

基于复杂网络的水资源承载力系统指标间耦合关系研究 ——以甘肃省为例*

贾玉博^{1,2}, 粟晓玲^{1,2**}, 褚江东^{1,2}, 朱兴宇^{1,2}, 吴海江^{1,2}

(1: 西北农林科技大学, 旱区农业水土工程教育部重点实验室, 杨凌 712100)

(2: 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 杨凌 712100)

摘要: 揭示水资源承载力系统多个指标之间的动态耦合关系及其耦合水平对于提高区域水资源的可持续利用水平和保障经济社会的稳健发展至关重要。本文将水资源承载力系统划分为水资源、社会、经济和生态环境 4 个子系统并从中选取 16 个代表性指标; 采用回归系数和相关系数共同划分指标间耦合关系的类型, 最后基于滑动窗口法和网络分析法揭示多个指标之间耦合关系的动态变化趋势以及水资源承载力系统的耦合水平。以甘肃省为例, 结果表明: 甘肃省水资源承载力系统经历了耦合—解耦—再耦合的关联模式, 且在 2015 年之后, 正向协调关系的强度显著提升, 而权衡关系和负向协调关系的影响则明显减弱; 正向协调关系中的关键指标为水资源开发利用率、城镇化率、灌溉亩均用水量 and 人均 GDP, 其对正向协调关系的推动作用整体上随时间增强。权衡和负向协调关系中多数关键指标对这两种关系的推动作用随时间先增强后显著减弱, 但人均日用水量对权衡仍有较强的推动作用, 在未来水资源管理中应予以重点控制; 水资源承载力系统指标关联的模块由 7 个降低为 5 个, 表明系统耦合水平虽有所提高仍有提升空间。研究思路可为客观全面地分析系统的耦合协调提供新的有效途径。

关键词: 水资源承载力系统; 网络分析; 耦合协调; 水资源管理; 甘肃省

Coupling relationship between indexes of water resources carrying capacity system based on complex network: A case study of Gansu Province*

Jia Yubo^{1,2}, Su Xiaoling^{1,2**}, Chu Jiangdong^{1,2}, Zhu Xingyu^{1,2} & Wu Haijiang^{1,2}

(1: Key Laboratory for Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Area of Ministry of Education, Northwest A & F University, Yangling 712100, P.R.China)

(2: College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling 712100, P.R.China)

Abstract: Revealing the dynamic coupling relationships and coupling levels among multiple indicators of the water resources carrying capacity system is crucial for enhancing the sustainable utilization of regional water resources and ensuring the steady development of the economy and society. In this study, the water resources carrying capacity system (WCCS) is divided into four subsystems: water resources, society, economy, and ecological environment, from which 16 representative indicators are selected. Regression coefficients and correlation coefficients are jointly used to classify the coupling relationships among the indicators. Finally, based on the sliding window method and network analysis, the dynamic trends of the coupling relationships among multiple indicators and the coupling level of WCCS are revealed. Taking Gansu Province as an example, the results show that the WCCS in Gansu Province has undergone a coupling – decoupling – recoupling pattern. After 2015, the strength of the positive coordination relationship has significantly increased, while the impacts of trade-off and negative coordination relationships have notably decreased. The key indicators in the positive coordination relationship are water resources development and utilization rate, urbanization rate, irrigation water consumption per mu, and per capita GDP, which have generally strengthened their driving effects on the positive coordination relationship over time. Most key indicators in the trade-off and negative coordination relationships have initially

* 2024-03-14 收稿; 2024-05-14 收修改稿。

国家重点研发计划项目 (2022YFD1900501) 和中央高校基本科研业务费专项资金项目 (2023HHZX004) 联合资助。

** 通信作者; E-mail: xiaolingsu@nwfau.edu.cn。

strengthened and then significantly weakened their driving effects on these two relationships over time. However, per capita daily water consumption still has a strong driving effect on the trade-off relationship and should be a key focus in future water resources management. The number of modules associated with the indicators of the WCCS has decreased from seven to five, indicating that although the system's coupling level has improved, there is still room for further enhancement. The research approach provides a new and effective way to objectively and comprehensively analyze the coupling and coordination of the system.

Keywords: Water resources carrying system; network analysis; coupling coordination; water resources management; Gansu Province

水资源是关乎人类生存和社会经济发展的关键自然资源。然而,随着气候变化和经济高速增长,水资源匮乏等问题日益凸显,对区域的可持续发展造成了严重挑战^[1]。因此,越来越多的学者开始聚焦于有限水资源条件下,资源环境与社会发展的相互作用关系^[2-3]。在此背景下,“水资源承载力”这一概念逐渐被提出^[4]。但水资源承载力的概念尚未统一,大致可归纳为两种观点。一种观点从增长极限的角度出发,认为水资源承载力是在一定的经济、社会和技术条件下,某个区域水资源系统所能支撑的最大人口数量和水资源开发利用的最大规模^[5]。另一种观点则从可持续发展的角度出发,侧重于水资源与经济社会、生态环境之间的整体协调状态^[6]。尽管这两种观点的角度不同,但均揭示了水资源承载力是由水资源、社会、经济和生态环境等多个子系统构成的复杂多维决策系统,形成了一个相互交织、相互影响的网络^[7]。水资源承载力的概念为探究水资源与经济、社会和生态环境之间的动态关系奠定了坚实的理论基础。

水资源为经济社会可持续发展和生态环境保护提供基本的物质条件,经济社会的发展又会对水资源和生态环境的保护水平产生积极影响。此外,生态系统可在一定程度上吸收或降解经济社会活动产生的“三废”(废水、废气、废渣),为水资源的更新和恢复提供了重要的潜在条件^[8]。在水资源管理中,如果过度优化某一要素可能会导致瓶颈转移到系统的其他要素上,从而出现新的问题;系统内部任何一个子系统的安全受到威胁,其他子系统也会产生连锁反应^[9]。特别地,对于地处西北内陆的甘肃省而言,其水资源匮乏,加之受农业活动和工业化进程的强烈影响,水资源、社会、经济和生态环境之间的矛盾已经威胁甚至破坏了区域水资源承载力系统的动态平衡^[10],使得区域发展不平衡、不充分的问题日益凸显。因此,明晰甘肃省水资源承载力系统各要素及各子系统之间的动态耦合水平,对区域的水资源管理及社会经济可持续发展具有重要意义。

