

杨亚锋,李欣瑞,张文宝,等.珠江流域片水资源空间均衡及其障碍因子分析[J].人民珠江,2026,47(1):1-10.

珠江流域片水资源空间均衡及其障碍因子分析

杨亚锋¹,李欣瑞¹,张文宝¹,王少华¹,王红瑞^{2*}

(1.华北理工大学理学院,河北唐山063210;2.北京师范大学水科学研究院,北京100875)

摘要:珠江流域片水资源优化配置与均衡发展是保障区域可持续发展的关键。从水资源、社会、经济和生态4个维度构建了水资源空间均衡评价指标体系,将珠江流域片划分为四个子区域,采用Dagum基尼系数和障碍度模型对珠江流域片水资源空间均衡及其障碍因子进行分析。研究结果表明:2017—2022年,珠江流域片水资源空间均衡差异主要来自区域间,其多年平均贡献率高达52.77%,其中子区域1因高原山地地形导致地表水渗漏严重,水资源开发利用率不足40%,而子区域4水利工程完备,需重点关注区域水资源协同调配;从动态变化角度来看,2017—2022年珠江流域片处于临界均衡状态,基尼系数波动范围为0.246~0.350;障碍因子分析显示,水资源子系统和经济社会子系统是珠江流域片各省实现水资源空间均衡的主要障碍因素。

关键词:水资源空间均衡;Dagum基尼系数;障碍因子诊断;珠江流域片

中图分类号:TV213.4 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-9235(2026)01-0001-10

随着全球气候变化和人类活动加剧,珠江流域片的水资源供需格局出现重大变化,面临着水资源分配不均以及水资源短缺的多重风险^[1-2]。水资源空间均衡指的是在特定区域内水资源在数量、质量上与人口分布、产业发展、生态需求等社会经济要素实现动态匹配的状态,既包括区域间水资源的合理调配,也涵盖区域内水资源利用效率与公平性的平衡。珠江流域作为中国经济发展和南方水资源供应的核心区域,其空间均衡状况尤为复杂且关键。该流域人口密度达320人/km²,是全国平均水平的2.3倍,工业增加值占全国比重超15%,但水资源开发利用率已接近45%,部分区域(如珠三角)突破70%的国际警戒线。同时,流域内存在显著的空间异质性:上游云贵高原地区水资源丰富但开发能力不足,中下游地区用水效率虽处于较高水平,但水质型缺水问题突出。因此,水资源的合理配置与均衡发展对该区域可持续发展至关重要^[3]。

当前,学界针对水资源空间均衡的研究方法主

要分为三类:一是基于基尼系数、泰尔指数等统计模型^[4],量化评估水资源分布的均衡程度;二是运用系统动力学、多目标优化模型^[5],模拟不同情境下水资源与社会经济系统的耦合关系;三是通过构建“压力-状态-响应”等指标体系^[6],识别关键影响因素。现有研究普遍认为,气候变化、产业结构差异和水利设施建设水平是导致区域水资源失衡的核心原因^[7-8],但研究尺度多集中于流域局部或单一行政区,缺乏对跨区域复杂系统的整体性分析。已有研究虽从不同角度开展了探索,如王宝恩等^[9]梳理了水资源统一调度管理的实践经验;姜良勇等^[6]基于“压力-状态-响应”模型提出水资源调度大数据指标体系;曾惠等^[10]采用优化的水足迹计算技术分析水资源使用效率;凌霄等^[11]深入剖析区域社会经济发展与水资源分布关系;禹熙等^[12]构建组合赋权-云模型评估珠三角城市水资源可持续性,但仍缺乏对全流域空间均衡特征的系统性研究。

鉴于此,本研究耦合层次分析法、基尼系数及

基金项目:国家自然科学基金(52279005);国家重点研发计划课题(2023YFC3205600)

收稿日期:2025-05-20 **修回日期:**2025-07-10 **网络首发日期:**2025-07-29

作者简介:杨亚锋(1985—),男,博士,教授,主要从事水资源系统分析等工作。E-mail:hblgyf@nest.edu.cn

通信作者:王红瑞(1963—),男,博士,教授,主要从事水资源系统分析等工作。E-mail:henrywang@bnu.edu.cn

障碍度分析等方法,深入探讨珠江流域片水资源空间均衡的差异特征,挖掘其内在规律和影响机制,旨在为珠江流域片水资源优化配置与可持续利用提供支撑,助力区域生态文明建设和高质量发展。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

珠江流域片在我国经济和生态格局中具有重

要地位,是南方水资源丰富且经济发展活跃的大型区域之一。该流域片主要跨越云南、贵州、广西、广东、湖南、江西、福建和海南8省(自治区),总面积约为45.37万 km^2 ,人口密集,总数约1.2亿。本研究根据珠江流域片各省(自治区)的地理位置将研究区域划分为子区域1(云南和贵州)、子区域2(广西、广东和海南)、子区域3(湖南和江西)和子区域4(福建),见图1。

