

基于生产过程视角的甘肃省人水系统耦合协调特征分析

郑健^{1,2}, 刘柠滔^{1,2}, 郭亚军³, 徐文婧^{1,2}

(1. 兰州理工大学土木与水利工程学院; 2. 甘肃省太阳能与生物质互补多联供系统重点实验室
3. 甘肃省疏勒河流域水资源利用中心)

摘要:从生产过程视角出发,构建了包含生产者-社会、生产资料-资源、生产环境-生态和生产产品-经济 4 维子系统的人水系统耦合协调关系评价体系,采用多因素综合评价法、耦合协调度模型和障碍度方法分析了 2010—2023 年甘肃省人水系统耦合协调特征的时空演变趋势。结果表明:2010—2023 年甘肃省人水系统 4 维子系统的综合评价指数没有统一的变化规律,生产产品-经济子系统的持续增长是推动人水系统协调发展的主要动力;各地市(州)人水系统耦合协调度整体呈上升趋势,但全省耦合协调度仍处于勉强协调水平,增长幅度受限;生产资料-资源子系统是制约甘肃省人水系统协调发展的首要原因,提高资源利用水平和减少生产污染是提高其协调水平的重要抓手。

关键词:人水系统;生产过程视角;耦合协调度;障碍度;甘肃省

Analysis of coupling and coordination characteristics of human-water system in Gansu Province from perspective of production process//Zheng Jian^{1,2}, Liu Ningtao^{1,2}, Guo Yajun³, Xu Wenjing^{1,2} (1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Lanzhou University of Technology; 2. Key Laboratory of Multi-supply System with Solar Energy and Biomass, Gansu Province; 3. Shule River Basin Water Resources Utilization Center of Gansu Province)

Abstract: From the perspective of the production process, an evaluation system for the coupling and coordination relationship of the human-water system was constructed, including four-dimensional subsystems, i. e., producer-society, production material-resource, production environment-ecology, and production products-economy subsystems. The spatiotemporal evolution trend of coupling and coordination characteristics of the human-water system in Gansu Province from 2010 to 2023 was analyzed by using the multi-factor comprehensive evaluation method, the coupling coordination degree model, and the obstacle degree method. Findings reveal that the comprehensive evaluation indexes of the four subsystems did not exhibit a uniform change pattern from 2010 to 2023. Among them, the continuous growth of the product-economy subsystem was the primary driving force for coordinated development of the human-water system. The coupling coordination degree of the human-water system in various cities (prefectures) of Gansu Province showed an overall upward trend. However, the coupling coordination degree of the whole province was still at a barely coordinated level with limited growth. The production material-resource subsystem constituted the primary factor constraining the coordinated development of the human-water system in Gansu Province. Consequently, enhancing resource utilization efficiency and reducing production pollution are key measures to improve the coordinated development level.

Key words: human-water system; perspective of production process; coupling coordination degree; obstacle degree; Gansu Province

水在自然生态系统和人类社会系统中具有极为特殊的作用^[1],人类在生产生活过程中与水形成了“供、用、耗、排”的复杂人水系统结构^[2],人水系统内涵丰富,内容多元,涵盖了人水安全、人水协调、人水服务等诸多方面,涉及环境、资源、社会生产等多种维度。近年来,在社会转型和产业变革加速发展的新背景下,人水系统面临多重压力的复合挑战,突

出表现为水资源约束与产业转型的适配性困难、水环境容量与污染排放增量的结构性矛盾、水生态韧性衰减与人口聚集取用水的协同性风险,形成了制约区域可持续发展的关键瓶颈^[3-4]。基于当下错综复杂的人水矛盾和建设适宜绿色发展路径的长远考量,国家对匹配社会经济的高质量人水系统发展局面提出了更高要求^[5-6]。研究人水关系是匹配新质

基金项目:国家自然科学基金项目(52469011);水利科学试验研究及技术推广计划项目(24GSLK052,24GSLK053)
作者简介:郑健(1981—),男,教授,博士,主要从事农业水资源高效利用研究。E-mail:zhj16822@126.com

生产力、构建生态文明社会、缓和地区用水矛盾、促进区域协调发展的理论方法与应用实践,完善人水系统研究成为新时期的重要研究方向。国内外学者已对人水系统开展了大量研究,从社会-水文集成模型^[7]、二元水循环过程解析^[8]、人水关系学原理分析^[9]、社会水循环^[10-11]等多角度完成了理论构建与内涵阐释,应用多元功能评价^[12]、耦合协调模型^[13]、系统动力学模拟等技术揭示了人水系统的互动机制,明确了社会经济生产与人类活动的核心驱动角色。耦合协调度模型可定量揭示人水系统的耦合协调程度,为评估区域可持续发展提供科学依据,在人水系统分析中应用广泛。众多学者通过构建水资源-经济-生态耦合协调系统对人水系统进行了评价分析,如卞宇航等^[14]基于黄河流域长序列数据,揭示了水资源-生态-社会系统的演变规律并识别了人水关系关键阈值;张文睿等^[15]针对河西走廊,建立了水资源-生态环境-社会经济协同发展模型,探索了区域水资源高效利用路径;Chapagain 等^[16]针对亚洲城市水安全风险,建立了包含压力-状态-响应模型的诊断体系,并提出了适应性管理策略;王富强等^[17]聚焦高强度人类活动下的京津冀城市群,探索了水资源-经济社会-生态环境的耦合协调路径,揭示了超大规模城市群的水安全保障机制;贾梦圆等^[18]则以大清河流域为例,阐释了城镇发展与水资源环境的耦合协调机理,刻画了人类活动对流域水生态的渐进式影响过程;董怡等^[19]以武汉市为对象,构建了社会人文-水系统的耦合评价体系,识别了特大城市人水关系的阶段性特征及其关键驱动指标。综合已有研究,社会经济活动的驱动作用及其与宏观系统的耦合协调关系已受到学者广泛关注,相关耦合协调模型中也常引入经济指标以刻画人水系统中的经济互馈效应。然而,现有研究对于社会经济活动的分析多集中于经济产出层面,研究视角尚未把人类宏观生产活动与水资源利用内在机理相关联,导致对人水系统演变深层驱动力的解析仍不够明晰。

