

熊艳,陈燕珊,邱颂曦等.基于热度指数的广州市节水产业空间分异研究[J].人民珠江,DOI:10.3969/j.issn.1001-9235.XXXX.XX.001.

基于热度指数的广州市节水产业空间分异研究

熊艳¹,陈燕珊^{2,3*},邱颂曦^{2,3},刘桢敏¹,何家祥¹,王雨欣¹

(1.广州市南部水网流域事务中心,广东 广州 510635;2.广东省水利水电科学研究院水资源与水生态环境工程研究所,广东 广州 510635;3.广东省节水技术创新中心,广东 广州 510635)

摘要:聚焦广义节水产业,以广州市11个行政区为单元,紧扣“需求-供给-成效”全链条逻辑,构建涵盖需求基础、产业活力、节水成效的节水产业发展热度指数体系,采用熵值法、Spearman秩相关和Moran's I等方法开展量化分析并划分差异化功能区。结果表明,2024年广州市节水产业空间非均衡性显著,总体呈现“东南产业高低凸显、北部涉农区托底、老城需求旺盛但产业薄弱”的分异格局;综合热度指数(含农业)呈显著正向空间集聚(Moran's I为0.570, $p=0.015$),农业节水是驱动空间分异格局中最具区分度的维度;各维度指数耦合协同偏弱,需求基础指数与节水成效指数(含农业)呈显著负相关($r=-0.727$, $p=0.011$),Bootstrap检验确认稳健。据此将11区划分为均衡发展区、转型提升区、农业节水产业培育区、发展滞后区4类功能区,并提出分区发展对策。

关键词:节水产业;热度发展指数;空间分异;熵值法;广州市

中图分类号: 文献标识码:A 文章编号:1001-9235(XXXX)XX-0001-11

全球气候变暖与城市化背景下,水资源成为战略性稀缺资源。广州市2024年降水量为2 409.6 mm,人均水资源量仅315.7 m³,低于全国平均水平(421 m³),对外调水依赖程度高,季节性缺水和咸潮问题并存,传统粗放用水方式难以为继。2023年以来,国家层面政策接连出台,2024年6月国家发展改革委等五部委印发《关于加快发展节水产业的指导意见》,明确建立产学研用深度融合的节水产业发展格局。发展节水产业是解决水资源约束、培育绿色新增长点的直接路径。学界普遍将节水产业划分为狭义(节水产业化)与广义(产业节水化)两类^[1-5]。现有研究多聚焦理论、政策与实践^[6-15],其中有关节水产业评价的研究多采用层次分析法(AHP)或综合指数法等确定性评价框架,权重设定依赖经验^[16-18],产业集聚理论^[19-20]、GIS空间可视化技术^[21]已被较好地用于产业布局研究。然而,针对

城市尺度节水产业空间格局的系统测度及其多维耦合关系实证分析尚不充分。鉴于此,本文以广州市11个行政区为研究单元,借鉴产业研究中“热度指数”的编制思路^[22-23],聚焦广义节水产业,紧扣节水产业“需求-供给-成效”全链条逻辑,构建节水产业发展热度指数,采用熵值法测算各区节水产业发展水平并识别空间分异格局,运用Spearman秩相关与Moran's I解析各维度间关系,同时借助蒙特卡洛扰动与Bootstrap重采样法对指数结果的敏感性和稳健性进行统计检验,以期为超大城市节水产业空间格局认知与功能区分类施策提供参考。

1 研究方法和数据来源

通过热度指数构建与测算、维度特征分析、敏感性与稳健性分析3个步骤,系统刻画广州市节水产业的空间分异特征。

基金项目:2025年广东省水资源节约与保护专项资金项目(粤财农[2025]29号)

收稿日期:2026-08-20 **修回日期:**2026-09-20

作者简介:熊艳(1985—),女,高级工程师,主要从事水利水电工程研究。

通信作者:陈燕珊(1995—),女,硕士,主要从事水文与水资源研究。

联系作者:致信rmzj@pearlwater.gov.cn,由期刊转接。

1.1 节水产业发展热度指数构建与测算

a)指数构建。遵循科学性、系统性及数据可获得性原则,聚焦广义节水产业,选取需求基础、节水产业活力和节水成效3个维度共14项指标构建节水产业发展热度指数(表1)。其中,需求基础维度

包括人均GDP等3项指标,反映节水产业的潜在市场空间;产业活力维度包括节水产业相关企业数量等4项指标,反映节水产业发展状态;节水成效维度包括人均综合用水量等7项指标,反映产业供给对节水目标的贡献程度。

表1 广州市节水产业发展热度指数评价体系

Tab. 1 Evaluation system for the development heat index of Guangzhou's water-saving industry

序号	一级指标	二级指标	单位	属性	数据来源
1	需求基础	人均GDP	万元	正	《广州市统计年鉴(2025)》
2		城镇化率	%	正	
3		第二产业比重	%	正	
4		节水产业相关企业数量	个	正	
5	产业活力	节水产业产值	万元	正	《广州市节水产业研究》项目成果
6		节水产业营收	万元	正	
7		R&D经费支出	万元	正	
8		人均综合用水量	m ³	负	
9	节水成效	万元GDP用水量	m ³	负	《广州市水资源公报(2025)》
10		万元工业增加值用水量	m ³	负	
11		城镇供水管网漏损率	%	负	
12		再生水利用率	%	正	
13		农田灌溉水有效利用系数	/	正	
14		农业水价综合改革实施面积占比	%	正	

