

黄河流域九省区水资源-能源耦合系统研究(Ⅱ): 演化规律

冯仲恺^{1,2,3}, 蒋林佚^{1,2,3}, 牛文静⁴, 王煜⁵, 彭少明⁶, 郑小康⁷

(1. 河海大学水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098;
3. 河海大学洪涝灾害风险预警与防控应急管理部重点实验室, 江苏 南京 210098;
4. 长江水利委员会长江水文局, 湖北 武汉 430010; 5. 水利部黄河水利委员会, 河南 郑州 450003;
6. 水利部水利水电规划设计总院, 北京 100120; 7. 黄河勘测规划设计研究院有限公司, 河南 郑州 450003)

摘要:识别了水资源、能源、社会经济、环境等多维子系统关联要素,构建了黄河流域九省区水资源-能源耦合系统动力学模型,以 CMIP6 提供的共享社会经济路径(SSP)气候情景为驱动,运用 Hurst 指数、有序度及耦合度等指标,揭示了变化气候条件下黄河流域九省区水资源-能源耦合系统的演化规律。结果表明:黄河流域九省区水资源-能源耦合系统演化过程可分为开发、拮抗、萧条、恢复等阶段,其中水资源子系统的气候敏感性高于能源子系统;第一产业用水量和第二产业能耗量受反馈影响突出,第三产业用水量和能耗量协同演化特性较强,SSP5-8.5 情景演化效率最快、敏感性最高,SSP3-7.0 情景次之,SSP1-2.6 情景最慢;黄河流域九省区水资源和能源子系统的 Hurst 指数较大,其中第二产业的单位生产总值用水量、能耗量等变量的 Hurst 指数最高,呈混沌无序特征;能源子系统有序度最高,环境子系统有序度最低,第二产业能耗量及其单位生产总值能耗量的信息熵占比最大;各变量在 SSP5-8.5 情景下随机演化特性最为突出,SSP1-2.6 情景下有序度最高;黄河流域九省区水资源-能源系统耦合度在 2020 年前上升明显,但处于失调状态,2020 年后处于基本协调状态,其中 SSP1-2.6 情景下耦合度最高,表明流域资源开发强度、环境意识增强会提升系统紧致性,而碳排放增加会削弱系统稳固性和耦合性。

关键词:水资源-能源耦合系统;系统动力学;CMIP6 气候模式;黄河流域

中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2025)06-0052-14

Water-energy coupling system in nine provinces and autonomous regions of the Yellow River Basin (Ⅱ): evolution law//FENG Zhongkai^{1,2,3}, JIANG Linyi^{1,2,3}, NIU Wenjing⁴, WANG Yu⁵, PENG Shaoming⁶, ZHENG Xiaokang⁷(1. State Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Key Laboratory of Flood Disaster Risk Warning, Prevention and Mitigation, Ministry of Emergency Management, Hohai University, Nanjing 210098, China; 4. Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, China; 5. Yellow River Conservancy Commission, Ministry of Water Resources, Zhengzhou 450003, China; 6. General Institute of Water Resources and Hydropower Planning and Design, Ministry of Water Resources, Beijing 100120, China; 7. Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China)

Abstract: This study identified the interrelated elements of multidimensional subsystems such as water resources, energy, and socio-economic factors, environment, and constructed a system dynamic model of the water-energy coupling system in the nine provinces, and autonomous regions of the Yellow River Basin. Driven by the climate scenario of the Shared Socioeconomic Pathway (SSP) provided by CMIP6, the indicators such as Hurst exponent, orderliness, and coupling degree were used to reveal the evolution law of the water-energy coupling system in the nine provinces and autonomous regions of the Yellow River Basin under changing climate conditions. The results show that the evolution process of the

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFC3202300);国家自然科学基金项目(52379009,52441901);江苏省自然科学基金优秀青年基金项目(BK20240189);北京江河水利发展基金会-水利青年科技英才项目(JHYC202310);湖北省自然科学基金三峡联合基金项目(2023AFD203);水灾害防御全国重点实验室自主研究项目(5240152E2)

作者简介:冯仲恺(1988—),男,教授,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:myfellow@163.com

water-energy coupling system in the nine provinces and autonomous regions of the Yellow River Basin can be divided into stages such as development, antagonism, depression, and recovery. Among them, the climate sensitivity of the water resources subsystem is higher than that of the energy subsystem. The water consumption of the primary industry and the energy consumption of the secondary industry are significantly affected by feedback, while the water consumption and energy consumption of the tertiary industry have a strong synergistic evolution characteristic. SSP5-8.5 scenario has the fastest evolution efficiency and highest sensitivity, followed by SSP3-7.0 scenario, and SSP1-2.6 scenario has the slowest evolution efficiency. The Hurst index of the water resources and energy subsystems in the nine provinces and autonomous regions of the Yellow River Basin is relatively high, among which the Hurst index of variables such as water consumption and energy consumption per unit of GDP in the secondary industry is the highest, showing chaotic and disorderly characteristics. The energy subsystem has the highest degree of orderliness, the environmental subsystem has the lowest degree of orderliness, and the information entropy ratio of the energy consumption of the secondary industry and its unit GDP energy consumption is the highest. The random evolution characteristics of each variable are most prominent under the SSP5-8.5 scenario, and the orderliness is highest under the SSP1-2.6 scenario. The coupling degree of water-energy systems in the nine provinces and autonomous regions of the Yellow River Basin increased significantly before 2020, but remained in a state of imbalance, and after 2020, it was in a state of basic coordination. The coupling degree is highest under the SSP1-2.6 scenario, indicating that the intensity of basin resource development and increased environmental awareness will enhance system compactness, while an increase in carbon emissions will weaken system stability and coupling.

Key words: water-energy coupling system; system dynamics; CMIP6 climate models; the Yellow River Basin

水资源-能源耦合系统是涉及水文循环、能源生产、环境承载和社会经济等多维要素的复杂系统^[1-2],不同要素之间存在着极其紧密的相互作用关系,任意要素变化均可能对关联子系统产生正向促进或负向抑制的影响,探明其演化规律和发展态势对区域可持续发展战略制定和综合管理具有重要意义。早期阶段,学者多注重静态系统分析,难以精确刻画要素间的动态反馈机制。伴随复杂科学发展,神经网络、支持向量机等机器学习方法逐步被应用于系统行为模拟,但因黑箱特性导致机理阐释不足。系统动力学通过构建存量-流量分析框架,利用微分方程定量解析复杂系统多维要素的非线性交互机制,其因果反馈建模和情景仿真能力为破解上述难题提供了新路径^[3-5]。系统动力学模型在用水量和能耗量预测^[6-7]、流域环境承载力评估^[8-10]、多要素复杂巨系统研究^[7,11]、区域政策分析与评估^[12-13]等领域取得了重要进展。

近年来,气候变化改变了流域水循环模式,增大了能源资源供给压力,加剧了系统运行不确定性。耦合模式比较计划(Coupled Model Intercomparison Project, CMIP)^[14]通过协调全球气候建模组的国际合作,构建了包含35个气候模式的标准化试验框架,其第六阶段(CMIP6)创新性地纳入共享社会经济路径(Shared Socioeconomic Pathway, SSP)^[15],提供了不同碳排放路径对应的气候情景,在水文过程模拟预测^[16-17]、极端气候事件监测^[18-22]等领域得到广泛应用。然而,已有研究未能充分考虑气候变化对水资源-能源耦合系统的胁迫效应,而且CMIP6的全球尺度输出与流域管理需求的局地尺度间存在差距,制约了精细化模拟分析与适应性策略制定。

为此,本文基于论文(I)部分^[23],建立黄河流域九省区水资源-能源耦合系统动力学模型,识别关键变量及其关联方程,利用统计降尺度方法将CMIP6多模式集合输出降尺度至流域分辨率,实现系统动力学模型与气候变化情景的有机集成;运用Hurst指数、有序度和系统耦合度等指标,推求变化条件下多维要素的变化路径,探明黄河流域九省区水资源-能源耦合系统演化规律,以期气候变化下水资源、能源适应性管理提供理论依据。

1 研究框架与数据来源

图1为研究框架。降雨等气象数据来自中国气象数据网(<http://data.cma.cn>)的地面气象站基本气象要素观测数据集;水资源量、产业用水量、废水排放量等水文数据来自黄河流域和各省区《水资源公报》;人口、生产总值、产业增加值等社会经济数据来自各省区历年统计年鉴和统计年报;产业能耗量等能源数据来自《中国能源统计年鉴》;不同碳排放路径对应的气候情景来自CMIP6网站(<https://aims2.llnl.gov/search/cmip6>),通过统计降尺度方法得到研究区对应的未来气候情景数据。此外,通过线性插值法对缺失数据、指标进行插补延长,最终获得2005—2022年尺度数据集。

2 系统动力学模型构建

2.1 变量选择

系统动力学模型由状态变量、速率变量、辅助变量和外生变量构成。其中,状态变量是系统动力学模型的核心变量,可以直观清晰地展示系统总体特征及其反馈关系;速率变量反映了状态变量的时序

