

文章编号: 1000-7709(2021)04-0040-04

基于地理探测器的广东省水资源利用效率影响因素研究

刘 莉,汪丽娜

(华南师范大学地理科学学院, 广东 广州 510631)

摘要: 城市水资源利用效率受自然因素与人为因素的综合影响,对水资源利用效率及其影响因素进行综合评价与探测,有利于为城市水资源的综合治理提供科学理论依据。使用人工鱼群投影寻踪模型,以广东省 21 个地级市为研究对象,对区域的水资源利用效率进行评价,在此基础上,采用**地理探测器模型,从自然条件和社会经济角度,探究各项影响因素对水资源利用效率的解释力**。结果显示,2018 年广东省水资源利用效率评价价值较高的城市主要分布于珠三角地区与粤东沿海地区;产水系数对水资源利用效率空间差异解释力最强;各要素相互作用后对水资源利用效率解释力明显增强,表明水资源利用效率空间差异是多因素综合影响的结果。

关键词: 水资源利用效率;投影寻踪模型;**地理探测器**;广东省

中图分类号: TV213.9

文献标志码: A

1 研究区概况

广东省陆地范围介于北纬 $20^{\circ}09'$ ~ $25^{\circ}31'$,东经 $109^{\circ}45'$ ~ $117^{\circ}20'$ 之间,东西跨度约 800 km,南北跨度约 600 km。省域范围内地貌类型复杂多样,地势总体北高南低,北部多为山地和高丘陵,南部则为平原和台地。广东省地处东亚季风区,光、热、水资源丰沛,且雨热同期;全省年平均气温 21.8°C ,平均降水量为 1 789.3 mm。沿海台地和低丘陵区不利蓄水,缺水现象突出;部分河流中下游河段由于城市废污水排放,造成城市水质性缺水问题。对广东省水资源利用效率进行研究,有利于为广东省水资源利用效率的提升提供理论支撑与决策支持。现有水资源利用效率评估及影响因素分析的研究方法主要包括数据包络法(DEA)^[1]、模糊综合评价法^[2]、主成分分析法^[3]等,各方法均存在一定的优缺点^[4,5]。且现有对水资源利用效率影响因素的研究聚焦在经济社会因素上,实际上,除社会经济因素外,区域水资源利用效率还受自然资源条件等多方面的影响。鉴此,本文引入人工鱼群的投影寻踪模型^[6],结合地

理探测器,分析造成广东省 21 个地级市水资源利用效率空间差异的社会经济和自然条件影响因素,旨在为城市水资源综合治理和水资源可持续发展措施的实施提供有效依据和理论支撑。

2 研究数据与方法

2.1 研究指标与数据来源

2.1.1 指标的选取

区域水资源利用效率反映了某区域在生产生活中对水资源的使用情况,是水资源有效开发利用和管理的重要综合指标。由于不同区域自然条件、社会经济条件、水资源利用方式等存在差异,水资源利用效率呈现明显的空间分异。在选取水资源利用效率评价指标时,需要遵循科学性、系统性及可获取性的指标选取原则^[7]。利用文献^[8]研究成果,结合现有的统计资料,根据广东省经济总量大、人口密集、区域工农业用水结构差异大的现状,多角度全面、系统地构建水资源利用效率与水资源利用效率影响因素两大评价体系。其中,水资源利用效率评价指标见表 1,水资源利用效率影响因素指标见表 2。

收稿日期: 2020-06-15,修回日期: 2020-07-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(41501021)

作者简介: 刘莉(1993-),女,硕士研究生,研究方向为城市化下的水资源特征,E-mail: licanly.liu@hotmail.com

通讯作者: 汪丽娜(1981-),女,博士、副教授,研究方向为水文要素变异、城市化下的水资源特征,E-mail: linawang2004@163.com

表 1 广东省水资源利用效率测度评价体系
Tab.1 Evaluation system of water resources
utilization efficiency in Guangdong Province

指标类型	指标
水资源综合利用效率	万元 GDP 用水量/(m ³ ·万元 ⁻¹) 人均综合用水量/(m ³ ·人 ⁻¹)
工业用水效率	万元工业产值用水量/(m ³ ·万元 ⁻¹)
农业用水效率	万元农业产值用水量/(m ³ ·万元 ⁻¹) 耕地实际灌溉每公顷均用水量/(m ³ ·ha ⁻¹)

表 2 广东省水资源利用效率影响因素指标体系
Tab.2 Index system of influencing factors of water
resources utilization efficiency in Guangdong Province

