

胡强,刘红峰,尹少华.水足迹视角下的东江湖流域水资源利用评价研究[J].环境工程技术学报,2024,14(6):1754-1762.

HU Q,LIU H F,YIN S H.Research on water resource utilization evaluation in Dongjiang Lake Basin from the perspective of water footprint[J].Journal of Environmental Engineering Technology, 2024, 14(6): 1754-1762.

水足迹视角下的东江湖流域水资源利用评价研究

胡强^{1,2},刘红峰^{3,4*},尹少华¹

1.中南林业科技大学

2.郴州技师学院

3.湖南汽车工程职业大学

4.湖南信息学院

摘要 东江湖是国家级自然保护区,随着城镇化、工业化进程加速,水资源紧缺、水环境污染问题突出,如何准确对比、评价东江湖流域水资源利用状况成为亟待解决的问题。以水足迹理论为基础,从水足迹结构、水足迹利用、水足迹安全、水足迹发展4个角度遴选7个指标,根据东江湖流域2012—2022年水资源、经济社会发展数据测算其水资源消耗,评价其水资源开发利用情况,选用Tapio脱钩模型衡量东江湖流域水足迹与经济社会发展的匹配状况。结果表明:东江湖流域水足迹以农业用水和工业用水为主,农业用水量占比超过58%;水资源利用效率自2018年以来逐步提升;进出口水足迹属于水资源净出口型;水足迹压力处于0.42~0.61,在极端干旱条件下不能保证水资源消耗;城乡居民生活用水量增加较快。Tapio系数显示,2012—2016年水足迹和经济发展以增长连结状态为主,2017—2022年弱脱钩状态频率增多,特别是在2022年,脱钩系数接近-0.44。研究显示,东江湖流域水资源充足,能满足区域工农业生产与居民生活所需,但须警惕极端干旱气候;同时,须提高水资源利用效率,发挥水资源优势升级区域产业结构,结合水资源优势发展“水经济”。

关键词 水足迹;脱钩理论;水资源评价;东江湖流域

中图分类号:X522 文章编号:1674-991X(2024)06-1754-09 doi:10.12153/j.issn.1674-991X.20240010

Research on water resource utilization evaluation in Dongjiang Lake Basin from the perspective of water footprint

HU Qiang^{1,2}, LIU Hongfeng^{3,4*}, YIN Shaohua¹

1. Central South University of Forestry and Technology

2. Chenzhou Technician College

3. Hunan Automotive Engineering Vocational University

4. Hunan University of Information Technology

Abstract Dongjiang Lake is a national nature reserve. With the acceleration of urbanization and industrialization, water resources are becoming increasingly scarce and water environmental pollution is becoming prominent. How to accurately compare and evaluate the water resource utilization status in Dongjiang Lake Basin has become an urgent problem that needs to be solved. Based on the water footprint theory, seven indicators were selected from four perspectives: water footprint structure, water footprint utilization, water footprint safety, and water footprint development. Based on water resources and economic and social development data from 2012 to 2022 in the Dongjiang Lake Basin, the water resource consumption was calculated, and the water resource development and utilization situation was evaluated. The Tapio decoupling model was used to measure the matching status of water footprint and economic and social development in the Dongjiang Lake Basin. The results indicated that the water footprint of the Dongjiang River Basin was mainly based on agricultural and industrial water use, with agricultural water consumption accounting for over 58%. The efficiency of water resource utilization has gradually improved

收稿日期:2024-01-04

基金项目:湖南省教育厅项目(23C0728, 23C0729);湖南省社科成果评审委员会一般项目(XSP24YBZ051);广东省教育厅项目(2023WTSCX086);韶关市社科规划项目(G2023007);韶关学院博士科研项目(9900064601/139);湖南省社科成果评审委员会重大项目(XSP22ZDA003);湖南省社科基金智库专项重点项目(21ZWB01)

作者简介:胡强(1974—),男,博士,研究方向为生态经济、创新经济, Www.642401338@qq.com

* 责任作者:刘红峰(1975—),男,副教授,博士,研究方向为农业经济、可持续生态, 892625216@qq.com

since 2018. The import and export water footprint belongs to the net export type of water resources. The water footprint pressure was between 0.42 and 0.61, and water resource consumption cannot be guaranteed under extreme drought conditions. The average water consumption of urban and rural residents had increased rapidly. The Tapio coefficient showed that from 2012 to 2016, the water footprint and economic development were mainly in a growth-linked state. From 2017 to 2022, the frequency of weak decoupling increased, especially in 2022, when the decoupling coefficient approached the level of -0.44 . Research has shown that the Dongjiang Lake Basin has sufficient water resources to meet the needs of regional industrial and agricultural production and residential life, but it is necessary to be vigilant against the impact of the extreme arid climate. At the same time, it is necessary to improve the efficiency of water resource utilization, leverage the advantages of water resources to upgrade regional industrial structure, and develop the "water economy" in combination with water resource advantages.

