

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdkq.2021.0051

龚镇杰,何艳虎.区域用水效率关联度时空演变及影响因素[J].南水北调与水利科技(中英文),2021,19(3):477-486,495.
GONG Z J, HE Y H. Spatiotemporal evolution and influencing factors of correlation degree of regional water use efficiency[J].
South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(3): 477-486, 495. (in Chinese)

区域用水效率关联度时空演变及影响因素

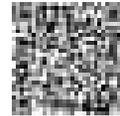
龚镇杰¹,何艳虎^{1,2}

(1. 广东工业大学环境生态工程研究院,广东省流域水环境治理与水生态修复重点实验室,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:通过构建用水效率引力模型并结合 ArcGIS 空间相关分析技术,揭示区域用水效率及其关联强度的时空演变特征,进一步采用多元回归分析方法辨识用水效率关联度潜力的主要影响因素,并以广东省 2004—2018 年 21 个地级市的面板数据为例进行计算与分析。结果表明:广东省万元 GDP 用水量与农田灌溉亩均用水量存在较强的空间相关性,珠三角为用水效率高值区,粤北与东西两翼为用水效率低值区;全省用水效率关联度随时间推移呈增强趋势,珠三角用水效率引力值最强,粤东次之,粤北与粤西较弱;研究与试验发展经费对用水效率关联度潜力的影响更为持久,为主要驱动因素。主要从充分发挥珠三角用水效率高值区联动效应和加大水利科技创新投入等方面提出对策建议,可为区域用水效率的空间均衡提供理论依据与参考。

关键词:引力模型;区域用水效率;空间关联度;广东省;影响因素

中图分类号:TV213.9 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



水资源总量丰富,人均占有量少是我国水资源的基本国情^[1-2]。21 世纪以来,我国进入了高速发展阶段,但存在水资源粗放利用问题,使得整体用水效率低下,严重阻碍着水资源与经济、社会和生态环境的可持续健康发展^[3-4]。2012 年,国务院办公厅颁布了《国务院关于实行最严格水资源管理制度的意见》,明确提出用水效率控制红线,坚决遏制用水浪费^[5]。当前,区域间的经济贸易往来与人口迁移则极大促进了技术、资金和资源等要素时空上的流动,构成了区域水资源需求的主要驱动力^[6],同时影响区域间用水效率,使得区域间用水效率在一定时期内关联互依。因此,研究区域用水效率及其关联程度的时空变化规律,并揭示其内在影响机制,对提高区域用水效率的空间均衡性和水资源管理水平具有重要意义。

对于用水效率时空变化规律的探索,已有大量学者做了相关研究和论证。如:赵良仕等^[7]、周迪等^[8]

论证了中国省际水资源利用效率具有显著的空间自相关性;马剑锋等^[9]、赵沁娜等^[10]、陈洪斌^[11]则从全国省际的农业或工业用水效率出发,探讨了农业用水效率和工业用水效率的空间相关性及效应。但在实际中,省内城市间的用水效率也存在较强的空间关联性,进而影响全省的整体用水效率,目前,也有少部分学者从城市尺度进行用水效率研究^[12]。不难发现,关于用水效率空间相关性的研究日趋丰富,但多数研究是定性论证了省际农业用水效率和工业用水效率在空间上的关联性,而对于区域用水效率空间关联度量及其影响因素分析的研究较少,相关研究对于促进区域水资源开发利用的空间均衡十分必要。

目前,引力模型在定量研究区域社会经济要素的空间关联度上有着较为广泛且成熟的应用^[13-14]。如齐梦溪等^[15]、孟德友等^[16]基于引力模型定量分析了城市间经济的空间关联强度。而引力模型在测度

收稿日期:2020-06-24 修回日期:2020-08-20 网络出版时间:2020-09-11

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20200911.1402.002.html

基金项目:国家自然科学基金(51979043;51509127)

作者简介:龚镇杰(1996—),男,广东广州人,主要从事水资源管理研究。E-mail:gongzhenjie721@163.com

通信作者:何艳虎(1985—),男,河南息县人,副教授,博士,主要从事水资源配置与管理研究。E-mail:heyanhua456@gdut.edu.cn

区域用水效率空间关联度方面的研究则较为少见。广东省作为我国沿海发达省份,经济总量连续 31 年位居全国第一^[17],但依然存在区域经济社会发展不均衡的突出问题,其中水资源开发利用的空间不均衡问题不容忽视^[6]。因此,以广东省为例,基于 2004—2018 年全省 21 个地级市面板数据,通过构建用水效率引力模型测算各地级市用水效率的空间关联度,并结合空间相关分析技术与多元回归分析方法,揭示用水效率及其关联度的时空演变特征与影响因素,并提出相应的对策建议,以期为促进区域用水效率的空间均衡提供理论依据与参考。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 研究方法

1.1.1 引力模型

引力模型在经济地理学中应用广泛,它用来解释类似万有引力规律的城市间经济联系^[18]。同样,城市间用水效率的空间关联性,亦可采用引力模型进行测度和解释。引力模型基本公式^[18]为

$$R_{ij} = G \frac{M_i M_j}{D_{ij}^b} \quad (1)$$

式中: R_{ij} 为城市 i 与城市 j 之间的用水效率联系强度; M_i 、 M_j 分别为两城市的综合用水效率“质量”; D_{ij} 为两城市间距离; b 为用水效率引力值的衰减系数,表示用水效率引力值随距离的衰减速度, b 值选取 1 或 2 即可以近似表现城市空间联系状态^[19],本文选取 b 为 2; G 为引力常数,在本文计算中取 1。

在用水效率引力值计算中,为了更加客观全面测算出城市间用水效率相互关联度,采用多指标综合用水效率作为用水效率“质量”。首先选取 2004—2018 年人均综合用水量、万元 GDP 用水量、万元工业增加值用水量(含火电与不含火电)、农田灌溉亩均用水量等 5 项用水指标,再分别进行极差标准化处理,并利用熵权法对 5 项用水指标进行赋权得到综合用水效率“质量”。在城市间距离上,有学者直接采用城市间距离表征^[20-21],在交通路网日趋完善下,直接采用城市距离会出现一定局限性^[16],因此,在计算中采用时间距离作为两城市的空间交通距离^[22],同时本研究重点是区域内不同城市间用水效率联系强度,对于同一城市的用水效率联系强度,假设其引力值为零。

1.1.2 空间自相关分析

本文用水效率的空间相关分析采用局部 Getis-Ord G^* 方法,它通过计算得到每个城市的 Z 得分和 P 值可确定高值聚类(热点区)与低值聚类(冷点区)

的空间分布情况,其中: Z 得分是 G^* 统计值,为标准差的倍数(有正负之分); P 值为 Getis-Ord G^* 方法中观测到的空间模式为随机分布的概率,当 P 值很小时表示观测到的空间模式不太可能为随机分布。因此,当 Z 得分高且 P 值小时呈现高值聚类(热点区),当 Z 得分低并为负数且 P 值小时则呈现低值聚类(冷点区),其余情况则不存在明显空间聚类。Getis-Ord 局部统计公式^[23]为

$$G^* = \frac{\sum_{j=1}^n w_{ij} x_j - \bar{x} \sum_{j=1}^n w_{ij}}{S \sqrt{\frac{[n \sum_{j=1}^n w_{ij}^2 - (\sum_{j=1}^n w_{ij})^2]}{n-1}}} \quad j \neq i \quad (2)$$