基于此,本文从生产过程视角出发,综合考量生产过程全链条中生产者活动的用水行为、生产资源的水资源配置效率、生产产品的水环境影响等多维度交互作用,将生产过程内部关联性特征融入评价体系的构建。通过构建基于生产过程视角的人水系统耦合协调特征评价体系,实现对甘肃省人水系统相互作用和演进动力的分析,以揭示甘肃省人水系统耦合协调特征的时空演变规律,为优化人水系统可持续发展路径提供理论参考与实践应用。

1 研究区概况与数据来源

甘肃省位于中国西北内陆地区,东邻陕西,南接四川、青海,西连新疆,北靠内蒙古、宁夏,并与蒙古国交界。甘肃省地理位置为 32°11'N~42°57'N、92°13'E~108°46'E,全省总面积 42.58 万 km²,下辖 14 个地市(州),包括 12 个地级市和 2 个民族自治州。本文指标数据主要来源于《甘肃省水资源公报》(2010—2023)、《甘肃省统计年鉴》(2010—2023)、各城市统计年鉴和统计公报以及各城市统计局和环保局等政府单位公报,部分缺失数据采用相邻年份均值或插值法填充。

2 研究方法

2.1 理论基础与概念内涵

“耦合”源于物理学概念,是指两个或两个以上系统之间相互作用、相互影响的现象,表现为物质、能量、信息的交换、依存和连接程度^[20]。“协调”表现为多个系统或要素在发展过程中的一种和谐、有序的状态,强调事物或系统随发展趋势相互促进、共同发展^[21]。而生产关系作为社会关系的核心构成部分,支撑着社会、经济和文化的持续发展,其本身在社会关系体系中占据决定性地位。

基于以上认识可以发现,人类社会通过水资源取用、消耗、排放等一系列水资源利用行为,促使水资源深度融入社会生产循环体系,进而形成一个紧密关联人类社会活动与水资源利用的复合系统。深入剖析二者的耦合结构可知,水资源作为不可或缺的生产资料,为各类生产活动提供了基础性的物质支撑。水资源是维系人类生命活动的关键要素,通过保障人类的生存与健康,确保了社会生产力的稳定发展。在产品流通环节,水资源凭借其独特的属性为产品赋予了经济价值,推动了经济的运行与发展。生产过程中产生的主产品与副产物又会反向作用于水环境。这一过程不断循环,使得自然界中赋存的水资源与人类社会用水行为共同形成了一个结构复杂、相互作用的人水系统。

2.2 评价框架设计

为深入探究社会经济活动与人水系统的互馈作用,本文基于生产过程视角构建人水系统协调性评价框架。通过双重维度重构,依据功能属性将水资源利用系统划分为社会、资源、生态与经济 4 个单元;按生产过程维度将人类社会系统分为生产者层、生产资料层、生产环境层和生产产品层 4 个维度。基于自然与社会属性的交叉融合,建立如图 1 所示的多维耦合人水系统协调性评价框架。

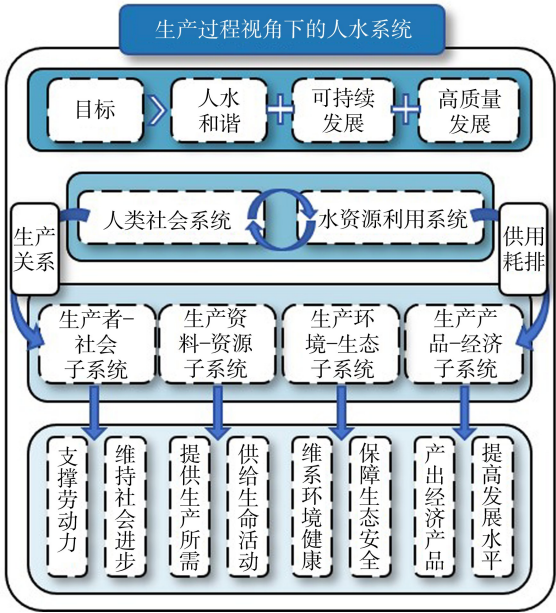


图1 基于生产过程视角的人水系统协调性评价框架

Fig.1 Evaluation framework of human-water system coordination based on perspective of production process