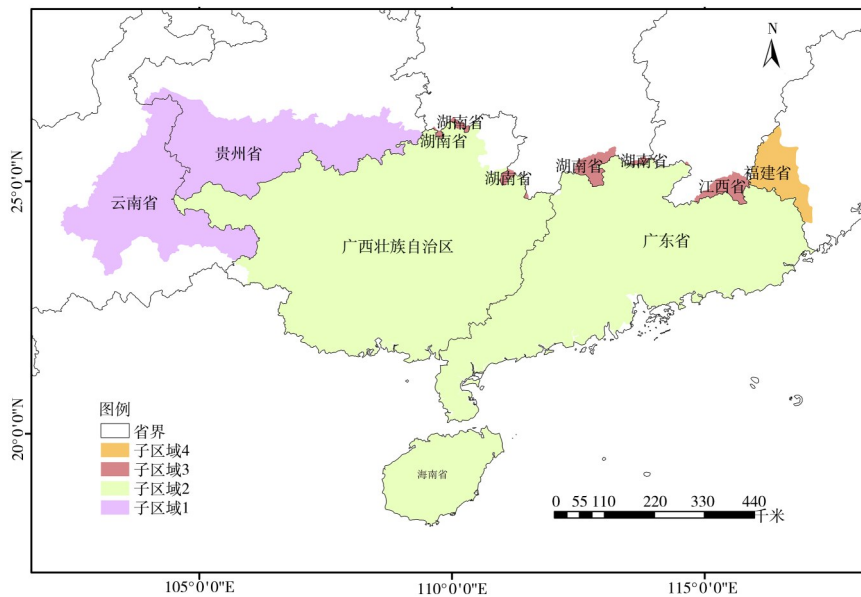


图1 珠江流域片区域划分

Fig. 1 Regional division of the Pearl River Basin

结合区域发展规划和水资源利用相关政策^[13],研究期设定为2017—2022年。

1.2 数据来源

本次研究所使用的土地面积数据来自中国科学院资源与环境科学数据中心提供的1km分辨率的土地使用数据(<http://www.resdc.cn>)。其他所用数据来源于2017—2022年的《水资源公报》《中国统计年鉴》以及各地(省、市)的《水资源公报》和《统计年鉴》。

2 研究方法

2.1 指标体系

水资源空间均衡评价结果与指标选取密切相关,结合相关研究^[14-16],对水-社会-经济-生态环境

复杂系统结构及其相互关系进行分析,筛选18个具有代表性的指标,见表1。

2.2 Dagum基尼系数

为明确区域差异来源与形成机制,采用Dagum基尼系数开展分析。相较于泰尔指数(对极端值敏感、难清晰呈现区域间交互)、变差系数(仅反映离散程度,缺乏区域层次结构解析),Dagum基尼系数可有效规避极端值干扰,还能通过超变密度项量化子区域间交互影响,为探究区域发展不平衡提供更全面精准视角,也常用于水资源空间均衡分析^[17]。Dagum基于子样本提出分解思路,将总体基尼系数拆解为子区域内差异、子区域间差异、超变密度3部分,具体流程见图2。

表 1 珠江流域片水资源空间均衡评价指标体系

Tab. 1 Evaluation index system for spatial equilibrium of water resources in the Pearl River Basin

目标层	准则层	指标层	指标属性	单位
水资源空间均衡	水资源子系统	水资源总量(X_1)	+	亿 m^3
		人均水资源量(X_2)	+	m^3 /人
		地表水资源量(X_3)	+	亿 m^3
		地下水资源量(X_4)	+	亿 m^3
		降水量(X_5)	+	mm
	社会子系统	城市人口密度(X_6)	-	人/ km^2
		恩格尔系数(X_7)	-	%
		建成区绿化覆盖率(X_8)	+	%
	经济子系统	居民人均可支配收入(X_9)	+	元
		城镇登记失业率(X_{10})	-	%
		人均地区生产总值(X_{11})	+	元/人
		第一产业增加值(X_{12})	+	亿元
		第二产业增加值(X_{13})	+	亿元
	生态子系统	第三产业增加值(X_{14})	+	亿元
		城市污染日处理能力(X_{15})	+	万 m^3
		生活垃圾无害化处理率(X_{16})	+	%
		人均公园绿地面积(X_{17})	+	m^2 /人
		生态用水总量(X_{18})	+	亿 m^3

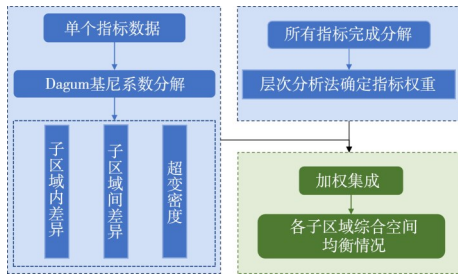


图 2 Dagum 基尼系数关系流程

Fig. 2 Relationship flowchart of Dagum Gini coefficient

总基尼系数为:

$$G = \left(\sum_{j=1}^k \sum_{h=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} \sum_{r=1}^{n_h} |E_{ji} - E_{hr}| \right) / 2n^2 \bar{E} \quad (1)$$

