

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.06.012

武汉市人水系统耦合协调发展及障碍因素识别

董 怡^{1,2}, 邹 磊¹, 夏 军^{1,3}, 乔云峰¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 武汉大学水资源工程与调度全国重点实验室, 湖北 武汉 430072)

摘要:通过构建武汉市人水系统评价指标体系,计算了2003—2020年武汉市人水系统耦合度及耦合协调度,并识别了人水系统耦合协调发展的障碍因素。结果表明:研究期内武汉市人水系统中人文社会系统发展指数总体呈上升趋势,水系统发展指数偏低,呈现波动态势,总体有所上升;人水系统处于高水平耦合状态,由低级协调发展至中级协调;2003—2011年人文社会系统的障碍度略高于水系统,主要障碍因素是人口城镇化率、国民人均可支配收入以及科学技术支出占GDP比例;2012—2020年人文社会系统障碍度显著下降,而水系统的障碍度显著上升,主要障碍因素是人均节水量及水利、环境和公共设施管理业从业人数占比。

关键词:人水系统;耦合度;耦合协调度;障碍因素;武汉市

中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)06-0087-08

Coupling and coordinated development of human-water system in Wuhan City and identification of obstacle factors//DONG Yi^{1,2}, ZOU Lei¹, XIA Jun^{1,3}, QIAO Yunfeng¹ (1. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Science, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Construct an evaluation index system for the human-water system in Wuhan, calculate the coupling degree and coupling coordinated degree of the human-water system in Wuhan from 2003 to 2020, and identify obstacle factors to the coupling coordinated development of the human-water system. The results showed that during the research period, the overall development index of the human and social system in Wuhan's human-water system showed an upward trend, while the development index of the water system was relatively low and showed a fluctuating trend, with an overall increase. The human-water system is in a high-level coupling state, developing from low-level coordination to intermediate coordination. From 2003 to 2011, the obstacle level of the human and social system was slightly higher than that of the water system, and the main obstacle factors were population urbanization rate, per capita disposable income, and the proportion of science and technology expenditure to GDP. From 2012 to 2020, the obstacle level of the human and social system significantly decreased, while the obstacle level of the water system significantly increased. The main obstacle factors were per capita water savings, and the proportion of employees in the water conservancy, environmental, and public facility management industries.

Key words: human-water system; coupling degree; coupling and coordinated degree; obstacle factors; Wuhan City

水是人类生产生活重要的基础资源和战略性资源,人类活动与水的相互作用程度加深,形成紧密的人水系统^[1-5]。城市由于其人口密集、工业生产及经济社会活动集中等特点,人水耦合关系更为密切。随着城镇化进程的快速推进,一些城市水资源短缺、

水质污染和内涝等水问题日益凸显,导致这些问题出现的核心原因是人水系统中社会、经济与自然环境等主体之间相互作用的复杂关系^[6-11]。因此,探究城市尺度人水系统耦合协调发展水平,对于明晰城市水问题和促进城市高质量发展具有重要的理论

基金项目:国家自然科学基金项目(41890823, 42101043);美丽中国生态文明建设科技工程专项资金资助项目(XDA23040304)

作者简介:董怡(1995—),女,博士研究生,主要从事水资源可持续利用研究。E-mail:dongy.19b@igsnnr.ac.cn

通信作者:邹磊(1990—),男,副研究员,博士,主要从事流域水循环模拟研究。E-mail:zoulel@igsnnr.ac.cn

价值与现实意义。

国内外学者从不同时空尺度对人水系统耦合协调关系开展了系列研究,研究方法涵盖自上而下的系统动力学方法^[12-14]、自下而上的智能体方法^[15-16]以及包括主成分分析、集对分析和耦合协调度等在内的综合方法^[17-19]3类。例如:Bakarji等^[20]提出了基于智能体模型的社会水文决策建模框架,用于反映人类在面对地下水污染时的社会行为;Pan等^[21]利用综合方法,以芝加哥和斯德哥尔摩两个城市为案例,模拟了区域土地利用、经济和水系统相互作用的过程,揭示了以经济和土地利用规划为代表的城市系统和以土地利用限制和相关水影响为代表的自然系统之间的反馈规律;Chapagain等^[22]通过综合方法建立评估指标体系,评估了亚洲曼谷、斋浦尔、河内、伊斯兰阿巴德和马达巴5个城市的水安全状况,并提出了改善这5个城市的水利管理计划、战略和政策建议;Li等^[23]基于系统动力学建立了社会水文模型来研究北京市未来水资源可持续问题,探讨了北京市城-水互动机制,揭示了北京主要用水压力的转变过程;Cui等^[24]建立了反映“城市化-资源-环境”3个子系统对城市化可持续性整体影响的评价指标体系,分析了京津冀城市群中13个城市综合协调发展指数的差异,并认为可以通过实施分区战略、调整政策和投资来增加城市群发展的协调性;焦士兴等^[25]运用层次分析法及耦合协调度模型,在城镇化与水资源等方面选取19个指标对2005—2017年河南省城镇化与水资源系统的协调发展状况进行了评价分析;万欣等^[26]从海绵城市建设绩效评价的视角出发,在城市尺度上构建了包含水生态、水环境、水资源、水安全、水文化5个子系统共11个指标的城市水系统绩效评价指标体系,运用耦合协调度模型分析两两子系统间的耦合协调关系,利用灰色关联分析识别影响子系统间耦合协调关系的关键指标。综上所述,对于人水系统耦合协调发展的研究,国外学者多在制度、政策、公民意识和行为等社会因素方面进行多元化的研究,而国内学者则更多关注资源、环境、人口、经济等宏观因素。由于城市人水耦合系统在不同区域、不同时间阶段具有显著的区域化特性,不同气候条件和社会经济发展阶段的城