注:(1)本文采用广义节水产业界定。(2)《广州市节水产业研究》项目数据说明:①节水产业相关企业筛选标准:基于广州市统计局、市场监督管理局等部门提供的企业名录,按照GB/T 4754—2017《国民经济行业分类》及《用水节水统计调查制度》,对企业主营业务进行逐一筛查。凡企业制造的产品或提供的服务涉及以下任一领域,即纳入统计范围:农业节水、工业节水、城镇生活节水、非常规水开发利用、水污染治理、通用节水。②节水产业产值/营收:在广州市统计局提供的基础数据之上,结合实地调研等方式进行核实与补充,统计各企业2024年度生产的节水产品或提供的节水服务的总价值量。(3)正向指标指数值越大对节水产业发展越有利,负向指标反之。

b)指数测算。采用熵值法赋权以规避主观偏差^[24-25],设有n个行政区,m项指标; x_{ij} 表示第i个行政区第j项指标的原始值。

标准化处理:

正向指标
$$X_{ij} = (x_{ij} - x_{jmin}) / (x_{jmax} - x_{jmin}), (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m) \tag{1}$$

负向指标
$$X_{ij} = (x_{jmax} - x_{ij}) / (x_{jmax} - x_{jmin}), (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m) \tag{2}$$

式中: X_{ij} 为标准化值; x_{jmax} 、 x_{jmin} 分别是第j项指标的最大值和最小值。

权重计算:

$$P_{ij} = X_{ij} / \sum_{i=1}^n X_{ij}, (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m) \tag{3}$$

$$e_j = -(1/\ln n) \sum_{i=1}^n (P_{ij} \ln P_{ij}), (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m) \tag{4}$$

$$d_j = 1 - e_j, (j = 1, 2, \dots, m) \tag{5}$$

$$W_j = d_j / \sum_{j=1}^m d_j, (j = 1, 2, \dots, m) \quad (6)$$

式中: P_{ij} 为第 j 项指标比重; e_j 为熵值; d_j 为差异系数; W_j 为指标权重。

热度指数计算:

$$y_{ij} = W_j \times X_{ij}, (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m) \quad (7)$$

$$s_{ik} = \sum_{j \in \Omega_k} y_{ij}, (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m) \quad (8)$$

$$S_i = \sum_{k=1}^3 s_{ik}, (i = 1, 2, \dots, n) \quad (9)$$

$$F_i = (S_i - S_{\min}) / (S_{\max} - S_{\min}) \times 100, (i = 1, 2, \dots, n) \quad (10)$$

式中: y_{ij} 为单项指标热度指数; s_{ik} 为第 i 区第 k 个维度热度指数; S_i 为第 i 区综合热度指数; F_i 为第 i 区百分制综合热度指数; Ω_1 、 Ω_2 、 Ω_3 分别为需求基础、产业活力、节水成效维度。

1.2 节水产业维度特征分析

a) Spearman 秩相关分析。采用 Spearman 秩相关系数分析维度关系, 规避量纲差异与极端值干扰^[26]。

$$r = \frac{\sum (R_{i,k} - \bar{R}_k)(R_{i,k'} - \bar{R}_{k'})}{\sqrt{\sum (R_{i,k} - \bar{R}_k)^2 \sum (R_{i,k'} - \bar{R}_{k'})^2}}, (i = 1, 2, \dots, n) \quad (11)$$

式中: r 为 Spearman 秩相关系数; $R_{i,k}$ 、 $R_{i,k'}$ 分别为第 i 区在维度 k 和维度 k' 的排位(排名值越小表示位次越靠前)。 $r \in [-1, 1]$, 正值表示正相关, 负值表示负相关。当样本量为 11 时, $p = 0.05$ 临界阈值 $|r| = 0.618$, $p = 0.01$ 临界阈值 $|r| = 0.755$ ^[27]。

b) Moran's I 空间自相关分析。采用 Moran's I 检验节水产业热度指数的空间集聚特征。

$$I = (n/S_0) \left(\left(\sum_{p=1}^n \sum_{q=1}^n w_{pq} (F_p - \bar{F})(F_q - \bar{F}) \right) / \left(\sum_{p=1}^n (F_p - \bar{F})^2 \right) \right) \quad (12)$$

$$Z_I = (I - E(I)) / \sqrt{Var(I)} \quad (13)$$

式中, n 为行政区个数, F_p 和 F_q 分别为第 p 区和第 q 区的综合热度指数, $\bar{F}$ 为所有区综合热度指数的均值, w_{pq} 为空间权重矩阵元素, S_0 为所有空间权重的

总和, $E(I)$ 为 Moran's I 的期望值, $Var(I)$ 为其方差。

基于 Queen 邻接规则构建空间权重矩阵, 通过 Z 得分判断显著性, 在显著性水平 $\alpha = 0.05$ 下, 若 $|Z_I| > 1.96$, 则认为存在显著的空间自相关。

1.3 敏感性与稳健性分析

a) 敏感性分析。为进一步分析指标权重变化对指数结果的影响, 采用蒙特卡洛扰动法进行敏感性分析^[28-32]。设模拟总次数为 B :

$$w_j^{(b)} = u_j^{(b)} W_j, (j = 1, 2, \dots, m; b = 1, 2, \dots, B) \quad (14)$$

$$\bar{R}_i = (1/B) \sum_{b=1}^B R_i^{(b)}, (i = 1, 2, \dots, n; b = 1, 2, \dots, B) \quad (15)$$

$$\sigma_i = \sqrt{(1/(B-1)) \sum_{b=1}^B (R_i^{(b)} - \bar{R}_i)^2} (i = 1, 2, \dots, n; b = 1, 2, \dots, B) \quad (16)$$

$$R_{i,\min} = \min R_i^{(b)}, R_{i,\max} = \max R_i^{(b)}, (i = 1, 2, \dots, n; b = 1, 2, \dots, B) \quad (17)$$