式中: G 为指标的总基尼系数; R_j 和 R_h 为 2 个不同子区域, 且 $j, h = 1, 2, 3, \dots, k$; C_i 和 C_r 为一个子区域内的 2 个不同的省; E_{ji} (E_{hr}) 为子区域 R_j (R_h) 的省 C_i (C_r) 的指标值; \bar{E} 为平均指标值; k 为子区域个数;

n 为省的个数; n_j (n_h) 为 R_j (R_h) 中省的数量。

子区域 R_j 内、 R_j 和 R_h 之间的基尼系数可以分别表示为 G_{jj} 和 G_{jh} :

$$G_{jj} = \left(\frac{1}{2\bar{E}_j} \sum_{i=1}^{n_j} \sum_{r=1}^{n_j} |E_{ji} - E_{jr}| \right) / n_j^2 \quad (2)$$

$$G_{jh} = \left(\sum_{i=1}^{n_j} \sum_{r=1}^{n_h} |E_{ji} - E_{hr}| \right) / n_j n_h (\bar{E}_j + \bar{E}_h) \quad (3)$$

G 被分解为 3 部分, 即子区域内差异 (G_R), 子区域间差异 (G_B) 和超变密度 (G_H)。超变密度反映了不同省之间的互动对整体差异的影响, 三者之间的关系如下:

$$G = G_R + G_B + G_H \quad (4)$$

$$G_R = \sum_{j=1}^k G_{jj} P_j S_j \quad (5)$$

$$G_B = \sum_{j=2}^k \sum_{h=1}^{j-1} G_{jh} (P_j S_h + P_h S_j) D_{jh} \quad (6)$$

$$G_H = \sum_{j=2}^k \sum_{h=1}^{j-1} G_{jh} (P_j S_h + P_h S_j) (1 - D_{jh}) \quad (7)$$

式中： $P_j = n_j/n$ 为区域 R_j 中省的个数在珠江流域片地区的总省数中的占比； $S_j = n_j \bar{E}_j / n \bar{E}$ ， $j = 1, 2, \dots, k$ ； D_{jh} 为 R_j 和 R_h 之间的相对影响，见式(8)—(10)：

$$D_{jh} = (d_{jh} - p_{jh}) / (d_{jh} + p_{jh}) \quad (8)$$

$$d_{jh} = \int_0^{\infty} dF_j(y) \int_0^y (y-x) dF_h(x) \quad (9)$$

$$p_{jh} = \int_0^{\infty} dF_h(y) \int_0^y (y-x) dF_j(x) \quad (10)$$

式中： d_{jh} 为子区域 R_j 和子区域 R_h 间的差异； p_{jh} 为 j 区域和 h 区域的超变一阶矩，可以解释为 j 区域和 h 区域中所有 $y_{hr} - y_{ji} > 0$ 的样本值总和的数学期望。

2.3 障碍因子诊断模型

障碍因子诊断模型是一种用于识别和量化影响决策目标实现的主要障碍因素的分析工具^[18]。通过计算各指标的全局权重，并结合原始数据的标准化处理，来识别和量化各指标对总目标的贡献和障碍程度。水资源空间均衡受到自然、社会、经济等诸多因素的影响，障碍度分析方法能够综合考虑这些因素，从而全面评估水资源空间均衡的状况及影响因素的作用程度^[19-20]。具体计算过程见下文。

计算第 i 个区域第 j 个指标的因子贡献度 F_{ij} ，见式(11)：

$$F_{ij} = R_{ij} \times w_j^* \quad (11)$$

式中： R_{ij} 为将第 i 个区域第 j 个指标原始数据经标准化处理后的值； w_j^* 为第 j 个指标通过层次分析法得到的权重。

计算第 j 个指标的障碍度 O_j ，见式(12)：

$$O_j = \frac{\sum_{i=1}^m F_{ij} \times I_j}{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m F_{ij} \times I_j} \times 100\% \quad (12)$$

式中： O_j 值越大，意味着“障碍”越大，即影响程度越大； I_j 为与第 j 个指标相关的某种系数或参数，一般反映该指标达到理想状态的程度等情况； m 为研究区域的总数； n 为指标的总数。

3 结果与分析

3.1 权重确定

对所考虑的诸多指标，用成对比较法和1—9比较尺度构成对比比较矩阵^[21-23]，见表2。例如：“水资源子系统”包含水资源总量、人均水资源量、地表水资源量、地下水资源量和降水量5个指标，将这些因素两两进行比较，因为他们之间的重要性不同。因此，根据表2来确定相对重要性，评分定理关系见表3。