市人水系统耦合协调呈现不同特征和规律,因此需要结合区域化特点分析城市尺度人水系统耦合协调发展以及识别其阻碍因素。

本文选取武汉市作为研究区,以全面反映城市尺度人水系统发展情况为出发点,从人口发展、社会发展、环境治理、经济建设、水资源禀赋、水资源开发利用和水生态环境7个方面构建涵盖30个指标的

城市尺度人水系统评价指标体系,利用熵权法确定各指标的权重,测算2003—2020年武汉市人水系统耦合协调发展水平,并识别人水系统协调发展障碍因素,旨在为武汉市实现可持续发展和水资源管理提供科学依据与参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

武汉市是我国中部地区的中心城市,也是中部崛起重要战略支点。武汉位于汉江与长江的交汇处,湖泊众多,总面积8569.15 km²。城市区域内部地形以河流湖泊冲积平原为主,地势东南高西北低,湿地面积占全市1/4。武汉市多年平均降水量为1207.94 mm,多年平均径流量为102.77亿m³。2003—2020年武汉市生产总值增长了将近10倍,由0.17万亿元跃升至1.56万亿元,2020年末城镇化率已达84.31%。随着城市化进程加快,城市人口数量激增,武汉市全市用水、排污总量逐年增加,对城市的高质量发展造成严重制约^[27]。探究武汉市人水系统耦合协调发展关系,对于推进长江中游城市群生态文明建设、加快城镇化进程具有重要意义。

1.2 数据来源

本文所采用的数据来源于《武汉市国民经济和社会发展统计公报》(2003—2020年)、《武汉市水资源公报》(2003—2020年)、《武汉市生态环境状况公报》(2003—2020年)以及《武汉市统计年鉴》(2004—2021年)。

2 研究方法

2.1 人水系统评价指标体系构建

在构建人水系统评价指标体系时,需要考虑城市社会经济发展和水系统相互作用、互相影响的复杂机理和指标因素的差异性,保证指标体系全面性和反映研究区域现实情况的准确性,兼顾各指标数据的可获得性和真实性,并且确保后续耦合协调度模型测算的科学程度。遵循以上全面性、真实性、可操作性和代表性等原则,构建武汉市人水系统评价指标体系如图1所示(括号中数据为指标权重)。

对于人文社会系统,从经济发展、人口发展、社会发展和环境治理4个维度构建评价指标体系。经济发展子系统反映经济发展的水平和速度,选取人均GDP和GDP年增长率2个指标表征;人口发展子系统用常住人口总量、人口密度和人口自然增长率3个指标表征;社会发展子系统用城镇化率、城镇常住居民人均可支配收入、科学技术支出占GDP比