为更好说明社会生产与水资源利用的互动关系,将人水系统分解为4个子系统进行评价:

a. 生产者-社会子系统。该系统凸显水资源的社会属性,即水资源为人类社会提供服务价值。水资源配置与利用保障了社会生命延续,是劳动力更迭成长的基础,更是维系社会结构稳定的关键纽带。

b. 生产资料-资源子系统。该系统强调水资源作为基础性生产资料参与社会生产。一方面,水作为直接生产资料投入生产流程(如农业灌溉中的作物水分吸收);另一方面,水以辅助性要素嵌入生产过程(如工业制造中的设备冷却与清洁环节)。通过水资源在生产环节中的深度参与,维系社会生产的持续运转。

c. 生产环境-生态子系统。人类生产生活必然对水在自然界中的存在形式和状态产生影响,直观表现为环境污染和生态治理程度。生产活动中水资源的开采利用对当地生态产生影响,生产排污造成直接和间接的环境污染,且城镇人口聚集增加了环境压力。

d. 生产产品-经济子系统。人水系统中水资源的经济属性通过生产流通与价值增值过程得以呈现。生产商品和服务过程中隐含水资源消耗,涵盖三次产业的全链条,形成了水资源在生产过程中的经济价值。

2.3 评价方法

2.3.1 评价指标体系构建

基于生产过程视角下人水系统的复杂内涵,参考既有研究与指标构建方法^[17-19],结合劳动人口结

构、城乡劳动力差异对用水过程的交互影响,并纳入经济环节与水资源利用的耦合关系,构建由系统层、子系统层、评价指标层组成的人水系统耦合协调关系评价指标体系(图2,图中正负号分别表示正向和负向指标)。各子系统指标层权重采用熵权法计算,指标选取遵循可行性、相关性和可获得性原则。

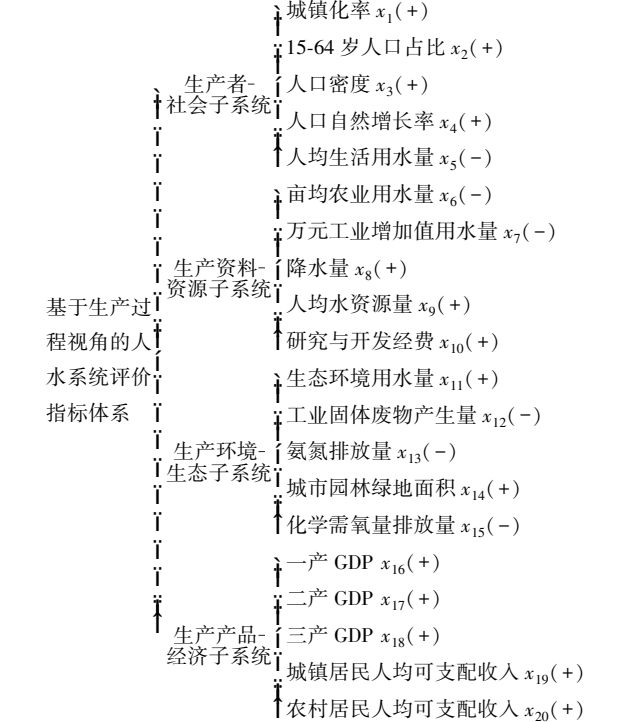


图2 人水系统耦合协调关系评价指标体系

Fig.2 Evaluation index system of coupling and coordination relationship of human-water system

a. 生产者-社会子系统。区域人口密度和自然增长率揭示社会劳动力的潜在变化态势和水资源的承载压力,城镇化率体现社会劳动力流向和城乡结构变迁所引发的水资源配置需求转变,15~64 岁人口占比表征社会劳动力情况,人均生活用水量反映社会生活层面的用水特征。

b. 生产资料-资源子系统。降水量和人均水资源量反映地区水资源赋存情况,亩均农业用水量(1 亩=1/15 hm²)和万元工业增加值用水量量化生产环节的资源转化效率,研究与开发经费体现创新投入对水资源高效利用的赋能作用。

c. 生产环境-生态子系统。工业固体废物产生量和氨氮排放量反映生产污染负荷,化学需氧量排放量衡量水体污染,生态环境用水量与城市园林绿地面积量化生态治理投入。

d. 生产产品-经济子系统。一产 GDP 反映农业生产效能,二产 GDP 揭示制造业发展强度,三产 GDP 表征服务业发展水平,城镇和农村居民人均可支配收入体现水资源经济价值在城乡间的分配格局。

2.3.2 多因素综合评价法

多因素综合评价法是利用多个指标进行综合评价的方法,可对评价体系进行量化比较^[12]。采用多因素综合评价法整合多元信息,克服了单一指标评价的局限,具体计算公式为:

$$U_i = \sum_{j=1}^{m_i} w_j b_j \tag{1}$$

式中: $U_i(i=1, 2, 3, 4)$ 为人水系统中子系统*i*的综合评价指数; b_j 为采用极差法对子系统指标*j*标准化处理后的数值; w_j 为子系统指标*j*的权重; m_i 为子系统*i*的评价指标数。