式中: $w_j^{(b)}$ 为扰动后权重; $u_j^{(b)}$ 为第 b 次模拟对每项权重独立生成的扰动因子(基准权重 $\pm 20\%$ 均匀扰动)。在上式基础上, 重复式(3)——(10), 计算得到第 i 区第 b 次模拟的综合热度指数 $F_i^{(b)}$, ($b = 1, 2, \dots, B$)、排位 $R_i^{(b)}$, ($b = 1, 2, \dots, B$), 并进一步计算均值 $\bar{R}_i$ 、标准差 σ_i 与极值 $R_{i,\min}$ 、 $R_{i,\max}$ 三项指标以度量稳健性。

b) 稳健性分析。针对小样本和极端值分布可能导致的指数结果不稳定问题, 采用 Bootstrap 重采样方法对指数结果进行检验。对 11 个行政区的样本数据进行有放回重采样, 每次抽取 n 个样本, 重复 C 次, 计算每次采样后各区的综合热度指数 $F_i^{(b)}$ 及排位。在此基础上, 计算每个区排位的百分位置信区间。对于第 i 个行政区, 将其 C 次重采样得到的排位序列从小到大排序, 取第 2.5 百分位数和第 97.5 百分位数作为 95% 置信区间的下限和上限:

$$Rank_i^{lower} = Q_{0.025} \left(\left\{ Rank_i^{(c)} \right\}_{c=1}^C \right) \quad (18)$$

$$Rank_i^{upper} = Q_{0.975} \left(\left\{ Rank_i^{(c)} \right\}_{c=1}^C \right) \quad (19)$$

式中: $Rank_i^{(c)}$ 为第 c 次重采样中第 i 区的排位; Q 为分

位数。

同时,采用 Bootstrap 方法对 Spearman 相关系数进行稳健性检验。对原始样本数据进行有放回重采样 C 次,每次计算需求基础与产业活力、节水成效(含农业)等关键变量对的 Spearman 秩相关系数 $r^{(b)}$,得到相关系数的百分位置信区间。

2 结果与分析

2.1 节水产业空间分异特征

2.1.1 空间分异格局描述

2024年广州市各区节水产业发展热度指数测算结果显示(图1),全市节水产业发展热度指数空间非均衡性显著,总体呈现“东南产业高地凸显、北

部涉农区托底、老城需求旺盛但产业薄弱”的分异格局。

分维度看,需求基础维度高值集中于东部与中心城区,黄埔区、越秀区、南沙区位居全市前三,形成东南部向中心城区辐射的高地;从化区因产业结构与城镇化水平限制,需求基础维度热度居全市末位。产业活力维度方面,空间集聚特征明显,东南部形成节水产业活力高地,黄埔区、天河区、番禺区构成第一梯队;从化区、荔湾区产业活力严重不足,空间上表现为西北部的明显低谷。节水成效维度方面,不考虑农业指标时,热度高值区呈多中心分布,番禺区位居全市首位,其次是花都区、海珠区,越秀区、荔湾区受老旧城区基础设施短板制约明显

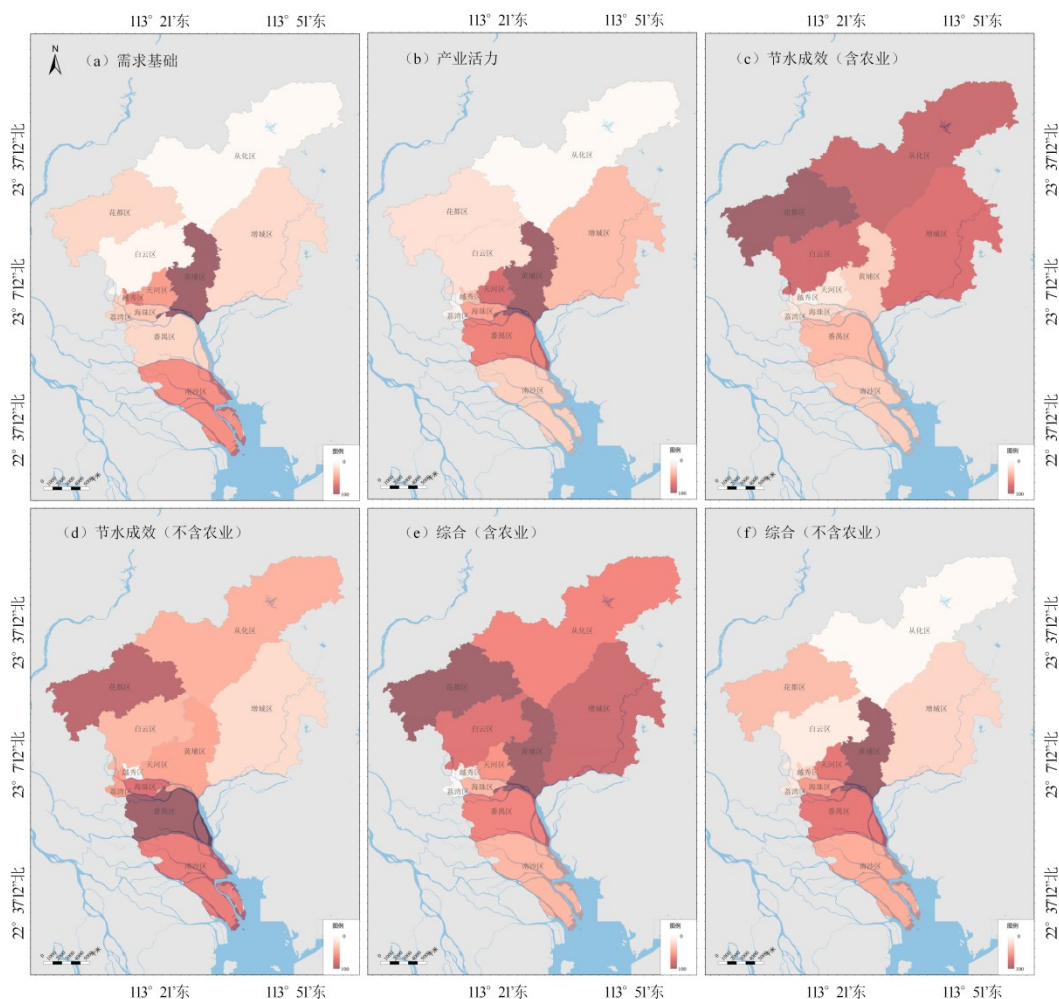


图1 2024年广州市节水产业发展热度指数空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of the development heat index of Guangzhou's water-saving industry in 2024