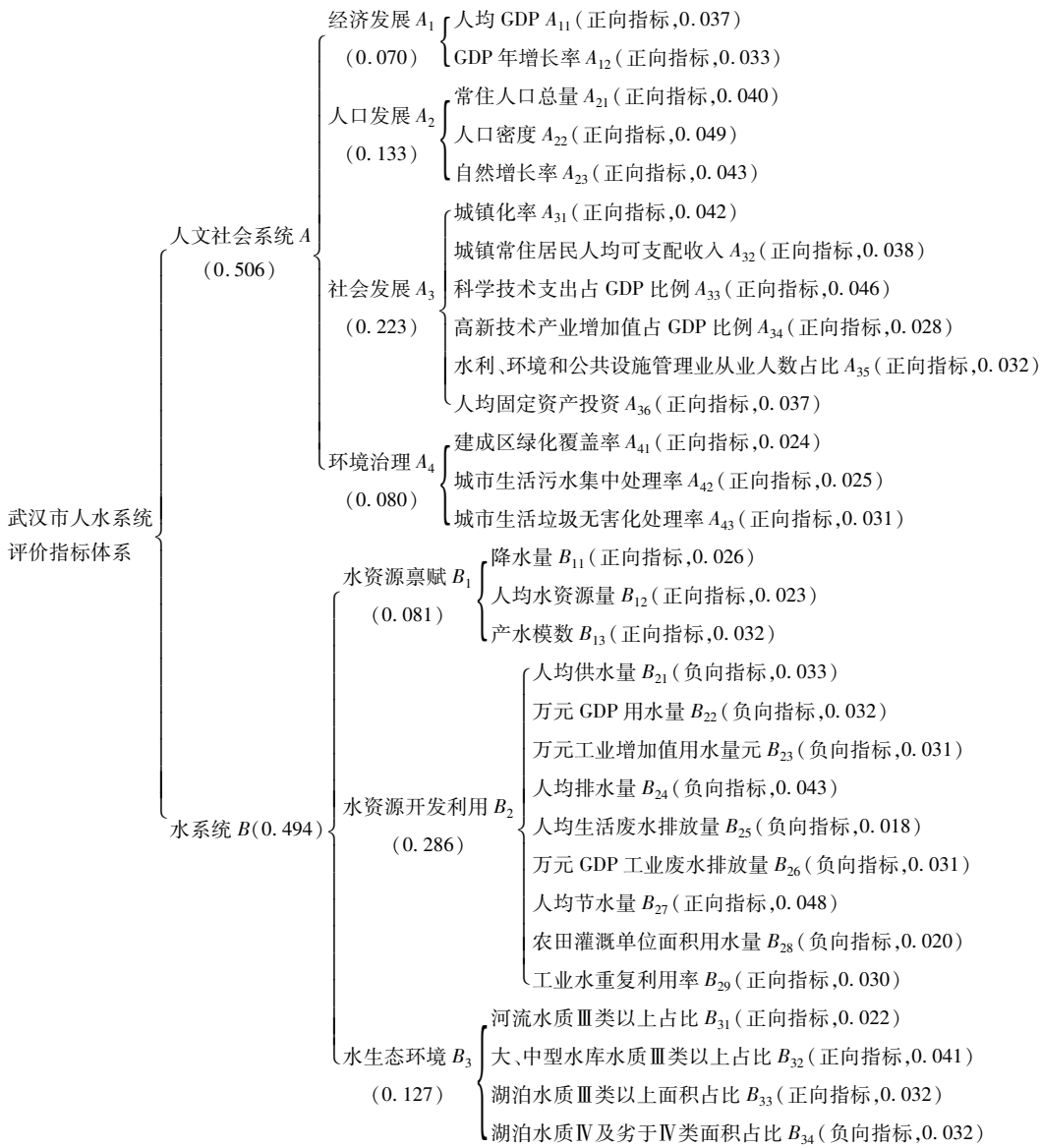


图1 武汉市人水系统评价指标体系

Fig.1 Evaluation index system of human-water system in Wuhan City

例、高新技术产业增加值占 GDP 比例、水利、环境和公共设施管理业从业人数占比和人均固定资产投资 6 个指标表征；环境治理用建成区绿化覆盖率、城市生活污水集中处理率和城市生活垃圾无害化处理率 3 个指标表征。对于水系统，从水资源禀赋、水资源开发利用、水生态环境 3 个维度构建评价指标体系。在水资源禀赋方面，选取降水量、人均水资源量和产水模数 3 个指标表征；在水资源开发利用方面，主要考虑城市供水、用水、排水以及节约用水方面的情况，其中供水情况用人均供水量指标表征，用水情况用万元 GDP 用水量和万元工业增加值用水量 2 个指标表征，排水情况用人均排水量、人均生活废水排放量、万元 GDP 工业废水排放量 3 个指标表征，节约用水方面用人均节水量、农田灌溉单位面积用水量、工业水重复利用率 3 个指标表征；在水生态环境方面，主要考虑河流、大中型水库和湖泊的水质情

况，因此选取河流水质Ⅲ类以上面积占比、大中型水库水质Ⅲ类以上面积占比、湖泊水质Ⅲ类以上面积占比和湖泊水质Ⅳ类及劣于Ⅳ类面积占比 4 个指标进行表征。

2.2 指标权重确定及发展指数计算

熵权法是一种客观赋权方法，其基本原理是对各个指标的变异程度进行度量，通过判断某个指标的离散程度测出其对于系统变化的影响程度，进而确定其重要程度^[28]，本文采用熵权法确定人水耦合系统中评价指标的权重。根据系统指标的标准化值和权重计算子系统发展指数，计算公式为

$$U_1 = \sum_{j=1}^m w_j b_j \quad (1)$$

$$U_2 = \sum_{j=1}^n w_j b_j \quad (2)$$

式中： U_1 、 U_2 分别为人文社会系统和水系统发展指数；

m, n 分别为人文社会系统和水系统评价指标总数; b_j 为经过标准化处理后指标 j 的值; w_j 为指标 j 的权重。

2.3 耦合度与耦合协调度计算

采用耦合度对人文社会系统与水系统之间的耦合发展状态进行测算, 计算公式为

$$C = \left[U_1 U_2 / (U_1 + U_2)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

式中 C 为耦合度, $C \in [0, 1]$, C 越大表示二者之间互相影响的程度越高。

尽管耦合度可以体现两个系统间的相互作用程度, 但不足以反映其协同发展状态, 因此引入耦合协调度来有效量化两个系统间的均衡状态和协调发展水平, 反映系统间互动的良性程度^[29], 计算公式为

$$D = \sqrt{CT} \quad (4)$$

其中

$$T = \alpha U_1 + \beta U_2$$

式中: D 为耦合协调度; T 为两个系统的综合协调指数; α 、 β 分别为水系统和社会系统的贡献度。基于当前时代发展背景, 本文认为二者具有相同的重要性, 因此取 $\alpha = \beta = 0.5$ 。 $D \in [0, 1]$, D 值越大说明人文社会系统与水系统发展水平越协调, 反之则反映协调程度低。参考向敬伟等^[30]研究成果, 对耦合度及耦合协调度的等级进行划分。对于耦合度: $C=0$ 为无序发展期, $0 < C \leq 0.3$ 为低水平耦合, $0.3 < C \leq 0.5$ 为拮抗时期, $0.5 < C \leq 0.8$ 为磨合时期, $0.8 < C \leq 1$ 为高水平耦合; 对于耦合协调度: $0 < D \leq 0.4$ 为低级协调, $0.4 < D \leq 0.5$ 为初级协调, $0.5 < D \leq 0.8$ 为中级协调, $0.8 < D \leq 1$ 为高度协调, $D=1$ 为优质协调。