水资源、经济、社会和生态环境子系统之间耦合关系的评估方法主要包括库尔涅茨曲线(EKC)、系统动力学模型和耦合协调度模型等。EKC模型通常只适用于研究一个指标对另一个指标的单向影响^[11],难以揭示多个指标或多个子系统之间的双向耦合关系。例如,李雅男等^[12]探讨了中国城市工业化发展与PM2.5的关系,结果表明工业化对PM2.5浓度的影响呈显著的倒“U”型。系统动力学模型只能提供模拟变量自上而下或自下而上的单向变化,不能阐明系统内存在的互馈关系^[13]和量化系统的耦合水平。耦合协调度模型可有效分析系统间的相互作用程度^[14],计算简便,应用广泛。然而,耦合协调度模型在量化系统整体的耦合水平时侧重于以子系统为单元,难以深入分析多指标之间存在的复杂关系。此外,耦合协调度模型子系统的权重分配问题将影响最终的分析结果^[15]。总之,上述3种方法在揭示多个指标间错综复杂的耦合关系方面存在局限,同时难以客观反映系统整体耦合状态的动态演变过程。因此,亟需一种可分析水资源承载力系统多指标间耦合关系的动态变化以及反映系统整体耦合水平的方法。

网络分析法作为描述复杂系统的量化方法,可以通过绘制节点间的关系来实现网络内复杂关系的可视化^[16],并且网络指标(如聚类系数、度中心性和特征路径长度等)可分析网络的耦合特性^[17-18]。该方法已被广泛应用于水资源领域和生态领域的复杂系统研究。例如,Bodin等^[19]采用网络分析法探究了人和生态系统的互馈关系;张明斗等^[20]采用网络分析法探究城市水资源利用效率空间关联网络的整体结构、个体结构及其空间聚类方式;杨辉宇等^[21]基于网络分析法深入剖析粤港澳大湾区的“态—势”特征,揭示各城市生态位和竞合关系。鉴于网络分析法在表征多指标间复杂耦合关系的优势,本文将该方法首次引入到水资源承载力系统指标间耦合关系的研究中,旨在充分挖掘指标数据所蕴含的信息,从指标和子系统两个维度全面深入探究水资源承载力系统内部的相互作用,以避免传统方法的局限性和弥补子系统或多指标之间耦合关系难以表征的缺陷,为水资源承载力系统耦合协调状况的评价与分析提供新思路。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

甘肃省地处黄土高原、内蒙古高原和青藏高原的交汇处,总面积约 42.6 万 km²。地势自西南向东北倾斜,大致可分为陇南山地、陇中黄土高原、甘南高原、河西走廊、祁连山脉、河西走廊以北地带六大地形区,大部分地区属于干旱气候区,干旱和半干旱地区占区域面积的 75%。全省各地区的年降水量在 36.6~734.9 mm 之间,空间上大致呈东南向西北递减的趋势,大部分地区的降水量不足 400 mm。2022 年,甘肃省人均和亩均水资源量(1 亩=666.67 m²)分别为全国平均水平的 1/3 和 1/5,且农业用水占该省总用水的 79.4%。水资源短缺和用水结构不合理导致水资源系统和生态环境系统不同程度的恶化,严重制约了水资源—经济社会—生态环境系统的可持续发展^[22]。

1.2 指标选取与数据来源

水资源承载力系统耦合水平评价的首要工作是建立评价指标体系,其构建通常基于 2 种方式。第 1 种是基于框架模型选取指标并建立指标体系,例如压力—状态—响应模型(PSR)或其衍生变体模型^[23-24]。第 2 种方式是从水资源承载力的定义出发,将系统划分为相互关联的子系统,从水资源子系统、经济子系统、社会子系统和生态环境子系统选取指标建立评价指标体系^[25],在探究区域水资源承载力系统协调发展的问题上更具优势^[26]。因此,本研究采用第 2 种方式,并结合甘肃省干旱半干旱的气候特点和水资源开发利用状况,综合考虑指标的科学性、系统性及数据可获得性等原则,在前人研究的基础上^[27-28],从 4 个子系统中选取 16 个指标构建水资源承载力系统耦合水平评价指标体系(表 1)。根据指标对水资源承载力的影响区分指标的正向和负向属性。正向指标表示该指标值的增加将有利于水资源承载力的提升;相反,负向指标的增加则会对水资源承载力产生不利影响。各指标数据来源于《甘肃发展年鉴(2002—2021)》、《甘肃省水资源公报(2001—2020)》以及《中国城市统计年鉴(2002—2021)》。

表 1 水资源承载力系统耦合水平评价指标体系及部分年份指标数据

Tab.1 Evaluation index system of coupling level of water resources carrying capacity system and index data for some years

准则层	指标层	属性	单位	2001 年	2011 年	2020 年
水资源子系统	降水量(f1)	正向	mm	238.0	272.9	317.6
	产水模数(f2)	正向	万 m ³ /km ²	4.9	6.0	9.7
	人均水资源量(f3)	正向	m ³ /人	861.1	1061.3	1642.2
	水资源开发利用率(f4)	负向	%	54.7	45.2	26.7
	地下水开采率(f5)	负向	%	20.4	19.0	14.9
社会子系统	人口密度(f6)	负向	人/km ²	57.0	56.0	59.0
	城镇化率(f7)	正向	%	24.5	37.2	52.2
	人均日生活用水量(f8)	负向	L	46.8	77.0	80.4
	人均耕地面积(f9)	正向	亩/人	2.9	2.0	3.2
经济子系统	人均 GDP(f10)	正向	万元	0.4	2.0	3.6
	第三产业比重(f11)	正向	%	35.8	36.2	55.1
	万元工业增加值用水量(f12)	负向	m ³ /万元	417.4	78.9	27.3
	农田灌溉亩均用水量(f13)	负向	m ³	598.0	553.4	425.0
生态环境子系统	生态环境用水率(f14)	正向	%	0.11	2.4	9.7
	万元 GDP 污水排放量(f15)	负向	t/万元	94.2	13.7	7.7
	建成区绿化覆盖率(f16)	正向	%	14.7	27.9	37.6

1.3 研究方法

1.3.1 时间序列的处理 基于 R 语言 4.2.3 版本对数据进行统计处理和数据分析。借助滑动窗口法^[29],按时间顺序将每 5 年的水资源承载力系统的指标数据划分在 1 个窗口,从而得到了覆盖 2001—2020 年的 16 个

连续时间段,即 2001—2005 年、2002—2006 年……直至 2016—2020 年(窗口 1~窗口 16)。其具体处理方法为一个固定长度的窗口从数据序列的起始位置开始,逐步向序列的末尾移动。然后,对每个窗口内的数据进行回归分析,并探讨各指标之间的相关性,从而为后续的网络指标计算奠定基础。值得注意的是,在生成窗口数据时,并未改变原始数据的分布或大小。