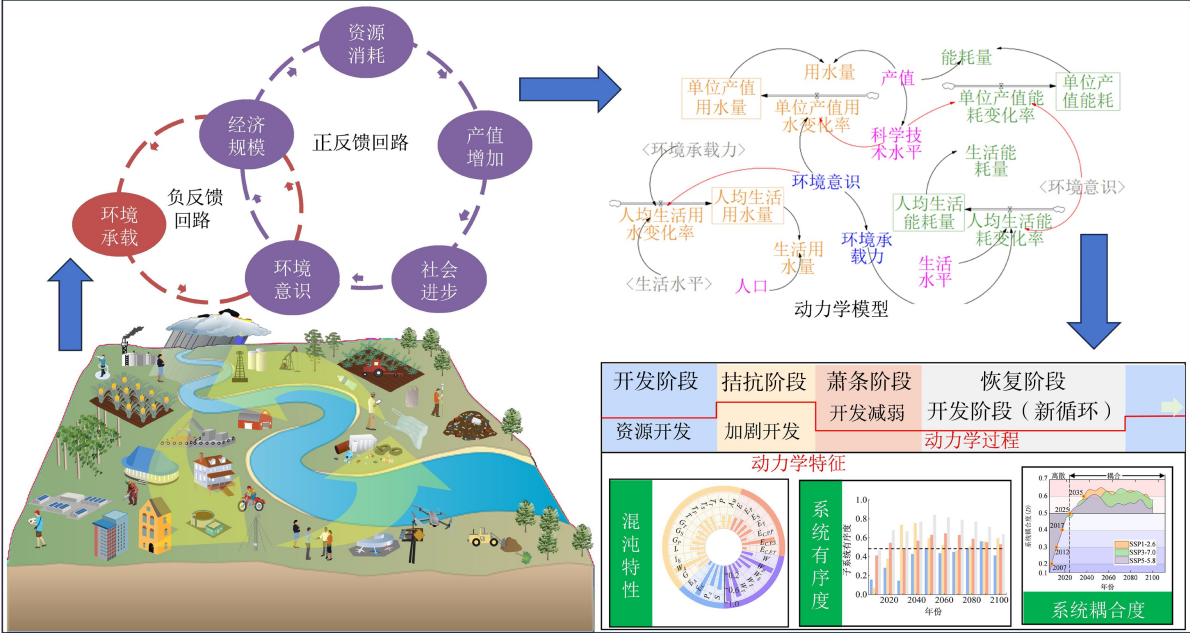


图 1 研究框架

Fig. 1 Study framework

变化,影响状态变量在不同时段的取值;辅助变量是连接相关变量的中间变量;外生变量为模型输入,本文将其取为 CMIP6 气候情景对应的有效降水量。考虑研究区下垫面复杂、生态环境脆弱、水资源能源集聚、空间异质性强等特点,采用需求侧变量可规避省域数据失真、重复核算等问题,确保模型输入可信度和实际可操作性。因此,本文选取水资源、能源、社会经济、环境四大子系统来构建系统动力学模型,部分变量信息见表 1。其中,水资源子系统变量选择参考文献[24-25];能源子系统变量选择参考文献[25];社会经济子系统变量选择参考文献[11];环境子系统变量选择参考文献[26-28]。

2.2 模型构建

系统动力学模型运用反馈关系描述不同子系统的拓扑结构,运用微分、积分、差分等复杂数理方程表征变量之间的相互关系。本文将水资源-能源耦合系统划分为水资源、能源、社会经济、环境四大子系统。

2.2.1 水资源子系统

水资源子系统变量包括用水总量、三次产业的用水量以及生活用水量,其中用水总量不考虑生态用水,计算公式为

$$W = W_p + W_s + W_T + W_D \quad (1)$$

其中

$$W_D = W_{DC}P$$

式中: W_D 为生活用水量; W_{DC} 为人均生活用水量。

将单位生产总值用水量和人均生活用水量设为受速率变量影响的状态变量,计算公式为

$$W_{Pi,t} = W_{Pi,t-1} + \frac{dW_{Pi,t-1}}{dt} \quad (2)$$

$$W_{DC,t} = W_{DC,t-1} + \frac{dW_{DC,t-1}}{dt} \quad (3)$$

式中: $W_{Pi,t}$ 为 t 时段产业 i 单位生产总值用水量, i 取 P、S、T 分别表示第一、第二、第三产业; $\frac{dW_{Pi,t-1}}{dt}$ 为产业 i 单位生产总值用水量的时间变化率,是速率变量; $W_{DC,t}$ 为 t 时段的人均生活用水量; $\frac{dW_{DC,t-1}}{dt}$ 为人均生活用水量的时间变化率,是速率变量。

速率变量由若干反映不同变量之间正、负反馈效应的分量组成。例如,第一产业单位生产总值用水量受到农业机械总动力的正反馈影响,即农业机械化扩张会刺激产生更密集的农业生产活动、更大的耕地面积,从而增大农业用水量^[29],计算公式为

$$\frac{dW_{PP,t-1}}{dt} = g(A_M) \quad (4)$$

式中 $g(\cdot)$ 为关联函数, $g(A_M)$ 表示 A_M 对速率变量 $\frac{dW_{PP,t-1}}{dt}$ 的反馈效应。

第二产业单位生产总值用水量受第二产业科学技术的负反馈影响、工业企业数量的正反馈影响以及环保意识的负反馈影响,即工业规模扩大会增加用水量,但科技水平的发展亦会提高用水效率进而降低用水量^[30],环保意识的提升则会促进社会各方采取先进的节水措施来降低用水量,即表现为负反馈效应^[27,31]。计算公式为

$$\frac{dW_{PS,t-1}}{dt} = g(T_S) + g(I_E) + g(E_A) \quad (5)$$

表 1 系统动力学模型主要变量

Table 1 Main variables of system dynamics model				
变量名	符号	类型	子系统	描述
流域蓄水量	S	辅助变量	环境	由降雨径流过程汇集形成的水资源存储量,影响环境承载力等
有效降水量	P_e	外生变量	环境	降水量扣除蒸发后的净雨量,影响流域蓄水量等
环境承载力	E_C	状态变量	环境	表征环境子系统的健康状态,影响环保意识等
环保意识	E_A	状态变量	环境	表征人类社会对环境子系统健康状态的感知程度,影响资源消费强度、产业发展格局等
流域生产总值	G	辅助变量	社会经济	三次产业的生产总值总和,影响流域人口规模和科学技术水平等
废水排放量	A	辅助变量	社会经济	人类社会在利用能源资源过程中向环境排放的污染废弃水体,影响环境承载力等
工业企业数量	I_E	辅助变量	社会经济	流域工业企业数量,与第二产业生产总值呈正相关关系
第一产业生产总值	G_P	辅助变量	社会经济	农业、林业、牧业、渔业等生产总值总和,衡量第一产业发展情况,影响第一产业科学技术水平等
第二产业生产总值	G_S	辅助变量	社会经济	工业和建筑业等生产总值总和,衡量工业和建筑业发展情况,影响第二产业科学技术水平等
第三产业生产总值	G_T	辅助变量	社会经济	服务业、金融业等生产总值总和,衡量现代社会经济发达程度,影响第三产业科学技术水平等
流域科学技术水平	T	辅助变量	社会经济	表征人类社会开发利用能源资源的科技能力,影响生活用水量和能耗量等
第一产业科学技术水平	T_P	辅助变量	社会经济	表征在第一产业的开发利用能力,影响单位粮食产量用水量与能耗量等
第二产业科学技术水平	T_S	辅助变量	社会经济	表征第二产业的开发利用能力,影响第二产业单位用水量与能耗量等
第三产业科学技术水平	T_T	辅助变量	社会经济	表征第二产业的开发利用能力,影响第三产业单位用水量与能耗量等
总人口	P	状态变量	社会经济	流域人口规模,影响资源消耗量等
农业机械总动力	A_M	辅助变量	社会经济	农、林、牧、渔业等机械动力总和,反映农业现代化水平,影响农业用水量等
生活水平	L	辅助变量	社会经济	表征水资源和能源利用带来的效益及平衡状态,影响第三产业单位用水量、能耗量、生活用水等
总能耗量	E	辅助变量	能源	三次产业的能耗量总和,影响生活水平等
第一产业能耗量	E_P	辅助变量	能源	第一产业生产活动消费的能源,影响第一产业生产总值等
第二产业能耗量	E_S	辅助变量	能源	第二产业生产活动消费的能源,影响第二产业生产总值等
第三产业能耗量	E_T	辅助变量	能源	第三产业生产活动消费的能源,影响第三产业生产总值等
第一产业单位生产总值能耗量	E_{PP}	状态变量	能源	表征农业生产活动的能源消耗强度与能源利用水平,影响第一产业能耗量等
第二产业单位生产总值能耗量	E_{PS}	状态变量	能源	表征工业生产活动的能源消费强度与能源利用水平,影响第二产业能耗量等
第三产业单位生产总值能耗量	E_{PT}	状态变量	能源	表征服务业、金融行业的能源消费强度与能源利用水平,影响第三产业能耗量等
用水总量	W	辅助变量	水资源	由第一产业、第二产业、第三产业用水量及生活用水量构成,不考虑生态用水,影响流域生活水平等
第一产业用水量	W_P	辅助变量	水资源	第一产业消费的水资源,影响第一产业生产总值等
第二产业用水量	W_S	辅助变量	水资源	第二产业消费的水资源,影响第二产业生产总值等
第三产业用水量	W_T	辅助变量	水资源	第三产业消费的水资源,影响第三产业生产总值等
第一产业单位生产总值用水量	W_{PP}	状态变量	水资源	表征农业生产活动对水资源的消耗强度和利用水平,影响第一产业用水量等
第二产业单位生产总值用水量	W_{PS}	状态变量	水资源	表征工业生产活动对水资源的消耗强度和利用水平,影响第二产业用水量等
第三产业单位生产总值用水量	W_{PT}	状态变量	水资源	表征服务业、金融行业对水资源的消耗强度和利用水平,影响第三产业用水量等

与第一产业与第二产业类似,第三产业单位生产总值用水量受到第三产业科学技术水平与环保意识的负反馈影响、生活水平的正反馈影响,即服务业与交通业的发展会在很大程度上增大用水量,环保意识会降低用水量^[11],人均生活用水量受到环保意识负反馈的影响。