滞后;考虑农业指标后,热度高值区呈北部、东部涉农区集聚特征,花都区、从化区、白云区、增城区形成连片农业节水优势带,有力托底全市综合节水成效。

感性分析结果显示(图2),综合热度指数(含农

业)排位标准差均值为0.40,最大值为0.75;综合热度指数(不含农业)排位标准差均值为0.22,最大值为0.49,均远小于1个排位间隔,表明权重扰动对排名影响有限,上述空间分异格局具有较好的稳健性。

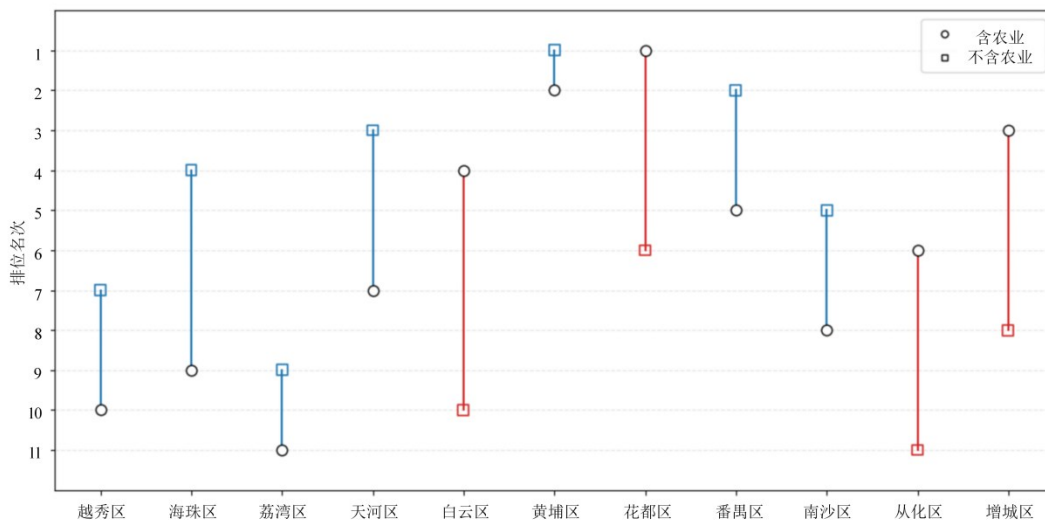


图2 节水产业发展综合指数排位敏感性分析

Fig. 2 Sensitivity analysis of comprehensive heat-index rankings

2.1.2 空间分异特征检验

全局 Moran's I 检验结果显示(表2),综合热度指数(含农业)的全局 Moran's I 为 0.570 ($Z = 3.028, p = 0.015$),在5%显著性水平上拒绝空间随机分布的原假设,表明广州市节水产业热度呈现显著的正向空间集聚特征。剔除农业指标后,综合热度指数(不含农业)的全局 Moran's I 降至 0.126 ($Z = 1.133, p = 0.619$),未通过显著性检验,空间集聚特征消失。上述对比表明,农业节水成效是驱动广州市节水产业热度空间集聚的主要维度。

表2 2024年广州市节水产业发展热度指数全局 Moran's I 检验结果

Tab. 2 Global Moran's I test results for the water-saving industry development heat index				
指标口径	<i>I</i>	<i>Z</i> 得分	<i>p</i> 值	结论
综合(含农业)	0.570	3.028	0.015	空间集聚显著
综合(不含农业)	0.126	1.133	0.619	空间分布随机

2.2 节水产业多维关系特征

2.2.1 维度间相关分析

Spearman 秩相关分析结果显示(表3),广州市节水产业三维指数间关联性偏弱,维度间存在结构性错配。具体而言,需求基础指数与产业活力指数呈中等正向关联趋势($r = 0.536, p = 0.089$),表明节水产业需求对产业孵化存在正向关联。需求基础指数与节水成效指数(含农业)呈显著负相关($r = -0.727, p = 0.011$),该结果可从统计口径与现实矛盾两层面对理解:统计口径层面,需求基础高值区(如越秀、黄埔)城镇化率高、农业用地极少,节水成效指数(含农业)天然趋近于零,而从化、增城等涉农区虽需求基础薄弱,却因农业节水指标贡献显著而成效指数靠前,形成统计上的“此消彼长”;在现实矛盾层面,涉农区农业节水多为公共效益,产业链短、附加值低,难以有效转化为产业活力,形成“高农业成效-低产业需求”的结构性错位。需求基础指数与节水成效指数(不含农业)、产业活力指数与

节水成效指数均关联较弱,表明节水产业需求高的地区并未同步实现更高的工业、生活节水成效,反映出当前节水产业“规模扩张未同步提升效率”的阶段性特征。

为评估上述相关关系的稳健性,采用 Bootstrap 重采样方法计算各相关系数的 95% 百分位置信区间。结果显示(表 3),仅需求基础与节水成效(含农业)的置信区间 $[-0.972, -0.268]$ 不包含零,表明该负相关关系具有统计稳健性(与 $p < 0.05$ 一致)。需求基础与产业活力的置信区间 $[-0.119, 0.916]$ 包含零,提示该正向关联趋势在统计上尚不稳健,需谨慎解读。其余配对置信区间均包含零,相关关系不稳健。

2.2.2 典型案例验证

为进一步揭示维度关系的区域表现及形成机理,选取黄埔区和从化区进行对比分析。

黄埔区需求基础指数与产业活力指数均居全市首位,依托强大的工业基础和科技创新集聚能力,形成了较为完整的节水产业链条。然而,其节水成效指数(含农业)仅排第 7,并非因其节水技术

落后,而是高度工业化、城镇化的用地结构决定了农业节水指标在本区域缺乏应用场景。这一反差印证了需求基础与节水成效(含农业)之间的统计背离:高产业活力并未同步带来高节水成效,根源在于城镇化地区农业节水指标的评价盲区。