1.3.2 系统耦合关系类型的划分 为了便于结果的解释,将指标间的耦合关系分为正向协调、权衡和负向协调。正向协调关系是指标之间存在的最佳关系,表示两个指标之间相互配合,一致向好的方向发展^[30]。例如,若人均 GDP 增加、农田灌溉亩均用水量减少,且二者存在关联,则视为正向协调关系。权衡关系表示一个指标的提高引起了另一个指标的恶化。例如,第三产业比重提高却使万元 GDP 污水排放量增加。类似地,负向协调关系表示指标之间存在关联,但一致趋于坏的方向发展。例如,若地下水开采率和农田灌溉亩均用水量在发展过程中均增加且相互影响。可见,指标的发展方向和指标之间有无关联共同决定了指标之间耦合关系的类型。为了量化这种关系,可采用回归系数和相关系数分别表征指标的发展趋势和指标间的相关性,具体的计算公式如下:

1) 回归分析。通过对各指标与序列索引值的线性回归系数(β)的正负判断指标的发展方向。若 $\beta > 0$,则表示指标值在该序列段内增长,对于正向指标,表明向好的方向发展,负向指标则向坏的方向发展;反之 $\beta < 0$,表示指标值减小,对于正向指标,表明向坏的方向发展,负向指标则向好的方向发展。线性回归系数的计算公式如下:

$$\hat{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T y \quad (1)$$

式中, $\hat{\beta}$ 表示回归系数向量, X 和 X^T 表示指标序列值及其转置, y 表示某一窗口下的时间序列(如 2001—2005 年)。

2) 相关性分析。采用皮尔逊(Pearson)相关系数分析指标之间的关联作用,相关系数的绝对值大小反映了关联作用的程度。同时引入显著性水平($P < 0.05$)避免统计上的虚假相关性,仅对指标之间存在显著相关的关系进行分析。由滑动窗口法得到某一窗口内指标数据间的相关系数 r_{ij} ,计算公式如下:

$$r_{ij} = \frac{\text{Cov}(X_i, X_j)}{\sigma_{X_i} \sigma_{X_j}} \quad (2)$$

式中, X_i 、 X_j 分别表示指标 i 和指标 j 的序列值, $\text{Cov}(X_i, X_j)$ 表示指标 X_i 与指标 X_j 之间的协方差, σ_{X_i} 和 σ_{X_j} 分别表示变量 X_i 和变量 X_j 的标准差。

根据相关分析和回归分析的结果划分指标之间的耦合关系如表 2 所示。

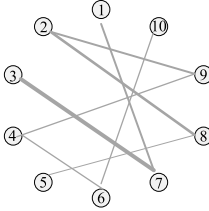
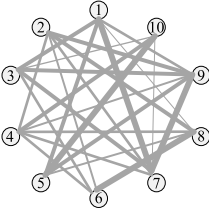
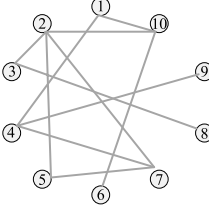
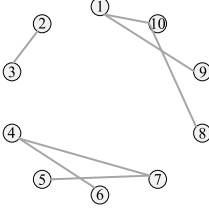
1.3.3 网络构建及网络指标 网络被定义为节点和连接两节点的边的集合^[31]。将前述 16 个指标作为网络节点。基于 R 包 igraph 分析每个窗口指标之间的相关性,并将具有显著相关性的节点在网络中以连边的形式表示^[32],不同的连边颜色代表不同的耦合关系类型,且相关性越大表明节点之间的关联强度越大。而与单个节点关联的边的数量定义为节点度,它反映了该节点与其他节点的连接情况。节点度越高,表示该节点与其他更多节点建立了连接。为了更准确地衡量各节点在网络中的重要性及其对网络结构的贡献,本研究引入加权节点度^[29],即根据节点与其他节点的连接强度(相关性大小)对节点度进行加权处理。

采用连通性和模块度两个网络指标探究系统指标之间耦合关系特征,其定义及含义见表 3。可见连通性和模块度的计算过程不涉及指标或子系统的权重分配,避免了现有研究所提及的权重系数设置中主观性过强的问题^[33-34]。因此,基于该研究方法进行系统指标之间耦合关系的分析结果更为客观可靠。

表 2 系统指标之间耦合关系类型的划分
Tab.2 Classification of coupling relationship types between system indicators

判别标准			耦合关系
r_{ij}	β	两指标属性	
>0	>0	正向,正向	正向协调
>0	<0	负向,负向	正向协调
>0		正向,负向	权衡
>0	>0	负向,负向	负向协调
>0	<0	正向,正向	负向协调
<0	>0(正向)	正向,负向	正向协调
<0		正向,正向	权衡
<0		负向,负向	权衡
<0	<0(正向)	正向,负向	负向协调

表 3 网络指标的定义及含义
Tab.3 Definition and meaning of network indicators

关键指标	定义(公式)	含义	低	高
连通性	网络中连边的数目占所有可能连边数目的比例并由连边的强度加权; 连通性 = $\sum pc / (n(n-1)/2)$, pc 为相关性系数, n 为网络中节点数目	高连通性表明多个指标之间有较强的耦合关系; 低连通性表明只有少数指标之间存在关联且强度较弱		
模块度	模块度是用来分析关联网络聚类特征的重要手段。模块度由 igraph 包中的“cluster walktrap”算法计算 ^[31]	高模块度表示网络划分为多个孤立的整体; 低模块度表示多个指标倾向相互关联		

2 结果与分析

2.1 耦合网络的可视化

图 1 为 2001—2020 年间 4 个时段甘肃省水资源承载力系统指标之间的耦合网络图, 图中的指标编号同表 1, 边的宽度代表指标之间的关联强度。2001—2005 年具有耦合关系的指标较少, 水资源承载力系统的耦合程度较低。城镇化率($f7$)、人均 GDP($f10$)和第三产业比重($f11$)与其他指标主要为正向协调关系, 表明该阶段城市化水平和经济发展对其他指标有促进作用, 但由于整体经济水平较低导致其他指标发展也相对缓慢。此外, 该阶段少数指标之间存在较强的权衡关系, 指标之间发展程度不匹配。例如, 人均耕地面积($f9$)和农田灌溉亩均用水量($f13$)之间的权衡反映了农田灌溉节水技术的提高未能满足人均耕地面积的扩张需求。2006—2010 年正向协调关系在整个系统占主导地位, 这是因为随着甘肃省自 2006 年开始实施“十一五规划”和“工业强省战略”, 推动了基础设施和经济结构的不断改善, 进而促进了正向协调关系的形成和发展。该阶段的权衡关系较弱, 仅存于人均每日用水量与人均 GDP 之间。负向协调关系则仅存于第三产业比重和建成区绿化覆盖率之间。2011—2015 年指标之间的关联作用集中在水资源子系统和经济社会子系统。具体表现为反映经济发展、产业结构和用水效率的人均 GDP、第三产业比重和万元工业增加值用水量与其他指标多为正向协调发展, 然而水资源子系统内部存在较多的负向协调关系并与经济子系统之间存在权衡。这是由于经济发展和人口快速增长带来技术水平提高和劳动力增加的同时需要消耗大量的水资源, 但该阶段水资源禀赋状况较差, 降水量和人均水资源量均呈减小趋势。2016—2020 年系统结构更加复杂, 除存在少量的权衡关系外, 指标之间的正向协调关系数量显著增加, 这些关系的联系强度也整体得到了增强, 表明系统整体向好发展。

