

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.04.010

东江下游流域城水耦合协调关系评价及其影响因素

林蔚¹, 陈梓林², 李晖¹

(1. 华南农业大学林学与风景园林学院, 广东 广州 510642; 2. 深圳大学建筑与城市规划学院, 广东 深圳 518060)

摘要:针对城镇化进程对水资源系统干扰逐步加强的问题, 基于水资源、水环境、水生态子系统构建水资源环境评价体系, 基于空间、人口、社会经济子系统构建城镇化质量评价体系, 测算东江下游流域14个区县单元的城水耦合协调度, 并运用灰色关联模型分析城水动态耦合关系的主要影响因素。结果表明, 2010—2020年大湾区东岸城镇化水平不断提高, 水资源环境水平波动上升, 城水耦合度提升显著, 由磨合阶段转变高水平耦合阶段; 耦合协调度在2010—2015年显著提升, 2016—2020年微弱下降, 其中黄埔、龙华等城市边缘区耦合协调度降幅较为明显, 空间分异显著; 高水平城水耦合关系下, 人口增长、建设用地扩张是胁迫水资源环境的主要因素, 水资源紧缺、用水效率低下以及水生态系统服务功能恶化是限制城镇化发展的主要原因。

关键词:城镇化; 水资源环境; 耦合协调度; 灰色关联模型; 东江流域下游; 粤港澳大湾区

中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2022)04-0066-09

Evaluation of urban-water coupling coordination relationship and its influencing factors in lower reaches of the Dongjiang River Basin // LIN Wei¹, CHEN Zilin², LI Hui¹ (1. College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2. School of Architecture & Urban Planning, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

Abstract: In view of the increasing interference of urbanization on the water resources system, the evaluation system of water resources and environment was built based on water resources, water environment and water ecology subsystems, and the urbanization quality evaluation system was built based on space, population and socio-economic subsystems. The urban-water coupling coordinated degree of 14 districts and counties in the lower reaches of the Dongjiang River Basin was calculated, and the main influencing factors of the urban-water dynamic coupling relationship were analyzed by using the grey correlation model. The results showed that from 2010 to 2020, the urbanization level of the east bank of the Greater Bay Area continued to improve, and the level of water resources environment was fluctuating upward. The urban-water coupling degree had increased significantly, from running-in stage to high-level coupling stage. The coupling coordination degree increased significantly from 2010 to 2015, and declined slightly from 2016 to 2020. The coupling coordination degree of Huangpu District, Longhua District and other urban fringe areas decreased significantly, with significant spatial differentiation. Under the high-level urban-water coupling relationship, population growth and construction land expansion were the main factors that stress the water resources environment. The shortage of water resources, the low efficiency of water use and the deterioration of water ecosystem services are the main reasons that restrict the development of urbanization.

Key words: urbanization; water resources environment; coupling coordination degree; grey correlation model; lower reaches of the Dongjiang River Basin; Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

随着人类活动对自然水循环的影响逐渐加深, 自然生态系统和经济社会系统逐渐演变失衡, 产生了一系列城市水问题, 严重制约了社会经济持续健康发展^[1-2]。人水互动关系增强, 水文系统和人类

系统演变为一个耦合系统^[3]。粤港澳大湾区人口高密度聚集, 水资源与人类社会关系一直都是重要的研究课题, 大湾区水问题亟待思考及解决^[4-6], 已在水资源、水安全、水环境、洪涝灾害等

基金项目: 国家自然科学基金(52078222); 广东省教育厅2020年度普通高校重点科研项目(2020ZDZX1033)

作者简介: 林蔚(1986—), 男, 讲师, 博士, 主要从事数字城乡规划研究。E-mail: gis_xifan@163.com

方面开展了有益探索^[7-10]。通过构建评价指标体系,分析水资源脆弱性和生态敏感性及其演变特征^[11-12]。然而,以上成果多从单方面水问题开展研究,或侧重于生态系统方面的指标体系构建和评价分析,对“自然-社会”复合生态系统间复杂的相互作用考虑不足^[2],难以刻画水资源开发利用、经济社会发展及生态环境保护之间复杂、变化的互馈关系^[13]。

和谐的城水关系是科学配置城市水资源、改善人居环境、实现人与自然协调发展的前提和基础^[2]。随着水问题研究的推进,城镇化与水资源、生态环境的耦合关系分析和耦合协调研究成为热点^[14-16],很多研究通过收集统计数据构建指标体系,以省、市为单元测度耦合协调程度,然而这些研究并未采用生态系统服务表征水循环过程的状态,较少考虑城镇化影响生态系统服务及其时空变化过程,不利于生态文明背景下的城市群发展^[17],对城水耦合关系的支撑有待进一步探讨。

流域是典型的复合生态系统,探析城镇化建设对水资源系统的多维干扰是开展流域治理的重要前提^[18]。随着城镇化进程的推进,东江下游城市群面临着水资源短缺、水环境污染和水生态退化的严峻挑战^[19]。“十四五”时期,我国城镇化将向高质量发展全面转型,亟待通过城水耦合重塑城市建设与水环境之间良性友好的整体关系^[20]。因此,探究流域水资源保护、城市发展与水环境的内在关系,对促进粤港澳大湾区可持续发展具有重要实践价值。本文融合遥感、生态系统服务评估等多种技术方法,构建“水资源-水环境-水生态”的水资源环境系统评价体系,分析其与城镇化质量的耦合协调程度,以期为东江下游城市群提升发展提供参考。

1 研究区概况

东江是粤港澳大湾区东部重要水源地,具有突出的战略地位和生态价值。选取大湾区东部人口集聚、经济发达的下游流域(图1),行政范围包括广州、深圳、东莞、惠州等4市,涉及10个市辖区、3个县区以及1个地级市(无下辖区县)。下游流域整体地势较为平坦,平均高程低于100 m,多年平均温度约20℃,年均降水量为1 200~2 000 mm,水网密布。根据统计年鉴数据,2020年研究区城镇化水平达75%左右^[21]。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