从化区则呈现相反格局。其需求基础指数与产业活力指数均居全市末位,但节水成效指数(含农业)高居第 2,这与其中北部生态屏障定位、耕地占比较高、农业灌溉面积大的区域特征密切相关。然而,从化区农业节水改造多以政府主导的公益性投入为主,节水技术推广分散于小农户经营体系,尚未形成规模化节水产业集群。这一案例深刻揭示了农业节水高成效难以转化为产业活力的现实困境:农业节水产生的多为外部性收益,缺乏市场化的产业转化路径。

两区对比表明,节水产业三维度之间的关系并非固定不变,而是随区域发展阶段和产业结构特征发生结构性偏移。产业活力与节水成效的脱节、需求基础与农业节水成效的背离,共同构成了广州市节水产业发展的核心制约。

表 3 2024 年广州市节水产业发展热度指数各维度 Spearman 秩相关系数及 Bootstrap 95% 置信区间

Tab. 3 Spearman rank correlation among dimension indices with bootstrap 95% confidence intervals

维度配对	r	p 值	Bootstrap 95% CI
需求基础-产业活力	0.536	0.089	$[-0.119, 0.916]$
需求基础-节水成效(含农业)	-0.727*	0.011	$[-0.972, -0.268]$
需求基础-节水成效(不含农业)	0.036	0.916	$[-0.710, 0.598]$
产业活力-节水成效(含农业)	-0.445	0.170	$[-0.906, 0.223]$
产业活力-节水成效(不含农业)	0.091	0.790	$[-0.531, 0.607]$
节水成效(含农业)-节水成效(不含农业)	0.155	0.650	$[-0.614, 0.789]$

注:*表示 $p < 0.05$,置信区间基于 Bootstrap 重采样。

2.3 节水产业功能区分类

基于前述空间分异与维度关系分析,结合三分位划分结果(将各维度指数由低到高排序,前 33% 划为低值区、中间 33% 为中值区、后 33% 为高值区)作为量化阈值,再综合各维度指数特征,将全市节水产业发展格局划分为 4 类功能区:

a) 节水产业均衡发展区。该类功能区以番禺区、天河区、海珠区为典型,综合指数(不含农业)位于中高值区,各分项指数无低值短板,需求基础对产业活力正向关联,各维度指数匹配度最优。三区产业活力指数排位均不低于需求基础排位,节水成效指数(不含农业)居全市前列,实现需求、供给、成

效的良性互动。

b)节水产业转型提升区。该类功能区以黄埔区为典型,综合指数与需求基础均位于高值区,但产业活力与节水成效关联较弱。黄埔区需求基础指数与产业活力指数均位居全市第1,依托工业强区优势,其单位GDP水耗等指标已达到先进水平,但受负向指标标准化规则及存量设施更新滞后影响,节水成效指数(不含农业)仅排第7,呈现产能快速扩张背景下,节水技术迭代与存量设施更新未能完全同步的特征。

c)农节产业培育区。该类功能区以花都区、从化区、增城区、白云区为典型,节水成效(含农业)与产业活力均位于高值区,需求基础与节水成效(含农业)呈显著负相关趋势。四区节水成效指数(含农业)居全市前列,反映出其在农业灌溉节水、管网改造等方面已有较好的实践基础。较高的节水成效意味着区域内已形成对节水设备、技术服务和运维管理的现实需求,为节水产业的发展提供了市场空间。然而,受农业主导的经济结构制约,产业活力指数排位普遍靠后,表明目前节水产品和服务的本地供给能力尚未跟上已有的节水实践需求,形成了需求有基础、供给待培育的错位格局。因此,该类功能区的核心特征并非节水产业已经成熟,而是具备培育节水产业的现实条件和发展空间。

d)节水产业发展滞后区。该类功能区以越秀区、南沙区、荔湾区为典型,产业活力位于中低值区,节水产业发展热度偏低。其中,越秀区、南沙区需求基础指数排位虽靠前,但产业活力指数、节水成效(不含农业)均靠后,属于高需求但低活力、低成效的节水产业发展滞后区;荔湾区需求基础、产业活力、节水成效指数排位均靠后,属于全方位偏弱的节水产业发展滞后区。

3 结论与建议

聚焦广义节水产业,以广州市11个行政区为研究单元,紧扣“需求-供给-成效”全链条构建节水产业发展热度指数体系,采用熵值法、Spearman秩相关和Moran's I等方法开展量化分析,并据此进行功

能区划分。结果显示,2024年广州市节水产业空间非均衡性显著,总体呈现“东南产业高地凸显、北部涉农区托底、老城需求旺盛但产业薄弱”的空间分异特征。空间自相关分析表明,含农业综合热度呈显著正向空间集聚(Moran's I为0.570, $p=0.015$),剔除农业指标后集聚消失,农业节水是驱动空间分异格局中最具区分度的维度。各维度耦合协同偏弱,维度间存在结构性错配:需求基础与产业活力呈正向关联趋势($r=0.536$, $p=0.089$),但Bootstrap置信区间包含零,该趋势尚不稳健;需求基础与节水成效(含农业)呈显著负相关($r=-0.727$, $p=0.011$),经Bootstrap检验确认稳健。具体而言,老城区存量管网改造需求迫切但产业基础薄弱,涉农区农业节水的高投入与低产业附加值困境尚未扭转,产业活力与节水成效关联度不高,表明当前节水产业存在“规模扩张未同步提升效率”的阶段性矛盾。基于以上分析,可将广州市11个行政区划分为4类功能区,分别是均衡发展区(番禺、天河、海珠)、转型提升区(黄埔)、农节产业培育区(花都、从化、增城、白云)、发展滞后区(越秀、南沙、荔湾)。

