

王晓庆, 李显娜, 何凯. 基于系统动力学的山西省水资源生态足迹核算与预测[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(8): 105-117. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.08.008

WANG Xiaoqing, LI Xianna, HE Kai. Ecological footprint accounting and prediction of water resources in Shanxi Province based on system dynamics[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(8): 105-117. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.08.008

基于系统动力学的山西省水资源生态 足迹核算与预测

王晓庆¹, 李显娜², 何凯³

(1. 山西水利职业技术学院, 山西 运城 044004; 2. 山西省水文水资源勘测局, 山西 太原 030001;
3. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 【目的】在自然和人为因素的双重驱动下, 山西省水资源可持续利用问题将愈发严重。因此, 科学预测山西省水资源生态足迹的发展趋势对该省水资源可持续利用具有重要的意义。【方法】利用水资源生态足迹法和系统动力学法建立山西省水资源可持续利用系统动力学模型, 根据参数灵敏度测试结果设计4种情景(包括现状延续型 DS1、经济发展型 DS2、节水防污型 DS3、综合发展型 DS4), 预测2023—2050年山西省水资源可持续利用水平与程度。【结果】结果表明: 在预测期内, 4种情景的人均水资源生态足迹与生态承载力均呈增长态势, 但前者平均值是后者平均值的4.850倍以上, 从而导致水资源亏损的出现。万元GDP水资源生态足迹均呈逐年递减态势, 表明水资源利用率得到有效的提升, 但水资源生态压力指数结果表明研究区水资源利用压力仍过大, 处于不可持续利用局面。Tapio脱钩模型预测显示水资源生态足迹与经济发展之间的关系大多数年份下处于协调可持续发展状态。【结论】经过综合比较, 情景DS4是最适宜研究区的未来情景, 各项发展指标有利于推动山西省社会经济与水资源可持续发展, 但在未来的用水过程中, 需优化用水结构、提高各行业用水效率、加强全社会节水意识, 才能促进研究区水资源可持续利用。

关键词: 水资源供需矛盾; 水资源生态足迹法; 系统动力学法; 情景分析; 山西省; 影响因素

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.08.008

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TV213.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)08-0105-13



Ecological footprint accounting and prediction of water resources in Shanxi Province based on system dynamics

WANG Xiaoqing¹, LI Xianna², HE Kai³

(1. Shanxi Conservancy Technical Institute, Yuncheng 044004, Shanxi, China; 2. Bureau of Hydrology and Water Resources Survey of Shanxi Province, Taiyuan 030001, Shanxi, China; 3. College of Water Conservancy and Hydropower, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu, China)

Abstract: [Objective] The issue of sustainable utilization of water resources in Shanxi Province is expected to become increasingly

收稿日期: 2024-09-27; 修回日期: 2024-11-27; 录用日期: 2024-11-28; 网络出版日期: 2024-12-24

基金项目: 国家自然科学基金(52039003)

作者简介: 王晓庆(1981—), 女, 硕士, 讲师, 主要从事水文与水资源研究。E-mail: 3641024015@qq.com

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

severe under the combined influence of natural and human factors. Therefore, accurate prediction of the development trend of the water resources ecological footprint in the province is essential for ensuring sustainable utilization of water resources. [Methods] A system dynamics model for the sustainable utilization of water resources in Shanxi Province was established using the water resources ecological footprint method and system dynamics method. Four scenarios were designed based on the result of parameter sensitivity analysis: continuation of the status quo (DS1), economic development (DS2), water conservation and pollution prevention (DS3), and comprehensive development (DS4). These scenarios were used to predict the level and degree of sustainable utilization of water resources in Shanxi Province from 2023 to 2050. [Results] The result showed that both the per capita water resources ecological footprint and the ecological carrying capacity in the four scenarios exhibited an increasing trend during the forecast period. However, the average value of the ecological footprint was more than 4.850 times that of the ecological carrying capacity, leading to a water resources deficit. The water resources ecological footprint per 10^4 RMB of GDP showed a decreasing trend over the years, indicating an effective improvement in water resources utilization efficiency. Despite this, the result of the ecological pressure index of water resources indicated that the pressure on water resources consumption remained high in the study area, and the current utilization was unsustainable. Predictions using the Tapio decoupling model indicated that the relationship between the water resources ecological footprint and economic development remained coordinated and sustainable in most years. [Conclusion] Through comprehensive comparison, scenario DS4 is identified as the most suitable future scenario for the study area. The development indicators associated with this scenario are conducive to promoting the sustainable development of both the socio-economic environment and water resources in Shanxi Province. However, for future water consumption, it is necessary to optimize the water consumption structure, improve water consumption efficiency across industries, and strengthen water conservation awareness across society to promote the sustainable utilization of water resources in the study area.

Keywords: conflict between water resources supply and demand; water resources ecological footprint method; system dynamics method; scenario analysis; Shanxi Province; influencing factors

0 引言

水资源是人类生存和繁衍的物质基础^[1],在资源安全、能源供应、粮食生产和环境维护等方面发挥着不可替代的作用^[2]。然而,近年来,颠覆传统认知的极端天气事件频繁发生,水旱灾害趋多趋频趋强趋广,极端性、反常性、复杂性、不确定性显著增强^[3-6],给人类造成严重、不可逆转的经济损失。此外,由于水资源管理不当,导致自然水体受到污染,水质恶化严重^[7]。从这个意义上讲,水资源可持续利用对促进区域经济、社会、生态环境协调发展、缓解区域水资源供需矛盾起到关键作用^[8]。

目前,常见评价区域水资源利用可持续状况的方法有 Bossel 指标体系法^[9]、可变模糊评价法^[10]、AHP-模糊综合评价法^[11]、遥感地理信息系统法^[12]、水资源生态足迹法^[13]。水资源生态足迹是在 WILLAM 教授于 1992 年提出的生态足迹 (Ecological Footprint, EF)^[14]的基础上进行扩展。水资源生态足迹是指某一区域具有生物生产力的水域面积能满足区域内居民对水资源的需求水平^[15],水资源生态承载力是指某一区域的水资源对区域社会整体发展的支撑与维持能力的大小^[16],将两者进行比较能够获取一段时期内某一区域水资源利用的盈亏情况^[17]。水资源生态足迹是一种直接将社会经济发展因素纳入会计范围内的评价方法,相较其他评价方法具有更为可操作的优势。因此,被

广泛应用于区域水资源可持续利用评价方面。JING 等^[18]以长江经济带为研究区,将水生态压力指数、水生态经济协调指数、水生态负载指数作为评价指标,进而提出水资源生态足迹综合模型,探讨了 2011—2018 年长江经济带水资源可持续利用的时空分布特征。LI 等^[19]将三维水资源生态足迹模型、基尼系数法和 Tapio 脱钩模型相耦合,构建了综合诊断框架,对新疆维吾尔自治区水资源生态足迹进行测算。王健泉等^[20]利用系统动力学法和水资源生态足迹法构建了河北省水资源生态足迹 SD 模型,在核算了 2006—2021 年水资源生态足迹的基础上,科学预测了河北省 2022—2050 年水资源生态足迹的发展趋势,研究成果为研究区水资源利用可持续发展提供数据支撑。

预测水资源生态足迹是制定区域水资源可持续发展战略的重要依据之一。目前,常见的预测方法有 BP-神经网络法^[21]、灰色预测法^[22]、ARIMA 法^[23]、GRNN 法^[24]、系统动力学法^[20]等,这些方法各有优劣,在不同研究区域尺度上得到广泛的应用。影响水资源生态足迹与生态承载力因素诸多,涉及人口增长、水文地质条件、工农业节水技术、社会经济发展等方面。相比之下,系统动力学能够定量考虑影响水资源利用过程中的各种水文、社会经济、科技等诸多因素,进而较准确、系统地预测区域水资源生态足迹。系统动力学 (System Dynamics, SD) 是福瑞斯特教