2.2.2 能源子系统

与水资源子系统类似,能源子系统包括三次产

业单位生产总值的能耗量以及总能耗等变量,各产业的能耗量由其生产总值及单位生产总值能耗量乘积得到。计算公式为

$$E = E_P + E_S + E_T + E_D \tag{6}$$

其中

$$E_D = E_{DC}P$$

式中: E_D 为生活能耗量; E_{DC} 为人均生活能耗。

将单位生产总值能耗和人均生活能耗设定为状态变量,计算公式为

$$E_{Pi,t} = E_{Pi,t-1} + \frac{dE_{Pi,t-1}}{dt} \quad (7)$$

$$E_{DC,t} = E_{DC,t-1} + \frac{dE_{DC,t-1}}{dt} \quad (8)$$

式中: $E_{Pi,t}$ 为 t 时段的产业 i 单位生产总值能耗; $\frac{dE_{Pi,t-1}}{dt}$ 为产业 i 单位生产总值能耗的时间变化率, 是速率变量; $E_{DC,t}$ 为 t 时段的人均生活能耗; $\frac{dE_{DC,t-1}}{dt}$ 为人均生活能耗的时间变化率, 是速率变量。

能源子系统的速率变量表征方法与水资源子系统类似, 计算公式为

$$\frac{dE_{PP,t-1}}{dt} = g(A_M) \quad (9)$$

$$\frac{dE_{PS,t-1}}{dt} = g(T_S) + g(I_E) + g(E_A) \quad (10)$$

$$\frac{dE_{PT,t-1}}{dt} = g(T_S) + g(E_A) \quad (11)$$

$$\frac{dE_{DC,t-1}}{dt} = g(L) + g(E_A) \quad (12)$$

2.2.3 社会经济子系统

社会经济子系统主要包括科技水平、生活水平、生产总值等变量。生产总值为三次产业生产总值之和, 各产业生产总值是能耗量、用水量的双变量函数, 即产品生产与资源消耗呈正相关关系^[27]。计算公式为

$$G = G_P + G_S + G_T \quad (13)$$

$$G_i = a(bE_i + cW_i)^d \quad (14)$$

式中: G 为流域生产总值; G_i 为产业 i 的生产总值; E_i 为产业 i 的能消耗量; W_i 为产业 i 的用水量; a 、 b 、 c 、 d 为系数, 由实际数据拟合得到。

科技水平、农业机总动力是生产总值的单变量函数, 即生产总值升高会加大资金投入, 促进科技发展和机械化水平提升^[29]。废水排放量是用水总量、科技水平的双变量函数, 即用水量增加会增加废水排放, 科技水平提升会促进废水处理效率提升、减少废水排放。计算公式为

$$T_i = (a_0 + b_0 e^{-c_0 G_i})^{-1} \quad (15)$$

$$A_M = a_1 T_P^{0.5042} \quad (16)$$

$$A = a_2 W(b_2 - c_2 e^{-d_2 T}) \quad (17)$$

式中: T_i 为产业 i 的科学技术水平; a_0 、 a_1 、 a_2 、 b_0 、 b_2 、 c_0 、 c_2 、 d_2 为系数, 由实际数据拟合得到。

流域生活水平是总用水量与总能耗量的双变量函数。通常情况下, 水资源与能源的投入会促进流域生产总值以及居民生活质量的提升^[11], 计算公

式为

$$L = (1 - e^{-E})(1 - e^{-W}) \quad (18)$$

式中 L 的取值范围为 0~1。

人口总量为模型的状态变量, 受流域总生产总值、环境承载力以及生活水平的正反馈影响, 即流域生产力、生活水平和环境承载力更为优越时, 会吸引和容纳更多的人口。人口总量的速率变量与单位生产总值用水量和能耗量相关, 将其进一步拆解为多个分量, 各分量表示对应变量的反馈效应, 同时采用逻辑回归方程进行修订^[32]。计算公式为

$$P_t = P_{t-1} + \frac{dP_{t-1}}{dt} \quad (19)$$

其中 $\frac{dP_{t-1}}{dt} = rP_{t-1}[g(G) + g(E_C) + g(L)]$

式中: P_t 为 t 时段总人口; $\frac{dP_{t-1}}{dt}$ 为人口变化率; r 为多年人口平均自然增长率。

2.2.4 环境子系统

环境子系统通过社会活动与水资源、能源子系统相互关联。除经济增长驱动流域自身活动外, 还需要考虑环境或生态系统带来的综合效应, 而水资源作为重要的自然资源, 与社会活动关系更为紧密, 是连接环境子系统与社会经济子系统的要素。因此, 本文以水资源为核心构建环境子系统, 主要变量包括流域蓄水量、环境承载力、环保意识等。流域水量平衡方程、环境承载力方程和环保意识方程的表达式为

$$S = P_e R - W - O \quad (20)$$

$$E_{C,t} = E_{C,t-1} + \frac{dE_C}{dt} \quad (21)$$

$$E_{A,t} = E_{A,t-1} + \frac{dE_A}{dt} \quad (22)$$

其中 $\frac{dE_C}{dt} = g(S, G)E_C \left(1 - \frac{E_C}{E_{C,\max}}\right)$

$$\frac{dE_A}{dt} = \begin{cases} 10(E_C - E_C/E_{C,\min})^2 & E_C \leq E_{C,\min} \\ -a_3 & E_C > E_{C,\min} \end{cases}$$

式中: O 为生态基流, 按照蒙大拿法^[33]以及《河湖生态环境需水计算规范》, 取流域水资源的 30%; R 为径流系数, 取流域多年平均值; $E_{C,t}$ 为 t 时刻的环境承载力; $\frac{dE_C}{dt}$ 为环境承载力变化率, 是速率变量; $E_{C,\max}$ 、 $E_{C,\min}$ 分别为环境承载力上、下限阈值; $E_{A,t}$ 为 t 时刻的环保意识; $\frac{dE_A}{dt}$ 为环保意识变化率, 是速率变量; a_3 为环保意识的下降速率常数。环境承载

力为状态变量,由环境承载力变化率决定,受流域蓄水量的正反馈影响以及废水排放量的负反馈影响,并采用逻辑方程进行修正。环保意识为状态变量,受环保意识变化率控制。当环境承载力低于下限阈值时环保意识开始积累,当环境承载力大于上限阈值时环境最大承载力开始下降。

2.2.5 关联方程

关联方程运用来描述将不同变量之间的复杂反馈关系,实现各子系统状态变量的有机连接,是构建系统动力学模型的重要步骤。换言之,关联方程可以将变量的复杂非线性时空变化分解为若干模态因子,以便更好地推求水资源-能源耦合系统多维变量的协同演化规律。本文运用速率方程确定关联方程,计算公式为

g(·)=δ_kw_kK_kR(V_k) (23)

其中 δ_k= $\begin{cases} 1 & \text{正反馈} \\ -1 & \text{负反馈} \end{cases}$

式中:V_k为变量k的变化率,受多个变量的反馈效应影响;w_k为变量k的权重;K_k为将变量变换到[0,1]的缩放函数,本文选取的函数形式为f(x)=m(1-e^{-nx}),x为具有反馈效应的变量,m、n为系数,采用试算法确定;R(V_k)为V_k的多年平均增长率。

2.3 基于统计降尺度的未来气候场景

CMIP6是由世界气候研究计划耦合模拟工作组发起的第六次模式比较计划,提供的气候情景被广泛应用于全球气候变化影响研究^[20],本文采用气

候情景模式 CMIP6 提供的 SSP 中 2015—2100 年降水数据,选取 SSP1-2.6、SSP3-7.0 和 SSP5-8.5 3 种典型情景,其中 SSP1-2.6 情景的碳排放量逐步降低,是可持续发展路径;SSP5-8.5 情景的碳排放量快速增加,是高度依赖化石燃料的发展路径;SSP3-7.0 情景的碳排放量缓慢增加,是介于 SSP5-8.5 和 SSP1-2.6 之间的中间路径。进一步,采用统计降尺度法获得研究区数据,即根据观测数据的概率分布函数对预测数据进行校正。图 2 为耦合未来气候情景的系统动力学模型示意图。

2.4 评价指标

2.4.1 Hurst 指数

Hurst 指数常用于评价目标变量的分形结构及时序依赖性,其值越小表示变量未来趋势与历史数据一致性越好,演化过程呈规律性变化;其值越大表示未来趋势与历史数据的相关性越弱,特别是大于 0.5 时,表示变量时间运动完全无规则,呈现混沌性,难以利用历史数据模拟未来趋势。对于给定的时间序列{ξ₁,ξ₂,⋯,ξ_t},Hurst 指数计算公式为

H=[lg(λ/σ)τ - lgτ]/lgτ (24)

