

珠三角城市群水系连通性与城市发展协调性分析^{*}杨 巍¹⁾, 王亚琴¹⁾, 申 宇¹⁾, 曾秀芬²⁾, 简梓红^{2)†}

(1)中国国土勘测规划院, 北京; 2)广东省地图院, 广东广州)

摘要 在全球气候变化与快速城市化双重胁迫下, 水系连通性已成为影响区域水安全与城市可持续发展的关键因素。以高度城镇化且水系密集度高的珠三角城市群为例, 本研究综合利用高分辨率遥感影像, 精准提取水域空间信息, 并构建了涵盖数量指标和形态指标的水系连通性综合评价体系, 引入城市发展综合评价指标, 采用层次分析-熵权法(AHP-EWM)确定组合权重, 并运用耦合协调度模型(CCDM), 定量评估了 2024 年珠三角水系连通性与城市发展的交互耦合与协调关系。结果表明: 1)珠三角各市水系连通性空间分异显著, 佛山、珠海、东莞等城市结构性优势突出, 综合评价较高; 2)城市发展水平呈“广深双核引领”格局, 与经济发展水平高度一致; 3)耦合协调分析揭示广州、佛山、东莞等地步入“中级协调”发展阶段, 而江门、肇庆、惠州等边缘城市则处于“失调衰退”类型, 协调发展水平相对滞后。本研究从“水-城”复合系统的视角, 揭示了快速城市化地区水系结构和城市功能间的内在互馈机制, 研究结果可为规划珠三角国土空间格局、保障区域水生态安全及促进人水和谐发展提供科学依据与决策支持。

关键词 水系连通性; 城市发展; 耦合协调度; 珠三角; 层次分析-熵权法

中图分类号 TV211; P343

DOI: 10.12202/j.0476-0301.2026011

0 引言

水是生命的源泉、经济的命脉与生态的基石。水系作为水资源的载体, 其空间结构的连通性决定了水循环过程、污染物迁移扩散能力以及生物栖息地的完整性, 是维系区域水生态安全与健康的关键结构性指标^[1-3]。在人类社会急剧发展的背景下, 水系结构与功能在人类活动的影响下正经历着前所未有的重塑^[4]。一方面, 城市扩张侵占自然水系, 导致河网破碎化、水域空间下降; 另一方面, 硬化化工程建设虽然在一定程度上提升了防洪排涝标准, 却也割裂了水系横向、纵向的连通性, 引发了“人水争地”的矛盾^[5]。近年来, 我国将水网工程建设提升至国家战略高度予以系统推进。2020 年, 党的十九届五中全会明确提出实施国家水网重大工程^[6]; 2023 年, 中共中央、国务院印发的《国家水网建设规划纲要》进一步明确, 要以逐步形成全国水网“一张网”为总体布局, 提升河湖水系整体连通性, 系统优化水资源配置格局, 促进水资源与经济社会发展相协调, 为高质量发展提供坚实的水安全保障^[7-8]。这一战略布局充分体现了国家对增强水系连通韧性的高度重视。因此, 如何科学认知并协调水系连通性与城市发展之间的关系, 已成为区域可持

续发展领域面临的重大科学问题与实践挑战。

珠三角城市群作为中国改革开放的先行区与高度城镇化的典型代表, 其密集的河网水系既是支撑其经济社会发展的宝贵资源, 也是其水生态安全格局的核心构成。然而, 随着改革开放和经济快速发展, 在快速城市化和工业化进程中, 珠三角地区同样面临着水系结构简化和河网主干化等严峻问题^[9-10], 对区域水资源配置能力、洪涝灾害韧性以及水环境承载力构成了潜在威胁。现有研究多侧重于水系形态的单一指标描述, 如连通性现状评估^[11-16]和长时间尺度的动态演变^[17-18], 或水系连通性对城市发展中土地利用格局关联分析^[9, 19], 缺乏对“水-城”系统间多维、非线性交互作用的综合量化诊断, 将二者视为耦合系统, 揭示其内在机制与协调状态的研究尚显不足。特别是在评价方法上, 构建融合结构与功能的水系连通性综合指标体系, 有效权衡主观经验与客观数据的组合赋权法, 精确刻画水系连通性和城市发展耦合协调的时空演化格局, 是当前研究需要突破的关键难题。

当前, 学界已发展出多种评价方法, 如: 利用水系拓扑结构分析结点(如河流交汇处、湖泊)与连接线(比如河道)网络特征的图论法; 从景观生态学视角出发, 采用基于图论的景观连接度指数法; 整合多源数据,

^{*} 国家重点研发计划资助项目(2024YFD1501700)

[†] 通信作者: 简梓红(1987—), 女, 高级工程师, 研究方向: 自然资源调查监测。E-mail: 741572102@qq.com

收稿日期: 2026-01-15

从结构、功能等多维度进行系统性评估的连通性指数法;动态再现水文过程,为连通性功能验证提供机制支持的水文模拟法^[20-26]。从现有文献来看,水系连通性研究主要遵循 3 种路径:大多数侧重于特定区域的连通性现状评估^[11-16],部分着眼于其长时间尺度的动态演变^[17, 27],或探索性地将连通性与土地利用格局动态进行关联分析^[9, 19]。总体上,现有方法多依赖专家经验确定权重,存在主观性强、适应性不足等问题。鉴于此,本研究采用层次分析-熵权法(AHP-EWM),通过融合主观赋权与客观赋权优势,构建更科学、更稳健的水系连通性评价模型。

本研究基于 2024 年珠三角亚米级的高空间分辨率遥感影像,利用水域空间自动化提取模型,对水体边界进行像素级定位,实现珠三角的水域空间提取。在此基础上,开展珠三角水系格局与连通性响应研究,明确其与城市发展的耦合关系,为修复珠三角地区河网水系结构、改善水系连通状况以及分析水资源影响下河网水系变化规律提供科学依据,进而为珠三角城市群的水系保护、水资源调配及防洪减灾提供基础参考。

1 研究区概况

本研究聚焦的珠三角城市群,其范围涵盖广州市、深圳市、珠海市、佛山市、东莞市、中山市、惠州市、肇庆市、江门市(图 1),土地总面积约 54 934 km²。作为中国最具活力的城市群之一,珠三角不仅是经济引擎,也是自然生态与人类活动交织的典型区域。珠三角属于典型的亚热带季风气候区,以高温多雨为特征,年均降水充沛,为水系提供了丰富的补给来源。地势上,该区域以平原和低丘陵为主,整体平坦,利于水系的网状分布与城市扩张。然而,水资源禀赋在地区间存在显著差异,时空分布极不均衡,季节性洪涝与干旱并存。城市发展高度依赖水资源。珠三角江河网络密集,但城市化过程中人类活动(如围垦、城市化)部分阻断自然水流,快速工业化与人口增长导致需求激增,与脆弱的水系承载能力形成张力,威胁区域生态平衡和城市韧性。探索珠三角城市群水系连通性与城市发展协调性,揭示自然条件与人为干预的复杂互动,对支撑珠三角地区城市可持续发展具有重大实践意义。