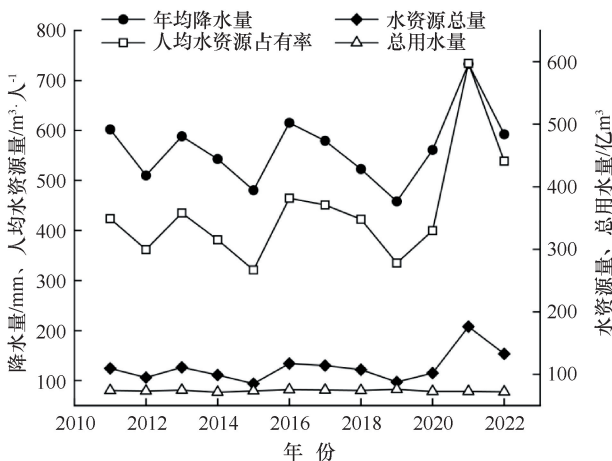
授为分析生产管理等企业问题于1956年提出的仿真方法^[25],是一种融定性定量于一体,研究复杂系统问题的方法,擅于解决高阶次、多变量、多重反馈的系统问题^[26],在诸多研究领域得到长足的发展,例如水资源承载力^[25]、新能源汽车电池回收^[27]、智能建造^[28]、装配式建筑^[29]、环境资源^[30]、粮食供应链安全^[31]等研究。

山西省矿产资源较丰富,具有重要的开采价值,是该省乃至全国能源开发的重点区域^[32],发展潜力无限。然而,该省的人均水资源占有量不足全国平均水平的1/5^[33],是中国最缺水的省份之一。目前,针对研究区缺水问题而展开的研究大多数是处于现状水资源生态足迹的动态分析^[32-33],进行定量、系统地预测山西省水资源可持续利用状况的研究较少。同时,在人为和自然因素的双重驱动下,该省的水资源可持续利用问题将愈发严重。因此,山西省水资源可持续利用水平亟需预测。基于此,本文利用水资源生态足迹法和系统动力学法,构建山西省水资源可持续利用系统动力学模型,科学预测该省水资源可持续利用水平。研究成果可给研究区水资源利用可持续发展规划提供数据支撑。

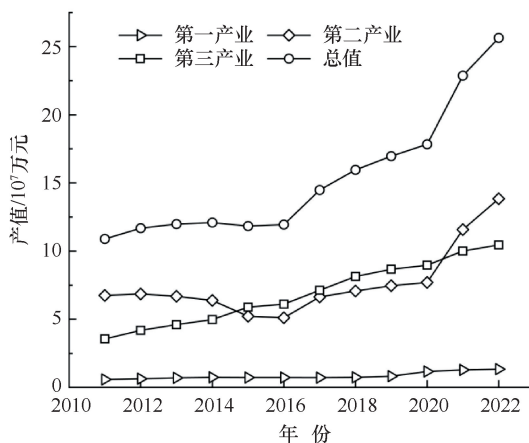
1 材料与研究方法

1.1 研究区概况

山西省(34°34'N—40°44'N, 110°14'E—114°33'E)的东、西、南和北面依次与河北省、陕西省、河南省和内蒙古自治区相邻,总面积为15.670万km²。从图1可知,在2011—2022年期间,年均降水量、水资源总量、人均水资源占有量呈不规则动态变化,平均值依次为565.560 mm、126.880亿m³、361.340 m³/人;



(a) 年均降水量、水资源总量、人均水资源占有率及总用水量



(b) 第一、第二、第三产业及生产总值

图1 2011—2022年山西省降水量、用水量、水资源量和国内生产总值

Fig. 1 Precipitation, water consumption, water resources, and gross domestic product in Shanxi Province (2011—2022)

用水量从2011年的74.180亿m³降至2022年的72.070亿m³,降幅为2.840%。研究区人均水资源占有量均值仅为361.340 m³,低于国际公认的人均500 m³的“极度缺水标准”,处于缺水状态。国内生产总值的动态变化分为涨降、缓涨、猛涨三个阶段,平均值为1.535×10⁸万元;第一、二、三产业平均值依次为0.849×10⁷万元、7.608×10⁷万元、6.892×10⁷万元,与平均国内生产总值的比重依次为5.53%、49.56%、44.91%。

1.2 水资源生态足迹、承载力模型

水资源生态足迹与承载力模型^[34-36]为

$$WFE = r_w \times \frac{W_i}{P_w} = N \times e_f \quad (1)$$

$$WEC = \alpha \times r_w \times \delta \times \frac{Q + R}{P_w} = N \times c_f \quad (2)$$

$$\delta = P/P_w \quad (3)$$

$$P = Q/A \quad (4)$$

式中, WFE 、 WEC 依次为研究区水资源生态足迹、生态承载力(hm²); e_f 、 c_f 依次为人均水资源生态足迹、生态承载力(hm²/人); r_w 为水资源全球均衡因子,取值5.19^[34-36]; W_i 为用水量, $i = 1 \sim 4$,依次为农业、工业、生活、生态环境用水量(m³); P_w 为全球水资源平均生产能力(m³/hm²),取值3140^[20]; α 为扣除用于生态和生物多样性补偿面积后的可用水资源比例,取值0.4^[36]; N 为总人数(人); δ 为区域水资源产量因子; Q 为区域水资源量(m³); R 为非常规水资源量(m³); A 为研究区面积(hm²),取值1.567×10⁷; P 为研究区水资源平均生产能力(m³/hm²)。

1.3 水资源可持续利用评价指标

本文选取水资源生态盈亏、水资源生态压力指

数、万元 GDP 水资源生态足迹作为水资源可持续利用评价指标。计算公式^[20,36]为

$$GAP = WEC - WFE \quad (5)$$

$$PFW = \frac{WFE}{WEC} \quad (6)$$

$$WEFG = \frac{WFE}{GDP} \quad (7)$$

式中, GAP 为水资源生态盈亏 (hm²); GAP > 0 表示盈余, 反之表示亏损; PFW 为水资源生态压力指数, PFW > 1 表示水资源利用不安全, 反之表示水资源利用安全; WEFG 为万元 GDP 水资源生态足迹 (hm²/万元), 计算值越小表示水资源利用率越高。

1.4 Tapio 脱钩模型

脱钩理论是一种用于评估经济发展与水资源利用压力之间的分析工具, 主要用于经济活动与环境指标之间的脱钩状态^[37]。脱钩本质是指随着经济的增长, 水资源利用效率提高而水资源利用总量增速放缓, 直至最终实现零增长甚至负增长^[38]。根据水资源生态足迹消耗与经济增长之间存在的脱钩状态^[39], 可大致分为三大类(脱钩、负脱钩、连结状态), 若将三大类进行细分, 可分为八种状态(脱钩状态可细分为强脱钩、弱脱钩、衰退脱钩状态; 负脱钩状态可细分为强负脱钩、弱负脱钩、扩张负脱钩状态; 连结状态可细分为扩张连结、衰退连结状态), 具体细分标准如表 1 所列。Tapio 脱钩模型为

$$f = \frac{\Delta WFE}{\Delta G} = \frac{(WFE_t - WFE_{t-1})/WFE_{t-1}}{(G_t - G_{t-1})/G_{t-1}} \quad (8)$$

式中, f 为脱钩指数; ΔWFE 为水资源生态足迹变化量; ΔG 为经济变化量; WFE_t、WFE_{t-1} 分别为第 t 年和第 t-1 年水资源生态足迹值 (hm²); G_t、G_{t-1} 分别为第 t 年和第 t-1 年经济值 (万元)。

1.5 水资源可持续利用系统动力学模型

影响山西省水资源可持续利用因素诸多, 涉及社会经济发展、工农业节水技术、人口增长等方面, 是

一个复杂的系统问题。本文将模型划分为 6 个子系统, 包括人均农业、工业、生活、生态环境用水生态足迹和人均水资源生态足迹以及人均水资源生态承载力子系统, 子系统间相互联系、相互制约以及子系统内部变量相互反馈与调节, 共同维护系统的动态平衡。在厘清变量间的反馈关系后, 利用 VENSIM Professional 软件将变量间的相互作用关系以方程(组)形式进行定量表达, 建立山西省水资源可持续利用系统动力学流程图(见图 2)。

模型模拟时间为 2011—2050 年, 基准年为 2011 年, 时间步长为 1 a。其中, 2011—2022 年为模型的校准年, 2023—2050 年为模型的预测年。

有效性检验是判断模型是否具备客观模拟研究区系统行为的能力。本文收集了山西省 2011—2022 年的农业用水量、总用水量、可水资源量和人口数据, 并基于公式(1)—(4)计算了人均农业用水生态足迹、人均水资源生态足迹、人均水资源生态承载力, 利用这 3 个待检验值进行有效性检验, 结果如表 2 所列。从表中可知, 相对误差均在 ±5.0% 以内, 两者的吻合度较高, 初步说明模型可用于后续的研究与预测。

