

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.04.017

海绵城市水系统耦合协调发展及动态响应研究

万欣, 卞文婕, 魏然, 胡梦柳, 宋亮亮

(河海大学商学院, 江苏 南京 211100)

摘要:针对城市水系统构建评价指标体系,收集了6座试点海绵城市评价指标数据,运用耦合协调模型对城市间水系统耦合协调发展情况进行了实证分析;采用灰色关联分析法确定关键指标,构建了系统耦合协调度与关键指标的向量自回归模型,分析关键指标对水系统协调发展的影响机制。结果表明:在海绵城市建设后,6市水系统的耦合协调水平由严重或中度失调达到基本协调,短期内试点的南方城市(武汉、深圳、上海)“海绵化”改造成效优于北方城市(济南、北京);水生态与水安全子系统耦合协调度最高,河道治理率和饮用水达标率对两子系统关系具有促进与阻碍交替的波动性影响;水资源与水文化子系统的耦合协调度最差,官方平台宣传次数对两子系统关系具有显著且持续的促进效应;水资源与水环境子系统耦合协调度有待进一步提高,万元GDP用水量和污水处理率对两子系统协调有促进效应,但持续时间较短。

关键词:海绵城市;城市水系统;耦合协调;脉冲响应

中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)04-0135-08

Study on coupling coordination development and dynamic response of water system of sponge cities// WAN Xin, BIAN Wenjie, WEI Ran, HU Mengliu, SONG Liangliang(*Business School, Hohai University, Nanjing 211100, China*)

Abstract: Based on the established evaluation indicator system of urban water system, evaluation indicator data collected from six typical pilot sponge cities were analyzed using a coupling coordination model to empirically examine the development status of coupling coordination of the water system of different cities. The key indicators were identified through grey correlation analysis, and a vector autoregression model was established to investigate the mechanism, through which these key indicators impact the development of coupling coordination of the water system. The findings indicate that the water system of the six cities has progressed from serious or moderate incoordination to coordination after the construction of sponge cities, and “sponging” reconstruction had better short-term effectiveness in southern pilot cities, including Wuhan, Shenzhen, and Shanghai, compared to northern pilot cities, including Jinan and Beijing. Furthermore, the coupling coordination degree between the water ecology and water security subsystems is found to be the highest, while river regulation rate and drinking water compliance rate exert fluctuating effects, alternatively impeding or promoting the interrelation between the two sub-systems. By contrast, the coupling coordination degree between the water resources and water culture subsystems is the weakest, while the number of official platform publicity exerts a significant and sustained positive effect on the relationship between the two sub-systems. Additionally, there is a need for further enhancement of the coupling coordination degree between the water resources and water environment subsystems, and the increases of water consumption per 10 000 yuan of GDP and sewage treatment rate have significant promoting but short-lived effects on the coordination between the two sub-systems.

Key words: sponge city; urban water system; coupling coordination; impulse response

城市水系统是一个由自然水循环和社会水循环耦合的复杂系统,是城市水系的利用、治理、配置、保护等涉水事务的总称,包含生态、环境、社会、人文等多维子系统^[1]。为加强城市水系统的可持续综合

治理,我国相继启动节水型城市、水生态文明城市、海绵城市等新型城市建设试点项目^[2]。海绵城市作为一种城市发展的新理念和新模式,统筹了自然降水、地表水和地下水的系统性,协调给水、排水等

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(71802071);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(B230207062)

作者简介:万欣(1985—),女,副教授,博士,主要从事基础设施可持续建设与治理研究。E-mail:wanxin@hhu.edu.cn

水循环利用环节,在确保城市排水防涝安全的前提下,可最大限度实现城市对水的积存、渗透和净化,促进水资源的高效利用和生态环境保护^[3]。我国2015年和2016年分两批确定了30个中央财政支持海绵城市建设试点,为海绵城市建设示范工作积累了经验和成果。为了评价海绵城市建设的成效,2015年住房和城乡建设部依据《海绵城市建设技术指南》制定了《海绵城市建设绩效评价与考核办法(试行)》(以下简称《办法》)。《办法》侧重于考评海绵城市技术指标完成情况,对于单体、单片“海绵”项目的建设成效评价起到了较好的指导作用。然而,不同于传统碎片化的治水路径,海绵城市统筹考虑治水目标,为城市雨洪管理、水环境治理、水生态修复和水资源利用提供一个综合的解决方案^[4]。因此,从多元系统耦合的视角切入,在城市尺度上把握试点海绵城市各类水系统的协调发展程度,对于提升城市“水韧性”、促进城市可持续发展具有重要的理论和现实意义。

从现有研究来看,城市水系统建设与管理的研究焦点从简单排放^[5]转向综合利用^[6],不断重视源头治理与生态治理^[7-8],对国外的低影响开发、绿色基础设施等理念进行吸收和转化^[9],海绵城市、水敏感城市等城市设计、建设理念成为城市水管理研究的新方向^[10]。总的来说,相关研究对采用可持续的综合城市水治理路径已经达成共识,但主要停留在概念和内涵解读层面,缺少从系统角度对城市不同水系统关系的量化及实证研究。在海绵城市评价研究方面,一些学者如 Yang 等^[11-13]利用 SWMM (storm water management model) 等雨洪模型模拟分析了海绵城市建设在雨洪管理上的成效。还有学者考虑社会公平^[14]、生态效能^[15]等,从特定角度探讨了海绵城市的建设成效。虽然有研究考虑了更为综合的评价因素^[16],但目前相关研究仍主要关注海绵城市的雨洪治理成效,使用的评价指标多为雨水径流控制、污染物削减等技术性指标,缺乏对自然和社会系统的综合考量,更缺少对水系统内部协调关系和相互作用机制的研究。