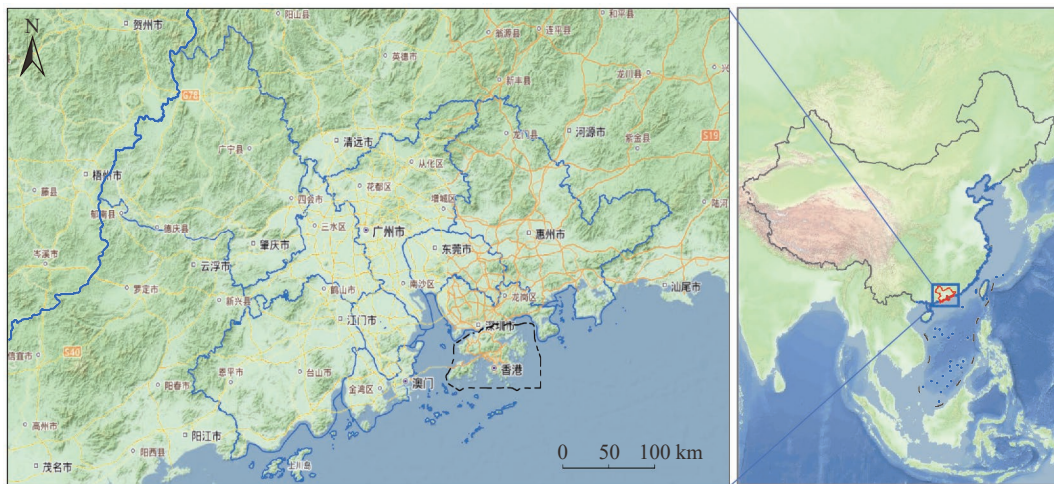


图 1 研究区概况

2 数据来源及研究方法

2.1 数据来源及预处理

本研究依托自主研发的水域空间自动化提取软件,以 2024 年丰水期高分、资源、吉林等系列高分率遥感影像为主,2022—2023 年高分、中巴系列丰水期遥感影像作为补充(表 1),开展珠三角水系空间信息提取。为保证多源影像的一致性,预处理阶段依次完成辐射定标、大气校正、几何校正和正射纠正,并统一坐标基准;随后进行多源配准(误差控制在 1 像素内)、影像拼接与研究区裁剪,采用重采样统一空

间分辨率(2 m),并对输入波段进行 Min-Max 归一化,以降低跨源辐射差异,同时按 8 : 2 划分训练集与验证集,完成空标签剔除、异常值筛查和标签完整性检查,确保训练数据质量。自动提取阶段构建“多尺度特征解耦”模型,设置光谱、空间和边界 3 分支,分别提取光谱响应、纹理形态和岸线特征;在特征融合阶段引入注意力机制增强边界响应,并采用多尺度融合整合深层语义与浅层细节,训练时采用主体分割损失(BCE+Dice)与边界加权损失联合优化,提高窄水体和复杂岸线识别能力。拓扑规则逻辑校验阶段,在模

型输出初始结果后,通过最小斑块面积阈值剔除噪声斑块,结合长宽比、紧致度和边界曲率识别建筑阴影与山体暗区误判,利用河网连通性和水陆边界连续性修正异常连接,并结合局部灰度差、方差及纹理特征进行二次复核,最后进行人工修正,对疑难区域再进

行人工目视解译与边界重绘。通过“预处理—模型提取—拓扑校验—人工修正”全流程处理,将水体边界误差控制在2像素以内,最终获取珠三角的水系数据。人口经济数据来源于珠三角各地市统计局官网,土地利用指标来源于国土调查成果共享应用服务平台。

表1 卫星影像数据源

序号	数据源	分辨率/m	时间范围	面积/km ²	比例/%
1	高分一号	2	2024年5—9月	20 161.0	36.77
2	高分六号	2	2024年5—8月	20 060.0	36.59
3	资源一号	2	2024年5—8月	10 842.5	19.78
4	吉林一号	2	2024年8—10月	3 294.0	6.01
5	高分一号	2	2023年5—7月	111.0	0.20
6	高分二号	2	2023年7月	300.8	0.55
7	高分一号	2	2022年5—9月	19.2	0.04
8	高分六号	2	2022年5月	8.2	0.01
9	CB04A	2	2022年5月	27.1	0.05

2.2 研究方法

2.2.1 基于图论的水系连通性模型构建

基于 ArcGIS10.8 平台,构建珠三角城市群水系几何网络模型,将河网水系中河流末端点、交汇点以及水库闸坝等人工设施位置定义为网络结点,连接2个相邻结点的河道段称为河链。通过空间拓扑分析,识别并消除重复或错误的结点与河链,确保网络结构的准确性。在此基础上,计算水系连通性参数,包括结点连接率、河网连接度等,统计河流数量、河流水域面积及流域总面积等基础参数。同时,针对鱼类等水生生物迁移需求,将水库闸坝工程数据叠加至水系网络模型中,识别水库闸坝对河道连续性 & 水流路径的阻断效应;引入割点系数概念,量化不同类别水库闸坝对水系连通性的割裂程度。其中,大型水库割点系数采用0.8,中型和小型水库分别采用0.5和0.2。如表2,结合珠三角水系几何网络特征,选择河网密度、水面率、河频率作为衡量区域水系数量特征指标^[12];选择水系环度、结点连接率、河网连接度、水系分维数作为衡量区域水系形态指标^[11, 16, 28]。

2.2.2 城市发展水平指标体系构建

为系统评估珠三角城市群的城市发展水平,研究构建涵盖人口、经济及土地利用3个维度的综合评价指标体系(表2),主要包括:城镇人口比例作为人口指标,第二、第三产业比重及城镇居民家庭人均消费支出作为经济指标,工业用地、商业服务用地、城镇交通运输用地、城镇住宅用地作为土地利用指标^[29]。通过多维度指标集成,刻画城市发展的空间特征与内

在关联,为后续水系连通性与城市发展协调性分析奠定基础。

2.2.3 水系连通性与城市发展耦合协调度分析

1) 基于层次分析-熵权法水系连通性和城市发展综合评价

运用层次分析-熵权法将珠三角城市群水系连通指标和城市发展划分为指标层与目标层。其中,水系连通性指标层包括数量特征指标和形态特征指标,城市发展指标层包括人口指标、经济指标和土地利用指标。首先运用归一化方法将水系连通指标进行量纲一化处理。

正向指标

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \min x_j}{\max x_j - \min x_j} \times 0.99 + 0.01, \quad (1)$$

负向指标

$$x'_{ij} = \frac{\max x_j - x_{ij}}{\max x_j - \min x_j} \times 0.99 + 0.01, \quad (2)$$

式中, x_{ij} 表示第 i 个样本的指标 j 的值, $\min x_j$ 表示指标 j 的最小值, $\max x_j$ 表示指标 j 的最大值。为了避免求取熵值时存在无意义的情况,在标准化处理的基础上增加了较小量级的实数0.01。

基于层次分析法构建目标层、准则层、指标层结构体系。构造层次树模型中每一层的判断矩阵、AHP权重计算公式。

$$b_{ij} = \frac{x'_{ij}}{\sum_{k=1}^n x'_{ik}}, \quad i, j = 1, 2, \dots, n, \quad (3)$$