研究数据包括 GlobleLand 30 土地覆被数据、

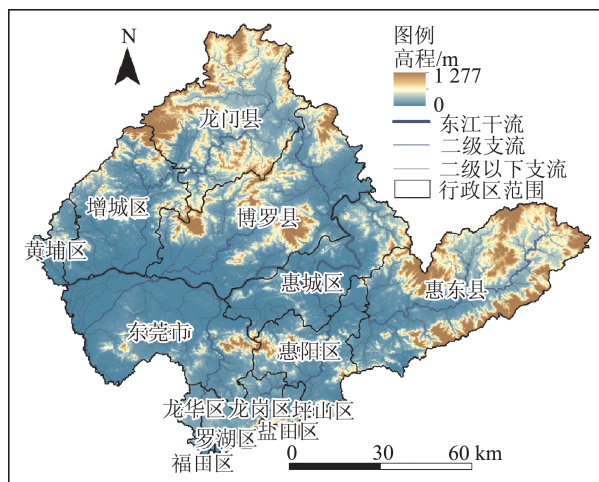


图1 东江下游流域概况

Fig.1 Overview of lower reaches of the Dongjiang River Basin

MODIS 全球蒸散发数据、植被指数数据、精细植被类型数据、气象数据、土壤质地数据、DEM 数据以及各地区社会经济、水资源等统计数据,各数据时间序列均选择2010年、2015年及2020年。其中蒸散发数据来源于MOD16A2 8d合成产品(<https://www.usgs.gov/>),空间分辨率为500 m,对数据进行拼接合成,提取实际总蒸散发波段;植被指数数据来源于MOD13Q1 16合成产品(<https://www.usgs.gov/>),空间分辨率为250 m,采用最大值合成法合成研究区逐月NDVI数据;土壤质地数据来源于寒区旱区科学数据中心(<http://westdc.westgis.ac.cn/>)中国土壤数据集,空间分辨率为1 km;数字高程DEM数据集源自地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>),空间分辨率为30 m;社会经济、水资源及水环境等统计数据源于东江下游流域内广州、深圳、惠州、东莞等地级市统计年鉴、水资源公报等,其中,坪山区(2016年新设)、龙华区(2016年新设)的2010年、2015年部分统计数据分别以龙岗区、宝安区代替。

2.2 指标体系构建

图2为东江下游流域城镇化质量与水资源环境评价指标体系,包括城镇化质量指标体系和水资源环境指标体系两部分(括号中数字为指标权重)。

2.2.1 城镇化质量指标体系

结合研究区城镇化发展情况,借鉴相关研究成果^[22-23],从空间、人口及社会经济发展3个子系统选取6个指标构建城镇化质量指标体系。选取建设用地率反映空间发展情况,人口发展用人口密度和常住人口城镇化率来反映,社会经济发展情况用人

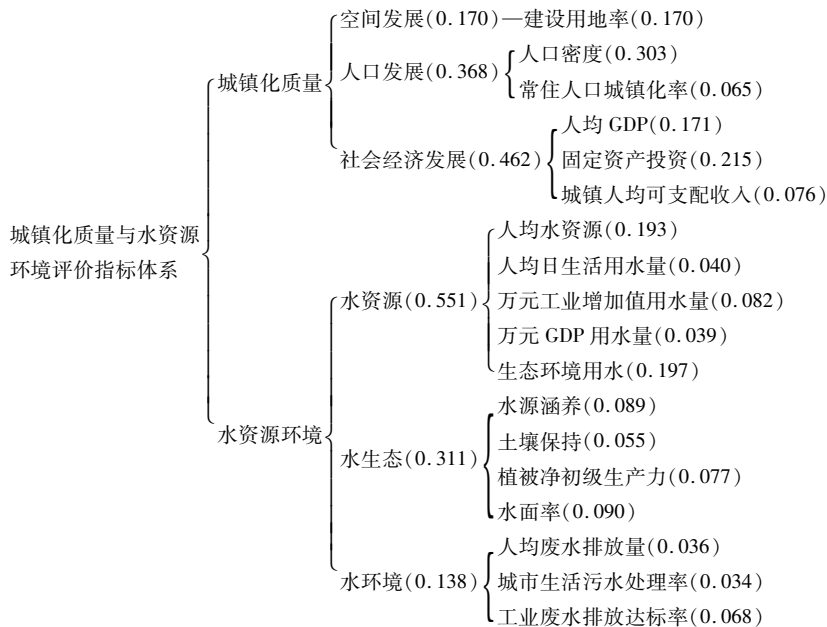


Fig.2 Evaluation index system of urbanization quality and water resources environment

均 GDP、固定资产投资、城镇人均可支配收入来反映。

2.2.2 水资源环境指标体系

流域水资源、水生态与水环境相辅相成,相互制约,水资源对维持城市社会经济发展具有重要意义,完善的水生态功能提供赖以生存的自然环境条件与效用,水环境是与水资源、水生物和污染密切相关的综合体^[18-19]。因此,从水资源、水生态和水环境 3 个子系统选取 12 个指标,构建水资源环境评价指标体系。

a. 水资源。研究区 2010 年以来水资源管理制度深化落实,结合已有评价成果,本文从水资源禀赋条件、用水效率及用水需求等方面选取人均水资源量、人均日生活用水量、万元工业增加值用水量以及万元 GDP 用水量、生态环境用水量等 5 个指标进行评价。

b. 水生态。传统的水生态功能评价多采用监测指标或统计数据,本文引入维持水生态系统服务的重要因子:水源涵养、土壤保持、植被净初级生产力以及水面率共同评价水生态功能。其中水源涵养利用 InVEST 模型产水模块中的水量平衡法的变形式进行计算^[24];土壤保持通过修正水土流失方程计算年平均土壤流失量^[25],数值越大,土壤保持能力越差,为负向指标;植被净初级生产力采用 CASA 模型进行计算^[26];水面率为河道面积与区域面积之比^[27]。

