时空变化及影响因素[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2021, 19(1): 92-102.  
CHEN M L, CHEN L, XIA L L, et al. Spatiotemporal variations and influencing factors of productive water consumption structure in Guangdong Province[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(1): 92-102. (in Chinese)

# 广东省生产用水结构时空变化及影响因素

陈美琳<sup>1,2</sup>, 陈磊<sup>1,2</sup>, 夏琳琳<sup>1,2</sup>, 蔡宴朋<sup>1,2</sup>, 杨志峰<sup>1,2</sup>

(1. 广东工业大学环境生态工程研究院, 大湾区城市环境安全与绿色发展教育部重点实验室, 广州 510006;  
2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广州 511458)

**摘要:** 基于多区域 LMDI 方法和信息熵原理, 研究 2005—2018 年广东省 4 大区域 21 个城市生产用水结构时空演化机制, 解构人口规模、人口分布、经济发展、产业结构和用水强度等 5 个驱动因素对广东省生产用水的影响。结果表明: 广东省生产用水总量总体上呈现降低趋势, 珠三角地区降低幅度明显, 三大产业的用水强度都逐年下降, 区域间差别显著; 三大产业用水占比基本保持稳定, 珠三角地区用水结构较为均衡, 粤东北地区用水结构趋向于单一, 以第一产业用水为主; 经济发展为主导正向驱动力, 用水强度为第一负向驱动力, 产业结构为第二负向驱动力且其驱动效应逐年下降, 人口规模为正向驱动力但效应较不明显, 人口分布驱动效应最不明显, 但人口分布在珠三角城市中主要表现为正向驱动力, 在粤东北地区则呈现为负向驱动力。该研究结果对协调区域产业发展和水资源的关系, 制定合理的水资源规划具有一定的参考价值。

**关键词:** 生产用水; 用水结构; 广东省; 驱动机制; LMDI; 时空演变特征; 信息熵

中图分类号: TV 21 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



用水结构是社会经济发展对水资源需求的集中体现。目前我国多数城市的用水结构都以生产用水为最大组成部分<sup>[1]</sup>, 生产用水占比远超生活和生态用水量占比, 对区域总用水量和用水结构产生重要影响。研究生产用水结构时空演变特征及其驱动机制能为协调经济发展和水资源的关系、评估节水政策实施效果提供科学决策依据。

以下是目前国内外对用水结构的主要研究。(1) 研究产业结构和用水结构的相关性与协调度, 如: 刘洋等<sup>[2]</sup>采用产业结构和用水结构协调度等指标, 评价了京津冀产业结构和用水结构协调性, 并采用对称 Logratio 变换与偏最小二乘回归相结合的方法分析产业增加值占比与用水占比相关性; 钟科元等<sup>[3]</sup>也采用相似方法分析了福建省用水结构与产

业结构相关性。(2) 研究用水结构稳定性和均衡度, 如易晶晶等<sup>[4]</sup>通过分析用水结构信息熵均衡度发现广东省用水结构信息熵总体逐年增加, 用水系统稳定性和均衡性增强, 珠三角地区和粤东地区用水结构更趋于均衡。(3) 研究用水结构空间分布情况, 如: 张陈俊等<sup>[5]</sup>采用描述统计法, 将地域间各驱动因素的效应差值作为指标用于反映长江三角洲地区用水量时空差异; 洪思扬等<sup>[6]</sup>采用洛伦兹曲线及基尼系数相结合的方法来分析天津市用水类型空间分布特征, 发现天津市工业用水空间分布极不均衡; 易晶晶<sup>[4]</sup>通过重心模型分析发现广东省用水结构信息熵重心向珠三角地区转移, 农业用水重心向粤北地区转移, 工业用水、生活用水和城镇公共用水重心向珠三角地区转移。(4) 研究用水结构驱动机制, 如:

收稿日期: 2020-06-24 修回日期: 2020-09-14 网络出版时间: 2020-09-29

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20200928.1748.002.html>

基金项目: 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州)人才团队引进重大专项(GML2019ZD0403); 中国博士后科学基金(2020M672537)

作者简介: 陈美琳(1996—), 女, 广东揭阳人, 主要从事城市生态系统管理研究。E-mail: 2111907116@mail2.gdut.edu.cn

通信作者: 蔡宴朋(1978—), 男, 四川安岳人, 教授, 博士生导师, 主要从事水生态效应管理、气候变化适应性规划、环境能源系统分析研究。

E-mail: yanpeng.cai@gdut.edu.cn

Long 等<sup>[7]</sup>采用 LMDI 法分析 12 个驱动因素对我国用水量增长的影响;何艳虎等<sup>[8]</sup>采用主成分分析法分析来自社会经济、水文气象、农业和用水等 4 个方面 13 个因子对我国中、东、西部地区用水结构的影响,分析了最严格水资源管理制度对用水结构的影响效果;白鹏等<sup>[9]</sup>采用线性或非线性回归法分析北京市用水结构驱动因素,发现农业和工业用水减少的主要驱动因素分别为耕种面积缩减和工业节水,生活和环境用水增加的主要原因分别是人口增加和园林绿化面积增加;胡霞等<sup>[10]</sup>通过建立工业用水效率全过程驱动因子识别模型分析山东省工业用水效率,发现工艺用水是提升山东省工业用水效率的主要因子,重复用水率为次要因子,产业结构影响较小。

在研究用水结构方面,信息熵指标能较为直观地反映复杂系统结构的演变特征,如今已经被广泛应用于水资源系统分析、评价、决策等方面<sup>[4,8,11]</sup>。在驱动因素研究方面,Kaya 恒等式与 LMDI 模型(logarithmic mean Divisia index,对数平均迪氏分解法)相结合的方法在多区域、多驱动因素的影响效应定量研究中具有显著优势,且驱动因子涵盖类别较广,目前已广泛应用于用水结构的驱动机制研究<sup>[5,7,10,13-18]</sup>。如:Zhou 等<sup>[19]</sup>则采用 LMDI 法分析了 14 个驱动因子对我国 1965—2013 年农业灌溉用水、工业用水、城镇用水和农村用水等 4 个部门用水量的影响;聂志萍等<sup>[13]</sup>采用 LMDI 模型分析得出经济和技术是我国生活用水的主要驱动力,人口与产业结构为辅助驱动力;易晶晶等<sup>[14]</sup>采用 LMDI 法分析了广东省产业用水驱动机制,发现经济发展和用水强度为主要驱动力,产业结构和人口规模为次要驱动力;孙志才等<sup>[15]</sup>采用 LMDI 法对我国年三次产业用水变化进行时空分析,发现经济水平和人口规模拉动了生产用水量增加,产业结构和用水强度促进生产用水量的减少,并采用 ISODATA 聚类模型分析各因素驱动效应强弱程度时空变化情况;轩党委等<sup>[16]</sup>采用 LMDI 法评价了水资源禀赋、水资源开发利用、人口规模、经济水平、产业结构和用水效率等 6 个驱动因素对淮安市生产用水变化的影响机制。梳理文献可知,已有的用水结构驱动研究多为时间序列和单一区域层面,缺乏空间各城市间对比分析,而且传统的 LMDI 法一般选择人口规模、经济规模、产业结构和技术效应等 4 类驱动因素,较少分析人口分布因素。人口是经济发展的原驱动力,而目前区域间人口往来日益频繁,人口分布不均匀问题日益突出,间接导致地区间经济发展和用水需求的矛盾不断加大,急需相关研究探讨人口分布因