表2 1—9比较尺度的含义

Tab. 2 Meaning of 1—9 comparison scales

尺度 a_{ij}	含义
1	a 指标与 b 指标重要性相同
3	a 指标与 b 指标相比略重要
5	a 指标与 b 指标相比重要
7	a 指标与 b 指标相比重要得多
9	a 指标与 b 指标相比极其重要
2,4,6,8	a 指标与 b 指标相比在上述2个相邻等级之间

表3 指标体系判断矩阵及一致性检验

Tab. 3 Judgment matrix of index system and consistency test

	水资源系统	水资源总量	人均水资源量	地表水资源量	地下水资源量	降水量	权重	一致性比例
水资源总量	1	3	2	2	3	0.357	$\lambda_{\max} = 5.19$	
人均水资源量	1/3	1	1/2	1/2	3	0.132	CI = 0.048 1	
地表水资源量	1/2	2	1	2	3	0.250	RI = 1.12	
地下水资源量	1/2	2	1/2	1	3	0.190	CR = 0.042 9 < 0.1	
降水量	1/3	1/3	1/3	1/3	1	0.072		

3.1.1 矩阵计算及权重确定

将矩阵中的元素按行相乘并开 n 次方得：

$A = [2.08 \ 0.75 \ 1.43 \ 1.09 \ 0.42]^T$ ，将 A 归一化得权重 $W = [0.36 \ 0.13 \ 0.25 \ 0.19 \ 0.07]^T$ 。

3.1.2 一致性检验。

计算一致性指标 CI,其中 λ_{max} 为矩阵最大特征值,见式(13):

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (13)$$

查找对应的平均随机一致性指标 RI,见表 4。

表 4 一致性指标 RI

Tab. 4 Consistency index RI

n=1	n=2	n=3	n=4	n=5	n=6	n=7	n=8	n=9	n=10	n=11
0	0	0.58	0.89	1.12	1.26	1.36	1.41	1.46	1.49	1.52

计算一致性比例 CR。若一致性比例 $CR < 0.1$,则说明判断矩阵通过一致性检验,反之则没有通过,需要调节判断矩阵再次进行计算。

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (14)$$

经一致性检验,权重向量 W 是合理的。进一步,得到指标体系的权重集见表 5。

3.2 水资源空间均衡基尼系数计算结果

依据各指标权重,借助 Dagum 基尼系数分解方法,将珠江流域总体基尼系数拆解为区域内、区域间、超变密度基尼系数及对应贡献率,以反映流域内子区域间水资源空间均衡的差异及来源,见表 6—8。

由表 6 可知,2017—2022 年总体基尼系数和区域间基尼系数处于波动下降状态,但区域间基尼系数波动幅度较小,其值高于区域内和超变密度的基尼系数,表明区域间基尼系数是导致水资源空间分布不均衡的主要原因。珠江流域片水资源基本处于临界均衡状态,主要影响来自区域间,多年平均贡献率高达 52.77%,其次是超变密度的贡献率为 26.87%,区域内贡献率为 20.36%。这表明珠江流域片不同区域之间水资源分布存在不平衡,区域内的水资源开发利用和调配相对协调,但局部范围内水资源分布也存在一定的不均衡性。

从表 7 可以看出,珠江流域片各子区域之间的差异主要集中在子区域 1 与其他子区域之间。其中子区域 1 因高原山地地形导致地表水渗漏严重,水

表 5 水资源空间均衡指标体系

Tab. 5 Index system for spatial equilibrium of water

resources		
准则层	指标层	总权重
水资源子系统 (0.55)	水资源总量	0.36
	人均水资源量	0.13
	地表水资源量	0.25
	地下水资源量	0.19
	降水量	0.07
	城市人口密度	0.42
	恩格尔系数	0.27
社会子系统 (0.26)	建成区绿化覆盖率	0.17
	居民人均可支配收入	0.14
	城镇登记失业率	0.43
	人均地区生产总值	0.28
经济子系统 (0.11)	第一产业增加值	0.09
	第二产业增加值	0.13
	第三产业增加值	0.07
生态子系统 (0.08)	城市污水日处理能力	0.39
	生活垃圾无害化处理率	0.39
	人均公园绿地面积	0.15
	生态用水总量	0.07

表 6 Dagum 基尼系数及贡献率

Tab. 6 Dagum Gini coefficients and contribution rates

年份	基尼系数				贡献率/%		
	总体	区域内	区域间	超变密度	区域内	区域间	超变密度
2017	0.350	0.072	0.181	0.097	21.21	43.84	34.95
2018	0.313	0.061	0.186	0.067	19.14	57.90	22.97
2019	0.275	0.057	0.148	0.070	20.67	50.90	28.43
2020	0.316	0.064	0.190	0.062	19.99	59.94	20.07
2021	0.263	0.053	0.157	0.053	19.59	61.89	18.52
2022	0.246	0.053	0.112	0.081	21.57	42.13	36.30