c. 水环境。良好的水环境质量是流域社会经济绿色协调、可持续发展的重要体现^[19]。结合当前研究区水环境治理政策实施情况,选取人均废水排

放量、城市生活污水处理率、工业废水排放达标率 3 个指标表征城市水环境状态。

2.2.3 数据标准化处理

由于评价指标存在量纲和属性差异,需引用极差标准化法对正、负向指标数据进行标准化处理^[22],公式分别为

$$Z_{ij} = \frac{X_{ij} - X_{jmin}}{X_{jmin} - X_{jmin}} \quad (1)$$

$$Z_{ij} = \frac{X_{jmax} - X_{ij}}{X_{jmax} - X_{jmin}} \quad (2)$$

式中: Z_{ij} 为系统 i 指标 j 标准化后的指标值,其取值范围为 $[0,1]$; X_{ij} 为原始值; X_{jmax} 、 X_{jmin} 分别为指标 j 的最大值和最小值。

2.2.4 指标权重确定及综合评价指数计算

熵权法通过计算指标信息熵确定权重系数,能有效消除主观因素影响^[28-29],故采用熵权法计算指标权重,图2 括号中为权重值。依据指标标准化值与权重系数,加权计算城镇化质量与水资源环境综合评价指数,计算公式为

$$f(U) = \sum_{i=1}^a m_i U_i \quad (3)$$

$$g(E) = \sum_{i=1}^b n_i E_i \quad (4)$$

式中: $f(U)$ 为城镇化质量综合评价指数; $g(E)$ 为水资源环境综合评价指数; m_i 与 n_i 为评价指标权重; U_i 与 E_i 分别为城镇化质量和水资源环境标准化指标值; a 和 b 为各系统指标数量。

2.3 耦合协调度模型

耦合度模型能够探究城镇化与水资源环境相互

影响程度,反映城水系统无序和有序状态的转变过程,展现系统内部组成要素间的动态关联关系^[30],耦合度越高,表明系统间关联程度越强^[16]。结合相关研究及实际情况,将城镇化质量与水资源环境耦合度 C 划分为 4 个等级: $C \in (0, 0.3]$ 表示处于低水平耦合阶段, $C \in (0.3, 0.5]$ 表示拮抗阶段, $C \in (0.5, 0.8]$ 表示磨合阶段, $C \in (0.8, 1.0]$ 表示高水平耦合阶段。耦合度计算公式^[31]为

$$C = \left\{ \frac{f(U)g(E)}{[f(U) + g(E)]^2} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

耦合度虽反映系统间相互作用程度,但无法表征各功能间是高水平的相互促进还是低水平相互制约^[31],因此进一步引入耦合协调度模型,量化城水系统在发展过程中的均衡状态和协调程度,着重分析系统之间的良性互动关系^[30]。结合相关研究及实际情况,将耦合协调度 D 划分为 6 个等级: $D \in (0, 0.2]$ 表示城水关系严重失调, $D \in (0.2, 0.4]$ 表示中度失调, $D \in (0.4, 0.5]$ 表示濒临失调, $D \in (0.5, 0.6]$ 表示勉强协调, $D \in (0.6, 0.8]$ 表示中度协调, $D \in (0.8, 1.0]$ 表示高度协调。耦合协调度计算公式^[31]为

$$D = \sqrt{CT} \quad (6)$$

其中 $T = \alpha f(U) + \beta g(E)$

式中: T 为城镇化质量与水资源环境综合发展指数; α 和 β 为系数,本研究认为两者同等重要,因此取 $\alpha = \beta = 0.5$ 。

2.4 灰色关联度模型

城镇化质量与水资源环境交互耦合关系复杂多样,因此引入灰色关联度模型定量分析城镇化质量与水资源环境系统间的动态耦合关系,揭示城水耦合关系的主要影响因素。灰色关联分析是依据各因素序列曲线几何形状的相似程度来判断其联系紧密程度的方法,通过计算要素间的关联系数,根据关联系数对于样本数的平均数计算评价要素间的关联度,对关联度进行排序得到对某一对象影响程度的大小,关联度越大,影响程度就越大。关联度计算公式为

$$\gamma_{ij} = \frac{1}{m} \sum_{t=1}^m \xi_{ijt} \quad t = 1, 2, \dots, m \quad (7)$$

其中

$$\xi_{ijt} = \frac{\min_i \min_j |Z_{Uit} - Z_{Ejt}| + \rho \max_i \max_j |Z_{Uit} - Z_{Ejt}|}{|Z_{Uit} - Z_{Ejt}| + \rho \max_i \max_j |Z_{Uit} - Z_{Ejt}|}$$

式中: γ_{ij} 为比较序列与参考序列整体关联度; m 为时刻数; ξ_{ijt} 为 t 时刻评价指标与参考序列对应元素的关联系数; Z_{Uit} 和 Z_{Ejt} 分别为各县(区) t 时刻的城镇

化质量与水资源环境指标标准化值; ρ 为分辨率系数,一般取值 0.5。

通过比较各个指标关联度 γ_{ij} 的大小,可以分析城镇化质量与水资源环境系统内部指标相互关联程度。 γ_{ij} 介于 0~1 区间,值越接近 1 代表系统间关联性越大。参考相关研究,关联度取值范围及其判断标准划分为 4 个等级: $\gamma_{ij} \in (0.00, 0.35]$ 表示二者为低水平关联状态, $\gamma_{ij} \in (0.35, 0.65]$ 表示中等关联, $\gamma_{ij} \in (0.65, 0.85]$ 表示高度关联, $\gamma_{ij} \in (0.85, 1.00]$ 表示极强关联。