影响因素	指标
水资源条件	降水量 $v_1/10^8\text{m}^3$ 地表水资源量 $v_2/10^8\text{m}^3$ 地下水资源量 $v_3/10^8\text{m}^3$ 水资源总量 $v_4/10^8\text{m}^3$ 产水系数 v_5
自然地理条件	归一化植被指数 v_6 (NDVI) 土地利用/覆被 v_7 (LUCC) 高程 (DEM) v_8/m
技术进步	研究与试验 (R&D) 经费 $v_9/\text{亿元}$
城市发展水平	城镇化率 $v_{10}/\%$

2.1.2 数据来源

为全面、系统地对广东省水资源利用效率进行量化与分析,使用的数据类型包括统计数据和空间数据 2 类。考虑数据的可获取性、完整性,以 2018 年为研究年份。其中,水资源利用效率评价体系中的用水量数据来源于广东省水资源公报,GDP、工农业产值数据来源于广东省统计年鉴;水资源利用效率影响因素中的水资源条件指标数据来源于广东省水资源公报,自然地理条件指标数据来源于中国科学院地理科学与资源环境研究所数据中心网站(<http://www.resdc.cn>),研究与试验 (R&D) 经费和城镇化率数据分别来源于广东省科技经费投入公报和广东省统计年鉴。

2.2 研究方法

2.2.1 水资源利用效率评价方法

由于各项评价指标量纲存在差异,为消除量纲的影响,对表 1 中农业、工业及水资源综合利用效率的各项指标进行标准化处理。

设指标集为 $\{x^*(i,j) \mid i=1,2,\cdots,n;j=1,2,\cdots,P\}$, 在研究中, $x^*(i,j)$ 为第 i 个城市第 j 个评价指标值; n 、 P 分别为城市的数量和评级指标的个数。

根据表 1,所使用的指标均为越小越优型指标,因此进行归一化处理:

$$x(i,j)=\frac{x_{\max}(j)-x^*(i,j)}{x_{\max}(j)-x_{\min}(j)} \quad (1)$$

式中, $x_{\max}(j)$ 、 $x_{\min}(j)$ 分别为指标集中第 j 个评价指标的最大、最小值。

由式(1)得出指标归一化结果,采用人工鱼群算法的投影寻踪模型,对 2018 年广东省 21 个地级市的水资源利用效率进行量化。计算方法见文献[9]。

2.2.2 水资源利用效率影响因子探测方法

借助地理探测器对广东省 2018 年水资源利用效率的影响因素进行探讨。地理探测器是探测空间分异性,以及解释其背后驱动力的一组统计学方法^[10],因子探测与交互探测是其中两种探测器。

(1)因子探测。因子探测用于探测 Y 的空间分异性,以及某因子 X 多大程度上解释了属性 Y 的空间分异。本研究中因变量 Y 为广东省 21 个城市的水资源利用效率, X 则表示对广东省水资源利用效率造成影响的各项因子。因子探测结果用 q 值度量,表达式为:

$$q=1-\frac{1}{N\sigma^2}\sum_{h=1}^LN_h\sigma_h^2=1-\frac{S_{\text{SW}}}{S_{\text{ST}}} \quad (2)$$

其中 $S_{\text{SW}}=\sum_{h=1}^LN_h\sigma_h^2$; $S_{\text{ST}}=N\sigma^2$ (3)

式中, $h=1,2,\cdots,L$ 为变量 Y 或因子 X 的分层,即分类或分区; N_h 、 N 分别为层 h 和全区的单元数; σ_h^2 、 σ^2 分别为层 h 和全区的值 Y 的方差。

q 的值域为 $[0,1]$, q 值越大表示自变量 X 对属性 Y 的解释力越强,反之越弱。

(2)交互作用探测。交互作用探测用于识别不同风险因子之间的交互作用,即评估因子 X_1 、 X_2 共同作用是否会增加或减弱对因变量的解释力。两个因子之间的交互作用见表 3。

表 3 两个自变量对因变量交互作用的类型

判据	交互作用
$q(X_1 \cap X_2) < \min(q(X_1), q(X_2))$	非线性增强
$\min(q(X_1), q(X_2)) < q(X_1 \cap X_2) < \max(q(X_1), q(X_2))$	单因子非线性减弱
$q(X_1 \cap X_2) > \max(q(X_1), q(X_2))$	双因子增强
$q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$	独立
$q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$	非线性增强

3 结果与分析

3.1 水资源利用效率评价

利用式(1)对表 1 中水资源利用效率测度指标进行归一化后,采用人工鱼群算法投影寻踪模型,可得 2018 年广东省 21 个地级市水资源利用效率评价价值。根据评价结果,利用 ArcGIS 中的

自然断点法,将 2018 年广东省水资源利用效率评价值按照“低”、“较低”、“一般”、“较高”、“高”五个等级进行划分,得出水资源利用效率等级空间分布特征,见图 1。