2.2 耦合关系特征的分析

耦合关系连通性(即相关关系的数量和强度)的大小反映了指标之间耦合程度的强弱, 图 2a 揭示了 3 种不同耦合关系连通性的动态变化趋势。可以看出, 指标间的耦合关系随时间呈现出显著的非线性变化趋势。具体而言, 正向协调关系的连通性经历了上升—下降—上升—下降的波动趋势, 表明其随时间经历了耦合—解耦—再耦合的过程, 且再耦合的耦合水平高于初始状态。权衡关系和负向协调关系的连通性呈缓慢上升—下降的趋势。具体而言, 自 2011 年起(窗口 11)正向协调关系的连通性呈增加趋势, 至 2015—2019 年达到峰值。而权衡关系的连通性在 2014—2018 年阶段为 0.08, 至 2016—2020 年阶段则下降至 0.02。另外, 负向协调关系的连通性在 2011 年后逐步下降, 并在 2015 年后降至 0。由此可见, 自 2015 年后, 各指标

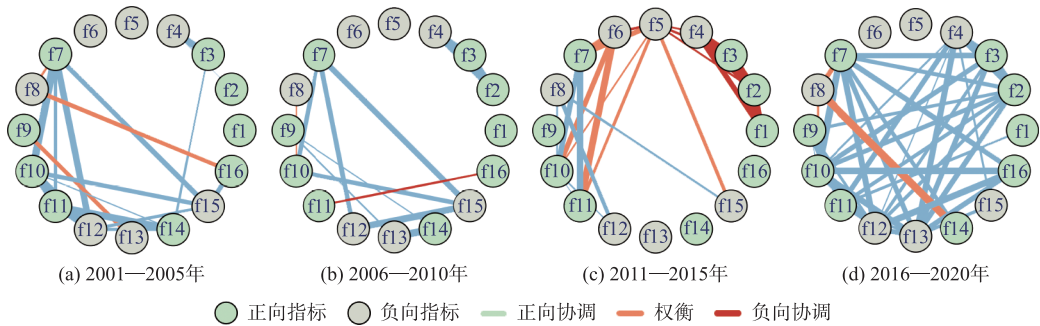


图1 甘肃省水资源承载力系统交互网络

Fig.1 Interactive network of water resources carrying system in Gansu Province

之间倾向于正向协调发展,进而可以推断出水资源承载力系统处于较高的正向协调水平。

图2b为正向协调关系的模块度随窗口的变化,由于权衡关系和负向协调关系在系统中整体占比较少,因此在本研究中没有考虑。可以看出,正向协调关系的模块度的总体趋势与连通性的趋势相反,呈周期下降的趋势,在2015年后模块度趋于0,结合网络图分析表明多个指标更倾向于整体发挥正向作用,系统正向协调水平提高。正向协调关系窗口1至窗口8的模块度波动较大,窗口9至窗口16波动较小,两个阶段中后一阶段整体的模块度低于前一阶段,但两个阶段均存在某一时段的模块度处于低值的情况,但其原因不同。例如,窗口4的模块度趋于0,是由于这一时段的正向协调关系仅存在于城镇化率、人均GDP、第三产业比重和万元GDP污水排放量中,且这4个指标两两之间相互影响,没有明显的模块化。窗口15以来模块度趋于0,是由于具有耦合关系的指标数目显著增多且均匀分布在各子系统,并共同作用于整个系统。

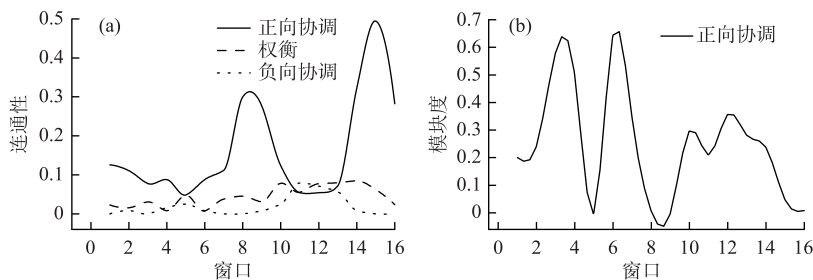


图2 3种耦合关系的连通性(a)和正向协调关系的模块度(b)随窗口的变化

Fig.2 The connectivity of the three coupling relationships(a) and the modularity degree forward coordination relationship(b) changes with the window

2.3 关键指标的特征分析

图3为3种不同耦合关系中关键指标的动态变化特征,在水资源管理中通过改善关键指标可以促进整个系统的发展,实现事半功倍的效果。可以看出,在正向协调关系中多数关键指标的加权节点度随窗口波动上升,形成两个峰值,后一个峰值集中出现在窗口15,且数值高于前一个峰值。水资源开发利用、城镇化率、农田灌溉亩均用水量、人均GDP在正向协调关系中具有较高的加权节点度,是相对占主导地位的指标。这表明随着这些指标的改进,许多其他指标在一定程度上也得到改善,对指标间正向协调关系的形成具有重要作用。其中农田灌溉亩均用水量在2011年前的加权节点度偏低,而2011年以后(窗口11)其加权节点度逐渐增大,成为前3个关键指标之一。水资源开发利用也显现出类似的趋势。这两个负向指标的变化表明在2011年以来与其他指标互相促进并得到改善,这可能与2011年后甘肃省农业机械化水平和农业水利设施等投入要素的改善和一系列水管理制度的实施有关^[35]。城镇化率和人均GDP的加权节点度在

整个时段内一直较高,原因是城市化水平和经济水平的提高可以带来大量的技术效应,促进用水效率和环保水平的提升,而水资源的合理配置和生态环境质量的提升又可以促进社会经济发展。