其中: $S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n} - (\bar{x})^2}$

式中: w_{ij} 为空间权重,当城市 i 与城市 j 在空间上越相邻 w_{ij} 越接近 1,只有相邻时 $w_{ij} = 1$,反之,当且仅当城市 i 与城市 j 不存在空间自相关性时 $w_{ij} = 0$; x_i 和 x_j 分别为城市 i 和城市 j 的用水指标; \bar{x} 为用水指标的平均值; n 为研究城市的样本数。

1.1.3 多元回归分析

多元回归分析方法是多个变量建立线性数量关系的统计分析方法^[24]。利用多元回归分析方法构建广东省各地级市用水效率关联度潜力与其影响因素的数学关系,从而对用水效率关联度潜力的影响因素进行定量分析。多元回归方程公式为

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \epsilon \quad (3)$$

式中: Y 为用水效率关联度潜力; $x_1, x_2, x_3, \dots, x_k$ 为影响因素; $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ 为回归系数,为随机误差项,在计算过程中对数据进行了极差标准化处理。

1.2 数据来源

研究的数据包括地理基础数据、用水指标数据、距离数据和影响因素数据。其中:地理数据通过国家基础地理信息中心获取广东省各地级市边界和各市行政中心点等地理矢量数据;5 项用水指标数据来源于 2004—2018 年的《广东省水资源公报》;城市间的时间距离由百度地图 API 获取;影响因素数据来源于 2004—2018 年的《广东省统计年鉴》。

2 结果分析

2.1 用水效率时空分布特征

用水效率的计算采用比值法^[8],在 5 项用水指标中,其数值越小表征用水效率越高。由图 1 可以看出,2004—2018 年广东省 5 项用水指标均呈现下降趋势。其中:万元 GDP 用水量在 2004—2011 年

从 290 m³ 下降到 88 m³,下降了 69.66%,在 2011—2018 年从 88 m³ 下降到 43 m³,下降了 51.14%;万元工业增加值用水量(含火电和不含火电)在 2004—2011 年,分别下降了 70.76%和 72.87%,在 2011—2018 年分别下降了 48.0%和 51.43%,说明广东省在最严格的水资源管理制度“三条红线”发布前,已经通过产业结构优化等措施,在发展经济的同时提高了工业用水效率。在人均综合用水量上,2004—2018 年

保持稳定下降,从 2004 年的 560 m³ 下降到 2018 年的 374 m³,下降了 33.21%,反映了广东省节水型社会建设成效明显。此外,农田灌溉亩均用水量在 2004—2018 年变化有起伏,但总体呈缓慢下降趋势,从 2004 年的 825 m³ 下降到 2018 年的 752 m³,下降了 8.85%。上述用水指标的变化趋势与“十三五”规划提出的“实行最严格的水资源管理制度,以水定产,以水定城,建设节水型社会”的目标大致吻合。

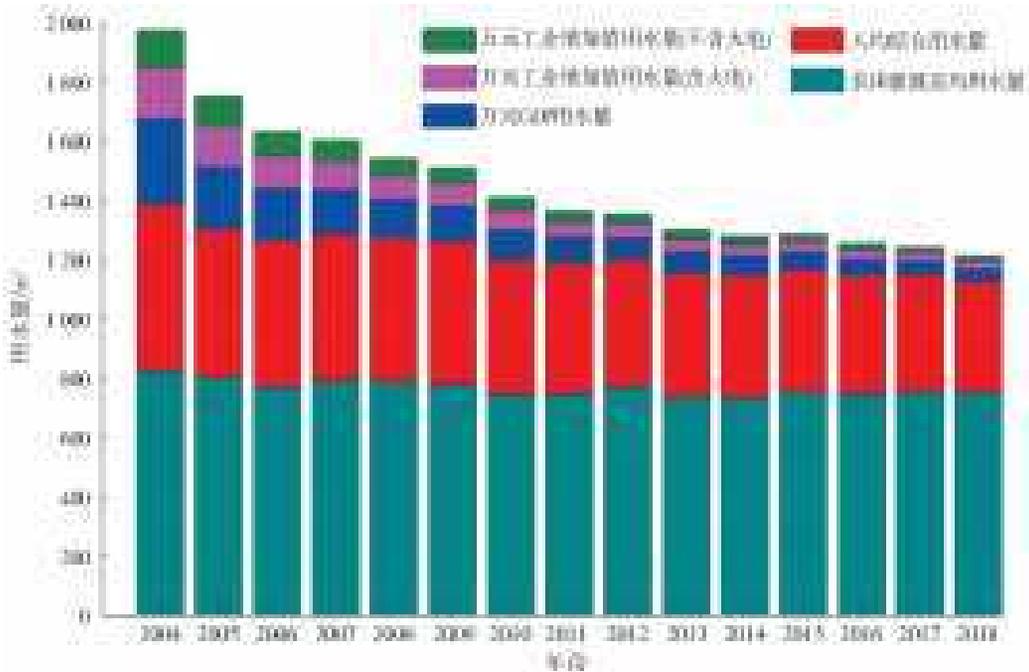


图 1 2004—2018 年 5 项用水指标变化
Fig. 1 Change of five water indicators from 2004 to 2018

采用 Getis-Ord G^* 方法分析用水效率空间相关性,对于具有统计显著性的热点区,其本身为高值的同时,该热点区周围亦为高值,而对于具有统计显著性的冷点区,其本身为低值的同时,该冷点区周围亦为低值,从而在空间上形成显著的相关性。通过比较 5 项用水指标的热点分析图,具体分析空间相关性较显著的万元 GDP 用水量与农田灌溉亩均用水量。由万元 GDP 用水量热点分析图(图 2)可看出:热点区(万元 GDP 用水量高)集中在粤北,说明粤北用水效率低下,同时热点区范围自 2004 年有缩小趋势,随后趋于平稳状态,但热点区依旧位于粤北;冷点区(万元 GDP 用水量低)集中在珠三角,说明珠三角用水效率高,同时冷点区范围自 2004 年后有扩大趋势,随后趋于平稳状态,冷点区并始终处于珠三角。由农田灌溉亩均用水量热点分析图(图 3)可看出:热点区(农田灌溉亩均用水量高)总体集中在粤北的河源和梅州、粤东的汕尾以及粤西的阳江和茂名,并随着时间出现明显的自东向西迁移过程;冷点区(农田灌溉亩均用水量低)则

集中在珠三角,在 2004—2009 年冷点区范围整体平稳,在 2014 年前后略有波动,到 2018 年,冷点区范围有扩大趋势。

结合图 1、2、3,纵观 2004—2018 年,广东全省万元 GDP 用水量和农田灌溉亩均用水量逐年下降,但全省各市万元 GDP 用水量和农田灌溉亩均用水量热冷点区的空间分异现象依然存在,总体上形成了以珠三角为用水效率高值区、粤北与东西两翼为用水效率低值区的不均衡空间分布格局。