表 2 水系连通性和城市发展评价指标体系

维度	类型	指标名称	公式	指标意义
水系 连通性	数量指标	河网密度	$D=L/A$	河流总长度 L 与研究区总面积 A 的比值,反映研究区内水网分布疏密程度,指标大小反映研究区调蓄能力
		水面率	$W=A_w/A$	流域内水面总面积 A_w 占研究区总面积 A 的比重,表示研究区水域面积大小的指标.其中,研究区面积采用各市统计局公布数据
		河频率	$R=N/A$	流域内河流数量 N 占研究区总面积 A 的比重,表示河流数量的发育情况
	形态指标	水系环度	$\alpha=(e-v'+1)/(2v'-5)$	e 为研究区内廊道数量, v' 为计算的结点数,反映河网水系实际成环水平的指标
		结点连接率	$\beta=e/v'$	反映河网水系中每个结点连接水系能力强弱的指标
		河网连接度	$\gamma=e/(3(v'-2))$	表示河网水系中每个结点连接到其他结点的难易程度,反映河网水系中廊道之间相互连接能力强弱的指标
		水系分维数	$\lg A(r)=-H\lg r+C$	$A(r)$ 为网格数目,个; r 为网格尺寸,km; H 为水系分维数, H 反映水系网络的复杂性和空间分布特征; C 为常数
	人口指标	城镇人口比例	$P_U=U/P\times 100\%$	U 为城市常住人口数量, P 为总人口数量,反映城市化进程的核心指标
城市 发展	经济指标	第二、第三产业比重	$P_1=(a+b)/Y\times 100\%$	a 为第二产业国内生产总值, b 为第三产业国内生产总值, Y 为国内生产总值(GDP),表征产业结构升级水平
		城镇居民人均可支配收入	$T_M=M/P$	M 为城镇居民可支配收入总额, P 为城镇居民总人口,体现城镇居民收入水平
	土地利用	城市用地	$A=\sum_{i=1}^n a_i$	A 为市域范围内某用地类型的图斑面积总和, a_i 为该类型每个图斑面积.其中城市用地指示居住空间供给状况、制造业集聚程度、服务业发展水平等;铁路用地、轨道交通用地和公路用地,体现城市的基础设施支撑能力
		铁路用地		
		轨道交通用地		
		公路用地		

$$\tilde{w}_i = \sum_{j=1}^n b_{ij}, \quad i = 1, 2, \cdots, n, \quad (4)$$

$$w_i = \frac{\tilde{w}_i}{\sum_{k=1}^n \tilde{w}_k}, \quad i = 1, 2, \cdots, n, \quad (5)$$

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(A_w)_i}{w_i}, \quad (6)$$

$$C_1 = \frac{(\lambda_{\max} - m)}{m - 1}, \quad (7)$$

$$C_R = \frac{C_1}{R_1}. \quad (8)$$

为了所求得结果符合实际要求,能作为基础实验数据,对判断矩阵进行一致性检验.其中, $\lambda_{\max}$ 是比较矩阵的最大特征值, m 为判断矩阵的阶数, C_1 为判断矩阵的一致性指标, R_1 为平均随机一致性指标(数值详见表 3)^[30], C_R 为平均随机一致性比率,当 $C_R<0.10$ 时,则认为判断矩阵合理,否则需要调整,使其满足 $C_R<0.10$,从而具有满意的一致性.

表 3 平均随机一致性指标数值

阶数 n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R_1	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

层次分析-熵权法可以充分利用原始数据,依据各个指标值的变异程度来计算指标权重,在人类福祉评价体系计算中得到了广泛的应用.因此本研究采用熵值法确定各个维度指标的权重.

熵值:

$$e_i = - \sum_{j=1}^n \frac{p_{ij} \ln(p_{ij})}{\ln(n)}, \quad i = 1, 2, \cdots, m, \quad j = 1, 2, \cdots, n, \quad (9)$$

式中: e_i 为第 i 个评价指标的熵; p_{ij} 为第 i 个指标下第 j 个评价对象的比重; m 为评价指标的个数; n 为样本数量.

熵权为

$$w_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^n (1 - e_j)}, \quad j = 1, 2, \cdots, n, \quad (10)$$

式中 w_j 为第 i 个评价指标的熵权.

2)水系连通性与城市发展耦合协调分析

运用耦合协调度模型来测度珠三角城市群河湖水系连通性与城市发展的耦合协调水平.根据相关研究,耦合协调水平可通过耦合度与耦合协调度这 2 个指标来反映^[28, 31-32].其中,耦合度反映子系统间的

相对强弱程度(即协调水平),而耦合协调度能够反映系统整体的耦合协调水平,表达式为

$$C=2\sqrt{\frac{U_1U_2}{(U_1+U_2)^2}}, \tag{11}$$

式中: C 为耦合度,取值范围在 0~1, C 值越大,说明协调水平越高; U_1 、 U_2 为综合得分. 综合评价指数 Q 的计算公式为

$$Q=\alpha U_1+\beta U_2, \tag{12}$$

式中: α 、 β 为相对重要程度系数,且其数值的相对大小不影响耦合协调发展的趋势. 本文认为二者同等重要,因此取 $\alpha=\beta=0.5$.

$$D=\sqrt{CQ}, \tag{13}$$

式中: D 为耦合协调度,取值范围亦为 0~1, D 越大,说明耦合协调水平越高. 参考已有研究划分耦合度评定等级和耦合协调度类型及评价(表 4).

3 结果分析

3.1 水系空间分布格局

基于遥感影像提取珠三角城市群水系空间分布如图 2 所示,珠江入海口水系呈扇状分布,河网密布,干支流众多,水系结构较复杂. 不同指标之间存在显著相关性(图 3): 河流数量越大,廊道数量越大;河流面积越大,廊道长度越大;河网密度越大,河频率和水面率越大(表 5). 对珠三角城市群河频率(R)、河网

表 4 耦合度和耦合协调度评定类型划分

取值范围	耦合度	耦合协调度	
	类型	类型	分类评价
[0.9, 1.0]	高水平耦合	协调发展类	优质协调
[0.8, 0.9)	良性耦合		良好协调
[0.7, 0.8)			中级协调
[0.6, 0.7)	磨合性耦合	过度发展类	初级协调
[0.5, 0.6)			勉强协调
[0.4, 0.5)			濒临失调
[0.3, 0.4)	拮抗型耦合	失调衰退类	轻度失调
[0.2, 0.3)			中度失调
[0.1, 0.2)	低水平耦合		严重失调
[0, 0.1)			极度失调

连接度(γ)、河网密度(D)、结点连接率(β)、水面率(W)、水系分维数(H)及水系环度(α)等水系连通性指标的空间格局进行了分析(图 4). 结果显示: 珠三角城市群水系连通性相关指标空间格局呈现显著的区域差异,各指标高值区主要分布于城市群中部及南部沿海,如广州、佛山、东莞等核心城市及其周边;低值区则多位于北部和西部山区及城市群外围. 整体上,珠三角城市群水系呈现中部和南部沿海发达、北部和西部相对稀疏的特征,核心城市水系连通性与复杂性较高,边缘区域较弱. 该格局与珠三角的地形地貌相关;同时,也受到人类活动及城市化发展的影响. 核心城市因人口与产业集聚,对水系连通性要求高,促进了相关建设;而边缘区域开发程度低,水系发展相对滞后.

