

珠三角城市群用水量与经济增长的脱钩状态及其驱动因素研究

刘羽^{1,2}, 朱记伟^{1,2}, 卢楠^{1,2}

(1. 西安理工大学 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048;

2. 陕西高校新型智库生态水利与可持续发展研究中心, 陕西 西安 710048)

摘要: 减轻经济增长对水资源消耗的依赖, 对实现城市的可持续发展至关重要。以珠江三角洲城市群为研究对象, 从整体和城市两个维度分析其水资源负载状况, 采用 Tapio 脱钩模型分析 2009–2019 年经济增长与用水量的脱钩时空变化特征, 并基于 LMDI 分解法探究影响因素的驱动效应。结果表明: 研究期内珠三角城市群水资源负载较高, 除肇庆、惠州、江门 3 市外, 其他 6 市水资源负载等级均达到 V 级; 珠三角城市群强、弱脱钩状态占比为 98.9%, 部分城市则呈现强、弱脱钩交替状态; 技术效应、产业结构、节水能力是珠三角城市群脱钩的主要驱动因素, 单位水资源效益、人口规模则抑制了脱钩。本研究可为减少城市经济增长对水资源的依赖、实现区域可持续发展提供参考。

关键词: 用水量; 经济增长; 脱钩效应; 水资源负载指数; LMDI 分解; 珠江三角洲城市群

中图分类号: TV213.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2023)01-0091-09

Decoupling state of water consumption and economic growth in the Pearl River Delta and its driving factors

LIU Yu^{1,2}, ZHU Jiwei^{1,2}, LU Nan^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Research Center of Eco-hydraulics and Sustainable

Development, the New Style Think Tank of Shaanxi Universities, Xi'an 710048, China)

Abstract: Alleviating the dependence of economic growth on water resources consumption is crucial to the sustainable development of urban agglomerations. Taking the Pearl River Delta Urban Agglomeration as the research object, we discussed its water resources load index from the overall and urban dimensions, analyzed the temporal and spatial characteristics of the decoupling between economic growth and water consumption using the Tapio decoupling model, and explored the driving effect of influencing factors based on LMDI. The results show that the water resources load of the Pearl River Delta Urban Agglomeration was relatively high during the study period. Except Zhaoqing, Huizhou and Jiangmen, the water resources load of the other six cities all reached grade V; the strong and weak decoupling status of the Pearl River Delta Urban Agglomeration accounted for 98.9%, some of the cities showed an alternating state of strong and weak decoupling; technological effect, industrial structure and water-saving capacity were the main driving factors for the decoupling of the Pearl River Delta Urban Agglomeration, whereas the benefits of unit water resources and population size inhibited the decoupling. This study can provide a theoretical support for alleviating the dependence of urban economic growth on water resources and realizing regional sustainable development.

Key words: water consumption; economic growth; decoupling effect; water resources load index; loga-

收稿日期: 2022-06-04; 修回日期: 2022-08-10

基金项目: 陕西水利科技项目(2022slkj-3); 陕西省教育厅重点科学研究计划项目(21JY029)

作者简介: 刘羽(1998-), 男, 河南舞钢人, 硕士研究生, 主要从事水文水资源方面研究。

通讯作者: 朱记伟(1982-), 男, 山东日照人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事生态水利与可持续发展方面研究。

rithmic mean Divisia index (LMDI) decomposition; the Pearl River Delta Urban Agglomeration

1 研究背景

水是保障农业发展、工业生产、城镇建设、居民生活的重要生产力要素^[1]。改革开放以来,我国经济快速发展,城市规模不断扩大,城市用水量快速增长^[2]。我国是世界上最缺水的国家之一^[3],约 70% 的城市面临缺水问题^[4],每年因缺水影响的产值超 $2\,300 \times 10^8$ 元,水资源危机已成为制约我国经济可持续发展的重要因素^[5]。我国“十四五”节水型社会建设规划中提出,要深入推进节水型社会建设,强化用水总量和用水强度刚性约束^[6]。因此分析城市经济增长与用水量之间的关系,确定影响用水量的关键因素,对于降低城市经济增长对用水量的依赖、解决城市用水问题、实现经济的可持续发展具有重要意义。

Tapio 脱钩模型常被用来评估经济增长与资源消耗的不同步状况^[7],近年来被广泛应用于经济增长与用水量之间的关系研究。Tasbasi 等^[8]利用 Tapio 脱钩模型计算了保加利亚的用水需求与收入之间的关系;Lu 等^[9]通过 Tapio 脱钩模型计算了西安市各产业的脱钩状况,发现西安市第一产业脱钩程度更高,但第二产业脱钩程度更为稳定;刘明胜等^[10]基于水足迹分析了贵州省水资源利用与经济协调发展的脱钩状态,发现整体上在由弱脱钩向强脱钩转化;张杏梅等^[11]分析了陕西省水资源利用与经济增长的脱钩情况,指出陕西省处于弱脱钩状态,但发展趋势良好;郑炎辉等^[12]利用脱钩理论系统剖析了 2015–2017 年广东省脱钩情况及空间差异,结果表明广东省总体上实现了脱钩,但存在显著的空间差异。

LMDI (logarithmic mean Divisia index) 分解法能够将一个复杂指标分解为若干简易子指标,普遍应用于资源消耗的分解^[13]。Wang 等^[14]基于 LMDI 分解法将我国用水量驱动因素分解为用水强度、产业结构、人口规模、经济水平、水资源禀赋和水资源利用率,发现用水强度和人口规模是影响用水量变化的最主要因素;孙付华等^[15]基于 LMDI 分解法将江苏省水足迹影响因素分解为技术改进、产业结构、规模经济、常住人口;童国平等^[16]基于 LMDI 分解法将安徽省用水量影响因素分解为人口、经济水平、产业结构、水资源利用效应;方伟成等^[17]基于 LMDI 分解法将东莞市水资源生态足迹影响因素分解为技术效应、经济效应、人口效应、结构效应,同时指出技

术效应是抑制水足迹增长的关键因素。

通过对文献的梳理,发现目前研究仍有以下不足:(1)多数研究仅专注于判断城市的脱钩程度,未明确不同城市的缺水程度及其实现脱钩的差异性;(2)现有研究多针对单一省市进行时间角度分析,很少针对多个城市构成的城市群进行空间范围内的对比分析。