灵敏度是考量模型可靠水平的指标, 是指改变模型参数值时, 观察参数值的变化对模型中目标变量产生的影响程度。灵敏度的详细计算公式、步骤和灵敏度分类标准见文献[40]。本文选取模型中 23 个参数和 6 个目标变量(人均农业、工业、生活、生态环境用水生态足迹和人均水资源生态足迹以及生态承载力)对模型进行灵敏度测试。具体操作是通过设置 23 个参数在 2011—2022 年内以 5.0% 的速度逐年增长, 再将参数值输入模型后运行, 算出每个参数对目标变量的平均灵敏度。从表 3 可知, 大多数参数表现出不灵敏, 出现灵敏参数的频率为 13.04%, 说明模型具备较好的可靠性, 结合有效性检验结果, 进一步说明模型可用于预测。

表 1 脱钩状态的划分

Table 1 Classification of decoupling states

脱钩状态		ΔWFE	ΔG	f	表征意义
脱 钩	强脱钩	负	正	(-∞, 0)	理想状态
	弱脱钩	正	正	[0, 0.8)	较理想状态
	衰退脱钩	负	负	(1.2, +∞)	可允许状态
负脱钩	强负脱钩	正	负	(-∞, 0)	最不理想状态
	弱负脱钩	负	负	[0, 0.8)	不可取状态
	扩张负脱钩	正	正	(1.2, +∞)	不可取状态
连 结	扩张连结	正	正	[0.8, 1.2]	不可取状态
	衰退连结	负	负	[0.8, 1.2]	可允许状态

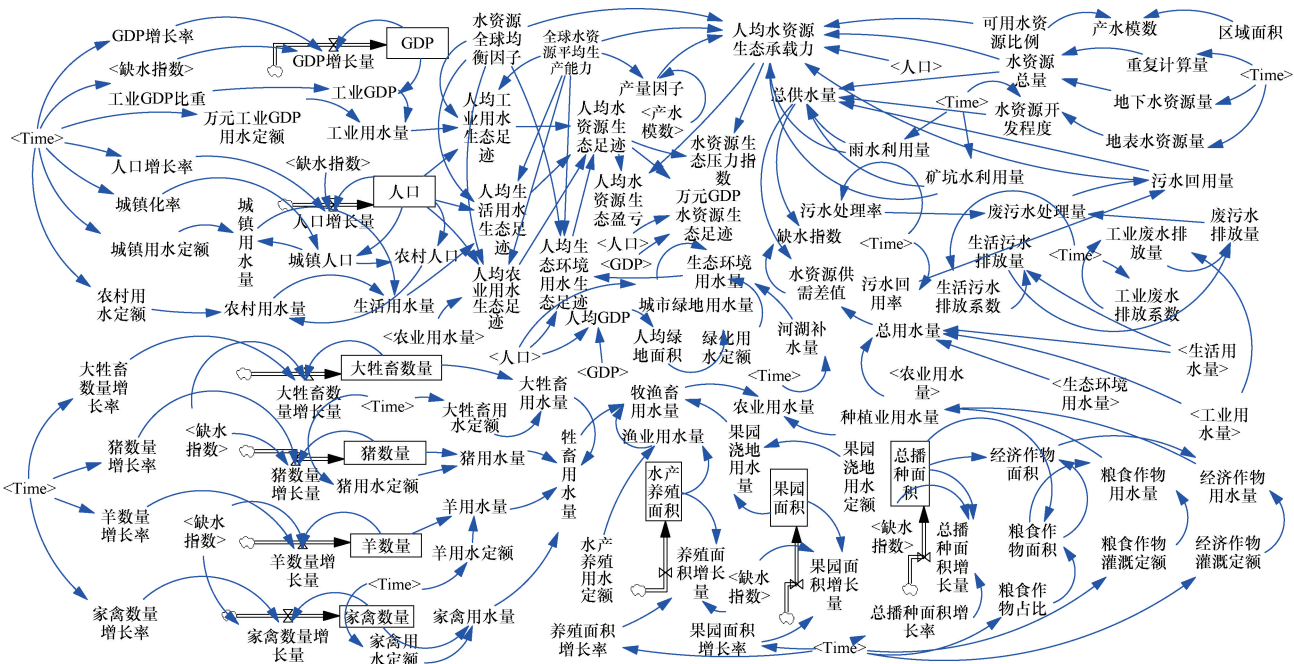


图2 山西省水资源可持续利用系统动力学流程图

Fig. 2 System dynamics flowchart of sustainable utilization of water resources in Shanxi Province

表2 模型有效性检验结果

Table 2 Model validity test results

年份	人均农业用水生态足迹			人均水资源生态足迹			人均水资源生态承载力		
	历史值/ hm ² ·人 ⁻¹	模拟值/ hm ² ·人 ⁻¹	相对 误差/%	历史值/ hm ² ·人 ⁻¹	模拟值/ hm ² ·人 ⁻¹	相对 误差/%	历史值/ hm ² ·人 ⁻¹	模拟值/ hm ² ·人 ⁻¹	相对 误差/%
2011	0.208	0.207	-0.481	0.344	0.342	-0.581	0.061	0.060	-1.639
2012	0.199	0.199	0.000	0.342	0.343	0.292	0.047	0.047	0.000
2013	0.203	0.209	2.956	0.350	0.358	2.286	0.066	0.067	1.515
2014	0.195	0.202	3.590	0.334	0.344	2.994	0.051	0.050	-1.961
2015	0.212	0.208	-1.887	0.346	0.345	-0.289	0.036	0.036	0.000
2016	0.220	0.225	2.273	0.355	0.362	1.972	0.074	0.072	-2.703
2017	0.214	0.217	1.402	0.353	0.353	0.000	0.069	0.070	1.449
2018	0.204	0.199	-2.451	0.351	0.346	-1.425	0.061	0.063	3.279
2019	0.207	0.204	-1.449	0.359	0.357	-0.557	0.040	0.039	-2.500
2020	0.194	0.195	0.515	0.345	0.347	0.580	0.056	0.054	-3.571
2021	0.194	0.200	3.093	0.345	0.351	1.739	0.177	0.173	-2.260
2022	0.192	0.199	3.646	0.342	0.351	2.632	0.099	0.099	0.000

1.6 情景设计

寻找适合山西省未来的发展情景是研究区水资源可持续利用发展的关键环节。因此,依据模型参数灵敏度测试结果,综合考虑设计了4种情景,现状延续型DS1、经济发展型DS2、节水防污型DS3、综合发展型DS4。4种情景描述为:情景DS1保持现状的发展趋势、系统结构和模型参数;情景DS2注重经济发展,GDP增速保持较高水平,人口增速、城镇化率、种植面积增速、水产养殖面积增速均有所提高;情景DS3强调节约用水,采取节水措施、提高污水处理效率;情景DS4既适度强调经济发展,也

注重水资源的保护。四种情景的参数取值如表4所列。决策变量参数取值是根据山西省实际人口增长情况、经济发展水平、水资源利用等因素,综合考虑各情景强调的侧重点不同而确定的,符合研究区的实际情况。

1.7 数据来源

本研究所用的数据分为现状阶段和预测阶段的数据。现状阶段中各行业用水量、水资源量、水资源开发系数、供水量等数据来自《山西省水资源公报(2011—2022年)》,社会经济、人口数量等数据来自《山西省统计年鉴(2012—2023年)》;预测阶段中所

表 3 灵敏度测试结果

Table 3 Sensitivity test results

参 数	平均灵敏度	参数灵敏度	参 数	平均灵敏度	参数灵敏度
人口增长率	0.087	中 等	大牲畜用水定额	0.004	不灵敏
城镇化率	0.127	中 等	猪数量增长率	0.017	不灵敏
城镇用水定额	0.173	中 等	猪用水定额	0.009	不灵敏
农村用水定额	0.075	中 等	羊数量增长率	0.006	不灵敏
GDP 增长率	0.738	灵 敏	羊用水定额	0.003	不灵敏
万元工业 GDP 用水定额	0.220	灵 敏	家禽数量增长率	0.013	不灵敏
水产养殖面积增长率	0.057	中 等	家禽用水定额	0.001	不灵敏
种植面积增长率	0.148	中 等	工业废污水排放系数	0.003	不灵敏
果园面积增长率	0.099	中 等	生活污水排放系数	0.002	不灵敏
粮食作物灌溉定额	0.244	灵 敏	污水处理率	0.005	不灵敏
经济作物灌溉定额	0.026	不灵敏	污水回用率	0.005	不灵敏
大牲畜数量增长率	0.001	不灵敏			