针对上述结构性失衡,提出分区发展对策。对于均衡发展区,建议番禺区巩固多维协同优势,打造产用融合示范样板,天河区、海珠区依托高需求与科创资源集聚优势,重点孵化节水技术研发、合同节水管理等知识密集型业态,可由区水务部门每年梳理一批公共机构、高校等的节水改造需求,形成项目清单向社会发布,引导节水服务企业对接实施;对于转型提升区,建议黄埔区在维持产业活力首位优势与工业节水效率领先位势基础上,推动节水装备制造向高端化转型,同步强化工业技改与老旧供水管网漏损控制,化解产能扩张与存量更新脱节的深层矛盾,具体可将高端节水装备纳入区级技改支持范围,深化已开展的再生水利用配置试点成果,进一步完善市场化机制;对于农节产业培育区,建议各区推动农业节水工程与产业链培育相衔接,将灌溉水有效利用系数提升、农业水价综合改革等

制度红利转化为节水设备与农艺服务的市场需求,可依托现有农机合作社拓展节水设备租赁与维修服务,并将精准补贴、节水奖励与灌溉效率提升挂钩;对于发展滞后区,建议越秀区、南沙区补足产业活力与非农领域节水成效短板,荔湾区通过专项政策引入产业孵化载体,并加快老旧管网更新以激活存量改造市场,具体可将老旧小区管网更新与城市更新项目统筹推进,南沙可依托自贸政策引进节水技术企业,荔湾可依托现有科技产业载体与科技金融政策,对接广东省“节水贷”等绿色金融工具,引导金融资源支持节水型初创企业发展。

本研究存在一定局限性。受数据可得性限制,本文仅基于2024年横截面数据展开分析,难以揭示节水产业长期时序演化规律,亦无法完全剥离水价改革、专项补贴等政策变量净效应,变量间双向因果关系有待验证。此外,受研究单元仅11个行政区的样本量限制,尽管采用了Bootstrap重采样进行稳健性检验,但统计推断能力仍有限,相关结论应视为初步揭示。后续研究拟结合长时序面板数据,开展多情景模拟与空间收敛分析,以弥补上述不足。

参考文献:

- [1] 王浩, 褚俊英. 我国节水产业的发展对策[J]. 中国水利, 2005(13): 59-62.
Wang Hao, Chu Junying. Countermeasures for water-saving industry development in China[J]. China Water Resources, 2005(13): 59-62. (in Chinese)
- [2] 邓武彬, 夏丽丽, 郑勇, 等. 江西省推进节水产业的实践与思考[J]. 中国水利, 2024(23): 64-67, 25.
Deng Wubing, Xia Lili, Zheng Yong, et al. Practices of advancing the water-saving industry in Jiangxi Province and reflections[J]. China Water Resources, 2024(23): 64-67, 25. (in Chinese)
- [3] 杨杰, 杨金梅. 新质生产力视角下我国节水产业发展的策略[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(4): 632-640.
Yang Jie, Yang Jinmei. Development strategy of China's water-saving industry from the perspective of new quality productive forces[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(4): 632-640. (in Chinese)
- [4] 田煜, 李双强. 新时代发展节水产业的策略路径[J]. 宏观经济管理, 2024(10): 59-66.
Tian Yu, Li Shuangqiang. Strategic path for developing water-saving industries in the new era [J]. Macroeconomic Management, 2024(10): 59-66. (in Chinese)
- [5] 刘劲松, 王高旭, 夏超凡, 等. 新时期节水产业高质量发展认识与思考[J]. 中国水利, 2024(12): 69-72.
Liu Jingsong, Wang Gaoxu, Xia Chaofan, et al. Reflection on the high quality development of water-saving industry in the new era [J]. China Water Resources, 2024 (12): 69-72. (in Chinese)
- [6] 曹鹏飞, 易雅宁, 王宏洋, 等. 新质生产力导向下的现代化节水产业体系构建策略[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2025, 23(4): 849-857.
Cao Pengfei, Yi Yaning, Wang Hongyang, et al. Strategy for constructing the modern water-saving industrial system oriented by new quality productive forces [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2025, 23(4): 849-857. (in Chinese)
- [7] 周哲宇. 供需互促: 我国节水产业发展规律与策略的辩证思考[J]. 水利发展研究, 2025, 25(7): 14-20.
Zhou Zheyu. Mutual promotion of supply and demand: dialectical thought on the development laws and strategies of China's water-saving industry [J]. Water Resources Development Research, 2025, 25(7): 14-20. (in Chinese)
- [8] 雷晶, 陈向东, 恒琪, 等. 用水权交易促进节水产业发展的对策研究[J]. 中国水利, 2024(19): 60-65, 51.
Lei Jing, Chen Xiangdong, Heng Qi, et al. Studies on measures to boost water-saving industry development through water rights trading [J]. China Water Resources, 2024(19): 60-65, 51. (in Chinese)
- [9] 杨国华, 陈梅. 以合同节水管理推动节水产业发展[J]. 中国水利, 2023(23): 22-25.
Yang Guohua, Chen Mei. Promoting water-saving industry development through contract-based water-saving management [J]. China Water Resources, 2023(23): 22-25. (in Chinese)
- [10] 陈洁. 基于生态系统的战略性新兴产业创新驱动因素研究: 以水资源循环利用与节水产业为例[J]. 人民珠江, 2017, 38(12): 1-4.
Chen Jie. Study on driving factors of strategic emerging industries based on ecosystem-taking water resources recycling and saving industry for example [J]. Pearl River, 2017, 38(12): 1-4. (in Chinese)
- [11] 施雁恒. 加快形成新质生产力推进山西节水产业高质量发展[J]. 山西水利, 2024(12): 9-10, 15.
Shi Yanheng. Accelerate the formation of new quality productive