2.4 障碍度计算

为探究人文社会系统与水系统间耦合协调发展的主要障碍, 利用障碍度^[31]识别研究时段内阻碍武汉市水系统协调发展的障碍因素, 计算公式为

$$y_{ij} = \frac{F_{ij} I_{ij}}{\sum_{i=1}^n F_{ij} I_{ij}} \times 100\% \quad (5)$$

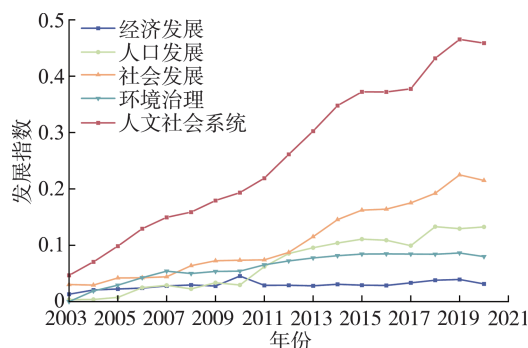
式中: y_{ij} 为子系统 i 中指标 j 的障碍度; F_{ij} 为子系统 i 中指标 j 对总目标的作用程度, 为指标标准化值与其权重的乘积; I_{ij} 为子系统 i 中指标 j 标准化值与 100% 的差值; n 为指标总数。

3 结果与分析

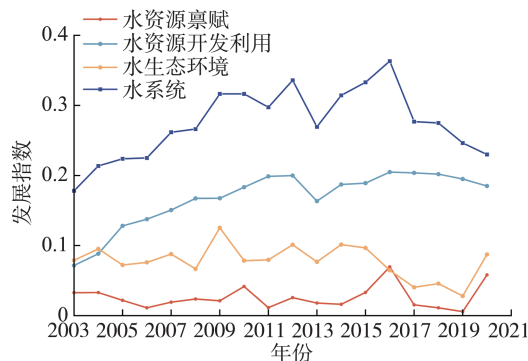
3.1 人水系统发展指数

图 2 为 2003—2020 年武汉市人文社会系统与水系统发展指数。由图 2(a) 可见, 人文社会系统及其各子系统的发展指数在研究期内均有不同程度的提升。2003—2020 年武汉市人文社会系统发展指

数由 0.047 增长至 0.459, 在 2019 年达到最高 (0.465), 2020 年出现小幅回落, 研究期内年均增长率达 14.38%。从子系统来看, 社会发展指数提升最多, 由 0.030 增长至 0.215; 人口发展指数在 2007—2008 年、2009—2010 年以及 2015—2017 年均出现了负增长, 这是由人口自然增长率在这 3 个时期出现下降所导致; 环境治理指数偏低, 总体增长速率不高; 经济发展指数在 4 个子系统中增长最少, 在 2010 年达到了峰值 (0.453), 进一步分析指标可以看出, 尽管武汉市人均 GDP 在 2003—2010 年、2011—2019 年持续增长, 但 GDP 年增长率的波动限制了经济发展指数的上升。综上可知, 社会发展和人口发展是促进武汉市人文社会发展指数提升的主要因素, 加强环境治理以及提高 GDP 年增长率对于武汉市提高人文社会发展水平有重要意义。由图 2(b) 可见, 在 3 个子系统的综合影响下, 2003—2020 年武汉市水系统发展指数年平均增长率为 0.56%。2003—2009 年, 水系统发展指数呈现“台阶式”增长, 由 0.178 上升至 0.316; 2010 年与 2009 年水系统发展指数持平; 2010—2016 年, 水系统发展指数呈现大幅波动, 并在 2016 年达到了最高值 (0.363); 2016 年后, 水系统发展指数开始下降, 2016—2020 年由 0.363 下降至 0.196。从子系统来



(a) 人文社会系统



(b) 水系统

图 2 2003—2020 年武汉市人文社会系统与水系统发展指数
Fig. 2 Human social system and water system development index in Wuhan City from 2003 to 2020

看,水资源开发利用在3个子系统中增长最为显著且波动相对较少,年平均增长率为5.74%;水资源禀赋和水生态环境在研究期内均呈现较大波动,水资源禀赋主要受到降水量变化的影响,2016年和2020年武汉市两次出现极端降水事件,降水量显著高于往年;水生态环境在2015年之前呈现波动,2015年后逐年下降,在2020年又出现较大回升。因此,改善水生态环境对于提升武汉市水系统发展指数至关重要。

3.2 耦合协调度

表1为2003—2020年武汉市人水系统耦合度及耦合协调度。由表1可见,2003—2020年武汉市人水系统的耦合度由0.812增长至0.916,经历了“增长—波动—下降”的过程,年平均增长率为0.71%。耦合度在2003—2006年增长速度较快,年平均增长率为3.23%;在2007—2016年增长速度放缓,并出现小幅波动,年平均增长率为0.41%,在2016年达到了最高值1.0;在2017—2020年持续下降,但依然维持在高水平耦合状态。相较于耦合度,耦合协调度水平偏低,在研究期内由0.302增长至0.547,年平均增长率为3.56%,人水系统耦合协调水平由低级提升至中级。耦合度结果表明人文社会系统与水系统关联度极高,存在相互作用、相互依赖的关系;耦合协调度所处等级仍然较低,表明人文社会系统与水系统发展状况存在较大差异。结合发展指数进行分析,可以看出水系统发展水平滞后于人文社会系统,制约了耦合协调度的提升,表明武汉市人文社会发展的同时需要兼顾水系统面临的资源及环境压力,进而推动城市的高质量发展。