式中:H为Hurst指数;λ为序列极值;σ为标准差;μ为序列均值;τ为变量滞时,确定方法参考 Elshafei 等^[31-32]的研究。

2.4.2 有序度

有序度反映子系统内各变量的紧密耦合程度,其值越大表示变量间协同性越好,高于 0.5 则认为

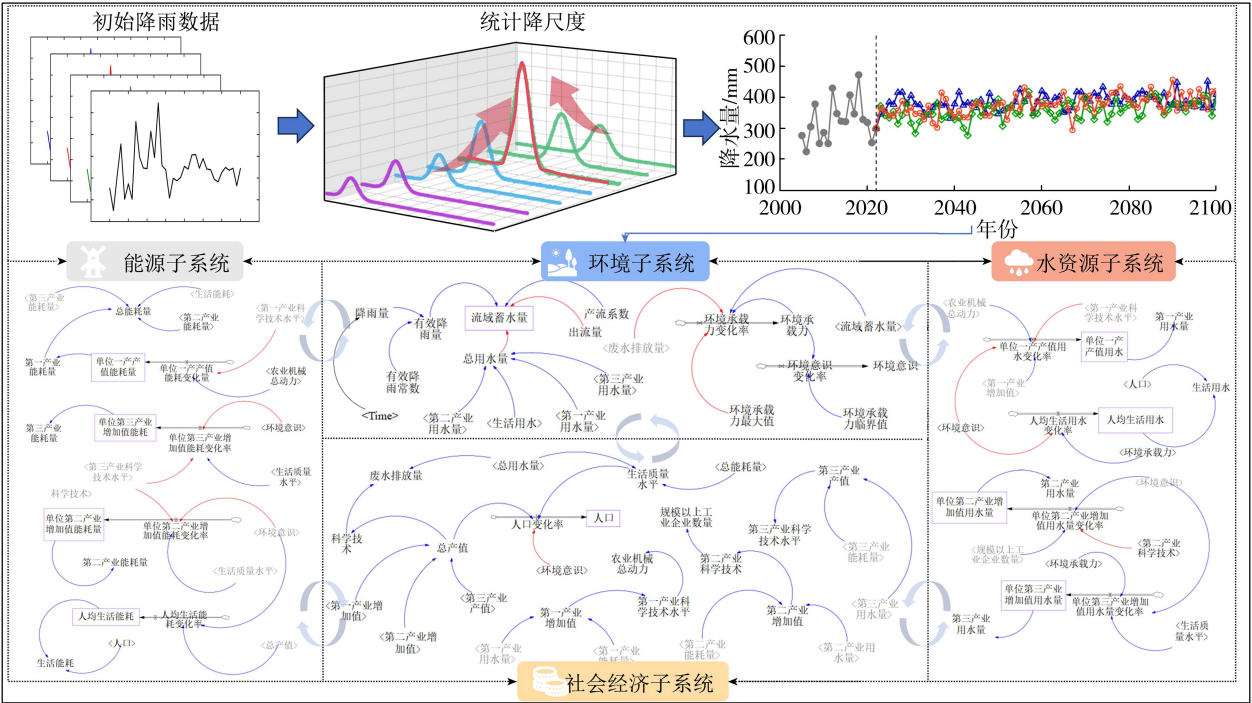


图 2 耦合未来气候情景的系统动力学模型示意图
Fig.2 Schematic diagram of system dynamics model coupled with future climate scenarios

子系统处于有序状态^[33];其值越小表示子系统协同性越差。有序度计算公式为

$$U_j = 1 - H_j/H_{m,j} \tag{25}$$

其中

$$H_j = \sum_{k=1}^{N_j} h_{j,k}$$

式中: U_j 为子系统 j 的有序度; H_j 为子系统 j 的信息熵; $H_{m,j}$ 为子系统 j 的信息熵最大值; $h_{j,k}$ 为子系统 j 变量 k 的信息熵,用于表征系统内部运动秩序性,熵值越大,表明系统内部运动越无序,需要外界干涉保证其稳定性; N_j 为子系统 j 的变量数。

2.4.3 耦合度

耦合度反映区域水资源-能源耦合系统不同变量之间的紧致性,取值范围为 0~1,其值越接近 1 表示系统变量之间的紧致性越好,耦合系统的结构越牢固;其值越接近 0 表示耦合系统变量之间的紧致性越差、子系统结构越松散。耦合度计算公式为

$$C = \left[Z \left(\prod_{j=1}^N U_j / \sum_{j=1}^N U_j \right)^{1/N} \right]^{1/2} \tag{26}$$

其中

$$Z = \sum_{j=1}^N w_j U_j$$

式中: C 为耦合度; Z 为基于有序度的综合评价指数; N 为子系统个数; w_j 为子系统 j 的权重,本文采用主观赋权法,认为各子系统重要性一致,即具有相同权重。参考李荣峰等^[34]的研究,根据耦合度对系统协调等级进行划分: 0~0.1 为极度失调,>0.1~0.2 为严重失调,>0.2~0.3 为中度失调,>0.3~0.4 为轻度失调,>0.4~0.5 为濒临失调,>0.5~0.6 为基本协调,>0.6~0.7 为初级协调,>0.7~0.8 为中级协调,>0.8~0.9 为良好协调,>0.9~1 为优质协调。

3 结果与分析

3.1 系统动力学有效性检验

采用决定系数 R^2 、百分比偏差 P_B 、平均绝对百分比误差 E_{MAP} 与观测值标准差比率 R_{SR} 检验系统动力学模型的有效性。其中, R^2 越大、 E_{MAP} 和 P_B 越小,表明模拟值越接近实测值,精度越高;当 $R^2 > 0.7$ 、 $-15 \leq P_B \leq 15$ 、 $R_{SR} \leq 0.7$ 时,认为模拟结果在可接受范围内。图 3 为 2005—2022 年黄河流域九省区部分变量系统动力学模型模拟结果。由图 3 可见,多数变量模拟值与实测值的拟合程度较好,其中总能耗量模拟值低于实测值,第三产业用水量模拟值高于实测值,但总体误差均较小, P_B 、 R_{SR} 和 R^2 均在可接受范围内,表明构建的系统动力学模型效果较好,可用于模拟研究区水资源-能源耦合系统的演化规律。

3.2 水资源-能源耦合系统动力学演化分析

图 4 为不同气候情景下黄河流域九省区社会经济、环境子系统的演化过程。由图 4 可见,各变量整体演化趋势存在明显差异,总人口、科学技术水平、环境意识、各产业生产总值等变量总体呈上升趋势,其余变量呈下降趋势。其中,第三产业生产总值变化最大,2005—2035 年增加了 53 万亿元,年均增长率达 53%;人口时间敏感性最低,2005—2100 年平均变化率仅有 4.3%。各变量演化过程大致分为 4 个阶段:①开发阶段,社会经济子系统发展迅速,各变量变化明显,表现为人口增长、科技水平提高和财富积累;②拮抗阶段,环境子系统对社会经济子系统产生负反馈作用,表现为环境承载力下降、环保意识增加、社会经济活跃度降低;③萧条阶段,社会经

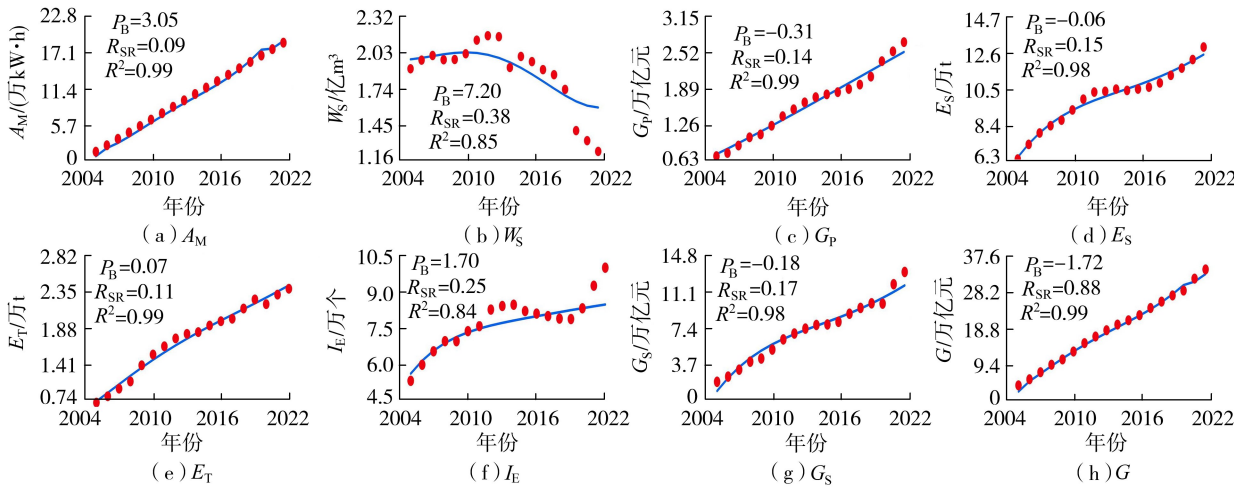


图 3 2005—2022 年黄河流域九省区部分变量系统动力学模型模拟结果

Fig. 3 Simulation results of partial variables in system dynamics model in nine provinces and autonomous regions of the Yellow River Basin from 2005 to 2022

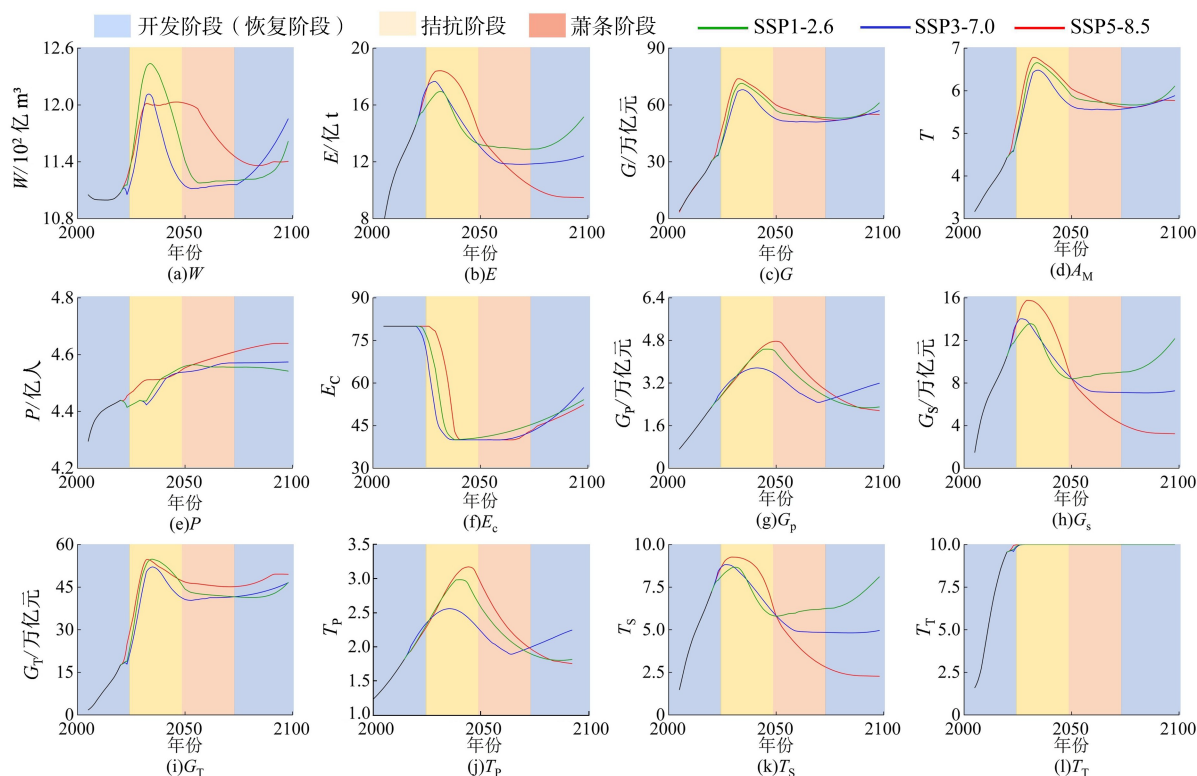


图 4 不同气候情景下黄河流域九省区社会经济、环境子系统的演化过程

Fig. 4 Evolutionary process of socioeconomic and environmental subsystems in nine provinces and autonomous regions of the Yellow River Basin under different climate scenarios