表 4 各情景下决策变量取值

Table 4 Values of decision variables in different scenarios

决策变量	单 位	情景 DS1	情景 DS2	情景 DS3	情景 DS4
人口增长率	‰	(2030, 0.25)	(2030, 0.50)	(2030, 0.25)	(2030, 0.30)
		(2040, 0.25)	(2040, 1.00)	(2040, 0.25)	(2040, 0.50)
		(2050, 0.25)	(2050, 1.50)	(2050, 0.25)	(2050, 0.70)
城镇化率	%	(2030, 64)	(2030, 66)	(2030, 64)	(2030, 66)
		(2040, 64)	(2040, 70)	(2040, 64)	(2040, 68)
		(2050, 64)	(2050, 74)	(2050, 64)	(2050, 70)
城镇用水定额	m ³ · 人 ⁻¹	(2030, 48)	(2030, 48)	(2030, 48)	(2030, 48)
		(2040, 48)	(2040, 48)	(2040, 46)	(2040, 47)
		(2050, 48)	(2050, 48)	(2050, 44)	(2050, 46)
农村用水定额	m ³ · 人 ⁻¹	(2030, 16.4)	(2030, 16.4)	(2030, 16.4)	(2030, 16.4)
		(2040, 16.4)	(2040, 16.4)	(2040, 15.0)	(2040, 15.4)
		(2050, 16.4)	(2050, 16.4)	(2050, 13.6)	(2050, 14.4)
GDP 增长率	%	(2030, 2.5)	(2030, 3.0)	(2030, 2.5)	(2030, 2.6)
		(2040, 2.5)	(2040, 4.0)	(2040, 2.5)	(2040, 2.8)
		(2050, 2.5)	(2050, 5.0)	(2050, 2.5)	(2050, 3.0)
万元工业 GDP 用水定额	m ³	(2030, 9.06)	(2030, 9.06)	(2030, 9.00)	(2030, 9.03)
		(2040, 9.06)	(2040, 9.06)	(2040, 8.50)	(2040, 8.73)
		(2050, 9.06)	(2050, 9.06)	(2050, 8.00)	(2050, 8.43)
水产养殖面积增长率	%	(2030, 1.67)	(2030, 1.80)	(2030, 1.67)	(2030, 1.67)
		(2040, 1.67)	(2040, 2.00)	(2040, 1.67)	(2040, 1.70)
		(2050, 1.67)	(2050, 2.20)	(2050, 1.67)	(2050, 1.73)
种植面积增长率	%	(2030, 0.66)	(2030, 1.00)	(2030, 0.66)	(2030, 0.68)
		(2040, 0.66)	(2040, 1.50)	(2040, 0.66)	(2040, 0.88)
		(2050, 0.66)	(2050, 2.00)	(2050, 0.66)	(2050, 1.08)
果园面积增长率	%	(2030, 2.27)	(2030, 2.80)	(2030, 2.27)	(2030, 2.30)
		(2040, 2.27)	(2040, 3.20)	(2040, 2.27)	(2040, 2.40)
		(2050, 2.27)	(2050, 3.60)	(2050, 2.27)	(2050, 2.50)
粮食作物灌溉定额	m ³ · hm ⁻²	(2030, 1032)	(2030, 1032)	(2030, 1020)	(2030, 1025)
		(2040, 1032)	(2040, 1032)	(2040, 1010)	(2040, 1020)
		(2050, 1032)	(2050, 1032)	(2050, 1000)	(2050, 1015)
污水处理率	%	(2030, 80)	(2030, 80)	(2030, 85)	(2030, 82)
		(2040, 80)	(2040, 80)	(2040, 90)	(2040, 85)
		(2050, 80)	(2050, 80)	(2050, 95)	(2050, 88)
污水回用率	%	(2030, 35)	(2030, 35)	(2030, 36)	(2030, 35)
		(2040, 35)	(2040, 35)	(2040, 40)	(2040, 37)
		(2050, 35)	(2050, 35)	(2050, 44)	(2050, 39)

注: (x, y)中的 x 代表年份, y 代表决策变量值

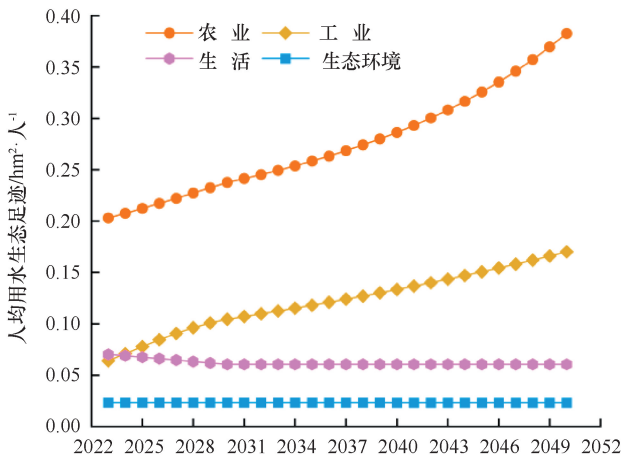
用数据来自模型阶段校准好的参数、情景设置中各决策变量值。

2 结果与分析

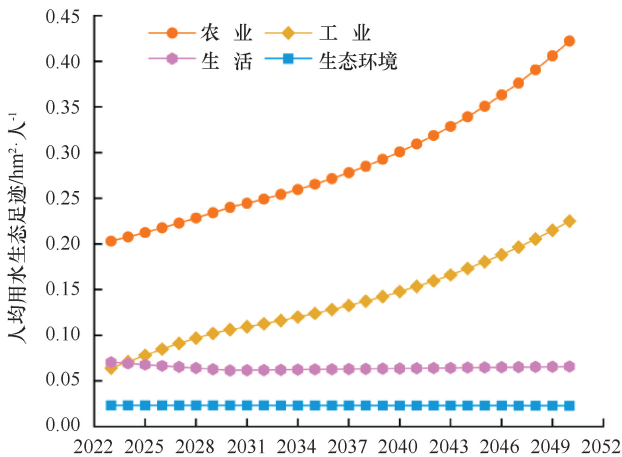
2.1 水资源生态足迹组成及比重

从图中3与图4可知, 4种情景下人均农业用水生态足迹均呈稳定增长趋势, 依次以平均年增长率2.376%、2.750%、2.325%、2.425%持续增长, 增至2050年的0.383 hm²/人、0.422 hm²/人、0.377 hm²/人、0.387 hm²/人, 与人均水资源生态足迹的比重依次介于55.41%~60.11%、55.34%~57.38%、55.32%~62.31%、55.24%~60.71%, 表明农业用水消耗了供水量的绝大部分, 农业节水是未来的工作重点。对于4种情景下人均工业用水生态足迹而言, 预测前期(2023—2030年)的增速明显快于预测后期

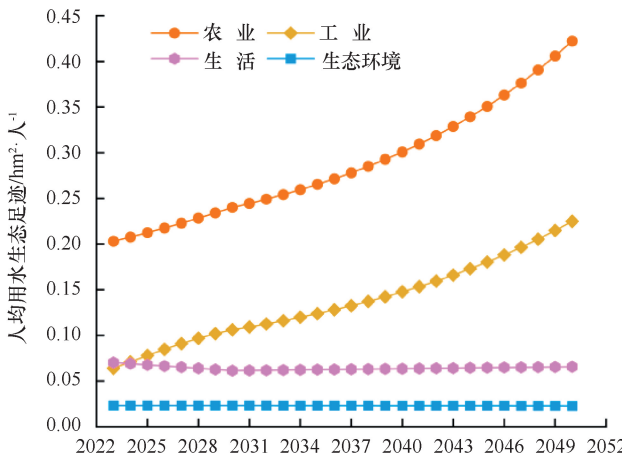
(2031—2050年), 整体呈持续增长态势, 依次从2023年的0.064 hm²/人、0.064 hm²/人、0.064 hm²/人、0.064 hm²/人增至2050年的0.170 hm²/人、0.225 hm²/人、0.150 hm²/人、0.167 hm²/人, 依次增长了1.656、2.516、1.344、1.609倍, 情景DS2的工业用水量多于其余三种情景, 是因为该情景较注重社会经济发展。同时, 4种情景下人均工业用水生态足迹与人均水资源生态足迹的比重均逐年增加, 依次从2023年的17.76%、17.76%、17.75%、17.74%增至2050年的26.72%、30.57%、24.83%、26.21%。相比前两者, 4种情景下人均生活用水生态足迹变化幅度较缓和, 依次以平均年下降率0.550%、0.251%、0.929%、0.569%下降, 降至2050年的0.061 hm²/人、0.066 hm²/人、0.055 hm²/人、0.060 hm²/人, 其平均值与人均水资源生态足迹均值的比重依次为