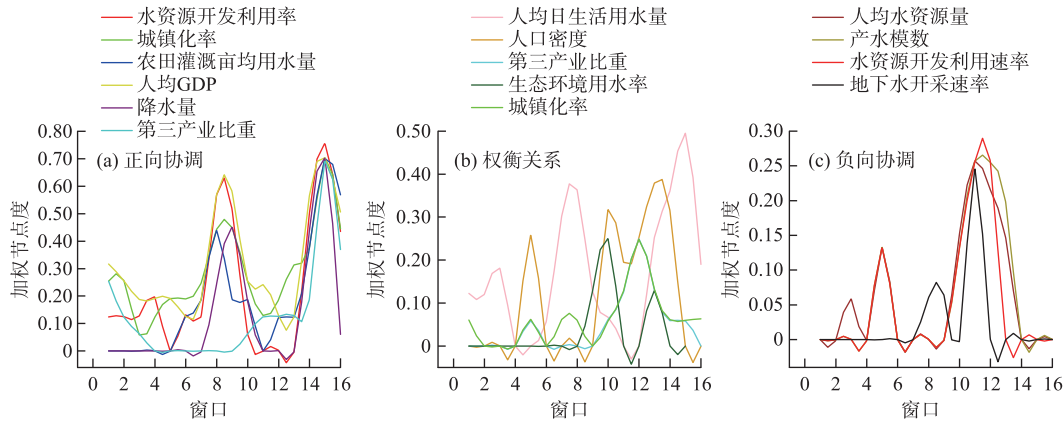


图3 3种耦合关系中的关键指标的加权节点度随窗口的变化
(图中仅显示正向协调关系中最大加权节点度 >0.65 的指标,权衡关系中最大加权节点度 >0.24 的指标和负向协调关系中最大加权节点度 >0.20 的指标)

Fig.3 The change of the weighted node degree of the key indicators in the three coupling relationships with the window

在权衡关系中,多数指标的加权节点度较低,而人均日生活用水量和人口密度的加权节点度较高,倾向与其他指标之间存在权衡关系。在2015年后(窗口15),除人均日生活用水量的加权节点度仍处于高值,对权衡关系仍有较强的推动作用外,其余指标的加权节点度趋于0。在人类日益多样化生存和发展需求的背景下,随着生活用水需求的不断增长,水资源的需求也随之不断增加,这不利水资源承载力的提升。但人均日生活用水量在权衡关系中具有较高的加权节点度,间接表明与其相关联的指标在逐步改善。城镇化率、生态环境用水率和第三产业比重的变化趋势相似,在2001—2008年间均处于较低的加权节点度,而在2009—2013年间加权节点度较大,是该阶段权衡关系中的主要指标,2014—2020年间加权节点度较低,与其他指标之间的冲突减小。这可能是由于在2008年前,城市化和产业结构调整对资源和环境造成了显著的负面影响。然而,随着经济的进一步发展,产业生产力得到提升,经济资金得到合理分配。此外,随着传统产业的升级改造、环境治理资金的增加以及绿色生产和生活方式等措施的广泛推行,资源和环境的高水平保护也相应得到了坚实的基础。这些措施有效地降低了发展所带来的资源环境成本,从而使得之前的冲突逐渐得到缓解。Omer等^[36]也支持这一观点。

在负向协调关系中加权节点度较高的指标集中于水资源子系统,分别是人均水资源量、产水模数、水资源开发利用率和地下水开采率。4个指标的加权节点度变化趋势基本一致,2010年前波动上升,在窗口11(2011—2015年)附近达到最大值,之后又显著下降。这是由于2010年前甘肃省经济社会的不充分发展对水资源子系统的依赖大,同时,水资源的粗放利用导致生态环境恶化。2011—2015年间水资源条件成为区域发展的主要瓶颈。然而,2015年后随着最严格水资源管理和用水效益提升等影响下,经济社会的发展与水资源的利用基本协调。

2.4 水资源承载力系统的解耦与重组

图4展示了水资源承载力系统模块化结构在4个不同时段动态演变。从子系统的视角来看,这一演变过程清晰地反映了各指标间解耦与耦合的交互作用。在2001—2005年期间,系统内的16个指标整合为7个模块,其中水资源子系统被细分为3个模块。值得注意的是,社会子系统的4个指标(f6~f9)与生态子系统之间展现了较高的耦合程度。同时,仅有一对指标将社会子系统与经济子系统相连接(模块A6),而经济子系统内部的指标则呈现出紧密的耦合关系,并与生态环境用水率相关联(模块A7)。然而,在2006—

2010年期间,尽管水资源子系统的模块结构保持相对稳定,但社会子系统与经济子系统之间的相互作用却显著增强(模块B5)。2011—2015年水资源子系统经历了明显的结构变化,由分散的两个子模块聚集为一个模块。然而,该阶段内水资源子系统与其他子系统的耦合水平仍然较低,地下水开采率对经济社会子系统产生较大影响(模块C2)。这一现象深刻揭示了在该时期内,甘肃省的经济社会发展在很大程度上依赖于地下水资源的利用。进入2016—2020年阶段,系统的模块结构再次经历了较大的变化,从7个模块聚合为5个模块。这一变化虽然在一定程度上提升了水资源承载力系统整体的耦合水平,但仍存在进一步优化的潜力。水资源子系统与其他子系统的多个指标紧密聚合。同时,生态环境子系统的3个指标与人均GDP和城镇化率构成一个模块(模块D5),凸显出经济社会发展与生态环境之间的耦合关系日趋显著。

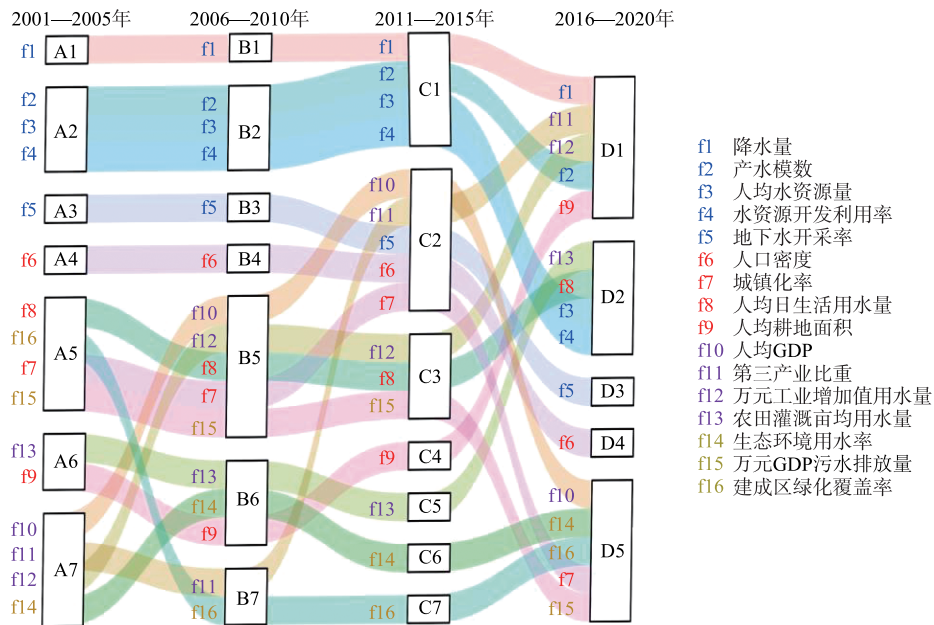


图4 4个阶段下水资源承载力系统的模块化结构(蓝色指标所属水资源子系统,红色指标所属社会子系统,紫色指标所属经济子系统,黄色指标所属生态环境子系统)

