

岳江,王红霞,王馨茹,等.山西省7条河的流域水生态承载力评估[J].南水北调与水利科技(中英文),2023,21(6):1235-1249. YUE J, WANG H X, WANG X R, et al. Assessment of water ecosystem carrying capacity in seven rivers basins in Shanxi Province [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(6): 1235-1249. (in Chinese)

山西省 7 条河的流域水生态承载力评估

岳江¹,王红霞^{2,3},王馨茹⁴,王小兰¹,郭伟¹

(1. 山西省气象科学研究所,太原 030002; 2. 华北电力大学,北京 102206; 3. 山西水利职业技术学院,太原 030032;
4. 北京匿合营造设计咨询有限公司,北京 100166)

摘要:为科学研判山西省 7 条河的流域水生态承载现状和存在问题,有效提升河流水生态承载力,构建 7 条河的流域水生态承载力评估指标体系,应用模糊综合评价法定级评估 7 条河的流域水生态承载力,使用差分自回归移动平均(autoregressive integrated moving average, ARIMA)模型和长短期记忆(long short-term memory, LSTM)模型对比预测水生态承载力变化趋势。结果表明,2011—2021 年,7 条河的流域水生态承载力总体为一般超载等级。其中,汾河流域水生态承载力呈基本承载,其他流域为一般超载,水环境指数和水资源指数对 7 条河的流域水生态承载力影响较大。ARIMA-LSTM 模型预测表明:2022—2031 年汾河水生态承载力变化呈上升趋势,涑水河、沁(丹)河流域水生态承载力未来趋势存在较大不确定性,其他流域水生态承载力呈不同幅度波动趋势;2031 年左右,各流域水生态承载力将得到提升。建议通过提升流域水资源利用率以及加强 7 条河的流域绿色生态走廊建设来推进流域水生态保护工作。

关键词: ARIMA-LSTM 模型;模糊综合评价;水生态承载力;趋势预测

中图分类号: TV213 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2023.0122

“承载力”这一概念最初在工程领域被引入,其定义是在不产生破损的情况下,物体所能负载的最大重量^[1]。承载力通常以力的量纲来衡量。然而,随着土地退化、环境污染和人口增长等问题的出现,承载力的这一概念已经扩大到了生态系统的应用领域^[2]。生态承载力和负载水平的测定已逐步成为评估社会经济可持续发展的重要指标^[3-4]。

在 20 世纪 90 年代,全球各地的学者们在生态承载力的研究中取得了重要进展。例如:Daily^[5]提出了应控制区域人口规模至能被生态系统所承受的范围内;Wackernagel 等^[6]则分别从理论和方法两个方面,给出了对区域生态承载力的计算框架,并在评估中融入生态足迹研究。与此同时,随着中国城市化进程加快,国内学者也开展了丰富的定量研究:刘士锐^[7]采用状态空间法对郑州市生态承载状况进行分析,找出生态失衡的原因并提出生态改善措施;Gao 等^[8]对比分析了计算生态承载力常用评

价方法的优缺点,对精细化开展生态承载力研究起到了一定推动作用;WILLIS 等^[9]对未来区域生态承载力研究的应用前景进行了深入探讨。此外,更多科研人员还关注到生态承载力指标、评估方法以及影响因素的研究。例如,卢开东等^[10]采用 DPSIR(driving-pressure-state-impact-response)模型将具有较大影响力的评估指标并入芜湖市水生态承载力评估体系,考核生态承载力的目的是找到生态系统自我调整与社会经济活动强度之间的平衡,以便实行合理的水资源配置。一些实证研究也显示了生态承载力的应用价值,如:杜芳等^[11]收集并分析了 1995—2018 年北运河北京段的评估指标数据;岳晨等^[12]分析了北京市 2010—2019 年的生态足迹和水资源负载指数动态变化;钟艳霞等^[13]根据石河子市生态需水量的研究结果,设计了产业布局和水资源配置方案。在水资源保护和治理的领域中,也有学者提出了流域发展指数及宏观-中观-

收稿日期:2023-06-10 修回日期:2023-10-19 网络出版时间:2023-11-15

网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20231114.0929.002

基金项目:山西省水利科学技术研究与推广项目(2023GM46);中国气象局干旱气象科学研究基金项目(IAM202321)

作者简介:岳江(1981—),女,山西太原人,高级工程师,主要从事计算机、应用气象研究。E-mail: 540222442@qq.com

通信作者:王红霞(1966—),女,山西运城人,教授,博士,主要从事大数据、人工智能、水资源评估方面研究。E-mail: wanghxsxyt@163.com

微观三层新的理论和评估体系^[14],并就新疆水资源保护问题提出了解决方案^[15-16]。

多位专家学者^[17-19]在开展水资源开发利用对生态环境影响研究中取得了一定成果,但仍存在一些不足:研究对象多为单一河流域或单一城市水体,对于多流域城市群之间,水生态承载力评估等级划分方法以及对比研究较少;研究成果对承载力未来变化情景预测偏少;不同地区水生态承载力指标体系及评估方法不同,导致水生态承载力评估结果不确定性较大。为了解决以上问题,实现在统一评价体系框架下对比分析和预测多流域水生态承载力变化情况,本文采用主成分分析法和熵权法筛选 7 条河的流域水生态承载力评估指标,并建立 7 条河流域统一的指标体系;引入模糊综合评价法对 7 条河的流域划分水生态承载力评估等级,并分析各流域主要影响因子;采用差分自回归移动平均 (autoregressive integrated moving average, ARIMA) 模型和长短期记忆 (long short-term memory, LSTM) 模型对比预测 7 条河的流域水生态承载力变化情况,并提出流域水生态保护和修复建议。研究结果可为地方政府部门更好地厘清流域水生态环境现状和脆弱程度及合理治理流域生态环境提供科学依据,同时也为构建地方经济与生态环境相适应的和谐发展模式提供新的尝试路径。

1 研究区概况

研究区域为山西省境内的汾河、桑干河、滹沱河、漳河、沁(丹)河、涑水河和大清河流域,面积约 11.2 万 km²,共涉及 11 个市 101 个县(市、区),占山西省总面积的 72%。其中,汾河流域涉及忻州、太原、吕梁、晋中、临汾、运城、阳泉、长治和晋城 9 市的 51 县(区),桑干河流域涉及忻州、朔州、大同 3 市的 19 县(区),滹沱河流域涉及忻州、阳泉和晋中 3 市的 12 个县(市、区),漳河流域面积涉及晋中和长治 2 市的 16 县(区),沁(丹)河流域涉及长治、临汾和晋城 3 市的 8 县(区),涑水河流域涉及运城市的 9 县(区),大清河流域涉及大同和忻州 2 市的 3 县。

7 条河的流域上中游大部分地区位于 400 mm 降水量等值线以西,气候干旱少雨;水资源开发利用率高^[20],超过 40% 的生态警戒线。7 条河的流域生态脆弱区分布广、类型多,极易发生退化,恢复难

度大且过程缓慢。环境污染积重较深,流域各地区产业以能源化工、原材料、农牧业等为主导的特征明显,竞争力强的新兴产业集群较为缺乏。因此,积极开展 7 条河的流域水生态承载力研究,可为当地水利部门制定水资源合理配置措施、有效保护水生态环境提供重要参考。

2 数据与方法

2.1 指标数据来源

建立一套科学合理的水生态承载力评价指标体系是开展水生态承载力评估的重要前提。由于人口、经济、水资源、水环境、水生态等子系统均可对水生态承载力产生影响^[21],从这些子系统中挖掘并提取关键指标,最终建立评价指标体系是评估流域水生态承载力的关键环节。选取资料时序长度为 2011—2021 年的水资源利用指标、水环境纳污指标、自然生境指标和人类支持力指标^[22](表 1)作为山西省 7 条河的流域水生态承载力指标。其中:水资源利用子指标主要来源于山西省水资源公报和山西省统计年鉴;水环境纳污子指标主要来源于山西省环境监测总站提供的水质监测数据报表、中国城市建设统计年鉴和山西省统计年鉴;自然生境子指标主要来源于山西省森林草原局提供的调查数据报表、中国城市建设统计年鉴以及遥感反演计算结果;人类支持力子指标主要来源于山西省统计年鉴。

