

基于水代谢和水循环理论的石羊河流域 水资源承载力评价

贾玉博^{1,2}, 杨宏伟³, 粟晓玲^{1,2}, 褚江东^{1,2}, 徐吉海³

(1. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 3. 甘肃省水利厅石羊河流域水资源利用中心, 甘肃 武威 733000)

摘要: 基于水代谢和水循环理论, 构建了包含输入、消耗、活力、调节、输出5个子系统的水资源承载力评价指标体系, 采用最小二乘法组合网络层次分析法和熵权法确定权重, 基于可变模糊集模型综合评价了石羊河流域2011—2020年水资源承载力, 耦合高斯混合回归模型和3种可解释性机器学习方法量化了各评价指标对承载力的影响, 从全局和局部尺度探究了其与水资源承载力的关系。结果表明: 2011—2020年流域水资源承载力总体呈波动向好态势, 但仍处于濒临超载的状态, 评分值由2011年的3.79增长到2013年的4.18, 之后下降到2020年的3.23; 高斯混合回归模型能够较好地处理高维、小样本的水资源承载力指标数据; 单位面积农业灌溉用水量、污水处理回用率、生态环境用水率、水资源开发利用、产水模数和地下水开采率是该流域水资源承载力的主要影响因素; 从全局看, 水资源承载力与主要影响因素呈非线性关系, 并随其非单调变化, 从局部看, 2011—2015年主要影响因素多表现为对水资源承载力的抑制作用, 2016—2020年逐步转为促进作用; 流域水资源承载力虽有提高, 但仍需加强水资源开发利用管理, 降低地下水开采率。

关键词: 水资源承载力; 可变模糊集; 高斯混合回归模型; 水代谢和水循环理论; 石羊河流域

中图分类号: TV213.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-6933(2024)05-0086-09

Water resources carrying capacity evaluation in the Shiyang River Basin based on theories of water metabolism and water cycle//JIA Yubo^{1,2}, YANG Hongwei³, SU Xiaoling^{1,2}, CHU Jiandong^{1,2}, XU Jihai³ (1. Key Laboratory for Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Area of Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 3. Shiyang River Basin Water Resources Utilization Center, Gansu Provincial Water Resources Department, Wuwei 733000, China)

Abstract: A water resources carrying capacity evaluation index system consisting of five subsystems, including input, consumption, vitality, regulation, and output, was constructed based on the theories of water metabolism and water cycle. The weights of different indicators were determined using the least squares method, together with the analytic hierarchy process and entropy weight method, and the water resources carrying capacity of the Shiyang River Basin was comprehensively evaluated using the variable fuzzy set model. The Gaussian mixture regression model was coupled with three interpretable machine learning methods to quantify the impact of each evaluation indicator on the water resources carrying capacity, and explore their relationships on both global and local scales. The results indicate that from 2011 to 2020, the water resources carrying capacity of the river basin showed an improving trend with fluctuation, but it was still on the verge of overload. The score of water resources carrying capacity increased from 3.79 in 2011 to 4.18 in 2013, and then decreased to 3.23 in 2020. The Gaussian mixture regression model performed well in handling high-dimensional and small-sample water resources carrying capacity indicator data. Indicators, including per-unit water consumption for agricultural irrigation, reuse rate of sewage treatment, water consumption rate of ecological environment, water resources development and utilization rate, water production modulus, and groundwater exploitation rate are the dominant factors restricting the water resource carrying capacity of the river basin. From a global perspective, there was a non-linear relationship between water resources carrying capacity and the dominant factors, and water resources carrying capacity

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD1900501); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2023HHZX004)

作者简介: 贾玉博(2001—), 男, 硕士研究生, 主要从事水文水资源研究。E-mail: jyb01@nwfau.edu.cn

通信作者: 粟晓玲(1968—), 女, 教授, 博士, 主要从事水文水资源研究。E-mail: xiaolingsu@nwfau.edu.cn

changed non-monotonically with those indicators. From a local perspective, the dominant factors tended to inhibit water resource carrying capacity from 2011 to 2015, while they gradually shifted to promotion factors from 2016 to 2020. Although the water resource carrying capacity in the river basin has been improved, it is necessary to strengthen the management in water resources development and utilization and reduce groundwater extraction rate in future.