表1 2003—2020年武汉市人水系统耦合度及耦合协调度
Table 1 Coupling degree and coupling coordinated degree of human-water system in Wuhan City from 2003 to 2020

年份	C	D	类型	状态
2003	0.812	0.302	人文社会发展滞后	高水平耦合,低级协调
2004	0.864	0.350	人文社会发展滞后	高水平耦合,低级协调
2005	0.921	0.385	人文社会发展滞后	高水平耦合,低级协调
2006	0.963	0.413	人文社会发展滞后	高水平耦合,初级协调
2007	0.962	0.445	人文社会发展滞后	高水平耦合,初级协调
2008	0.968	0.453	人文社会发展滞后	高水平耦合,初级协调
2009	0.961	0.488	人文社会发展滞后	高水平耦合,初级协调
2010	0.970	0.497	人文社会发展滞后	高水平耦合,初级协调
2011	0.988	0.505	人文社会发展滞后	高水平耦合,中级协调
2012	0.992	0.544	人文社会发展滞后	高水平耦合,中级协调
2013	0.998	0.534	水系统发展滞后	高水平耦合,中级协调
2014	0.999	0.575	水系统发展滞后	高水平耦合,中级协调
2015	0.998	0.593	水系统发展滞后	高水平耦合,中级协调
2016	1.000	0.606	水系统发展滞后	高水平耦合,中级协调
2017	0.988	0.569	水系统发展滞后	高水平耦合,中级协调
2018	0.975	0.587	水系统发展滞后	高水平耦合,中级协调
2019	0.951	0.582	水系统发展滞后	高水平耦合,中级协调
2020	0.916	0.547	水系统发展滞后	高水平耦合,中级协调

3.3 障碍因素

图3和图4为2003—2020年武汉人文社会系统、水系统及各子系统的障碍度。由图3可见,水系统和人文社会系统对耦合协调发展的障碍程度在2003年较为接近,随后发展态势呈现出明显区别。

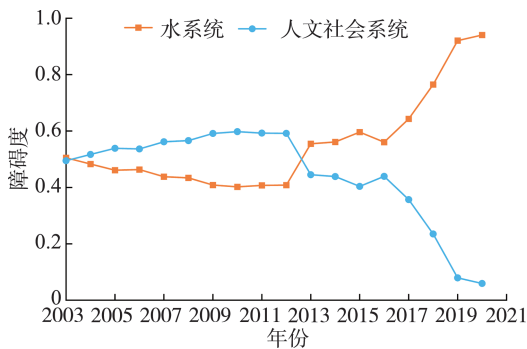


图3 2003—2020年武汉人文社会系统和水系统障碍度
Fig.3 Obstacle degree of human social system and water system in Wuhan City from 2003 to 2020

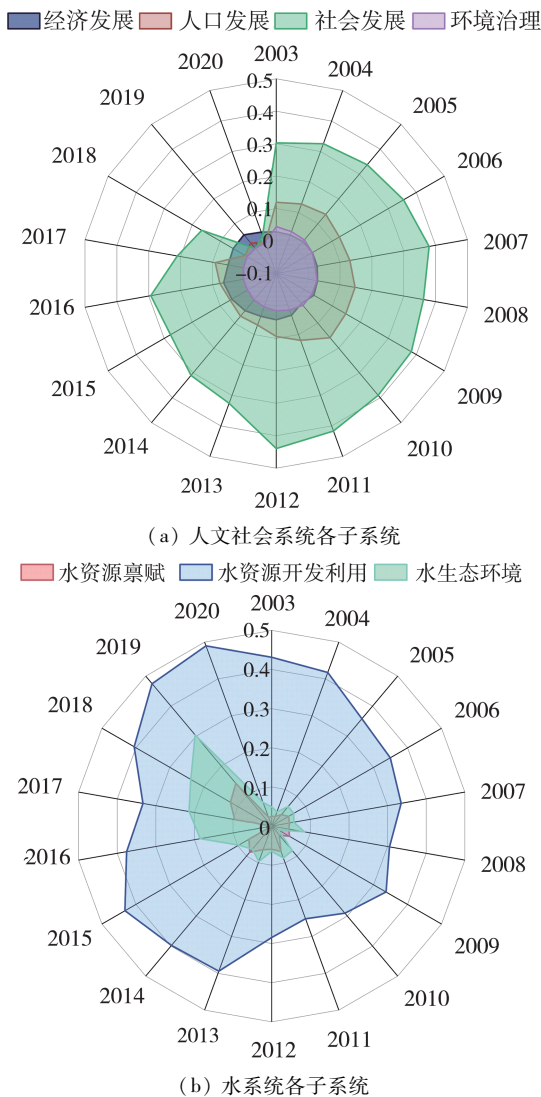


图4 2003—2020年武汉市各子系统障碍度
Fig.4 Obstacle degree of subsystems in Wuhan City from 2003 to 2020