综上,本文基于系统思维,从城市尺度构建一套适用于综合评价城市水系统绩效的指标体系,并运用耦合协调模型、灰色关联度模型和脉冲响应分析等研究方法,探究选取的6个典型试点海绵城市水系统内部的耦合协调关系,揭示海绵城市水系统协调或制约关系的演化特征以及关键指标对该种关系的影响机制。

1 城市水系统评价指标体系构建

城市水系统是包含城市各项涉水事务的综合管理

系统,而海绵城市建设是一个复杂的系统过程,其本质是对城市水系统的重构。在《办法》中,将海绵城市的评价体系分为水生态、水环境、水资源、水安全、制度建设及执行情况、显示度6个方面。为了从城市尺度系统地评价水系统的建设情况,本文主要遵循以下原则构建评价指标体系:①层次性。确保整个指标体系纵向上层次清晰合理,横向上尽可能涵盖每一层次的主要内容。②普适性。要求指标既能反映各子系统的主要特征又适用于评价不同地域的城市,即所构建的指标体系理论上可对国内任何城市的水系统进行评价。③可量化性。要求指标数据方便获取,且能形成时间序列,便于开展时间和空间维度的分析。基于以上原则并结合相关研究和专家建议^[17-21],构建了如图1所示的城市水系统评价指标体系。

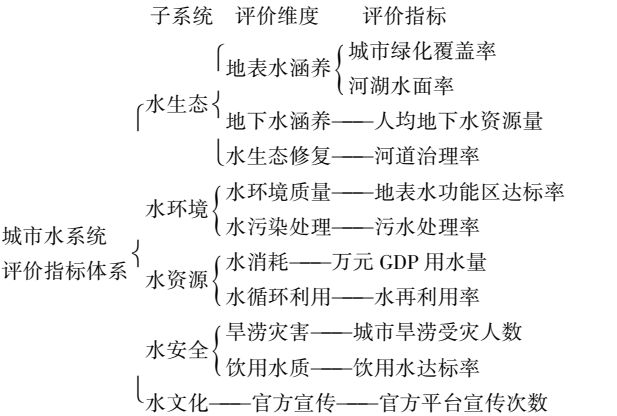


Fig.1 Evaluation indicator system of urban water system

水生态子系统主要从城市的水涵养能力和修复能力两个维度进行评价^[17],其中水涵养同时考虑了地表水和地下水的保持、存储能力;水环境子系统从环境质量和污染处理两个维度进行评价^[18];水资源子系统的状态主要通过城市对水资源的利用效率来体现^[19];城市水安全主要体现为城市对旱涝灾害的抵御能力和对饮水安全的保障能力^[20];水文化是人们在涉水活动中创造的精神和物质成果的总和^[21],城市水文化的形成在精神层面上主要通过城市管理者对居民的宣传教育实现,而水文化的物质成果可由相关物质文化遗产或主题建筑等的规模数量来表征,考虑到后者无官方统计数据,本文主要以水务及生态环境管理部门在官方平台上对水物质文化、水事活动、水制度建设等内容的宣传次数作为衡量水文化的指标,该指标可在一定程度上动态反映城市管理者对水文化的打造力度。

2 数据来源与处理

2.1 数据来源

截至目前,全国共有30个试点海绵城市,其中

北方城市 12 个、南方城市 18 个。本研究对试点城市的选取遵循以下原则:①代表性。选取的试点海绵城市在地域上具有代表性,确保覆盖南方和北方区域,同时考虑在华东、华南、华北、华中、西南、西北、东北七大地理区域上的分布。②数据可获取性。选取的试点城市相关统计数据较为全面、完整,统计口径一致,能够满足研究的分析需要。最终,选取同时满足以上原则的 6 个试点海绵城市,即北京、天津、济南、上海、深圳和武汉。

根据图 1 所示的评价指标体系收集数据,数据主要来源于两类资料:①6 市 2005—2020 年相关年报和公报,包括《市统计年鉴》《市水资源公报》《市河湖报告》《市绿化状况公报》《全国水旱灾害公报》等;②官方网站及媒体账号发布的资讯信息,包括各城市的水务、生态环境和园林绿化等政府部门的官方网站、官方微博和公众号发布的新闻及资讯。

2.2 数据处理

2.2.1 数据标准化

在计算各指标的权重前,需要对数据进行标准化处理,以消除不同指标量纲、量级及属性的差异,使指标之间具有可比性。正向指标和负向指标的标准化计算公式为

$$X_{it} = \begin{cases} 0.99 \frac{x_{it} - x_{i \min}}{x_{i \max} - x_{i \min}} + 0.01 & \text{正向指标} \\ 0.99 \frac{x_{i \max} - x_{it}}{x_{i \max} - x_{i \min}} + 0.01 & \text{负向指标} \end{cases} \quad (1)$$