Key words: water resources carrying capacity; variable fuzzy set; Gaussian mixture regression model; theories of water metabolism and water cycle; Shiyang River Basin

水是人类生存的基本资源,水资源可持续利用是实现经济社会持续发展和生态系统健康的前提,而流域水资源承载力评价作为可持续发展和水资源安全战略研究的基础,对流域系统可持续发展具有重要意义。石羊河流域地处欧亚大陆腹地,是西北内陆干旱区与东部季风的交汇过渡带,降水量偏低,蒸发强烈^[1],干旱缺水是制约区域可持续发展的主要因素。20世纪80年代以来,流域农田面积扩大,导致农业用水增加,挤占了生态用水^[2],同时水资源过度开发,导致流域下游径流量急剧减少甚至断流,尾间湖消失,荒漠化面积增大,生态环境日益恶化。尽管2007年国务院批准实施《石羊河流域重点治理规划》后,水资源状况和生态环境有所改善,但距离高效节水农业和适水发展的要求仍有一定的差距。因此,亟须科学、全面地评价流域水资源承载力,并揭示水资源承载力的主要影响因素,为流域水资源可持续利用和有效保护提供科学依据和决策支持。

建立科学合理的评价指标体系是水资源承载力研究的首要工作,众多学者在水资源承载力评价指标体系构建方面开展了研究。指标体系构建通常基于两种方式:①通过收集以往研究中使用频度高的指标,采用统计方法将其约简、整理成评价指标体系^[3],但其完全依赖于统计方式,缺乏理论基础;②基于某理论或视角构建,如Zhang等^[4]基于二元水循环视角建立了包含水生态、水质、水量和水利用4个指标层的水资源承载力评价模型,Ren等^[5]结合生物代谢的相关理论,提出了区域水代谢理论,并将其应用于水资源承载力评价研究中。水循环理论更侧重于水文变量的转换和水资源在输入、输出端的互馈过程,缺乏对取用水等水代谢过程的表征;水代谢理论则忽略了污水的再生利用以及经过蒸发和降雨等自然循环过程再次作为流域水资源输入的水循环过程。两种方式各有缺陷,因此亟须将水代谢与水循环理论相结合,建立更加科学和全面的评价指标体系,为准确评价流域水资源承载力奠定基础。

深入探究水资源承载力的主要影响因素对提升水资源承载力具有重要意义,现有研究多采用障碍度模型^[6-8]或灰色关联度模型^[9-10]。障碍度模型通过计算指标值与最优目标值之间的偏差程度确定水

资源承载力的影响因素,具有客观、运算量小的优点^[11]。然而,水资源承载系统是一个复杂的巨系统,因素间相互作用和影响,该模型计算过程不能体现因素与承载力的复杂关系,其结果可能难以全面表征影响水资源承载力的主要因素。灰色关联度模型根据因变量和目标变量的变化趋势相似程度衡量二者的关联性,但其忽略了因变量之间的相互作用,可能导致结果不准确。可见,上述方法虽可以识别主要影响因素,但水资源承载系统因素间的复杂关系降低了其准确性,且在反映水资源承载力的影响机制方面存在一定的局限性,需要更深入研究因素与水资源承载力之间的动态关系。近年来,基于可解释性机器学习模型,学者们将机器学习模块与可解释性模块相耦合,揭示复杂系统中的潜在关系,并深入挖掘底层机制^[12-13]。

本文将水代谢和水循环理论结合,构建了包含输入、消耗、活力、调节、输出5个子系统的水资源承载力评价指标体系,建立了基于可变模糊集法的水资源承载力综合评价模型,并耦合高斯混合回归(Gaussian mixture regression, GMR)模型^[14]和3种可解释性机器学习方法识别水资源承载力主要影响因素,从全局和局部视角揭示影响因素与水资源承载力的动态关系,以期对石羊河流域水资源可持续利用提供科学依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