2003—2012 年,人文社会系统和水系统的障碍度变化相对稳定,人文社会系统障碍度逐渐上升,水系统障碍度逐渐下降,人文社会系统障碍度略高于水系统。2012 年之后,人文社会系统与水系统障碍度呈现出与之前相反的变化趋势,人文社会系统障碍度开始下降,水系统障碍度开始上升并在 2013 年反超人文社会系统,二者之间差距逐渐扩大。在研究期内,人文社会系统的障碍度由 0.495 下降至 0.059,水系统障碍度由 0.505 上升至 0.941。由图 4 可见,水系统中障碍度由高到低依次是水资源开发利用、水生态环境和水资源禀赋;人文社会系统中障碍度由高到低依次是社会发展、人口发展、经济发展及环境治理。

表 2 为 2003—2020 年武汉市人水系统排名前 6

表 2 2003—2020 年武汉市人水系统排名前 6 的障碍因素及其障碍度

Table 2 Top six obstacle factors and obstacle degree in human-water system in Wuhan City from 2003 to 2020

年份	第 1 名		第 2 名		第 3 名		第 4 名		第 5 名		第 6 名	
	障碍因素	障碍度	障碍因素	障碍度	障碍因素	障碍度	障碍因素	障碍度	障碍因素	障碍度	障碍因素	障碍度
2003	B_{24}	0.084	A_{31}	0.074	A_{33}	0.069	A_{36}	0.067	B_{29}	0.064	A_{32}	0.062
2004	B_{21}	0.060	B_{24}	0.088	A_{31}	0.076	A_{32}	0.064	A_{33}	0.077	A_{36}	0.069
2005	B_{24}	0.089	A_{33}	0.077	A_{31}	0.076	A_{36}	0.069	A_{32}	0.064	B_{29}	0.060
2006	B_{24}	0.088	A_{33}	0.081	A_{31}	0.077	A_{36}	0.073	A_{32}	0.068	A_{22}	0.052
2007	B_{24}	0.091	A_{31}	0.084	A_{33}	0.083	A_{36}	0.074	A_{32}	0.069	B_{29}	0.055
2008	B_{24}	0.094	A_{33}	0.089	A_{36}	0.071	A_{32}	0.067	A_{22}	0.056	A_{31}	0.051
2009	B_{24}	0.105	A_{33}	0.101	A_{32}	0.072	A_{36}	0.068	A_{22}	0.063	B_{21}	0.057
2010	A_{33}	0.100	B_{24}	0.075	A_{35}	0.067	A_{32}	0.066	A_{23}	0.064	A_{22}	0.063
2011	A_{33}	0.108	A_{35}	0.090	B_{32}	0.079	A_{23}	0.064	A_{36}	0.063	A_{32}	0.063
2012	A_{33}	0.120	A_{35}	0.106	A_{32}	0.062	A_{36}	0.061	B_{24}	0.053	A_{34}	0.052
2013	B_{27}	0.142	A_{33}	0.099	B_{24}	0.096	A_{35}	0.095	B_{32}	0.084	A_{32}	0.049
2014	B_{27}	0.106	B_{24}	0.102	A_{33}	0.093	A_{35}	0.071	A_{32}	0.065	B_{31}	0.054
2015	B_{27}	0.203	A_{33}	0.091	A_{32}	0.060	B_{25}	0.056	B_{28}	0.049	B_{24}	0.048
2016	B_{27}	0.253	B_{33}	0.091	B_{34}	0.090	A_{33}	0.075	B_{25}	0.059	A_{35}	0.057
2017	B_{27}	0.237	B_{33}	0.093	B_{34}	0.092	A_{23}	0.041	B_{32}	0.053	A_{35}	0.058
2018	B_{27}	0.275	B_{33}	0.090	B_{34}	0.089	B_{32}	0.040	B_{25}	0.056	A_{12}	0.035
2019	B_{27}	0.229	B_{32}	0.097	B_{25}	0.097	B_{33}	0.000	B_{34}	0.124	A_{12}	0.000
2020	B_{24}	0.157	B_{27}	0.156	B_{21}	0.119	B_{22}	0.117	B_{26}	0.114	B_{23}	0.110

4 结 论

a. 2003—2020 年武汉市人文社会系统及其子系统发展水平均有所提升,社会发展和人口发展是促进武汉市人文社会发展指数提升的主要因素,加强环境治理以及提高 GDP 年增长率对于武汉市提高人文社会发展水平有重要意义。水系统发展呈现较大波动,水资源开发利用水平明显提升,水资源禀赋主要受到降水量的影响,提升水生态环境水平对于提升武汉市水系统整体发展水平至关重要。

b. 2003—2020 年武汉市人水系统始终处于高水平耦合状态,表明两个系统相互作用强烈。协调性由低级协调上升至中级协调。水系统发展水平滞

的障碍因素及其障碍度。由表 2 可见,武汉市人水系统主要障碍因素在研究期内呈现出阶段性的特征,由于 2012 年是人文社会系统与水系统障碍度变化发生转折的关键年份,因此分别统计 2012 年之前和之后排名前 10 位的障碍因素中出现频率高于 50% 的因素。2003—2011 年出现频率最高的障碍因素是人口城镇化率 A_{31} 、国民人均可支配收入 A_{32} 以及科学技术支出占 GDP 比例 A_{33} ,三者的出现频率均为 1;其次为人均排水量 B_{24} 和人均固定资产投资 A_{36} ,出现频率均为 0.89;2012—2020 年出现频率最高的障碍因素依次是人均节水量 B_{27} ,水利、环境和公共设施管理业从业人数占比 A_{35} ,大、中型水库水质Ⅲ类以上占比 B_{32} 和国民人均可支配收入 A_{32} ,出现频率分别为 0.88、0.75、0.63 和 0.63。