式中: x_{it} 为指标 i 在第 t 年的数值; X_{it} 为 x_{it} 标准化后的数值; $x_{i \max}$ 、 $x_{i \min}$ 分别为指标 i 在所有年份数据中的最大值和最小值。

2.2.2 指标权重与综合评价

采用 CRITIC(criteria importance though intercriteria correlation)法确定指标权重,通过加权平均计算子系统的综合评价。CRITIC 法中的冲突性量化指标基于相关系数计算得到,用以衡量不同指标间的相关关系;对比强度用标准差来反映,可衡量不同对象在同一指标上的波动性;进一步根据冲突性指标和对比强度计算各项指标所包含的信息量,再根据信息量大小确定各项指标的权重;最后,将标准化后的指标数据进行加权,计算子系统综合评价,用以衡量子系统综合建设成效的价值量。计算公式为

$$R_{ij} = \frac{\sum_{t=1}^N (X_{it} - \bar{X}_i)(X_{jt} - \bar{X}_j)}{\sqrt{\sum_{t=1}^N (X_{it} - \bar{X}_i)^2 (X_{jt} - \bar{X}_j)^2}} \quad (2)$$

$$Q_j = \sum_{i=1}^m (1 - R_{ij}) \quad (3)$$

$$P_j = \delta_j Q_j \quad (4)$$

$$w_j = P_j / \sum_{j=1}^m P_j \quad (5)$$

$$F_{at} = \sum_{j=1}^d X_{jt} w_j \quad (6)$$

式中: R_{ij} 为指标 i 与指标 j 之间的相关系数; $\bar{X}_i$ 为指标 i 标准化后的均值; N 为指标数据的年份总数; Q_j 为指标 j 的冲突性量化值; m 为指标总数; P_j 为指标 j 所包含的信息量; δ_j 为指标 j 的标准差; w_j 为指标 j 的权重; F_{at} 为子系统 a 在第 t 年的综合评价; d 为子系统 a 中包含的指标数。

3 研究方法

3.1 耦合协调模型

耦合协调模型源自物理学领域,主要用于分析两个或两个以上系统之间通过彼此作用而相互影响的程度。该模型首先计算两个子系统之间的耦合度和综合协调指数,在此基础上,计算表征系统间协同发展关系的耦合协调度 D 。计算公式为

$$C_{ab} = 2[F_a F_b / (F_a + F_b)^2]^{1/2} \quad (7)$$

$$T_{ab} = \alpha F_a + \beta F_b \quad (8)$$

$$D_{ab} = (C_{ab} T_{ab})^{1/2} \quad (9)$$

式中: C_{ab} 为系统 a 与系统 b 的耦合度; F_a 、 F_b 分别为两个子系统的综合评价; T_{ab} 为两系统的综合协调指数; D_{ab} 为两系统的耦合协调度。根据专家意见和文献[22],认为各子系统同等重要,待定系数 α 和 β 不存在偏重关系,均取值 0.5。

耦合协调度 D 处于 0 ~ 1.0,数值越大,表示子系统间耦合协调水平越高。根据 D 值的大小,可将城市水系统各子系统间的协调发展状况划分为不同类型^[23]:①严重失调。0 ≤ D ≤ 0.2,系统间相互制约、发展失调,城市水系统建设效率低,存在一系列城市水问题。②中度失调。0.2 < D ≤ 0.3,系统间矛盾逐渐缓和,但仍然存在相互抑制发展的现象。③基本协调。0.3 < D ≤ 0.5,系统间出现正向的相互促进作用,城市水问题得到修复。④中度协调。0.5 < D ≤ 0.8,系统间协调度较高,互促发展,城市水问题明显减少。⑤高度协调。0.8 < D ≤ 1.0,系统间高度协调,实现系统间多目标协调。

3.2 灰色关联度模型

耦合协调度可表征两系统间的协同发展关系,结合灰色关联分析可计算两系统中具体指标的关联程度,进而识别影响两系统耦合协调关系的关键指标。灰色关联度模型通过线性插值法将序列中的离

散数据映射为连续曲线,依据两个指标序列得到的曲线来判断指标之间的关联程度,曲线越相似,则指标间的关联程度越大^[24]。首先计算两系统中两两指标的关联系数,再进一步确定两指标间的关联度,关联度越大说明两指标对所属系统间作用关系的影响程度越大,指标的变化对系统间耦合关系的影响就越大。关联度的计算公式为

$$\gamma_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \xi_{ijt} \quad (10)$$

$$\text{其中 } \xi_{ijt} = \frac{\min_i \min_t |X_{jt} - X_{it}| + \rho \max_i \max_t |X_{jt} - X_{it}|}{|X_{jt} - X_{it}| + \rho \max_i \max_t |X_{jt} - X_{it}|}$$

式中: ξ_{ijt} 为指标 i 和指标 j 在第 t 年的关联系数; γ_{ij} 为两指标间的关联度; ρ 为分辨率,一般取 0.5。

3.3 向量自回归模型

向量自回归(vector autoregression, VAR)模型是一种用非结构化方法建立各变量之间关系的多方程模型,它将系统中每一个内生变量作为系统中所有内生变量滞后值的函数来构造模型,从而估计全部内生变量的动态关系,常用于时间序列系统的预测以及分析随机扰动对系统的动态影响^[25]。本文首先构建耦合协调度与评价指标的 VAR 模型,其一般表达式如式(11)所示。然后,基于 VAR 模型构建脉冲响应函数,以选取的指标为冲击变量开展脉冲响应分析,观察系统耦合协调度的当前值和未来值受该冲击的影响程度,揭示具体指标对系统协调发展的长期动态作用机制。

$$Y_t = \mu + \Pi_1 Y_{t-1} + \Pi_2 Y_{t-2} + \cdots + \Pi_p Y_{t-p} + \varepsilon_t \quad (11)$$