Key words water footprint; decoupling theory; water resource evaluation; Dongjianghu Lake Basin

1993年,地理学家Allan^[1]从学术研究角度提出了虚拟水的概念,此后,该概念被广泛应用于水文学、生态经济学、环境经济学等交叉学科的研究中^[2-3]。基于虚拟水的研究基础,2002年荷兰学者Hoekstra对虚拟水的概念与理论进行了拓展与丰富,提出了水足迹(water footprint, WFP)的研究概念^[4]。水足迹指一个国家、地区的人口或个人在一定时间内消耗或生产的所有产品和服务所需要的水资源总量,能更清晰、准确地衡量出研究区域内水资源的真实消耗量。水足迹的概念基于生态学中关于生态足迹的研究而提出,二者存在直接类比的关系^[5-6]。学术界关于水足迹的研究成果较多,如Hoekstra等^[7]通过时序研究,计算出1997—2001年世界各国的水足迹,得出该时期全世界人均水足迹为 $1\,240\text{ m}^3/\text{a}$,美国人均水足迹达到 $2\,480\text{ m}^3/\text{a}$,为世界人均水足迹的2倍;而中国人均水足迹只有 $700\text{ m}^3/\text{a}$,仅为世界人均水足迹的1/2多。近年来学者运用水足迹理论对我国开展了广泛的区域性水资源利用研究。姜秋香等^[8]测度了黑龙江省2000—2018年的水足迹,并分析了黑龙江省该时期水足迹的时空演变特征;朱向梅等^[9]采用洛伦兹曲线图形和基尼系数,在构建三维水足迹模型的基础上,量化分析了2005—2018年黄河流域各省(区)水足迹的时空差异及均衡程度;Liu等^[10]测度、分析了我国长江经济水足迹的状况,以及人口、经济和土地利用等因素对水足迹的影响;李中杰等^[11]研究了饮用水源与经济社会发展的耦合协调关系。

学术界将水足迹理论与脱钩模型相结合来研究综合性或区域性的经济社会-生态环境耦合协调关系,该方法在生态环境保护、低碳经济、绿色发展、创新发展等研究领域均有较多应用。同样,脱钩模型在水资源保护、水资源开发利用、水生态环境均衡的研究中应用较广。如王喜峰等^[12]从纵向、横向2个维度研究了水资源和社会经济发展之间的脱钩

机制,翟琴琴^[13]研究发现陕西省的水资源开发利用与经济增长之间处于弱脱钩的状态。从中国知网关键词搜索得出,学术界运用较多的脱钩模型有OCED模型^[14]、Tapio脱钩模型^[15]和IPAT方程^[16]。张玲玲等^[17]利用Topio模型与LMDI分解模型研究了2001—2015年长江经济带11省(市)的水体污染与经济增长脱钩关系演变及驱动因素;王昱璋等^[18-19]采用Topio模型研究了2010—2020年湖南省水资源利用情况;钟妮栖等^[20]采用Tapio模型研究了黄河流域城市群水资源利用与经济发展脱钩关系;段洋洲等^[21]进一步研究了黄河流域环境治理绩效的空间关联网及影响因素。Tapio模型源于OCED模型,且能基于弹性变化使用增长率对脱钩状态进行定量描述,优势明显。

目前,国内学术界对我国中西部干旱、半干旱区的资源性缺水省(区、市)的水足迹研究较多,而对于南方雨水充沛及湿润地区的水足迹研究较少。既有的水足迹研究中大都从考虑水足迹结构部分的整体性宏观问题出发进行研究,而对水足迹与产业结构不协调、水资源利用效率低等的局部性微观问题分析较少。东江湖流域是湖南省战略性水资源,也是世界可持续发展创新示范区建设的核心组成部分,但鲜有对该流域水资源可持续性开发利用的针对性水足迹研究。鉴于此,笔者基于水足迹理论和现有研究成果,测算湖南省东江湖流域水足迹状况,采用Tapio脱钩模型分析东江湖流域水足迹与经济社会发展之间的耦合协调关系。通过对东江湖水足迹的研究,以期为郴州市作为不可再生性和枯竭性的矿业资源型城市的产业结构调整、经济转型升级、生态环境保护、水资源开发利用和“水经济”发展提供理论支撑和实践参考,从而丰富水足迹理论,为脱钩模型在局部领域提升结构性水资源利用效率、发挥水资源优势提供理论依据。

1 研究区与研究方法

1.1 研究区概况

东江湖流域 (113°08'E~113°44'E, 25°34'N~26°18'N) 位于湖南省东南部郴州市境内, 系长江流域湘江水系耒水支流上游, 流域总面积为 4 719 km², 因国家“六五”重点能源工程——东江水电站拦河蓄水而成。流域涉及资兴、汝城、桂东、宜章 4 个县(市)共 29 个乡镇, 其中资兴市涉及 7 个乡镇, 东江湖水面 95% 处于资兴市内。东江湖湖面长约 103 km, 湖面最宽处约 6.2 km, 湖面面积为 160 km², 平均水深

61 m, 最大水深 141 m, 总库容为 91.5×10^8 m³, 正常蓄水量为 81.2×10^8 m³, 按蓄水量排名处于全国淡水湖泊前 10 名。每年平均来水量达到 44.8×10^8 m³, 与全流域 3 000 多万人口(约占湖南省人口总数的 1/2)的用水安全息息相关。东江湖发源于桂东县的烟竹堡, 主要入湖支流有沅江、浙水、潞水、淇水等, 其中河流面积在 50 km² 以上的有 22 条, 10 km² 以上的有 135 条。东江湖出水汇入耒水, 最终流向湘江, 成为洞庭湖水系的一部分。东江湖水资源是湖南省稀缺的战略性淡水资源之一。东江湖流域地表水系见图 1。