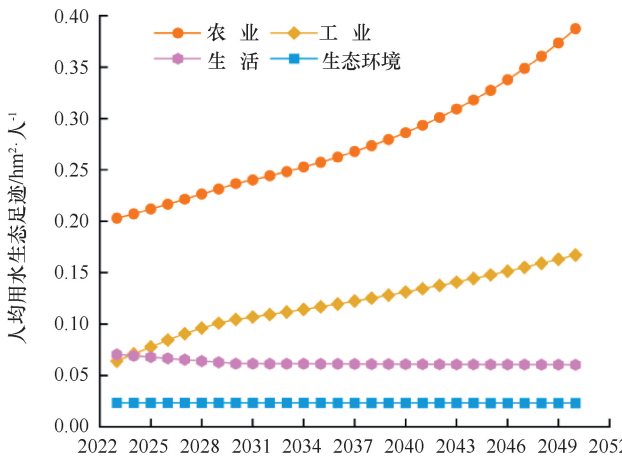
(a) 情景DS1



(b) 情景DS2



(c) 情景DS3



(d) 情景DS4

图3 2023—2050年山西省人均农业、工业、生活、生态环境用水生态足迹

Fig. 3 Per capita ecological footprint of agricultural, industrial, domestic and ecological water consumption in Shanxi Province (2023—2050)

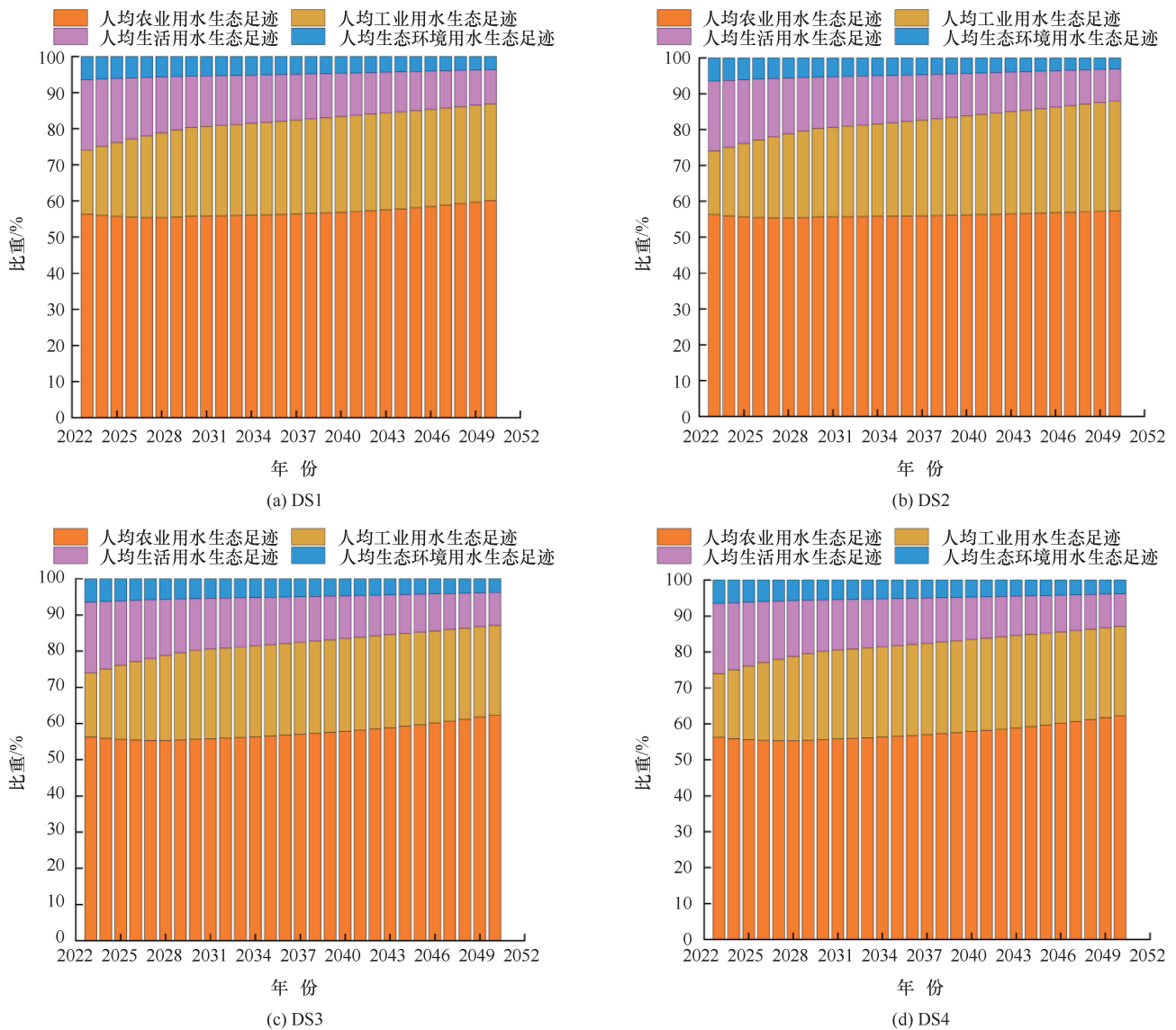


图4 2023—2050年山西省人均农业、工业、生活、生态环境用水生态足迹比重

Fig. 4 Proportion of per capita ecological footprint of agricultural, industrial, domestic, and ecological environment water consumption in Shanxi Province (2023—2050)

9.50%、8.93%、9.02%、9.45%。4种情景下人均生态环境用水生态足迹依次以平均年下降速率0.016%、0.080%、0.016%、0.032%下降,到2050年,其值依次为0.023 hm²/人、0.023 hm²/人、0.023 hm²/人、0.023 hm²/人。

2.2 水资源可持续利用评价

从图5可知,4种情景下人均水资源生态足迹呈增长态势。其中,情景DS2的增速最快,从2023年的0.361 hm²/人增至2050年0.736 hm²/人,增幅高达103.88%,这是因为情景DS2更加注重未来的社会经济发展,从而导致人均水资源生态足迹在预测期内不断攀升;情景DS1、DS4次之;情景DS3的增速最慢,以平均年增长率1.937%增至2050年的0.605 hm²/人。

4种情景下人均水资源生态承载力均有所提高,情景DS3的人均水资源生态承载力最大,同时也是增速最快的情景,从2022年的0.096 hm²/人升至2050年的0.099 hm²/人,提高了0.003 hm²/人,该情景注重水资源的保护,使得人均水资源生态承载力呈稳中有升的态势;情景DS4、DS1依次降低;情景DS2的人均水资源生态承载力最弱,均值为0.096 hm²/人,这归因于此情景过度强调社会经济发展,对现有水资源保护力度不足,从而导致水资源生态承载力恢复较慢。由于情景DS2的水资源量无法支撑发展社会经济的需水量,导致水资源以平均年亏损量0.014 hm²/人持续亏损,也是4种情景中亏损最严重的情景;情景DS3的亏损程度相较其余3种情景