2.3.3 耦合协调度模型

耦合协调度可以量化系统内各子系统的均衡状态和协调发展水平,反映系统内良性互动的程度。计算公式为:

$$D = \sqrt{CT} \tag{2}$$

其中 $C = 4(\prod_{i=1}^4 U_i)^{\frac{1}{4}} / \sum_{i=1}^4 U_i$ $T = \sum_{i=1}^4 \alpha_i U_i$

式中: D 为耦合协调度,范围为0~1, D 越大,说明人水系统发展水平越协调,反之则协调程度低; C 为耦合度,范围为0~1, C 越大表示各子系统之间互相影响的程度越高; T 为协调度; $\alpha_i(i=1, 2, 3, 4)$ 为各子系统的贡献度。参照相关研究且基于当前发展^[15,22],文中4个子系统具有相同的重要性,取 $\alpha_1=\alpha_2=\alpha_3=\alpha_4=0.25$ 。根据耦合协调度取值范围将人水系统划分为以下10种耦合协调类型:极度失调($0\leq D\leq 0.1$)、严重失调($0.1<D\leq 0.2$)、中度失调($0.2<D\leq 0.3$)、轻度失调($0.3<D\leq 0.4$)、濒临失调($0.4<D\leq 0.5$)、勉强协调($0.5<D\leq 0.6$)、初级协调($0.6<D\leq 0.7$)、中级协调($0.7<D\leq 0.8$)、良好协调($0.8<D\leq 0.9$)和优质协调($0.9<D\leq 1$)。

2.3.4 障碍度方法

障碍度可衡量各指标对耦合协调发展水平的负向贡献程度^[19],基于各指标的障碍度可判断阻碍系统协调发展的主要障碍指标。各子系统层的障碍度可通过线性加权获得。障碍度计算公式为:

$$O_k = w_k A_k / \sum_{k=1}^K w_k A_k \tag{3}$$

其中 $A_k = 1 - b_k$
式中: O_k 为第*k*个指标对总目标层的障碍度,表征第*k*个指标对人水系统发展的制约程度; K 为指标总数; A_k 为第*k*个指标与理想值之间的偏离度; b_k 第*k*个指标采用极差法对数据标准化处理后的数值。

3 结果与分析

3.1 人水系统综合评价分析

基于甘肃省人水系统多因素综合评价指数,对甘肃省2010—2023年人水系统进行分析。从图3可以看出,人水系统各子系统呈现出不同的发展态势。

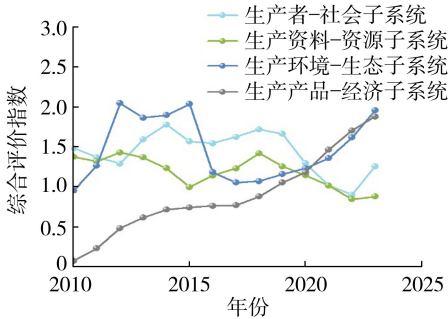


图3 各子系统多因素综合评价指数
Fig. 3 Multifactor comprehensive evaluation index of subsystems

由图3可知,2010—2023年甘肃省人水系统呈现出显著的非均衡演进格局。生产者-社会子系统综合评价指数呈现“倒U形”波动,2012年经历深度调整,2014年达到阶段高点(1.7858)后波动下行,2022年探至谷底(0.9061),2023年虽反弹至1.2603,仍较2010年低15.6%,反映社会劳动力资源和社会治理效能的修复尚需时日。生产资料-资源子系统存在刚性衰减的严峻制约,综合评价指数从2010年的1.3804滑落至2023年的0.8828,累计萎缩36%,表明资源支撑力滞后于经济规模。生产环境-生态子系统呈现显著波动性演进特征,综合评价指数在2012年达到周期峰值(2.0533)后,2017年急剧下降至1.0569,降幅达48.5%,通过持续性修复,2023年回升至1.9629。生产产品-经济子系统作为核心增长极持续扩张,综合评价指数从2010年的低起点(0.0761)稳步攀升至2023年1.8856(增长24倍),尤其在2020年后加速跃升,2021—2023年年均增速为12.5%,标志着水资源经济价值的高效转化。

3.2 人水系统耦合协调度分析

2010—2023年甘肃省各地市(州)人水系统耦合协调度计算结果如表1所示,整体上各地市(州)协调发展水平差异明显,且在不同年份间波动,反映出城市发展不平衡和发展过程的复杂性。甘肃省在人水系统耦合协调方面呈现出缓慢上升的发展特征,至2023年全省14个地市(州)中有4个达到初级协调,5个为勉强协调,5个为濒临失调。

表 1 甘肃省各地市(州)人水系统耦合协调类型

Table 1 Coupling coordination types of human-water system in various cities (prefectures) of Gansu Province