素对用水量变化的驱动机制。

广东省是我国的人口大省和经济大省,2018 年常住人口达 11 346.0 万人,全省 GDP 总量为 97 277.77 亿元<sup>[20]</sup>,都位列全国第一。同时,广东省是我国水资源总量最丰富的省区之一,但水资源时空分布不均,人均水资源占有量少。广东省各区域间人口分布极不均匀,2018 年珠三角地区常住人口达 6 300.99 万人<sup>[20]</sup>,占全省总人口 55.53%,而广州、深圳、佛山等 3 座城市常住人口总数占珠三角地区总人口数 56.87%。目前广东省产业布局已逐渐形成以珠三角为核心向四周递减的空间格局,产业发展水平的空间聚集特征明显<sup>[21-22]</sup>,生产用水结构时空演化复杂,对其生产用水结构的研究较少涉及广东省 4 大区域之间和 21 个城市之间的空间对比分析。

鉴于此,本文采用多区域 LMDI 法和信息熵原理,探讨 2005—2018 年广东省 4 大区域 21 个城市间的用水结构变化和驱动效应,在传统的 LMDI 法基础上,增加了空间因素,将区域间人口分布、经济发展差异纳入到区域总体用水驱动解析中,选用人口规模、人口分布、经济发展、产业结构和用水强度等 5 个驱动因子,探索多区域生产用水时间和空间结构变化驱动机制,以期为进一步理解广东省生产用水结构时空变化及其影响机制提供科学依据,对从宏观上准确监控水资源消耗、协调区域产业发展和水资源的关系具有一定的参考价值。

## 1 研究方法与数据来源

### 1.1 研究方法

#### 1.1.1 信息熵原理

信息熵用于反映复杂系统结构的演变特征,熵值  $H$  越高,系统中各组分占比越趋于均匀,系统更加稳定,适用于本研究探讨生产用水结构时空变化。用水结构信息熵  $H$  计算公式为

$$H = - \sum_j^n P_{ij} \ln P_{ij} \quad (1)$$

式中: $n$  为生产用水类型数量; $P_{ij}$  为  $i$  城市  $j$  类型生产用水量占该城市生产用水总量的比例。对得到的信息熵  $H$  进行均一化,得到用水结构信息熵均衡度  $J$

$$J_i = H_i / H_{i, \max} \quad (2)$$

其中  $H_{\max} = \ln n$ ,表示当各类用水类型占比一致时,用水系统结构不再具有优势类别,此时系统信息熵最大,系统达到最均衡最稳定状态。

#### 1.1.2 LMDI 分解法

LMDI 方法由 Ang<sup>[23-24]</sup>提出,最早用于能源强

度变化驱动效应分析,随后广泛应用于用水结构驱动机制研究。LMDI 法具有无残差、结果唯一、计算简易等优点。本文采用 LMDI 法加法模型,在传统的因素分解思路上引入空间因素,共设定 5

个驱动因素,具体公式如公式(3),相关变量描述见表 1。

$$W = \sum_{ij} W_{ij} = \sum_{ij} P \times \frac{P_i}{P} \times \frac{G_i}{P_i} \times \frac{V_{ij}}{G_i} \times \frac{W_{ij}}{V_{ij}} \quad (3)$$

表 1 生产用水 LMDI 分解模型变量描述

Tab. 1 The interpretation of variables in the LMDI decomposition model for productive water

变量	变量描述	变量	变量描述
$i$	城市数量	$G_i$	$i$ 城市生产总值/亿元
$j$	产业类型 $j$	$S_i$	$i$ 城市占总人口比重, $S_i = P_i/P$
$W$	生产用水总量/亿 $m^3$	$s_{ij}$	$i$ 城市 $j$ 产业增加值占生产总值比重, $s_{ij} = V_{ij}/G_i$
$W_{ij}$	$i$ 城市 $j$ 产业生产用水量/亿 $m^3$	$V_{ij}$	$i$ 城市 $j$ 产业增加值/亿元
$P$	区域总人口数/万人	$q_i$	$q_i = G_i/P_i$ , $i$ 城市人均生产总值/万元
$P_i$	$i$ 城市人口数/万人	$I_{ij}$	$I_{ij} = W_{ij}/V_{ij}$ , $i$ 城市 $j$ 产业用水强度/( $m^3 \cdot 元^{-1}$ )

令基期的生产用水总量为  $W_0$ , 其后  $T$  年的生产用水总量为  $W_T$ , 则在  $T$  年时生产用水总量变化  $\Delta W$  可分解为

$$\Delta W = W_T - W_0 = \Delta W_{po} + \Delta W_{pd} + \Delta W_{ec} + \Delta W_{st} + \Delta W_{in} \quad (4)$$

式中:

$$\Delta W_{po} = \sum_{ij} \left( \frac{W_{T,ij} - W_{0,ij}}{\ln W_{T,ij} - \ln W_{0,ij}} \right) \ln(P_T/P_0) \quad (5)$$

$$\Delta W_{pd} = \sum_{ij} \left( \frac{W_{T,ij} - W_{0,ij}}{\ln W_{T,ij} - \ln W_{0,ij}} \right) \ln(S_{T,i}/S_{0,i}) \quad (6)$$

$$\Delta W_{ec} = \sum_{ij} \left( \frac{W_{T,ij} - W_{0,ij}}{\ln W_{T,ij} - \ln W_{0,ij}} \right) \ln(q_{T,i}/q_{0,i}) \quad (7)$$

$$\Delta W_{st} = \sum_{ij} \left( \frac{W_{T,ij} - W_{0,ij}}{\ln W_{T,ij} - \ln W_{0,ij}} \right) \ln(s_{T,ij}/s_{0,ij}) \quad (8)$$

$$\Delta W_{in} = \sum_{ij} \left( \frac{W_{T,ij} - W_{0,ij}}{\ln W_{T,ij} - \ln W_{0,ij}} \right) \ln(I_{T,ij}/I_{0,ij}) \quad (9)$$

式中:  $\Delta W_{po}$  指人口规模效应,代表人口总体规模对生产用水量的影响,亿  $m^3$ ;  $\Delta W_{pd}$  指人口分布效应,代表常住人口在各区域的分布情况对生产用水量的影响,亿  $m^3$ ;  $\Delta W_{ec}$  指经济发展效应,代表各区域经济发展水平对生产用水量的影响,亿  $m^3$ ;  $\Delta W_{st}$  指产业结构效应,代表产业结构变动对生产用水量的影响,亿  $m^3$ ;  $\Delta W_{in}$  指用水强度效应,代表各产业用水强度对生产用水量的影响,亿  $m^3$ ; 公式中其余变量含义参见表 1。若效应为正值,则代表该因素的变化促使生产用水量增加,为正向驱动力;反之,则为负向驱动力。