式中: Y_t 为包括耦合协调度和评价指标的 $k \times 1$ 维内生当期变量列向量; k 为变量个数; μ 为 $k \times 1$ 维常数项列向量; $\Pi_1, \Pi_2, \cdots, \Pi_p$ 为 $k \times k$ 维参数矩阵; ε_t 为 $k \times 1$ 维随机误差列向量; p 为滞后阶数。

4 结果与分析

4.1 海绵城市水系统耦合协调关系特征分析

4.1.1 城市间比较

根据耦合协调模型,计算两两子系统之间的耦合协调度,图 2 以雷达图的形式给出了 6 市 2005 年、2011 年、2016 年和 2020 年的计算结果。

由图 2 可见,虽然由于数据的波动性,个别城市在个别年份出现耦合协调度局部下降的情况,但在研究期内 6 市水系统的耦合协调关系整体上有了较大提升,全部由严重或中度失调状态达到了基本协调状态。6 市水系统的耦合协调发展模式较为相似,其中比较有特点的是深圳市和济南市。深圳水系统的耦合协调度起点低,但发展速度较快,研究期内年均增长率为 11.0%。由于产业密集、人口密度高,深圳曾是全国黑臭水体数量最多、水质污染最为严重的城市之一。随着海绵城市的推行,深圳出台治水提质工作计划(2015—2020 年),采取系列举措,治水成效显著,实现了黑臭水体全面消除,重点河流水质稳定,达到地表水Ⅳ类以上,并在全国第二批海绵城市试点绩效评价中获得第一名。相比之下,济南水系统协调关系呈现出起点高,发展速度缓慢的特点,耦合协调度年均增长率为 5.8%。“泉城”济南是典型的资源型缺水城市,一直以来,围绕

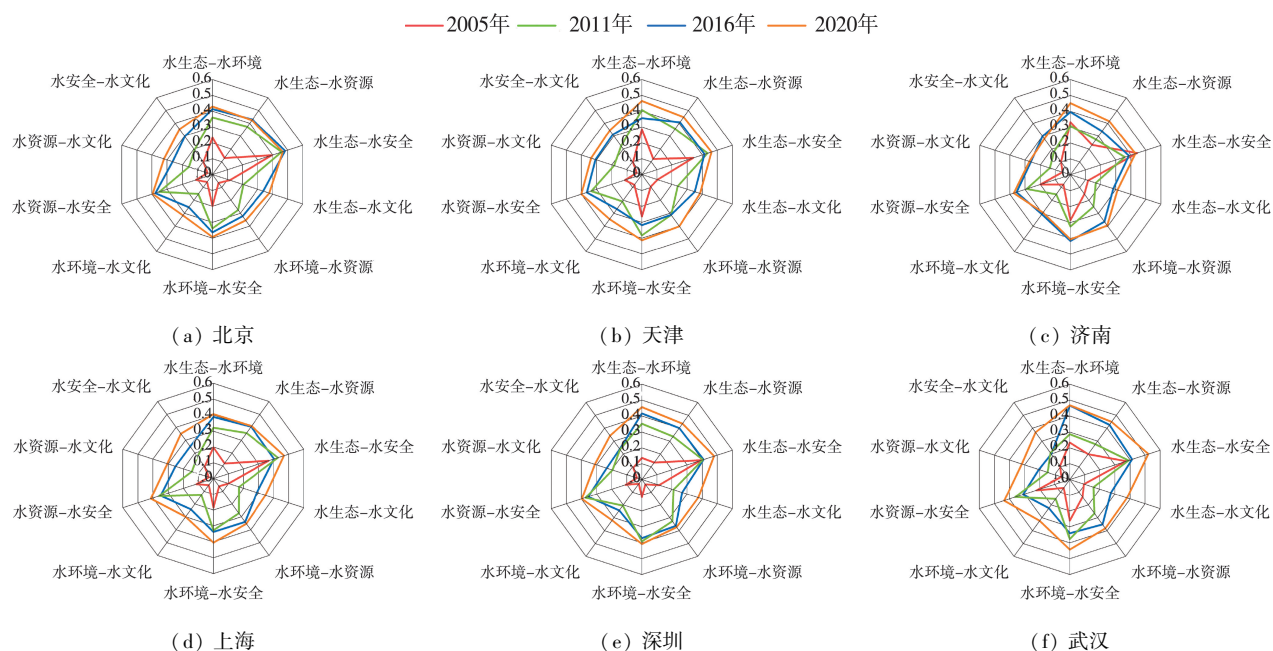


图 2 试点海绵城市水系统耦合协调度演化

Fig. 2 Evolution of coupling coordination degree of water system of pilot sponge cities