年份	甘肃省	地市(州)													
		酒泉	嘉峪关	张掖	金昌	武威	兰州	白银	临夏	定西	天水	平凉	庆阳	甘南	陇南
2010	轻失	轻失	轻失	轻失	轻失	轻失	轻失	轻失	中失	中失	轻失	濒失	中失	中失	中失
2011	濒失	濒失	轻失	勉协	濒失	濒失	轻失	勉协	濒失	轻失	濒失	勉协	濒失	濒失	轻失
2012	濒失	濒失	濒失	勉协	濒失	勉协	濒失	勉协	勉协	濒失	濒失	勉协	勉协	濒失	濒失
2013	勉协	濒失	轻失	勉协	濒失	濒失	濒失	初协	濒失	濒失	勉协	初协	勉协	濒失	濒失
2014	勉协	勉协	濒失	初协	濒失	勉协	濒失	中协	勉协	勉协	勉协	初协	勉协	濒失	濒失
2015	勉协	勉协	濒失	初协	勉协	初协	濒失	初协	勉协	勉协	勉协	初协	濒失	濒失	濒失
2016	勉协	勉协	濒失	初协	濒失	初协	濒失	初协	勉协	勉协	勉协	濒失	勉协	濒失	濒失
2017	勉协	勉协	濒失	初协	濒失	勉协	濒失	初协	勉协	勉协	初协	勉协	勉协	勉协	勉协
2018	勉协	勉协	勉协	初协	濒失	初协	濒失	中协	勉协	初协	初协	初协	初协	初协	勉协
2019	初协	勉协	勉协	初协	濒失	勉协	勉协	初协	初协	中协	中协	初协	勉协	初协	勉协
2020	勉协	勉协	初协	濒失	濒失	勉协	初协	轻失	初协	勉协	勉协	濒失	濒失	初协	勉协
2021	勉协	勉协	勉协	勉协	勉协	勉协	勉协	濒失	初协	初协	初协	勉协	勉协	初协	勉协
2022	勉协	勉协	勉协	濒失	初协	勉协	勉协	濒失	勉协	初协	初协	濒失	初协	勉协	勉协
2023	勉协	濒失	濒失	濒失	濒失	初协	勉协	濒失	初协	勉协	初协	勉协	勉协	初协	勉协

注：表中中失、轻失、濒失、勉协、初协、中协分别代表耦合协调类型为中度失调、轻度失调、濒临失调、勉强协调、初级协调和中级协调。

由图 4 可以看出,甘肃省在人水系统耦合协调方面呈现出缓慢上升的发展特征,各地市(州)耦合协调度呈波动状态,未呈现明显的趋势。不同年份各地市(州)人水系统耦合协调度数值不同,最大值 0.736 出现在 2019 年的天水,最小值 0.226 出现在 2010 年的定西。各地市(州)人水系统耦合协调度较大值分散于不同年份,显示出各地市(州)在发展进程中并不存在统一的发展脉络,所反映的人水系统协调水平也未呈现出显著的集中趋势。此外,各地市(州)人水系统耦合协调度最小值同样缺乏明显的时间规律,表明各地市(州)发展路径的多样性和不同发展阶段所面临的复杂状况。

甘肃省人水系统发展具有显著区域差异,各地区障碍指标分布符合地域自然禀赋和经济结构。障碍指标主要来自生产资料-资源子系统,表明甘肃省经济社会发展与资源利用之间仍存在矛盾。在河西地区,水危机集中表现为生产与生态用水的双重挤压。酒泉农业灌溉效率低下成为首要约束,张掖生态用水短缺问题显著,而武威和金昌则面临人均生活用水超载与生态用水不足的复合压力,凸显出绿洲经济中水资源紧绷态势。陇中地区呈现多元矛盾交织,兰州作为省会同时承受人均生活用水与亩均农业用水的高负荷,白银受降水量匮乏和工业污染叠加困扰,而定西生态用水与人均水资源稀缺并存,反映出半干旱区系统性脆弱。陇东地区暴露出工业结构性缺陷,庆阳万元工业增加值用水量成为最大障碍,平凉万元工业增加值用水量凸显能源基地转型的急迫性。甘肃南部生态屏障区的发展矛盾主要集中在生活用水与生态用水的平衡,甘南和陇南地区均以人均生活用水与生态用水为核心矛盾。

3.4 讨论

从甘肃省人水系统多因素综合评价指数可以看出,推动人水系统发展的主要动力是生产产品-经济子系统的持续增长,生产者-社会子系统、生产资料-资源子系统、生产环境-生态子系统的波折震荡反映出协调发展的困难与阻力,说明人水系统受结构调整的影响,内部表现出不稳定性。这一结论与张恬姿等^[22]对甘肃省水资源-经济社会-生态环境耦合协调驱动因素的研究基本一致。

结合耦合协调度和障碍度分析来看,河西地区受自然承载力约束显著,长期处于协调度低位徘徊的状态,反映出资源密集型发展模式与生态脆弱性之间的深层矛盾;陇中地区城市间发展不平衡,主要

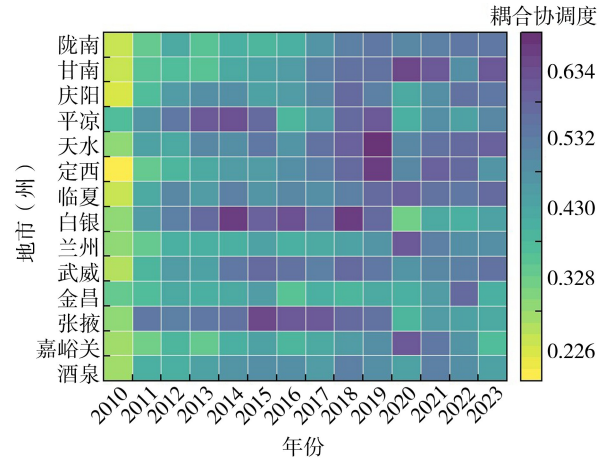


图 4 甘肃省各地市(州)人水系统耦合协调度
Fig. 4 Coupling coordination degree of human-water system in various cities (prefectures) of Gansu Province