资源开发利用不足 40%。相比之下,其他地区,如子区域 2 的平原和丘陵地带、子区域 3 的平原与低山丘陵地带,以及子区域 4 福建的沿海平原与山

地相间的地形,相对更有利于水资源的汇集和调配。子区域4水利工程设施较为完善,能够有效调节和分配水资源,从而提高水资源的利用效率。然而,子区域1水利工程设施相对薄弱,水资源调配能力有限,这使得水资源在区域间的分配存在不均衡现象。

表7 区域间差距

Tab. 7 Inter-regional difference

年份	子区域 4&3	子区域 4&2	子区域 4&1	子区域 3&2	子区域 3&1	子区域 2&1
2017	0.245	0.382	0.452	0.364	0.397	0.496
2018	0.252	0.383	0.479	0.316	0.328	0.389
2019	0.222	0.316	0.258	0.294	0.263	0.366
2020	0.430	0.509	0.500	0.344	0.192	0.367
2021	0.310	0.303	0.376	0.303	0.181	0.320
2022	0.166	0.310	0.286	0.267	0.212	0.307

表8中,区域内差异主要源自子区域2,广东经济较为发达,城市化水平高,工业和生活用水需求大。而广西和海南相对广东部分地区经济发展水平较低。经济发达地区对水资源的开发利用程度高,水资源短缺问题可能更为突出,而经济欠发达地区可能存在水资源开发利用不足和浪费现象并存的情况。广东有珠江等大型河流,广西有西江等重要水系,海南则河流短小。河流分布的不均衡导致不同地区水资源调配和利用的差异,这也是造成区域内水资源空间不均衡的原因之一。

表8 区域内差距

Tab. 8 Intra-regional difference

年份	子区域4	子区域3	子区域2	子区域1
2017	0	0.045	0.394	0.281
2018	0	0.050	0.293	0.175
2019	0	0.044	0.334	0.090
2020	0	0.050	0.404	0.088
2021	0	0.060	0.287	0.094
2022	0	0.045	0.271	0.139

3.3 障碍因子诊断分析

2017—2022年,珠江流域片8省(自治区)准则层6年平均的障碍度见图3。图3表明珠江流域片各省在水资源空间均衡方面的障碍因子分布存在较大差异。云南和广西的社会子系统是最主要的障碍因子,而在福建等地区,水资源子系统则成为障碍度最高的领域。这表明在这些地区,水资源的合理利用和管理是实现水资源空间均衡的关键。

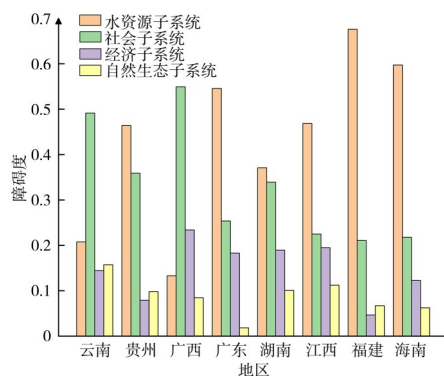


图3 准则层障碍度

Fig. 3 Obstacle degree of criterion layer

图4展示了8个省(自治区)的具体障碍因素,珠江流域片不同省份在水资源空间均衡程度上的主要制约因素存在显著差异,这些信息为制定并提升该区域水资源空间均衡的有效对策提供了重要依据。以云南和福建为例进行分析。

影响云南地区水资源空间均衡的前三大因素分别是城市人口密度、恩格尔系数和建成区绿化覆盖率。城市人口密度高使得大量人口集中区域的生活用水需求激增,老旧供水设施难以满足快速增长的需求,同时污水排放量也随之大幅增加,若污水处理能力跟不上,会导致水资源污染,影响可利用量;较高的恩格尔系数反映出居民在食品等基础生活资料支出占比较大,在农业领域农户难以采用滴灌、喷灌等高效节水技术,家庭日常水资源浪费现象普遍,且居民对水资源保护的意识和行动滞后;城镇登记失业率高则表明部分地区经济活力不足,企业生产经营困难使工业用水需求减少,同时政府在水资源基础设施建设、节水技术研发推广等

方面投入降低,这些因素相互交织,从而严重影响云南地区水资源的有效利用和空间均衡。针对这些问题,云南可通过优化城市规划布局、加强水资源管理、发展特色产业提高居民收入、推广节水技术和器具、促进产业发展创造就业岗位以及开展水资源领域就业培训等措施,逐步改善水资源空间均衡状况。