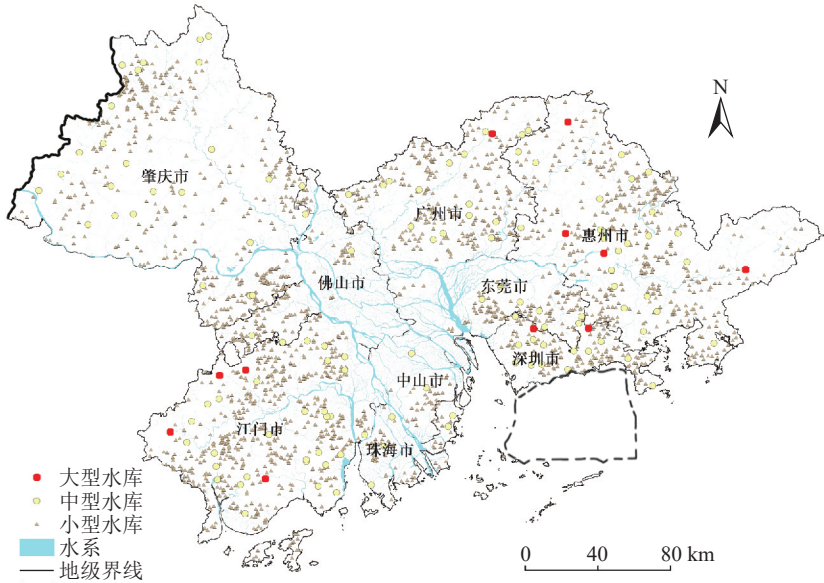


图 2 珠三角城市群水系空间分布

3.2 城市发展空间格局

本研究对珠三角城市群的城镇人口比例,第二、

第三产业比重,城镇居民人均可支配收入,以及城市用地、铁路用地、轨道交通用地、公路用地等指标的

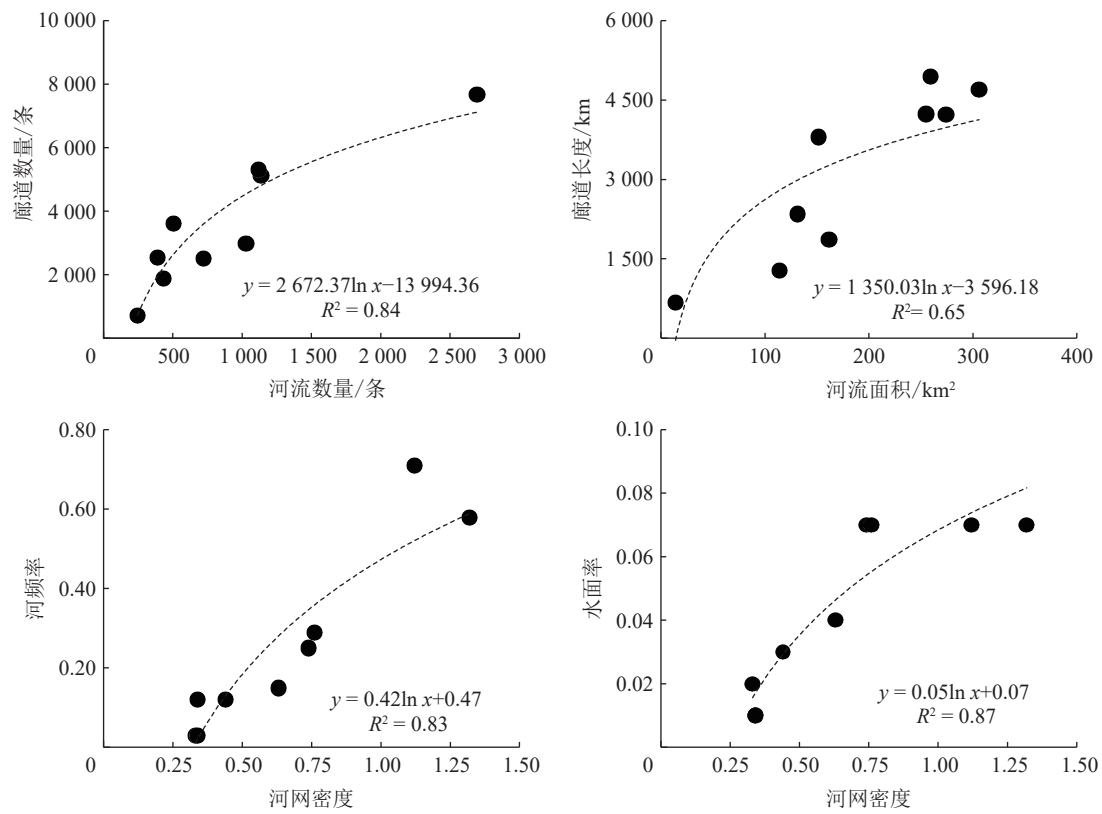


图 3 珠三角水系空间分布

表 5 珠三角各市 2024 年水系相关特征值

市	面积/km ²	河流数量/条	廊道数量/条	水库数量/座			结点数量/个	廊道长度/km	河流面积/km ²
				大型	中型	小型			
广州	7 434	1 135	5 122	1	16	359	2 591	4 698.34	305.95
深圳	1 997	246	723	2	14	164	296	683.64	13.93
珠海	1 725	433	1 876	0	4	67	863	1 279.83	113.55
佛山	3 798	2 696	7 662	0	3	109	3 688	4 237.77	255.11
江门	9 535	1 120	5 309	4	30	650	2 571	4 226.61	274.01
肇庆	14 900	504	3 617	0	26	628	1 705	4 955.03	259.36
惠州	11 300	388	2 536	4	24	588	1 185	3 802.19	151.42
东莞	2 460	719	2 508	0	8	107	1 172	1 868.30	161.60
中山	1 784	1 029	2 979	0	1	34	1 611	2 347.03	131.55

空间格局进行分析(图 5)。结果显示:城镇人口比例方面,深圳市城镇人口比例超过 99%,广州市、珠海市、佛山市、东莞市和中山市均超过 80%,江门市、肇庆市等相对较低,<80%。产业结构数据显示,珠三角城市群中部城市以第二、第三产业为主导,二者比重之和均超过 99%,产业现代化程度高,而肇庆市则相对较低,为 82.44%;居民收入方面,广州市和深圳市城镇居民人均可支配收入较高,均超 80 000 元·a⁻¹,珠海市、佛山市、东莞市和中山市为 67 479~70 088 元·a⁻¹,江门市为 50 023 元·a⁻¹,惠州市为 54 572 元·a⁻¹,肇庆市较低,为 40 924 元·a⁻¹。城市用地方面,广州市和深圳市规模较大,肇庆市等较小;交通用地中,广

州市、深圳市、东莞市等公路、轨道交通和铁路用地面积大,交通基础设施发达,肇庆市等相对滞后,目前轨道交通用地极少。总体上,珠三角城市群内部各城市在上述指标方面存在显著差异:中部核心城市优势明显,城市发展不平衡。