“供水保泉”积累了丰富的治水经验,在研究期初各子系统间呈现出比其他城市更好的协调关系。同时,济南作为黄河流域的中心城市,其水系建设与管理对于国家黄河流域生态保护和高质量发展重大战略的实施至关重要,然而由于其水系复杂,济南在水源保护、流域污染联防联控、流域生态修复等方面仍面临诸多挑战。

以 2016 年设立海绵城市建设试点为参照点,比较 2011—2015 年与 2016—2020 年 6 市水系统耦合协调度的平均年增长率,发现 6 市年均增长率在两阶段的均值分别为 4.0% 和 5.3%,说明海绵城市建设促使城市水系统以更快的增速向协调方向发展,即在一定程度上促进了水系统的耦合协调。进一步对 2016 年后各城市进行比较发现,上海、深圳、武汉等南方城市水系统的耦合协调关系改善较为明显,耦合协调度年均增长率为 5%~10%;而北京、济南等北方城市水系统的耦合协调度年均增长率则较低,为 2%~3%。实际上,南北方城市“海绵化”改造有其不同的侧重点。北方城市水资源匮乏,地下水超采和污染严重,海绵改造以提高水的存蓄、补给和回收利用为主。南方城市雨水充沛、河湖水系发达,由于过度强调经济发展导致地表水污染严重,相比之下,其治水的重点在于如何提升城市防洪排涝能力、消除城市黑臭水体、提高地表水质等。虽然海绵城市为城市水问题提供综合解决方案,但“城市看海”、黑臭水体是城市“海绵化”初期重点解决的问题,并且从各城市的实践来看已初见成效,所以短期内南方城市建设成效优于北方城市。因此,海绵城市应坚持因地制宜、因城施策,在统筹各水系统协调发展的同时考虑各城市的建设基础和特点。

4.1.2 子系统间比较

为了展示各子系统间的协调发展情况,计算各子系统与其他子系统耦合协调度的平均值,绘制其随时间变化的曲线,如图 3 所示。由图 3 可知,各子系统与其他子系统的耦合协调关系稳步上升,实现了从严重失调或中度失调到基本协调的转变。水生态子系统与其他 4 个子系统的耦合协调度最好,而水文化子系统与其他子系统的耦合协调度最差。水体具有流动性,水生态的改善是一个动态、持续、系统的过程,将全面带动城市其他子系统的良性发展,相反水生态的恶化也会对其他子系统的发展起到遏制作用。而对于水文化子系统,早期城市涉水的报道内容简单、形式单一,主要是对政府水务工作的报道以及对法定公开信息的公示等,新媒体(如微博、微信等)的兴起有效提升了信息传播和扩散的效率。政府和相关组织可方便、快捷地通过社交媒体

与公众进行交流、互动,实现居民对于城市水务、水治理的即时参与,有效促进了水文化子系统与其他子系统的耦合协调关系。

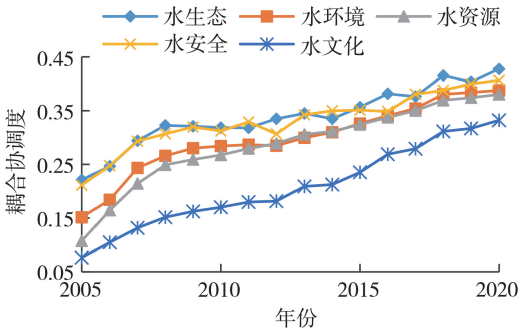


图 3 各子系统与其他子系统耦合协调发展趋势
Fig.3 Trends of coupling coordination relations between sub-systems

计算研究期内两两子系统间耦合协调度的均值得到图 4 所示柱状图,进一步反映了各子系统与其他子系统协调发展的情况。由图 4 可知,在两两子系统的耦合协调关系中,水生态与水安全子系统协调程度最高,而水资源与水文化子系统协调程度最差。水安全是城市水系统建设的红线,较早受到重视并着手治理,各城市可靠的用水和防洪保障体系已基本建设完成。相对成熟的水安全子系统对保护水生态子系统免受污染和灾害干扰,起到了重要作用。由于受传统水文化和用水习惯的影响,多数居民缺乏对我国水资源现状的正确认知,视水资源为用之不竭的公共资源,社会未能形成良好的节水意识和可持续发展理念,导致水文化与水资源子系统的协调促进效应较差。政府及相关部门应结合河湖长制平台,充分利用新媒体优势,建立多元化、层次化的水文化传播机制。

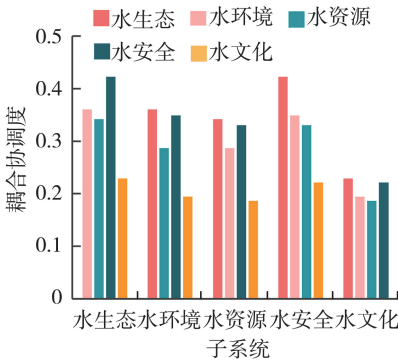


图 4 各子系统间的耦合协调度均值
Fig.4 Average coupling coordination degree between different sub-systems