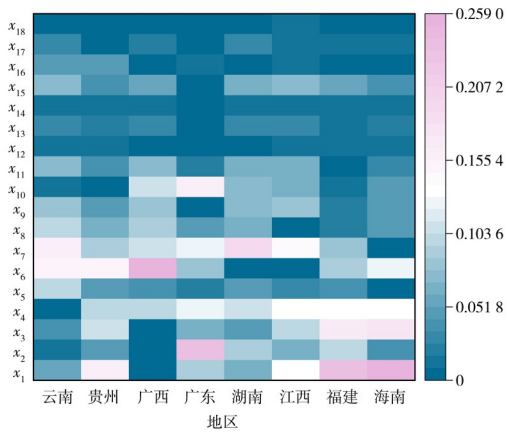


图4 指标层障碍度

Fig. 4 Obstacle degree of index layer

福建地区障碍度排名前三的因素分别为水资源总量、地表水资源量和地下水资源量。福建地区虽降水丰富,但受地形和气候影响,水资源时空分布极不均衡,闽西北山区降雨多但利用率低,闽南沿海人口经济集中却因河流短小而供需矛盾突出,岛屿众多也加剧了区域水资源调配难度。其地质以红壤、花岗岩为主,地下水储量有限,山区裂隙水零散,沿海平原易受海水入侵导致水质咸化,部分地区过度开采引发地面沉降,形成恶性循环。同时,福建河流具有“短、急、独”特征,调蓄能力弱,暴雨期易涝、枯水期易涸,现有水库供水功能弱,跨区域调水工程尚不完善。因此,福建可通过构建跨区域水网、推广海水淡化缓解总量不均,划定地下水禁采区、开发替代水源保护地下水资源,优化水库功能、强化生态流量管理提升地表水资源调控能力,以实现水资源空间均衡。

4 结论与建议

本研究深入分析珠江流域片水资源空间均衡

的差异特征,主要结论如下。

a)从时间维度来看,2017—2022年期间,基尼系数的波动变化揭示了水资源空间均衡的动态演进趋势。部分年份基尼系数偏高,反映出水资源分布不均衡问题较为突出;而在另一些年份,基尼系数有所下降,表明水资源空间均衡状况有所改善。这种动态变化体现出气候变化、经济发展节奏以及政策导向等多重因素的综合影响。在经济快速发展、城市化进程加快的阶段,用水需求的增加导致水资源分布失衡加剧;而随着节水政策的强力推行、水利工程的优化布局与高效运行,水资源空间均衡性逐步趋于稳定并有所改善。

b)从空间维度来看,产业布局、人口发展、水资源调配工程与水资源承载力的适配程度,是影响珠江流域片水资源空间均衡的核心因素。在产业布局方面,广东作为经济强省,第二产业增加值占比39%,电子、化工等高耗水产业集中,工业用水量占全省25%,远超广西、海南等地区;而广西农业用水占比高达65%,但灌溉水有效利用系数仅0.52,产业结构差异导致区域用水需求与效率显著失衡。人口发展层面,区域间人口分布极不均衡,广东常住人口达1.27亿,占流域总人口超70%,但人均水资源量不足1500 m³,而云南人口约4690万,人均水资源量超5000 m³,高密度人口区域面临巨大供水压力。水资源调配工程与承载力适配方面,子区域1受高原、山地地形影响,地表水大量渗漏,水利基础设施薄弱,水资源开发利用不足40%;相比之下,子区域4的水利工程完备,工程建设与区域水资源承载力的不匹配,加剧了流域内水资源分布失衡。

c)障碍因子分析表明,珠江流域片各省障碍因子分布呈现显著区域差异。云南受城市人口密度、恩格尔系数和建成区绿化覆盖率制约,高密度人口加大用水与排污压力,低居民收入限制节水投入,绿化不足削弱水源涵养能力;福建则因水资源总量、地表及地下水资源量受限,地形气候致时空分布不均,地表水难调蓄,地下水易受海水入侵。因此,云南需优化布局、发展经济与推进生态修复,福

建需建设跨区域调水工程、推广海水淡化、保护地下水并优化水库功能,其他区域应根据自身省份的特点实施不同的措施,共同推动流域水资源均衡化、可持续发展。

参考文献:

- [1] 杨红龙,王炳坤,杜尧东,等. RCPs 情景下珠江流域气候变化预估分析[J]. 热带气象学报,2014,30(3):503-510.
YANG H L, WANG B K, DU Y D, et al. Projected change in climate in the Pearl River Basin under the RCPs scenarios [J]. Journal of Tropical Meteorology, 2014, 30(3): 503-510. (in Chinese)
- [2] 李晓丽,杨涛. 珠江流域2015~2100年降水及气温的时空变化预测[J]. 水电能源科学,2015,33(11):5-9.
LI X L, YANG T. Spatio-temporal changes prediction of precipitation and temperature in Pearl River Basin from 2015 to 2100 [J]. Water Resources and Power, 2015, 33(11): 5-9. (in Chinese)
- [3] 周雪欣,罗昊. 珠江流域水资源承载力评价及风险识别[J]. 人民珠江,2023,44(2):28-36,69.
ZHOU X X, LUO H. Assessment and risk identification of water resources carrying capacity in the Pearl River Basin [J]. Pearl River, 2023, 44(2): 28-36, 69. (in Chinese)
- [4] 夏帆,陈莹,窦明,等. 水资源空间均衡系数计算方法及其应用[J]. 水资源保护,2020,36(1):52-57.
XIA F, CHEN Y, DOU M, et al. Calculation method and application of spatial equilibrium coefficient of water resources [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(1): 52-57. (in Chinese)
- [5] 张礼兵,胡亚南,金菊良,等. 基于系统动力学的巢湖流域水资源承载力动态预测与调控[J]. 湖泊科学,2021,33(1):242-254.
ZHANG L B, HU Y N, JIN J L, et al. Dynamic prediction of water resources carrying capacity of Chaohu Basin and system optimization regulation based on system dynamics simulation [J]. Journal of Lake Sciences, 2021, 33(1): 242-254. (in Chinese)
- [6] 姜良勇,李继清,陈思雨. 珠江流域水资源调度大数据指标体系构建[J]. 人民珠江,2020,41(5):108-115.
JIANG L Y, LI J Q, CHEN S Y. Establishment of big data index system of water resources scheduling in Pearl River Basin [J]. Pearl River, 2020, 41(5): 108-115. (in Chinese)
- [7] 王静,袁昕怡,陈晔,等. 面向可持续城市生态系统管理的资源环境承载力评价方法与实践应用:以烟台市为例[J]. 自然资源学报,2020,35(10):2371-2384.
WANG J, YUAN X Y, CHEN Y, et al. Evaluation method and application for resources-environment carrying capacity towards sustainable urban ecosystem management: a case study of Yantai city [J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35(10): 2371-2384. (in Chinese)
- [8] 岳立,雷燕燕. 黄河流域绿色水资源效率空间关联网络构建及其演化因素[J]. 西北师大学报(社会科学版),2022,59(2):62-74.
YUE L, LEI Y Y. Construction of spatially linked network of green water resources efficiency in the Yellow River Basin and its evolutionary factors [J]. Journal of Northwest Normal University (Social Sciences), 2022, 59(2): 62-74. (in Chinese)
- [9] 王宝恩. 强化跨省河流水资源统一调度扎实推动新阶段珠江水利高质量发展[J]. 水利发展研究,2024,24(1):46-50.
WANG B E. Strengthening unified regulation of cross-provincial river water resources and promoting high-quality development of Pearl River water conservancy in the new era [J]. Water Resources Development Research, 2024, 24(1): 46-50. (in Chinese)
- [10] 曾惠,鄢春华,黄婉彬,等. 城市化水平与水资源利用效率的关系研究:以珠江三角洲城市群为例[J]. 北京大学学报(自然科学版),2020,56(03):561-570.
ZENG H, YAN C H, HUANG W B, et al. A case study on the relationship between urbanization level and water use efficiency in the Pearl River Delta urban agglomeration [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2020, 56(3): 561-570. (in Chinese)
- [11] 凌霄,徐志标. 珠江三角洲城市群水资源区域一体化研究[J]. 给水排水,2016,52(10):21-25.
LING X, XU Z B. Study on regional water resources integration in urban agglomeration in Pearl River Delta [J]. Water & Wastewater Engineering, 2016, 52(10): 21-25. (in Chinese)
- [12] 禹熙,李晓英,吴少霖. 基于组合赋权-云模型的珠江三角洲水资源可持续性动态评价[J]. 水资源与水工程学报,2023,34(1):75-83.
YU X, LI X Y, WU S L. Dynamic evaluation of water resources sustainability in the Pearl River Delta based on the combined weight-cloud model [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2023, 34(1): 75-83. (in Chinese)
- [13] 黎开志,戴力群,刘喜燕. 珠江流域综合规划(2012—2030年)[R].
LI K Z, DAI L Q, LIU X Y. Comprehensive plan for the Pearl River Basin (2012-2030) [R]. (in Chinese)