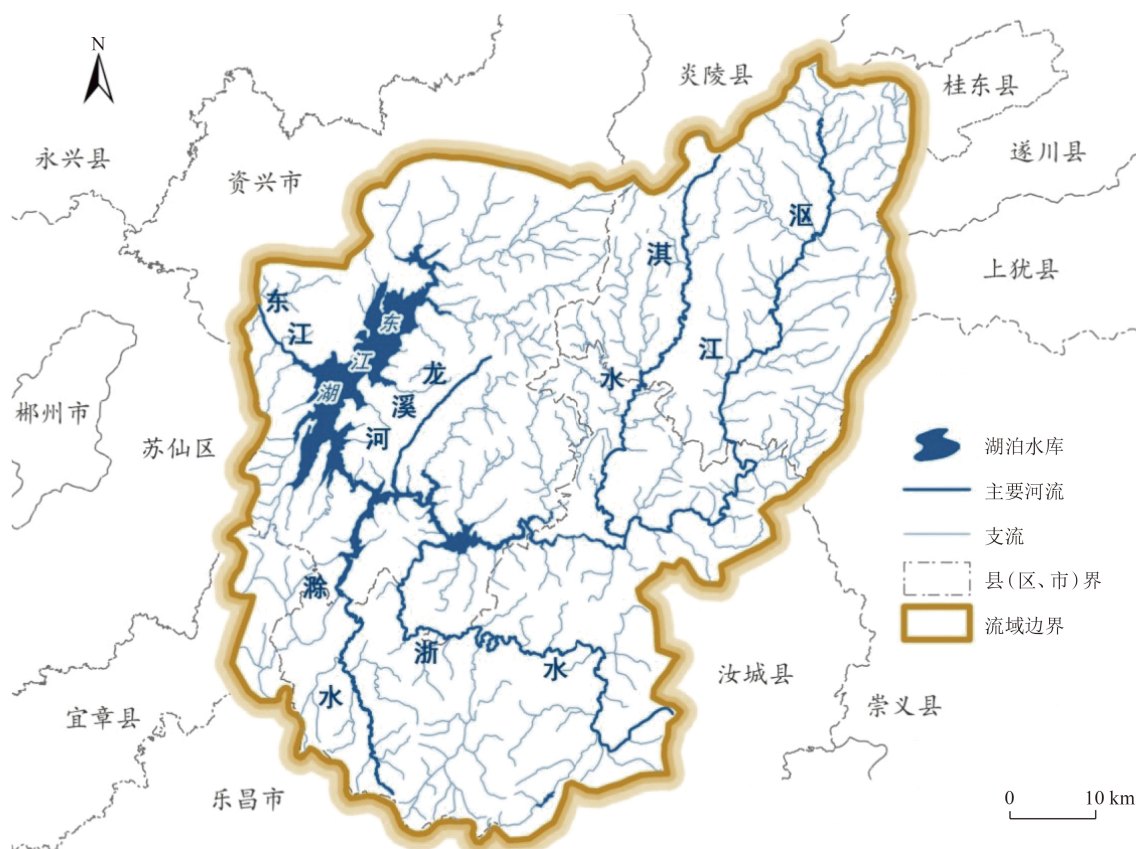


图 1 东江湖流域地表水系示意

Fig.1 Schematic diagram of surface water system in Dongjiang Lake Basin

1.2 数据来源

本研究涉及的农业用水量、工业用水量、生活用水量、进出口虚拟水量、生态用水量等水资源数据(2012—2022 年)来自《湖南省水资源公报》与国家统计局全国年度统计公报。经济社会发展数据(2012—2022 年)来自湖南省、郴州市及相关县(区、市)官方公布的统计资料。

1.3 研究方法

1.3.1 水足迹测算

水足迹主要由工农业生产用水量、生活用水量、生态用水量、进出口虚拟水量等组成, 分为区域

内部水足迹(IWFP)和区域外部水足迹(EWFP)。EWFP 指该地区通过贸易等手段接纳其他地区的水资源量, 也称为进口水足迹, 划分为实体水、虚拟水^[22] 2 种形式。

水足迹的计算公式如下:

$$WFP = IWFP + EWFP \quad (1)$$

$$IWFP = AWW + IWW + DWW + EWW - VWE_{dom} \quad (2)$$

式中: WFP 为总水足迹, 10^8 m³; AWW、IWW、DWW、EWW、VWE_{dom} 分别为农业用水量、工业用水量、生活用水量、生态用水量、出口虚拟水量, 10^8 m³。

工业、生活、生态用水量用实际用水量(实体水)来衡量,农业用水量和进出口用水量按照学术界通常的做法采用虚拟水量来表示。

1.3.2 农业用水量计算

由于农业生产所消耗的水资源难以量化,本文的农业用水量采用虚拟水,即用产品数量折算出用水量。根据东江湖流域农作物种植和家畜养殖现状,选取粮食、水果、蔬菜、油料 4 类植物产品以及牛肉、羊肉、猪肉、牛奶、蛋类、水产品 6 类动物产品,参考全国农产品虚拟用水量的平均值^[23](表 1),采用式(3)进行用水量计算。

表 1 农产品虚拟用水量参考值
Table 1 Reference value for virtual water
content of agricultural products m³/kg

产品	虚拟用水量	产品	虚拟用水量
粮食	1.397	牛肉	12.560
蔬菜	0.136	羊肉	5.200
水果	1.000	牛奶	1.900
油料	3.967	蛋类	3.550
猪肉	2.210	水产品	5.000

$$AWW = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} O_i \times W_i \tag{3}$$