- forces and promote the high-quality development of Shanxi Province's water-saving industry [J]. Shanxi Water Resources, 2024(12): 9–10, 15. (in Chinese)
- [12] 宋美华, 姜欣, 刘健, 等. 新时期山东省节水产业高质量发展路径研究[J]. 水利发展研究, 2026, 26(2): 44–53.
- Song Meihua, Jiang Xin, Liu Jian, et al. Research on the path of high-quality development of water-saving industry in Shandong Province in the new era [J]. Water Resources Development Research, 2026, 26(2): 44–53. (in Chinese)
- [13] 陈诗凌, 刘达, 洪昌红. 浅议广东省节水产业发展[J]. 广东水利水电, 2024(3): 1–5.
- Chen Shiling, Liu Da, Hong Changhong. An overview of the development of water-saving industry in Guangdong Province [J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2024(3): 1–5. (in Chinese)
- [14] 黄晓家, 赵潭, 于水静, 等. 我国第三产业发展与节水研究[J]. 中国给水排水, 2022, 38(4): 49–56.
- Huang Xiaojia, Zhao Tan, Yu Shuijing, et al. Research on China's tertiary industry development and water saving [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(4): 49–56. (in Chinese)
- [15] 苏飞, 董增川, 沈仁英, 等. 用水总量与效率控制下的区域产业节水效应优化分析[J]. 灌溉排水学报, 2012, 31(4): 95–98.
- Su Fei, Dong Zengchuan, Shen Renying, et al. Optimization on water-saving effect of regional industry with water use amount and water use efficiency control [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2012, 31(4): 95–98. (in Chinese)
- [16] 张修宇, 未志豪, 时梓尧, 等. 河南省引黄受水区节水水平评价及空间均衡分析[J]. 人民黄河, 2025, 47(9): 103–109, 120.
- Zhang Xiuyu, Wei Zhihao, Shi Ziyao, et al. Evaluation of water conservation level and spatial equilibrium analysis in the Yellow River Water-Receiving Area of Henan Province [J]. Yellow River, 2025, 47(9): 103–109, 120. (in Chinese)
- [17] 高金花, 高晓珊, 廉冀宁, 等. 基于AHP-熵权法的农业节水技术综合效益评价[J]. 农机化研究, 2019, 41(12): 58–63.
- Gao Jinhua, Gao Xiaoshan, Lian Jining, et al. Comprehensive benefit evaluation of agricultural water-saving technology based on AHP-Entropy Weight Method [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(12): 58–63. (in Chinese)
- [18] 房春艳, 夏文君, 郑炎辉, 等. 湿润地区节水综合效益及其影响因素研究[J]. 人民珠江, 2025, 46(12): 80–91.
- Fang Chunyan, Xia Wenjun, Zhen Yanhui, et al. Study on comprehensive benefit of water saving and its influencing factors in humid areas [J]. Pearl River, 2025, 46(12): 80–91. (in Chinese)
- [19] Krugman P. Increasing returns and economic geography [J]. Journal of Political Economy, 1991, 99(3): 483–499.
- [20] 杨丽, 孙之淳. 基于熵值法的西部新型城镇化发展水平测评[J]. 经济问题, 2015(3): 115–119.
- Yang Li, Sun Zhichun. The development of western New-type urbanization level evaluation based on Entropy Method [J]. On Economic Problems, 2015(3): 115–119. (in Chinese)
- [21] Duranton G, Overman H G. Testing for localization using micro-geographic data [J]. Review of Economic Studies, 2005, 72(4): 1077–1106.
- [22] 刘海龙, 管志涛. 中国电影产业时空演变特征及驱动因素[J]. 热带地理, 2021, 41(5): 943–955.
- Liu Hailong, Guan Zhitao. Spatio-temporal evolution characteristics and driving factors of Chinese Film Industry [J]. Tropical Geography, 2021, 41(5): 943–955. (in Chinese)
- [23] 苏冰杰, 许永洪, 潘文捷. 基于混频数据的数字经济热度指数的构造方法与应用[J]. 统计与信息论坛, 2025, 40(6): 3–16.
- Su Bingjie, Xu Yonghong, Pan Wenjie. Construction method and application of digital economy heat index based on mixed-frequency data [J]. Journal of Statistics and Information, 2025, 40(6): 3–16. (in Chinese)
- [24] 杨江敏, 杨忍, 薛德升. 广东省城市环境质量变化的时空格局及影响因素[J]. 热带地理, 2017, 37(4): 601–609.
- Yang Jiangmin, Yang Ren, Xue Desheng. Spatial-temporal pattern and influencing factors of environmental quality in Guangdong, China [J]. Tropical Geography, 2017, 37(4): 601–609. (in Chinese)
- [25] 刘海龙, 谢亚林, 贾文毓, 等. 山西省生态安全综合评价及时空演化[J]. 经济地理, 2018, 38(5): 161–169.
- Liu Hailong, Xie Yaling, Jia Wenyu, et al. Ecological security assessment and spatial-temporal evolution of Shanxi Province [J]. Economic Geography, 2018, 38(5): 161–169. (in Chinese)
- [26] 王佃来, 宿爱霞, 刘文萍. 基于Spearman等级系数的植被变化趋势分析[J]. 应用科学学报, 2019, 37(4): 519–528.
- Wang Dianlai, Su Aixia, Liu Wenping. Trend analysis of vegetation cover changes based on Spearman rank correlation coefficient [J]. Journal of Applied Sciences, 2019, 37(4): 519–528. (in Chinese)
- [27] Zar J H. Significance testing of the Spearman rank correlation coefficient [J]. Journal of the American Statistical Association, 1972, 67(339): 578–580.
- [28] 陈卫平, 涂宏志, 彭驰, 等. 环境模型中敏感性分析方法评述[J]. 环境科学, 2017, 38(11): 4889–4896.
- Chen Weiping, Tu Hongzhi, Peng Chi, et al. Comment on