- [14] BIAN D H, YANG X H, LU Y, et al. Analysis of the spatiotemporal patterns and decoupling effects of China's water resource spatial equilibrium [J]. *Environmental Research*, 2023, 216. DOI: 10.1016/j.envres.2022.114719.
- [15] BIAN D H, YANG X H, XIANG W Q, et al. A new model to evaluate water resource spatial equilibrium based on the game theory coupling weight method and the coupling coordination degree [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 366. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.132907.
- [16] BIAN D H, YANG X H, WU F, et al. A three-stage hybrid model investigating regional evaluation, pattern analysis and obstruction factor analysis for water resource spatial equilibrium in China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 331. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.129940.
- [17] ZHAO Z Y, CAI Y H, YANG Y F. Construction and application of a water resources spatial equilibrium model: a case study in the Yangtze River Economic Belt [J]. *Water*, 2023, 15(16). DOI: 10.3390/w15162984.
- [18] 马继敏,脱云飞,王倩,等. 基于GRA-TOPSIS法云南省水资源承载力评价及障碍因子诊断[J]. *水资源与水工程学报*, 2022, 33(2):11-17, 26.
- MA J M, TUO Y F, WANG Q, et al. Evaluation of water resources carrying capacity in Yunnan Province based on GRA-TOPSIS and diagnosis of its obstacle factors [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2022, 33(2): 11-17, 26. (in Chinese)
- [19] 左其亭,张志卓,吴滨滨. 基于组合权重TOPSIS模型的黄河流域九省区水资源承载力评价[J]. *水资源保护*, 2020, 36(2): 1-7.
- ZUO Q T, ZHANG Z Z, WU B B. Evaluation of water resources carrying capacity of nine provinces in Yellow River Basin based on combined weights TOPSIS model [J]. *Water Resources Protection*, 2020, 36(2): 1-7. (in Chinese)
- [20] 傅春,李雅蓉. 江西省水资源承载力评价及障碍因子诊断[J]. *人民长江*, 2019, 50(8):109-114.
- FU C, LI Y R. Evaluation of water resources carrying capacity and diagnosis of obstacle factors in Jiangxi Province [J]. *Yangtze River*, 2019, 50(8): 109-114. (in Chinese)
- [21] 陈灏,张义敏,张晓琳,等. 基于层次分析法的长时间尺度水资源综合评估[J]. *人民珠江*, 2021, 42(11):53-59.
- CHEN H, ZHANG Y M, ZHANG X L, et al. Comprehensive evaluation of water resources on a long time scale based on analytic hierarchy process [J]. *Pearl River*, 2021, 42(11): 53-59. (in Chinese)
- [22] 张修宇,曹彦坤,包添豪,等. 基于组合权重TOPSIS模型的河南省引黄受水区水资源承载力研究[J]. *人民黄河*, 2023, 45(7):73-78.
- ZHANG X Y, CAO Y K, BAO T H, et al. Assessment of water resources carrying capacity of the Yellow River diversion area in Henan Province based on TOPSIS model with combined weights [J]. *Yellow River*, 2023, 45(7): 73-78. (in Chinese)
- [23] 王海亮,张记飞,雷华友,等. 基于AHP-集对分析法的河南煤炭采空区地下水资源利用评价[J]. *人民黄河*, 2024, 46(10): 72-77, 89.
- WANG H L, ZHANG J F, LEI H Y, et al. Evaluation of groundwater resources utilization coal goaf area in Henan Province based on analytic hierarchy process and set pair analysis [J]. *Yellow River*, 2024, 46(10): 72-77, 89. (in Chinese)

Analysis of Spatial Equilibrium and Obstacle Factors of Water Resources in the Pearl River Basin

YANG Yafeng¹, LI Xinrui¹, ZHANG Wenbao¹, WANG Shaohua¹, WANG Hongrui^{2*}

(1. College of Science, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, China; 2. College of Water Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: The optimal allocation and equilibrium development of water resources in the Pearl River Basin is key to regional sustainable development, maintaining ecological stability and promoting coordinated socioeconomic progress. Global climate change has led to more frequent extreme hydrological events, coupled with rapid urbanization and ongoing industrial restructuring within the basin. Against this backdrop, the contradiction between water supply and demand has become increasingly prominent. This makes the scientific assessment of the spatial equilibrium of water resources an urgent and necessary task. This study constructed a spatial equilibrium evaluation system of water resources covering four dimensions: water resources, society, economy, and ecology. The water resources subsystem includes core indicators such as per capita water resources and utilization rate, which reflect the basic endowment

and development potential of water resources. The society subsystem covers population density and water supply guarantee rate, aiming to embody the level of social demand for water and the security of supply. The economy subsystem incorporates agricultural irrigation water efficiency and industrial water reuse rate, which measures the efficiency of water use in economic activities. The ecology subsystem involves the water quality compliance rate of key water bodies and the wetland retention rate, reflecting the supporting capacity of water resources for the ecosystem. The basin was divided into four regions, including subregion1、2、3、4, based on geographical features, hydrological systems, and administrative divisions, ensuring that each region's unique characteristics were accurately captured. The study adopted the Dagum Gini coefficient, which decomposed overall differences into intra-regional, inter-regional, and trans-variation components, and the obstacle degree model, which quantified the hindrance of each factor to equilibrium, so as to analyze spatial equilibrium and its obstacle factors. Results from 2017 to 2022 show that inter-regional differences have dominated the spatial equilibrium gaps, with an average contribution rate of 52.77%. Specifically, subregion 1's plateau and mountain terrain cause severe surface water seepage, keeping its water utilization rate below 40%. In contrast, subregion 4, with its complete water conservancy projects including reservoirs and diversion systems, highlighting the need for coordinated allocation measures like cross-basin water transfers. Dynamically, the basin remains in a critical equilibrium state during this period, with the Gini coefficient fluctuating between 0.246 and 0.350, indicating certain instability. Obstacle analysis identifies the water resources subsystem (due to uneven distribution and low efficiency) and the society subsystem (owing to mismatched population and water endowment) as the main barriers, which need targeted solutions to promote balanced water resources development in the basin.

Keywords: spatial equilibrium of water resources; Dagum Gini coefficient; obstacle factor diagnosis; Pearl River Basin region

(责任编辑:李泽华)