水环境、水资源子系统与其他子系统的耦合协调处于中等水平,两子系统除了与水文化子系统协调关系较差外,二者之间的协调关系也有待加强。

水环境、水资源在取水和用水过程中联系紧密,良好的水环境是保障水源供应数量和质量的基础,而优质的水资源又对水土保持、环境净化具有重要作用。城市化过程中需水量迅猛增长,水资源的过度开采给水环境带来了巨大压力,产生了一系列严重的环境问题,例如,华北地区地下水超采导致地下水位连年下降,出现了河湖断流、地面沉降、裂缝等环境问题。政府及相关部门应平衡生活、生产用水与水环境保护之间的矛盾,在保证经济产能的同时,实现水资源利用和水环境保护的双向促进。

4.2 海绵城市水系统耦合协调响应关系分析

4.2.1 关键指标识别

为进一步探究关键指标对系统耦合协调度的动态作用机制,基于耦合协调分析结果,选取3组最具代表性的水系统作为分析对象,包括耦合协调发展水平最好的水生态与水安全子系统和协调关系最差的水资源与水文化子系统,以及联系紧密但协调关系还需进一步加强的水资源与水环境子系统。表1的灰色关联分析结果展示了各子系统指标间的关联度。总体来看,各指标间的关联度均达0.5以上,正相关关系较强,表明城市水系统中5个子系统的指标间存在较强的相互促进作用。针对上述3组水系统,选取两子系统中关联度最高的关键指标与耦合协调度建立VAR模型,并以关键指标作为脉冲响应分析的冲击序列。这些关键指标包括:水生态与水安全系统中的河道治理率和饮用水达标率($R=0.754$);水资源与水文化子系统的水再利用率和官方平台

宣传次数($R=0.745$);水资源与水环境子系统中的万元GDP用水量和污水处理率($R=0.938$)。

4.2.2 脉冲响应分析

建立VAR模型之前为避免出现伪回归现象和确保模型的稳定性和准确度,需要对数据进行检验。利用EViews 9.0进行ADF(augmented Dickey-Fuller)单位根检验,在5%的显著性水平下水生态与水安全子系统耦合协调度的一阶差分序列为平稳序列,河道治理率和饮用水达标率指标为平稳序列;水资源与水文化子系统耦合协调度为平稳序列,水再利用率和官方平台宣传次数指标的一阶差分序列为平稳序列;水资源与水环境子系统耦合协调度、万元GDP用水量和污水处理率指标均为平稳序列。根据AIC(Akaike information criterion)、SC(Schwarz criterion)和HQC(Hannan-Quinn criterion)信息准则,确定所构建的3个VAR模型的最佳滞后阶数分别为二阶、二阶和三阶。进一步根据AR(auto-regression)根检验模型稳定性,每个变量的特征根均落在单位圆内,表明3个VAR模型均通过了稳定性检验。因此分别以河道治理率和饮用水达标率、水再利用率和官方平台宣传次数以及万元GDP用水量和污水处理率作为冲击进行脉冲响应分析,结果见图5。

a. 水生态与水安全子系统耦合协调度对河道治理率、饮用水达标率的脉冲响应。由图5(a)可见水生态与水安全子系统的耦合协调度对两指标的冲击响应总体上较为一致。具体来说,冲击在第1期

表1 各子系统指标间的关联度

Table 1 Correlation between indicators of sub-systems

评价指标	城市绿化 覆盖率	河湖 水面率	河道 治理率	人均 地下水 资源量	地表水 功能区 达标率	污水 处理率	万元GDP 用水量	水再利 用率	城市旱涝 受灾人数	饮用水 达标率
地表水功能区达标率	0.696	0.812	0.668	0.547						
污水处理率	0.599	0.624	0.720	0.562						
万元GDP用水量	0.623	0.628	0.708	0.574	0.706	0.938				
水再利用率	0.789	0.737	0.679	0.575	0.786	0.731				
城市旱涝受灾人数	0.564	0.570	0.699	0.633	0.609	0.682	0.683	0.621		
饮用水达标率	0.586	0.643	0.754	0.585	0.634	0.788	0.759	0.657		
官方平台宣传次数	0.803	0.821	0.619	0.544	0.781	0.606	0.612	0.745	0.569	0.581

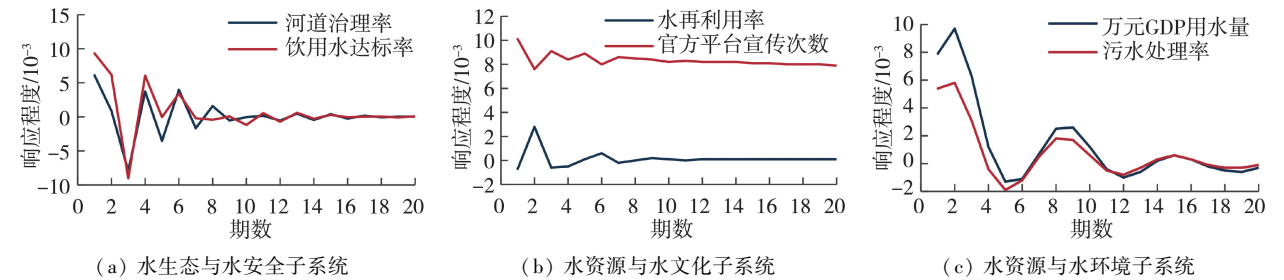


图5 不同子系统耦合协调度的脉冲响应

Fig. 5 Impulse response of coupling coordination degree of different sub-systems

和第2期对耦合协调度产生正向影响,并在第1期达到正向影响的峰值,第3期时影响急剧下降,达到负向影响的最低点,此后第4期至第10期耦合协调度受两指标冲击而震荡,但震荡幅度逐期递减,最后渐趋于0。说明初期河道治理率、饮用水达标率的冲击可以快速提升两子系统的协调关系,但该影响波动性较大,呈现正向与负向的交替作用,最终趋于消失。基于城市水系间的关联性和水生态的脆弱性,加强城市间及流域间的联合执法是提升水生态与水安全协调发展的关键。