3 结果与分析

3.1 城镇化质量与水资源环境综合评价

3.1.1 城镇化质量时空分异特征

自 2010 年以来,研究区城镇化质量各项指标均呈现稳步提升,常住人口城镇化率由 78% 提升至 85%,人均 GDP 上涨 1 倍,人口密度也大幅提高。2016—2020 年,固定资产投资及城镇居民人均可支配收入得到大幅提升。总体而言,2010—2020 年城镇化质量综合指数整体呈持续上升趋势,由 0.34 增加至 0.48,其中黄埔、增城、坪山、龙华以及惠城等区提升较为明显。研究区城镇化水平存在显著空间差异,城镇化质量指数高值区主要集中于大湾区腹地的东江下游河段及其左岸支流石马河流域,主要包括福田、罗湖、龙华、盐田、黄埔、东莞等市区。而低值区分布于靠近上游河段的右岸公庄水流域及左岸西枝江流域,包括龙门、惠东、惠阳、博罗等县,整体呈现上游河段至下游河段城镇化水平递增的空间格局特征(表 1)。

3.1.2 水资源环境水平时空分异特征

研究区水资源层面整体趋向良性发展,2010—2020 年人均日生活用水量已下降 35 L/d,水资源利用效率也大幅提升,万元工业增加值用水量及万元 GDP 用水量逐渐降低,表明研究区用水结构逐步优化。人均水资源 2010—2020 年由 2 161.96 m³ 下降至 1 804.65 m³,低于全省平均水平。水生态层面的水土保持、水源涵养等水生态系统服务功能出现明显恶化趋势,主要原因是粗放的扩张建设导致植被覆盖度减少。数据分析显示,2010—2020 年植被净生产力呈现下降趋势,土壤流失量增加 16.54%,地表径流量由年均 3 933.78 m³/hm² 上升至 5 288.32 m³/hm²,水源涵养量下降 7.34%,表明研究区面临较为严峻的水土流失问题。同时,由于河流截弯取直等工程破坏水系结构,水面率也下降 6.43%。而水环境治理行动取得明显成效,污水排放处理各项指标均有所提升。

表1 2010—2020年各区县城镇化质量综合评价指数
Table 1 Comprehensive evaluation index of urbanization quality of each district and county from 2010 to 2020

年份	龙门县	博罗县	惠城区	惠东县	惠阳区	黄埔区	增城区
2010	0.011	0.068	0.183	0.065	0.142	0.330	0.162
2015	0.018	0.127	0.235	0.082	0.178	0.485	0.211
2020	0.037	0.179	0.286	0.125	0.192	0.538	0.315
年份	东莞市	龙华区	龙岗区	坪山区	福田区	罗湖区	盐田区
2010	0.519	0.493	0.492	0.399	0.783	0.543	0.508
2015	0.554	0.617	0.574	0.444	0.805	0.583	0.571
2020	0.593	0.673	0.646	0.516	0.849	0.629	0.651

水资源环境综合评价指数整体呈现波动变化趋势,2010—2015年水资源环境水平稳步提升,由0.38提升至0.42,2016—2020年则下降至0.40,呈微弱下降趋势。2010—2015年,提升较为明显的包括龙门县、博罗县、惠城区、增城区及东莞市等干流沿岸地区(表2),其主要原因是研究区流域重要河段的水环境治理与修复取得成效;而这些地区在2015—2020年水资源环境水平整体有所下降,初步判断为城镇化进程加快导致水资源过度消耗和水生态空间遭受严重挤占。而下游河段发达城区如福田区、龙华区、东莞市、坪山区等水资源环境水平在2015年后有所回升,该片区生态环境投入大幅增加,水污染排放有效控制与治理修复促使水资源环境得到明显改善,加之水资源利用效率有所提升,使得水资源环境逐渐恢复。研究区水资源环境水平空间差异较小,下游河段整体水平略优于上游河段,东莞市、石马河流域的盐田区及增江流域的龙门县处于较高水平。

表2 2010—2020年各区县水资源环境综合评价指数
Table 2 Comprehensive evaluation index of water resources environment of each district and county from 2010 to 2020

年份	龙门县	博罗县	惠城区	惠东县	惠阳区	黄埔区	增城区
2010	0.443	0.321	0.364	0.344	0.305	0.394	0.432
2015	0.490	0.385	0.392	0.373	0.331	0.394	0.452
2020	0.464	0.358	0.401	0.318	0.317	0.346	0.424
年份	东莞市	龙华区	龙岗区	坪山区	福田区	罗湖区	盐田区
2010	0.471	0.375	0.344	0.361	0.401	0.423	0.526
2015	0.491	0.373	0.335	0.378	0.364	0.420	0.492
2020	0.521	0.377	0.365	0.404	0.402	0.433	0.529

3.2 城镇化质量与水资源环境耦合协调时空分异特征

3.2.1 耦合度时空分异特征

2010—2020年,研究区城镇化质量与水资源环境耦合度整体呈现逐步上升趋势,自0.702提升至0.813,由磨合阶段转变为高水平耦合阶段,反映了城镇化发展水平与水资源环境高度关联,相互作用程度逐渐提升。表3为各区县城镇化质量与水资源

环境耦合度情况,可见耦合度持续上升且涨幅较大地区包括坪山、增城、东莞、博罗、惠城等区县。耦合度出现波动变化的主要有黄埔区与龙岗区,在2010—2015年呈现下降趋势,水资源环境水平提升速度难以匹配城镇化发展进程。其中,龙岗区由0.837降至0.695,高水平耦合阶段退化为磨合阶段;黄埔区仍大于0.8,处于高水平耦合阶段,而随着下游河段地区城镇化进程进入高质量发展阶段,龙岗区、黄埔区在2016—2020年阶段耦合度回升至高水平耦合阶段,水资源环境与城镇化发展相互适应。东江下游左岸石马河流域包括福田区、盐田区、罗湖区等城区。耦合度变化幅度较小,始终处于高水平耦合阶段,城镇化质量与水资源环境同步发展。2010—2020年,各区县耦合度差异逐步缩小,但仍然存在明显的空间分异特征,高值区主要分布在东江干流沿岸及其左岸支流石马河流域,包括东莞市、深圳市各区及博罗县等地区,占研究区面积的78.3%;而低值区主要分布在龙门县、惠东县、惠阳区。