石羊河流域(图1)位于甘肃省河西走廊东南部,地处乌鞘岭以西,祁连山以北,处于36°29'N~39°27'N、101°41'E~104°16'E之间。流域自东向西由大靖河、古浪河、黄羊河等8条河流和众多小沟小河组成,总面积约为4.16万km²。流域属温带大陆性干旱气候,具有降水稀少、蒸发强烈、空气干燥和温差大等特点,是甘肃工农业发达、人口集中、水资源供需矛盾突出、生态恶化程度最严重的区域之一,也是西北干旱区人水关系不协调的典型区域^[15]。

1.2 数据来源

评价指标数据主要来源于甘肃省2011—2020年水资源公报和水利发展统计公报(<http://slt.gansu.gov.cn/slt/c106726/c106732/c106773/>)

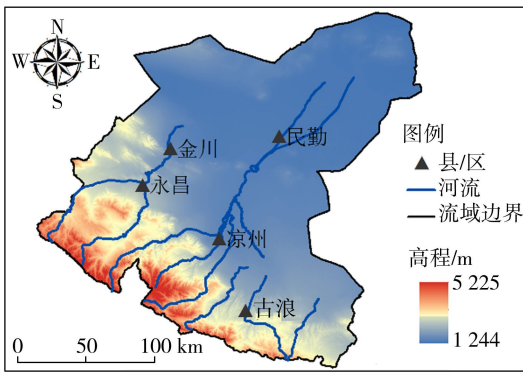


图1 研究区概况

Fig. 1 Overview of study area

zcfg.shtml)。水域面积率数据来源于武汉大学遥感团队发布的土地利用数据集^[16]。2011—2013年和2014—2020年植被覆盖数据分别来自Landsat7和Landsat8影像,并基于谷歌地球引擎遥感云计算平台进行数据筛选、去云、掩膜处理。

2 研究方法

2.1 水代谢和水循环理论

区域水代谢描述了人类与水资源之间的关系,将城市系统中包括农业、工业、家庭和商业在内的各个部门资源流动概念化^[17-18],揭示了人类与自然系统之间的密切联系。区域水代谢更关注水资源从区域外部输入到系统内部,最终以水污染物的形态输出至自然环境的线性流过程。水循环主要表现为水在自然界中通过蒸发、水汽输送、凝结降落、下渗和径流等不断进行的周期性水文过程,以及人类在生产生活中对水资源的管理^[19],如通过污水处理、再生水利用等技术提高水资源利用率。在水代谢系统中,水资源通过管道等水利设施在各用水部门之间流动,产生的污水经过净化处理后在社会水循环中重新利用,而未被利用的水资源经过自然循环过程再次成为流域的水资源输入。可见,水代谢和水循环较为科学地表现了人水关系。

2.2 评价指标体系构建

本文综合考虑指标的科学性、系统性、动态性、可比性、可获得性等原则^[20-21],结合流域干旱半干旱的气候特点和水资源供需状况,从水资源承载力内涵出发,将流域作为大的有机体,构建包含输入、消耗、活力、调节、输出5个子系统的水资源承载力评价指标体系,如图2所示(图中*表示负向指标)。5个子系统相互关联,输入层仅考虑水资源的输入,为消耗层提供了初级水资源,包括降水、地表水、地下水、再生水等,主要与流域水资源条件、利用方式等有关;消耗是水资源代谢的主要表现形式之一,消

耗层指标反映了水资源消耗转化为各种生产生活所需产品的过程;活力层指标是水资源代谢的催化剂,涉及消耗层中水资源的分配和转化过程,影响水代谢和水循环的强度,促进或阻碍水资源承载力的提升;调节层对流域水资源量和质具有保障作用并影响输入层中水资源分配,满足消耗层不同时间段对水资源的需求;输出层涉及的指标是其他4层相互作用产生的价值和废弃物排放量。水的资源属性是水资源承载力的理论基础^[22],相应地基于水代谢和水循环理论的指标体系从本质上反映了水的资源属性,一方面考虑了水资源被人类经济活动与自然环境消耗,以承载一定经济社会和生态环境规模;另一方面考虑了影响水资源量、质以及利用效率的多维因素,如经济社会发展和人类生产生活需求变化等。