式中: O_i 为第 i 个产品小类的年产量, 10^4 t; W_i 为第 i 个产品小类的虚拟水含量, m^3/kg ; $1/10$ 为单位换算系数。

1.3.3 进口、出口虚拟水量计算

研究区的进口虚拟水量(EWFP)、出口虚拟水量(VWEdom)与进出口贸易值相关^[24]。在度量进口贸易产生的虚拟水量时,进口产品的用水量无法直接用原产地的用水量来衡量,采用“替代效应”法^[25],以研究区的生产用水量来测算^[26]。计算公式如下:

$$EWFP = \frac{IT}{GDP} \times TWS \tag{4}$$

$$VWEdom = \frac{ET}{GDP} \times TWS \tag{5}$$

式中: IT 为地区进口贸易值,即东江湖流域 2012—2022 年各年份的进口贸易值, 10^8 元; GDP 为东江湖流域 2012—2022 年各年份的地区生产总值, 10^8 元; ET 为东江湖流域 2012—2022 年各年份的出口贸易值, 10^8 元; TWS 为东江湖流域 2012—2022 年各年份的总供水量, $10^8 m^3$ 。

1.4 水足迹评价指标

国内关于区域水足迹的研究大都聚焦于干旱地区。对于水资源丰富的东江湖流域而言,水足迹理论对于流域充分发挥水资源优势、着力打造“水经

济”,防范因地区产业结构不协调而导致的结构性缺水问题,使水资源优势在不可再生性矿业资源型地区产业结构转型升级中充分发挥作用都具有理论价值和现实意义。

在对近 5 年中国知网和 Web of Science 的文献资料进行分析的基础上,从水足迹结构、水足迹利用、水足迹安全、水足迹发展 4 个角度提出对东江湖流域水足迹评价的 7 个指标,用以测算东江湖流域的水足迹构成、水足迹开发利用状况、水足迹在极端状况下的安全性及水足迹发展趋势。

1.4.1 水足迹结构测算

水足迹结构采用水资源进口依赖度(WD)来测算。WD 越大,说明研究区域对外部水足迹越存在依赖,当超过 50% 时为高度依赖;相反,亦然。计算公式如下:

$$WD = \frac{EWFP}{WA} \times 100\% \tag{6}$$

式中 WA 为总用水量, $10^8 m^3$ 。

1.4.2 水足迹利用测算

水足迹利用采用人均水足迹、水资源利用效率、水足迹净贸易度 3 个指标来测算。人均水足迹(WFPPC, $m^3/人$)表达区域在单位时间内人均消耗的水足迹;水资源利用效率(WIUD, 元/ m^3)指该地区单位 GDP 所产生的水足迹;水足迹净贸易量(WFT, $10^8 m^3$)指该地区在单位时间内净出口贸易所含虚拟水量。计算公式如下:

$$WFPPC = \frac{WFP}{TP} \tag{7}$$

$$WIUD = \frac{GDP}{WFP} \tag{8}$$

$$WFT = VWEdom - EWFP \tag{9}$$

式中 TP 为东江湖流域年常住人口数, 10^4 人。

1.4.3 水足迹安全测算

水足迹安全采用水资源压力指数(WSI)、水资源匮乏度(WS)2 个指标来测算。WSI、WS 计算公式如下:

$$WSI = \frac{WFP}{WA} \tag{10}$$

$$WS = \frac{WFP + VWEdom}{WA} \tag{11}$$

WSI<1 时,表明该研究区域水资源开发利用状况较好,反之则供需矛盾突出。WS<1 时,表明该研究区域水资源丰富;WS>1 时,则表明该研究区域水资源匮乏。

1.4.4 水足迹发展测算

水足迹发展采用水资源增长指数(WFI)来测算。WFI 反映各年水足迹变化幅度, WFI 越大则该

年度内水足迹增长率越大,其计算公式如下:

WFI = (WFP_n - WFP_{(n-1)}) / WFP_{(n-1)} × 100% (12)

式中 WFP_n、WFP_{(n-1)} 分别为第 n 年、第 n-1 年的水足迹, 10⁸ m³。

1.5 Tapio 模型评价

引入 Tapio 模型对东江湖流域经济增长与水资源开发利用的协同性展开讨论,进行水资源评价。一般认为,根据脱钩模型分析区域性水资源开发利用与经济增长之间存在着负脱钩、脱钩以及介于二者之间过渡状态的连结 3 种关联关系。负脱钩情形下,水资源开发利用程度与经济增长之间同步发展,二者关联紧密,随着经济增长速度的加快,对水资源的开发利用程度也加剧,导致水资源承载的压力随之增加;脱钩情形下,经济增长速度快于水资源开发利用程度,二者的关联松散,经济增长速度的加快不会导致水资源开发利用程度的加剧,产业发展朝节水、高产值方向转型;连结情形则为负脱钩和脱钩之间的过渡状态^[27]。Tapio 模型以 GDP 反映经济水平、水足迹反映水资源开发利用程度,脱钩指数则为所研究区域的水足迹增长率与 GDP 增长率之比,计算公式如下:

D_n = W_n / G_n = (WFP_n - WFP_{(n-1)}) / WFP_{(n-1)} / (GDP_n - GDP_{(n-1)}) / GDP_{(n-1)} (13)

式中: D_n 为第 n 年的脱钩指数; W_n、G_n 分别为第 n 年的水足迹增长率和 GDP 增长率, WFP_n 为第

n 年的水足迹; GDP_n 为第 n 年的地区生产总值, 10⁸ 元。Tapio 模型的评价等级划分方式如表 2 所示。

表 2 脱钩评价等级划分情况

Table 2 Classification of decoupling evaluation levels

脱钩程度		W _n	G _n	D _n
脱钩	强脱钩	—	+	(-∞, 0)
	弱脱钩	+	+	[0, 0.8)
	衰退脱钩	—	—	(1.2, +∞)
连结	增长连结	+	+	[0.8, 1.2]
	衰退连结	—	—	[0.8, 1.2]
负脱钩	强负脱钩	+	—	(-∞, 0)
	弱负脱钩	—	—	[0, 0.8)
	增长负脱钩	+	+	(1.2, +∞)