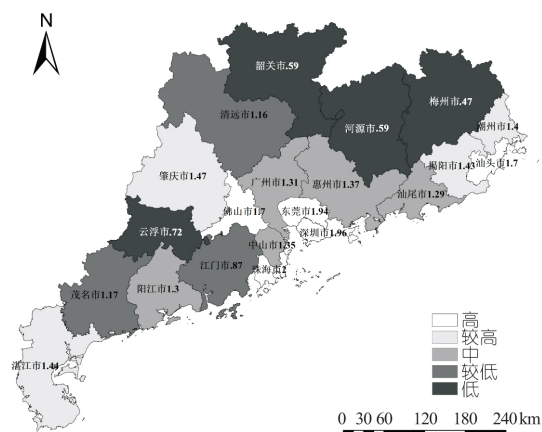


图 1 2018 年广东省水资源利用效率空间分布

Fig.1 The spatial distribution of water resources utilization efficiency of Guangdong Province in 2018

按照广东省“珠三角地区、粤东沿海地区、粤西沿海地区、北部山区”四大板块的划分原则,水资源利用效率评价为“高”、“较高”的城市,主要分布于珠三角地区和粤东沿海地区;水资源利用效率评价值“低”的城市,则大部分分布在北部山区。根据各城市水资源利用效率评价值与水资源利用效率评价指标基础数据,水资源利用效率最高的 3 个城市分别为珠海市(2.00)、深圳市(1.96)、东莞市(1.94)。由于研究使用的指标均为越小越优型,用水量越少,水资源利用效率越高。反映水资源利用效率的 5 项指标中,珠海市万元农业产值用水量全省最低,万元 GDP 用水量全省倒数第 2;深圳市万元工业产值用水量和人均综合用水量均为全省最低;东莞市耕地实际灌溉每公顷平均用水量为全省最低,万元 GDP 用水量全省倒数第 3。

3.2 水资源利用效率影响因素探测

利用地理探测器,分别探测影响水资源利用的因素在单独作用及综合作用时,对广东省水资源利用效率所造成的影响程度。根据表 2,土地利用/覆盖按照中国土地利用/覆被数据分类系统分为耕地、林地、草地、水域、居民用地、未利用土地 6 个类型,其余指标则应用自然断点法分为 5 类。利用地理探测器的因子探测及交互作用探测,对造成广东省水资源利用效率空间分异的各项影响因素指标进行探测,结果见表 4。由表 4 可知,在 4 个影响方面中,水资源条件 5 项指标 q 统计值平均值最高,对水资源利用效率的解释力达 30.60%;其次为城市发展水平,所对应的城镇化率(v_{10})

表 4 水资源利用效率影响因素探测结果

Tab.4 Factor detector results of water resources utilization efficiency

影响因素	指标	q 统计值
水资源条件	v_1	0.27
	v_2	0.33
	v_3	0.30
	v_4	0.25
	v_5	0.38
自然地理条件	v_6	0.11
	v_7	0.08
	v_8	0.18
	v_9	0.15
城市发展水平	v_{10}	0.22

平均解释力达 22.10%。对 2018 年广东省水资源利用效率影响最小的为自然地理条件,3 项指标平均解释力仅为 12.33%。从单项指标看,对水资源利用效率影响最大的为产水系数(v_5),随后依次为地表水资源量(v_2)、地下水资源量(v_3)。

采用交互探测方法进一步检测两个影响因素指标的交互作用是否增加对广东省水资源利用效率的解释力,结果见表 5。

表 5 广东省 2018 年水资源利用效率影响因素交互探测结果

Tab.5 Interaction detector result of water resources utilization efficiency of Guangdong Province in 2018

指标	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5	v_6	v_7	v_8	v_9	v_{10}
v_1	0.27									
v_2	0.53	0.33								
v_3	0.47	0.47	0.30							
v_4	0.46	0.40	0.35	0.25						
v_5	0.85	0.63	0.63	0.63	0.38					
v_6	0.30	0.34	0.32	0.29	0.46	0.11				
v_7	0.30	0.35	0.33	0.30	0.45	0.12	0.08			
v_8	0.37	0.43	0.43	0.42	0.50	0.23	0.21	0.18		
v_9	0.38	0.42	0.37	0.35	0.56	0.20	0.20	0.30	0.15	
v_{10}	0.43	0.48	0.55	0.56	0.63	0.25	0.24	0.32	0.26	0.22