鉴于此,本研究以珠江三角洲城市群 9 个城市为研究对象,基于水资源负载指数分析区域水资源的可持续利用能力,借助 Tapio 脱钩模型研究珠江三角洲城市群 2009–2019 年经济增长与用水量脱钩的时空变化规律,并利用 LMDI 分解法探究推动脱钩的驱动因素,以期为缓解城市群经济增长与用水量的矛盾提供理论支撑。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区概况

珠江三角洲(简称珠三角)城市群位于我国广东省的中南部,包括广州、佛山、肇庆、深圳、东莞、惠州、珠海、中山、江门 9 个城市,区域面积为 $54\,733\text{ km}^2$,其地理区位如图 1 所示。珠三角城市群作为改革开放的先行区,集聚了广东省 55.95% 的人口和 80.71% 的经济体量,是目前世界上人口最多、占地最广的城市群,也是我国创新能力最强、综合实力最强的三大城市群之一^[18]。改革开放以来,珠三角经济快速发展,截止 2020 年底地区生产总值已达 $89\,523.93 \times 10^8$ 元,较 2009 年增长了 275%。珠三角区全年高温多雨,年平均降雨量为 $1\,600 \sim 2\,300\text{ mm}$,降雨集中在 4–9 月。区域水资源总量丰富,但人均水资源量严重短缺,2020 年人均水资源量仅有 $1\,295\text{ m}^3$,约为全国人均水资源量的 1/2,属于中度缺水区域^[19],流域水资源开发利用程度较高,珠三角城市群部分地区的水资源开发利用率达 26.20%,远高于全省 10.40% 的开发利用水平^[20],日益严重的水问题逐步成为制约区域城市发展的重要因素。

2.2 数据来源

本研究数据来源于《广东省水资源公报》(2009–2019 年)、《广东省统计年鉴》(2009–2019 年)、各地市统计年鉴(2009–2019 年)、各地市水资源公报等。根据国家统计局对指标的解释,农业用水量对应第一产业用水;第二产业包括工业及建筑业,由于建筑业用水量难以统计,因此使用水资源公报中一般工业用水(含火力发电用水)对应第二产

业用水;第三产业用水为除去第一、第二产业之外的其他产业用水量之和。2009 - 2019 年珠三角 GDP 及用水量变化见图 2。

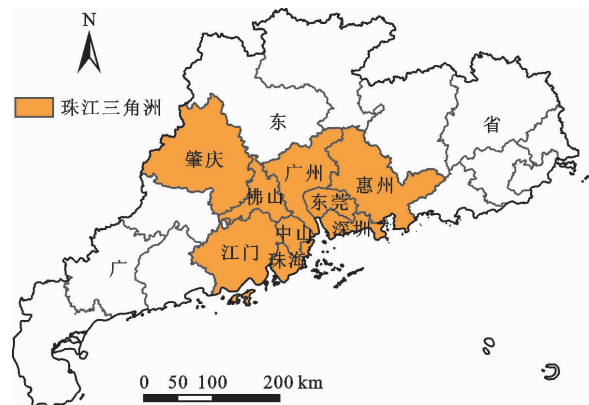


图 1 珠江三角洲地理区位图

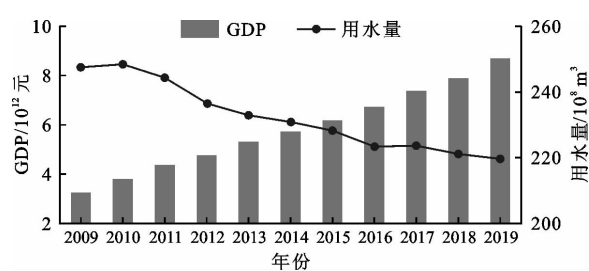


图 2 2009 - 2019 年珠三角 GDP 及用水量变化

2.3 研究方法

2.3.1 水资源负载指数 水资源负载指数可以反映水资源在当前一段时间内的特性及在今后一段时间内的开发难易程度^[21],根据黄锋华等^[22]和李丽等^[23]的研究,其计算公式为:

$$c = \frac{\alpha}{W} \sqrt{R \cdot G} \tag{1}$$

式中: c 为水资源负载指数; R 为当地年末常住人口, 10^4 ; G 为地区生产总值,取当年价格, 10^8 元; W 为区域水资源总量, 10^8 m^3 ; α 为区域降雨系数,其取值规则见表 1。

表 1 区域降雨系数 α 的取值规则

降雨量 p 值范围/mm	降雨系数 α 取值
$p \leq 200$	$\alpha = 1.0$
$200 < p \leq 400$	$\alpha = 1 - 0.1(p - 200)/200$
$400 < p \leq 800$	$\alpha = 0.9 - 0.2(p - 200)/400$
$800 < p \leq 1600$	$\alpha = 0.7 - 0.2(p - 200)/800$
$p > 1600$	$\alpha = 0.5$

根据水资源负载指数 c 的大小将其划分为 5 个级别(I ~ V 级),各级别分级标准及评价见表 2。

表 2 水资源负载指数分级及评价

水资源负载指数 c	级别	级别评价	未来水资源开发评价
$c > 10$	V	很高 潜力不大	有条件时需要外流域补水
$c = 5 \sim 10$	IV	高 潜力不大	开发困难
$c = 2 \sim 5$	III	中等 潜力较大	开发较难
$c = 1 \sim 2$	II	较低 潜力大	开发较易
$c < 1$	I	低 潜力很大	开发容易

2.3.2 Tapio 脱钩模型 “脱钩”常在经济学领域中用于分析资源消耗和经济增长之间的关系^[24]。Tapio 提出了基于经济增长的强脱钩、弱脱钩、扩张连接和扩张性负脱钩以及基于经济衰退的强负脱钩、弱负脱钩、衰退连接和衰退性脱钩 8 种状态。脱钩指数计算公式如下:

$$E = \frac{\Delta W/W}{\Delta GDP/GDP} = \frac{(W_t - W_{t-1})/W_{t-1}}{(GDP_t - GDP_{t-1})/GDP_{t-1}} \tag{2}$$

式中: E 为脱钩指数; ΔW 为用水量的增加值, 10^8 m^3 ; W_t 、 W_{t-1} 为第 t 年与第 $t - 1$ 年该地区的用水量, 10^8 m^3 ; ΔGDP 为生产总值的增加值; GDP_t 、 GDP_{t-1} 为第 t 年与第 $t - 1$ 年该地区的生产总值, 10^8 元。