注: —表示负向增长, +表示正向增长。

2 结果与分析

2.1 东江湖流域水足迹构成

根据 2012—2022 年的《郴州市统计年鉴》《郴州市水资源公报》《湖南省统计年鉴》《湖南省水资源公报》计算东江湖流域的工业用水量、生活用水量、生态用水量的实体水量,进出口的虚拟水量,以及农业用水量的虚拟水量;根据式(1)~式(5)计算外部水足迹、内部水足迹及总水足迹,得出 2012—2022 年东江湖流域水足迹构成情况,结果如表 3 所示。

表 3 2012—2022 年东江湖流域水足迹构成

Table 3 Composition of water footprint in Dongjiang Lake Basin from 2012 to 2022

年份	农业用水量	工业用水量	生活用水量	生态用水量	出口虚拟水量	总用水量	外部水足迹	内部水足迹	总水足迹
2012	13.636	7.874	2.843	0.174	1.704	26.231	1.605	22.823	24.428
2013	13.874	7.896	2.239	0.176	2.056	26.241	1.734	22.129	23.863
2014	14.368	6.975	2.741	0.164	2.212	26.460	1.881	22.036	23.917
2015	14.832	6.993	2.234	0.159	1.319	25.537	1.148	23.079	24.227
2016	14.754	7.012	2.476	0.162	1.508	25.912	0.882	22.896	23.778
2017	14.368	7.214	2.672	0.171	1.660	26.112	1.324	22.792	24.116
2018	13.689	7.074	2.946	0.173	1.842	25.724	1.506	22.040	23.546
2019	13.246	6.762	3.526	0.168	2.096	25.798	1.341	21.606	22.947
2020	12.582	6.663	3.801	0.164	3.167	26.377	1.138	20.043	21.181
2021	12.574	6.573	3.823	0.159	2.991	26.120	1.015	20.138	21.153
2022	12.476	6.544	3.836	0.163	1.867	24.886	1.052	21.152	22.204

注: 总用水量为农业用水量、工业用水量、生活用水量、生态用水量与出口虚拟水量之和。

由表 3 可知, 2012—2022 年东江湖流域农业用水量波动缓慢下降,工业用水量缓慢下降,生活用水量则呈明显上升趋势,生态用水量基本保持相对稳

定;总水足迹波动缓慢下降,研究期内总水足迹的峰值为 2012 年的 24.428×10⁸ m³。

东江湖流域农业用水量在总水足迹中占比超过

58%, 主要原因是该区域气候条件适宜, 农业十分发达, 农业产业对用水量需求较大, 并且农业用水效率偏低。工业用水量在 2013 年达到峰值 $7.896 \times 10^8 \text{ m}^3$ 后, 处于波浪式缓慢下降的趋势, 直到 2022 年降至 $6.544 \times 10^8 \text{ m}^3$, 主要原因是近 10 多年来, 郴州市由原来典型的高污染、高耗水的矿业资源型城市的产业结构, 逐步向低排放、低耗水、高附加值的产业结构转型升级, 对有效控制工业用水量起到了关键作用。但是, 随着城镇化率的不断提高, 居民生活用水量(包括公共设施用水量)呈现出逐年增长的趋势, 由 2012 年的 $2.843 \times 10^8 \text{ m}^3$ 增长至 2022 年的 $3.836 \times 10^8 \text{ m}^3$, 主要原因是城镇化不断发展、城乡居民生活水平逐步提高, 带来了生活用水量的逐年增加, 预计该上升趋势在今后很长时间都会持续。生态用水量占比较小, 随着生态环境修复及环境保护工作的不断加强, 生态环境用水量基本稳定, 该部分用水量将进一步趋于稳定。进、出口虚拟水量是进出口贸易状态的直接体现, 研究期间东江湖流域水足迹净贸易量均为正值, 各年度出口虚拟用水量明显大于外部水足迹(既进口虚拟水量)。从时序来看, 出口虚拟水量呈现出不断增长的趋势, 表明其水足迹呈现净输出状态, 主要原因是流域外向型经济的不断发展促进了出口额的持续上涨, 地区贸易顺差稳定增加, 特别是中国(湖南)自由贸易试验区郴州片区的设立更是为稳定与发展出口预期奠定了坚

实基础。

2.2 东江湖流域主要水足迹评价指标变化

依据东江湖流域关于水资源、经济社会发展的统计数据, 结合式(6)~式(12)关于水足迹指标计算, 得到水足迹结构、水足迹利用、水足迹安全、水足迹发展 4 类共 7 个指标的计算结果, 如表 4 所示。

从水足迹结构的角度分析, 东江湖流域水资源进口依赖度一直维持在较低水平(超过 50% 认为依赖度过高, 比例越低越安全)。东江湖流域水资源丰富, 很好地满足了该区域生产、生活所需, 对外来进口产品依赖度较低, 主要原因是郴州市水资源丰富, 可供开发利用的涉水产业涵盖面广。目前东江湖流域的产业内部结构仍然存在较大优化空间, 主要表现为农业规模化、标准化、产业化、智能化程度较低, 农业用水量且水资源利用效率较低, 不能满足农业现代化、农业高质量发展的需要; 工业仍存在着原来矿业开采与初级加工的痕迹, 高新技术产业、高附加值的新兴产业占比不足, 产业结构转型升级仍然任重道远; 以数据要素、水资源优势为主的现代服务业基础薄弱, 没有形成实质性的产业特色、产业规模与产业优势。因此, 东江湖流域发挥水资源优势, 打造“水经济”生态时要在现有涉水产业发展的基础上, 进一步加快与数据要素、高新技术的结合, 从而拓展水资源优势的发展空间, 延伸产业链, 补充价值链, 提升产品附加值。