济活跃度持续走低,用水量和能耗量降低,总人口、各产业生产总值小幅下降后保持相对稳定;④恢复阶段,环境承载力从消退状态逐步恢复,社会经济子系统再次活跃,开始新一轮演化。此外,各变量在不同气候情景下的演化路径存在差异,总体表现为:SSP5-8.5 情景下水资源-能源耦合系统的演化最快,各变量较快达到峰值并随即发生转换,曲线变化相对剧烈;SSP1-2.6 情景下耦合系统演化最慢,达峰时间最晚,变量敏感性最低,曲线整体较为平滑;SSP3-7.0 情景介于两者之间。黄河流域九省区在 SSP3-7.0 情景下生产力水平最高,预计 2038 年前后达到人口峰值(4.35 亿人)和 GDP 峰值(72 万亿元),较其他情景提前 5~8 a。究其原因,黄河流域九省区多位于干旱半干旱地区,水资源短缺制约其社会经济发展,而 SSP3-7.0 情景的降水量最大(年均 328 mm),增加了流域径流和蓄水容量,具有较高的水资源和环境承载力,可以承载更多的人口、积累更多的财富、发展更高水平的科学技术。

图 5 为不同气候情景下黄河流域九省区水资源、能源子系统的演化过程。由图 5 可见,在空间层面上,研究区总用水量和总能耗量呈先升后降趋势。总用水量(未考虑生态用水)于 2034—2037 年达到峰值,与徐建新等^[35]提出的“我国水资源 2035—2040 年达峰”预测结果较为吻合,SSP3-7.0 情景下

峰值最大(1210 亿 m^3),SSP5-8.5 情景下达峰时间最早(2033 年)。总能耗量达峰时间早于总用水量,预计为 2031—2033 年,略滞后于我国 2030 年达峰目标,SSP3-7.0 情景下 2031 年达到峰值 17.2 亿 t,SSP1-2.6 情景下 2033 年达到峰值 18.2 亿 t,因其高耗能产业占比较高,演化前期敏感性高于总用水量,随后缓慢下降,敏感性降低。行业层面上,第一产业用水量在 SSP5-8.5 情景的峰值最大(910 亿 m^3)、SSP3-7.0 情景的峰值最小(870 亿 m^3),能耗量在不同气候情景下趋势相差不大,均在 2039 年左右达到峰值,其中 SSP5-8.5 情景下峰值最大(5.9 亿 t);不同于第一产业,第二产业用水量持续下降,在演化过程中并未出现峰值,其中 SSP1-2.6 情景下降速率最小,能耗量在 SSP5-8.5 情景下峰值最大(14.7 亿 t);第三产业用水量与能耗量趋势相差不大,不同气候情景下达峰时间均在 2036 年左右,其中 SSP3-7.0 情景下峰值最大,用水量与能耗量分别达到 140 亿 m^3 和 3.1 亿 t。总的来说,黄河流域九省区及其三次产业的用水量和能耗量在不同气候情景的演化模式存在明显差异,其原因在于:一方面,农业灌溉是水资源主要消耗途径,SSP3-7.0 情景下降水量较大,大部分农业灌溉用水需求可由天然降雨补给完成,降低了第一产业用水量峰值;另一方面,黄河流域九省区能源行业较为成熟,前期开发阶

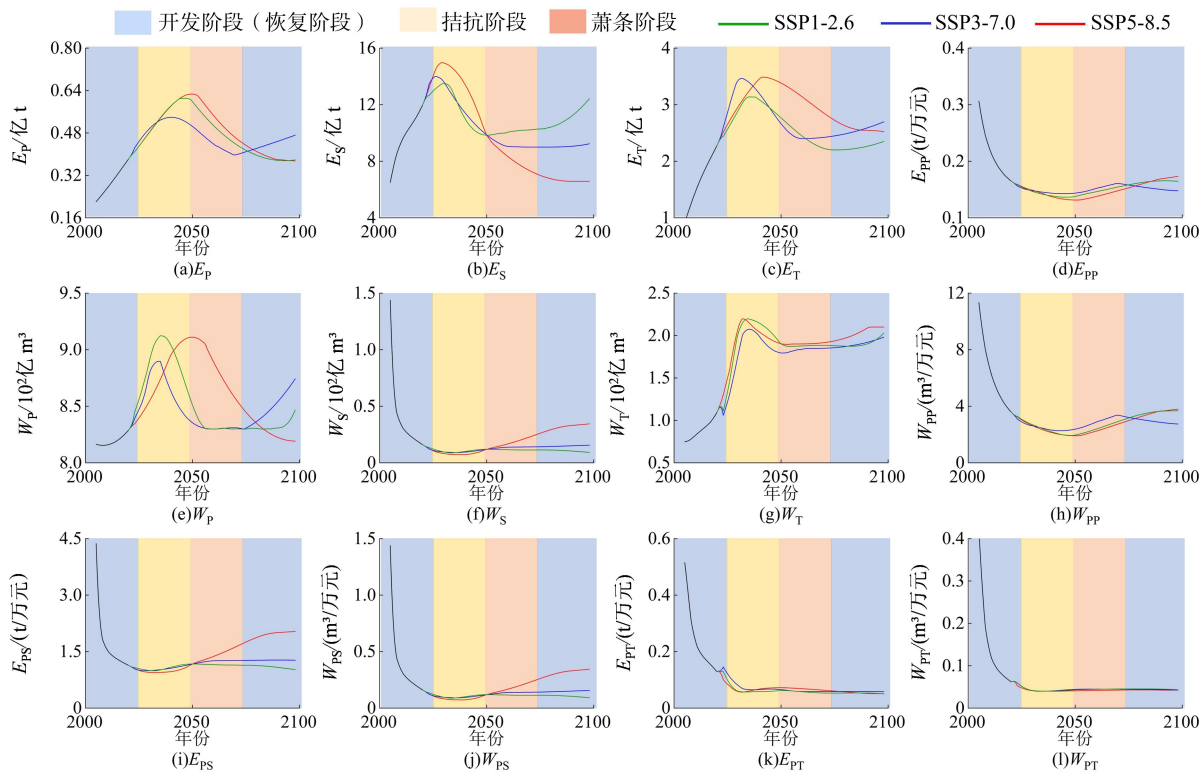


图5 不同气候情景下黄河流域九省区水资源、能源子系统的演化过程

Fig. 5 Evolutionary process of water resources and energy subsystems in nine provinces and autonomous regions of the Yellow River Basin under different climate scenarios

段能源子系统达峰时间早于水资源子系统,而在萧条阶段,环境子系统负反馈作用增强,通过有效降水量、流域蓄水量等变量对水资源子系统造成直接影响,使水资源子系统在不同气候情景下差异性较大,而能源子系统通过环境承载力、环境意识等变量承受环境子系统的间接影响,变量的时滞传递效应在一定程度上稀释和缓解了气候变化影响。因此,黄河流域九省区水资源-能源耦合系统存在典型“牵一发而动全身”的级联效应,一旦前置变量超出极限阈值,会对后续关联要素造成严重影响,其中水资源子系统的敏感性高于能源子系统,需重点关注。

3.3 水资源-能源耦合系统动力学特性分析

3.3.1 变量混沌程度分析

图6为各气候情景下不同长度时间序列的Hurst指数。由图6可见,对于不同变量,相较于环境子系统和社会经济子系统,水资源、能源子系统的平均Hurst指数较大,分别达到了0.51和0.54,表明水资源、能源子系统相关变量大多随时间做无规律运动,呈紊乱和混沌状态,难以通过直接观测探寻其状态变化。其中,第二产业单位生产总值用水量、能耗量的Hurst指数最大,是系统中最无序的变量,规律性和趋势性较差。从时间序列长度来看,随着序列长度增加,环境子系统变量和社会经济子系统变量的Hurst指数呈减小趋势,而水资源、能源子系

统变量呈增大趋势,表明环境子系统、社会经济子系统在长期演化过程中逐步降低了混沌性,趋于规律性,而水资源子系统和能源子系统则与之相反。从气候情景来看,SSP5-8.5情景拥有最高的Hurst指数,其平均值达到了0.51,高于SSP1-2.6情景的0.43和SSP3-7.0情景的0.48,表明高排放情景会增加变量的演化随机性。因此,第二产业用水量、第三产业能耗量等变量的Hurst指数较低,其演化规律易于追踪,可作为流域资源优化配置的优先关注对象;第二产业能耗量等变量的Hurst指数较高,演化趋于混沌,应加强监测,及时发现潜在风险和问题,制定分级风险调控策略。