8 种脱钩状态分布及相应的脱钩指数 E 值范围见图 3。

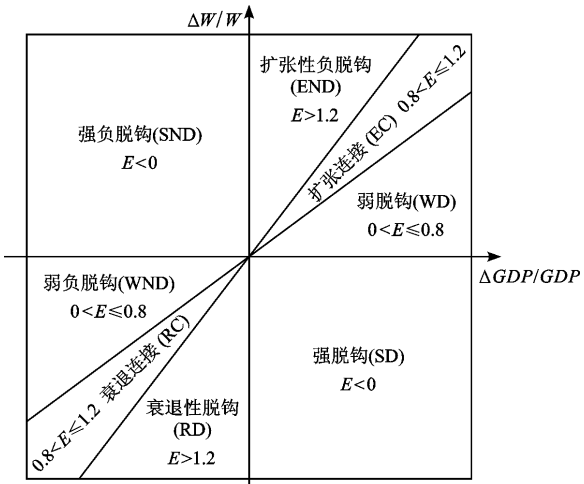


图 3 Tapio 脱钩状态分布及相应的 E 值范围

图 3 所示的 8 类脱钩状态中,强脱钩(strong decoupling, SD)代表经济增长与用水量之间的负相关关系,表明经济增长不再依赖用水量的增长,为最理想的脱钩状态;弱脱钩(weak decoupling, WD)表明经济增长仍需水资源推动,但对水资源的依赖程度较小,为最接近理想的脱钩状态;扩张连接(expansive coupling, EC)及扩张性负脱钩(expansive nega-

tive decoupling, END) 的脱钩状态稍差一些。当经济出现衰退时,会出现强负脱钩(strong negative decoupling, SND)、弱负脱钩(weak negative decoupling, WND)、衰退连接(recessive coupling, RC)、衰退性脱钩(recessive decoupling, RD)4 类脱钩状态,其中强负脱钩(SND)表明经济衰退的同时用水量上升,为最不理想状态;其他 3 类脱钩状态意味着用水量减少的同时经济也在衰退,也极不理想。

2.3.3 LMDI 分解法 LMDI 分解对象后没有无法解释的残差,可以用来定量分析影响研究对象的不同因素及各因素的影响程度^[25]。为进一步探索用水量与经济增长间的关系,通过梳理已有文献,结合珠三角用水量特征,将用水量变化影响因素分解为人口规模^[9, 14-17, 24-28]、产业结构^[9, 14-17, 24-25]、技术效应^[9, 14-15, 17, 24-25, 27]、节水能力^[9, 14]和单位水资源效益^[9, 14],构建 LMDI 分解模型,如公式(3)所示。

$$W = \sum W_i = \sum_{i=1}^3 \left(\frac{W_{it}}{G_{it}} \cdot \frac{G_{it}}{G_t} \cdot \frac{G_t}{W_t} \cdot \frac{W_t}{R_t} \cdot R_t \right) \\ = \sum_{i=1}^3 (h_{it} \cdot g_{it} \cdot d_t \cdot l_t \cdot R_t) \quad (3)$$

式中: W 为用水总量, 10^8 m^3 ; W_i 为第一、二、三产业的用水量, 10^8 m^3 ; W_{it} 为第 i 产业第 t 年的用水量, 10^8 m^3 ; W_t 为第 t 年的用水量, 10^8 m^3 ; G_{it} 为第 i 产业第 t 年的生产总值, 10^8 元; G_t 为第 t 年的国内生产总值, 10^8 元; R_t 为第 t 年末该地区的常住人口, 10^4 。

用水量的变化受 ΔW_h (技术效应)、 ΔW_g (产业结构)、 ΔW_d (单位水资源效益)、 ΔW_l (节水能力)、 ΔW_R (人口规模)5 种因素相互耦合作用的影响, LMDI 加法模型分解公式如下:

$$\Delta W = W_t - W_0 = \Delta W_h + \Delta W_g + \Delta W_d + \Delta W_l + \Delta W_R \\ = \sum_{i=1}^3 \left(L_i \cdot \left(\ln \frac{h_{it}}{h_{i0}} + \ln \frac{g_{it}}{g_{i0}} + \ln \frac{d_t}{d_0} + \ln \frac{l_t}{l_0} + \ln \frac{R_t}{R_0} \right) \right) \quad (4)$$

$$L_i = \frac{W_{it} - W_{i0}}{\ln (W_{it}/W_{i0})} \quad (5)$$

式中: ΔW 为用水量的变化量, 10^8 m^3 ; W_0 为基准年的用水量, 10^8 m^3 ; L_i 为权重。

3 结果与分析

3.1 珠三角城市群水资源负载指数评价

为探究近年来珠三角城市群水资源负载情况,计算珠三角各市 2009-2019 年水资源负载指数,结果如图 4 所示。由图 4 可见,2009-2019 年珠三角

城市群整体水资源负载指数均大于 10,负载等级为 V 级。负载指数在 2011 年达到最大值 18.91,2012 年减小为 13.58,随后波动上升并逐渐接近峰值,说明珠三角城市群水资源开发程度很高,开发潜力不足,水资源较为短缺且短缺程度逐年增大;从各市来看,广州市、佛山市、深圳市、东莞市、珠海市、中山市的水资源负载等级均为 V 级,负载指数普遍大于 20,表明这些城市水资源开发程度很高,水资源短缺问题严重,其中深圳市历年水资源负载指数均大于 77,且呈现快速增大趋势,在 2017 年出现最大值 135.55,水资源短缺问题最为突出。肇庆市、惠州市、江门市的负载指数基本介于 2~5 之间,负载等级为 III 级,负载指数呈现波动增大趋势,但增速较慢,表明城市水资源丰富,具有一定开发潜力。