表 4 2012—2022 年东江湖流域水足迹情况
Table 4 Water footprint of Dongjiang Lake Basin from 2012 to 2022

年份	水足迹结构	水足迹利用			水足迹安全		水足迹发展
	水资源进口依赖度/%	人均水足迹/($\text{m}^3/\text{人}$)	水资源利用效率/($\text{元}/\text{m}^3$)	水足迹净贸易量/(10^8 m^3)	水资源压力指数	水资源匮乏度	水足迹增长指数
2012	6.43	1 227.9	62.113	0.099	0.436	0.543	1.43
2013	7.01	1 214.1	64.740	0.322	0.703	0.835	-0.85
2014	7.63	1 215.8	71.130	0.331	0.413	0.536	0.23
2015	4.68	1 218.6	76.679	0.171	0.442	0.521	1.34
2016	3.60	1 212.8	80.040	0.626	0.501	0.603	-0.28
2017	5.42	1 219.5	83.793	0.336	0.536	0.614	1.45
2018	6.20	1 207.8	93.813	0.336	0.432	0.536	-0.56
2019	5.60	1 194.9	104.60	0.755	0.368	0.437	-0.47
2020	4.91	1 156.8	114.63	2.029	0.421	0.495	-0.36
2021	4.41	1 156.4	130.96	1.886	0.428	0.531	-0.22
2022	4.56	1 178.9	134.23	0.815	0.714	0.845	-0.95

从水足迹利用的角度分析, 东江湖流域水资源利用效率在 2012—2022 年提升幅度达 200%, 主要原因是国家层面十分重视水资源管理, 2012—2013 年

先后发布了《国务院关于实行最严格水资源管理制度的意见》《国务院关于化解产能严重过剩矛盾的指导意见》, 郴州市在东江湖流域水资源治理过程中积

极落实国家层面的政策措施。同时,郴州市结合地方特色,出台了一系列贯彻落实国家、省相关政策的配套实施方案,将产业结构转型升级与水资源治理相结合,在严格管控水资源开发利用、淘汰低端产能的基础上,大力发展低耗水、高附加值的产业,形成了一定规模的新兴产业集群。研究期内,东江湖流域水足迹净贸易量均为正值,为水足迹净输出地区,为郴州市作为湖南省自贸区的组成部分之一的外向型经济发展奠定了坚实基础。2012—2022 年东江湖流域人均水足迹总体呈现稳定—下降的趋势,各年稳定在 $1\ 200\text{ m}^3/\text{人}$ 左右,远高于全国平均水平,与世界平均水平相当。

从水足迹安全角度来看,2012—2022 年东江湖流域水资源压力指数绝大部分年份在 0.4~0.6 的区间内稳定波动,处于水资源承压能力范围之内,唯 2022 年东江湖流域水资源压力指数高达 0.714,这是由于该年度遭遇春夏连旱,水资源总量下降。2012—2022 年东江湖流域水资源匮乏度处于 0.43~0.85。综合东江湖流域水资源压力指数、水资源匮乏度 2 项指标的情况分析,研究区域水资源供给安全性保障良好,但是要防范极端干旱年份所存在的压力。

从水足迹发展的角度分析,2012—2022 年东江湖流域水足迹发展呈波形平稳向好趋势,除 2012 年的 1.43、2015 年的 1.34、2017 年的 1.45,出现波浪式反复水足迹增长之外,至 2022 年下降到了-0.95。从流域产业结构调整状况分析,2017 年之前处于产业结构转型升级的前期探索阶段,水足迹发展状况没有明显向好的趋势;2017 年之后产业转型升级成效逐步显现,尤其是 2018 年以来,政策及措施相对稳定并持续发挥了较好作用,推动水足迹明显向好发展。东江湖流域治理过程中要进一步强化水资源本身具有社会属性、经济属性的特点,建立与水生态文明相适应的产业结构、经济社会发展模式;要加速淘汰火电、水泥、冶炼、制革、印染等落后产能,大力推进绿色产业的发展;要多措并举培育节水意识,挖掘农业节水潜能。

2.3 东江湖流域 Tapio 脱钩模型评价

基于 Tapio 模型,依托于水足迹评价指标,进一步计算出 2012—2022 年东江湖流域水足迹和经济发展的脱钩系数,得出其所处时期内水资源开发利用与经济增长之间的脱钩状态,结果如表 5 所示。

东江湖流域脱钩系数可以 2017 年为界划分为 2 个时段:1)2012—2016 年,水足迹和经济发展以增长连结状态为主,脱钩系数在-0.080~1.200 内波动,仅有 2013 年出现强脱钩状态,原因是该年份遭遇旱

灾,工农业用水量显著下降。2)2017—2022 年,脱钩系数处于-0.440~0.796,大部分处于弱脱钩状态,唯有 2022 年脱钩系数为-0.440,处于强脱钩状态。可见,东江湖流域水资源利用情况稳定向好。水资源利用方面,东江湖流域水足迹年增长率维持在 3% 以内,2019 年后更出现了多年负增长,且变化趋势趋于稳定,充分说明东江湖流域在水资源治理上取得了良好效果。

表 5 2012—2022 年东江湖流域水资源 Tapio 脱钩分析

Table 5 Tapio decoupling analysis of water resources in Dongjiang River Basin from 2012 to 2022