### 1.2 案例区与数据来源

本文选取广东省作为案例区,广东省共 21 个城市,分为珠三角地区、粤北地区、粤西地区和粤东地区等 4 个区域,其中:珠三角共 9 个城市,为广州、深圳、佛山、东莞、中山、珠海、惠州、江门、肇庆;粤东共

4 个城市,分别为汕头、潮州、揭阳、汕尾;粤西共 3 个城市,分别为湛江、茂名、阳江;粤北共 5 个城市,分别为韶关、清远、梅州、河源、云浮。

采用 2005—2018 年广东省社会经济相关数据和各产业生产用水数据,其中,人口指标、产业增加值指标的数据来源于 2006—2019 年《广东省统计年鉴》<sup>[20]</sup>,人口指标采用“常住人口”<sup>[15]</sup>。为消除价格因素影响,各市三次产业增加值均按照 2005 年不变价格进行调整,调整后三次产业增加值之和作为地区生产总值,产业结构由三大产业增加值占比表示。

各产业生产用水指标来源于 2006—2019 年《广东省水资源公报》<sup>[25]</sup>。水资源公报中用水量是按农业、工业、生活和生态环境等 4 个部门统计,其中,城镇生活用水由居民生活用水和公共用水(含建筑业,以及第三产业,即商业贸易、餐饮住宿、交通运输、机关团体等服务行业用水)组成<sup>[25]</sup>,用水量统计与三次产业口径并不对应,需进行相应调整。大部分已有产业用水结构研究都直接将农业用水与第一产业用水对应,工业用水与第二产业用水对应<sup>[2]</sup>,而第三产业用水量数据选取的间接渠道较多,如张陈俊等<sup>[5]</sup>近似地将生活用水直接作为第三产业用水,蒋磊等<sup>[26]</sup>将地区生活用水量与家庭生活取水量估计值之差作为第三产业用水,刘洋等<sup>[2]</sup>将《中国城市建设统计年鉴》城市供水中的“公共服务用水”和“其他用水”之和作为第三产业用水。本文通过调整,选取农业用水作为第一产业用水、工业用水作为第二产业用水。考虑到城镇生活用水的公共用水中建筑业用水量较少,其虽为第二产业,但是对公共用水影响较低,公共用水能极好地代表第三产业用水量需求,故本文将城镇生活用水中的公共用水近似作为第三产业用水。调整后的三次产业用水量相加得到总用水量,生产用水结构由三大产业用水量

占比表示,产业用水强度由单位产业增加值的用水量表示<sup>[5]</sup>。

## 2 广东省生产用水结构时空变化及驱动机制

### 2.1 生产用水结构时空变化分析

#### 2.1.1 产业发展与生产用水概况

图1为广东省2005—2018年三大产业增加

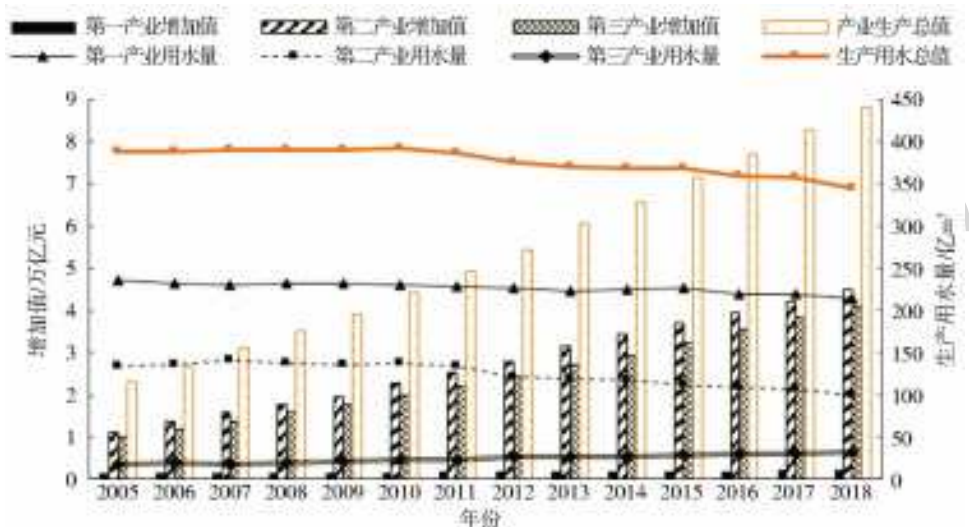


图1 2005—2018年广东省各产业增加值与生产用水量逐年变化

Fig. 1 Annual changes of industrial added value and productive water consumption in Guangdong Province from 2005 to 2018

由图1可知,广东省生产用水总量总体上逐年降低,从2005年387.84亿 $m^3$ 下降至2018年345.34亿 $m^3$ ,其中2005—2010年几乎不变,2011年最严格水资源管理制度实施后生产用水量开始显著降低。分产业看,第一产业和第二产业生产用水总量逐年减少,第三产业生产用水量则逐年增加。三大产业用水占比2005年为61%:35%:4%,2018年则为62%:29%:9%。第一产业用水占比最高且相对稳定,第二产业用水占比次之但逐年下降,第三产业用水占比最低但逐年升高,从2005年4.43%上升到了2018年9.19%。此外,三大产业用水强度都逐年下降,第一产业用水强度远高于第二、第三产业。

#### 2.1.2 分产业生产用水量时空变化分析

图2为广东省4大区域21个城市三大产业生产用水量时空变化热力图,色度越暗表示生产用水量越大,色块在行上的明暗变化代表城市生产用水量逐年变化情况,色块中数值为该市当年生产用水量全省排名情况,名次越靠前,生产用水量越大。由于三大产业用水量级不同,为分别探讨各个产业用水情况,图中三个产业分别采用了不同明暗对比度参考色柱,第二产业采用的明暗对比最为强烈,因为其数组中存在较大的极端值,需通过加强明暗对比

值和生产用水量逐年变化情况,由图可知,广东省生产总值逐年增长10.88%,产业结构总体持续为“二—三—一”,2018年全省三次产业结构约为3%、51%、46%,二、三产业占比逐年提升,第一产业占比最低且逐年下降,从2005年的63.3%下降到2018年的2.64%,产业结构总体上尚未升级为“三—二—一”结构。