2.2 用水效率关联度时空演变特征

在用水效率引力值计算中,用水效率采用比值法^[8],即用水量越少表征用水效率越高。考虑到用水效率“质量”与引力值成正比关系,所以用水指标值的倒数作为用水效率“质量”因子。通过计算得到的用水效率引力值可反映两城市用水效率的空间关联度,为了更直观地分析用水效率关联度的时空演变特征,从 2004—2018 年中选取 2004、2009、2014、2018 年共 4 个年份的用水效率引力值数据制成引力曲面图(图 4~7)。

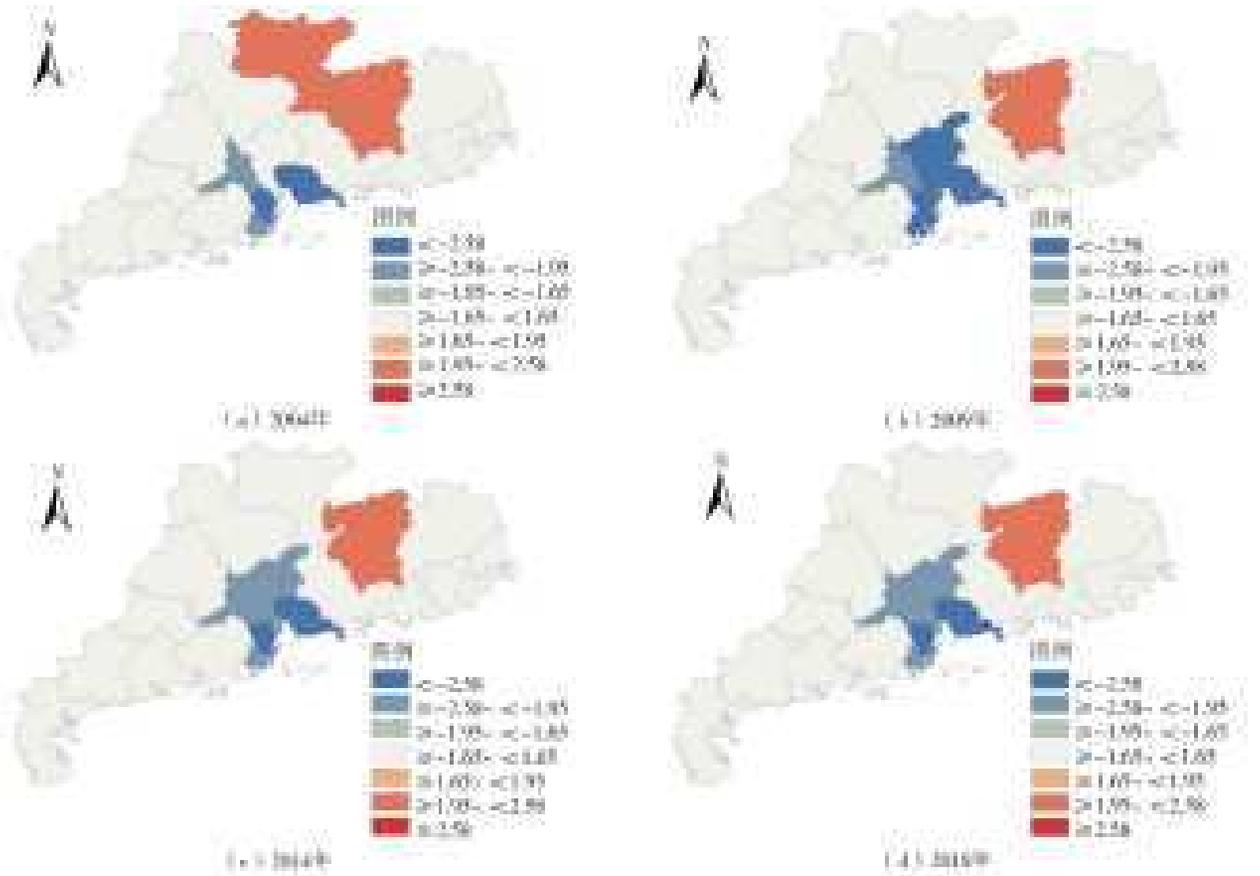


图 2 万元 GDP 用水量热点分析

Fig. 2 Hot spot analysis of water consumption in ten thousand yuan GDP

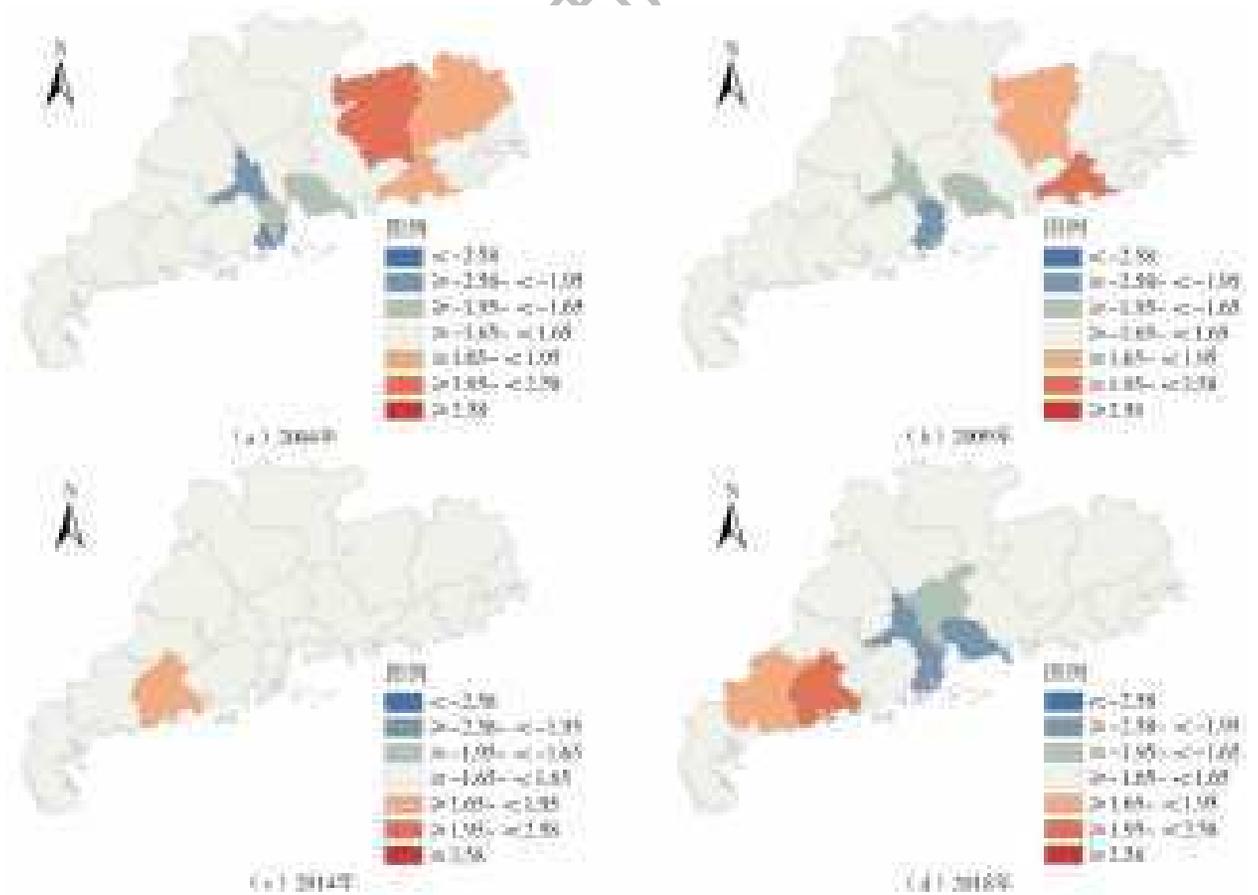


图 3 农田灌溉亩均用水量热点分析

Fig. 3 Hot spot analysis of water consumption per mu for irrigation

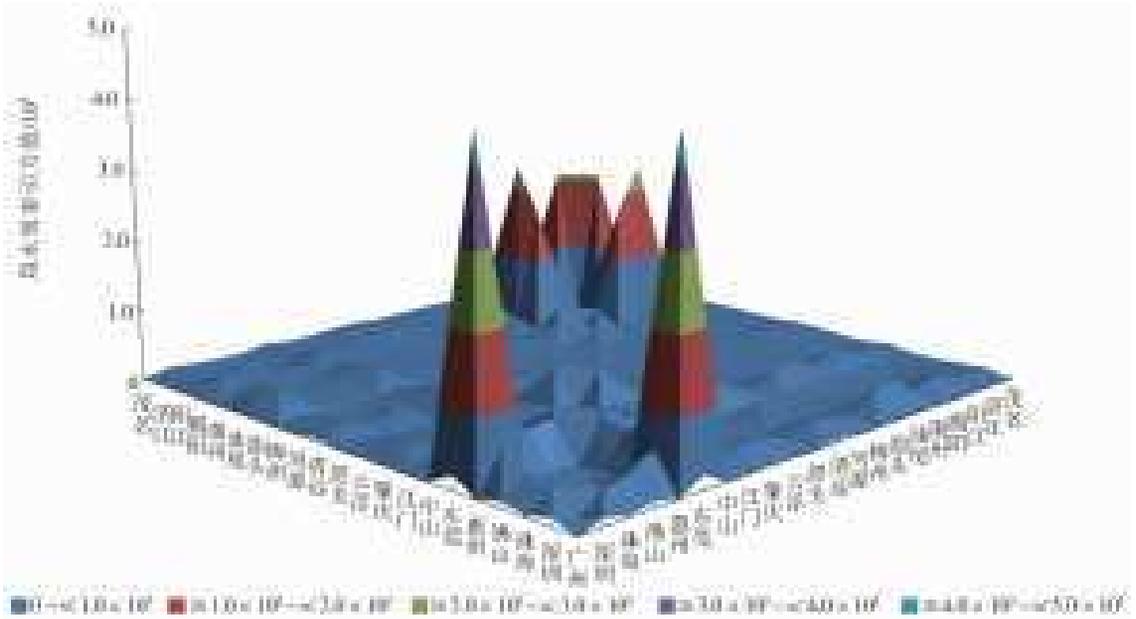


图 4 2004 年用水效率引力曲面图

Fig. 4 Gravity surface map of water efficiency in 2004

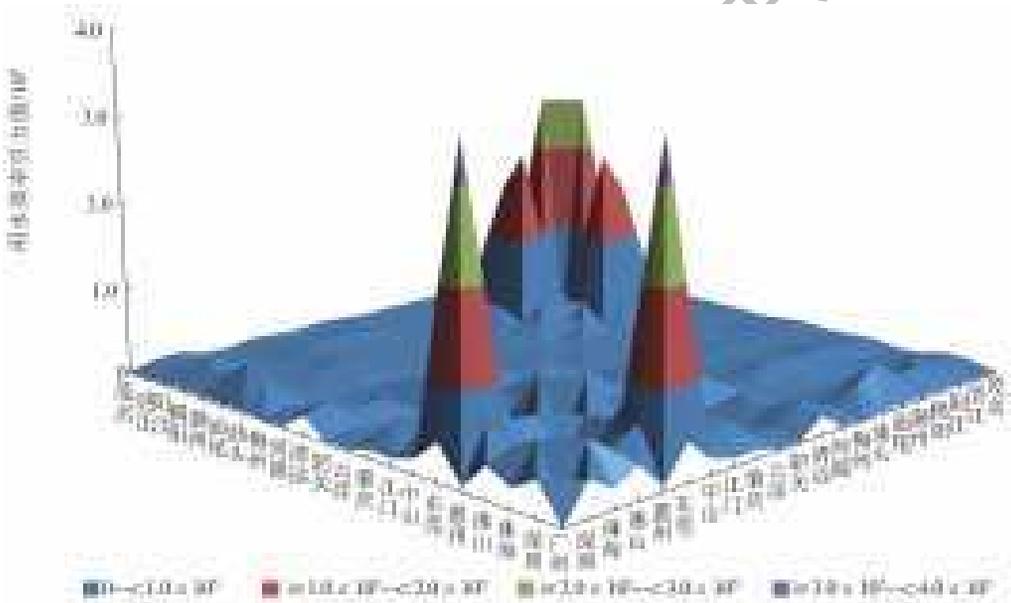