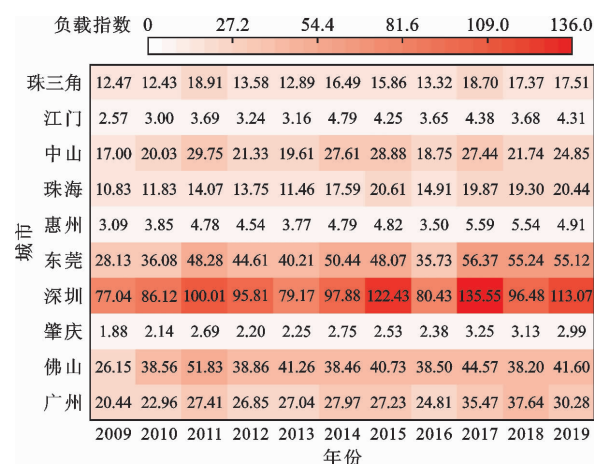


图 4 2009-2019 年珠三角城市群水资源负载指数热点图

2009-2019 年珠三角城市群 GDP 增长了 2.75 倍,随着经济的发展,其对水资源的需求也在不断增加,这是水资源负载指数不断增大的原因之一。同时,珠三角城市群人口规模从 2009 年的约 $5\,300 \times 10^4$ 增长到了 2019 年的约 $7\,800 \times 10^4$,涨幅达 45.49%,导致居民用水量快速增大。珠三角城市群企业密集,2019 年规模以上工业企业达 55 415 家,是 2009 年的 2.81 倍,虽然近年来珠三角城市群在控制高耗水企业、调整产业结构、引入节水技术等方面取得了显著成就^[29],但工业用水仍然是各市水资源最重要的负担之一,这些问题在深圳市表现的尤为突出。水资源负载指数研究表明,肇庆市、惠州市、江门市水资源仍有一定的开发潜力,为了充分发挥地区的水资源优势,可适当保留部分高附加值产业,逐步实现经济增长与用水量的脱钩;其他 6 市水资源量匮乏,开发潜力小,应采取一系列措施节约水资源,尽快实现经济增长与用水量的脱钩,缓解区域

经济增长与水资源之间的供需矛盾。

3.2 脱钩效应

利用 Tapio 脱钩模型计算珠三角城市群的脱钩情况,结果如表 3 所示。分析表 3 可知,研究期内珠三角城市群整体呈现强脱钩(8 次)和弱脱钩(2 次)状态,强脱钩指数平均为 -0.16,说明其强脱钩水平并不高。各市的脱钩状态包括强脱钩、弱脱钩和扩张性负脱钩,其中强脱钩占比为 62.2%,弱脱钩占比为 36.7%,扩张性负脱钩占比为 1.1%。深圳市、珠海市主要表现为弱脱钩,两市仅在 2012 和 2013 年出现强脱钩,深圳市脱钩指数均小于 0.36,且呈现“W”型变化趋势,珠海市脱钩指数波动增大并在

2018 年达到最大值 0.56。广州市、佛山市、惠州市的脱钩状态良好,强脱钩占比达 80%~90%,表明经济增长对用水量的依赖程度正在降低。中山市强脱钩占比为 80%,但在 2019 年由强脱钩状态突变为扩张性负脱钩状态,表明该年份中山市用水量的增长速度超出了经济的增长速度。肇庆市、东莞市、江门市的脱钩指数呈现出一定的波动状态,脱钩状态稳定性较差。

由于研究期内珠三角部分城市脱钩状态的年际波动较大,将研究期分为 2010-2014 年和 2015-2019 年 2 个阶段,进一步探究珠三角城市群脱钩变化的空间异质性,结果如图 5 所示。

表 3 研究期珠三角及各市的脱钩指数与脱钩状态

年份	广州		佛山		肇庆		深圳		东莞		惠州		珠海		中山		江门		珠三角	
	脱钩 指数	脱钩 状态	脱钩 指数	脱钩 状态	脱钩 指数	脱钩 状态	脱钩 指数	脱钩 状态	脱钩 指数	脱钩 状态	脱钩 指数	脱钩 状态	脱钩 指数	脱钩 状态	脱钩 指数	脱钩 状态	脱钩 指数	脱钩 状态	脱钩 指数	脱钩 状态
2010	-0.06	SD	-0.25	SD	-0.11	SD	0.32	WD	0.40	WD	0.00	WD	0.24	WD	0.32	WD	0.10	WD	0.02	WD
2011	-0.12	SD	-0.54	SD	0.02	WD	0.17	WD	-0.24	SD	-0.01	SD	0.09	WD	-0.26	SD	0.00	WD	-0.11	SD
2012	-0.67	SD	-0.85	SD	-0.18	SD	-0.05	SD	-0.67	SD	-0.01	SD	-0.18	SD	-0.02	SD	-0.54	SD	-0.36	SD
2013	-0.06	SD	-0.68	SD	-0.03	SD	-0.15	SD	-0.18	SD	-0.08	SD	-0.04	SD	-0.02	SD	-0.19	SD	-0.13	SD
2014	-0.28	SD	-0.23	SD	0.21	WD	0.15	WD	0.41	WD	-0.21	SD	0.37	WD	-0.74	SD	-0.56	SD	-0.11	SD
2015	-0.18	SD	0.26	WD	0.46	WD	0.30	WD	-0.51	SD	-0.24	SD	0.13	WD	-2.22	SD	-0.27	SD	-0.14	SD
2016	-0.35	SD	-0.02	SD	-0.38	SD	0.01	WD	-0.79	SD	-0.12	SD	0.10	WD	-1.15	SD	-0.14	SD	-0.24	SD
2017	0.19	WD	-0.12	SD	-0.26	SD	0.10	WD	0.11	WD	-0.16	SD	0.27	WD	-1.04	SD	0.13	WD	0.01	WD
2018	-0.27	SD	-0.61	SD	-0.71	SD	0.35	WD	0.36	WD	-0.23	SD	0.56	WD	-0.41	SD	-0.07	SD	-0.16	SD
2019	-0.27	SD	0.09	WD	0.12	WD	0.15	WD	0.15	WD	-0.24	SD	0.26	WD	2.86	END	-0.74	SD	-0.07	SD