来体现其他数值间的差异。结合各城市产业增加值与用水强度情况进行分析,可得如下结果。

(1) 由图2第一产业生产用水量变化热力图可知,第一产业用水主要集中在粤西、粤北地区,粤东城市排名普遍靠后,珠三角地区的江门、肇庆、惠州和广州的第一产业生产用水量较大,其余城市第一产业生产用水量偏少。总体上大部分城市第一产业生产用水量逐年降低。2018年湛江、茂名、江门、梅州、清远第一产业生产用水量排名全省前5位,而深圳、珠海、东莞、中山、潮州第一产业生产用水量排名后5位,其对应的第一产业增加值省内排名也为最后5名,且深圳和东莞两个城市为全省中第一产业增加值负增长城市。2018年珠海、广州、肇庆、佛山、湛江的第一产业用水效率排名前五,其中珠海第一产业万元增加值用水仅为325.84 $m^3$ ,深圳第一产业用水效率排名最后,第一产业万元增加值用水高达2575.17 $m^3$ ,江门、河源、韶关和梅州第一产业用水效率也较为低下,各城市用水强度差异大,最高最低值相差2249.33 $m^3$ /万元,各城市间需加强节水工作经验交流。

(2) 由图2第二产业生产用水量变化热力图可知,珠三角地区生产用水量最高,这是由于珠三角地区第二产业发达,集中了众多工业园区<sup>[27]</sup>。广州、佛

山工业用水远超其他城市,2018 年分别达 34.79 亿、13.75 亿  $m^3$ ,但工业用水效率全省排名分别仅为第 18 和第 12,用水效率较低。为更好体现广州、佛山以外其他城市的用水时空演变规律,热力图中加深了第二产业参考色柱的明暗对比强度。珠三角地区除珠海外,其余城市工业生产用水量也较大,粤北地区生产用水量高于粤西和粤东地区,且在 2008—2014 年波动较大。从时间序列看,广东、佛山、江门、东莞、中山、韶关等城市第二产业生产用水量下降显著,惠州、河源、梅州第二产业用水则呈现出先增长后下降的倒“U”形趋势,研究期间广东省各城市第二产业增加值都呈现出逐年增长的趋

势,故推断广东省大部分城市第二产业经济发展与生产用水量已实现“脱钩”,不同城市脱钩程度有所不同。参照各市产业增加值信息可知,深圳、广州、佛山第二产业增加值总量远超其他城市,深圳第二产业用水效率全省排名第 1,万元产业增加值用水量仅为 4.95  $m^3$ 。云浮、河源、韶关、梅州和潮州第二产业发展排名靠后,云浮在研究期间第二产业增加值持续位于全省最后 1 名。2018 年深圳、阳江、珠海、汕头、汕尾的第二产业用水效率排名前 5 位,韶关、河源、梅州、广州的第二产业用水效率排名后 4 位,最后 1 名韶关的第二产业万元增加值用水量达 69.17  $m^3$ 。

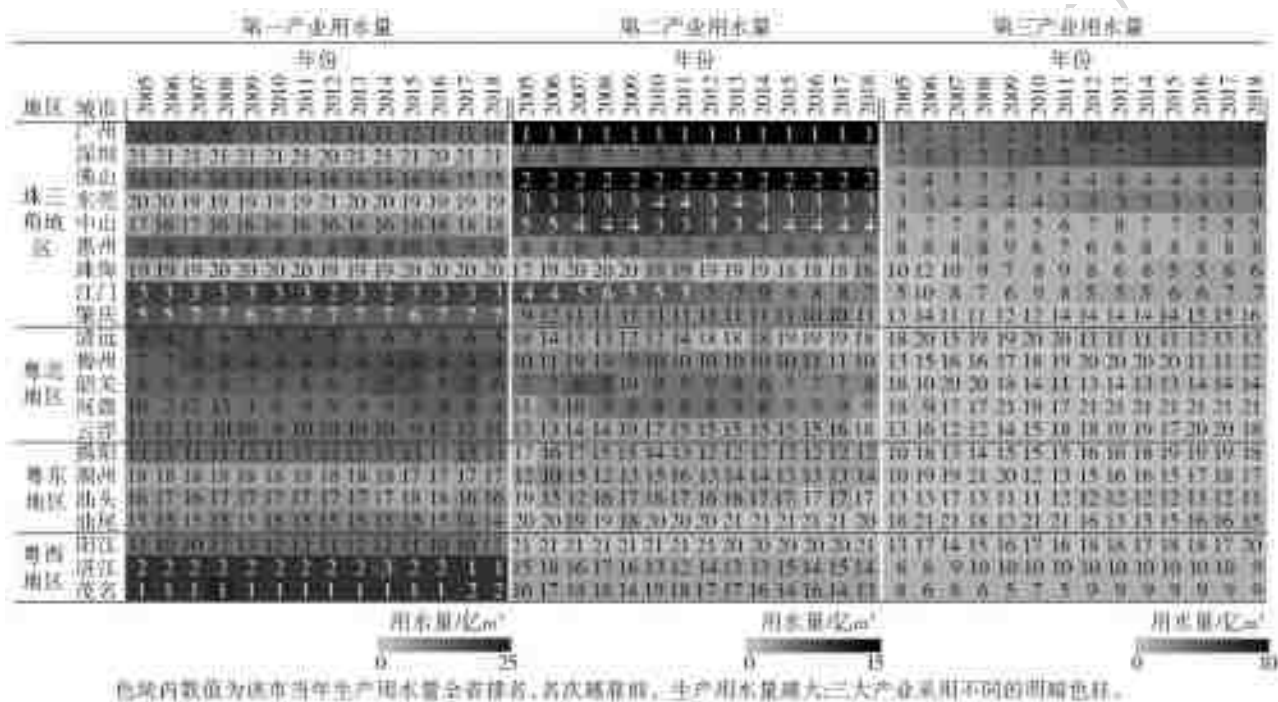


图 2 2005—2018 年广东省 21 个城市三大产业生产用水量时空变化

Fig. 2 Spatiotemporal changes of productive water consumption in three industries of 21 cities in Guangdong Province from 2005 to 2018

(3) 参照图 2 中第三产业生产用水量变化热力图可知,珠三角地区第三产业用水明显高于其他地区,各城市都有所增加但增量极不明显,广州、深圳、东莞、佛山和中山第三产业用水排名前 5 位,河源、阳江、云浮、揭阳和潮州排名后 5 位。已知各城市第三产业增加值都逐年增长,其中广州、深圳、东莞、佛山第三产业增加值稳居全省前 4 名,茂名于 2013 年超过中山排名第 5,第三产业较不发达城市有云浮、河源、汕尾、潮州。第三产业用水强度总体上比第一二产业低,2018 年广州、深圳、揭阳、茂名、佛山第三产业用水效率排名前 5,广州第三产业万元产业增加值用水 5.82  $m^3$ ,而汕尾、梅州、珠海、云浮和潮州的第三产业用水效率较低下,汕尾第三产业用水效率全省最低,万元产业增加值用水达 17.34  $m^3$ 。

(4) 从生产用水总量的空间分布上看,珠三角地区生产用水总量较高,其次为粤西地区。2018 年广州、江门、湛江、佛山、茂名生产用水总量排名全省前 5,其中广州生产用水量远超其他城市,2018 年用水达 52.96 亿  $m^3$ ,排名第 2 的江门用水总量为 24.63 亿  $m^3$ 。珠海、潮州、汕头和汕尾生产用水总量排名后 4 位。