3.3 人水系统障碍度分析

运用障碍度方法分析了甘肃省各地市(州)人水系统耦合协调的阻碍因素,筛选出影响程度位列前三和最小、次小的障碍指标,结果如表 2 所示。

表 2 甘肃省各地市(州)障碍指标统计

Table 2 Statistics of obstacle factors of various cities (prefectures) in Gansu Province

地区	地市(州)	第一障碍指标		第二障碍指标		第三障碍指标		次小障碍指标		最小障碍因子	
		指标	障碍度	指标	障碍度	指标	障碍度	指标	障碍度	指标	障碍度
河西地区	酒泉	x_6	0.284 1	x_{11}	0.060 4	x_8	0.056 7	x_1	0.015 5	x_{18}	0.014 4
	嘉峪关	x_5	0.131 5	x_7	0.119 2	x_4	0.081 7	x_{14}	0.010 2	x_1	0.002 5
	张掖	x_{11}	0.086 6	x_5	0.083 9	x_{13}	0.082 8	x_{17}	0.020 6	x_4	0.006 3
	金昌	x_5	0.083 5	x_{11}	0.078 6	x_{18}	0.070 4	x_3	0.025 6	x_4	0.012 7
	武威	x_5	0.126 0	x_{11}	0.081 1	x_6	0.073 5	x_3	0.010 8	x_4	0.003 7
陇中地区	兰州	x_5	0.106 2	x_6	0.080 7	x_4	0.078 8	x_{18}	0.018 7	x_{16}	0.016 7
	白银	x_8	0.078 2	x_{13}	0.076 7	x_2	0.071 6	x_{16}	0.023 8	x_4	0.006 8
	临夏	x_5	0.103 1	x_7	0.082 4	x_8	0.067 2	x_4	0.028 6	x_1	0.027 4
	定西	x_{11}	0.086 7	x_9	0.083 3	x_6	0.073 1	x_{15}	0.022 2	x_4	0.017 3
	天水	x_5	0.096 2	x_{11}	0.086 3	x_{12}	0.074 5	x_{18}	0.013 7	x_4	0.006 0
陇东地区	平凉	x_5	0.096 1	x_7	0.083 0	x_{13}	0.077 4	x_{12}	0.010 5	x_4	0.006 0
	庆阳	x_7	0.112 6	x_5	0.103 9	x_{11}	0.079 8	x_9	0.015 6	x_4	0.000 5
甘南地区	甘南	x_5	0.110 2	x_{11}	0.088 4	x_{16}	0.069 2	x_{18}	0.024 6	x_4	0.016 7
陇南地区	陇南	x_5	0.089 3	x_{11}	0.084 7	x_9	0.069 0	x_3	0.030 7	x_4	0.007 1

受城镇化和产业转型影响;陇东地区有能源优势与传统工业产业,但同时展现出能源基地扩张与生态承载力的冲突;陇南地区和甘南地区则肩负生态保护任务且经济基础薄弱,整体协调程度相对较低,但上升趋势明显。胡浩等^[23]研究也指出,甘肃省各地市(州)发展水平与资源分布不均、利用效率差异显著等地域禀赋特征高度耦合,整体空间分布规律性相对较弱。这一研究结论进一步佐证了基于生产过程视角对甘肃省人水系统协调水平分析的合理性。

甘肃省劳动力再配置与城镇化进程引发的结构性张力构成了人水系统演进的核心原因。《甘肃省国民经济和社会发展统计公报》数据显示,2010—2023 年全省常住人口累计减少 92.05 万人,下降 3.6%。劳动力规模缩减缓解了水资源需求压力,人口自然增长率在省内 78.57%的地市(州)成为障碍度最低的指标,如庆阳市该指标障碍度仅 0.000 5,为系统优化提供了缓冲空间。同时,城镇化进程通过劳动力聚集形成的产业优势加速了经济产业发展,如在酒泉、张掖、兰州、白银、天水、甘南,产业 GDP 均为障碍度较小的指标。当劳动人口向城镇聚集时,一方面驱动了经济增长,另一方面也加剧了区域水系统的用水压力。《2023 年甘肃省水资源公报》数据显示,甘肃省年均降水量仅 262.2 mm,先天水资源禀赋薄弱。在全省 85.71%的地市(州),人均生活用水量均为第一或第二障碍指标,如武威市该指标障碍度高达 0.126 0,人水冲突明显。产业发展层面,资源利用效率不足与生产污染问题进一步显示出人水系统协调面临资源环境条件的双重约束。传统产业(如酒泉、武威、兰州、定西的种植业,嘉峪关、庆阳的能源化工产业)普遍存在用水效率低下与污染物排放现象,凸显出区域用水矛盾。劳

动力聚集及产业转型伴生的水资源再配置矛盾也构成系统发展的阻力。

综合来看,影响甘肃省人水系统协调发展的根本矛盾是城镇化推进与水资源承载力间的动态博弈。具体表现为生产、生活中水资源利用需求与污染排放对水系统承载力的双重压迫。鉴于此,协同调控产业发展、优化城镇空间格局、全面提升水资源利用效率与污染治理能力,是促进甘肃省人水系统协调发展的关键着力点。