图 5 2009 年用水效率引力曲面图

Fig. 5 Gravity surface map of water efficiency in 2009

从整体来看,广东省各市用水效率空间关联度随时间呈现上升趋势,并呈现出明显的区域分异特征,形成了以深圳和东莞为核心的珠三角用水效率关联度高值区和以汕头为核心的粤东用水效率关联度副高值区,相比之下,粤西和粤北两地区则为用水效率关联度低值区。从区域层面来看,珠三角内部出现两极化现象,深圳作为关联度高值区的核心城市,与东莞、惠州、中山 3 市的用水效率关联度明显大于深圳与珠三角其他城市的用水效率关联度,而江门、肇庆与珠三角其他城市的用水效率关联度普遍为低值,粤东则未出现两极化现象,而粤西、粤北的用水效率关联度则始终为低值。究其原因,城市间用水效率空间关联强度受用水效率“质量”

和城市的空间距离两因素直接影响,其中用水效率“质量”受城市区位、产业结构以及经济发展水平等影响。深圳作为经济特区,经济发展水平高,其用水效率“质量”为大值,而东莞、惠州、中山 3 市的用水效率“质量”也位居广东省各市前列,同时在空间距离上,4 市均为相邻关系,即用水效率空间关联度大。相比之下,江门、肇庆经济发展水平相对不高,其用水效率“质量”为小值,且与深圳等城市空间距离大,继而用水效率空间关联度弱。粤西与粤北地区则属于广东省经济发展水平落后地区,其用水效率“质量”为小值,即该区域的用水效率空间关联度在全省范围内普遍为低值,同时与珠三角城市的空间距离大,所形成的用水效率空间关联度更弱。