2.2 技术方法

水生态承载力与流域内社会、经济、环境、资源和生态情况密切相关^[23]。因此,在评估流域水生态承载力时,许多学者结合研究区特点选取水生态承载力评价指标^[24]。采用指标体系法评价生态承载力时,需对生态承载力的指标赋予不同权重^[25];在评价水生态承载力时,利用系统动力学模型,建立人口、经济、水环境、水资源、水生态的耦合系统,可通过指标之间的相互作用共同影响水生态承载力指数^[26-28]。因此,构建合理的水生态承载力指标体系,各指标除需满足对水生态承载力具有一定影响的条件外,指标之间还应具有较强相关性。本文采用全局时序主成分分析法和熵权法对初估指标进行筛选比较,建立一套适合 7 条河流域水生态承载力评估的指标体系,根据综合模糊评价法对流域水生态承载力进行评估,使用 ARIMA 模型预测 2022—2031 年水生态承载力变化趋势。

2.2.1 全局时序主成分分析法

基于不同流域和时段的水生态承载力指标体系的面板数据,采用SPSS全局时序主成分分析法,通

过对所选取的时间序列指标进行归一化处理、最大方差法因子旋转并经过KMO度量、Bartlett球形度检验确定水生态承载力初估指标。

表1 7条河的流域水生态承载力指标数据及来源
Tab. 1 Indicator data and sources of water ecological carrying capacity in the seven rivers basins

指标类型	子指标名称	来源	说明	
水资源利用	水资源开发利用率/%	山西省水资源公报	流域总用水量/水资源总量	
	水资源总量/亿m ³	山西省水资源公报		
	人均水资源量/m ³	山西省水资源公报、山西省统计年鉴	流域水资源总量/人口总数	
	年降雨量/亿m ³	山西省水资源公报		
	产水系数	山西省水资源公报	年降水量/水资源总量	
	用水量/亿m ³	山西省水资源公报		
	供水量/亿m ³	山西省水资源公报		
	万元GDP用水量/m ³	山西省水资源公报		
水环境纳污	人均用水量/m ³	山西省水资源公报		
	市政工程污水处理率/%	中国城市建设统计年鉴		
	COD质量浓度/(mg·L ⁻¹)	山西省环境监测站		
	单位土地面积COD排放量/(t·m ⁻²)	山西省环境监测站、山西省统计年鉴		
	氨氮质量浓度/(mg·L ⁻¹)	山西省环境监测站		
	耕地面积化肥使用量/(t·m ⁻²)	山西省统计年鉴	流域化肥使用量/耕地面积	
	耕地面积畜禽养殖量/(只·m ⁻²)	山西省统计年鉴	流域畜禽饲养量/耕地面积	
	叶绿素质量浓度/(mg·L ⁻¹)	山西省环境监测站		
自然生境	水质达标率/%	山西省环境监测站		
	单位土地面积氨氮排放量/(t·m ⁻²)	山西省统计年鉴、山西省环境监测站	流域氨氮排放量/土地面积	
	废污水排放量/万吨	山西省环境监测站		
	自然保护区面积/m ²	山西省森林草原局		
	河岸带林草覆盖率/%	遥感反演		
	绿化覆盖面积/m ²	中国城市建设统计年鉴		
	人类支持力	人口数量/人	山西省统计年鉴	
		人均GDP/万元	山西省统计年鉴	
第一产业产值/万元		山西省统计年鉴		
第二产业产值/万元		山西省统计年鉴		
第三产业产值/万元		山西省统计年鉴		

2.2.2 水生态承载力量化评估法

对水生态承载力初估指标归一化处理后采用熵权法^[29-30]对其赋权,公式为

$$P_{i,j} = \bar{E}_{i,j} / \sum_{j=1}^m \bar{E}_{i,j} \quad (1)$$

式中: $\bar{E}_{i,j}$ 为水生态承载力指标的标准化数值; $P_{i,j}$ 是第 i 个指标第 j 个年份的指标值的权重; m 为指标年份长度。

$$e_i = -k \sum_{j=1}^m P_{i,j} \ln P_{i,j} \quad (2)$$

$$w_i = (1 - e_i) / \sum_{i=1}^n (1 - e_i) \quad (3)$$

式中: $k=1/\ln m$; n 为水生态承载力指标个数; e_i 为第 i 个指标的熵值; w_i 是第 i 个指标的熵权。

水生态承载力评估指数 E_j 计算公式为

$$E_j = \sum_{i=1}^n w_i \bar{E}_{i,j} \quad (4)$$

水生态承载力指数划分方法采用模糊综合评价

法^[31],公式如下:

对于数据集 U , 定义为 $U = (u_1, u_2, \dots, u_w)$, 其中, u_i 表示评价对象的第 i 个因素, w 为 U 集合中的数据总数。设定评价等级指标集为 V , 定义为 $V = (v_1, v_2, \dots, v_r)$, 其中, v_j 代表第 j 种评价结果, r 为 V 集合中评价结果总数。若数据集 U 中第 i 个元素对评价集 V 中第 1 个元素的隶属度为 r_{i1} , 则对第 i 个元素单因素评价的结果用模糊集合表示为: $R_i = (r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{ir})$, 以 w 个单因素评价集 (R_1, R_2, \dots, R_w) 为行组成矩阵 R_{wr} , 称为模糊综合评价矩阵。设 $A = (a_1, a_2, \dots, a_w)$ 为 U 的权重集合模糊集, 则通过模糊变化将 U 的模糊向量 A 转为 V 的模糊向量 B , 即 $B = A_{1w}R_{wr} = (b_1, b_2, \dots, b_r)$ 。此处为综合评价合成算子, 即矩阵乘法。最后确定系统总得分, 即 $F = B_{1r}S_{1r}$, 其中, F 为系统总得分, S 为 V 相应因素的得分。

2.2.3 ARIMA 模型预测

基于 7 条河的流域水生态承载力指数样本数量较少的情况, 使用 SPSS 软件、差分自回归移动平均 (autoregressive integrated moving average, ARIMA) 模型可以预测 7 条河的流域水生态承载力未来 10 年变化趋势。ARIMA 模型^[28-29] 是时间序列预测分析方法之一, 可以表示为

$$Y_t = c + \phi_1 Y_{t-1} + \phi_2 Y_{t-2} + \dots + \phi_p Y_{t-p} + \theta_1 \epsilon_{t-1} + \theta_2 \epsilon_{t-2} + \dots + \theta_q \epsilon_{t-q} + \epsilon_t \quad (5)$$

式中: Y_t 是时间序列数据; ϕ_1 到 ϕ_p 表示 AR 参数, 可描述当前值与过去 p 个时间点值之间的关系; θ_1 到 θ_q 表示 MA 参数, 用来描述当前值与过去 q 个时间点的误差之间的关系; ϵ_t 是在 t 时间点的误差项; c 是常数项。

2.2.4 LSTM 模型预测

为了进一步提升预测方法的鲁棒性和可靠性, 采用 Python 编程技术引入 LSTM 深度学习模型^[32] 对 7 条河的流域水生态承载力未来 10 年变化趋势进行预测。LSTM 是一种递归神经网络, 可用于解决时间序列数据预测及插补问题。LSTM 链式结构包括前后两个神经元的状态及神经元间逐点操作、串接及输出。其中, 每个神经元内编码部分的基本结构是 LSTM-I, LSTM-I 单元过程定义为

$$C_t = f_t C_{t-1} + i_t \tilde{C}_t \quad (6)$$

$$f_t = \sigma(W_f[h_{t-1}, x_t] + b_f) \quad (7)$$

$$h_t = \sigma(W_i[h_{t-1}, x_t] + b_i) \quad (8)$$

$$\tilde{C}_t = \tanh(W_c[h_{t-1}, x_t] + b_c) \quad (9)$$

$$o_t = \sigma(W_o[h_{t-1}, x_t] + b_o) \quad (10)$$

$$h_t = o_t \tanh C_t \quad (11)$$

式中: f_t 叫做遗忘门, 表示 C_{t-1} (上个单元状态) 的哪些特征用于计算 C_t (下个单元状态); \tilde{C}_t 表示单元状态更新值, 由输入数据和隐节点经由 \tanh 激活函数计算得到; 向量的各要素均位于 $[0, 1]$ 区间, 使用 Sigmoid 作为激活函数, 输出一个 $[0, 1]$ 区间值。 i_t 叫做输入门, 与 f_t 均为 $[0, 1]$ 区间的向量, 由 x_t 和隐节点 h_{t-1} 经由 Sigmoid 激活函数计算得到; o_t 为输出门; 隐节点 h_t 由输出门 o_t 和单元状态 C_t 经由 \tanh 激活函数计算得到 LSTM 神经网络最终输出; 参数 W_f 、 W_i 、 W_c 、 W_o 为输入维度乘以输出维度的积; 参数 b_f 、 b_i 、 b_c 、 b_o 为输出维度。