由表 5 可知,10 项影响因素指标交互后,各项指标对水资源利用效率的影响程度均增强,且各项指标的交互作用类型均为双因子增强或非线性增强。其中,产水系数(v_5)与降水量(v_1)之间的交互作用对水资源利用效率解释力最强,达 85%;此外,产水系数(v_5)与其他水资源条件指标,以及城镇化率(v_{10})交互作用后解释力均达到 63%的较高水平。根据因子探测和交互探测结果,综合判断得出影响广东省水资源利用效率的主导因素是水资源条件,主要包括产水系数、地表水资源量与地下水资源量;其次,城市发展水平也是影响城市水资源利用效率的重要因素。

产水系数是降水转化为产水量的效率值^[11],该指标能反映区域径流状况。由于广东省降雨丰沛,受强降雨和上游来水影响,洪水灾害为省内主要自然灾害之一,对全省的生产活动和水资源利

用造成重大影响^[12]。其次,由于城市发展,广东省农业废水、工业废水及生活污水排放增多,造成部分河流中下游河段污染,对各地地表水与地下水资源造成不同程度的污染,并导致部分地区存在水质性缺水问题,从而对水资源利用效率造成影响。再次,城镇化率是衡量城市化水平的重要指标之一,对水资源利用效率拥有较强解释力水平,是由于城镇化导致城市下垫面状况发生改变,影响城市径流。此外,随着经济发展,城镇人口增长,城市需水量急剧增加,但部分城市水资源管理水平、节水技术无法与日益增长的水资源需求相互平衡,从而对水资源利用效率产生一定影响。

4 结论

a.珠三角地区水资源利用效率在广东省内较高,产水系数为主要影响因素,各项影响因素对水资源利用效率的影响程度在交互后均有增强。

b.地理探测器可有效探测地区的全局驱动力,可广泛应用于水资源利用效率空间差异的识别与分析中。

c.由于数据获取渠道等限制,无法对所有影响因素进行分析,结果具有一定局限性。

参考文献:

[1] 马海良,黄德春,张继国.考虑非合意产出的水资源

利用效率及影响因素研究[J].中国人口·资源与环境,2012,22(10):35-42.

[2] 罗勇,王乐志,傅春,等.基于主客观耦合的区域水资源综合利用效率评价[J].人民长江,2019,50(12):80-84.

[3] 李浩鑫,邵东国,尹希,等.基于主成分分析和 Copula 函数的灌溉用水效率评价方法[J].农业工程学报,2015,31(11):96-102.

[4] 孙加森.数据包络分析(DEA)的交叉效率理论与应用研究[D].合肥:中国科学技术大学,2014.

[5] 许新宜,王红瑞,刘海军.中国水资源利用效率评估报告[M].北京:北京师范大学出版社,2010.

[6] 方崇,张春乐,陆克芬.基于人工鱼群算法的南宁市内河水水质综合评价的投影寻踪回归分析[J].中国农村水利水电,2010(2):8-12.

[7] 李世祥,成金华,吴巧生.中国水资源利用效率区域差异分析[J].中国人口·资源与环境,2008,18(3):215-220.

[8] 雍志勤,张鑫.基于投影寻踪模型的榆林市水资源承载力研究[J].灌溉排水学报,2019,38(1):101-107.

[9] 汪丽娜,陈晓宏,李粤安.投影寻踪和人工鱼群算法的洪水分类[J].人民长江,2008,39(24):34-37.

[10] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].地理学报,2017,72(1):116-134.

[11] 赵亚茹,周俊菊,雷莉,等.基于 InVEST 模型的石羊河上游产水量驱动因素识别[J].生态学杂志,2019,38(12):3789-3799.

[12] 陈韬澜.广东省水资源变化、问题及建议浅谈[J].人民论坛,2014(34):222-223.

Study on Influencing Factors of Water Resources Utilization Efficiency in Guangdong Province Based on Geo-detector Method

LIU Li, WANG Li-na

(School of Geography Science, South China Normal University, Guangzhou 510631, China)

Abstract: Urban water resources utilization efficiency is affected by both natural and human factors. The comprehensive evaluation and detection of water resource utilization efficiency and its influencing factors are conducive to providing scientific theoretical basis for the comprehensive management of urban water resources. In this paper, projection pursuit model based on artificial fish swarm was used to evaluate the regional water resources utilization efficiency in 21 cities of Guangdong Province. Then, the Geo-detector model was used to explore the influencing factors on the efficiency of water resources utilization from both natural and socio-economic aspects. The results show that in 2018, the cities with high evaluation value of water resource utilization efficiency in Guangdong Province were mainly distributed in the Pearl River Delta and the eastern coastal areas. The water production coefficient had the strongest explanatory power for the spatial difference of water resources utilization efficiency. The explanatory power of water resource utilization efficiency is obviously enhanced after the interaction of the influencing factors, indicating that the spatial difference of water resource utilization efficiency is the result of the comprehensive influence of multiple factors.

Key words: water resources utilization; projection pursuit model; Geo-detector; Guangdong Province