粤东 4 市在经济特区汕头影响下,用水效率“质量”处于全省中游,同时在空间上为相邻关系,从而 4 市

用水效率空间关联度普遍较大,但由于与珠三角城市空间距离大,所形成的用水效率关联度不强。

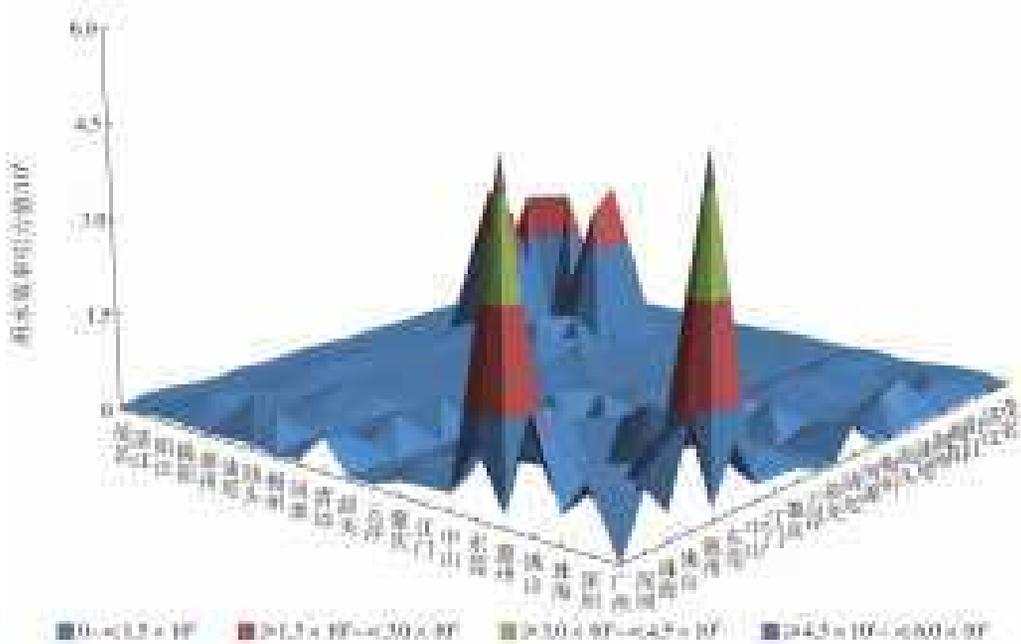


图 6 2014 年用水效率引力曲面图

Fig. 6 Gravity surface map of water efficiency in 2014

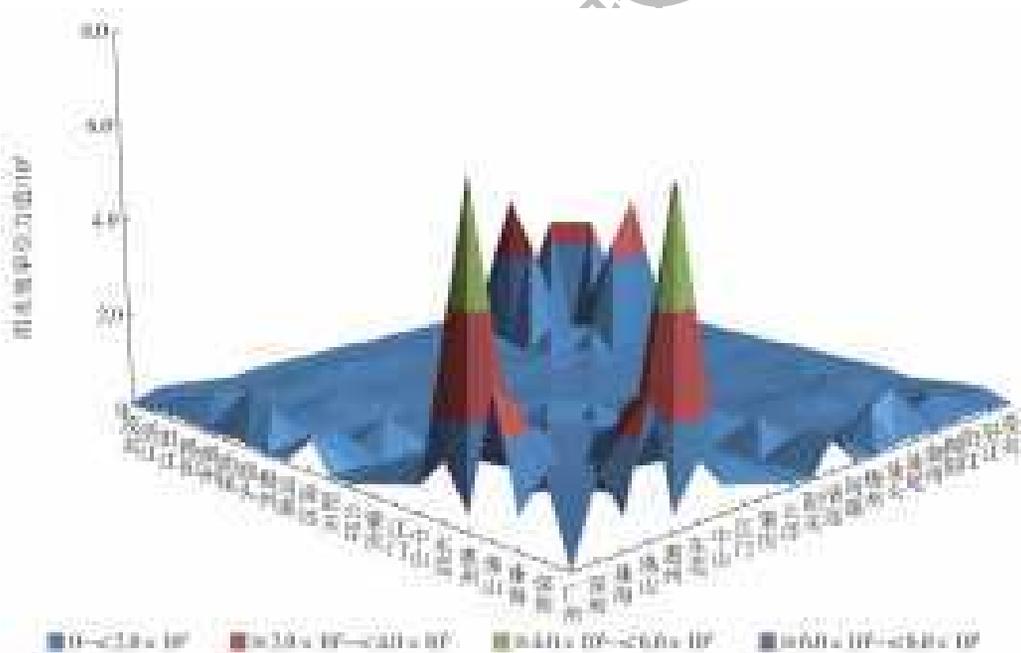


图 7 2018 年用水效率引力曲面图

Fig. 7 Gravity surface map of water efficiency in 2018

由此可见,全省各市的用水效率关联度随时间总体呈现增强趋势,但用水效率关联度的空间分异现象依然存在,其中用水效率关联度的高值集中在珠三角,粤东次之,粤西与粤北较弱,这与用水效率时空分布特征基本吻合。同时,珠三角、东西两翼和粤北区域间的用水效率关联度普遍不高。

2.3 用水效率关联度潜力的影响因素分析

根据已有研究,用水效率与本地区的自然条件、

经济发展水平、产业结构和科学技术水平密不可分^[25]。因此,从自然资源禀赋、经济发展、节水技术进步以及产业结构等方面选取影响用水效率关联度潜力的因素,同时考虑数据可获得性和代表性,选取人均水资源量作为自然资源禀赋因素,城镇化率和人均 GDP 作为经济发展因素,研究与试验发展经费作为节水技术进步因素,第一产业比重、第二产业比重以及第三产业比重作为产业结构因素,构建用水

效率关联度潜力与其影响因素的多元回归方程。其中,用水效率关联度潜力作为因变量由每个城市用水效率引力值求和得到的总引力值表示,各影响因素则作为解释变量。采用逐步回归法得到解释变量

的回归系数,并进行膨胀系数 VIF 多重共线性检验。对于回归系数的显著性水平 α ,一般可设置为 0.001 和 0.050,在本研究中,当 $\alpha \leq 0.050$ 时,可认为回归系数通过了 $\alpha=0.050$ 的显著性水平检验,结果见图 8。