3.3.2 子系统有序度分析

图7为不同气候情景下各子系统的有序度。由图7可见,各子系统的有序度呈增加趋势,其中能源子系统的有序度最高,SSP1-2.6情景下约80%年份超过0.5,并在2050年达到最高值(0.8);环境子系统的有序度最低,仅SSP1-2.6情景2080年及SSP3-7.0情景2070年、2080年超过0.5。从气候情景来看,SSP1-2.6情景下各子系统的有序度均高于其他情景,其中环境子系统最为显著,年均有序度达到0.34,较SSP5-8.5情景增加了约10%,原因在于高碳排放加剧了气候变化,增加了极端事件发生频次,降低了系统稳定性,增大了演化随机性。图8为不

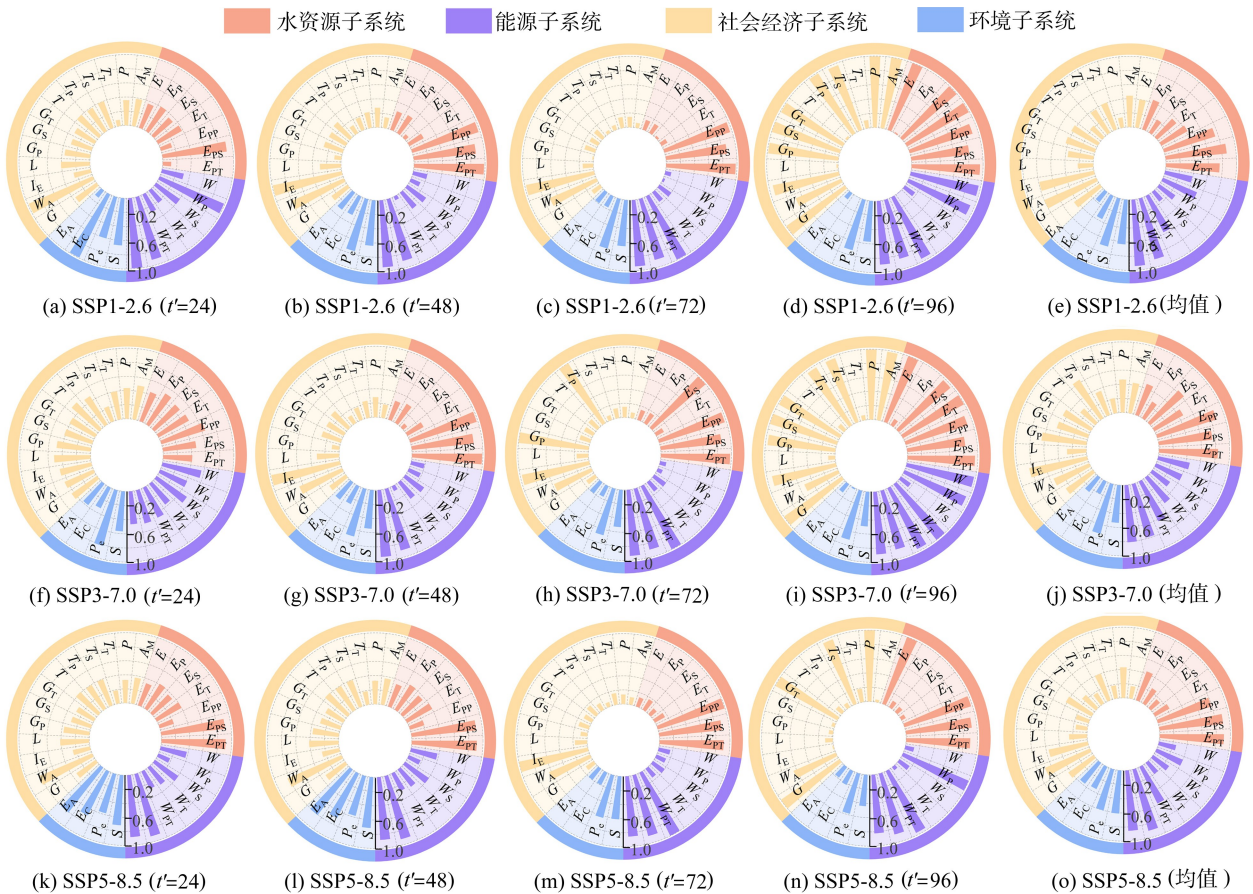


图 6 各气候情景下不同长度时间序列的 Hurst 指数

Fig. 6 Hurst index of different length time series under various climate scenarios

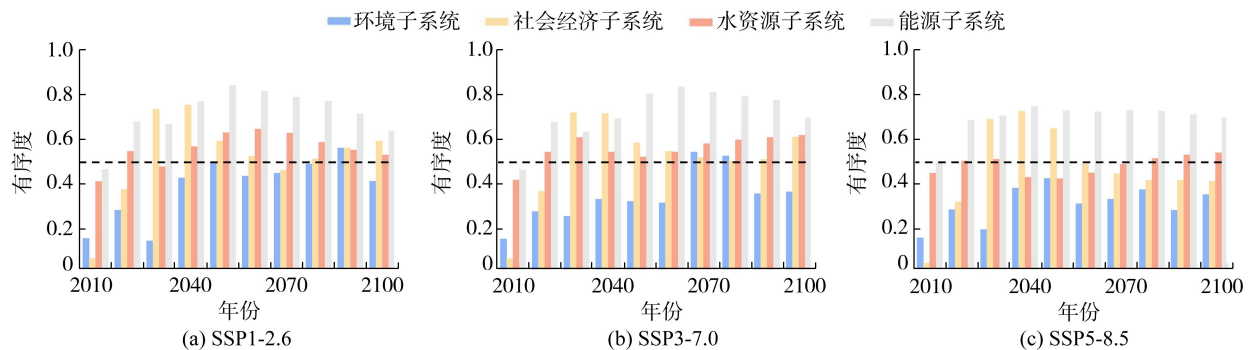


图 7 不同气候情景下各子系统的有序度

Fig. 7 Orderliness of various subsystems under different climate scenarios

同气候情景下各子系统变量的信息熵占比。由于黄河流域九省区产业体系相对成熟,能源子系统整体演化过程较为稳定,其中第二产业总能耗及其单位生产总值能耗的信息熵占比最大,主导了能源子系统有序度的变化;其余子系统变量信息熵占比在前期变化较大,在 2050 年后趋于稳定,表明此时子系统内部运动趋于平稳。综上,可依据黄河流域九省区各子系统的特点针对性制定政策措施:能源子系统有序度较高,可保持其稳定发展;环境子系统有序度较低,可通过治理污染、恢复生态等措施,提高风险响应能力。

3.3.3 系统耦合度分析

图 9 为黄河流域九省区水资源-能源耦合系统的耦合度。由图 9 可见,2005—2022 年耦合度呈快速上升趋势,但整体水平较低,系统处于失调状态,呈现离散性;2022 年后,不同气候情景下的耦合度均超过 0.5,系统实现了基本协调,并在未来长时间保持基本协调状态。其中,SSP1-2.6 情景下耦合度最高,年平均为 0.62,并于 2040 年达到峰值;SSP5-8.5 情景下耦合度最低,年平均约 0.55;SSP3-7.0 情景下呈缓慢上升趋势,从 2022 年的 0.5 逐步增加到 2100 年的 0.61。究其原因,黄河流域九省区前

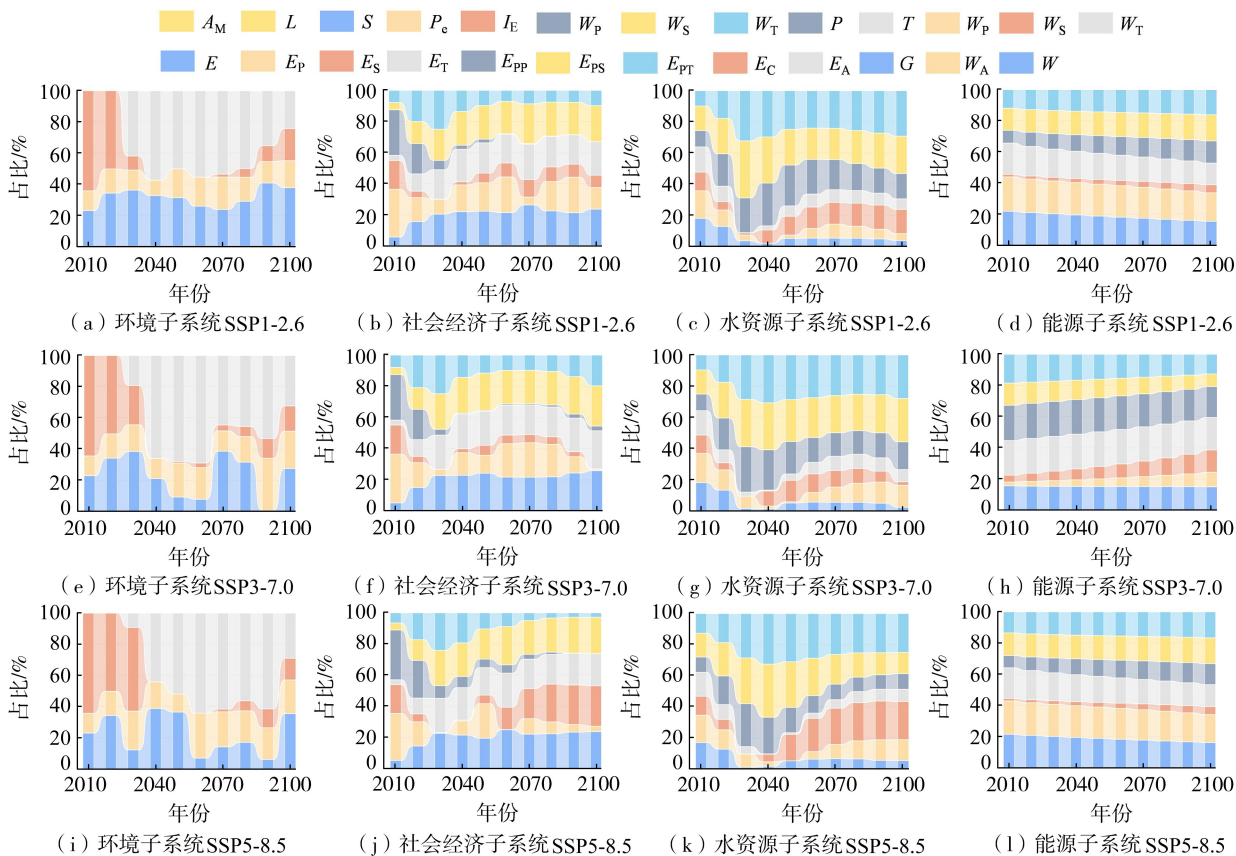


图 8 不同气候情景下各子系统变量的信息熵占比

Fig. 8 Proportion of information entropy of each subsystem variable under different climate scenarios