年份	脱钩系数	脱钩状况	年份	脱钩系数	脱钩状况
2012	0.941	增长连结	2018	0.676	弱脱钩
2013	-0.080	强脱钩	2019	0.472	弱脱钩
2014	1.143	增长连结	2020	0.297	弱脱钩
2015	1.200	连结	2021	0.747	弱脱钩
2016	1.047	增长连结	2022	-0.440	强脱钩
2017	0.796	弱脱钩			

随着东江湖流域所在的郴州市贯彻落实最严格水资源管理制度,水资源环境治理效果明显,生态环境得到了有效保护;郴州市在大力促进产业转型中,高能耗、高污染产业逐渐向低能耗、低排放产业方向转变;郴州市在水资源利用、矿业资源高效开发过程中,通过科技创新提高了资源利用效率,使经济发展对水资源、不可再生的矿业资源的依赖度逐步降低。近年来,郴州市着力构建符合市情实际的水资源治理指标体系,施行了最为严格的水资源管理制度;将东江湖列为国家重点保护生态湖泊、重要饮用水水源保护区的重中之重进行管控,从流域源头治理污染排放,促进流域产业升级,实现对东江湖流域水资源的开发利用、保护和管理。

3 结论与展望

(1)东江湖流域总用水量和总水足迹呈波浪式缓慢下降趋势,水资源利用绝大部分源于内部供应,并呈现出对外输出水足迹持续增加的外向型经济发展趋势,水资源能较好地支撑区域经济社会发展,水资源安全上有保障。农业用水量占比超过 58%,挤占了其他产业的水资源供应量,不利于经济转型升级和高质量发展“水经济”。东江湖流域用水量构成表现为农业用水量>工业用水量>生活用水量>出口虚拟水量>生态用水量。人均水足迹总体呈现出上升—稳定—下降的趋势。水资源压力指数在 0.42~0.61 的区间内稳定波动,仅有大旱年份出现突增。

2018 年之前水足迹增长指数呈反复振荡状态, 之后出现缓慢上升趋势, 表明东江湖流域水资源环境治理及产业转型升级的成效逐步显现。

(2) 东江湖流域水资源与经济发展间的脱钩系数显示, 经济增长对水资源的依赖程度在逐步下降。2012—2016 年以增长连结状态为主, 2017—2022 年弱脱钩状态出现频率显著增加, 水资源利用与经济发展整体处于脱钩状态, 呈现出经济发展对水资源的依赖性越来越低的发展趋势, 有利于东江湖流域产业转型升级和区域经济社会可持续发展。

(3) 研究综合表明, 东江湖流域水资源禀赋优良, 除极端干旱年份外均能满足区域内工农业生产、居民生活和生态环境用水所需, 但需要防范极端干旱年份用水短缺问题。一方面要实施最为严格的水资源管理措施, 另一方面要充分发挥水资源优势, 大力发展地区特色生物农业、先进制造业、数据要素产业等新型产业集群。针对城乡居民生活用水日益增加问题, 应加强节约用水宣传, 推荐安装节水洁具。在产业结构调整、水资源优势利用与“水经济”打造过程中应进一步破解发展不充分、不平衡的局面。

受数据资料的限制, 研究中借鉴现有成果所采用的单位农产品虚拟水含量的取值时, 未考虑地域差异, 使农业用水量计算结果存在一定误差, 考虑到东江湖流域农业用水量占比较高, 后续将开展针对性研究进行弥补。