后于人文社会系统,制约了人水系统协调水平的提升。

c. 2003—2011 年,武汉市人文社会系统障碍度略高于水系统障碍度,2011 年之后人文社会系统障碍度不断下降,水系统障碍度不断上升,二者之间差距逐渐扩大。2003—2011 年武汉市人水系统协调发展的主要障碍因素是人口城镇化率、国民人均可支配收入以及科学技术支出占 GDP 比例;2012—2020 年主要障碍因素是人均节水量以及水利、环境和公共设施管理业从业人数占比。

参考文献:

[1] ALCAMO J,BONN G,GRASSL H,et al. The global water system project: science framework and implementation

- activities [J]. Environmental Policy Collection, 2005, 19 (2): 62-69.
- [2] 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.
- [3] CHOI S, LEE S O, PARK J. A comprehensive index for stream depletion in coupled human-water systems [J]. Journal of Hydro-Environment Research, 2017, 16: 58-70.
- [4] SIVAPALAN M, SAVENIJE H H G, BLOESCHL G. Socio-hydrology: a new science of people and water [J]. Hydrological Processes, 2012, 26(8): 1270-1276.
- [5] 左其亭, 毛翠翠. 人水关系的和谐论研究 [J]. 中国科学院院刊, 2012, 27 (4): 469-477. (ZUO Qiting, MAO Cuicui. Research on the harmony theory method of human-water relationship [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2012, 27(4): 469-477. (in Chinese))
- [6] 张翔, 廖辰暘, 韦芳良, 等. 城市水系统关联模型研究 [J]. 水资源保护, 2021, 37(1): 14-19. (ZHANG Xiang, LIAO Chenyang, WEI Fangliang, et al. Research on the nexus model of urban water system [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(1): 14-19. (in Chinese))
- [7] GU J, SUN S, WANG Y, et al. Sociohydrology: an effective way to reveal the coupled evolution of human and water systems [J]. Water Resources Management, 2021, 35 (14): 4995-5010.
- [8] ZHANG X, WEI F L, MENG Y, et al. Linking water, society and ecology in a system dynamics framework: case study of Huainan City [J]. Water Supply, 2019, 19(8): 2400-2409.
- [9] ZHOU X Y. Spatial explicit management for the water sustainability of coupled human and natural systems [J]. Environmental Pollution, 2019, 251: 292-301.
- [10] 田富强, 程涛, 芦由, 等. 社会水文学和城市水文学研究进展 [J]. 地理科学进展, 2018, 37(1): 46-56. (TIAN Fuqiang, CHENG Tao, LU You, et al. A review on socio-hydrology and urban hydrology [J]. Progress in Geography, 2018, 37(1): 46-56. (in Chinese))
- [11] 左其亭. 人水关系学的基本原理及理论体系架构 [J]. 水资源保护, 2022, 38(1): 1-6. (ZUO Qiting. Basic principles and theoretical system of human-water relationship discipline [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1): 1-6. (in Chinese))
- [12] LIU H, BENOIT G, LIU T, et al. An integrated system dynamics model developed for managing lake water quality at the watershed scale [J]. Journal of Environmental Management, 2015, 155: 11-23.
- [13] KUIL L, CARR G, VIGLIONE A, et al. Conceptualizing socio-hydrological drought processes: the case of the Maya collapse [J]. Water Resources Research, 2016, 52(8): 6222-6242.
- [14] 张沛. 塔里木河流域社会-生态-水资源系统耦合研究 [D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2019.
- [15] POULADI P, AFSHARA A, AFSHAR M H, et al. Agent-based socio-hydrological modeling for restoration of Urmia Lake: application of theory of planned behavior [J]. Journal of Hydrology, 2019, 576: 736-748.
- [16] ANEBAGILU P K, DIETRICH J, PRADO-STUARDO L, et al. Application of the theory of planned behavior with agent-based modeling for sustainable management of vegetative filter strips [J]. Journal of Environmental Management, 2021, 284: 112014.
- [17] 胡光伟, 许滢, 张明, 等. 基于 SPA 的湖南省水资源与社会经济发展协同度评价 [J]. 水利水电技术, 2019, 50 (1): 65-72. (HU Guangwei, XU Ying, ZHANG Ming, et al. Evaluation on synergy degree of water resources system and social economical system in Hunan Province based on SP [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, 50(1): 65-72. (in Chinese))
- [18] SIVAPALAN M, BLOESCHL G. Time scale interactions and the coevolution of humans and water [J]. Water Resources Research, 2015, 51(9): 6988-7022.
- [19] ENTESHARI S, SAFAVI H R, VAN DER ZAAG P. Simulating the interactions between the water and the socio-economic system in a stressed endorheic basin [J]. Hydrological Sciences Journal-Journal Des Sciences Hydrologiques, 2020, 65(13): 6988-7022.
- [20] BAKARJI J, O'MALLEY D, VESSELINOV V V. Agent-based socio-hydrological hybrid modeling for water resource management [J]. Water Resources Management, 2017, 31(12): 3881-3898.
- [21] PAN H, DEAL B, DESTOUNI G, et al. Sociohydrology modeling for complex urban environments in support of integrated land and water resource management practices [J]. Land Degradation & Development, 2018, 29(10): 3639-3652.
- [22] CHAPAGAIN K, ABOELNGA H T, BABEL M S, et al. Urban water security: a comparative assessment and policy analysis of five cities in diverse developing countries of Asia [J]. Environmental Development, 2022, 43: 100713.
- [23] LI B, SIVAPALAN M, XU X. An urban sociohydrologic model for exploration of Beijing's water sustainability challenges and solution spaces [J]. Water Resources Research, 2019, 55(7): 5918-5940.
- [24] CUI X G, FANG C L, LIU H M, et al. Assessing sustainability of urbanization by a coordinated development index for an urbanization-resources-environment complex