注:SD 为强脱钩;WD 为弱脱钩;END 为扩张性负脱钩。

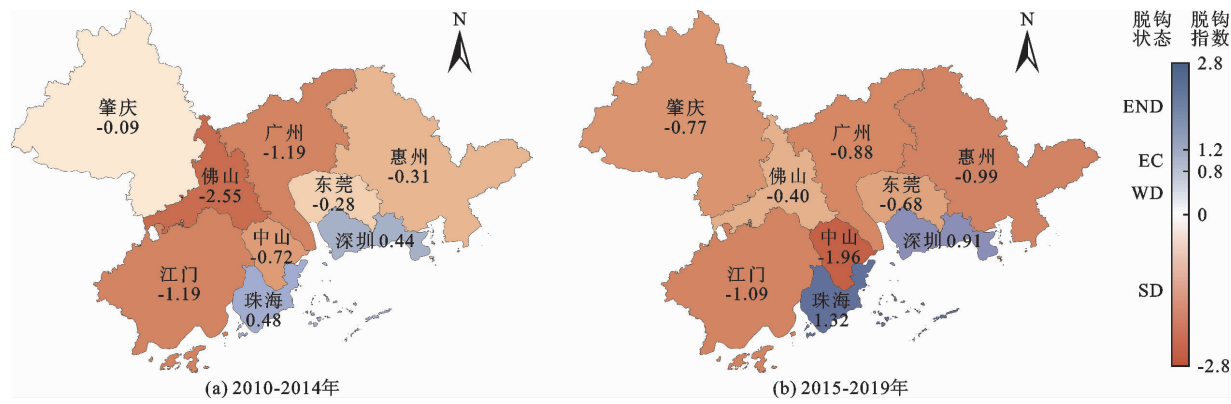


图 5 研究期珠三角城市群不同时期脱钩指数空间变化特征

对图 5 中 2010-2014 年与 2015-2019 年 2 个阶段各市的脱钩指数进行比较可知,江门市脱钩指数由 -1.19 变为 -1.09,脱钩水平波动降低,但仍然处于较好的脱钩状态;广州市和佛山市强脱钩程度明显减弱,其中佛山市脱钩指数由 -2.55 变为 -0.40,虽然仍处

于强脱钩状态,但在 2015-2019 年间强脱钩指数普遍不高,如不采取措施,脱钩程度可能会进一步减弱;肇庆市、惠州市、东莞市、中山市的强脱钩程度明显增大,其中中山市的脱钩指数变化最大,由 -0.72 变为 -1.96,在珠三角城市群中达到领先水平;深圳市的脱

钩指数由 0.44 变为 0.91,脱钩状态由弱脱钩转变为扩张连接,脱钩程度明显减弱;珠海市的脱钩指数由 0.48 变为 1.32,脱钩状态由弱脱钩转变为扩张性负脱钩,在珠三角城市群中表现最差。值得注意的是,珠三角城市群脱钩的空间分布随时间发展出现了“马太效应”,大部分处于强脱钩状态的城市向更良好的脱钩状态发展,处于弱脱钩状态的城市向更差的脱钩状态发展,即“强者越强,弱者越弱”。

3.3 用水量驱动力分解

由于研究期内珠三角城市群经济均处于增长状态,所以用水量的变化是决定珠三角城市群脱钩的主要因素。城市用水量受到多个因素的驱动影响,通过 LMDI 分解法计算,得到研究期内珠三角各城市的技术效应、产业结构、单位水资源效益、节水能力、人口规模 5 个因素对用水量驱动作用的方向及贡献率,如图 6 所示。

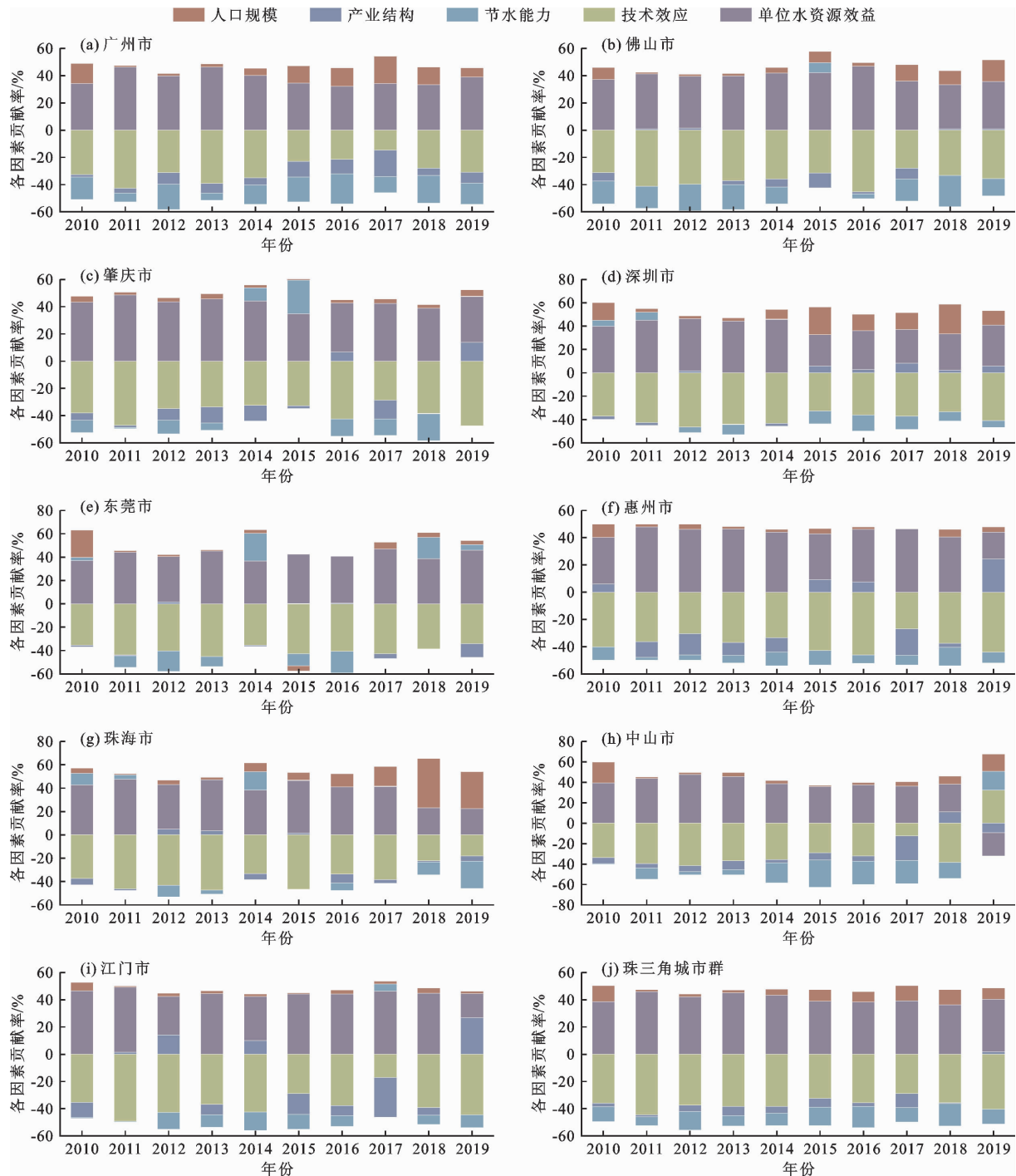


图6 研究期珠三角城市群用水量各驱动因素的贡献率

根据图6的计算结果分析5个因素对用水量的驱动作用:

(1)技术效应。研究期内技术效应是抑制珠三角城市群用水量增长的最主要因素,其贡献率的均值为36.65%,累计减少用水量 $234.52 \times 10^8 \text{ m}^3$,从而促进了经济增长与用水量的脱钩。对各市来说,技术效应同样抑制了用水量的增长,其贡献率均在26.63%以上。广州、珠海、中山、江门4市技术效应影响效果年际波动幅度较大,波动主要集中在2017-2019年,分析数据发现,在技术效应贡献占比较低的年份,第一、二产业用水量显著增长,而经济增长保持平稳状态,这可能意味着珠三角城市群等一、二产业技术节水水平较差;其他城市技术效应影响效果年际波动幅度相对较小,技术效应抑制用水量增长的能力随时间逐步降低,意味着各产业技术效率的提高会促进脱钩,但随着城市脱钩水平的进一步发展,其对脱钩的影响作用逐渐减小。

(2)产业结构。从整体来看,产业结构在研究期内抑制了珠三角城市群用水量的增长,促进了经济增长与用水量的脱钩,其作用小于技术效应,研究期内累计减少用水量 $24.0 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。从各市来看,产业结构促进了深圳、惠州、江门3市用水量的增长,从而抑制了脱钩。对于广州、佛山、肇庆、东莞、珠海、中山6市而言,产业结构抑制了用水量的增长,但影响程度差距较大,其中产业结构对于广州市用水量减少的贡献率平均为8.13%,而对东莞市仅为1.65%。随着时间的发展,产业结构抑制用水量增长的能力不断减小,意味着产业结构同样出现了边际递减效应。

(3)单位水资源效益。单位水资源效益对于用水量的增长有显著的促进作用,研究期内推动珠三角城市群用水量累计增长 $258.63 \times 10^8 \text{ m}^3$,年平均贡献率为40.69%,是抑制脱钩的最主要因素。从各市来看,单位水资源效益对促进用水量增长的贡献较为稳定,年平均贡献率稳定在37.49%以上。但肇庆、珠海、中山3市的单位水资源效益在研究期内对用水量的贡献率呈波动下降趋势,即对于脱钩的抑制作用逐渐减弱。

(4)节水能力。节水能力在研究期内抑制了珠三角城市群用水量增长,促进了经济增长与用水量的脱钩,累计促进珠三角城市群用水量减少 $70.63 \times 10^8 \text{ m}^3$,年均贡献率为11.41%,其抑制作用逐年波动且有缓慢增大趋势。从各市来看,节水能力对于用水量增长主要为抑制作用,但佛山、肇庆、深圳、东

莞、珠海、中山、江门7市在个别年份的节水能力却促进了用水量的增长。节水能力总体上促进了经济增长与用水量的脱钩,但对于各市而言节水能力存在空间差异。

(5)人口规模。人口规模促进了珠三角城市群用水量的增长,研究期内累计促进用水量增长 $42.76 \times 10^8 \text{ m}^3$,年平均贡献率为6.85%,是抑制珠三角城市群经济增长与用水量脱钩的重要因素之一。珠三角城市群吸纳了较多外省的流动人口工作定居,导致珠三角城市群常住人口规模庞大,人口增速较高,在为珠三角城市群带来更多劳动力和经济增长的同时也消耗了更多的水资源,从而抑制了脱钩。同样,各市人口数量的增长导致用水量与经济同步增长,特别是2018-2019年间珠海市常住人口出现较快增长,年均增速达7.01%,使人口驱动的用水量增长累计达 $0.75 \times 10^8 \text{ m}^3$,占当年用水量增长的38.69%;肇庆、惠州、江门3市人口规模较为稳定,年均增长率最高速率仅为1.17%,对用水量增加的影响并不显著;东莞市在2015年出现了人口的负增长,导致人口规模抑制了用水量的增长,抑制贡献率为4.49%。

4 讨 论

珠三角城市群不仅是广东经济的“火车头”,也是粤港澳大湾区跻身世界大湾区的重要支撑,实现珠三角城市群经济增长与用水量的脱钩对区域可持续发展具有重要意义。通过研究发现,珠三角城市群水资源负载指数整体较大,且呈小幅波动增长趋势,其中,广州市、佛山市、深圳市、东莞市、中山市、珠海市水资源负载指数较大;肇庆市、江门市、惠州市水资源负载指数较小。该研究结果与徐珊等^[30]的研究结论一致。因此在制定城市高质量发展策略时,需要因地制宜,协调好城市发展与资源环境承载力之间的关系,根据资源禀赋、自然条件选择适宜的发展模式。

产业结构的偏向、较低的工业用水重复率以及较高的人均生活用水量是导致珠三角城市群水资源负载指数偏高的主要因素^[31]。研究期内珠三角城市群产业用水占比及人均生活用水量如图7所示。

分析图7可知,肇庆市、惠州市、江门市主要以农业用水为主,这与中国大部分地区的用水结构基本一致^[32],广州等其他6市用水结构更加偏向工业用水,且工业用水重复率较低,普遍在65%~70%之间,低于全省71.2%的平均水平^[33]。此外,广州

等 6 市人均生活年平均用水量为 124.62 m^3 , 而肇庆、江门、惠州 3 市人均生活年平均用水量仅为 84.43 m^3 , 差异较为明显。

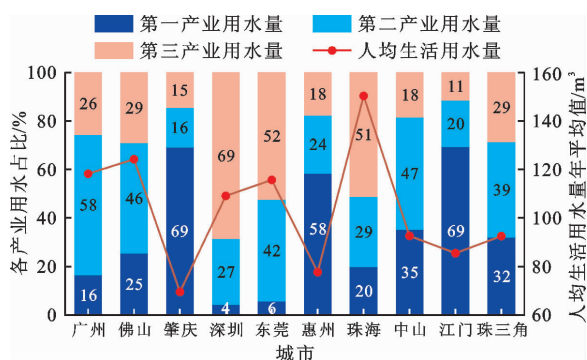


图7 研究期珠三角城市群产业用水占比及人均生活用水量

珠三角城市群总体处于脱钩状态,但脱钩指数长期波动,且波动幅度较大,表明脱钩状态并不稳定。基于空间分析发现各市脱钩强弱差距随时间逐渐增大,强脱钩城市在区域中部集中分布转为逐渐分散,这一发现与郑炎辉等^[12]、陈刚等^[34]的研究结论相似,表明珠三角城市群经济增长对于用水量的依赖逐渐减弱。近年来,广东省先后实施了《广东省节约用水办法》《广东省水资源管理条例》等政策文件,持续提高了全社会节约用水能力,在发展经济的同时,降低了水资源的消耗,这可能是导致上述现象产生的主要原因。此外,农业用水几乎占珠三角城市群用水量 1/3,2019 年广东省农田灌溉有效利用系数为 0.506,低于当年全国平均水平 0.559。加强农业用水管理,提高农业用水效率,是推动脱钩进一步发展的重要手段。