3 结果与讨论

3.1 水生态承载力评估指标体系

《山西省汾河流域生态修复与保护条例》规定, 要根据汾河流域水生态承载力进行产业布局, 并从水资源、污染防治、生态环境保护及社会经济发展等方面给出生态修复意见, 因此, 结合山西省 7 条河的流域生态环境、社会经济现状及政策导向, 选取水资源开发利用率、水资源总量等 27 个指标作为水生态承载力初估指标。通过对初估指标进行 KMO 和 Bartlett 检验得到 KMO 值为 0.669, Bartlett 球形度检验显著性为 0, 通过了 0.01 显著性检验, 数据样本适合做主成分分析。

根据全局时序主成分分析结果(表 2)可知, 水生态承载力指标体系可提取特征值大于 1 且累积方差解释率大于 80% 的 6 个主成分, 并进行熵权法赋权。从赋权结果来看: 主成分 1、2 总权重占比最大, 分别为 19.62% 和 19.61%; 主成分 3 和 4 次之, 权重占比均为 13.70%; 主成分 5, 权重占比为 8.21%; 主成分 6 权重最小, 占比为 8.02%。从指标隶属种类来看, 水资源类占比 25.67%, 水环境类占比 30.45%, 自然生境类占比 14.03%, 人类支持力占比 12.71%, 因此, 水环境类和水资源类指标为 7 条河的流域水生态承载力评估结果的关键影响因子。从各子指标来看, 单位土地 COD 排放量和自然保护区面积权重均大于 6%, 废污水排放量、绿化覆盖面积、COD 质量浓度、单位土地面积氨氮排放量权重在 3.5% 以上, 成为 7 条河的流域水生态承载力的关键指标。

表2 7条河的流域水生态承载力指标体系架构

Tab. 2 Indicator system framework of water ecological carrying capacity in the seven rivers basins

%

成分	主要指标名称	权重	特征值方差百分比/%	累计百分比/%
1	废污水排放量	3.84	19.62	19.62
	单位土地面积COD排放量	6.36		
	第三产业产值	1.90		
	绿化覆盖面积	3.58		
	第二产业产值	2.11		
	人均GDP	1.83		
2	供水量	2.94	19.61	39.23
	用水量	3.06		
	第一产业产值	3.77		
	万元GDP用水量	3.17		
	人口数量	3.10		
	人均用水量	3.57		
3	氨氮质量浓度	5.25	13.70	52.93
	水质达标率	1.53		
	COD质量浓度	3.74		
	河岸带林草覆盖率	3.18		
4	年降雨量	1.87	13.70	66.63
	水资源总量	3.07		
	人均水资源量	2.79		
	产水系数	2.58		
	水资源开发利用率	2.62		
	市政工程污水处理率	0.77		
5	叶绿素质量浓度	0.94	8.21	74.82
	自然保护区面积	7.27		
6	耕地面积化肥使用量	2.04	8.02	82.86
	耕地面积畜禽养殖量	2.44		
	单位土地面积氨氮排放量	3.54		

3.2 水生态承载力评估结果分析

根据水生态承载力指数计算方法得到2011—2021年7条河的流域水生态承载力变化情况见图1。由图1可知,11年间,山西省7条河的流域水生态承载力指数无显著变化趋势,水生态承载力指数在0.24(2013年)~0.29(2021年),均值为0.27。从各条河的流域水生态承载力变化可知,汾河流域水生态承载力呈显著上升趋势($k=0.01$, $R^2=0.49$),承载力指数在0.39(2013年)~0.68(2021年),均值为0.53,大于其他流域的水生态承载力指数(0.08~0.30)。其中:大清河流域水生态承载力指数在0.14(2013年、2017年)~0.20(2019年),均值为0.16;滹沱河流域水生态承载力指数在0.24(2018年)~0.29(2021年),

均值为0.27;沁(丹)河流域水生态承载力指数在0.19(2018年)~0.27(2021年),均值为0.21;桑干河流域水生态承载力指数在0.23(2011年)~0.29(2021年),均值为0.25;涑水河流域水生态承载力指数在0.06(2018年)~0.21(2021年),均值为0.08;漳河流域水生态承载力指数在0.14(2018年)~0.19(2021年),均值为0.16。由此可知,在2011—2021年中,2013年和2018年各流域水生态承载力最低;2011—2012年、2014—2017年各流域水生态承载力基本保持小幅上升趋势;2019—2021年除大清河流域水生态承载力呈下降趋势外,其余流域均呈显著上升趋势,说明2019—2021年7条河各流域(大清河除外)水生态承载力整体情况有显著改善。

将各流域水生态承载力均值从小到大顺序排列,可以得到:汾河>漳沱河>桑干河>沁(丹)河>大清河>漳河>涑水河。

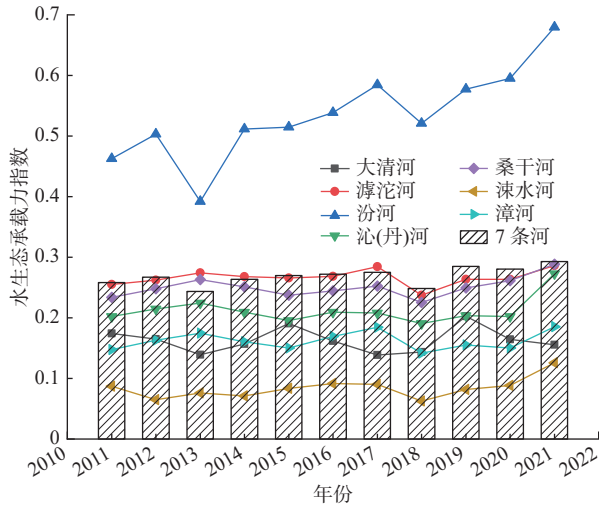


图 1 7 条河的流域水生态承载力指数年际变化

Fig. 1 Interannual variation of water ecological carrying capacity indicator in the seven rivers basins

模糊综合评价法^[31]常应用于水资源承载力评估等级划分。本文在确定水生态承载力等级划分依据上引入模糊综合评价法,分别计算 7 条河各流域评价等级(表征承载状态)重要节点数值,建立 7 条河各流域水生态承载力等级划分标准见表 3。根据各流域水生态承载力指数计算结果(图 2)并结

合表 3 承载力等级划分标准可知,2011—2021 年山西省 7 条河的流域水生态承载力等级总体为一般超载。其中:2011—2018 年为一般超载;2019—2021 年流域水生态承载力明显提升,等级为基本承载。7 条河的流域水生态等级分别为:汾河流域水生态承载力等级 2011—2016 年、2018 年为基本承载,2017 年、2019—2021 年为较好承载;大清河流域 2013—2014 年、2016—2018 年水生态承载力等级均为一般超载,2011—2012 年、2015 年、2019—2021 年为基本承载;漳沱河流域 2011—2016 年、2018—2020 年水生态承载力等级为一般超载,2017 年、2021 年为基本承载;沁(丹)河流域 2011—2012 年、2014—2020 年水生态承载力等级为一般超载,2013 年、2021 年为基本承载;桑干河流域 2011—2012 年、2014—2019 年水生态承载力等级为一般超载,2013 年、2020—2021 年为基本承载;涑水河流域 2011—2015 年、2018—2019 年水生态承载力等级为一般超载,2016—2017 年、2020—2021 年为基本承载;漳河流域 2011—2012 年、2014—2015 年、2018—2020 年水生态承载力等级为一般超载,2013 年、2016—2017 年、2021 年为基本承载。因此,2019—2021 年,随着 7 条河各流域水生态承载力的提升,其承载力等级也提高至基本承载或较好承载状态。

表 3 水生态承载力等级划分标准

Tab. 3 Classification criteria for water ecological carrying capacity levels

流域名称	承载力指数区间				
	严重超载	一般超载	基本承载	较好承载	最佳承载
大清河	(0,0.08]	(0.08,0.17]	(0.17,0.25]	(0.25,0.33]	(0.33,1]
漳沱河	(0,0.14]	(0.14,0.27]	(0.27,0.41]	(0.41,0.55]	(0.55,1]
汾河	(0,0.21]	(0.21,0.42]	(0.42,0.62]	(0.62,0.83]	(0.83,1]
沁(丹)河	(0,0.11]	(0.11,0.22]	(0.22,0.33]	(0.33,0.44]	(0.44,1]
桑干河	(0,0.13]	(0.13,0.26]	(0.26,0.39]	(0.39,0.51]	(0.51,1]
涑水河	(0,0.04]	(0.04,0.09]	(0.09,0.13]	(0.13,0.18]	(0.18,1]
漳河	(0,0.08]	(0.08,0.17]	(0.17,0.25]	(0.25,0.33]	(0.33,1]
7条河	(0,0.14]	(0.14,0.28]	(0.28,0.41]	(0.41,0.55]	(0.55,1]