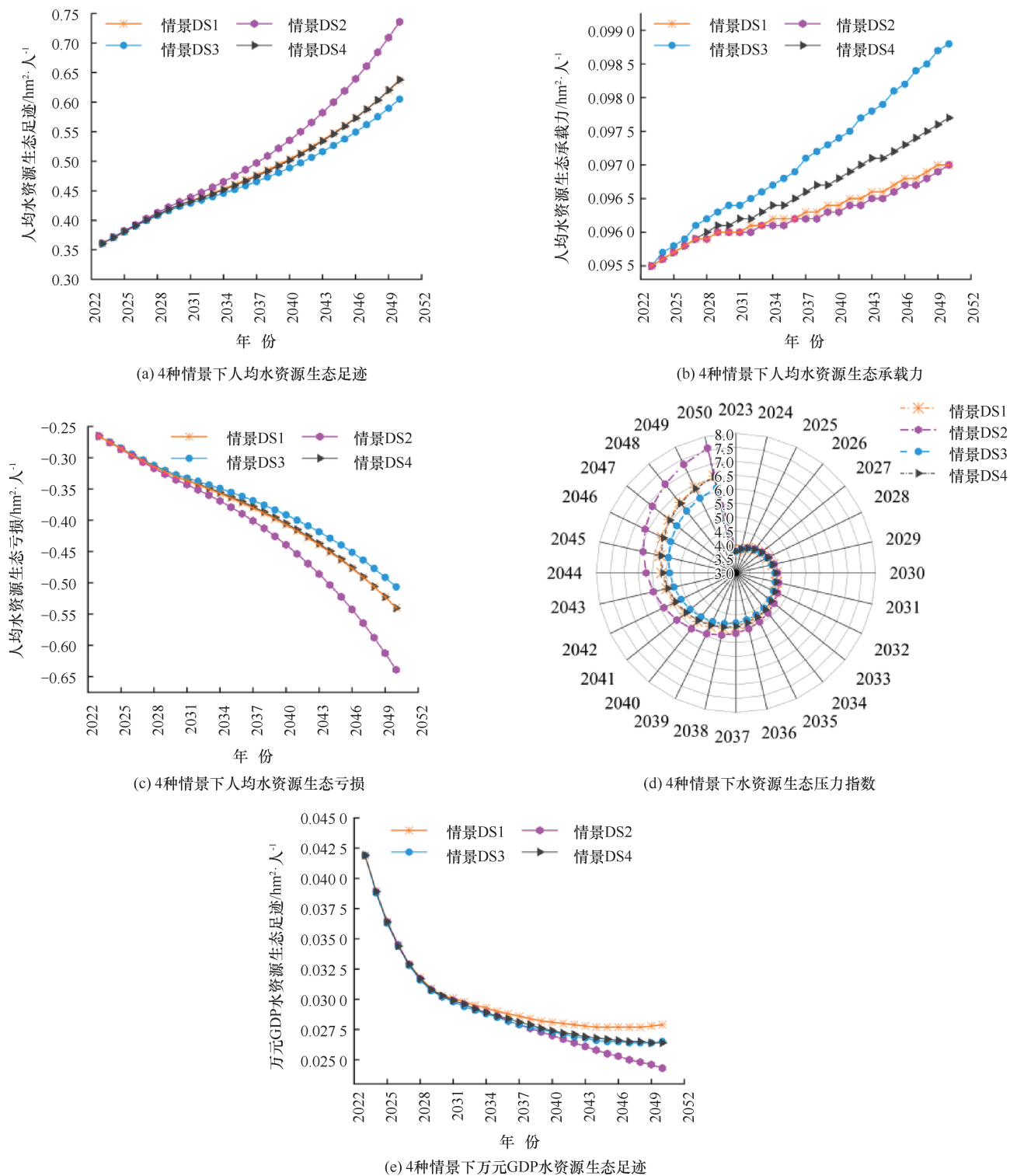


图5 预测期内山西省水资源可持续利用评价指标

Fig. 5 Evaluation indicators for water resources sustainable utilization in Shanxi Province during prediction period

较缓和, 到2050年, 亏损量为0.506 hm²/人。

从模拟结果来看, 山西省在未来一段时期内水资源利用仍处于不安全局面。其中, 情景DS2的水资源利用最不安全; 情景DS1和DS4次之; 情景DS3水资源利用安全性能最优; 4种情景下平均水资源生

态压力指数依次为5.009、5.320、4.840、4.984。4种情景下万元GDP水资源生态足迹均呈递减趋势, 依次以平均年下降率1.473%、1.981%、1.662%、1.677%下降至2025年的0.028 hm²/万元、0.024 hm²/万元、0.027 hm²/万元、0.026 hm²/万元。其

中, 情景 DS2 的水资源利用率最高; 情景 DS3、DS4 次之; 情景 DS1 最低。情景 DS2 的水资源处于高亏损状态。因此, SD 模型通过不断优化系统内部变量的协调度进而提高水资源利用率, 从而遏制水资源生态亏损。从这一角度看, 模型的系统行为符合研究区的实际情况, 进一步说明模型具有较强的适用性。

2.3 水资源生态足迹与经济之间脱钩状态评价

弱脱钩表示 GDP 和水资源生态足迹均呈增长趋势, 但经济增幅大于水资源生态足迹增幅; 扩张连结表示 GDP 和水资源生态足迹均增长, 但经济增速小于水资源生态足迹增速。从表 5 可知, 4 种情景下脱钩状态均为弱脱钩和扩张连结。情景 DS1、DS2、DS3 和 DS4 下脱钩状态表现为弱脱钩的年份出现在 2023—2040 年、2023—2048 年与 2049—2050 年、2023—2043 年、2023—2043 年, 其余年份下脱钩状态表现为扩张连结状态。然而, 研究期内脱钩状态以弱脱钩为主, 说明大多数年份下经济发展与水资源生态足迹的关系处于协调可持续发展状态。4 种情景出现弱脱钩状态的频数依次为 17 次、26 次、20 次、20 次, 出现扩张连结状态的频数依次为 10 次、1 次、7 次、7 次, 4 种情景下水资源生态足迹消耗与经济发展之间的协调程度从优到劣的顺序为 DS2>DS3 = DS4>DS1。

总体而言, 4 种情景下水资源生态足迹与经济发展之间的关系整体上以弱脱钩为主, 但在预测末期, 少数年份表现出扩张连结状态, 表明水资源生态足迹

的消耗速率快于经济发展速率, 显然不利于推动山西省水资源可持续发展。因此, 需加大各种节水措施和技术的应用, 提高各部门的用水效率, 多管齐下, 致使在实现经济增长的同时, 极大限度地降低用水量, 实现水资源利用可持续发展。

2.4 发展情景对比

表 6 是 4 种情景对比结果。从平均角度下分析, 在预测期内, 情景 DS4 的平均 GDP 增长率仅次于情景 DS2(4.00%), 大于情景 DS1、DS3; 情景 DS4 的人均水资源生态足迹、生态亏损和水资源生态压力指数均值都位于倒数第二的水平, 仅高出情景 DS3(最小值) 0.011 hm²/人、0.012 hm²/人和 0.144; 情景 DS4 的人均水资源生态承载力均值同情景 DS3 并列第一, 均为 0.097 hm²/人, 大于情景 DS1 和 DS2; 情景 DS1、DS3 和 DS4 下万元 GDP 水资源生态足迹均值均为 0.030 hm²/万元, 大于情景 DS2 (0.029 hm²/万元), 表明情景 DS2 的水资源利用率高于其余 3 种情景; 出现弱脱钩的频数最多是情景 DS2, 情景 DS3 和 DS4 并列第二, 情景 DS1 最少。

对于 4 种情景而言, 情景 DS2 能够在未来一段时期内持续拉动山西省经济发展, 但水资源亏损速度较快, 显然不利于山西省水资源利用与经济发展的长期协调发展; 情景 DS3 能够以相对较快的速度恢复研究区水资源生态承载力, 但 GDP 增速相对较慢, 社会经济发展水平较落后, 显然在强调经济发展的背景下很难被接受; 情景 DS4 相比于 DS1, 情景 DS4 的平均 GDP 增长率、人均水资源生态承载力均值、

表 5 2022—2050 年山西省水资源生态足迹与经济之间脱钩状态评价结果

Table 5 Evaluation results of decoupling states between water resources ecological footprint and economy in Shanxi Province (2022—2050)