### 2.1.3 用水结构信息熵时空变化分析

采用信息熵均衡度指标表示用水结构均衡度,并用热力图可视化,见图 3,用水结构越均衡则色块越深,其生产用水结构组分间优势度小,整体用水结构趋于均衡稳定。

由图 3 可知,总体上全省用水结构均衡度逐年提高,但较不明显,用水结构合理性有待提高。珠三角经济发达城市用水结构趋向均衡稳定,其次为粤

东地区。2018年珠海、中山、深圳、佛山、广州用水结构信息熵均衡度位列前5名,而粤西、粤北用水结

构则趋向单一化,第一产业用水占比较高,阳江、湛江、清远、茂名、云浮均衡度较低。

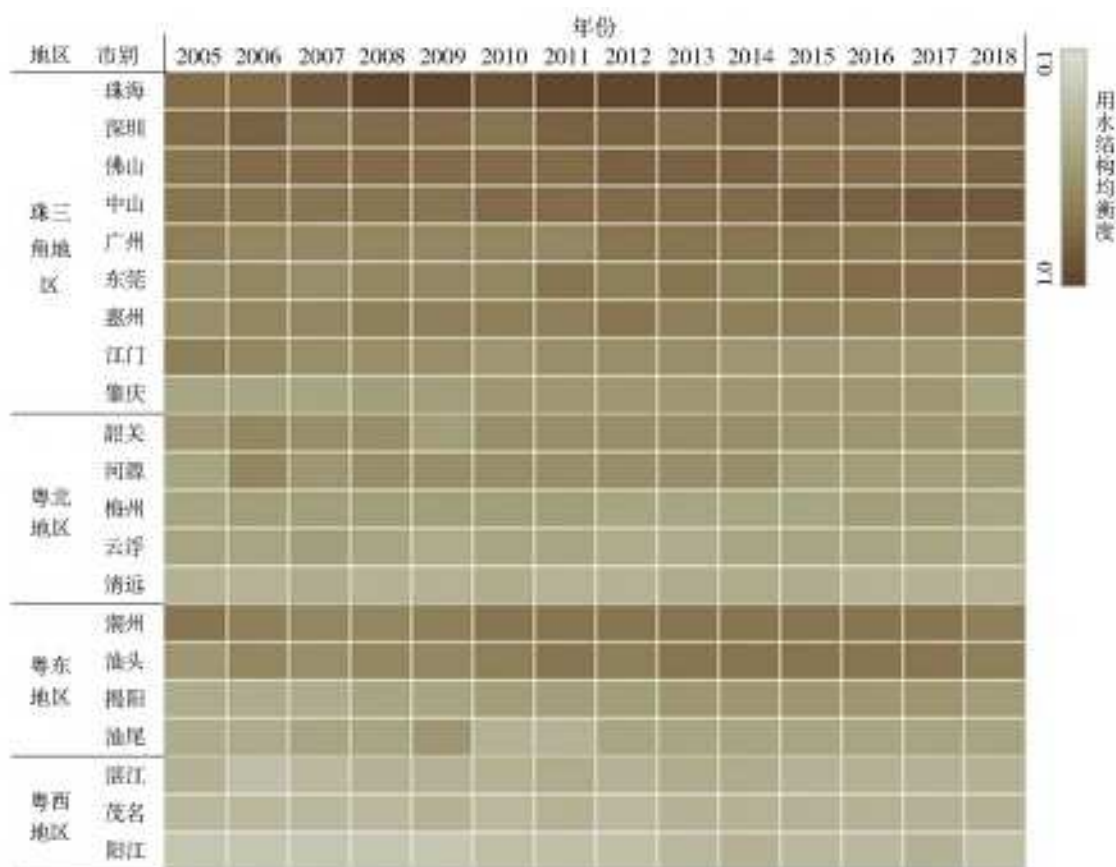


图3 2005—2018年广东省21个城市生产用水结构信息熵均衡度时空变化

Fig. 3 Spatiotemporal changes of information entropy equilibrium degree of productive water consumption structure of 21 cities in Guangdong Province from 2005 to 2018

分析各城市生产用水结构可知,研究期间,珠三角地区以外的城市以及珠三角地区的惠州、江门和肇庆共计15个城市生产用水结构都为“一二三”,即第一产业用水占比高于其他两个产业。2018年广州、中山、佛山生产用水结构为“二一三”,珠海、东莞为“二三一”结构,其中珠海是全省用水结构信息熵均衡度最高的城市,用水结构最为均匀,一、二、三产业用水比为25%:39%:36%。此外,深圳市是唯一一个用水结构为“三二一”的城市,其2018年一、二、三产业用水比例为8%:42%:50%。

### 3 生产用水结构时空变化驱动因素分析

#### 3.1 驱动效应时间变化分析

对2005—2018年广东省生产用水进行驱动力分析,先逐年计算人口规模、人口分布、经济发展、产业结构和用水强度等5个驱动因素对生产用水的驱动效应,再整体上分析广东省2005—2018年累计驱动效应变化情况,结果见表2和图4。表2中各因素贡献率由该因素的驱动效应值除以总效应得到。

由表2和图4可知如下结果。

(1) 人口规模为较微弱的正向驱动力,均值贡献率为-185.77%,在2006—2010年人口规模驱动效应明显,之后效应值较低,这与广东省常住人口逐年变化率的变动趋势相符合,广东省常住人口增长率在2005—2010年较大,2011年后显著下降。

(2) 人口分布因素由城市常住人口占全省常住人口总数的比例表征,其效应代表了各城市常住人口占比变化对生产用水量的影响。由表2可知,人口分布效应相对于其他4个驱动力而言并不明显,均值贡献率仅为9.88%,在2005—2013年效应值绝对值极小,2013年后效应值绝对值上升,整体来看人口分布驱动了用水量减少,但其驱动力远小于其他4个驱动因素。

(3) 经济发展是导致生产用水量增加的主导因素,研究期间逐年算法平均效应值为33.27亿 $m^3$ ,贡献率为-1017.81%,整体上呈现出波动中下降的趋势,波动趋势与广东省人均GDP增长率变化趋势相似。

表 2 2005—2018 年广东省生产用水变化驱动效应分解

Tab. 2 Decomposition of influencing factors for productive water consumption in Guangdong Province from 2005 to 2018