参考文献

- [1] ALLAN J A. Virtual water: a strategic resource global solutions to regional deficits[J]. *Groundwater*, 1998, 36(4): 545-546.
- [2] DUAN C C, CHEN B. Virtual water embodied in international energy trade of China[J]. *Energy Procedia*, 2016, 88: 94-99.
- [3] ZHANG Y, ZHANG J H, TANG G R, et al. Virtual water flows in the international trade of agricultural products of China[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 557: 1-11.
- [4] 马晶, 彭建. 水足迹研究进展 [J]. *生态学报*, 2013, 33(18): 5458-5466.
MA J, PENG J. Research progress on water footprint[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(18): 5458-5466.
- [5] HOEKSTRA A Y. Human appropriation of natural capital: a comparison of ecological footprint and water footprint analysis[J]. *Ecological Economics*, 2009, 68(7): 1963-1974.
- [6] HOEKSTRA A Y, HUNG P Q. Globalisation of water resources: international virtual water flows in relation to crop trade[J]. *Global Environmental Change*, 2005, 15(1): 45-56.
- [7] HOEKSTRA A Y, CHAPAGAIN A K. Water footprints of nations: Water use by people as a function of their consumption pattern[M]//CRASWELL E, BONNELL M, BOSSIO D, et al. *Integrated Assessment of Water Resources and Global Change*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2006: 35-48.
- [8] 姜秋香, 吴云星, 王子龙, 等. 黑龙江省水足迹时空分布规律及空间均衡分析 [J]. *水资源保护*, 2022, 38(5): 122-131.
JIANG Q X, WU Y X, WANG Z L, et al. Spatio-temporal distribution and spatial equilibrium analysis of water footprint in Heilongjiang Province[J]. *Water Resources Protection*, 2022, 38(5): 122-131.
- [9] 朱向梅, 王子莎. 黄河流域水足迹公平性分析研究 [J]. *环境生态学*, 2022, 4(增刊 1): 83-89.
ZHU X M, WANG Z S. Equity analysis of water footprint in the Yellow River Basin[J]. *Environmental Ecology*, 2022, 4(Suppl 1): 83-89.
- [10] LIU G, HU F, WANG Y X, et al. Assessment of lexicographic minimax allocations of blue and green water footprints in the Yangtze River Economic Belt based on land, population, and economy[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16(4): 643.
- [11] 李中杰, 李亚丽, 汪艳如, 等. 饮用水源地生态环境与经济社会发展耦合协调研究: 以昆明市松华坝水库为例 [J]. *环境工程技术学报*, 2022, 12(6): 2132-2139.
LI Z J, LI Y L, WANG Y R, et al. Study on coupling and coordination of eco-environment and socio-economic development of drinking water sources: a case study of Songhuaba Reservoir in Kunming City[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2022, 12(6): 2132-2139.
- [12] 王喜峰, 沈大军, 李玮. 水资源利用与经济增长脱钩机制、模型及应用研究 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2019, 29(11): 139-147.
WANG X F, SHEN D J, LI W. Research on the mechanism, model and application of decoupling between water resources utilization and economic growth[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2019, 29(11): 139-147.
- [13] 翟琴琴. 基于水资源生态足迹的陕西省水资源与经济增长脱钩关系研究 [D]. 临汾: 山西师范大学, 2021.
- [14] OECD. Indicators to measure decoupling of environmental pressures from economic growth[R]. Paris: OECD, 2002.
- [15] TAPIO P. Towards a theory of decoupling: degrees of decoupling in the EU and the case of road traffic in Finland between 1970 and 2001[J]. *Transport Policy*, 2005, 12(2): 137-151.
- [16] 王永刚, 王旭, 孙长虹, 等. IPAT 及其扩展模型的应用研究进展 [J]. *应用生态学报*, 2015, 26(3): 949-957.
WANG Y G, WANG X, SUN C H, et al. Research progress on the application of IPAT model and its variants[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(3): 949-957.
- [17] 张玲玲, 车力, 王宗志, 等. 长江经济带水污染与经济脱钩关系演变及驱动因素研究 [J]. *水利水电技术 (中英文)*, 2021, 52(12): 47-59.
ZHANG L L, CHE L, WANG Z Z, et al. Study on evolution and driving factors of relationship between water pollution and economic decoupling in Yangtze River Economic Zone[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2021, 52(12): 47-59.
- [18] 王昱璋, 董增川, 崔璨, 等. 水足迹视角下的湖南省水资源利用

- 评价[J/OL]. 西安理工大学学报. <https://kns.cnki.net/kcms2/detail/61.1294.n.20230620.1741.008.html>.
- [19] 曹姗姗, 何昭丽, 徐力璇, 等. 区域旅游发展对水资源绿色效率的影响及其时空分异[J]. 经济地理, 2023, 43(7): 215-224.
CAO S S, HE Z L, XU L X, et al. The impact of tourism development on green efficiency of water resources in China and its spatio-temporal differentiation[J]. Economic Geography, 2023, 43(7): 215-224.
- [20] 钟妮栖, 夏瑞, 张慧, 等. 黄河流域城市群水资源利用与经济发展脱钩关系研究[J]. 环境科学研究, 2024, 37(1): 102-113.
ZHONG N X, XIA R, ZHANG H, et al. Research on the decoupling relationship between water resources utilization and economic development in urban agglomerations of the Yellow River Basin[J]. Research of Environmental Sciences, 2024, 37(1): 102-113.
- [21] 段洋洲, 王奕淇, 甄雯青. 黄河流域环境治理绩效的空间关联网络及影响因素分析[J]. 环境科学研究, 2024, 37(7): 1546-1560.
DUAN Y Z, WANG Y Q, ZHEN W Q. Analysis of spatial correlation network and influencing factors of environment governance performance in the Yellow River Basin[J]. Research of Environmental Sciences, 2024, 37(7): 1546-1560.
- [22] 胡圆昭, 朱豪, 尹明财, 等. 基于水足迹理论的长江经济带水资源利用评价[J]. 长江科学院院报, 2023, 40(10): 35-43.
HU Y Z, ZHU H, YIN M C, et al. Evaluation of water resources utilization in the Yangtze River Economic Belt based on water footprint theory[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2023, 40(10): 35-43.
- [23] 张蕾. 中国虚拟水和水足迹区域差异研究[D]. 大连: 辽宁师范大学, 2009.
- [24] 林彤. 福建省水足迹研究[D]. 福州: 福建师范大学, 2015.
- [25] 朱启荣, 孙雪洁, 杨媛媛. 虚拟水视角下中国农产品进出口贸易节水问题研究[J]. 世界经济研究, 2016(1): 87-98.
ZHU Q R, SUN X J, YANG Y Y. Saving water from China's agricultural imports & exports based on virtual water[J]. World Economy Studies, 2016(1): 87-98.
- [26] 陈秀莲, 郭家琦. 中国虚拟水贸易的测度、评价与影响因素的实证分析: 基于投入产出公式和 SDA 分解模型[J]. 现代财经(天津财经大学学报), 2017, 37(1): 101-113.
CHEN X L, GUO J Q. Empirical analysis on the measurement, evaluation and influencing factors of virtual water trade in China: base on the input-output formula and SDA model[J]. Modern Finance and Economics-Journal of Tianjin University of Finance and Economics, 2017, 37(1): 101-113.
- [27] 潘安娥, 陈丽. 湖北省水资源利用与经济协调发展脱钩分析: 基于水足迹视角[J]. 资源科学, 2014, 36(2): 328-333.
PAN A E, CHEN L. Decoupling and water footprint analysis of the coordinated development between water utilization and the economy in Hubei[J]. Resources Science, 2014, 36(2): 328-333. ◇