- system: a case study of Jing-Jin-Ji region, China [J]. Ecological Indicators, 2019, 96: 383-391.
- [25] 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))
- [26] 万欣, 卞文婕, 魏然, 等. 海绵城市水系统耦合协调发展及动态响应研究[J]. 水资源保护, 2023, 39(4): 135-142. (WAN Xin, BIAN Wenjie, WEI Ran, et al. Research on coupling coordination development and dynamic response of water system of sponge cities [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(4): 135-142. (in Chinese))
- [27] 刘佳琪, 董怡, 许明军, 等. 武汉市废水排放 EKC 曲线及驱动效应研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2022, 43(02): 89-94. (LIU Jiaqi, DONG Yi, XU Mingjun, et al. Study on EKC curve and driving effect of wastewater discharge in Wuhan [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2022, 43(2): 89-94. (in Chinese))
- [28] 程启月. 评测指标权重确定的结构熵权法[J]. 系统工程理论与实践, 2010, 30(7): 1225-1228. (CHENG Qiyue. Structure entropy weight method to confirm the weight of evaluating index [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2010, 30(7): 1225-1228. (in Chinese))
- [29] 姚尧. 湖南省土地利用转型的时空演变特征及其与社会经济发展耦合协调机制研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2018.
- [30] 向敬伟, 万沙, 胡守庚. 城市生态经济耦合协调发展的因子贡献度分析: 以武汉市为[J]. 中国地质大学学报(社会科学版), 2015, 15(6): 30-36. (XIANG Jingwei, WAN Sha, HU Shougeng. Research on factor contribution degree of coordinated development in Wuhan's eco-economic system [J]. Journal of China University of Geosciences (Social Science Edition), 2015, 15(6): 30-36. (in Chinese))
- [31] 姜晓艳, 吴相利. 林业资源型城市生态-经济-社会协调发展的定量测度: 以黑龙江省伊春市为例[J]. 生态学报, 2021(21): 1-12. (JIANG Xiaoyan, WU Xiangli. Quantitative investigation of the coordinated development of ecology-economy-society in forest resource-based city: a case study of Yichun, Heilongjiang Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021(21): 1-12. (in Chinese))

(收稿日期: 2022-12-17 编辑: 王芳)

(上接第 86 页)

- [69] 瞿思敏, 包为民. 实时洪水预报综合修正方法初探[J]. 水科学进展, 2003, 14(2): 167-171. (QU Simin, BAO Weimin. Comprehensive correction of real-time flood forecasting[J]. Advances in Water Science, 2003, 14(2): 167-171. (in Chinese))
- [70] 王东升, 胡关东, 袁树堂. 基于水文相似性的预报误差修正[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(2): 140-145. (WANG Dongsheng, HU Guandong, YUAN Shutang. Hydrological forecasting error corrections based on hydrological similarity[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(2): 140-145. (in Chinese))
- [71] 谭乔凤, 陈然, 朱阳, 等. 基于多因子最近邻抽样回归模型的径流相似性预报[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(6): 521-527. (TAN Qiaofeng, CHEN Ran, ZHU Yang, et al. Runoff similarity forecast based on multi-factor nearest neighbor bootstrapping regressive model[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(6): 521-527. (in Chinese))
- [72] 闻昕, 陈然, 谭乔凤, 等. 基于多因素相似性的融雪径流预报方法研究[J]. 水力发电学报, 2022, 41(3): 46-59. (WEN Xin, CHEN Ran, TAN Qiaofeng, et al. Study on forecasting method of snowmelt runoff based on multi-factor similarity[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2022, 41(3): 46-59. (in Chinese))
- [73] 张珂, 牛杰帆, 李曦, 等. 洪水预报智能模型在中国半干旱半湿润区的应用对比[J]. 水资源保护, 2021, 37(1): 28-35. (ZHANG Ke, NIU Jiefan, LI Xi, et al. Comparison of artificial intelligence flood forecasting models in China's semi-arid and semi-humid regions [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(1): 28-35. (in Chinese))
- [74] 李长兴. 论流域水文尺度化和相似性[J]. 水利学报, 1995(1): 40-46. (LI Changxing. On catchment hydrological scale and similarity[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1995(1): 40-46. (in Chinese))

(收稿日期: 2022-11-13 编辑: 王芳)