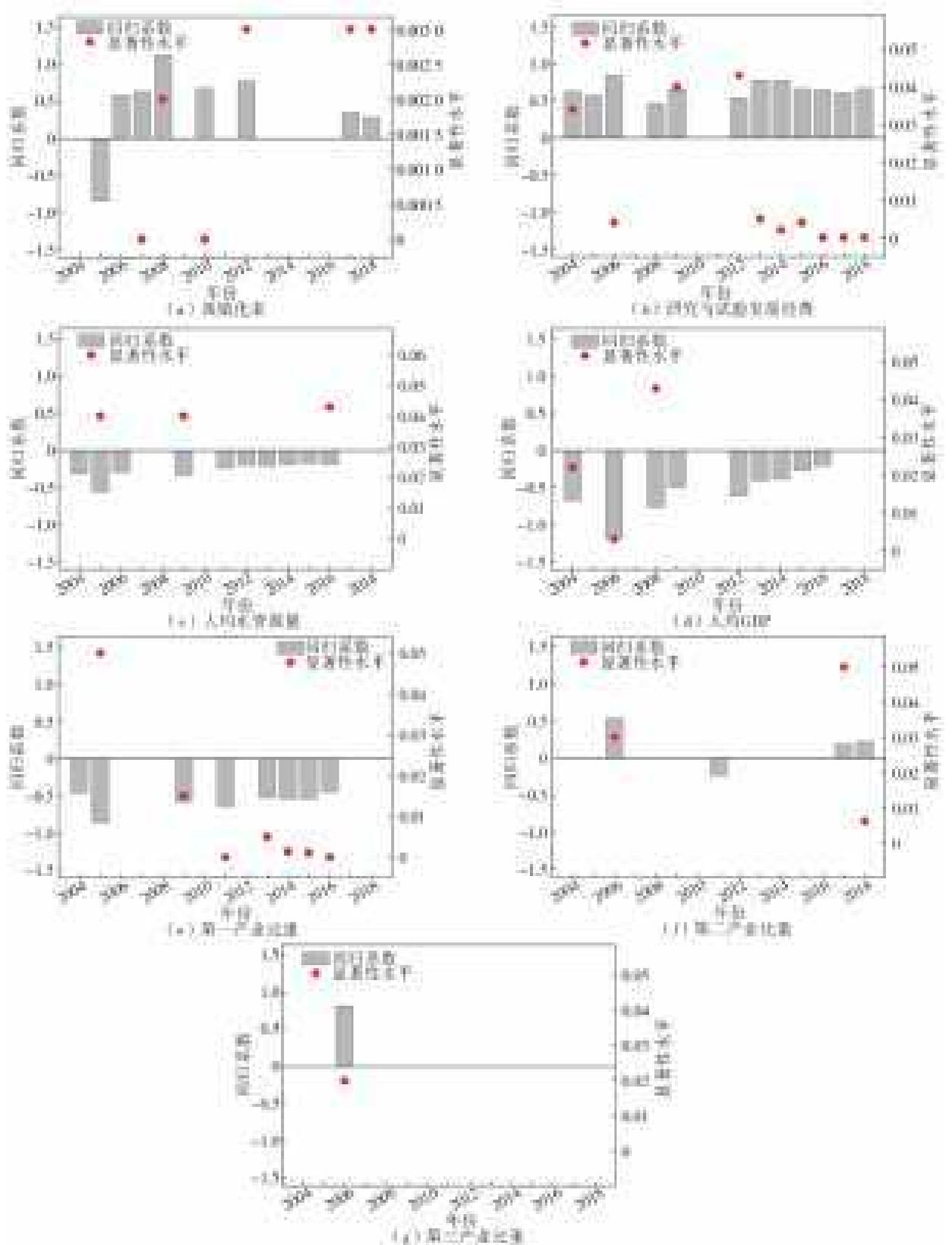


图 8 各影响因素回归分析结果

Fig. 8 Regression analysis of influencing factors

从整体上看,研究与试验发展经费通过 $\alpha = 0.050$ 显著性水平检验的年份多于其他影响因素,次数达到 10 次,而第三产业比重通过检验次数仅为 1 次,表明在 2004—2018 年,相较于其他影响因素,研究与试验发展经费对用水效率关联度潜力存在持续性的显著影响。从促进与抑制作用来看,城镇化率、研究与试验发展经费、第二产业比重以及第三产业比重的回归系数均为正数,而人均水资源量、人均 GDP 和第一产业比重回归系数则为负数,说明城镇化率、研究与试验发展经费、第二产业比重以及第三产业比重对用水效率关联度潜力起着促进作用,而人均水资源量、人均 GDP 和第一产业比重则对用水效率关联度潜力产生抑制作用。从时间变化来看,研究与试验发展经费自 2012 年起,连续七年通过显著性水平 $\alpha = 0.050$ 的检验,同时其显著性水平 α 随时间变小,回归系数整体下降幅度不大。在这期间,第一产业比重在 2013—2016 年连续 4 年通过显著性水平 $\alpha = 0.050$ 的检验,而剩余影响因素少有连续多年通过显著性水平 $\alpha = 0.050$ 的检验,表明随着时间推移,尤其是在 2012 年后,相较于其他影响因素,研究与试验发展经费的投入促进了节水技术的提高和设备的升级改造,进而显著影响区域用水效率关联度的潜力,对其起着主要的促进作用。

由此可见,相较于城镇化率、第一产业比重、人均水资源量、人均 GDP、第二产业比重以及第三产业比重,研究与试验发展经费对广东省用水效率的关联度潜力的影响更为持久,且影响的显著性随时间呈现增强趋势,为 2004—2018 年广东省用水效率关联度潜力的主要驱动因素。

3 结论与建议

通过构建用水效率引力模型,结合 ArcGIS 空间相关分析技术与多元回归分析方法,以区域经济社会发展不平衡问题突出的广东省为例,研究了区域用水效率关联度的时空演变特征及影响因素,得到如下结论:

(1)广东省各地级市万元 GDP 用水量与农田灌溉亩均用水量存在较为显著的空间自相关性,总体上形成了以珠三角为用水效率高值区(冷点区),粤北与东西两翼为用水效率低值区(热点区)的不均衡空间分布格局。

(2)广东省各地级市用水效率关联度随时间推移呈增强趋势,但用水效率关联度的空间分异现象明显,珠三角地区(以深圳和东莞为核心)用水效率关联度最强,粤东(以汕头为核心)次之,粤西与粤北

较弱,与全省用水效率的时空分布特征基本吻合。

(3)研究与试验发展经费、城镇化率、第二产业比重以及第三产业比重对用水效率关联度潜力起着显著的正向促进作用,而人均水资源量、人均 GDP 和第一产业比重则对用水效率关联度潜力产生负向抑制作用。其中,研究与试验发展经费对用水效率关联度潜力的影响更为持久,且随着时间推移,对用水效率关联度潜力的正向促进作用更为显著。

根据以上研究结论,结合新时期“十六字”治水思路、广东省最严格水资源管理措施和区域发展战略,提出如下建议:

(1)正视区域用水效率空间分布的不均衡问题,基于区域用水效率关联度的空间分异特性,充分发挥用水效率高值区的联动作用,深化东西两翼和粤北地区与珠三角区域合作,促进资金、技术、资源等要素以珠三角为中心的广泛流动,从而拓宽珠三角用水效率的空间溢出通道,增大提升东西两翼和粤北地区用水效率的受益面,为实现区域用水效率空间均衡提供充分引力。

(2)广东省在持续推进城镇化进程的同时,应保持加大科技研发投入,尤其是东西两翼和粤北山区,将水利创新科技成果转化与区域后发优势紧密结合,以提升用水效率和提高水资源管理水平;继续优化升级产业结构,提升第二、第三产业比重,发挥其在促进全省用水效率关联度潜力提升方面的积极作用,进而增强用水效率高值区的空间溢出效应和带动作用,为实现区域水资源开发利用的均衡协调发展提供坚实保障。