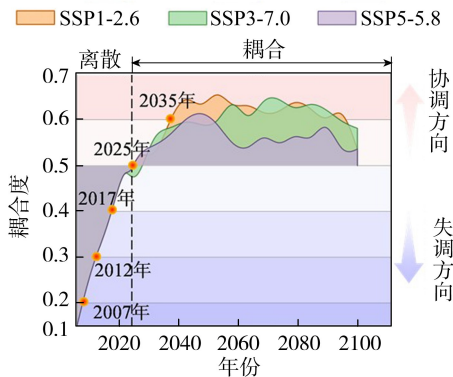


图 9 黄河流域九省区水资源-能源耦合系统的耦合度
Fig. 9 Coupling degree of water resources-energy coupling system in nine provinces and autonomous regions of the Yellow River Basin

期社会经济发展水平偏低,各子系统紧密度欠佳;近年来经济发展迅猛、城市化提速、人口增加,增大了水资源和能源投入,加之生态环保意识和可持续发展理念深入人心,通过封山育林、植树造林、退耕还林、自然保护区建设和生态补偿等措施,提升了环境承载能力,促进了区域人口分布、城市化布局 and 区域协调发展,不同变量相互作用持续加剧,各子系统愈加紧密,提升了系统耦合度^[36-39],因此有必要在流域能源资源管理中形成整体思想,促进系统可持续

协调发展。

4 结 语

本文基于不同气候情景和系统动力学模型,运用 Hurst 指数、有序度和耦合度等指标,研究了黄河流域九省区水资源-能源耦合系统的动态演化规律。结果表明,气候情景与耦合系统的交互作用会直接影响系统演化轨迹,如 SSP5-8.5 情景下系统脆弱性和随机性均高于 SSP1-2.6 情景,表明气候路径选择通过非线性放大效应加剧了系统混沌特征;三次产业对气候波动的响应存在明显异质性,其中第一产业用水量和能耗量敏感程度低于第二、第三产业,第二产业能耗对气候波动的响应强度较大,凸显工业部门是系统韧性调控的关键节点;若干混沌变量通过非线性协同机制可形成宏观有序的系统结构,系统耦合度受资源开发与低碳转型双重驱动,表明流域管理需突破传统单要素调控模式,充分关注子系统的协同增效作用,其中环境意识强化与碳排放约束有利于提升系统稳定性。需要说明的是,本文模型为复杂水资源系统的概化模拟,结果均基于当前认知、实测资料与边界条件设定,属阶段性成果。考虑未来应用场景变化或研究条件调整,模型预测结果可能与实际存在偏差,需在后续研究中进一步完善。

参考文献:

[1] MARTTUNEN M, MUSTAJOKI J, SOJAMO S, et al. A framework for assessing water security and the water-energy-food nexus: the case of Finland[J]. Sustainability, 2019, 11(10): 2900.

[2] 洪思扬, 方伟, 王佳友, 等. 广东省水资源-能源-粮食的省际流动与风险传递[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(4): 18-27. (HONG Siyang, FANG Wei, WANG Jiayou, et al. Inter-provincial water, energy, and food flow and risk transfer in Guangdong Province[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025, 53(4): 18-27. (in Chinese))

[3] FORRESTER J W. Counterintuitive behavior of social systems[J]. Theory and Decision, 1971, 2(2): 109-140.

[4] 赵璧奎, 邱静, 李宁宁, 等. 基于系统动力学的城市社会经济干旱模拟与对策研究[J]. 水资源保护, 2023, 39(6): 63-69. (ZHAO Bikui, QIU Jing, LI Ningning, et al. Urban socio-economic drought simulation and countermeasure study based on system dynamics [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(6): 63-69. (in Chinese))

[5] 舒心怡, 徐宗学, 叶陈雷, 等. 晋城市洪涝驱动下微观与宏观耦合建模的社会系统响应及韧性分析[J]. 水资源保护, 2025, 41(3): 65-74. (SHU Xinyi, XU Zongxue, YE Chenlei, et al. Analysis of social system response and resilience under flood driving in Jincheng City through micro-macro coupled modeling [J]. Water Resources Protection, 2025, 41(3): 65-74. (in Chinese))

[6] 李学军, 杨昌海, 王茗洋, 等. 基于系统动力学的新能源外送规模预测[J]. 高电压技术, 2025, 51(5): 2149-2159. (LI Xuejun, YANG Changhai, WANG Mingyang, et al. New energy delivery scale prediction based on system dynamics[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(5): 2149-2159. (in Chinese))

[7] 关雪桦, 陈志和, 叶智恒. 中山市水资源系统动态模拟与敏感性分析[J]. 水资源保护, 2022, 38(2): 103-111. (GUAN Xuehua, CHEN Zhihe, YE Zhiheng. Dynamic simulation and sensitivity analysis of water resources system in Zhongshan City [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(2): 103-111. (in Chinese))

[8] 杨光明, 时岩钧, 杨航, 等. 基于系统动力学的水资源承载力可持续发展评估: 以重庆市为例[J]. 人民长江, 2019, 50(8): 6-13. (YANG Guangming, SHI Yanjun, YANG Hang, et al. Assessment of sustainable development of water resources carrying capacity based on system dynamics model: case of Chongqing City [J]. Yangtze River, 2019, 50(8): 6-13. (in Chinese))

[9] 徐凯莉, 吕海深, 朱永华. 水资源承载力系统动力学模拟及研究[J]. 水资源与水工程学报, 2020, 31(6): 67-72. (XU Kaili, LYU Haishen, ZHU Yonghua. Simulation of water resources carrying capacity based on system dynamics [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2020, 31(6): 67-72. (in Chinese))

[10] 王奕淇, 李国平, 延步青. 基于 SD 与 AHP 模型的流域水资源承载力仿真研究[J]. 系统工程, 2022, 40(3): 24-32. (WANG Yiqi, LI Guoping, YAN Buqing. Simulation research on carrying capacity of basin water resources based on SD and AHP model [J]. Systems Engineering, 2022, 40(3): 24-32. (in Chinese))

[11] FENG Maoyuan, LIU Pan, LI Zejun, et al. Modeling the nexus across water supply, power generation and environment systems using the system dynamics approach: Hehuang Region, China[J]. Journal of Hydrology, 2016, 543: 344-359.

[12] 李璐, 张泽端, 毕贵红, 等. “双碳”目标下基于系统动力学的发电行业碳减排政策研究[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(12): 69-81. (LI Lu, ZHANG Zeduan, BI Guihong, et al. Carbon emission reduction policy in the power generation sector based on system dynamics with “dual carbon” targets[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(12): 69-81. (in Chinese))

[13] 朱帮助, 唐隽捷, 江民星, 等. 基于系统动力学的碳市场风险模拟与调控研究[J]. 系统工程理论与实践, 2022, 42(7): 1859-1872. (ZHU Bangzhu, TANG Junjie, JIANG Minxing, et al. Simulation and regulation of carbon market risk based on system dynamics[J]. Systems Engineering: Theory & Practice, 2022, 42(7): 1859-1872. (in Chinese))

[14] 周天军, 邹立维, 吴波, 等. 中国地球气候系统模式研究进展: CMIP 计划实施近 20 年回顾[J]. 气象学报, 2014, 72(5): 892-907 (ZHOU Tianjun, ZOU Liwei, WU Bo, et al. Development of earth/climate system models in China: a review from the coupled model intercomparison project perspective [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2014, 72(5): 892-907. (in Chinese))

[15] 周天军, 邹立维, 陈晓龙. 第六次国际耦合模式比较计划(CMIP6) 评述[J]. 气候变化研究进展, 2019, 15(5): 445-456. (ZHOU Tianjun, ZOU Liwei, CHEN Xiaolong. Commentary on the coupled model intercomparison project phase 6 (CMIP6) [J]. Climate Change Research, 2019, 15(5): 445-456. (in Chinese))

[16] 刘丽博, 索梅芹, 宋亚轩. 基于 CMIP6 的漳河上游气温、降水及径流预估研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2024, 55(12): 79-91. (LIU Libo, SUO Meiqin, SONG Yaxuan. Study on prediction of temperature, precipitation and runoff in the upper Zhanghe River Basin based on CMIP6 [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2024, 55(12): 79-91. (in Chinese))