单位: 亿 m<sup>3</sup>

时段	人口规模	人口分布	经济发展	产业结构	用水强度	总效应
2005—2006	4.58	- 0.06	54.34	- 24.30	- 34.83	- 0.28
2006—2007	14.42	- 0.40	45.10	- 27.94	- 28.67	2.51
2007—2008	9.27	- 0.01	37.16	- 18.83	- 28.20	- 0.62
2008—2009	9.14	- 0.15	33.10	- 15.86	- 25.56	0.67
2009—2010	11.78	- 0.18	40.23	- 18.78	- 30.40	2.65
2010—2011	2.36	- 0.02	42.88	- 16.87	- 35.00	- 6.65
2011—2012	2.68	0.09	34.44	- 12.52	- 34.53	- 9.85
2012—2013	2.15	- 0.02	37.20	- 17.44	- 27.76	- 5.87
2013—2014	2.76	- 0.16	29.53	- 12.25	- 21.18	- 1.30
2014—2015	3.94	- 0.70	23.38	- 10.10	- 17.32	- 0.80
2015—2016	4.96	- 0.72	21.52	- 10.38	- 24.04	- 8.66
2016—2017	5.42	- 1.07	18.60	- 7.29	- 16.91	- 1.24
2017—2018	5.50	- 0.80	15.10	- 2.84	- 30.03	- 13.06
逐年均值	6.07	- 0.32	33.27	- 15.03	- 27.26	- 3.27
均值贡献率%	- 185.77	9.88	- 1 017.81	459.73	833.97	
2005—2018	76.42	- 4.41	419.83	- 196.24	- 338.11	- 42.50
总贡献率%	- 179.81	10.37	- 987.84	461.74	795.55	

注: 贡献率为“+”表示该驱动因素为负向驱动力, 驱动生产用水量减少; 贡献率为“-”表示驱动因素为正向驱动力, 促使生产用水量增加。

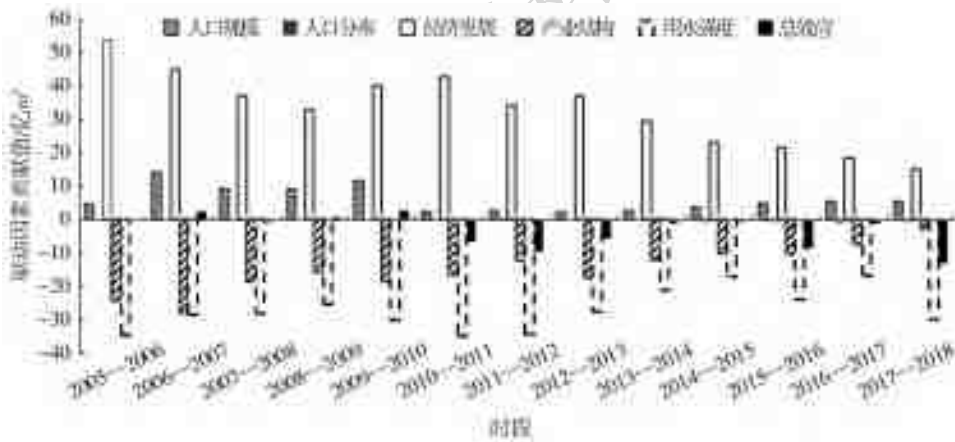


图 4 2005—2018 年广东省生产用水变化驱动效应逐年分解

Fig. 4 Driving effect of yearly decomposed productive water consumption change in Guangdong Province from 2005 to 2018

(4) 产业结构为负向驱动力, 效应绝对值在波动中逐年递减, 研究期间平均效应贡献率为 459.73%。研究期间广东省第二、三产业增加值占比变化趋势较不明显, 而第一产业增加值占比逐年下滑, 这影响了各产业的产业结构效应值, 一、二、三产业的产业结构效应值分别为- 198.80 亿、1.40 亿和 1.17 亿 m<sup>3</sup>, 第一产业结构效应为负且最为明显, 而第二、三产业效应为正。

(5) 用水强度效应代表节水相关政策和科技等活动对生产用水量的影响, 用水强度为显著的负向驱动力, 驱动效应均值贡献率为 833.97%, 研究期

间波动较大, 在 2011 年左右用水强度效应较为明显, 这是由于 2011 年广东省实施了最严格水资源管理制度。此外, 其在第二产业中驱动效应最为明显, 累计效应达- 190.63 亿 m<sup>3</sup>, 其次为第一产业, 累计效应为- 129.89 亿 m<sup>3</sup>, 这是受第二产业用水强度变化率大于第一产业用水强度变化率的影响。

### 3.2 驱动效应空间对比分析

图 5 为 4 大区域 5 个驱动因素 2005—2018 年累计驱动效应对比图, 图 6 为 21 个城市各个驱动因素累计驱动效应对比图。图 5 中各区域各驱动因素的效应值为该区域该驱动因素所有城市效应值的总

计,由于4大区域城市数量不同,加和效应难以体现区域间驱动效应水平差异,故通过求区域内城市的驱动效应平均值作为区域驱动效应水平指标,结果见图6。另外,一个区域对所属区域的驱动效应贡献率由该区域驱动效应值除以所属区域总的驱动效应值得到。结合图5、6,对驱动因素效应进行空间分析,结论如下。

(1)人口规模效应方面,各城市效应值都为正值,2005—2018年来广东省全省常住人口的增长促进了生产用水量的增加。由人口规模效应计算公式(5)可知,各城市人口规模效应事实上是全省常住人口总体的增长对各城市用水量的驱动,并不能表示各城市人口情况对该城市生产用水量的驱动,故这里不对各城市展开对比探讨。

(2)人口分布效应方面,由前文可知人口分布效应极小,人口分布因素影响极低,但从空间角度上分析,其展现出了一定的规律性,即人口分布在珠三角以外的城市均表现为负向驱动力,而在珠三角地区中,除江门和肇庆表现为负向驱动力以外,其余城市均呈现为正向驱动力。由人口分布效应计算公式(6)可知,各市常住人口增长率相对于全省平均常住人口增长率的高低决定了人口分布效应值的正

负符号,即若在研究期间常住人口增长率大于全省平均人口增长率的城市,人口分布效应为正;反之则为负。研究期间,深圳、广州、佛山、中山、珠海、惠州、东莞的常住人口增长率排名全省前7,并高于全省平均水平,则其人口分布效应为正,而其余城市常住人口增长率皆低于全省平均水平,人口分布效应表现为负。



图5 广东省4大区域生产用水量变化驱动效应分解  
Fig. 5 Decomposition of driving effect for productive water change of 4 regions in Guangdong Province



图中虚线为各区域各因素驱动效应平均值参考线,数值为该区域该因素的驱动效应平均值(单位:亿m<sup>3</sup>),括号表示负数;蓝色表示效应值为正,红色表示效应值为负。

图6 广东省21个城市生产用水变化驱动效应分解

Fig. 6 Decomposition of driving effect for productive water change of 21 cities in Guangdong Province