3.3 水系连通性和城市发展综合评价

本研究通过对城市发展评价指标和水系连通性评价指标进行归一化与量纲一化处理,并运用熵权法确定指标权重(表 6),分别计算了城市发展综合评价指标值和水系连通性综合评价指标值。在河网连通度指标体系中,河网密度和河频率的权重占比突出,分别达 0.185 和 0.175,表明单位面积内河流长度与分

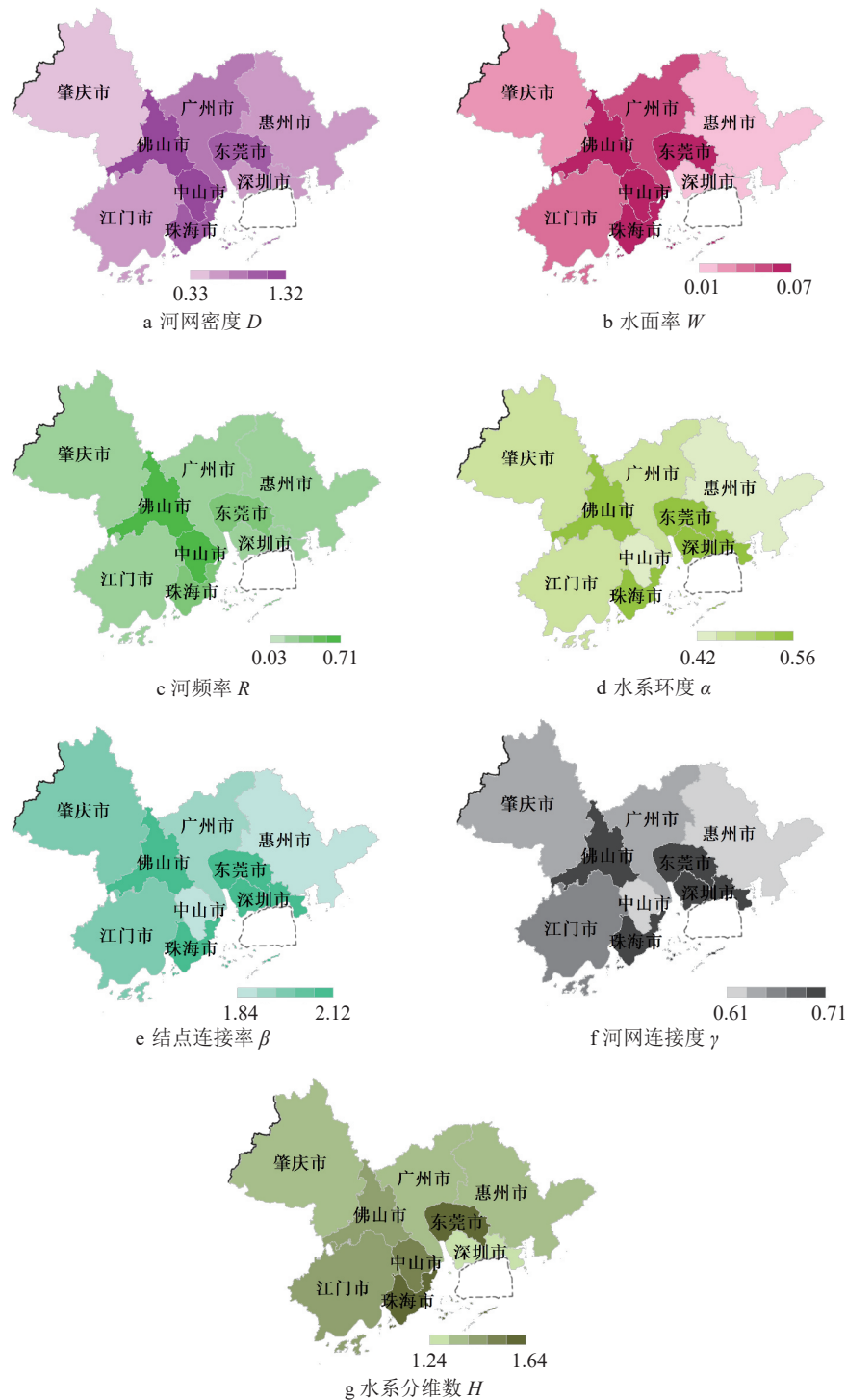


图4 珠三角水系连通性评价指标空间分布

布频率是衡量水系连通性的核心要素,直接反映区域水系的空发育规模与覆盖能力。接下来是水系环度、河网连接度和结点连接率,权重值为0.135~0.136,尤其在城市化背景下,人工水利工程对河网拓扑结构的改造(如闸坝建设、河道硬化)可能显著改变此类指标值。水系分维数权重为0.125,水面率权重最小,仅为0.108,反映其对整体连通性的贡献较弱。在城市发展指标体系里,交通用地占主导地位,轨道交通用

地权重最高,为0.298;其次是城市用地指标,权重为0.230;公路用地和铁路用地权重分别为0.147和0.125,凸显了土地利用与交通基础设施对城市群发展的核心驱动作用。珠三角作为高密度城市化区域,轨道交通(如城际铁路、地铁网络)的扩张直接引导城市空间结构演变,而城市用地规模则反映人口与产业集聚的强度。城镇居民人均可支配收入,城镇人口比例,以及第二、第三产业比重之和的权重相对较小,依次