年 份	总体脱钩状态				年 份	总体脱钩状态			
	情景 DS1	情景 DS2	情景 DS3	情景 DS4		情景 DS1	情景 DS2	情景 DS3	情景 DS4
	脱钩结果	脱钩结果	脱钩结果	脱钩结果		脱钩结果	脱钩结果	脱钩结果	脱钩结果
2023—2024	RT	RT	RT	RT	2037—2038	RT	RT	RT	RT
2024—2025	RT	RT	RT	RT	2038—2039	RT	RT	RT	RT
2025—2026	RT	RT	RT	RT	2039—2040	RT	RT	RT	RT
2026—2027	RT	RT	RT	RT	2040—2041	KZLJ	RT	RT	RT
2027—2028	RT	RT	RT	RT	2041—2042	KZLJ	RT	RT	RT
2028—2029	RT	RT	RT	RT	2042—2043	KZLJ	RT	RT	RT
2029—2030	RT	RT	RT	RT	2043—2044	KZLJ	RT	KZLJ	KZLJ
2030—2031	RT	RT	RT	RT	2044—2045	KZLJ	RT	KZLJ	KZLJ
2031—2032	RT	RT	RT	RT	2045—2046	KZLJ	RT	KZLJ	KZLJ
2032—2033	RT	RT	RT	RT	2046—2047	KZLJ	RT	KZLJ	KZLJ
2033—2034	RT	RT	RT	RT	2047—2048	KZLJ	RT	KZLJ	KZLJ
2034—2035	RT	RT	RT	RT	2048—2049	KZLJ	KZLJ	KZLJ	KZLJ
2035—2036	RT	RT	RT	RT	2049—2050	KZLJ	RT	KZLJ	KZLJ
2036—2037	RT	RT	RT	RT					

注: RT 代表弱脱钩状态; KZLJ 代表扩张连结状态。

表 6 4 种情景对比结果

Table 6 Comparison of results in four scenarios

对比指标	情景 DS1	情景 DS2	情景 DS3	情景 DS4
平均 GDP 增长率/%	2.50(③)	4.00(①)	2.50(③)	2.80(②)
人均水资源生态足迹均值/hm ² ·人 ⁻¹	0.483(②)	0.513(①)	0.471(④)	0.482(③)
人均水资源生态承载力均值/hm ² ·人 ⁻¹	0.096(③)	0.096(④)	0.097(①)	0.097(②)
人均水资源生态亏损均值/hm ² ·人 ⁻¹	0.387(②)	0.416(①)	0.374(④)	0.386(③)
水资源生态压力指数均值	5.009(②)	5.320(①)	4.840(④)	4.984(③)
万元 GDP 水资源生态足迹均值/hm ² ·万元 ⁻¹	0.030(①)	0.029(④)	0.030(③)	0.030(②)
出现弱脱钩的频数/次	17(③)	26(①)	20(②)	20(②)

注: ①代表最大; ②代表第二; 以此类推。

出现弱脱钩的频数均高于情景 DS1; 人均水资源生态足迹、生态亏损、生态压力指数均值均低于情景 DS1; 这两种情景下万元 GDP 水资源生态足迹均值相等, 显然, 情景 DS4 的大多数指标优于情景 DS1。因此, 情景 DS4 较其余 3 种情景而言, 是较适宜山西省未来的发展模式。

3 结论

(1) 基于水资源生态足迹理论, 利用系统动力学建立山西省水资源可持续利用系统动力学模型。从有效性检验和参数灵敏度测试结果看来, 该 SD 模型能够较准确地复现研究区水资源利用的演变过程, 适用于山西省水资源可持续利用水平的预测。

(2) 从模拟结果分析, 4 种情景下水资源均处于高亏损状态, 且呈逐年加重的趋势。此外, 水资源生态压力指数均呈稳定上升趋势, 均值依次为 5.009、5.320、4.840、4.984, 说明未来水资源利用压力仍过大。然而, 4 种情景下万元 GDP 水资源生态足迹均呈逐年下降态势, 说明水资源利用效率逐渐提升。同时, 水资源生态足迹与经济发展之间的关系以弱脱钩为主, 两者的关系在大多数年份下处于较理想状态。

(3) 在预测期内, 4 种情景下人均农业用水生态足迹均值与人均水资源生态足迹均值的比重依次为 56.87%、56.14%、57.60%、56.98%, 农业用水消耗了水资源的绝大部分。因此, 提高农业用水效率是研究区未来的重点工作, 通过诸如改革农业水价、优化种植结构, 改变灌溉方式等措施, 实现农业用水统筹控制和优化农业用水效率。

(4) 通过情景对比, 发现情景 DS4 是最适宜山西省未来发展的情景, 对山西省社会经济发展和水资源保护均有一定的保障。山西省作为严重缺水省份之一, 水资源供需矛盾尖锐, 改变这一情况并非一朝一夕。因此, 要求在参考情景 DS4 的发展指标下, 需

要全社会、各部门的通力合作, 不断提高用水效率, 推广节水技术, 发展水资源多元化利用, 才能实现研究区水资源利用可持续发展。

参考文献 (References):

- [1] 高雅玉, 宋玉, 田晋华, 等. 西北干旱区乡镇水资源承载力评价体系构建[J]. 人民长江, 2023, 54(8): 139-145.
GAO Y Y, SONG Y, TIAN J H, et al. Evaluation system for water resources carrying capacity of villages and towns in arid region of Northwest China[J]. Yangtze River, 2023, 54(8): 139-145.
- [2] GLEESON T, WADA Y, BIERKENS M F P, et al. Water balance of global aquifers revealed by groundwater footprint[J]. Nature, 2012, 488(7410): 197-200.
- [3] 李国英. 为以中国式现代化全面推进强国建设、民族复兴伟业提供有力的水安全保障: 在 2024 年全国水利工作会议上的讲话[J]. 水利发展研究, 2024, 24(1): 1-10.
LI G Y. Improved water security for China's efforts to build itself into a stronger country and rejuvenate the Chinese nation on all fronts by pursuing Chinese modernization: Speech at the 2024 National Water Conservancy Work Conference [J]. Water Resources Development Research, 2024, 24(1): 1-10.
- [4] AGHAKOUCHAK A, CHIANG F, HUNING L S, et al. Climate extremes and compound hazards in a warming world [J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2020, 48: 519-548.
- [5] ALLAN C, XIA J, PAHL-WOSTL C. Climate change and water security: Challenges for adaptive water management [J]. Current Opinion in Environmental Sustainability, 2013, 5(6): 625-632.
- [6] 李国英. 深入贯彻落实党的二十大精神 扎实推动新阶段水利高质量发展: 在 2023 年全国水利工作会议上的讲话[J]. 水利发展研究, 2023, 23(1): 1-11.
LI G Y. Thoroughly implement the spirit of the 20th National Congress of the Communist Party of China and solidly promote the high-quality development of water conservancy in the new stage: Speech at the National Water Conservancy Work Conference in 2023 [J]. Water Resources Development Research, 2023, 23(1): 1-11.
- [7] 吴丰昌. 我国水体污染控制与治理成效、科技支撑与展望[J]. 水利发展研究, 2023, 23(12): 1-8.