Fig.4 The module structure of the four-stage launching resource carrying systems

3 讨论

3.1 耦合关系特征的变化趋势

水资源承载力系统是一个多指标交织的复杂系统,本研究揭示了16个指标之间随时间经历了耦合—解耦—再耦合的关联模式。2001—2020年间,甘肃省水资源承载力系统正向协调、权衡和负向协调关系的连通性在2001—2009年间均处于低位,在2010—2014年间均有所增大,而权衡和负向协调的连通性在2015年后均减小甚至消失。这可能是由于严格的水资源管理降低了西北地区经济发展对水资源的依赖,促进了产业转型和系统整体的协同发展^[37]。本研究将显著相关性阈值 P 设为0.05,阈值取值的不同可能会对结果产生影响,未来研究中应当对阈值的选择进一步考虑。指标之间的相互作用随时间的非线性变化趋势与其他研究视角的结果相符。先前的研究运用库兹涅茨曲线和环境库兹涅茨曲线等概念在实例上证明,经济发展与环境污染^[38]以及城市化与环境变化^[39]之间的关系呈现出倒U型或倒N型曲线。这些研究表明,在经济发展的初期阶段,经济发展目标的改善将会损害社会和环境发展目标,但在转折点之后,它们将与其他发展目标同时改善。

3.2 窗口大小对结果的影响

为获得更加可靠的实验结果,本研究参考武旭同等^[40]采用的窗口选择方法,通过分析不同窗口大小下

两个网络特征(连通性和模块度)的变化趋势并计算各移动窗口大小下网络特征的变化范围与所有移动窗口大小下网络特征的最大变化范围的比例,从而确定最合适的窗口大小。较大的时间窗口(例如 2001—2010 年、2002—2011 年)可能遗漏细节变化,因为它们涵盖了更长的时间跨度,而较小的时间窗口(例如 2001—2005 年、2002—2006 年)则更能够反映特定时期的情况,如 2005 年的情况。因此,本研究设置了窗口大小为 5、6、7 的实验组,可以看出在同一耦合关系类型下,网络特征的变化趋势和转折点位置在所有窗口下基本相同(表 4)。此外,在窗口大小为 5 时,两个网络特征的变化范围与最大变化范围的比例均超过 75%,与其他移动窗口大小相比,窗口大小为 5 时可以避免强调一个网络指标的变化。例如,在窗口大小为 7 时,对于正向协调关系连通性的变化被强调(100%),而模块度的变化被低估(60.9%)。

表 4 不同窗口大小对网络指标结果的影响

Tab.4 The impact of different window sizes on network indicator results

耦合 关系	网络 指标	窗口 大小	整体 趋势	转折 年份	网络指标的 变化范围/所有窗口下的 最大变化范围
正向协调	连通性	5	上升—下降—上升—下降	2009 年、2011 年、2015 年	79.3%
		6	上升—下降—上升—下降	2009 年、2011 年、2014 年	88.6%
		7	上升—下降—上升	2008 年、2013 年	100.0%
	模块度	5	周期下降	2003 年、2005 年、2007 年、 2009 年、2013 年	100.0%
		6	周期下降	2003 年、2005 年、2007 年、 2008 年、2014 年	70.1%
		7	周期下降	2004 年、2009 年、2013 年	60.9%
权衡	连通性	5	波动上升—下降	2014 年	86.9%
		6	波动上升—下降	2014 年	100.0%
		7	波动上升—下降	2013 年	73.7%
负向协调	连通性	5	波动上升—下降	2011 年	85.4%
		6	波动上升—下降	2012 年	92.3%
		7	波动上升—下降	2011 年	100%

3.3 措施建议

水资源承载力系统指标之间复杂的耦合关系加剧了系统高效调控的难度,研究结果有助于加深对水资源承载力系统的认识,可为甘肃省水资源可持续发展的政策制定提供参考依据。

1) 农田灌溉亩均用水量对正向协调关系的形成具有重要作用。因此,建议根据地区特点优化农业生产布局,调整种植结构,全面贯彻适水种植理念,并改造升级灌溉设施,大力发展大田膜下滴灌和水肥一体化等先进技术,以提高灌溉水利用系数,降低农田灌溉用水量,从而实现水资源的高效利用和农业的可持续发展。

2) 人均生活用水量已成为制约水资源承载力系统协调发展的关键因素。鉴于此,应当贯彻“以水定城、以水定人”的原则,大力推进节水型城市建设。具体而言,要优化供水管网,提升用水效率。同时,加强节水宣传教育、完善节水相关法规,并推动水权制度的创新,鼓励和引导更广泛的公众参与节水行动,共同促进水资源的合理利用。

3) 经济社会发展与生态环境之间的耦合关系日益紧密。因此,需坚持生态优先的原则,提升生态环境用水率和建成区绿化覆盖率以及减少万元 GDP 污水排放量,以实现经济和生态环境的高水平协调。

由于资料获取的限制,本研究未探讨区域耦合协调状况的空间异质性。然而,若能从空间层面对耦合协调状况进行深入分析,有望为政策制定者提供更具体的指导。此外,当前水资源承载力系统耦合水平的评价指标体系中,指标的正负向判定主要依赖于前人研究和定性分析,尚缺乏充分的计算依据,这需要在未来进行更深入的研究。

4 结论

本文基于网络分析法直观地揭示了甘肃省 2001—2020 年水资源承载力系统指标之间的复杂关系,采用连通性和模块度两个网络关键指标以及加权节点度分析了指标之间的耦合关系和各关键指标的动态变化趋势。得到以下结论:

1) 甘肃省水资源承载力系统指标间的耦合关系呈现出复杂多变的网络结构形态,随时间经历了耦合—解耦—再耦合的关联模式,指标间正向协调关系的连通性随时间整体增大,而权衡和负向协调关系的连通性随时间先增大后减小,且在 2015 年之后处于低值。研究期系统正向协调水平提高,权衡和负向协调水平降低。此外,系统正向协调关系的模块度总体呈波动下降的趋势并在 2015 年后趋于 0,表明具有正向协调关系的指标倾向于协同发挥正向作用。

2) 水资源开发利用、城镇化率、农田灌溉亩均用水量 and 人均 GDP 对指标间正向协调关系的形成具有显著影响,且影响程度随时间整体增强。在权衡关系中除人均日生活用水量外其余关键指标对关系的影响随时间先增大后减小,对权衡关系的促进作用在 2015 年后显著减弱。在负向协调关系中的 4 个关键指标对关系的影响呈先增强后减弱的趋势。