技术效应显著降低了用水量的消耗,单位水资源效益显著增加了用水量的消耗,这与陈磊等^[35]的研究结果基本一致。该结果的产生依赖于国家的政策支持,在国家颁布《中国节水技术政策大纲》后,珠三角城市群在发展经济、提高人民生活水平的前提下,大力引进节水技术、优化产业结构、发展节水型产业,有力地促进了珠三角城市群向脱钩状态迈进^[36]。值得注意的是,单位水资源效益是促进用水量增长最主要的因素,表明珠三角城市群经济发展处于较高水平,由此可知经济发展仍然是导致用水量增加的主要因素。

5 结论与建议

5.1 结论

本研究以珠三角城市群为研究对象,基于

2009–2019 年的经济和水资源相关数据,创新性地将水资源负载指数、脱钩模型和 LMDI 分解法相结合,分析各市水资源压力,判断各市经济增长与用水量的脱钩状态,量化不同因素对脱钩的影响。研究得出的主要结论如下:

(1)整体来看,研究期内珠三角城市群历年水资源负载指数等级均为 V 级,且呈现波动增大趋势,同时水资源利用程度较高,开发潜力较小;各市之间水资源负载指数有较大差异,肇庆市、惠州市、江门市的负载指数基本介于 2~5 之间,尚有一定开发利用潜力,广州市、佛山市、深圳市、东莞市、珠海市、中山市水资源负载指数等级均超过 V 级,且呈现明显上升趋势,说明这些地区严重缺水,且水资源开发潜力不足。

(2)研究期内珠三角城市群出现强脱钩、弱脱钩、扩张性负脱钩 3 种脱钩状态。从整体上看,珠三角城市群出现 8 次强脱钩年份和 2 次弱脱钩年份;从各市来看,多数城市出现强、弱脱钩交替现象。2010–2014 年,各市脱钩指数存在较大差异,强脱钩城市在空间分布上向区域中部聚集,2015–2019 年,各市脱钩指数差距进一步加大,出现较为明显的两极分化,强脱钩城市在空间分布上较为分散。

(3)研究期内抑制经济发展与用水量脱钩的最主要因素是单位水资源效益,促进脱钩的最主要因素是技术效应。在其他因素中,人口规模是抑制脱钩的重要因素,产业结构与节水能力在整体上促进脱钩,对于某些城市则出现抑制与促进效果交替的现象。

5.2 建议

分析珠三角城市群水资源利用状态和经济增长与用水量的脱钩关系及其驱动因素,有利于提出针对性的政策,从而加快用水量与经济增长的脱钩,实现区域的可持续发展。因此,本研究提出以下几点政策建议:

(1)根据珠三角各市水资源负载指数现状及成因,应积极开展跨流域调水项目建设,促进区域水资源合理配置,推动海水淡化技术水平升级,提高海水淡化技术产能,加强对微咸水、雨水等非常规水源的利用;在用水方面,需要提高工业重复用水率,以提高水资源综合利用效率,同时提高污水处理能力,改善河流湖泊水质,降低水质性缺水风险。

(2)在城市建设发展过程中,应牢固树立“以水定城、以水定地、以水定人、以水定产”的原则,以区域水资源禀赋为刚性约束条件,量水而行,合理确定

城市产业结构和发展布局,考虑城市水资源承载能力,严格水资源论证,合理制定用水总量红线。

(3)强化计划用水和定额管理制度,建立以涉水对象分类名称及代码为基础的用水定额体系;将用水量指标进行层层分解,逐级控制用水规模,对一定规模的用水户实施用水实时监控;通过实施阶梯水价引导节约用水、提升用水效率;加强对居民的节水宣传教育,鼓励节水行为,降低居民生活过程中的用水浪费。

参考文献:

- [1] 刘晓,陈隽,范琳琳,等. 水资源承载力研究进展与新方法[J]. 北京师范大学学报(自然科学版),2014,50(3): 312-318.
- [2] 王旗齐. 城镇供水专项规划问题研究[D]. 重庆:重庆大学,2017.
- [3] SUN Siao, ZHOU Xian, LIU Haixing, et al. Unraveling the effect of inter-basin water transfer on reducing water scarcity and its inequality in China[J]. Water Research, 2021, 194: 116931.
- [4] 任毅,卢治文. 珠江三角洲城市供水安全技术措施探讨[C]// 河南大学,贵州省水利学会. 2017(第五届)中国水生态大会论文集,2017.
- [5] 夏玮静,王宁练,沈月. 基于流域的陕西省水资源承载力研究[J]. 干旱区地理,2020,43(3): 602-611.
- [6] 王浩,张建云,王亦楠,等. 水,如何平衡发展之重[J]. 中国水利,2020(21): 11-19.
- [7] 王宝强. 基于脱钩分析的中国经济增长与水资源关系利用研究[D]. 兰州:兰州大学,2015.
- [8] TASBASI A. A threefold empirical analysis of the relationship between regional income inequality and water equity using Tapio decoupling model, WPAT equation, and the local dissimilarity index: Evidence from Bulgaria[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28: 4352-4365.
- [9] LU Nan, ZHU Jiwei, TANG Zeming, et al. Decreasing water dependency for economic growth in water-scarce regions by focusing on water footprint and physical water: A case study of Xi'an, China[J]. Sustainable Cities and Society, 2022, 85: 104092.
- [10] 刘明胜,刘青山. 基于水足迹视角下的水资源利用与经济协调发展脱钩分析——以贵州省为例[J]. 中国农村水利水电,2017(8): 86-91.
- [11] 张杏梅,翟琴琴. 基于水资源生态足迹的陕西省水资源利用与经济增长的脱钩分析[J]. 中国农村水利水电, 2021(10): 21-26.
- [12] 郑炎辉,何艳虎,王金杰,等. 基于脱钩理论的区域产业节水目标研究——以广东省为例[J]. 水资源与水工程学报,2021,32(4): 38-44.
- [13] 刘玉邦,严雨男. 成都市水生态足迹的时间分布特征及其影响因素[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2020,18(2): 93-98.
- [14] WANG Qiang, WANG Xiaowei. Moving to economic growth without water demand growth—A decomposition analysis of decoupling from economic growth and water use in 31 provinces of China[J]. Science of the Total Environment, 2020, 726: 138362.
- [15] 孙付华,杨一帆,沈菊琴,等. 基于水足迹-LMDI模型的江苏省水资源利用与经济发展的脱钩关系研究[J]. 江苏社会科学,2020(6): 233-240.
- [16] 董国平,陈岩. 基于脱钩理论和LMDI模型安徽省用水量和经济发展关系的定量研究[J]. 中国林业经济, 2019(1): 16-20.
- [17] 方伟成,孙成访,郭文显. 基于LMDI法东莞市水资源生态足迹影响因素分析[J]. 水资源与水工程学报, 2015,26(3): 115-117+123.
- [18] 邓金鸿. 珠三角边缘城镇空心村治理研究[D]. 广州:中共广东省委党校,2018.
- [19] 许林晓,林声. 2001-2020年全国水资源变化趋势分析[J]. 灌溉排水学报,2021,40(S2): 1-5.
- [20] 张义敏,张晓琳,陈畅. 基于水资源生态足迹模型的广东省及珠三角九市水资源可持续利用研究[J]. 人民珠江,2022,43(4): 31-40.
- [21] 商庆凯,阴柯欣,米文宝. 基于水足迹理论的青海省水资源利用评价[J]. 干旱区资源与环境,2020,34(5): 70-77.
- [22] 黄锋华,黄本胜,邱静. 基于均衡系数的广东省水资源空间均衡研究[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2021,60(5): 86-93.
- [23] 李丽,刘诗奇,王平,等. 基于负载指数的中蒙俄经济走廊水资源开发潜力评价[J]. 干旱区研究,2021,38(4): 910-918.
- [24] 杨洋,丁镭,曾克峰. 基于LMDI模型的广西水足迹驱动力分析[J]. 国土资源科技管理,2017,34(2): 20-29.
- [25] 张陈俊,章恒全,陈其勇,等. 中国用水量变化的影响因素分析——基于LMDI方法[J]. 资源科学,2016,38(7): 1308-1322.
- [26] 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.
- [27] 于艳青,欧阳蔚,周戎星,等. 安徽省产业用水结构变化的驱动因子识别与分析[J]. 水电能源科学,2014,32(12): 33-38.
- [28] 杨雅雪,杨井,许玉凤,等. 基于LMDI方法的新疆生产用水变化分析[J]. 干旱区地理,2016,39(1): 67-76.
- [29] 张可. 区域一体化有利于减排吗? [J]. 金融研究, 2018(1): 67-83.

(下转第109页)

- [21] 季小兵,马玉其,王新友,等. 基于1960—2018年实测径流与水文学方法的开都河生态流量分析[J]. 水资源与水工程学报,2020,31(6):17—23+30.
- [22] 马玲,李润杰,黄佳盛,等. 格尔木河生态基流研究[J]. 水力发电,2022,48(9):28—33+44.
- [23] 孟慧颖. 河流生态基流的计算方法及其适用性分析[J]. 科技传播,2013,5(9):135+127.
- [24] 李梦瑶,付兴涛. 汾河中游河道生态流量分析[J]. 水资源与水工程学报,2022,33(2):45—53.
- [25] 钟华平,刘恒,耿雷华,等. 河道内生态需水估算方法及其评述[J]. 水科学进展,2006,17(3):430—434.
- [26] 刘悦忆,朱金峰,赵建世. 河流生态流量研究发展历程与前沿[J]. 水力发电学报,2016,35(12):23—34.
- [27] 王添. 吉林省东辽河、伊通河、饮马河生态需水及其保障措施研究[D]. 长春:吉林大学,2020.
- [28] 李远军. 乌江梯级水电站生态流量在线监测及实时预警功能的开发和应用[J]. 红水河,2021,40(5):99—102.
- [29] 丁智慧,王振龙,朱永华. 淮河干流阜阳段生态基流估算研究[J]. 人民黄河,2020,42(5):103—107.
- [30] 武会先,吕洪予. 确定河流生态需水量的方法[J]. 人民黄河,2006,28(6):12—13.
- [31] 普剑红. 论生态及环境需水量研究进展与前瞻[J]. 广东科技,2014,23(2):171—172.
- [32] 黄康,李怀恩,成波,等. 基于Tennant方法的河流生态基流应用现状及改进思路[J]. 水资源与水工程学报,2019,30(5):103—110.
- [33] 范小杉,何萍,徐杰,等. 我国生态环境预警研究进展[J]. 环境工程技术学报,2020,10(6):996—1006.

(上接第99页)

- [30] 徐珊,夏丽华,陈智斌,等. 基于生态足迹法的广东省水资源可持续利用分析[J]. 南水北调与水利科技,2013,11(5):11—15+98.
- [31] 王华辉. 珠三角城市环境保护规划指标体系比较[J]. 广东化工,2021,48(24):109—112.
- [32] KONG Yang, HE Weijun, YUAN Liang, et al. Decoupling analysis of water footprint and economic growth: A case study of Beijing—Tianjin—Hebei Region from 2004 to 2017[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, 16(23): 4873.
- [33] 李胜双. 金塔盆地水资源承载力分析及其调控模式研究[D]. 兰州:兰州大学,2017.
- [34] 陈刚,韦晓慧. 粤港澳大湾区背景下珠三角城市群经济一体化与城市关联分析[J]. 长安大学学报(社会科学版),2020,22(1):58—69.
- [35] 陈磊,乔昌凯,夏琳琳,等. 广东省新型城镇化时期生活用水变化及驱动机制[J]. 南水北调与水利科技(中英文),2021,19(2):273—280.
- [36] 欧阳怡然. 珠三角城市群水—能源—粮食—经济协调性时空演变分析[D]. 广州:广东工业大学,2021.