4 结 论

a. 2010—2023 年,甘肃省生产产品-经济子系统综合评价指数持续递增,成为人水系统演进的核心驱动力;生产者-社会子系统综合评价指数呈现“倒 U 形”波动;生产资料-资源子系统综合评价指数则从 1.380 4 衰退到 0.882 8;生产环境-生态子系统综合评价指数波动最为剧烈,2012 年出现最大值 2.053 3,2017 年为最小值 1.056 9,表明生态承载力始终是人水系统平稳发展的关键限制因素。

b. 2010—2023 年,伴随社会经济发展,甘肃省各地市(州)人水系统耦合协调度总体呈上升趋势,但存在阶段性波动,地区差异显著,甘肃省耦合协调度水平由轻度失调变为勉强协调。至 2023 年全省 14 个地市(州)有 4 个达到初级协调,5 个为勉强协调,5 个为濒临失调。

c. 掣肘甘肃省各地市(州)人水系统协调发展的障碍指标主要来自生产资料-资源子系统,甘肃省经济社会发展与自然保护之间存在矛盾,资源开发与环境治理的冲突仍然尖锐。甘肃省人水系统当前处于经济增长与生态保护的博弈期,统筹协调用水模式和排污治理是促进甘肃省人水系统协调发展的

重要抓手。

参考文献：

[1] 谷树忠. 水价值的系统发现和全面实现[J]. 中国水利, 2024(3):8-12. (Gu Shuzhong. Systematic discovery and comprehensive realization of water value[J]. China Water Conservancy,2024(3):8-12. (in Chinese))

[2] Zuo Qiting, Wu Qingsong, Zhang Zhizhuo, et al. A novel method for quantifying the harmonious balance of human-water relationship [J]. Sustainable Cities and Society, 2025,119:106082.

[3] Wang Xueyi, Geng Manguo, Tang Xiangong. Unbalanced rural development in underdeveloped areas: rurality and human settlements [J]. Frontiers in Sustainable Food Systems,2025,8:1518683.

[4] Kristensen N G. Consequential urban development of sustainable strategies [J]. Urban Geography, 2025, 46 (1):231-248.

[5] 汤志华,刘辉. 习近平总书记关于治水重要论述的核心要义[J]. 新视野, 2025 (1): 38-45. (Tang Zhihua, Liu Hui. The core essence of Xi Jinping’s important exposition on water management[J]. Expanding Horizons,2025(1): 38-45. (in Chinese))

[6] 左其亨. 人水关系学的基本方程及模型构建[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52 (5): 1-12. (Zuo Qiting. Basic equations and model construction of human-water relationship discipline [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52 (5): 1-12. (in Chinese))

[7] Nazemi A, Madani K. Urban water security: emerging discussion and remaining challenges [J]. Sustainable Cities and Society,2018,41:925-928.

[8] 王浩,王建华,秦大庸,等. 基于二元水循环模式的水资源评价理论方法[J]. 水利学报,2006,37(12):1496-1502. (Wang Hao, Wang Jianhua, Qin Dayong, et al. Theory and methodology of water resources assessment based on dualistic water cycle model [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37 (12): 1496-1502. (in Chinese))

[9] 左其亨. 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))

[10] 李玮,刘家宏,贾仰文,等. 社会水循环演变的经济驱动因素归因分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2016, 14 (5): 356-361. (Li Wei, Liu Jiahong, Jia Yangwen, et al. Attribution analysis of economic driving factors of social water cycle evolution[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2016,14(5):356-361. (in Chinese))

[11] 贾玉博,杨宏伟,栗晓玲,等. 基于水代谢和水循环理论的石羊河流域水资源承载力评价[J]. 水资源保护, 2024, 40 (5): 86-94. (Jia Yubo, Yang Hongwei, Su Xiaoling, et al. Water resources carrying capacity evaluation in the Shiyang River Basin based on theories of water metabolism and water cycle [J]. Water Resources Protection,2024,40(5):86-94. (in Chinese))

[12] 魏超,张梦鑫,吴洲,等. 功能视角下长江中游城市群城乡协调发展特征及障碍因素诊断[J]. 长江流域资源与环境, 2023, 32 (10): 2032-2044. (Wei Chao, Zhang Mengxin, Wu Zhou, et al. Characteristics and obstacles of coordinated urban-rural development in urban agglomeration in mid-Yangtze River from a functional perspective [J]. Resources and Environment of the Yangtze River Basin, 2023, 32 (10): 2032-2044. (in Chinese))

[13] 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))

[14] 卞宇航,屈博,江恩慧,等. 黄河流域水资源-生态-社会系统耦合协调分析[J]. 人民黄河,2024,46(10):49-54. (Bian Yuhang, Qu Bo, Jiang Enhui, et al. Coupling coordination analysis of water resources-ecology-society system in the Yellow River Basin[J]. Yellow River,2024, 46(10):49-54. (in Chinese))

[15] 张文睿,孙栋元,王亦可,等. 河西走廊水资源-生态环境-社会经济系统耦合关系及时空分异[J]. 干旱区研究, 2024, 41 (9): 1527-1537. (Zhang Wenrui, Sun Dongyuan, Wang Yike, et al. Coupling relationship and spatial-temporal differentiation of the water resources-ecological environment-social economic system in the Hexi Corridor [J]. Arid Zone Research, 2024, 41 (9): 1527-1537. (in Chinese))

[16] 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.