3) 甘肃省水资源承载力系统指标关联的模块由 2001—2005 年间的 7 个模块变为当前的 5 个模块,系统整体的耦合水平有所提升。此外,经济社会模块与生态环境模块的耦合关系更加明显。

5 参考文献

- [1] Meng XM, Wu LF. Prediction of per capita water consumption for 31 regions in China. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, **28**(23): 29253-29264. DOI: 10.1007/s11356-021-12368-0.
- [2] Arrow K, Bolin B, Costanza R *et al.* Economic growth, carrying capacity, and the environment. *Ecological Applications*, 1996, **6**(1): 13-15. DOI: 10.2307/2269539.
- [3] Wang ZJ, Weng WB, Ma HZ. Study on planning methods for sustainable use of water resources in arid inland areas. *Journal of Tsinghua University: Science and Technology*, 1998, (1): 35-38, 60. [王忠静, 翁文斌, 马宏志. 干旱内陆区水资源可持续利用规划方法研究. 清华大学学报: 自然科学版, 1998, (1): 35-38, 60.]
- [4] Zhang L, Dong ZC, Zhang W. Discussion on the concept of sustainable carrying capacity of water resources and research ideas. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2003, (10): 108-112. [张丽, 董增川, 张伟. 水资源可持续承载能力概念及研究思路探讨. 水利学报, 2003, (10): 108-112.]
- [5] Wang H, Qin DY, Wang JH *et al.* Study on the water resources carrying capacity of inland arid zones in Northwest China. *Journal of Natural Resources*, 2004, **19**(2): 151-159. [王浩, 秦大庸, 王建华等. 西北内陆干旱区水资源承载能力研究. 自然资源学报, 2004, **19**(2): 151-159.]
- [6] Tehrani NA, Makhdom MF. Implementing a spatial model of Urban Carrying Capacity Load Number (UCCLN) to monitor the environmental loads of urban ecosystems. Case study: Tehran metropolis. *Ecological Indicators*, 2013, **32**: 197-211. DOI: 10.1016/j.ecolind.2013.03.022.
- [7] Yang LJ, Yang XR, Wei W *et al.* Spatio-temporal evolution and influencing factors of water resource carrying capacity in Shiyang River Basin: Based on the geographical detector method. *Water Supply*, 2020, **20**(4): 1409-1424. DOI: 10.2166/ws.2020.057.
- [8] Wang XY, Zhang SL, Tang XP *et al.* Research on water resources environmental carrying capacity (WRECC) based on support-pressure coupling theory: A case study of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area. *Journal of Environmental Management*, 2022, **3**(20): 115805. DOI: 10.2139/ssrn.4060750.
- [9] Gao L, Bryan BA. Finding pathways to national-scale land-sector sustainability. *Nature*, 2017, **544**: 217-222. DOI: 10.1038/nature21694.
- [10] Zhang TZ, Wang XJ, Qi GP *et al.* Analysis on the coupling and coordinated evolution of water resources-economic-society-ecological environment in Gansu Province. *Hydro-Science and Engineering*, 2023, (2): 53-63. DOI: 10.12170/20220406001. [张恬姿, 王小军, 齐广平等. 甘肃省水资源—经济社会—生态环境耦合协调演变分析. 水利水运工程学报, 2023, (2): 53-63.]
- [11] Zhang JT, Dong ZC. Assessment of coupling coordination degree and water resources carrying capacity of Hebei Province (China) based on WRESP2D2P framework and GTWR approach. *Sustainable Cities and Society*, 2022, **82**: 103862. DOI: 10.1016/j.scs.2022.103862.
- [12] Li YN, Ding ZM, Deng YJ *et al.* The relationship between urban industrialization and PM2.5 in China: On the internal mechanism of EKC curve formation. *Environmental Science*, 2020, **41**(4): 1987-1996. DOI: 10.13227/j.hjks.201910042. [李雅男, 丁振民, 邓元杰等. 中国城市工业化发展与 PM2.5 的关系: 兼论 EKC 曲线形成的内在机制. 环境科学, 2020, **41**(4): 1987-1996.]
- [13] Wang TZ, Jian SQ, Wang JY *et al.* Dynamic interaction of water-economic-social-ecological environment complex system under the frame-