b. 水资源与水文化子系统耦合协调度对水再利用率、官方平台宣传次数的脉冲响应。由图5(b)可见耦合协调度在第1期官方平台宣传次数冲击下达到正向影响的峰值后急剧下降至最低点,小幅波动后稳定在0.008左右。水再利用率仅起到短期的正向作用,对两子系统的耦合协调度不具有有效持续的促进效果。官方平台宣传次数对两子系统的正向影响显著高于水再利用率,说明提升水文化能够奠定水系统建设的群众基础和人文基础,持续稳定地促进水资源系统的发展,是保障城市水系统可持续发展的长久之计。

c. 水资源与水环境子系统耦合协调度对万元GDP用水量、污水处理率的脉冲响应。由图5(c)可见两指标对子系统耦合协调度的影响相似,即第1期至第2期呈正向效应,在第2期达到峰值,但前者较后者的正向影响更大。第2期至第5期两指标的影响逐步下降,而后正向促进效应与负向抑制效应交替出现,耦合协调度渐趋于0。由此可见,短期内万元GDP用水量和污水处理率的提升对两子系统协调发展具有显著促进作用,并且这种正向影响可持续一定期数;而从长期来看,该影响随期数增加逐步减弱,持续能力较差。因此,应采取有效技术经济措施,注重发挥水资源集约利用和水环境保护之间的长效促进效应。

5 结 论

a. 研究期内6市水系统的耦合协调水平由严重或中度失调达到基本协调状态,整体呈现出较为类似的发展特征,海绵城市建设在一定程度上促进了水系统的协调发展,目前来看对南方城市(武汉、深圳、上海)水系统的提升比北方城市(济南、北京)更为明显。

b. 在城市水系统的协调关系中,水生态与水安全子系统的耦合协调度最高,河道治理率和饮用水达标率对两子系统的协调关系呈现促进与阻碍交替的波动性影响;水资源与水文化子系统的耦合协调

度最差,但增长速度较快,官方平台宣传次数对两子系统的协调关系有显著且持续的促进效应;水资源与水环境子系统的耦合协调度有待提高,万元GDP用水量、污水处理率对两子系统耦合协调关系的促进效应持续期间较短。

参考文献:

- [1] 莫罹,龚道孝,高均海,等.城市水系统从理念、方法到规划实践[J].给水排水,2021,47(1):77-83. (MO Li, GONG Daoxiao, GAO Junhai, et al. Urban water system from conception, methods to planning practice[J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 47(1): 77-83. (in Chinese))
- [2] 王浩,梅超,刘家宏.海绵城市系统构建模式[J].水利学报,2017,48(9):1009-1014. (WANG Hao, MEI Chao, LIU Jiahong. Systematic construction pattern of the sponge city[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(9): 1009-1014. (in Chinese))
- [3] 谢映霞.基于海绵城市建设理念的系统治水思路[J].北京师范大学学报(自然科学版),2019,55(5):552-555. (XIE Yingxia. Thoughts on systematic water control based on the concept of sponge city construction[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2019, 55(5): 552-555. (in Chinese))
- [4] 杨默远,刘昌明,潘兴瑶,等.基于水循环视角的海绵城市系统及研究要点解析[J].地理学报,2020,75(9):1831-1844. (YANG Moyuan, LIU Changming, PAN Xingyao, et al. Analysis of sponge city system and research points from the perspective of urban water cycle[J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(9): 1831-1844. (in Chinese))
- [5] 章云睿,胡继元,李智轩,等.城市雨洪灾害风险治理研究进展与展望[J].西部人居环境学刊,2022,37(1):1-8. (ZHANG Yunrui, HU Jiyuan, LI Zhixuan, et al. Research progress and prospect of urban rain and flood disaster risk governance[J]. Journal of Human Settlements in West China, 2022, 37(1): 1-8. (in Chinese))
- [6] 张翔,廖辰昉,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] 迟国梁.关于新时代流域水环境治理技术体系的思考[J].水资源保护,2022,38(1):182-189. (CHI Guoliang. Thoughts on water environmental management technology system in watersheds in the new era[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1): 182-189. (in Chinese))
- [8] 陶洁,曹阳,左其亭.环境DNA技术在河流生态系统中的应用研究进展[J].水资源保护,2021,37(6):150-