(3)经济发展效应方面,珠三角地区总效应最强,从区域平均水平看,粤西经济发展效应平均水平

最高,其次为珠三角、粤北、粤东。广州远超其他城市位居全省第一,为全省经济发展效应贡献12.78%。



(4) 产业结构效应方面,如图 6 所示,所有城市的产业结构驱动力都促进了生产用水量的减少,从各区域驱动效应均值看,粤西地区驱动效应最为明显,各市平均效应值为 $-14.03$  亿  $m^3$ ,其次为粤北地区。珠三角地区产业结构驱动效应各市差值较大,广州、江门、惠州、肇庆以及佛山产业结构效应值超过区域平均值,其余城市产业结构驱动效应则远低于全省平均效应值。珠海、深圳、东莞、潮州和汕头的产业结构累计驱动效应全省最低。分产业看,各城市第一产业的产业结构效应都为负值,其中珠海、深圳、东莞、潮州和汕头第一产业产业结构驱动效应最不明显,各城市的第二、三产业结构效应都极不明显,多数城市第二产业产业结构驱动效应为正值,但在广州市第二产业的产业结构驱动效应为负值,且高于其他城市。

(5) 用水强度效应方面,各城市都为负值,珠三角地区较为明显,广州远超其他城市,驱动效应为 $-82.62$  亿  $m^3$ ,为全省用水强度驱动效应贡献 24.44%。佛山位居全省第 2,贡献率为 9.48%,虽与排名第 1 的广州存在较大差距,但依旧远高于其他城市,其余城市表现较为均衡。从区域均值看,粤北、粤西用水强度效应均值较为接近,粤东地区用水强度效应最弱,各城市间可加强节水技术和政策交流。

(6) 总效应方面,珠三角地区总贡献率最高,达 79.46%,其中广州贡献率全省最大,达 47.15%,深圳总效应为全省最大正值,贡献率为 $-4.96\%$ ,粤北、粤西和粤东总效应都较低。深圳、汕头、梅州、河源、湛江总效应都为正,潮州为零,其余城市总效应都为负,这说明研究期间大部分城市在各驱动因素综合影响下生产用水总量减少。

## 4 结 论

基于多区域 LMDI 模型和信息熵原理,对广东省 2005—2018 年 4 大区域 21 个城市生产用水结构进行时空变化分析和影响因素分析,结论如下。

(1) 2005—2018 年广东省总体生产用水量逐年降低,珠三角地区减少最为明显。三个产业用水占比基本稳定,第一产业用水集中在粤西和粤北,第二产业和第三产业用水集中在珠三角地区,珠三角发达地区用水结构更加趋于均衡,粤东、西、北地区用水结构趋向于单一,且都以第一产业用水为主,用水结构合理性有待进一步提高。

(2) 经济发展为生产用水变化的主导正向驱动力,用水强度为主要负向驱动力,产业结构为第二负向驱动力且驱动效应逐年减弱。研究期间,三大产

业用水效率都有所提升,各区域用水效率差别极大,用水强度效应以珠三角城市群最为明显,人口规模为正向驱动力,驱动效应较弱。各驱动因素在不同地区的驱动效应差异较大。

(3) 人口分布驱动效应远弱于其他驱动因素,但其在空间分布上体现出一定规律性,即在肇庆、江门和珠三角以外的城市体现为负向驱动力,在珠三角发达城市则呈现为正向驱动力,体现了珠三角发达地区常住人口增长率相对于其他地区而言较高。发达地区人口迁入率较高,驱动了产业经济发展,进而驱动了生产用水量的增加。

广东省为人口大省和经济大省,各区域资源禀赋、经济发展程度差距较大,本研究为广东省协调经济发展和水资源关系提供了科学依据。如何综合更多影响因素,增加不同城市或区域间可比性,以进一步剖析生产用水结构时空演化机理,仍有待更多研究。

## 参考文献(References):

- [1] ZHANG Z, LIU J, CAI B, et al. City level water withdrawal in China: Accounting methodology and applications[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2020: 1-14. DOI: 10.1111/jiec.12999.
- [2] 刘洋, 李丽娟. 京津冀地区产业结构和用水结构变动关系[J]. *南水北调与水利科技*, 2019, 17(2): 1-9. (LIU Y, LI L J. The relationship between industrial structure and water consumption structure in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. *South to North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2019, 17(2): 1-9. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2019.0028.
- [3] 钟科元, 陈莹, 陈兴伟, 等. 福建省用水结构与产业结构相关性的区域变化[J]. *南水北调与水利科技*, 2015, 13(3): 593-596, 605. (ZHONG K Y, CHEN Y, CHEN X W, et al. Analysis of the correlation between water consumed structure and industrial structure in different regions of Fujian Province[J]. *South to North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2015, 13(3): 593-596. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2015.03.043.
- [4] 易晶晶, 陈志和, 杨创鹏, 等. 基于信息熵原理的区域用水结构时空演变特征研究[J]. *水文*, 2019, 39(4): 12-17. (YI J L, CHEN Z H, YANG C P, et al. Analysis of spatiotemporal characteristics of regional water utilization structure based on information entropy[J]. *Journal of China Hydrology*, 2019, 39(4): 12-17. (in Chinese)) DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.2019.04.003.
- [5] 张陈俊, 赵存学, 林琳, 等. 长江三角洲地区用水量时空