3.3 水生态承载力评估结果检验

对 7 条河的流域水生态承载力评估结果的检验方式采用历史资料检验法,以涑水河山西段(运城)为例,水生态承载力指数经由评估指标主成分分析筛选、熵权法赋权求和计算得出。因此,进行水生

态承载力评估结果检验时,可基于水生态承载力主成分分析得到的成分矩阵,将 2016—2020 年水生态承载力计算结果代入指标体系成分矩阵,逆推得到 2016—2020 年人口数量,结果见表 4。

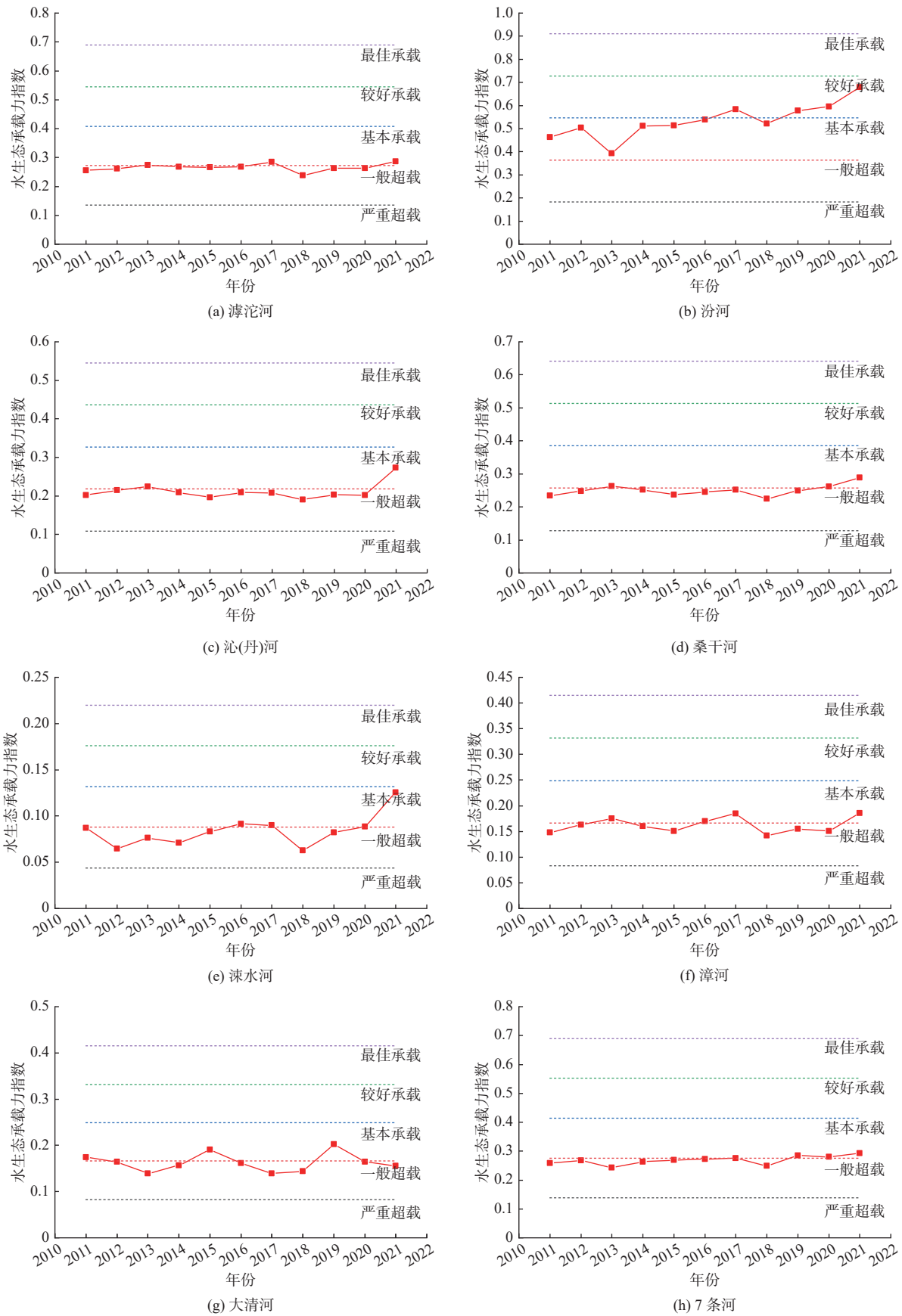


图2 各子流域水生态承载力指数等级变化

Fig. 2 Changes in water ecological carrying capacity index grades among sub-basins

由误差值可知,水生态承载力对其子指标——人口数量预测结果误差小于0.002%,模拟结果与历

史实际数据基本吻合,因此,水生态承载力计算方法合理,预测结果可信。

表 4 承载力评估检验结果

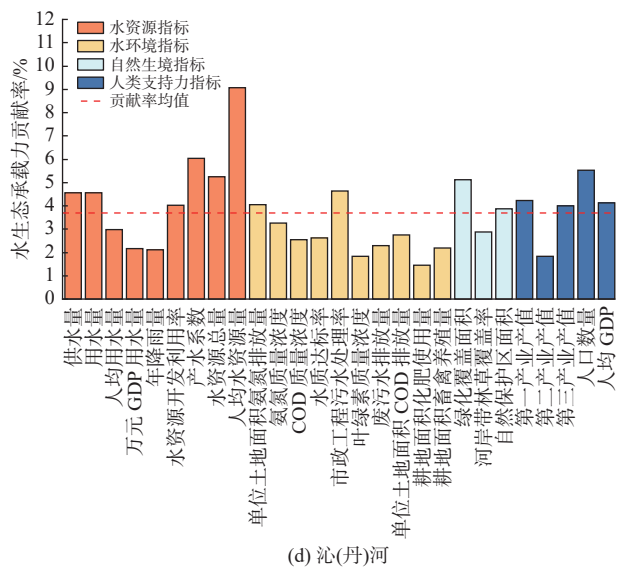
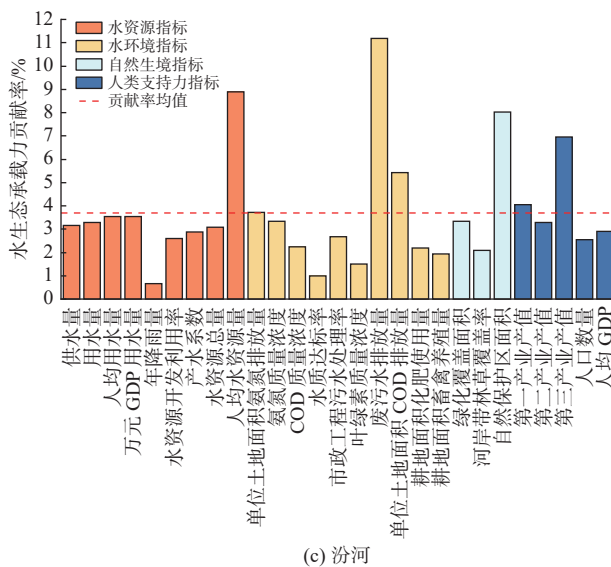
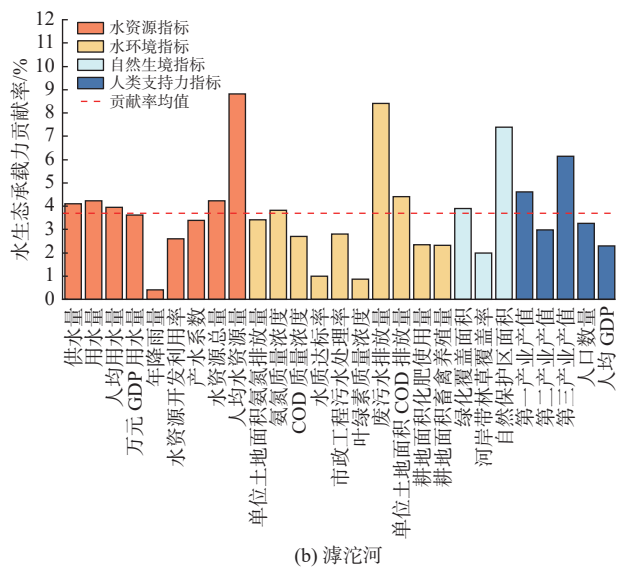
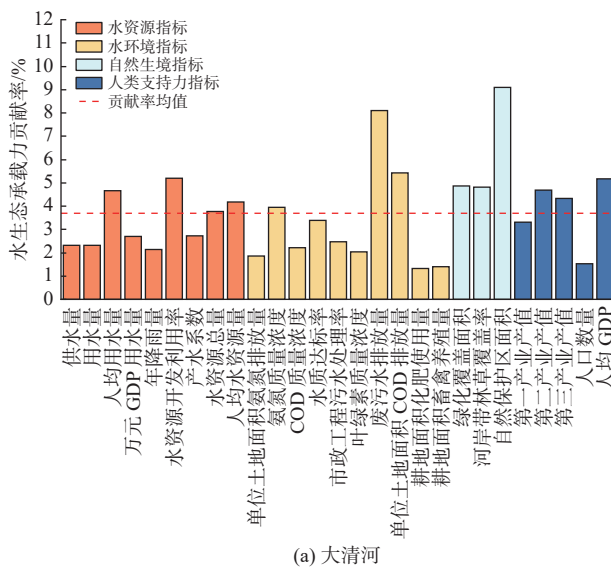
Tab. 4 Results of load capacity assessment inspection