[17] 隆院男, 张雨林, 蒋昌波, 等. 基于 CMIP6 的气候变化下资水流域径流响应研究[J]. 水土保持研究, 2024, 31

- (4): 114-125. (LONG Yuannan, ZHANG Yulin, JIANG Changbo, et al. Study on runoff response of Zishui Basin under climate change based on CMIP6[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(4): 114-125. (in Chinese)).
- [18] 杨肖丽, 马慧君, 吴凡, 等. 基于 CMIP6 的全球及干旱带干旱时空演变[J]. 水资源保护, 2023, 39(2): 1-17. (YANG Xiaoli, MA Huijun, WU Fan, et al. Research on the spatiotemporal evolution trends of global and arid zone meteorological drought based on CMIP6 multimodal analysis[J]. Water Resource Protection, 2023, 39(2): 1-17. (in Chinese))
- [19] SRIVASTAVA A, GROTHJAHN R, ULLRICH P A. Evaluation of historical CMIP6 model simulations of extreme precipitation over contiguous US regions[J]. Weather and Climate Extremes, 2020, 29: 100268.
- [20] ZHU Huanhuan, JIANG Zhihong, LI Juan, et al. Does CMIP6 inspire more confidence in simulating climate extremes over China? [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2020, 37(10): 1119-1132.
- [21] 卞国栋, 张建云, 王国庆, 等. 预估全球升温 1.5℃ 与 2.0℃ 下淮河流域极端降雨的变化特征[J]. 水科学进展, 2023, 34(6): 827-838. (BIAN Guodong, ZHANG Jianyun, WANG Guoqing, et al. Projection of extreme precipitation over the Huai River Basin under 1.5℃/2.0℃ global warming[J]. Advances in Water Science, 2023, 34(6): 827-838. (in Chinese))
- [22] 周中元, 王涛, 孙亚翥, 等. 黄河未来气候情景下冰情特征演变分析[J]. 水利学报, 2024, 55(3): 355-366. (ZHOU Zhongyuan, WANG Tao, SUN Yafei, et al. Analysis of the evolution of ice characteristics in the Yellow River under future climate scenarios[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2024, 55(3): 355-366. (in Chinese))
- [23] 冯仲恺, 蒋林佚, 牛文静, 等. 黄河流域九省区水资源-能源耦合系统研究(I): 特征解析[J]. 水资源保护, 2025, 41(5): 160-172. (FENG Zhongkai, JIANG Linyi, NIU Wenjing, et al. Water-energy coupling system in nine provinces and autonomous regions of the Yellow River Basin(I): characteristic analysis[J]. Water Resource Protection, 2025, 41(5): 160-172. (in Chinese))
- [24] LIU Yating, CHEN Bin. Water-energy scarcity nexus risk in the national trade system based on multiregional input-output and network environ analyses[J]. Applied Energy, 2020, 268: 114974.
- [25] 吴兆丹, 谈心阳, 刘烨宁, 等. “水资源-能源”纽带关系视角下西北地区能源产业可持续发展路径研究[J]. 水利经济, 2024, 42(5): 9-19. (WU Zhaodan, TAN Xinyang, LIU Yening, et al. Research on sustainable development path of energy industry in Northwest China from perspective of water-energy nexus[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2024, 42(5): 9-19. (in Chinese))
- [26] SIVAPALAN M. Debates-perspectives on socio-hydrology: changing water systems and the “tyranny of small problems”-socio-hydrology [J]. Water Resources Research, 2015, 51(6): 4795-4805.
- [27] VAN EMMERIK T H M, LI Z, SIVAPALAN M, et al. Socio-hydrologic modeling to understand and mediate the competition for water between agriculture development and environmental health: Murrumbidgee River Basin, Australia [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2014, 18(10): 4239-4259.
- [28] JIA Benjun, ZHOU Jianzhong, ZHANG Yongchuan, et al. System dynamics model for the coevolution of coupled water supply-power generation-environment systems: Upper Yangtze River Basin, China [J]. Journal of Hydrology, 2021, 593: 125892.
- [29] 王建华, 姜大川, 肖伟华, 等. 水资源承载力理论基础探析: 定义内涵与科学问题[J]. 水利学报, 2017, 48(12): 1399-1409. (WANG Jianhua, JIANG Dachuan, XIAO Weihua, et al. Study on theoretical analysis of water resources carrying capacity: definition and scientific topics [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(12): 1399-1409. (in Chinese))
- [30] LIU Y, TIAN F, HU H, et al. Socio-hydrologic perspectives of the co-evolution of humans and water in the Tarim River basin, Western China: the Taiji-Tire model[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2014, 18(4): 1289-1303.
- [31] ELSHAFEI Y, SIVAPALAN M, TONTIS M, et al. A prototype framework for models of socio-hydrology: identification of key feedback loops and parameterisation approach [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2014, 18(6): 2141-2166.
- [32] 易彬, 陈璐, 路岚青, 等. 珠江上中游社会-水文多因素的系统动力学生活需水预测[J]. 中国农村水利水电, 2020(11): 35-41. (YI Bin, CHEN Lu, LU Lanqing, et al. Domestic water demand prediction of the upper and middle Pearl River Basin based on system dynamics method considering social-hydrological multi-factor [J]. China Rural Water and Hydropower, 2020(11): 35-41. (in Chinese))
- [33] 丁启慧, 贾美蓉, 丁相毅, 等. 青海湖流域主要河流的生态需水[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(3): 575-584. (DING Qihui, JIA Meirong, DING Xiangyi, et al. Ecological water demand of major rivers in Qinghai Lake basin[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(3): 575-584. (in Chinese))
- [34] 李荣峰, 沈冰, 张金凯. 基于相空间重构的水文自记忆预测模型[J]. 水利学报, 2006, 37(5): 583-587. (LI Rongfeng, SHEN Bing, ZHANG Jinkai. Self-memory

hydrologic prediction model based on phase-space reconstitution [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006,37(5):583-587. (in Chinese))

[35] 徐建新,郝志斌,蒋晓辉,等. 区域水资源系统动力学特征分析[J]. 水科学进展, 2008, 19(4): 519-524. (XU Jianxin,HAO Zhibin, JIANG Xiaohui, et al. Analysis of dynamic characteristics for the regional water resources system[J]. Advances in Water Science, 2008, 19(4): 519-524. (in Chinese))

[36] 何中政,迟英凡,王超,等. 考虑时间序列特征的水资源耦合系统有序度评价方法研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2023, 54(5): 51-60. (HE Zhongzheng, CHI Yingfan, WANG Chao, et al. Study on evaluation of order degree of water resources coupling system considering time series characteristics [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2023, 54(5): 51-60. (in Chinese))

[37] 杨舒媛,张晓昕,魏保义,等. 北京市滨水空间环境品质提升的潜力分析探索[J]. 水利学报, 2024, 55(8): 931-941. (YANG Shuyuan, ZHANG Xiaoxin, WEI Baoyi, et al. Analysis and exploration on the potentiality of waterfront environment quality improvement in Beijing [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2024, 55(8): 931-941. (in Chinese))

[38] 赵勇,何凡,何国华,等. 国家水网规划建设十点认识与思考[J]. 中国水利, 2023(14): 24-33. (ZHAO Yong, HE Fan, HE Guohua, et al. Ten insights and reflections on the planning and construction of the national water network [J]. China Water Resources, 2023(14): 24-33. (in Chinese))

[39] 刘奕汝,杨培涛. 区域森林生态-自然-经济-社会复合系统的耦合协调度:以长沙市为例[J]. 林业科学, 2023, 59(9): 139-146. (LIU Yiru, YANG Peitao. Coupling coordination degree of regional forest ecological-nature-economy-society complex system;a case study in Changsha [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2023, 59(9): 139-146. (in Chinese))

(收稿日期:2025-04-09 编辑:王芳)

+++++

(上接第 51 页)

[27] 刘宏伟,储少志,蔡钊,等. 极端暴雨洪水条件下厂区不同排水方案的防洪能力模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(3): 30-39. (LIU Hongwei, CHU Shaozhi, CAI Zhao, et al. Simulation study on flood control capacity of different drainage schemes in factory area under extreme rainstorm flood conditions[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025, 53(3): 30-39. (in Chinese))

[28] 张旭旻,陈颖冰,李永坤,等. 雨量数据缺失条件下基于实测流量的北京市“23·7”极端暴雨降水反演[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(6): 38-44. (ZHANG Xumin, CHEN Yingbing, LI Yongkun, et al. Precipitation retrieval of the “23·7” extreme rainstorm in Beijing based on measured discharge under the deficiency of rainfall data[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52(6): 38-44. (in Chinese))

[29] 李致家,张心愿,白云鹏,等. 海河“23·7”流域性特大洪水复盘模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(5): 13-19. (LI Zhijia, ZHANG Xinyuan, BAI Yunpeng, et al. Retrospective simulation on the Haihe “23·7” basin-wide extreme flood[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52(5): 13-19. (in Chinese))

[30] YANG Jie, HUANG Xin. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019[J]. Earth System Science Data, 2021, 13(8): 3907-3925.

[31] 刘子龙,张晓昕,叶婉露,等. 城市内涝模型的地表DEM处理方法研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2024, 60(6): 881-888. (LIU Zilong, ZHANG Xiaoxin, YE Wanlu, et al. Surface digital elevation model for urban local flooding simulation [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Sciences). 2024, 60(6): 881-888. (in Chinese))

[32] 黄晖,毕舒怡,字肖萌,等. 深圳城市绿地土壤入渗性能及影响因素研究[J]. 中国农学通报, 2020, 36(14): 74-79. (HUANG Hui, BI Shuyi, ZI Xiaomeng, et al. Urban green spaces in Shenzhen: soil infiltration capacity and its influencing factors [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2020, 36(14): 74-79. (in Chinese))

[33] 莫斌,陈晓燕,杨以翠,等. 不同土地利用类型土壤入渗性能及其影响因素研究[J]. 水土保持研究, 2016, 23(1): 13-17. (MO Bin, CHEN Xiaoyan, YANG Yicui, et al. Research on soil infiltration capacity and its influencing factors in different land uses [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23(1): 13-17. (in Chinese))

[34] 深圳市应急管理局. 深圳市防汛防旱防风指挥部办公室关于防御强降雨的公告 [EB/OL]. (2023-09-08) [2025-06-18]. https://yjgl.sz.gov.cn/zwgk/xxgkml/qt/tzgg/content/post_10824932.html. (收稿日期:2025-03-06 编辑:王芳)