表3 2010—2020年各区县城镇化质量与水资源环境耦合度
Table 3 Coupling degree of urbanization quality and water resources environment in each district and county from 2010 to 2020

年份	龙门县	博罗县	惠城区	惠东县	惠阳区	黄埔区	增城区
2010	0.250	0.426	0.546	0.345	0.439	0.923	0.808
2015	0.325	0.689	0.702	0.518	0.593	0.862	0.893
2020	0.404	0.721	0.792	0.540	0.642	0.978	0.954
年份	东莞市	龙华区	龙岗区	坪山区	福田区	罗湖区	盐田区
2010	0.898	0.815	0.837	0.845	0.821	0.802	0.878
2015	0.982	0.837	0.695	0.930	0.909	0.981	0.993
2020	0.998	0.892	0.847	0.984	0.906	0.990	0.991

3.2.2 耦合协调度时空分异特征

表4为各区县城镇化质量与水资源环境耦合协调度情况。2010—2020年,研究区城镇化质量与水资源环境耦合协调度整体呈波动上升趋势,其中2010—2015年阶段由0.557提升至0.612,由勉强协调状态转变为中度协调状态,提升较为明显地区主要为东江干流沿岸博罗、惠城、东莞、增城等区县,得益于这期间东江下游开展专项治水行动,以水生态修复为抓手,以水污染治理为重点,提升整体水环境质量,城镇化发展进程也持续推进,城水关系趋向协调共生。2016—2020年阶段耦合协调度下降至0.584,呈微弱下降趋势,整体状态仍为中度协调。降幅较大的区县包括黄埔、龙华、增城、惠阳,其中黄埔区由中度协调退化为失调状态,增城区与龙华区由中度协调状态转变为濒临失调状态。近年来,粤港澳大湾区边缘区优化增长和核心区有机更新成为新的发展趋势,如黄埔、龙华、增城等城市边缘区逐

渐成为发展重心。然而,人口快速聚集,人均生活用水和水资源开发压力急剧上升,生活、生产废水排放量持续提升,粗放的建设用地扩张造成水生态系统服务功能逐渐退化,水资源环境质量呈明显下降趋势,难以匹配城镇化快速发展进程,城水关系出现恶化。相较于城市边缘区的粗放扩张,下游河段福田区、罗湖区、盐田区、东莞市等城市核心区近年来进入高质量发展阶段,城镇化与水资源环境基本达到高度协调状态。这些片区随着环保投入的增加、水环境治理能力的强化、水资源利用效率提升、生态滨水空间修复改造等举措逐步落实,水资源环境整体水平得到有效改善,并促进城镇化可持续发展,推动城水关系呈现高水平相互促进,达到协调共生。2010—2020 年,各区县耦合协调度差距有所缩小,但仍然存在显著差异,下游河段整体优于上游河段,其主要原因是区域城镇化发展不平衡以及面临水资源环境压力不一致。上游河段地区包括龙门、博罗、惠东等区县城镇化水平较低,但水资源本底条件较好。2010—2015 年,上游河段地区耦合协调度整体提升显著;随着城镇化对水资源环境的胁迫增强,2016—2020 年耦合协调度出现下降,部分地区回落至失调状态。而下游河段地区耦合协调度虽有波动变化,但整体仍维持在中度协调状态。

表 4 2010—2020 年各区县城镇化质量与水资源环境耦合协调度

Table 4 Coupling coordination degree of urbanization quality and water resources environment in each district and county from 2010 to 2020							
年份	龙门县	博罗县	惠城区	惠东县	惠阳区	黄埔区	增城区
2010	0.281	0.295	0.454	0.358	0.208	0.543	0.590
2015	0.406	0.510	0.506	0.416	0.486	0.669	0.638
2020	0.373	0.478	0.592	0.385	0.373	0.442	0.586
年份	东莞市	龙华区	龙岗区	坪山区	福田区	罗湖区	盐田区
2010	0.837	0.571	0.582	0.602	0.810	0.779	0.894
2015	0.905	0.641	0.489	0.606	0.642	0.766	0.887
2020	0.950	0.593	0.642	0.801	0.833	0.812	0.929

3.3 高水平耦合状态下城水关系影响因素

城镇化质量与水资源环境的耦合关系可从城镇化发展对水资源环境的胁迫和水资源环境对城镇化的制约两个方面进行分析^[30]。城镇化发展需要从水资源环境获取大量能量和物质,而该进程可能会对水资源环境产生胁迫作用,导致水资源环境恶化,各种水问题频发;另一方面,水资源环境是城镇化发展的重要承载条件,将对城镇化发展产生约束作用,当通过有效措施(如控制城镇人口、加大环保投入、提升水资源利用效率)改善水资源环境时,可促进城镇化发展质量提升(图 3)。高水平耦合阶段下,

城镇化质量与水资源环境系统内部组成要素交互耦合将推动城水系统走向良性或恶性的互动关系。为进一步厘清城水耦合关系的影响因素,以达到高水平耦合状态的 2020 年城镇化质量综合指数与水资源环境综合指数为参考序列,计算系统指标要素间的灰色关联度并排序,进一步揭示城水系统内部各要素交互耦合特征。