年份	人口数量预测值/人	人口数量实测值/人	误差/%
2016	4 888 089	4 888 196	0.002
2017	4 855 245	4 855 329	0.002
2018	4 817 473	4 817 531	0.001
2019	4 789 097	4 789 135	0.001
2020	4 771 556	4 771 582	0.001

3.4 主要影响因素分析

由于 7 条河的流域涉及的区域(市、区、县)自然环境、污染现状、城镇规模以及产业结构存在较大差异,因此各流域水生态承载力指数差异性较大。分别对各流域筛选主要影响指标,分析其变化规律及原因,可为提出改善修复流域生态环境、提高承载力的对策提供理论依据。本文采用主成分分析法计算 7 条河的流域水生态承载力指标体系中各影

响因子方差贡献率。图 3 给出了 7 条河的流域水生态承载力主要影响因子贡献率年际变化情况。由图 3 可知:各流域中水环境纳污指标、自然生境指标均对水生态承载力影响较大;水资源利用指标和人类支持力指标对各流域影响具有局地性特征。大清河和汾河流域主要受水环境纳污指数和自然生境指数影响较大;滹沱河、沁(丹)河、桑干河流域均受水资源利用指标、水环境纳污指标、自然生境指标和人类支持力指标影响,且影响程度差异较大;涑水河受以上 4 类指标影响,但各指标影响程度差异较小。7 条河的流域水资源指标中的人均水资源量、人均用水量、水环境指标中的废污水排放量、单位土地 COD 排放量、自然生境指标中的自然保护区面积、绿化覆盖率以及人类支持力指标中的第三产业产值均成为影响 7 条河的流域水生态承载力大小的关键因素。



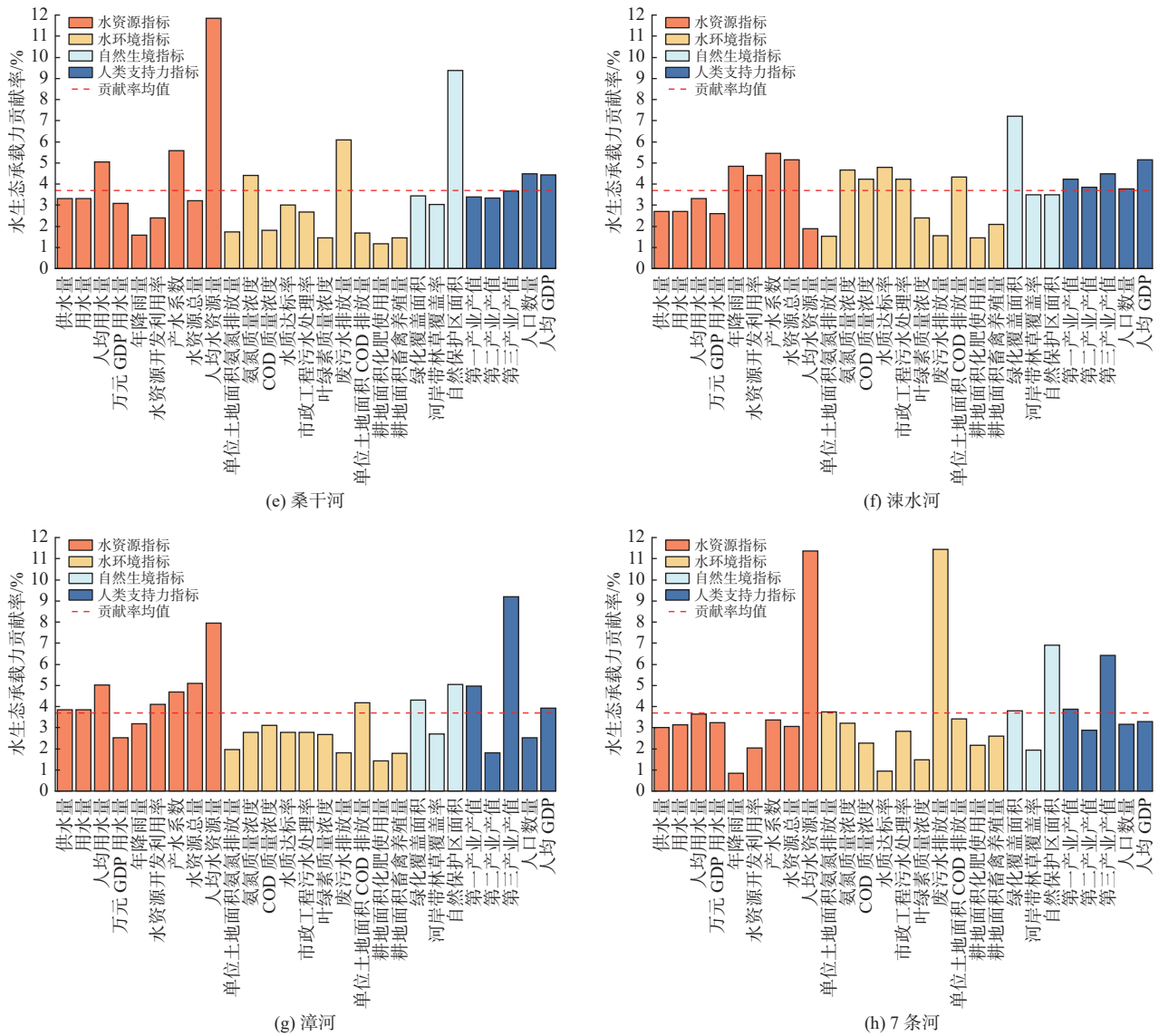


图3 7条河的流域水生态承载力主要影响因子年际变化

Fig. 3 Interannual variation of the main factors affecting water ecological carrying capacity in the seven rivers basins

这是因为人均水资源量指标可反映区域内可供个人使用的水资源总量,水资源的充足程度对于水生态的健康和稳定具有直接影响。如果人均水资源量偏低,则水生态系统可能会受到过度开发和压力。人均用水量指标是衡量人类活动对水资源消耗情况的有效指标;过度或不合理的水资源消费往往导致地下水位降低,河流干涸,摧毁水生态环境。废水中含有多种有害物质,若未经处理直接排入水体,将破坏水质,威胁生物多样性,进而影响整个水生态系统的平衡。化学需氧量(COD)是衡量水体污染程度的重要指标之一,单位土地COD排放量越高,表明水体污染严重,对微生物、植物和动物的生存构成威胁,从而降低水生态系统的承载力。设立自然保护区可以保护水源,维护生物多样性,防止过度开发和污染。因此,自然保护区面积大可

提高水生态系统的抵御能力;绿化覆盖率高的地方,不仅能减少城市热岛效应,改善环境,同时还能通过植被对雨水的吸纳作用,保护水源并减轻地表径流,从而保障水质。第三产业产值也是影响水生态承载力的重要因素,因为随着经济的发展,第三产业(服务业)的比重增加,其对水资源的依赖并非像第一、二产业那般密切,在一定程度上第三产业结构转型可以缓解水资源的开采压力,有利于水生态环境的保护。