- WU F C. Effectiveness, scientific and technological support, and prospects for water pollution control and management in China[J]. *Water Resources Development Research*, 2023, 23(12): 1-8.
- [8] GRAYMORE M L M, SIPE N G, RICKSON R E. Sustaining Human Carrying Capacity: A tool for regional sustainability assessment[J]. *Ecological Economics*, 2010, 69(3): 459-468.
- [9] 凌新颖, 马金珠, 于海超, 等. 基于 Bossel 指标体系对敦煌盆地水资源可持续利用评价[J]. *节水灌溉*, 2018(10): 42-46.
- LING X Y, MA J Z, YU H C, et al. Water resources sustainable utilization evaluation based on bossel index system in Dunhuang[J]. *Water Saving Irrigation*, 2018(10): 42-46.
- [10] 吕芳, 张兰霞. 可变模糊评价法在沿海经济带水资源可持续利用评价中的应用[J]. *水利经济*, 2012, 30(4): 12-15.
- LYU F, ZHANG L X. Application of variable fuzzy assessment method in evaluation of sustainable utilization of water resources in coastal economic zone of Liaoning Province[J]. *Journal of Economics of Water Resources*, 2012, 30(4): 12-15.
- [11] 李俊晓, 李朝奎, 罗淑华, 等. 基于 AHP-模糊综合评价方法的泉州市水资源可持续利用评价[J]. *水土保持通报*, 2015, 35(1): 210-214.
- LI J X, LI C K, LUO S H, et al. Sustainable utilization evaluation of water resources in Quanzhou City based on AHP and fuzzy synthetic judgment[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2015, 35(1): 210-214.
- [12] RAO D P. A remote sensing-based integrated approach for sustainable development of land water resources [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, 2001, 31(2): 207-215.
- [13] LI H, ZHAO F, LI C H, et al. An improved ecological footprint method for water resources utilization assessment in the cities[J]. *Water*, 2020, 12(2): 503.
- [14] REES W E. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: What urban economics leaves out[J]. *Environment and Urbanization*, 1992, 4(2): 121-130.
- [15] YANG Y F, WANG H R, LI Y Y, et al. New green development indicator of water resources system based on an improved water resources ecological footprint and its application [J]. *Ecological Indicators*, 2023, 148: 110115.
- [16] WANG H, HUANG J J, ZHOU H, et al. Analysis of sustainable utilization of water resources based on the improved water resources ecological footprint model: A case study of Hubei Province, China [J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 262: 110331.
- [17] YANG Y, CAI Z X. Ecological security assessment of the Guanzhong Plain urban agglomeration based on an adapted ecological footprint model[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 260: 120973.
- [18] JING P R, SHENG J B, HU T S, et al. Spatiotemporal evolution of sustainable utilization of water resources in the Yangtze River Economic Belt based on an integrated water ecological footprint model [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 358: 132035.
- [19] LI D L, ZUO Q T, JIANG L, et al. An integrated analysis framework for water resources sustainability considering fairness and decoupling based on the water resources ecological footprint model: A case study of Xinjiang, China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 383: 135466.
- [20] 王健泉, 秦欢欢. 河北省水资源生态足迹分析与预测[J]. *人民长江*, 2024, 55(8): 114-124.
- WANG J Q, QIN H H. Analysis and prediction of water resources ecological footprint in Hebei Province[J]. *Yangtze River*, 2024, 55(8): 114-124.
- [21] 安慧, 范历娟, 吴海林, 等. 基于 BP 神经网络的淮河流域水生生态足迹分析与预测[J]. *长江流域资源与环境*, 2021, 30(5): 1076-1087.
- AN H, FAN L J, WU H L, et al. Analysis and prediction of water ecological footprint of Huaihe River Basin based on BP neural network [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2021, 30(5): 1076-1087.
- [22] 郭荣中, 申海建, 杨敏华. 基于灰色模型的长沙市生态足迹与生态承载力预测分析[J]. *水土保持研究*, 2015, 22(4): 195-200.
- GUO R Z, SHEN H J, YANG M H. Predictive analysis on the ecological footprint and carrying capacity of Changsha City based on grey model[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2015, 22(4): 195-200.
- [23] 张振龙, 孙慧, 苏洋. 新疆干旱区水资源生态足迹与承载力的动态特征与预测[J]. *环境科学研究*, 2017, 30(12): 1880-1888.
- ZHANG Z L, SUN H, SU Y. Dynamic characteristics and prediction of ecological footprint and carrying capacity of water resources in arid areas of Xinjiang[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2017, 30(12): 1880-1888.
- [24] 郭晓娜, 苏维词, 杨振华, 等. 城乡统筹背景下重庆市水生态足迹分析及预测[J]. *灌溉排水学报*, 2017, 36(2): 69-75.
- GUO X N, SU W C, YANG Z H, et al. Assessment and forecast on ecological footprint of water resources in Chongqing under coordinating urban and rural background[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2017, 36(2): 69-75.
- [25] 热孜娅·阿曼, 方创琳. 新疆水资源承载力的系统动力学仿真与情景模拟[J]. *环境科学与技术*, 2020, 43(6): 205-215.
- AMAN Reziya, FANG Chuanglin. System dynamics and scenario simulation of water resources carrying capacity in Xinjiang [J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 43(6): 205-215.
- [26] SUN Y H, LIU N N, SHANG J X, et al. Sustainable utilization of water resources in China: A system dynamics model[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 142: 613-625.
- [27] LI X, MU D, DU J B, et al. Game-based system dynamics simulation of deposit-refund scheme for electric vehicle battery recycling in China

- [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2020, 157: 104788.
- [28] 赵星轩, 刘月君, 闫佳蕾, 等. 基于系统动力学的智能建造技术推广策略研究[J]. *科技与创新*, 2024(16): 110-113.
- ZHAO X X, LIU Y J, YAN J L, et al. Research on the promotion strategy of intelligent technology based on system dynamics [J]. *Science and Technology & Innovation*, 2024(16): 110-113.
- [29] 肖阳, 胡国杰. 基于系统动力学的装配式建筑成本控制研究[J]. *辽宁工业大学学报(社会科学版)*, 2024, 26(4): 37-40.
- XIAO Y, HU G J. Research on cost control of assembly building based on system dynamics[J]. *Journal of Liaoning University of Technology (Social Science Edition)*, 2024, 26(4): 37-40.
- [30] 李可欣, 曹永强, 范帅邦, 等. 东北三省“水-能源-碳”系统仿真模拟: 基于系统动力学模型[J]. *生态学报*, 2023, 43(17): 6999-7011.
- LI K X, CAO Y Q, FAN S B, et al. Simulation of water-energy-carbon in Northeast China based on system dynamics model[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(17): 6999-7011.
- [31] SONG S, GOH J C L, TAN H T W. Is food security an illusion for cities? A system dynamics approach to assess disturbance in the urban food supply chain during pandemics[J]. *Agricultural Systems*, 2021, 189: 103045.
- [32] 郭汉清, 张治国, 董晓辉, 等. 山西省水资源生态足迹动态分析[J]. *山西农业大学学报(自然科学版)*, 2015, 35(3): 306-310.
- GUO H Q, ZHANG Z G, DONG X H, et al. Dynamic analysis of water resources ecological footprint of Shanxi Province[J]. *Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2015, 35(3): 306-310.
- [33] 杜轶, 郭青霞, 张勇. 2种不同算法的水资源生态足迹动态比较分析: 以山西省为例[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(4): 165-171.
- DU Y, GUO Q X, ZHANG Y. Dynamic comparative analysis of water resources ecological footprint based on two different algorithms: Taking Shanxi Province as an example[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(4): 165-171.
- [34] 陈星, 袁晔, 许钦, 等. 基于外调水调控的水资源承载力空间优化[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2024, 22(6): 1071-1079.
- CHEN X, YUAN Y, XU Q, et al. Spatial optimisation of water resources carrying capacity based on regulation of external water transfers[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2024, 22(6): 1071-1079.
- [35] 岳晨, 刘峰, 杨柳, 等. 北京市2010—2019年水资源生态足迹和生态承载力[J]. *水土保持通报*, 2021, 41(3): 291-295.
- YUE C, LIU F, YANG L, et al. Ecological footprint and ecological carrying capacity of water resources in Beijing City during 2010—2019 [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2021, 41(3): 291-295.
- [36] 陶倩君, 郭程轩. 广东省水资源生态足迹的定量评价及其影响因素[J]. *水资源保护*, 2018, 34(2): 28-33.
- TAO Q J, GUO C X. Quantitative evaluation and influential factor of water resources ecological footprint in Guangdong Province[J]. *Water Resources Protection*, 2018, 34(2): 28-33.
- [37] YASMEN H, TAN Q M. Assessing Pakistan's energy use, environmental degradation, and economic progress based on Tapio decoupling model [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28(48): 68364-68378.
- [38] 吴丹. 中国经济发展与水资源利用脱钩态势评价与展望[J]. *自然资源学报*, 2014, 29(1): 46-54.
- WU D. Evaluation and prospect on the decoupling trend of economic development and water resource utilization in China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(1): 46-54.
- [39] 胡西武, 郭玮. 青海省水资源利用与经济增长脱钩研究[J]. *人民黄河*, 2023, 45(8): 90-95.
- HU X W, GUO W. Research on the decoupling of water resources utilization and economic growth in Qinghai Province [J]. *Yellow River*, 2023, 45(8): 90-95.
- [40] 李玲, 潘雪倩, 夏威夷, 等. 基于SD模型的重庆市水资源承载力模拟分析[J]. *中国农村水利水电*, 2018(5): 128-133.
- LI L, PAN X Q, XIA W Y, et al. Simulation and analysis of water resources carrying capacity in Chongqing based on SD model [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2018(5): 128-133.

(责任编辑 王海锋)