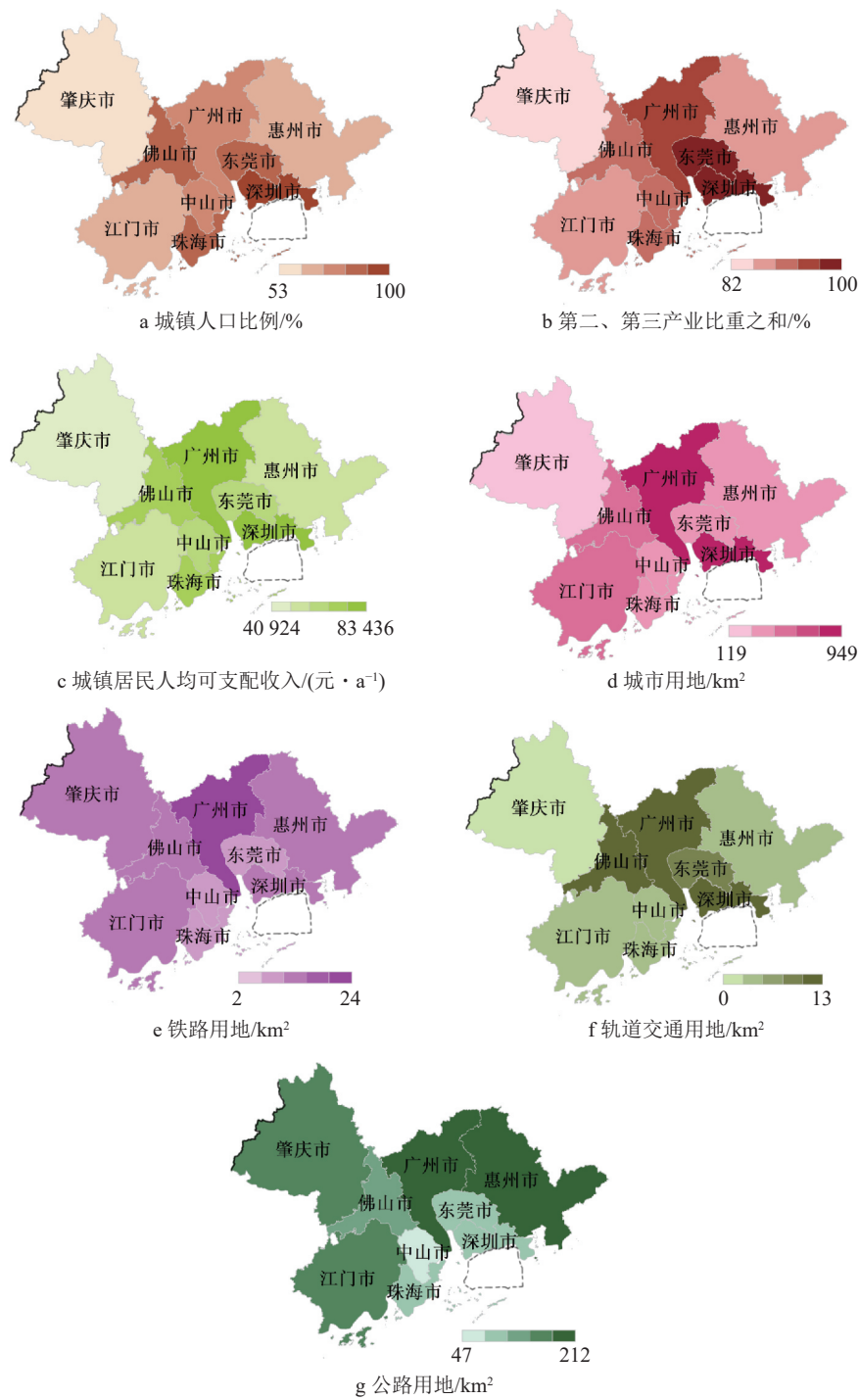


图 5 珠三角城市发展评价指标空间分布

为 0.096、0.058 和 0.047. 由此可看出, 社会经济指标权重较低, 可能是由于交通与土地利用对城市发展的直接影响更为显著.

为深入探究评价体系中各指标权重对最终结果的影响, 本研究采用单因素敏感性分析方法, 依次对每个指标的权重实施 $\pm 10\%$ 的扰动测试. 具体而言, 在每次测试中调整某一指标的权重后, 为保持所有权重之和为 1, 其余指标权重按其原权重比例进行相应调整, 以实现权重体系的归一性. 在此基础上, 重新

计算各评价对象的综合得分并生成新的排序序列. 通过对比不同权重情景下评价结果(特别是排名顺序)的差异, 可系统识别关键影响权重的指标, 进而评估模型鲁棒性并明确决策敏感点, 详见图 6. 结果显示: 水系连通性相关指标的权重变化对最终评价结果无影响; 城市发展相关指标权重变动的影响也较为有限, 仅当“城镇居民人均可支配收入”指标权重降低时, 引起了佛山市和东莞市排名顺序的变动. 整体来看, 该评价体系在指标权重发生合理波动时仍能保持结

表 6 指标权重结果

评价对象	指标类型	指标名称	指标权重
水系连通性	数量指标	河网密度	0.185
		水面率	0.108
		河频率	0.175
	结构指标	水系环度	0.136
		结点连接率	0.135
		河网连接度	0.136
		水系分维数	0.125
城市发展	人口指标	城镇人口比例	0.058
	经济指标	第二、第三产业比重	0.047
		城镇居民人均可支配收入	0.096
	土地利用指标	城市用地	0.230
		铁路用地	0.125
		轨道交通用地	0.298
		公路用地	0.147

论的相对稳定,表明模型具有较强的鲁棒性。

如图 7,水系连通性综合评价结果表明,珠三角 9 个市的水系连通性综合评价指标评价值为 0.033~

0.806。佛山市、珠海市和东莞市的水系连通性明显优于其他地区,综合评价指标值分别为 0.806、0.763 和 0.709;中山市次之,综合评价指标值为 0.527;深圳市、