3.5 水生态承载力趋势预测

基于7条河的流域水生态承载力现状和可持续性高质量发展的需求,探讨当前形势下未来10年承载力变化情况具有很强的现实意义。为提升预测结果的可靠性,使用ARIMA模型和LSTM模型对7条河的流域及各子流域水生态承载力分别进行预测。

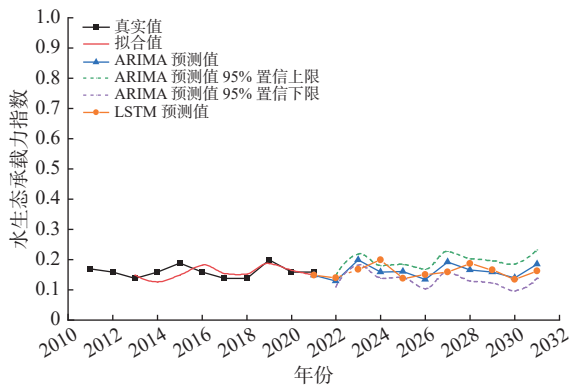
3.5.1 ARIMA-LSTM 模型预测过程

根据 ARIMA 模型多次预测结果, 得到 7 条河的流域水生态承载力 2022—2031 年预测结果见图 4。表 5 给出了 7 条河的流域 ARIMA 模型参数, 其中, z 值表示标准差的倍数, p 值表示所观测到的空间模式是由某一随机过程创建而成的概率, CI 为 95% 置信区间。AIC 值(赤池信息量准则)和 BIC 值(贝叶斯信息量准则)为寻找 AR 和 MA 的最佳阶数的评估准则^[32]。确定模型最佳阶数后, 即可根据表 5 中模型参数构建 7 条河的流域 ARIMA 评估模型。

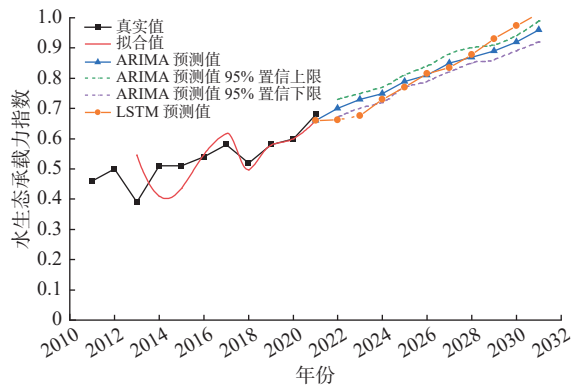
ARIMA 预测模型适用性通常采用 Ljung-Box 检验(LB 检验), Q 值为其检验统计量, p 值表征其显著性^[33]。若 ARIMA 模型预测的新序列对原始序列解释性很好, 则新序列与原始序列的残差序列应

为白噪声序列。 Q 值用于检验新序列残差的自相关系数是否满足白噪声, 常以其对应的 p 值是否大于 0.1 作为新序列残差是否通过白噪声检验的判别标准。由表 6 可知, $Q_1 \sim Q_8$ 对应 p 值显著性均大于 0.1, 满足白噪声检验, 表明 ARIMA 模型满足预测要求。

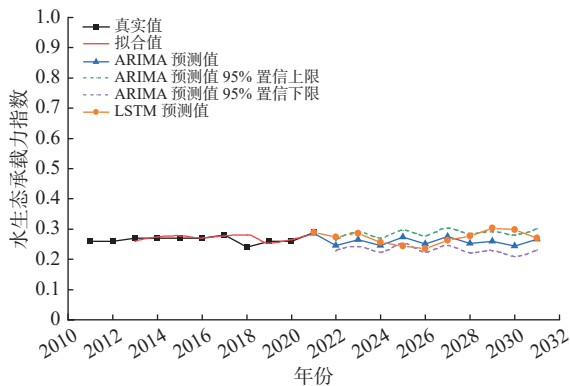
LSTM 模型建立前, 先将 7 条河各流域水生态承载力指数集拆分为训练集和测试集, 并分别转换为 LSTM 建模接受的数据格式, 即 samples, time_steps, features 三维数据集。设置 1 个输入层、50 个隐藏层和 1 个输出层, 使用 Adam 优化器和均方误差损失函数进行编译, 迭代次数为 100 次, 通过多次训练, 调整隐藏层神经元个数, 最终建立 7 条河各子流域最佳预测模型。基于 LSTM 预测得到的 2022—2031 年水生态承载力指数变化情况如图 4 橙色曲线所示。



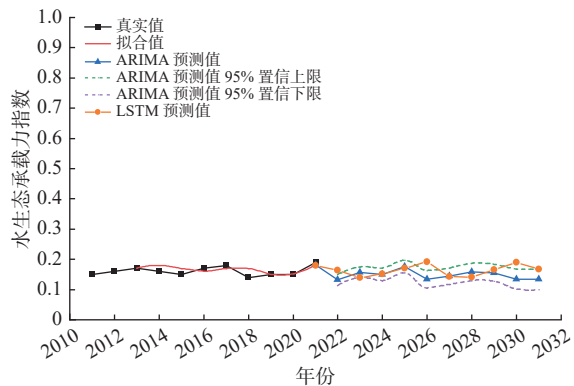
(a) 大清河



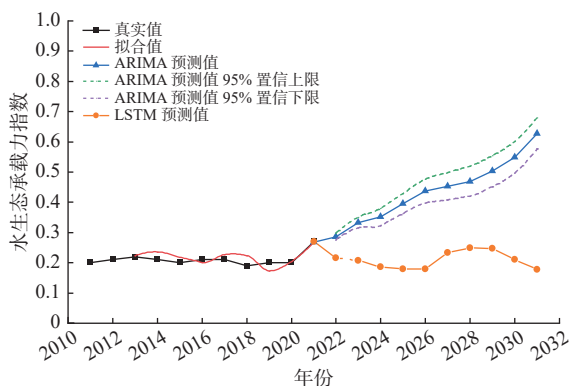
(b) 汾河



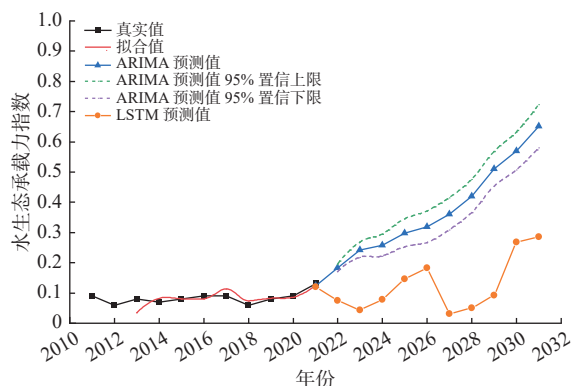
(c) 淳沱河



(d) 漳河



(e) 沁(丹)河



(f) 洮水河

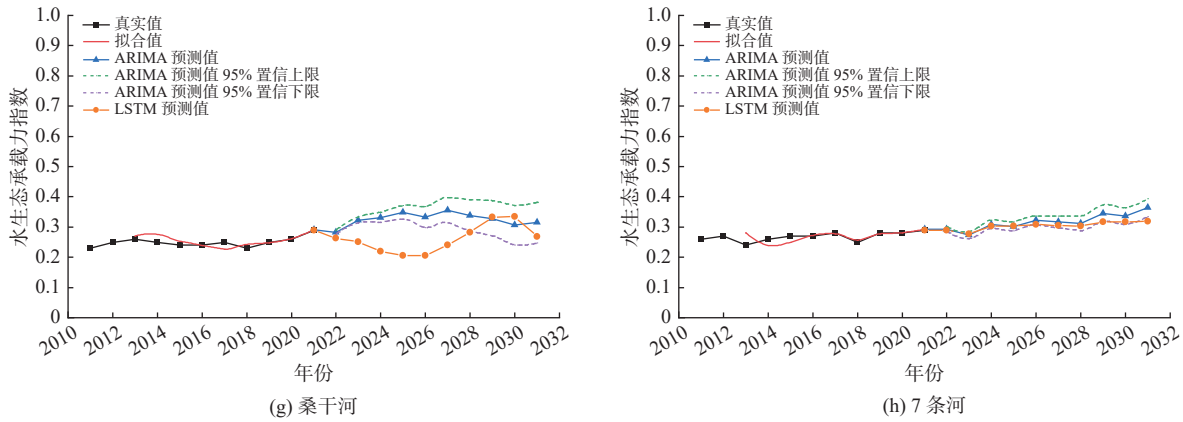


图4 7条河的流域水生态承载力2022—2031年变化趋势

Fig. 4 Trend of water ecological carrying capacity from 2022 to 2031 in the seven rivers basins