- 差异的驱动效应研究[J]. 资源科学, 2018, 40(1): 89-103. (ZHANG C J, ZHAO C X, LIN L, et al. Driving effort of spatial temporal differences in water consumption in Yangtze River Delta[J]. Resources Science, 2018, 40(1): 89-103. (in Chinese)) DOI: 10.18402/resci.2018.01.09.
- [6] 洪思扬, 王红瑞, 程涛, 等. 天津市供水结构变化分析[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(4): 1-6. (HONG S Y, WANG H R, CHENG T, et al. Analysis of water supply and consumption structural change in Tianjin[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(4): 1-6. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2017.04.001.
- [7] LONG H, LIN B, OU Y, et al. Spatiotemporal analysis of driving factors of water resources consumption in China. [J]. Science of The Total Environment, 2019, 690: 1321-1330. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.06.311.
- [8] 何艳虎, 李深林, 杨洁, 等. 我国不同区域用水结构变化及其驱动因素分析[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(4): 1-6. (HE Y H, LIS L, YANG J, et al. Change of water use structure and its driving factors in different regions of China. [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2016, 27(4): 1-6. (in Chinese)) DOI: 10.11705/j.issn.1672-643X.2016.04.01.
- [9] 白鹏, 刘昌明. 北京市用水结构演变及归因分析[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(4): 1-6. (BAI P, LIU C M. Evolution law and attribution analysis of water utilization structure in Beijing[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(4): 1-6. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2018.0090.
- [10] 胡霞, 程亮, 王宗志, 等. 工业用水效率全过程驱动因子识别模型[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(3): 201-208. (HU X, CHENG L, WANG Z Z, et al. A full decomposing model for industrial water use efficiency [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(3): 201-208. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2019.0077.
- [11] 李潇, 刁艳芳, 刘翠善, 等. 宁夏用水结构变化及影响因素分析[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2019, 40(5): 64-69. (LI X, DIAO Y F, LIU C S, et al. Analysis on the variation of water utilization structure and its influencing factors in Ningxia[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (natural science edition), 2019, 40(5): 64-69. (in Chinese)) DOI: 10.19760/j.ncwu.zk.2019069.
- [12] 谢海涛. 湖南省用水现状及其影响因素研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2011. (XIE H T. The research of water resources utilization and its influencing factor analysis in Hunan Province[D]. Changsha: Hunan University, 2011. (in Chinese))
- [13] 聂志萍, 吴梦芝, 马海良. 基于 LMDI 和脱钩理论的我国生活用水影响因素研究[J]. 水利经济, 2019, 37(5): 11-15. (NIE Z P, WU M Z, MA H L. Affecting factors for domestic water use in China based on LMDI and decoupling theory[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2019, 37(5): 11-15. (in Chinese)) DOI: 10.3880/j.issn.1003-9511.2019.05.003.
- [14] 易晶晶, 陈志和. 基于 LMDI 模型的广东省产业用水驱动力和驱动效应分析[J]. 人民珠江, 2019, 40(8): 39-43. (YI J J, CHEN Z H. Analysis of driving force and driving effect of industrial water use in Guangdong Province based on LMDI model[J]. Pearl River, 2019, 40(8): 39-43. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1001-9235.2019.08.007.
- [15] 孙才志, 谢巍. 中国产业用水变化驱动效应测度及空间分异[J]. 经济地理, 2011, 31(4): 666-672. (SUN C Z, XIE W. Measurement of the driving effects for industrial water utilization change and its spatial difference in China[J]. Geographical Research, 2011, 31(4): 666-672. (in Chinese))
- [16] 轩党委, 沈静文, 胡庆芳, 等. 基于 KAYA 恒等式和 LMDI 分解法的淮南市生产用水驱动因素分析[J]. 水利水电技术, 2019, 50(7): 40-47. (XUAN D W, SHEN J W, HU Q F, et al. Analysis of driving factors of production water in Huai'an City based on KAYA identity and LMDI model[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, 50(7): 40-47. (in Chinese)) DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2019.07.005.
- [17] 洪思扬, 王红瑞, 程涛, 等. 北京市第三产业用水特征及其发展策略[J]. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(5): 108-116. (HONG S Y, WANG H R, CHENG T, et al. Water features and development strategy of tertiary industry in Beijing [J]. China Population, Resources and Environment, 2016, 26(5): 108-116. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1002-2104.2016.05.013.
- [18] 秦昌波, 葛察忠, 贾仰文, 等. 陕西省生产用水变动的驱动机制分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(5): 131-136. (QIN C B, GE C Z, JIA Y W, et al. [J]. Driving mechanism analysis for productive water consumption changes in Shaanxi Province[J]. China Population, Resources and Environment, 2015, 25(5): 131-136. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1002-2104.2015.05.017.
- [19] ZHOU F, BO Y, CIAIS P, et al. Deceleration of China's human water use and its key drivers[J]. Proceed

- ings of the National Academy of Sciences PNAS, 2020, 117 ( 14 ): 7702-7711. DOI: 10. 1073/ pnas. 1909902117.
- [ 20 ] 广东省统计局. 广东统计年鉴[ M ]. 北京: 中国统计出版社, 2006—2019. ( Statistics Bureau of Guangdong Province. Guangdong Statistical Yearbook[ M ]. Beijing: China Statistics Press, 2006-2019. ( in Chinese))
- [ 21 ] 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 W F, LUO C. Spatial pattern of the development level of industrial structure in Guangdong Province [ J ]. Areal Research and Development, 2017, 36(2) : 29-34. ( in Chinese)) DOI: 10. 3969/ j. issn. 1003-2363. 2017. 02. 006.
- [ 22 ] CHEN L, XU L, YANG Z. Accounting carbon emission changes under regional industrial transfer in an urban agglomeration in China's Pearl River Delta[ J ]. Journal of Cleaner Production, 2017, 167: 110-119. DOI: 10. 1016/ j. jclepro. 2017. 08. 041.
- [ 23 ] ANG B W. LMDI decomposition approach: A guide for implementation[ J ]. Energy Policy, 2015, 86: 233-238. DOI: 10. 1016/ j. enpol. 2015. 07. 007.
- [ 24 ] ANG B W. The LMDI approach to decomposition analysis: a practical guide[ J ]. Energy Policy, 2005, 33 (7) : 867-871.
- [ 25 ] 广东省水利厅. 广东省水资源公报[ R ]. 2006—2019. ( Guangdong Water Conservancy Bureau. Guangdong Water Resources Bulletin[ R ]. 2006-2019. ( in Chinese))
- [ 26 ] 蒋蕾, 陈远生, 李璐. 近 20 年北京市产业取水与节水变化分析[ J ]. 自然资源学报, 2011, 26( 6 ): 1040-1051. ( JIANG L, CHEN Y S, LI L. Dynamic analysis on the industrial water withdrawal and water saving of Beijing in the past 20 years[ J ]. Journal of Natural Resources, 2011, 26( 6 ): 1040-1051. ( in Chinese))
- [ 27 ] XU Q, DONG Y X, YANG R, et al. Temporal and spatial differences in carbon emissions in the Pearl River Delta based on multi-resolution emission inventory modeling [ J ]. Journal of Cleaner Production, 2019, 214: 615-622. DOI: 10. 1016/ j. jclepro. 2018. 12. 280.

## Spatiotemporal variations and influencing factors of productive water consumption structure in Guangdong Province

CHEN Meilin<sup>1,2</sup>, CHEN Lei<sup>1,2</sup>, XIA Linlin<sup>1,2</sup>, CAI Yanpeng<sup>1,2</sup>, YANG Zhifeng<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of City Cluster Environmental Safety and Green Development of the Ministry of Education, Institute of Environmental and Ecological Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou, 510006, China;

2. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou), Guangzhou, 511458, China)

**Abstract** Multi-regional LMDI decomposition model and Information entropy were adopted to analyze spatiotemporal variations of the productive water consumption structure in 21 cities in 4 regions of Guangdong Province from 2005 to 2018, and decompose the five driving factors, including population size, population distribution, economic development, industrial structure, and water consumption intensity. The results showed that: the overall productive water consumption in Guangdong showed a downward trend from 2005 to 2018, and the reduction was more remarkable in the urban agglomeration of Pearl River Delta (PRD), overall, the productive water consumption efficiency of all industries improved with a significant difference among different regions; the proportion of the productive water consumption of three industries was found stable, and the water use structure in the PRD region was relatively balanced, and the water use structure in the east, west, and north of Guangdong tend to be unitary, with water used for the primary industry; economic development was the dominant positive driver leading to the increase of productive water consumption, water consumption intensity was found to be the main negative driving factor, while the industrial structure was the secondary negative factor, respectively. The promotion effect of population size driver was not significant. Population distribution driver showed a slight promotion effect in PRD, while a slight inhibitory effect in the northern, eastern, and western Guangdong. The results of this research have a certain reference value for coordinating the relationship between regional industrial development and water resources and formulating a reasonable water resource strategy and planning.

**Key words:** productive water; water consumption structure; Guangdong Province; driving effect; LMDI; spatiotemporal variation; information entropy