[17] 王富强,应卓晖,吕素冰,等. 京津冀地区水-经济-生态耦合协调发展特征评价[J]. 水资源保护, 2022, 38 (5): 80-86. (Wang Fuqiang, Ying Zhuohui, Lyu Subing, et al. Evaluation of coupling coordinated development characteristics of water-economy-ecology system in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Water Resources Protection,2022,38(5):80-86. (in Chinese))

[18] 贾梦圆,张子琦,张新然,等. 城镇发展与水资源环境的耦合协调机理与测度方法研究:以大清河流域 51 个县

(区)为例[J]. 水资源与水工程学报, 2024, 35(6): 33-41. (Jia Mengyuan, Zhang Ziqi, Zhang Xinran, et al. Coupling mechanism and measurement method of urban development and water resources environment: a case study of 51 counties (districts) in the Daqing River Basin [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2024, 35(6): 33-41. (in Chinese))

[19] 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[J]. 水资源保护, 2023, 39(6): 87-94. (Dong Yi, Zou Lei, Xia Jun, et al. Coupling and coordinated development of human-water system in Wuhan City and identification of obstacle factors [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(6): 87-94. (in Chinese))

[20] 刘沛衡. 中原城市群水资源-经济社会-生态环境互馈机制及耦合协调模拟[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2024.

[21] 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[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2023, 44(1): 1-9. (Zuo Qiting, Wang Jiaoyang, Ma Junxia, et al. Conceptual differences and calculation methods comparison of matching degree, coordination degree and harmony degree [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2023, 44(1): 1-9. (in Chinese))

[22] 张恬姿, 王小军, 齐广平, 等. 甘肃省水资源-经济社会-生态环境耦合协调驱动因素研究[J]. 水利水运工程学报, 2023(3): 38-46. (Zhang Tianzi, Wang Xiaojun, Qi Guangping, et al. Driving factors of water resources-economic society-ecological environment coupling in Gansu Province [J]. Hydro-Science and Engineering, 2023(3): 38-46. (in Chinese))

[23] 胡浩, 康玲芬, 尚雪英, 等. 基于 ESRE 系统评价的甘肃区域协调发展时空分析[J]. 甘肃行政学院学报, 2021(6): 111-121. (Hu Hao, Kang Lingfen, Shang Xueying, et al. Spatial-temporal analysis of the coordinated development of Gansu based on the ESRE system evaluation [J]. Journal of Gansu Administration Institute, 2021(6): 111-121. (in Chinese))

(收稿日期: 2025-04-11 编辑: 施业)

(上接第 143 页)

[17] Dehghani A, Moazam H M Z H, Mortazavizadeh F, et al. Comparative evaluation of LSTM, CNN, and ConvLSTM for hourly short-term streamflow forecasting using deep learning approaches [J]. Ecological Informatics, 2023, 75: 102119.

[18] Liao Yaoxing, Wang Zhaoli, Yu Haijun, et al. Accelerating urban flood inundation simulation under spatio-temporally varying rainstorms using ConvLSTM deep learning model [J]. Water Resources Research, 2025, 61(8): e2025WR040433.

[19] Ha Si, Liu Darong, Mu Lin. Prediction of Yangtze River streamflow based on deep learning neural network with El Niño-Southern oscillation [J]. Scientific Reports, 2021, 11(1): 11738.

[20] Niu Zhaoyang, Zhong Guoqiang, Yu Hui. A review on the attention mechanism of deep learning [J]. Neurocomputing, 2021, 452: 48-62.

[21] Vaswani A, Shazeer N, Parmar N, et al. Attention is all you need [C]//Proceedings of the 31st International Conference on Neural Information Processing Systems. Long Beach: Curran Associates Inc., 2017: 6000-6010.

[22] Zhang Jinyu, Yan Hua. A long short-term components neural network model with data augmentation for daily runoff forecasting [J]. Journal of Hydrology, 2023, 617: 128853.

[23] Cui Zhen, Guo Shenglian, Zhou Yanlai, et al. Exploration of dual-attention mechanism-based deep learning for multi-step-ahead flood probabilistic forecasting [J]. Journal of Hydrology, 2023, 622: 129688.

[24] Chrysos G G, Wu Yongtao, Pascanu R, et al. Hadamard product in deep learning: introduction, advances and challenges [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2025, 47(8): 6531-6549.

[25] Shi Xingjian, Chen Zhouong, Wang Hao, et al. Convolutional LSTM network: a machine learning approach for precipitation nowcasting [C]//Proceedings of the 29th International Conference on Neural Information Processing Systems. Montreal: MIT Press, 2015: 802-810.

[26] Ismail A A, Gunady M, Corrada Bravo H, et al. Benchmarking deep learning interpretability in time series predictions [C]//Proceedings of the 34th International Conference on Neural Information Processing Systems. Vancouver: NeurIPS, 2020: 6441-6452.

(收稿日期: 2024-12-16 编辑: 施业)