表5 ARIMA模型参数(以7条河的流域为例)
Tab. 5 ARIMA model parameter table for the seven rivers basins

项	符号	系数	标准误差	z值	p值	95% CI
常数项	c	0.001	0.012	0.047	0.962	-0.023 ~ 0.024
AR参数	φ_1	0.068	10.967	0.006	0.995	-21.427 ~ 21.563
	φ_2	-0.078	9.825	-0.008	0.994	-19.334 ~ 19.179
	φ_3	-0.441	5.581	-0.079	0.937	-11.379 ~ 10.498
	φ_4	0.151	6.182	0.024	0.980	-11.965 ~ 12.268
	φ_5	0.462	8.711	0.053	0.958	-16.611 ~ 17.536
	φ_6	-0.464	3.471	-0.134	0.894	-7.266 ~ 6.338
	φ_7	0.150	7.127	0.021	0.983	-13.819 ~ 14.118
	φ_8	-0.002	6.499	0	1	-12.740 ~ 12.736
	φ_9	-0.164	6.958	-0.024	0.981	-13.802 ~ 13.474
	φ_{10}	0.160	8.073	0.02	0.984	-15.662 ~ 15.982
	φ_{11}	-0.062	9.935	-0.006	0.995	-19.534 ~ 19.410
	φ_{12}	-0.003	6.266	0	1	-12.284 ~ 12.278
MA参数	θ_1	-0.701	18.193	-0.039	0.969	-36.359 ~ 34.957
	θ_2	-0.285	17.244	-0.017	0.987	-34.082 ~ 33.513
	θ_3	-0.195	9.347	-0.021	0.983	-18.515 ~ 18.124
	θ_4	0.052	6.699	0.008	0.994	-13.076 ~ 13.181
	θ_5	0.942	6.632	0.142	0.887	-12.057 ~ 13.940
	θ_6	-0.769	3.949	-0.195	0.846	-8.508 ~ 6.971
	θ_7	0.095	8.713	0.011	0.991	-16.982 ~ 17.172
	θ_8	-0.064	16.739	-0.004	0.997	-32.872 ~ 32.744
	θ_9	0.018	6.736	0.003	0.998	-13.184 ~ 13.221
	θ_{10}	0.270	0.951	0.284	0.776	-1.593 ~ 2.133
	θ_{11}	-0.293	0.940	-0.312	0.755	-2.135 ~ 1.549
	θ_{12}	0.100	0.904	0.111	0.912	-1.672 ~ 1.872

注: AIC值: -8.926; BIC值: -3.799。

3.5.2 ARIMA-LSTM模型预测对比分析

由图4可知:7条河的流域2022—2031年水生生态承载力指数基本呈缓慢上升趋势;2031年7条河

的流域水生态承载力指数为0.36,为基本承载水平。

各子流域中:2022—2031年,大清河、汾河、滹沱河、漳河流域ARIMA模型和LSTM模型预报结

果差别较小,可认为大清河、滹沱河、漳河流域 2022—2031 年水生态承载力呈小幅波动变化趋势,汾河流域 2022—2031 年水生态承载力呈显著上升趋势;桑干河、沁(丹)河、涑水河流域 2022—2031 年水生态承载力 ARIMA 模型和 LSTM 模型预报结果差异较大,桑干河流域 ARIMA 模型预报结果为 2022—2027 年水生态承载力基本呈缓慢上升,2028—2031 年缓慢下降趋势,LSTM 模型预报结果为 2022—2026 年、2030—2031 年水生态承载力呈下降趋势,2027—2029 年呈上升趋势;沁(丹)河流域 ARIMA 模型预报结果为 2022—2031 年水生态承载力呈显著上升趋势,LSTM 模型预报结果为 2022—2031 年水生态承载力变化为单谷单峰型,范围在 0.2~0.3,呈小幅波动趋势;涑水河流域 ARIMA 模型预报结果为 2022—2031 年水生态承载力呈显著上升趋势,LSTM 模型预报结果为 2022—2031 年水生态承载力指数在 0.02~0.3 大幅波动,呈双峰双谷型。因此,ARIMA 模型和 LSTM 模型预报结果表明,2022—2031 年桑干河、沁(丹)河、涑水河流域水生态承载力指数变化趋势存在较大不确定性。根据 ARIMA 模型和 LSTM 模型预报结果,预计到 2031 年,大清河、滹沱河、桑干河、漳河水生态承载力等级均为基本承载,汾河水生态承载力等级为最佳承载,沁(丹)河、涑水河承载力等级因模型预报结果差异较大尚无定论。

表 7 ARIMA-LSTM 模型预测值平均绝对百分比误差

Tab. 7 Average mean absolute percentage error of ARIMA-LSTM model forecast values

模型	大清河	滹沱河	汾河	沁(丹)河	桑干河	涑水河	漳河	7条河
ARIMA模型	0.110	0.035	0.098	0.075	0.041	0.160	0.071	0.044
LSTM模型	0.026	0.005	0.281	0.496	0.249	0.004	0.007	0.055

4 结论

通过主成分分析和熵权法筛选建立的指标体系可有效评估 7 条河的流域水生态承载力变化情况。从评估结果来看:7 条河的流域水生态承载力指数在 0.24~0.29 波动,呈一般超载状态;各子流域中,汾河流域水生态承载力呈显著上升趋势,其他流域承载力变化不显著。2011—2021 年,汾河流域水生态承载力状态总体为基本承载,其他流域均为一般超载级别。ARIMA-LSTM 模型预测结果表明:未来 10 年内,汾河流域水生态承载力呈显著上升趋势,涑水河、沁(丹)河流域水生态承载力存在较大不确

表 6 ARIMA 模型 Ljung-Box Q 检验统计量 (以 7 条河的流域为例)Tab. 6 ARIMA model Ljung-Box Q test statistics table for the seven rivers basins

项	统计量	p 值
Q_1	0.508	0.476
Q_2	1.766	0.414
Q_3	1.775	0.62
Q_4	1.908	0.753
Q_5	2.209	0.82
Q_6	2.407	0.879
Q_7	2.407	0.934
Q_8	2.480	0.963

3.5.3 ARIMA-LSTM 模型预测效果检验

ARIMA 模型和 LSTM 模型预测效果可通过平均绝对百分比误差(mean absolute percentage error, MAPE)来判断^[33]。7 条河的流域中,ARIMA 模型水生态承载力预测值的 MAPE 在 0.035(滹沱河流域)~0.160(涑水河流域);LSTM 模型水生态承载力预测值的 MAPE 在 0.004(涑水河流域)~0.496(沁(丹)河流域)(表 7);除大清河、滹沱河、涑水河、漳河及 7 条河流域以外,ARIMA 模型和 LSTM 模型对其余流域预测值的 MAPE 差异较大。与 LSTM 预测结果相比,ARIMA 模型对各子流域误差值及变化幅度较小,说明 ARIMA 模型对 7 条河的流域水生态承载力预测的稳定性较好。

定性,其余流域水生态承载力呈不同幅度波动趋势。预计 2031 年左右,各流域水生态承载力指数将有不同程度提升。

7 条河的流域水生态承载力指数受水环境指数和水资源指数影响最大,自然生境和人类支持力指标对流域水生态承载力影响次之。如水资源指标中的人均水资源量、人均用水量,水环境指标中的废污水排放量、单位土地 COD 排放量,自然生境指标中的自然保护区面积、绿化覆盖率以及人类支持力指标中的第三产业产值均为影响 7 条河的流域水生态承载力大小的关键因素。因此,建议引入更多以上类型相关指标对水生态承载力的影响开展研究。

参考文献:

- [1] MARTIN Z. B, ROBERT H. S. Engineering geology and soil bearing capacity assessment: A review[M]. Elsevier's Engineering Geology Journal, Amsterdam, 2015.
- [2] HUDAK A T. Rangeland mismanagement in South Africa: Failure to apply ecological knowledge[J]. *Human Ecology*, 1999, 27(1): 55-78. DOI: 10.1023/A:1018705300730.
- [3] SHI Y, SHI S, WANG H. Reconsideration of the methodology for estimation of land population carrying capacity in Shanghai metropolis[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 652: 367-381. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.10.210.
- [4] XIANG Y Y, MENG J J. Research and application advances in ecological carrying capacity[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(11): 2958-2965. DOI: 10.7515/JEE181009.
- [5] DAILY, G. C. Eds. Nature's service: Societal dependence on natural ecosystem [M]. Island Press, Washington. 1997.
- [6] WACKERNAGEL M, REES W E. Perceptual and structural barriers to investing in natural capital economics from an ecological footprint perspective[J]. *Ecological Economics*, 1997, 20(1): 3-24. DOI: 10.1016/S0921-8009(96)00077-8.
- [7] 刘士锐. 郑州市生态承载力综合评估研究[D]. 郑州: 河南大学, 2014.
- [8] GAO X H, XU W H, LIN Y C, et al. Review on evaluation methods and indices of regional ecological carrying capacity[J]. *Journal of Human Settlements in West China*, 2021, 36(1): 57-65. DOI: 10.13791/j.cnki.hsfwest.20210108.
- [9] WILLIS K. J, JEFFERS E. S, TOVAR C, et al Determining the ecological value of landscapes beyond protected areas[J]. *Biological Conservation*, 2012, 147(1): 3-12. DOI: 10.1016/j.biocon.2011.11.001.
- [10] 卢开东, 王健健, 马燮铤, 等. 基于DPSIR模型的芜湖市水生态承载力研究与建议[J]. *环境工程技术学报*, 2022, 12(2): 538-545. DOI: 10.12153/j.issn.1674-991X.20210666.
- [11] 杜芳, 彭剑峰, 王亚俊, 等. 北运河北京段水生态承载力研究及关键控制要素识别[J]. *环境科学研究*, 2021, 34(10): 2369-2379. DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2021.05.31.
- [12] 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): 291-304. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.03.038.
- [13] 钟艳霞, 陈锋, 洪涛. 基于生态环境遥感解译的石河子市水资源优化配置研究[J]. *哈尔滨工业大学学报(社会科学版)*, 2018, 20(3): 120-128. DOI: 10.16822/j.cnki.hitskb.20180306.002.
- [14] 张金良, 曹智伟, 金鑫, 等. 黄河流域发展质量综合评估研究[J]. *水利学报*, 2021, 52(8): 917-926. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20201088.
- [15] 闫立山. 浅谈新疆水资源开发利用与生态环境保护[J]. *地下水*, 2020(42): 186-187. DOI: 10.19807/j.cnki.DXS.2020-03-068.
- [16] 杜俊平, 陈年来, 叶得明. 干旱区水资源与区域经济协调发展时空特征研究: 以河西走廊为例[J]. *中国农业资源与区划*, 2017, 38(4): 161-169. DOI: 10.7621/cjarrp.1005-9121.20170424.
- [17] 梁变变, 石培基, 周文霞, 等. 河西走廊城镇化与水资源效益的时空格局演变[J]. *干旱区研究*, 2017, 34(02): 213-224. DOI: 10.13866/j.azr.2017.02.30.
- [18] 聂春霞, 何伦志, 甘昶春. 城市经济、环境与社会协调发展评估: 以西北五省区为例[J]. *干旱区地理*, 2012, 35(3): 517-525. DOI: 10.13826/j.cnki.cn65-1103/x.2012.03.022.
- [19] 马涵玉, 黄川友, 殷彤, 等. 系统动力学模型在成都市水生态承载力评估方面的应用[J]. *南水北调与水利科技*, 2017, 15(4): 101-110. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2017.04.0117.
- [20] 许丽婷, 刘海红, 黄丽洁, 等. 2000—2020年汾河流域生态环境与水源涵养时空变化[J]. *干旱区研究*, 2023, 40(2): 313-325. DOI: 10.13866/j.azr.2023.02.15.
- [21] 丁相毅, 石小林, 凌敏华, 等. 基于“量-质-域-流”的太原市水资源承载力评价[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2022, 20(1): 09-20. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2022.0002.
- [22] 刘丹, 王丽萍, 李荣波, 等. 基于水资源系统健康的区域水资源承载力评价[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2015, 13(2): 214-219. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2015.02.006.
- [23] 任晓庆, 杨中文, 张远, 等. 滦河流域水生态承载力评估研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2019, 30(5): 72-79. DOI: 10.11705/j.issn.1672-643X.2019.05.12.
- [24] 杨亚锋, 闫佳伟, 王红瑞, 等. 长江经济带水环境承载力时空变化特征[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2022, 20(4): 714-723. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2022.0073.
- [25] RONG Q Q, CAI Y P, SU M R, et al. Identification of the optimal agricultural structure and population size in a reservoir watershed based on the water ecological carrying capacity under uncertainty[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 234: 340-352. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.06.179.
- [26] ZHANG X Y, ZHU J W, XIE J C, et al. Selection of an evaluation index for water ecological civilizations

- of water-shortage cities based on the grey rough set[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2017, 82: 012079. DOI: 10.1088/1755-1315/82/1/012079.
- [27] FAN X H, LI Q G, XU Z. Green credit risk assessment under the background of water ecological civilization city construction: Based on BP neural network model[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, 446(3): 1154-1166. DOI: 10.26914/c.cnkihy.2019.106897.
- [28] 张雯婕, 岳启蒙, 温河青, 等. 水生态文明城市建设评价方法及其应用研究[J]. *北京师范大学学报: 自然科学版*, 2020, 56(2): 315-323. DOI: 10.12202/j.0476-0301.2020128.
- [29] 周彬, 赵宽, 钟林生, 等. 舟山群岛生态系统健康与旅游经济协调发展评价[J]. *生态学报*, 2015, 35(10): 3437-3446. DOI: 10.5846/stxb201404020617.
- [30] 赵宏波, 马延吉. 东北粮食主产区耕地生态安全的时空格局及障碍因子: 以吉林省为例[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(2): 515-524. DOI: 10.13287/j.1001-9332.2014.0055.
- [31] 王秦, 张艳, 杨永芳. 雄安新区资源环境承载力评价指标体系研究[J]. *环境科学与技术*, 2020, 43(5): 203-212. DOI: 10.19672/j.cnki.1003-6504.2020.05.028.
- [32] 林旭杰, 孟祥瑞. 基于ARIMA时间序列的瓦斯浓度预测研究[J]. *黑龙江工业学院学报(综合版)*, 2022, 22(7): 77-83. DOI: 10.16792/j.cnki.1672-6758.2022.07.011.
- [33] 王军, 马小越, 张宇航, 等. 基于SSA-LSTM模型的黄河水位预测研究[J]. *人民黄河*, 2023, 45(9): 158-162. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2023.09.011.

Assessment of water ecosystem carrying capacity in seven rivers basins in Shanxi Province

YUE Jiang¹, WANG Hongxia^{2,3}, WANG Xinru⁴, WANG Xiaolan¹, GUO Wei¹

(1. Shanxi Meteorological Institute, Taiyuan 030002, China; 2. North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 3. Shanxi Water Conservancy Vocational and Technical College, Taiyuan 030032, China; 4. Beijing Initial-null Design Consultation Limited Company, Beijing 100166, China)

Abstract: The objective of this study is to establish a unified evaluation system for water ecosystem carrying capacity in multiple river basins, which can scientifically analyze, compare, and predict the changes in water ecosystem carrying capacity. This will further enable the proposal of targeted measures for water ecosystem restoration.

Principal component analysis (PCA) and entropy weighting method were used to establish the evaluation indicator system. A fuzzy comprehensive evaluation method was introduced to classify the water ecosystem carrying capacity assessment levels. The ARIMA model was utilized to predict the changes in water ecosystem carrying capacity in the seven rivers basins.

From 2011 to 2021, the water ecosystem carrying capacity in the seven rivers basins was generally at an overloaded level. Among them, the Fen River basin showed a significant upward trend, reaching the level of basic sustainability. The remaining basins exhibited insignificant changes in water ecosystem carrying capacity and were classified as generally overloaded. Through the analysis of the contribution rates of evaluation indicators, it was found that the water environmental index and water resources index had a significant impact on the water ecosystem carrying capacity in the selected basins. The ARIMA prediction results indicate that from 2022 to 2031, the water ecosystem carrying capacity of the Fen River, Shushui River, and Qin (Dan) River will continue to increase, leading to an overall improvement in the carrying capacity of each basin.

The unified evaluation system in multiple river basins provides a scientific assessment of the water ecosystem carrying capacity of the seven rivers basins in Shanxi Province. Additionally, the ARIMA model proves to be a suitable tool for predicting future trends in water ecosystem carrying capacity changes across multiple river basins.

Key words: ARIMA-LSTM model; fuzzy comprehensive evaluation method; water ecological carrying capacity; trend forecast