- work of water resources carrying capacity. *Journal of Cleaner Production*, 2022, **368**: 133132. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.133132.
- [14] Wang XY, Zhang SL, Gao C *et al.* Coupling coordination and driving mechanisms of water resources carrying capacity under the dynamic interaction of the water-social-economic-ecological environment system. *Science of the Total Environment*, 2024, **920**: 171011. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.171011.
- [15] Wang SS, Yang JY, Wang AL *et al.* Evaluation and prediction of water-economy-ecosystem coupling coordination in the Yellow River Basin of Henan Province. *J Lake Sci*, 2022, **34**(3): 919-934. DOI: 10.18307/2022.0314. [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. 湖泊科学, 2022, **34**(3): 919-934.]
- [16] Farine DR, Whitehead H. Constructing, conducting and interpreting animal social network analysis. *Journal of Animal Ecology*, 2015, **84**(5): 1144-1163. DOI: 10.1111/1365-2656.12418.
- [17] Wu YT, She QS, Gao YY *et al.* Multi-scale intermuscular coupling network analysis. *Journal of Biomedical Engineering*, 2021, **38**(4): 742-752. DOI: 10.7507/1001-5515.202009023. [吴亚婷, 余青山, 高云园等. 多尺度肌间耦合网络分析. 生物医学工程学报, 2021, **38**(4): 742-752.]
- [18] Yue ZL, Shan J, Liu GW *et al.* Analysis of patent cooperation in the field of seed industry in Heilongjiang Province from the perspective of social network. *Science and Technology Management Research*, 2023, **43**(11): 135-141. [岳增蕾, 单静, 刘光武等. 社会网络视角下黑龙江省种业领域专利合作分析. 科技管理研究, 2023, **43**(11): 135-141.]
- [19] Bodin Ö, Alexander SM, Baggio J *et al.* Improving network approaches to the study of complex social-ecological interdependencies. *Nature Sustainability*, 2019, **2**: 551-559. DOI: 10.1038/s41893-019-0308-0.
- [20] Zhang MD, Weng AH. The spatial correlation network and formation mechanism of urban water resources utilization efficiency in the Yangtze River Economic Belt. *Acta Geographica Sinica*, 2022, **77**(9): 2353-2373. DOI: 10.11821/dlxb202209015. [张明斗, 翁爱华. 长江经济带城市水资源利用效率的空间关联网络及形成机制. 地理学报, 2022, **77**(9): 2353-2373.]
- [21] Yang HY, Zeng D, Li MM *et al.* Study on urban ecological niche in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area from the perspective of multiple flow Spaces. *Acta Geographica Sinica*, 2023, **78**(8): 1983-2000. DOI: 10.11821/dlxb202308009. [杨辉宇, 曾达, 李苗苗等. 多元流空间视角下粤港澳大湾区城市生态位研究. 地理学报, 2023, **78**(8): 1983-2000.]
- [22] Kou JW, Li CY, Ma WJ. The coupling of agricultural water footprint and socioeconomic development in ecological functional zones: A case study of Gansu Province, China. *Anthropocene*, 2023, **43**: 100391. DOI: 10.1016/j.ancene.2023.100391.
- [23] Jin JL, Shen SX, Cui Y *et al.* Application of semi-biased reduction set pair potential in dynamic evaluation of water resource carrying capacity of yellow irrigation districts. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2021, **52**(5): 507-520. [金菊良, 沈时兴, 崔毅等. 半偏减法集对势在引黄灌区水资源承载力动态评价中的应用. 水利学报, 2021, **52**(5): 507-520.]
- [24] Liu QF, Wang XK, Zhu Q *et al.* Coupling relationship of water resources carrying capacity system in Tibet Autonomous Region based on the function of "Three Sansheng". *Journal of Natural Resources*, 2023, **38**(6): 1618-1631. DOI: 10.31497/zrzyxb.20230615. [刘庆芳, 王小坤, 朱青等. 基于“三生”功能的西藏自治区水资源承载力系统耦合关系. 自然资源学报, 2023, **38**(6): 1618-1631.]
- [25] Zhang F, Yin M, Zhang JX. Evaluation of water resources carrying capacity of Gansu Section of Yellow River Basin based on entropy weight TOPSIS. *Yellow River*, 2024, **46**(4): 79-85. [张帆, 尹萌, 张金霞. 基于熵权 TOPSIS 的黄河流域甘肃段水资源承载力评价. 人民黄河, 2024, **46**(4): 79-85.]
- [26] Zheng JL, Li XP. Coordination-based model for regional water resources carrying capacity assessment. *Water Resources Protection*, 2021, **37**(5): 30-35. [郑江丽, 李兴排. 基于协调性的区域水资源承载力评估模型. 水资源保护, 2021, **37**(5): 30-35.]
- [27] Cui Y, Tang HY, Jin JL *et al.* Evaluation and diagnosis of regional water resources carrying capacity based on dynamic difference coefficient. *Water Resources Protection*, 2023, **39**(5): 152-160, 177. [崔毅, 唐慧彦, 金菊良等. 基于动态差异度系数的区域水资源承载力评价与诊断. 水资源保护, 2023, **39**(5): 152-160, 177.]
- [28] Li Z, Jin JL, Cui Y *et al.* Evaluation method of regional water resources carrying capacity based on semi-partial connection number and dynamic subtraction set pair potential. *J Lake Sci*, 2022, **34**(5): 1656-1669. DOI: 10.18307/2022.0519. [李征, 金菊良, 崔毅等. 基于半偏联系数和动态减法集对势的区域水资源承载力评价方法. 湖泊科学, 2022, **34**(5): 1656-1669.]
- [29] Felipe-Lucia MR, Soliveres S, Penone C *et al.* Land-use intensity alters networks between biodiversity, ecosystem functions, and services. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2020, **117**(45): 28140-28149. DOI: 10.1073/pnas.2016210117.
- [30] Zuo QT, Wang JY, Ma JX *et al.* Concept difference and calculation method comparison of matching degree, coordination degree and harmony degree. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power*, 2023, **44**(1): 1-9. DOI: 10.19760/j.ncwu.zk.2023001. [左其亭, 王娇阳, 马军霞等. 匹配度、协调度与和谐度的概念区别与计算方法对比. 华北水利水电大学学报, 2023, **44**(1): 1-9.]
- [31] Bali Swain R, Ranganathan S. Modeling interlinkages between sustainable development goals using network analysis. *World Development*, 2021, **138**: 105136. DOI: 10.1016/j.worlddev.2020.105136.
- [32] Csardi G, Nepusz T. The igraph software package for complex network research. *InterJournal Complex Systems*, 2006, **1695**(5): 1-9.

- [33] Tian P, Wang JJ, Hua W *et al.* Spatial-temporal pattern and coupling coordination of water resources carrying capacity in urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River. *J Lake Sci*, 2021, **33**(6): 1871-1884. DOI: 10.18307/2021.0621. [田培, 王瑾钰, 花威等. 长江中游城市群水资源承载力时空格局及耦合协调性. 湖泊科学, 2021, **33**(6): 1871-1884.]
- [34] Dong Y, Chu L, Xia J *et al.* Coupling and coordinated Development of Man-Water system and Identification of obstacle factors in Wuhan City. *Water Resources Protection*, 2023, **39**(6): 87-94. [董怡, 邹磊, 夏军等. 武汉市人水系统耦合协调发展及障碍因素识别. 水资源保护, 2023, **39**(6): 87-94.]
- [35] Zhang N, Yang X, Chen T. Spatio-temporal characteristics of the coupling coordination degree of water-energy-food system in western China. *China Environmental Science*, 2022, **42**(9): 4444-4456. [张宁, 杨肖, 陈彤. 中国西部地区水-能源-粮食系统耦合协调度的时空特征. 中国环境科学, 2022, **42**(9): 4444-4456.]
- [36] Omer A, Ma ZG, Zheng ZY *et al.* Natural and anthropogenic influences on the recent droughts in Yellow River Basin, China. *Science of the Total Environment*, 2020, **704**: 135428. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.135428.
- [37] Liu YL, Du JQ, Ding BY *et al.* Water resource conservation promotes synergy between economy and environment in China's northern drylands. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2021, **16**(3): 28. DOI: 10.1007/s11783-021-1462-y.
- [38] Liu YS, Ji GD, Luo ZX *et al.* Environmental and economic impact of pollution control on the eastern route of South-to-North Water Diversion Project in Shandong section: An empirical analysis based on EKC curve theory. *China Population Resources and Environment*, 2020, **30**(10): 73-81. DOI: 10.12062/cpre.20200329. [刘远书, 籍国东, 罗忠新等. 南水北调东线治污对山东段的环境与经济影响—基于EKC曲线理论的实证分析. 中国人口·资源与环境, 2020, **30**(10): 73-81.]
- [39] Li SS, Ma Y. Urbanization, economic development and environmental change. *Sustainability*, 2014, **6**(8): 5143-5161. DOI: 10.3390/su6085143.
- [40] Wu XT, Fu BJ, Wang S *et al.* Decoupling of SDGs followed by re-coupling as sustainable development progresses. *Nature Sustainability*, 2022, **5**(5): 452-459. DOI: 10.1038/s41893-022-00868-x.