研究基于用水效率引力模型,研究了区域用水效率关联度的时空演变,目前只是得到了初步结果,如在核算用水效率“质量”中,用水效率采用了简单的比值法,且存在用水指标较少等问题。下一步可结合区域虚拟水贸易,继续深入探讨区域用水效率关联度的影响机制。

参考文献(References):

- [1] 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[J]. 长江流域资源与环境, 2009, 18(2): 116-120. (ZHANG L P, XIA J, HU Z F. Situation and problem analysis of water resource security in China [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2009, 18(2): 116-120. (in Chinese))
- [2] 李慧,丁跃元,李原园,等. 新形势下我国节水现状及问题分析[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(1): 202-208. (LI H, DING Y Y, LI Y Y, et al. Analysis of status quo and problems of water conservation in China in

- new situation[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(1): 202-208. (in Chinese)) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2019. 0027.
- [3] 李原园,曹建廷,黄火键,等. 国际上水资源综合管理进展[J]. 水科学进展, 2018, 29(1): 127-137. (LI Y Y, CAO J T, HUANG H J, et al. International progress in integrated water resources management[J]. Advances in Water Science, 2018, 29(1): 127-137. (in Chinese)) DOI: 10. 14042/j. cnki. 32. 1309. 2018. 01. 015.
- [4] 方诗标,贾仁甫,方诗彬,等. 城市生活用水效率驱动因子及调控研究[J]. 人民黄河, 2013, 35(3): 47-50, 61. (FANG S B, JIA R F, FANG S B, et al. Study on drive factors and regulation of urban domestic water use efficiency[J]. Yellow River, 2013, 35(3): 47-50, 61. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-1379. 2013. 03. 017.
- [5] 于琪洋. 实行最严格水资源管理制度考核工作分析与展望[J]. 中国水利, 2019(17): 6-8. (YU Q Y. Analysis and prospect of implementing the assessment of the strictest water resources management system[J]. China Water Resources, 2019(17): 6-8. (in Chinese))
- [6] 陈晓宏,王佳雯,何艳虎,等. 基于水资源需求场理论的需水驱动力影响分析[J]. 水科学进展, 2018, 29(3): 358-364. (CHEN X H, WANG J W, HE Y H, et al. Analysis on driving forces of water demand based on theory of water demand field[J]. Advances in Water Science, 2018, 29(3): 358-364. (in Chinese)) DOI: 10. 14042/j. cnki. 32. 1309. 2018. 03. 007.
- [7] 赵良仕,孙才志,郑德凤. 中国省际水资源利用效率与空间溢出效应测度[J]. 地理学报, 2014, 69(1): 121-133. (ZHAO L S, SUN C Z, ZHENG D F. Water resource utilization efficiency and its spatial spillover effects measure in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(1): 121-133. (in Chinese)) DOI: 10. 11821/dlxb201401012.
- [8] 周迪,周丰年. 中国水资源利用效率俱乐部趋同的检验、测度及解释: 2003—2015年[J]. 自然资源学报, 2018, 33(7): 1103-1115. (ZHOU D, ZHOU F N. Inspection, measurement and interpretation of club convergence of water resources utilization efficiency in China: 2003-2015[J]. Journal of Natural Resources, 2018, 33(7): 1103-1115. (in Chinese)) DOI: 10. 31497/zrzyxb. 20170638.
- [9] 马剑锋,王慧敏,佟金萍. 技术进步与效率追赶对农业用水效率的空间效应研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2018, 28(7): 36-45. (MA J F, WANG H M, TONG J P. Research on spatial effects of technological progress and efficiency catch-up on agricultural water use efficiency[J]. China Population, Resources and Environment, 2018, 28(7): 36-45. (in Chinese)) DOI: 10. 12062/cpre. 20171215.
- [10] 赵沁娜,王若虹. 省际工业用水效率测度及空间关联特征[J]. 水资源保护, 2017, 33(5): 42-47. (ZHAO Q N, WANG R H. Measurement of provincial industrial water use efficiency and its characteristics of spatial association[J]. Water Resources Protection, 2017, 33(5): 42-47. (in Chinese)) DOI: 10. 3880/j. issn. 1004-6933. 2017. 05. 008.
- [11] 陈洪斌. 我国省际农业用水效率测评与空间溢出效应研究[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(2): 85-90. (CHEN H B. Provincial agricultural water use efficiency evaluation and spatial spillover effect in China[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2017, 31(2): 85-90. (in Chinese)) DOI: 10. 13448/j. cnki. jalre. 2017. 049.
- [12] 史毅超,唐彦,唐德善,等. 基于DEA和Malmquis指数的浙江省用水效率分析[J]. 人民长江, 2018, 49(9): 35-40. (SHI Y C, TANG Y, TANG D S, et al. Analysis on water use efficiency in Zhejiang Province based on DEA model and Malmquis index[J]. Yangtze River, 2018, 49(9): 35-40. (in Chinese)) DOI: 10. 16232/j. cnki. 1001-4179. 2018. 09. 007.
- [13] KAHOU LI B, MAKTOUF S. The determinants of FDI and the impact of the economic crisis on the implementation of RTAs: A static and dynamic gravity model[J]. International Business Review, 2015, 24(3): 518-529. DOI: 10. 1016/j. ibusrev. 2014. 10. 009.
- [14] RAHMAN N, RAHMAN M N. One Belt One Road: will it increase the gravity between China and Eurasia[J]. Journal of International Trade Law and Policy, 2019, 18(3): 152-164. DOI: 10. 1108/JITLP-06-2019-0037.
- [15] 齐梦溪,鲁晗,曹诗颂,等. 基于引力模型的经济空间结构时空演变分析: 以河南省为例[J]. 地理研究, 2018, 37(5): 883-897. (QI M X, LU H, CAO S S, et al. Spatial and temporal evolution of economic spatial structure based on gravity model: A case of Henan Province, China[J]. Geographical Research, 2018, 37(5): 883-897. (in Chinese)) DOI: 10. 11821/dlyj201805003.
- [16] 孟德友,陆玉麒. 基于引力模型的江苏区域经济联系强度与方向[J]. 地理科学进展, 2009, 28(5): 697-704. (MENG D Y, LU Y L. Strength and direction of regional economic linkage in Jiangsu Province based on gravity model[J]. Progress in Geography, 2009, 28(5): 697-704. (in Chinese))
- [17] 黄应来,王彪,王丽莹. 广东GDP突破10万亿元