- sensitivity analysis methods for environmental models [J]. *Environmental Science*, 2017, 38(11): 4889–4896. (in Chinese)
- [29] 马瀚青, 张琨, 马春锋, 等. 参数敏感性分析在遥感及水文模型中的研究进展[J]. *遥感学报*, 2022, 26(2): 286–298.
- Ma Hanqing, Zhang Kun, Ma Chunfeng, et al. Research progress on parameter sensitivity analysis in ecological and hydrological models of remote sensing [J]. *National Remote Sensing*, 2022, 26(2): 286–298. (in Chinese)
- [30] 王瑞, 周宁, 董福达, 等. 基于熵权-TOPSIS法的2019–2024年天津市突发公共卫生事件报告质量评价[J]. *疾病监测*, 2026, 41(2): 228–234.
- Wang Rui, Zhou Ning, Dong Fuda, et al. Evaluation of the reporting quality of public health emergencies in Tianjin from 2019 to 2024 based on the entropy-weight technique for order preference by similarity to ideal solution method [J]. *Disease Surveillance*, 2026, 41(2): 228–234. (in Chinese)
- [31] 王潞欧, 赵春梅, 习红明. 基于改进 AHP-TOPSIS 的煤矿顶板灾害风险分析[J]. *山东煤炭科技*, 2026, 44(1): 81–86.
- Wang Luou, Zhao Chunmei, Xi Hongming. Risk analysis of coal mine roof disaster based on improved AHP-TOPSIS [J]. *Shandong Coal Science and Technology*, 2026, 44(1): 81–86. (in Chinese)
- [32] 肖成明, 王真, 郭怀成. 蒙特卡洛模拟在湖泊生态安全评价指标权重确定中的应用[J]. *安全与环境工程*, 2016, 23(4): 83–86.
- Xiao Chengming, Wang Zhen, Guo Huaicheng. Application of Monte Carlo Simulation in ecological security evaluation of lakes [J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2016, 23(4): 83–86. (in Chinese)

Spatial Differentiation of the Water-Saving Industry in Guangzhou Based on a Development Heat Index

XIONG Yan¹, CHEN Yanshan^{2,3*}, QIU Songxi^{2,3}, LIU Zhenmin¹, HE Jiaxiang¹, WANG Yuxin¹

(1. Guangzhou Southern Water Network Basin Affairs Center, Guangzhou 510635, China; 2. Guangdong Research Institute of Water Resources and Hydropower, Guangzhou 510635, China; 3. Guangdong Water-Saving Technology Innovation Center, Guangzhou 510635, China)

Abstract: Focusing on the water-saving industry in a broad sense, this study takes the 11 administrative districts of Guangzhou as units of analysis. Following the full-chain logic of "demand – supply – effectiveness," it constructs a Water-Saving Industry Development Heat Index system covering three dimensions: demand foundation, industrial vitality, and water-saving effectiveness. The demand foundation dimension includes per capita GDP, urbanization rate, and the share of the secondary industry; the industrial vitality dimension covers the number of water-saving enterprises, output value, revenue, and R&D expenditure; and the water-saving effectiveness dimension includes comprehensive water use per capita, water consumption per 10,000 yuan of GDP, industrial added value per unit of water consumption, leakage rate of the urban water supply network, reclaimed water utilization rate, effective utilization coefficient of farmland irrigation water, and the share of area covered by the comprehensive reform of agricultural water pricing. Data are drawn mainly from the Guangzhou Statistical Yearbook (2025), the Guangzhou Water Resources Report (2025), project-based enterprise surveys, and district-level self-assessments for water-saving society construction. Quantitative analysis and differentiated functional zoning are conducted using the entropy method, Spearman rank correlation, and Moran's I. To test the robustness of the index results, Monte Carlo perturbation (with $\pm 20\%$ uniform disturbances applied to the baseline weights) and bootstrap resampling are further employed. The results indicate that in 2024, the spatial imbalance of Guangzhou's water-saving industry was pronounced, showing an overall pattern of "prominent industrial highlands in the southeast, agriculture-related districts in the north providing bottom-line support, and strong demand but weak industry in the old urban cores." The comprehensive heat index (including agricultural water-saving indicators) exhibited significant positive spatial clustering (Moran's I 0.570, $p = 0.015$). After removing agricultural indicators, Moran's I dropped to 0.126 ($p = 0.619$), confirming that the observed spatial clustering was mainly attributable to agricultural water-saving effects. The coupling coordination among dimensional indices was generally weak, and the demand foundation index was significantly negatively correlated with the water-saving effectiveness index that included agricultural

water-saving indicators($r = -0.727, p = 0.011$); this result was confirmed by the bootstrap test (95% CI [-0.972, -0.268]). This negative association reflects a structural mismatch: highly urbanized districts such as Yuexiu and Huangpu have little agricultural land and thus score low on agricultural water-saving indicators, whereas agricultural districts such as Conghua and Zengcheng achieve high water-saving effectiveness despite weak demand foundations. Meanwhile, the positive trend between demand foundation and industrial vitality did not pass the bootstrap robustness check, suggesting that the linkage between market demand and industry formation ($r = 0.536, p = 0.089$) remains statistically inconclusive at the current stage. Accordingly, the 11 districts are divided into four functional zones: the balanced development zone (Panyu, Tianhe, Haizhu), the transformation and upgrading zone (Huangpu), the agricultural water-saving industry cultivation zone (Huadu, Conghua, Zengcheng, Baiyun), and the lagging development zone (Yuexiu, Nansha, Liwan), with corresponding zonal development strategies proposed. For the balanced development zone, consolidating multi-dimensional synergies and incubating knowledge-intensive water-saving services are recommended. For the transformation and upgrading zone, upgrading high-end water-saving equipment manufacturing and strengthening pipe-network retrofitting is suggested. For the agricultural water-saving industry cultivation zone, integrating agricultural water-saving projects with local industrial chains and expanding precision subsidy mechanisms are advised. For the lagging development zone, introducing industrial carriers, activating the retrofit market through urban renewal, and leveraging green finance tools such as Guangdong's "water-saving loan" program are proposed. Limitations of this study include reliance on 2024 cross-sectional data and the small sample size of 11 districts, which constrain causal inference and long-term trend analysis. Future research could incorporate panel data and spatial convergence models to address these gaps.

Keywords: water-saving industry; development heat index; spatial differentiation; entropy method; Guangzhou

(责任编辑:程 茜)