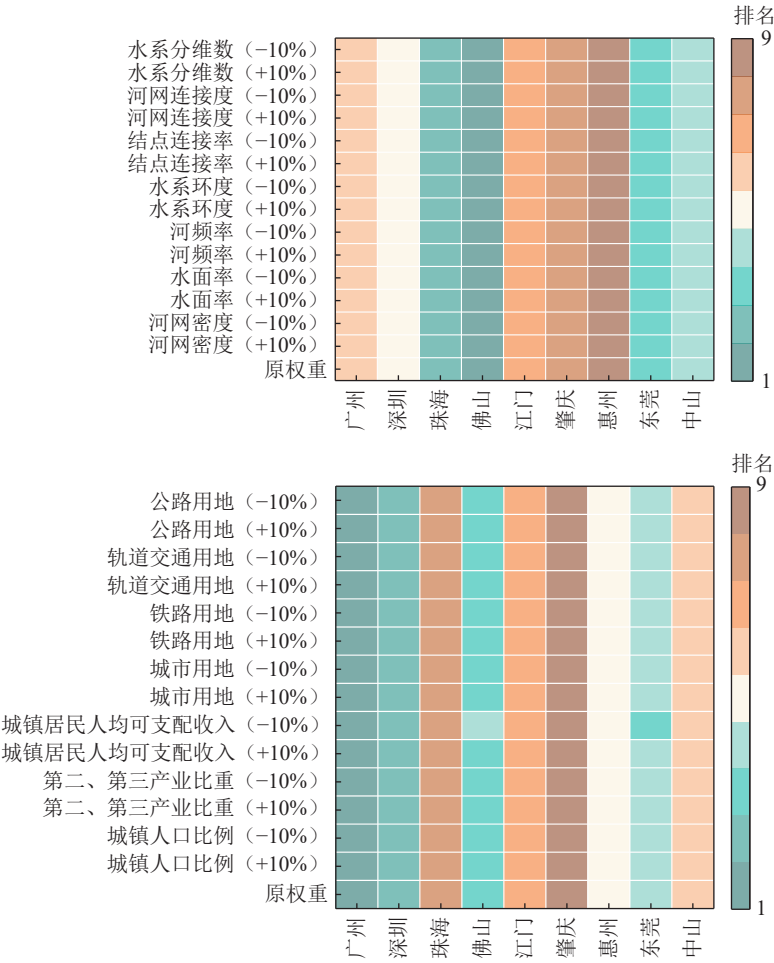


图 6 指标权重敏感性分析

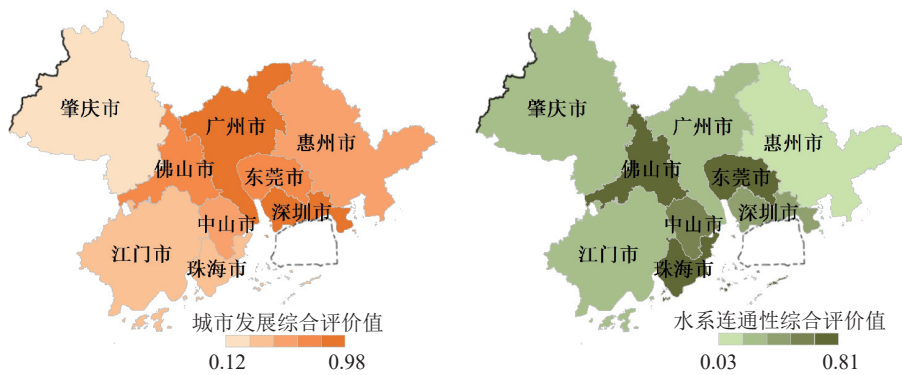


图 7 珠三角城市群城市发展和水系连通性综合评价结果

广州市和江门市的综合评价指标值为 0.200~0.350; 肇庆市水系连通性较弱, 指标值为 0.127; 惠州市的水系连通性最差, 指标值仅为 0.026. 城市发展综合评价结果显示, 珠三角 9 个市的城市发展综合评价指标评价值为 0.123~0.976. 其中: 广州市城市发展综合水平显著优于其他城市, 评价价值高达 0.976; 深圳市次之, 综合得分为 0.673; 佛山市、东莞市和惠州市的综合得分均在 0.300 以上; 中山市和江门市城市发展综合指标相对较低, 综合得分略高于 0.200; 珠海市和肇庆市的城市发展综合得分最低, 分别为 0.177 和 0.123.

总体来说, 城市发展综合水平与水系连通性在珠三角 9 市呈现出不同的分布格局. 如: 广州市城市发展综合水平领先, 但水系连通性指标并非突出; 深圳市城市发展水平较高, 水系连通性处于中等; 佛山市、东莞市水系连通性与城市发展水平均表现较好; 惠州市城市发展水平尚可, 但水系连通性最差; 肇庆市和珠海市城市发展综合得分低, 但相比较而言, 肇庆市水系连通性较差, 珠海市水系连通性较好, 反映了城市发展受多种复杂因素交互影响.

3.4 河湖水系连通与城市发展的耦合协调分析

如表 7, 珠三角城市群河湖水系连通与城市发展的耦合协调性存在显著空间差异, 根据评价结果, 广州市、佛山市、东莞市处于“中级协调”, 深圳市、珠海市、中山市为“初级协调”, 江门市、肇庆市、惠州市仍处于“失调衰退”(其中江门市濒临失调, 肇庆市和惠州市轻度失调). 这种分化格局深刻反映了各城市在快速城镇化进程中对水系保护与城市发展关系的不同处理方式: 广州市与佛山市长期注重蓝绿空间系统整合, 实现了水系连通与城市发展的良性互促; 东莞市在快速工业化中通过水系修复与廊道建设, 有效缓解了发展对水网的压迫, 同样达成中级协调; 佛山市的实践表明, 只有 2 方面同步推进、系统优化, 方能实现更高水平协调. 深圳市虽经济高度发达, 但高强度城市开发显著切割自然水系, 连通性薄弱成为系统协调的关键短板, 仅处于初级协调, 表明即使经济领先, 若忽视水系网络完整性仍会制约人水和谐; 珠海市与中山市重视生态保护, 但水系网络整体性仍有提升空间, 同样处于初级协调水平. 而经济相对滞后、规划中对水系保护重视不足的江门市、肇庆市和惠州市, 则未能实现二者有效协同, 整体处于失调状态.

表 7 珠三角水系连通与城市发展的耦合性分析

行政区	C	耦合度类型	D	耦合协调类型	分类评价
广州市	0.825	良性	0.717	过度发展类	中级协调
深圳市	0.943	高水平	0.690	过度发展类	初级协调
珠海市	0.782	磨合性	0.606	过度发展类	初级协调
佛山市	0.945	高水平	0.758	过度发展类	中级协调
江门市	0.999	高水平	0.477	失调衰退类	濒临失调
肇庆市	0.999	高水平	0.353	失调衰退类	轻度失调
惠州市	0.580	磨合性	0.321	失调衰退类	轻度失调
东莞市	0.960	高水平	0.729	过度发展类	中级协调
中山市	0.947	高水平	0.613	过度发展类	初级协调

值得注意的是, 珠三角城市群地区存在不少人工河道, 这些水系连通后对城市发展产生了深远影响. 一方面, 人工河道打破了自然水系的局限, 通过打通

断头浜、连接孤立水体, 显著提升了区域水系连通性, 增强了水资源调配能力和防洪排涝韧性, 为城市安全提供基础保障; 另一方面, 连通后的人工河道与城市

空间深度融合,承担起生态廊道、景观轴线、滨水休闲空间等复合功能,促进了城市蓝绿空间的系统整合,带动了沿线土地价值提升和产业布局优化,成为推动城市高质量发展的重要引擎。广州市与佛山市的实践中,人工河道正是其实现水系连通与城市发展良性互促的关键抓手;东莞市也通过人工河道的疏浚与连接,有效缓解了工业发展对水网的压迫。这些经验表明,科学规划与建设人工河道,使其与自然水系有机衔接、与城市功能深度融合,是提升珠三角城市群河湖水系连通水平、实现人水和谐共生的重要路径。

4 结论与展望

本研究聚焦珠三角城市群,从“水-城”复合系统的视角,利用高分辨率遥感影像,精准提取水域空间信息,并构建了涵盖结构性与功能性的水系连通性综合评价体系,同时引入城市发展综合评价指标,采用层次分析-熵权法确定组合权重,运用耦合协调度模型,定量诊断了2024年珠三角水系连通性与城市发展的耦合协调关系,揭示了快速城市化地区水系结构和城市功能间的内在互馈机制。得出以下主要结论:

1)在水系连通性方面,珠三角地区呈现显著空间分异。佛山市、珠海市和东莞市水系结构完整,河网密度与结点连接率高,连通性综合评价居前;惠州市、肇庆市等地受自然与人类活动双重影响,水系结构简单化,连通功能较弱。此格局凸显快速城市化进程对水系网络的差异化作用。

2)城市发展层面,珠三角城市群城市发展不平衡,中部核心城市优势明显,广州市和深圳市作为区域核心,在经济集聚、人口城镇化与基础设施建设上优势突出。

3)耦合协调关系上,珠三角各市表现复杂。广州市、佛山市和东莞市处于“中级协调”,深圳市、珠海市和中山市为“初级协调”,江门市、肇庆市和惠州市处于“失调衰退”,其中江门市濒临失调,肇庆市和惠州市轻度失调。深圳市虽城市发展水平高,但水系连通性弱,制约系统协调;佛山市在水系连通与城市发展2方面协同良好。

总体而言,珠三角城市群水系连通性与城市发展的耦合协调关系呈现显著的空间不平衡特征。为促进区域可持续发展,应着力推动水系连通性提升与城市发展的系统协同。针对水系连通性较弱且发展失调的城市(如肇庆市、惠州市),应加强水系综合整治与生态修复,优化水系网络结构与功能;针对城市发展水平有待提高的城市(如珠海市),可借鉴广州市、佛山市等核心城市的协调发展经验,增强内生发展动力。同时,各城市需强化区域协同机制,打破行政壁垒,共同推进水系与城市一体化发展,以优化国土空

间格局、保障区域水生态安全。未来可进一步探究气候变化对系统协调性的影响,评估其脆弱性与适应策略,也可探索运用人工智能、大数据与数字孪生等技术构建智慧管理平台,以支持精细化、动态化的规划决策,并通过跨学科、多尺度的耦合机制研究,深入揭示自然水系与城市社会经济系统之间的交互过程与调控路径,从而为区域人水和谐发展提供科学依据与决策支持。