- [N]. 南方日报, 2020-01-19 (A06). (HUANG Y L, WANG B, WANG L Y. Guangdong's GDP exceeded 10 trillion yuan [N]. Nangfang Ribao, 2020-01-19 (A06)).
- [18] 刘继生, 陈彦光. 分形城市引力模型的一般形式和应用方法[J]. 地理科学, 2000, 20(6): 528-533. (LIU J G, CHEN Y G. The gravitational models of fractal cities; Theoretical basis and applied methods[J]. Scientia Geographica Sinica, 2000, 20(6): 528-533. (in Chinese)) DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2000.06.007.
- [19] 顾朝林, 庞海峰. 基于重力模型的中国城市体系空间联系与层域划分[J]. 地理研究, 2008, 27(1): 1-12. (GU C L, PANG H F. Study on spatial relations of Chinese urban system; Gravity model approach[J]. Geographical Research, 2008, 27(1): 1-12. (in Chinese))
- [20] 刘承良, 丁明军, 张贞冰, 等. 武汉都市圈城际联系通达性的测度与分析[J]. 地理科学进展, 2007, 26(6): 106-113. (LIU C L, DING M J, ZHANG Z B, et al. Accessibility analysis on the spatial linkage of Wuhan metropolitan area[J]. Progress In Geography, 2007, 26(6): 106-113. (in Chinese)) DOI: 10.11820/dlkxjz.2007.06.011.
- [21] 苗长虹, 王海江. 河南省城市的经济联系方向与强度[J]. 地理研究, 2006, 25(2): 222-232. (MIAO C H, WANG H J. On the direction and intensity of urban economic contacts in Henan Province[J]. Geographical Research, 2006, 25(2): 222-232. (in Chinese))
- [22] 靳海攀, 郑林, 张敬伟. 基于时间距离的鄱阳湖生态经济区经济联系变化网络分析研究[J]. 经济地理, 2013, 33(6): 148-154. (JIN H P, ZHENG L, ZHANG J W. Network analysis of economic contacts variability in Poyang Lake ecological economic zone based on travel time cost[J]. Economic Geography, 2013, 33(6): 148-154. (in Chinese)) DOI: 10.15957/j.cnki.jjdl.2013.06.009.
- [23] YUAN Y, CAVE M, ZHANG C. Using Local Moran's I to identify contamination hotspots of rare earth elements in urban soils of London[J]. Applied Geochemistry, 2018, 167-178. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2017.07.011.
- [24] 余灏哲, 李丽娟, 李九一. 一体化进程中京津冀水资源利用与城市经济发展关系时空分析[J]. 南北水调与水利科技, 2019, 17(2): 29-39. (YU H Z, LI L J, LI J Y. Temporal and spatial relationships between water resources utilization and urban economic development in Beijing-Tianjin-Hebei region during integration process[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(2): 29-39. (in Chinese) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbtdqk.2019.0031.
- [25] 孙才志, 王妍, 李红新. 辽宁省用水效率影响因素分析[J]. 水利经济, 2009, 27(2): 1-5. (SUN C Z, WANG Y, LI H X. Influencing factors of water utilization efficiency in Liaoning Province[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2009, 27(2): 1-5. (in Chinese))

Spatiotemporal evolution and influencing factors of correlation degree of regional water use efficiency

GONG Zhenjie¹, HE Yanhu^{1,2}

(1. Guangdong Provincial Key Laboratory of Water Quality Improvement and Ecological Restoration for Watersheds, 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: With only 7% of the global water resources available to feed 22% of the world's population, China is facing significant challenges from water scarcity. Since 2000, China has entered a stage of rapid development, however, the extensive utilization of water resources has led to low water use efficiency (WUE) which seriously hinders the sustainable development of economy, society and ecological environment. Guangdong, as a developed province in China, has ranked the first in economic aggregate for the last twenty-eight years. However, the regional inequality development is still prominent, among which the uneven of water resources exploitation and utilization can not be ignored. Thus, the improvement of spatial equilibrium in WUE is highly needed for solving the problem of uneven spatial distribution of water resources.

Time series of panel data were obtained from Guangdong Province from 2004 to 2018, and this dataset is comprised of 21 prefecture-level cities. The spatiotemporal characteristic of the regional WUE and its spatial correlation degree were explored using constructing gravity model and spatial analysis technique. The multiple regression models were further used to identify the main influencing factors.

The water consumption per ten-thousand-yuan of Gross Domestic Product (GDP) and the average water consumption per mu for farmland irrigation had relatively strong spatial correlations in Guangdong Province in terms of WUE. The area of high WUE (cold spot) was located in the Pearl River Delta (PRD) while the area of low WUE (hot spot) was located in the north,

(下转第 495 页)

water resources in each city. The matching relationship between the water resources utilization and the economic development of 10 cities in Henan section of the Shaying River basin from 2014 to 2018 is studied, based on the calculation method of data sequence. Finally, the matching degree among water consumption, the available water resources and the GDP of each city is analyzed.

Results show that there is a large gap in available water resources due to climatic conditions and other factors, among which Luohe and Zhoukou have more available water resources. During the study period, the matching relationship between available water resources and water consumption of various cities differed greatly. Although Zhumadian is rich in water resources and has many rivers in its territory, while its water consumption ranks low among the cities, so the matching degree of water resources availability and water consumption in Zhumadian is poor. In the time dimension, the matching degree between water consumption and GDP of various cities was good; while in the spatial dimension, the matching situation of Kaifeng was the worst, and other cities such as Luohe were better. Meanwhile, the matching degree was at a higher level or above, indicating that the water resources consumed by cities in the Henan section of the Shaying River basin can produce corresponding economic benefits. In terms of time and space, the matching relationship between the available water resources and GDP in various cities had significant differences. The matching degree of Shaying River basin was the best in 2016, and the matching degree in Pingdingshan, Ruzhou, Nanyang, and Zhumadian were relatively better.

In general, the matching degree of water consumption and GDP of different cities in Henan around Shaying River basin has little difference over time, and the matching degree of different cities is similar. However, the matching degree of available water resources and GDP varies greatly between different cities. Therefore, it is necessary to use water transfer or other ways to improve the local water resources endowment conditions. Results are helpful to reveal the temporal and spatial evolution law of water resources utilization and economic development in various cities of Shaying River basin, clarify its influencing factors, and provide decision supports for realizing the optimal allocation and efficient utilization of water resources, and coordinated socio-metric development among regions.

Key words: water resource; matching degree; available water resource; spatio-temporal matching; Shaying River basin

(上接第 486 页)

east and west of Guangdong. Meanwhile, an increasing trend was observed in correlation degree of WUE, among which the highest correlation degree was found in the PRD (with Shenzhen and Dongguan as the core), followed by the east of the province (with Shantou as the core) and the north and west of the province. For the driving factors, it is found that the research and experimental development funds (R&D), urbanization rate, the proportion of secondary and tertiary industry have positive effect on the potential correlation degree of WUE. Furthermore, R&D was found the major driving factor for the increase of the potential correlation degree of WUE over time, while per capita water resources, per capita GDP and the proportion of primary industry performed negative effect on the potential correlation degree of WUE.

The spatiotemporal distribution of WUE is uneven in the Guangdong Province. The correlation degree of WUE showed an increasing trend over time, yet spatial variation of the correlation degree of WUE was obvious. Multi-factor interactions are essential for the potential correlation degree of WUE, however, the R&D was found the dominant factor for the changes of the potential correlation degree of WUE.

Key words: gravity model; regional water use efficiency; spatial correlation degree; Guangdong Province; influencing factor