156. (TAO Jie, CAO Yang, ZUO Qiting. Research progress on the application of environmental DNA technology on river ecosystem[J]. Water Resources Protection, 2021, 37 (6): 150-156. (in Chinese))
- [9] 李定强, 刘嘉华, 袁再健, 等. 城市低影响开发面源污染治理措施研究进展与展望[J]. 生态环境学报, 2019, 28 (10): 2110-2118. (LI Dingqiang, LIU Jiahua, YUAN Zaijian, et al. Research advance and prospects on low impact development control measures for urban non-point source pollution[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2019, 28(10): 2110-2118. (in Chinese))
- [10] 王锋, 何包钢. 水敏感城市治理模式与实践: 澳大利亚的探索[J]. 城市发展研究, 2017, 24 (10): 86-93. (WANG Feng, HE Baogang. Governance approach & practice of water sensitive city: Australia's exploration[J]. Urban Development Studies, 2017, 24 (10): 86-93. (in Chinese))
- [11] YANG Yuanyuan, LI Jing, HUANG Qiang, et al. Performance assessment of sponge city infrastructure on stormwater outflows using isochrone and SWMM models [J]. Journal of Hydrology, 2021, 597: 126151.
- [12] LUAN Bo, YIN Ruixue, XU Peng, et al. Evaluating green stormwater infrastructure strategies efficiencies in a rapidly urbanizing catchment using SWMM-based TOPSIS [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 223: 680-691.
- [13] 陈秋伶, 林凯荣, 陈文龙, 等. 多尺度海绵城市系统雨洪控制研究[J]. 水利学报, 2022, 53(7): 862-875. (CHEN Qiuling, LIN Kairong, CHEN Wenlong, et al. Study on storm flood control in multi-scale sponge city system[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53(7): 862-875. (in Chinese))
- [14] WANG Sisi, PALAZZO E. Sponge city and social equity: Impact assessment of urban stormwater management in Baicheng City, China [J]. Urban Climate, 2021, 37: 100829.
- [15] ZHOU Hong, LI Huiping, ZHAO Xianbo, et al. Emergy ecological model for sponge cities: a case study of China [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 296: 126530.
- [16] 高玉琴, 陈佳慧, 王冬冬, 等. 海绵城市低影响开发措施综合效益评价体系及应用[J]. 水资源保护, 2021, 37 (3): 13-19. (GAO Yuqin, CHEN Jiahui, WANG Dongdong, et al. Comprehensive benefits evaluation system and application of low impact development measures in sponge city [J]. Water Resources Protection, 2021, 37 (3): 13-19. (in Chinese))
- [17] TIAN Pei, WU Huaqing, YANG Tiantian, et al. Evaluation of urban water ecological civilization: a case study of three urban agglomerations in the Yangtze River Economic Belt, China [J]. Ecological Indicators, 2021, 123: 107351.
- [18] 曾恩钰, 陈永泰. 空间溢出视角下的城市水环境影响因素研究: 以太湖流域城市为例[J]. 长江流域资源与环境, 2022, 31 (6): 1312-1323. (ZENG Enyu, CHEN Yongtai. Research on the influencing factors of city water environment from the perspective of spatial spillover: a case of cities in the Taihu Basin [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2022, 31 (6): 1312-1323. (in Chinese))
- [19] 俞雅乖, 刘玲燕. 中国水资源效率的区域差异及影响因素分析[J]. 经济地理, 2017, 37 (7): 12-19. (YU Yaguai, LIU Lingyan. Regional differences and influence factors of water resource efficiency in China: based on super efficiency DEA-Tobit [J]. Economic Geography, 2017, 37(7): 12-19. (in Chinese))
- [20] 夏军, 石卫. 变化环境下中国水安全问题研究与展望[J]. 水利学报, 2016, 47 (3): 292-301. (XIA Jun, SHI Wei. Perspective on water security issue of changing environment in China [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(3): 292-301. (in Chinese))
- [21] 郑晓云. 水文化的理论与前景[J]. 思想战线, 2013, 39 (4): 1-8. (ZHENG Xiaoyun. The theory and prospect of water culture [J]. Thinking, 2013, 39 (4): 1-8. (in Chinese))
- [22] 孙红梅, 雷喻捷. 长三角城市群产业发展与环境规制的耦合关系: 微观数据实证[J]. 城市发展研究, 2019, 26 (11): 19-26. (SUN Hongmei, LEI Yujie. Coupling relationship between industrial development and environmental regulation in urban agglomeration of the Yangtze River Delta: microcosmic data demonstration [J]. Urban Development Studies, 2019, 26 (11): 19-26. (in Chinese))
- [23] 汪顺生, 杨金月, 王爱丽, 等. 河南省黄河流域水资源-经济-生态系统耦合协调评价及预测[J]. 湖泊科学, 2022, 34 (3): 919-934. (WANG Shunsheng, YANG Jinyue, WANG Aili, et al. Evaluation and forecast of coupling coordination of water resources, economy and ecosystem in the Yellow River Basin of Henan Province [J]. Journal of Lake Sciences, 2022, 34(3): 919-934. (in Chinese))
- [24] 林蔚, 陈梓林, 李晖. 东江下游流域城水耦合协调关系评价及其影响因素[J]. 水资源保护, 2022, 38 (4): 66-74. (LIN Wei, CHEN Zilin, LI Hui. Evaluation of urban-water coupling coordination relationship and its influencing factors in lower reaches of the Dongjiang River Basin [J]. Water Resources Protection, 2022, 38 (4): 66-74. (in Chinese))
- [25] CUI Herui, WU Ruirui, ZHAO Tian. Sustainable development study on an energy-economic-environment system based on a vector autoregression model in Shanxi, China [J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2019, 28(3): 1623-1635.

(收稿日期: 2022-07-12 编辑: 施业)