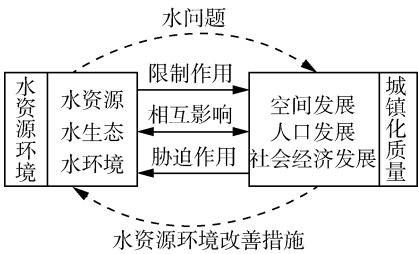


图 3 城水耦合机制

Fig. 3 Urban-water coupling mechanism

3.3.1 城镇化发展对水资源环境的主要胁迫因素

城镇化质量对水资源环境的综合关联度为 0.676,表明城镇化发展对水资源环境胁迫作用显著,主要胁迫因素为:人口密度(与水资源环境关联度最高,为 0.861)、建设用地率(关联度为 0.776)、人口城镇化率(关联度为 0.738)。人口要素是衡量城镇化水平的基础指标,也是地区水资源环境承载力剧增的重要原因。2010—2020 年,研究区人口快速增长,人均水资源持续下降,用水需求也急速上升,对水资源环境系统产生胁迫影响最大,这也促使下游河段发达城区不断提升水资源利用效率,并实施城镇人口、产业用水限制等相关政策保护水资源环境。建设用地扩张是城镇化进程的主要体现,但同时也挤占水生态空间并导致巨大的水资源消耗和水污染排放。2010—2020 年,研究区建设用地率增加 6.34%,2010—2015 年建设用地增加集中在研究区下游河段地区,2016—2020 年上游河段建设用地扩张明显,造成区域植被覆盖锐减,水生态系统服务功能逐渐退化,水资源环境面临严峻挑战。人均 GDP(关联度为 0.636)提升对水资源环境也有一定影响,经济产业快速发展可能导致水环境污染、水资源浪费以及治水成本提升。城镇人均可支配收入(关联度为 0.582)、固定资产投资(关联度为 0.464)对水资源环境的胁迫程度较小。

3.3.2 水资源环境对城镇化发展主要制约因素

水资源环境对城镇化质量的综合关联度为 0.642,表明水资源环境系统对城镇化发展具有较大的约束作用。其中,水资源环境系统与城镇化发展的关联度由大到小排序为:水资源层面(0.713)、水生态层面(0.621)、水环境层面(0.614)。制约城镇

化发展的主要水资源环境因素包括:人均水资源(与城镇化质量关联度最高,为0.858)、水源涵养功能(关联度为0.810)、单位GDP用水量(关联度为0.738)、工业废水排放达标率(关联度为0.672)、万元工业增加值用水量(关联度为0.656)等,表明水资源禀赋条件及用水效率对城镇化发展极为重要。研究区当前用水规模偏大,水资源本底条件及用水效率区域差异明显,制约了城镇化高质量发展。同时,水生态系统服务功能同样影响城镇化质量提升。近年来,龙门、惠东、博罗等山区县由于建设用地扩张、农田开垦导致植被覆盖度降低、土壤侵蚀性增强,河道硬化、截弯取直工程破坏河流自然形态,严重影响河网调蓄功能;水污染日趋严重,水环境治理较为滞后,也成为城镇化质量提升的阻碍之一。生活污水处理率(关联度为0.646)、人均日生活用水量(关联度为0.640)、固碳功能(关联度为0.624)、人均废水排放量(关联度为0.608)、水土保持功能(关联度为0.566)、河网调蓄功能(关联度为0.509)、生态环境用水量(关联度为0.482)等其他水资源环境因素对城镇化发展制约程度较小。

4 结 论

a. 城镇化质量综合评价指数呈现持续上升趋势,但区域间发展极不均衡,下游河段城镇化发展水平远超上游河段;水资源环境综合水平呈现波动变化趋势,2010—2015年稳步提升,2016—2020年出现微弱下降趋势,区域差异较小,下游河段整体水资源环境略优于上游河段。

b. 城镇化质量与水资源环境耦合度逐步上升,由磨合阶段转变至高水平耦合阶段,不同地区耦合度差异逐渐缩小,但仍存在明显的空间分异特征;城镇化质量与水资源环境耦合协调度时序变化出现波动,2010—2015年耦合协调度显著提升,由勉强协调状态转变为中度协调状态,2016—2020年微弱下降,但仍为中度协调状态。耦合协调度空间差异同样显著,下游河段优于上游河段,这与区域城镇化发展不平衡以及面临水资源环境压力不一致有关。

c. 高水平耦合状态下,城镇人口快速增长及建设用地的粗放扩张是城镇化发展胁迫水资源环境的主要因素;水资源紧缺的本底条件、不合理的用水效率以及逐渐恶化的水生态系统服务功能是水资源环境限制城镇化发展的主要原因。

参考文献:

[1] 王浩,贾仰文,杨贵羽,等. 海河流域二元水循环及其伴生过程综合模拟[J]. 科学通报, 2013, 58(12):

1064-1077. (WANG Hao, JIA Yangwen, YANG Guiyu, et al. Integrated simulation of the dualistic water cycle and its associated processes in the Haihe River Basin [J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(12): 1064-1077. (in Chinese))

[2] 王浩,王佳,刘家宏,等. 城市水循环演变及对策分析[J]. 水利学报, 2021, 52(1): 3-11. (WANG Hao, WANG Jia, LIU Jiahong, et al. Analysis of urban water cycle evolution and countermeasures [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(1): 3-11. (in Chinese))

[3] BLAIR P, BUYTAERT W. Socio-hydrological modelling: a review asking “why, what and how?” [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2016, 20(1): 443-478.