5 参考文献

- [1] 王国庆,于学锦,王婕,等. 2015—2024年中国水资源和用水结构的时空演变及成因[J]. 水科学进展, 2025, 36(6): 949
- [2] 顾莉,蔡尚,褚克坚,等. 融合水系结构与闸坝动态调控的水系连通性新指标构建[J]. 水资源保护, 2025, 41(5): 231
- [3] 易小梅,滑磊,何海,等. 基于图论理论的西溪湿地水系连通性评价[J]. 湿地科学, 2023, 21(6): 951
- [4] 窦明,宋孙娟,石亚欣,等. 结构-功能耦合下的城市水系连通方案两阶段优化[J]. 水科学进展, 2022, 33(1): 79
- [5] Cote D, Kehler D G, Bourne C, et al. A new measure of longitudinal connectivity for stream networks[J]. *Landscape Ecology*, 2009, 24(1): 101
- [6] 徐宗学,庞博,冷罗生. 河湖水系连通工程与国家水网建设研究[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2022, 20(4): 757
- [7] 金凤君,叶志聪,陈卓,等. 面向中国式现代化的国家水网建设方向与战略途径[J]. 经济地理, 2024, 44(1): 148
- [8] 国家水网建设规划纲要[J]. 中国水利, 2023(11): 1
- [9] 王鸣雷,邱思妍,史文娇. 珠三角地区至2050年土地利用变化对生物多样性的影响[J]. 生态学报, 2024, 44(16): 7183
- [10] 王晓艳,雒海潮,王文豪. 珠三角城市群水资源承载力评价及协调发展分析[J]. 给水排水, 2024, 60(增刊2): 22
- [11] 李保琦,郭一,张少雄,等. 河北省水系发育状况与连通能力及其相关性[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2025, 23(3): 660
- [12] 李进宝,何学敏,黄鹏程,等. 克里雅河流域水系结构及连通性特征[J]. 中国水土保持科学(中英文), 2025, 23(3): 232
- [13] 崔枫笛. 基于复杂网络的北京市水系连通性优化策略研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2023
- [14] 范鲁晔,顾文权,邵东国,等. 江汉平原河湖水系连通性评价研究[J]. 中国农村水利水电, 2023(8): 111
- [15] 梁霄,巨文慧,孙博闻,等. 基于AHP-熵权法的平原城市河网水系连通性评价:以廊坊市为例[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2022, 20(2): 352
- [16] 李辉. 沈阳市水系形态结构特征及水系连通指标阈值的确定[J]. 水利技术监督, 2023(6): 106
- [17] 赵立杰,仕玉治,李福林,等. 1990—2020年黄河下游大汶河区水系连通性时空变化特征[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2026, 40(1): 10
- [18] 韩方红,高凡,王海东,等. 基于图论法的阿克苏河流域生

- 态水网水系连通性评估 [J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2025, 23(5): 1090
- [19] 张文欣. 近 40 年珠江三角洲城市化进程下河网水系变化研究 [D]. 广州: 广州大学, 2023
- [20] 高学平, 胡泽, 闫晨丹, 等. 考虑水力连通性的水系连通评价指标体系构建与应用 [J]. *水资源保护*, 2022, 38(2): 41
- [21] Bu J H, Zhang S L, Li C H, et al. A longitudinal functional connectivity comprehensive index for multi-sluice flood control system in plain urban river networks[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 613: 128362
- [22] Zhang C, Kuai S Y, Tang C H, et al. Evaluation of hydrological connectivity in a river floodplain system and its influence on the vegetation coverage[J]. *Ecological Indicators*, 2022, 144: 109445
- [23] 邓俊鹏. 基于图论法对城市水系连通性评价及优化 [D]. 南昌: 南昌大学, 2021
- [24] Hajibabaei M, Hesarkazzazi S, Minaei A, et al. Using complex network theory for missing data reconstruction in water distribution networks[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2024, 101: 105114
- [25] 李加林, 杨佳铭, 刘永超, 等. 鄱阳湖流域水系格局与连通性变化分析 [J]. *水资源保护*, 2026, 42(1): 30
- [26] 褚克坚, 杨焯, 刘朗, 等. 基于核主成分分析的长三角地区河网水系连通性评价模型研究 [J]. *长江流域资源与环境*, 2025, 34(8): 1708
- [27] 姚越超, 王伟, 周存宇, 等. 下荆江流域牛轭湖群水文连通性变化趋势及驱动因素分析 [J]. *长江流域资源与环境*, 2025, 34(9): 2092
- [28] 刘永婷. 城市发展对嘉兴市水系连通影响及其与水资源耦合关系研究 [D]. 芜湖: 安徽师范大学, 2018
- [29] 黄河. 城市-水系格局动态演变分析及响应机制研究 [D]. 郑州: 郑州大学, 2021
- [30] 谢欢. 水环境综合整治技术及效果评价研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2021
- [31] 杨怡康, 蒋毓琪, 田文博, 等. 黄河流域资源型城市韧性与碳排放的耦合协调、时空演进与空间集聚 [J]. *水土保持通报*, 2025, 45(6): 259
- [32] 刘培, 魏乾坤, 陈秋伶. 珠江三角洲典型复杂河网区水系连通及调度研究 [J]. *水利水电技术(中英文)*, 2024, 55(1): 113

Water system connectivity and urban development coordination in the Pearl River Delta urban agglomeration

Yang Wei¹⁾, Wang Yaqin¹⁾, Shen Yu¹⁾, Zeng Xiufen²⁾, Jian Zihong²⁾

(1) China Land Surveying and Planning Institute, Beijing, China;

2) Guangdong Provincial Institute of Surveying and Mapping, Guangzhou, Guangdong, China)

Abstract Under the double pressure of global climate change and rapid urbanization, river system connectivity becomes a critical factor for regional water security and urban sustainable development. In this study high-resolution remote sensing imagery was used to extract water body data in the highly urbanized Pearl River Delta. A comprehensive assessment system is constructed for river connectivity, covering both structural and functional aspects (river network density, water surface ratio, circuitry, and node connectivity). Urban development indicators are incorporated and analytic hierarchy process-entropy weight method (AHP-EWM) is used to determine weights. Coupling coordination degree model (CCDM) is used to quantitatively evaluate interaction between river system connectivity and urban development in the region for 2024. Significant spatial variations are found in connectivity, with Foshan, Zhuhai, and Dongguan exhibiting structural advantages. Urban development is found to follow a “dual-core pattern led by Guangzhou and Shenzhen”, aligning with their economic levels. Coupling coordination analysis indicates that cities like Guangzhou, Foshan, and Dongguan are at an “intermediate coordination” stage, while peripheral cities Jiangmen, Zhaoqing, and Huizhou are in an “imbalanced decline” state. In this research we find the intrinsic feedback mechanisms between river systems and urban functions in rapidly urbanizing areas; this provides scientific support for spatial planning, water ecological security, and harmonious human-water development in the Pearl River Delta.

Keywords water system connectivity; urban development; coupling coordination degree; Pearl River Delta; analytic hierarchy process - entropy weight method (AHP-EWM)

【责任编辑: 范 林】