[4] 李郁,周金苗,黄耀福,等. 从巨型城市区域视角审视粤港澳大湾区空间结构[J]. 地理科学进展, 2018, 37(12): 1609-1622. (LI Xun, ZHOU Jingmiao, HUANG Yaofu, et al. Understanding the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area from the perspective of megacity region [J]. Progress in Geography, 37(12): 1609-1622. (in Chinese))

[5] 王大洋,王大刚. 粤港澳大湾区背景下广东省9市人水和谐关系时空特性研究[J]. 水资源与水工程学报, 2020, 31(5):23-29. (WANG Dayang, WANG Dagang. Spatiotemporal distribution characteristics of the human: water harmony in nine cities of Guangdong Province under the background of the Great Bay Area [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2020, 31(5):23-29. (in Chinese))

[6] 李骏飞,杨磊三,孟凡松. 粤港澳大湾区面临的水问题探析[J]. 中国给水排水, 2019, 35(18): 10-14. (LI Junfei, YANG Leisan, MENG Fansong. Discussion on water problems of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(18): 10-14. (in Chinese))

[7] 吴盼,赵信文,顾涛,等. 粤港澳大湾区水资源现状及其与社会经济协同演化趋势: 与国际湾区对比研究[J]. 中国地质, 2021, 48(5):11. (WU Pan, ZHAO Xinwen, GU Tao, et al. Current situation of water resources and its co-evolution trend with social economy in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area: a comparative study with the international bay area [J]. Geology in China, 2021, 48(5):11. (in Chinese))

[8] 高真,黄本胜,邱静,等. 粤港澳大湾区水安全保障存在的问题及对策研究[J]. 中国水利, 2020(11): 6-9. (GAO Zhen, HUANG Bensheng, QIU Jing, et al. Research on the water security issues and suggestions in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area [J]. China Water Resources, 2020(11): 6-9. (in Chinese))

[9] 张万顺,张紫倩,彭虹,等. 粤港澳大湾区金山湖流域水质变化规律[J]. 水资源保护, 2021, 37(5):1-8.

- (ZHANG Wanshun, ZHANG Ziqian, PENG Hong, et al. Water quality variations of Jinshan Lake Basin in Guangdong, Hong Kong and Macao Great Bay Area [J]. Water Resources Protection, 2021, 37 (5): 1-8. (in Chinese))
- [10] 陈文龙, 何颖清. 粤港澳大湾区城市洪涝灾害成因及防御策略[J]. 中国防汛抗旱, 2021, 31(3): 14-19. (CHEN Wenlong, HE Yingqing. Causes and prevention strategies on urban flood disasters in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area [J]. China Flood & Drought Management, 2021, 31 (3): 14-19. (in Chinese))
- [11] 林钟华, 刘丙军, 伍颖婷, 等. 变化环境下珠三角城市群水资源脆弱性评价[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2018, 57(6): 8-16. (LIN Zhonghua, LIU Bingjun, WU Yingting, et al. Assessment of water resource vulnerability of the Pearl River Delta metropolitan under environment change [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2018, 57(6): 8-16. (in Chinese))
- [12] 甘琳, 陈颖彪, 吴志峰, 等. 近 20 年粤港澳大湾区生态敏感性变化[J]. 生态学杂志, 2018, 37(8): 228-237. (GAN Lin, CHEN Yingbiao, WU Zhifeng, et al. The variation of ecological sensitivity in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area in recent 20 years [J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(8): 228-237. (in Chinese))
- [13] LUO Zengliang, ZUO Qiting. Evaluating the coordinated development of social economy, water, and ecology in a heavily disturbed basin based on the distributed hydrology model and the harmony theory[J]. Journal of Hydrology, 2019, 574: 226-241.
- [14] 吕添, 吴次芳, 李冠, 等. 基于耦合模型的赣江水源保护区城市发展与水资源环境关系研究[J]. 水土保持研究, 2014, 21(6): 271-277. (LYU Tian, WU Cifang, LI Guan, et al. Study on the relationship between the urban development and the environment of water resources in Ganjiang river based on coupling model [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2014, 21 (6): 271-277. (in Chinese))
- [15] 焦士兴, 王安周, 李青云, 等. 河南省城镇化与水资源耦合协调发展状况[J]. 水资源保护, 2020, 36(2): 21-26. (JIAO Shixing, WANG Anzhou, LI Qingyun, et al. Study on coupling and coordinated development of urbanization and water resources in Henan Province [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(2): 21-26. (in Chinese))
- [16] 童彦, 潘玉君, 张梅芬, 等. 云南省城市化与水资源的耦合协调发展研究[J]. 水土保持通报, 2020, 40(6): 243-248. (TONG Yan, PAN Yujun, ZHANG Meifen, et al. Coupling and coordinated development of urbanization and water resources in Yunan Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(6): 243-248. (in Chinese))
- [17] 王世豪, 黄麟, 徐新良, 等. 粤港澳大湾区生态系统服务时空演化及其权衡与协同特征[J]. 生态学报, 2020, 40(23): 8403-8416. (WANG Shihao, HUANG Lin, XU Xinliang, et al. Spatial and temporal evolution of ecosystem services and its trade-offs and synergies in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(23): 8403-8416. (in Chinese))
- [18] 王浩, 王建华, 胡鹏. 水资源保护的新内涵: “量-质-域-流-生”协同保护和修复[J]. 水资源保护, 2021, 37(2): 1-9. (WANG Hao, WANG Jianhua, HU Peng. New connotation of water resources protection: “quantity-quality-domain-connectivity-biology” coordinated protection and restoration [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(2): 1-9. (in Chinese))
- [19] 何艳虎, 郭红江, 谭倩, 等. 广东省东江流域显著水问题类型识别[J]. 水资源保护, 2021, 37(5): 16-21. (HE Yanhu, GUO Hongjiang, TAN Qian, et al. Type identification of significant types of water problems in the Dongjiang River Basin, Guangdong Province [J]. Water Resources Protection, 2021, 37 (5): 16-21. (in Chinese))
- [20] 王世福, 张晓阳. 以“城水耦合”实现“城水共生”[N]. 光明日报, 2020-10-09.
- [21] 吕乐婷, 张杰, 彭秋志, 等. 东江流域景观格局演变分析及变化预测[J]. 生态学报, 2019, 39(18): 6850-6859. (LYU Leting, ZHANG Jie, PENG Qiuzhi, et al. Landscape pattern analysis and prediction in the Dongjiang River Basin [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(18): 6850-6859. (in Chinese))
- [22] 郑炜. 广东省新型城镇化质量与水资源安全耦合分析[J]. 人民长江, 2019, 50(1): 95-101. (ZHENG Wei. Coupling analysis of new urbanization quality and water resources safety in Guangdong Province [J]. Yangtze River, 2019, 50(1): 95-101. (in Chinese))
- [23] 王少剑, 崔子恬, 林靖杰, 等. 珠三角地区城镇化与生态韧性的耦合协调研究[J]. 地理学报, 2021, 76(4): 973-991. (WANG Shaojian, CUI Zitian, LIN Jingjie, et al. Coupling relationship between urbanization and ecological resilience in the Pearl River Delta [J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(4): 973-991. (in Chinese))
- [24] 王秀明, 刘谓承, 龙颖贤, 等. 基于改进的 InVEST 模型的韶关市生态系统服务功能时空变化特征及影响因素[J]. 水土保持研究, 2020, 27(5): 381-388. (WANG Xiuming, LIU Xucheng, LONG Yingxian, et al. Spatial-temporal changes and influencing factors of ecosystem services in Shaoguan City based on improved InVEST [J].

- Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27 (5): 381-388. (in Chinese))
- [25] 苏春生, 吴孝情, 陈晓宏, 等. 土地覆盖类型变化对梯度发展流域的土壤侵蚀动态影响[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2018, 57(2): 32-41. (SU Chunsheng, WU Xiaoqing, CHEN Xiaohong, et al. Dynamic impacts of land-cover change on soil erosion in a gradient development basin [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2018, 57 (2): 32-41. (in Chinese))
- [26] 朱文泉, 潘耀忠, 张锦水. 中国陆地植被净初级生产力遥感估算[J]. 植物生态学报, 2007 (3): 413-424. (ZHU Wenquan, PAN Yaozhong, ZHANG Jinshui. Estimation of net primary productivity of Chinese terrestrial vegetation based on remote sensing[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2007 (3): 413-424. (in Chinese))
- [27] 王跃峰, 许有鹏, 张倩玉, 等. 太湖平原区河网结构变化对调蓄能力的影响[J]. 地理学报, 2016, 71(3): 449-458. (WANG Yuefeng, XU Youpeng, ZHANG Qianyu, et al. Influence of stream structure change on regulation capacity of river networks in Taihu Lake Basin [J]. Acta Geographica Sinica, 2016, 71 (3): 449-458. (in Chinese))
- [28] 林珍铭, 夏斌. 熵视角下的广州城市生态系统可持续发展能力分析[J]. 地理学报, 2013, 68 (1): 45-57. (LIN Zhenming, XIA Bin. Analysis of sustainable development ability of the urban ecosystem in Guangzhou City in the perspective of entropy [J]. Acta Geographica Sinica, 2013, 68(1): 45-57. (in Chinese))
- [29] 艾亚迪, 魏传江, 马真臻. 基于 AHP-熵权法的西安市水资源开发利用程度评价[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40 (2): 11-16. (AI Yadi, WEI Chuanjiang, MA Zhenzhen. Evaluation on water resources development and utilization degree based on AHP-entropy weight method [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(2): 11-16. (in Chinese))
- [30] 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.
- [31] 张凤太, 苏维词. 贵州省水资源-经济-生态环境-社会系统耦合协调演化特征研究[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(6): 44-49. (ZHANG Fengtai, SU Weici. The Evolution characteristics of coupling and coordination of water resources-economy-environment-society system in Guizhou [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015, 34 (6): 44-49. (in Chinese))

(收稿日期: 2021-06-30 编辑: 王芳)

(上接第 65 页)

- [23] 李国栋, 张俊华, 王乃昂, 等. 基于重标极差分析和非周期循环分析的气候变化趋势预测: 以兰州市为例[J]. 干旱区研究, 2013, 30 (2): 299-307. (LI Guodong, ZHANG Junhua, WANG Naiang, et al. Prediction of climate change trend based on rescaled range analysis and non-periodic cycle analysis: a case study in lanzhou city [J]. Arid Zone Research, 2013, 30 (2): 299-307. (in Chinese))
- [24] 张鑫, 蔡焕杰, 尹晓楠. 应用重标度极差分析法(R/S)分析无定河流域水沙变化[J]. 农业工程学报, 2010, 26 (增刊 2): 212-217. (ZHANG Xin, CAI Huanjie, YIN Xiaonan. Variation trends analysis of runoff and sediment time series based on R/S method in Wuding River Basin [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(Sup2): 212-217. (in Chinese))
- [25] 史贵君, 郭力源, 林涛, 等. 深圳市降水变化特征及其未来变化情况预测[J]. 长江科学院院报, 2020, 37(5): 28-33. (SHI Guijun, GUO Liyuan, LI Tao, et al. Variation characteristics and future changes of precipitation in Shenzhen [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2020, 37(5): 28-33. (in Chinese))
- [26] 许月卿, 李双成, 蔡运龙. 基于小波分析的河北平原降水变化规律研究[J]. 中国科学: D 辑 地球科学, 2004 (12): 1176-1183. (XU Yueqing, LI Shuangcheng, CAI Yunlong. The research on precipitation change in Hebei Plain based on wavelet analysis [J]. Science in China: Series D Earth Science, 2004, 34 (12): 1176-1183. (in Chinese))
- [27] 黄奇章. 广东降水气候特征及其成因分析[J]. 热带地理, 1990(2): 113-124. (HUANG Qizhang. The analysis of the precipitation-climate characteristics and causes of formation in Guangdong Province [J]. Tropical Geography, 1990(2): 113-124. (in Chinese))
- [28] 赵嘉阳, 王文辉, 靳全锋, 等. 基于 EOF 的福建省降水量时空变化特征分析[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2017, 31 (2): 73-79. (ZHAO Jiayang, WANG Wenhui, JIN Quanfeng, et al. Analyzing spatial and temporal distributions of precipitation in Fujian Province using empirical orthogonal function [J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2017, 31(2): 73-79. (in Chinese))

(收稿日期: 2021-09-03 编辑: 熊水斌)