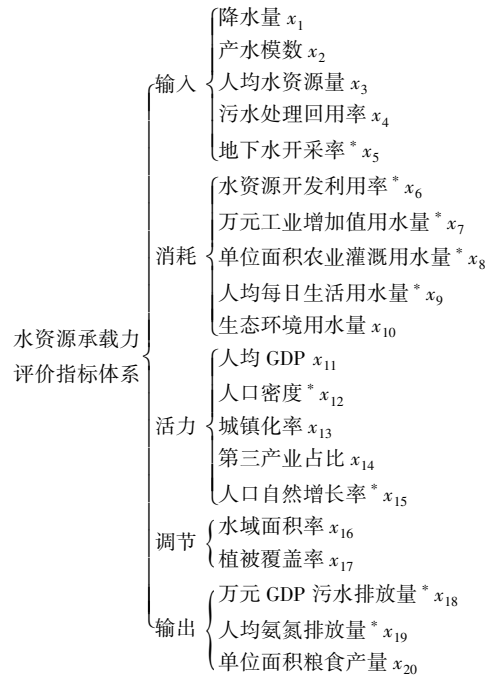


图2 水资源承载力评价指标体系

Fig. 2 Water resources carrying capacity evaluation index system

参考文献^[23-25],结合流域水资源状况和GB 3838—2002《地表水环境质量标准》、GB/T 50331《城市居民生活用水量标准》等标准规范,确定了水资源承载力评价标准。该标准将水资源承载力水平划分成I~V级,分别对应承载盈余、承载适宜、濒临超载、轻度超载和严重超载,相应的评价指标分级标准如表1所示。

2.3 指标权重计算

由于操作简单、实用性强等优点,层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)广泛应用于指标权重的确定^[26-27]。相比于传统AHP法,网络层次分析法(analytic network process, ANP)既摆脱了对层次结构的限制,又解决了具有相互依赖和反馈效应的

表 1 评价指标分级标准

Table 1 Evaluation index grading standard

等级	x_1/mm	$x_2/(\text{万 m}^3/\text{km}^2)$	x_3/m^3	$x_4/\%$	$x_5/\%$	$x_6/\%$	x_7/m^3
I 级	≥ 550	≥ 28	≥ 900	≥ 80	≤ 40	≤ 45	≤ 30
II 级	400~<550	18~<28	800~<900	70~<80	>40~50	>45~55	>30~70
III 级	250~<400	10~<18	700~<800	60~<70	>50~60	>55~65	>70~110
IV 级	100~<250	4~<10	600~<700	40~<60	>60~70	>65~75	>110~150
V 级	<100	<4	<600	<40	>70	>75	>150
等级	$x_8/(\text{m}^3/\text{hm}^2)$	x_9/L	$x_{10}/\%$	$x_{11}/\text{万元}$	$x_{12}/(\text{人}/\text{km}^2)$	$x_{13}/\%$	$x_{14}/\%$
I 级	≤ 200	≤ 60	≥ 5	≥ 6	≤ 50	≥ 70	≥ 60
II 级	>200~350	>60~75	3~<5	5~<6	>50~55	60~<70	50~<60
III 级	>350~500	>75~90	2~<3	4~<5	>55~60	50~<60	40~<50
IV 级	>500~650	>90~105	1~<2	3~<4	>60~65	40~<50	30~<40
V 级	>650	>105	<1	<3	>65	<40	<30
等级	$x_{15}/\%$	$x_{16}/\%$	$x_{17}/\%$	x_{18}/l	x_{19}/kg	$x_{20}/(\text{kg}/\text{hm}^2)$	
I 级	≤ 0.3	≥ 5	≥ 55	≤ 6	≤ 0.1	≥ 500	
II 级	>0.3~0.6	3~<5	45~<55	>6~8	>0.1~0.2	420~<500	
III 级	>0.6~0.8	2~<3	35~<45	>8~10	>0.2~0.3	360~<420	
IV 级	>0.8~1.0	1~<2	30~<35	>10~12	>0.3~0.4	300~<360	
V 级	>1.0	<1	<30	>12	>0.4	<300	

多准则分析问题^[28]。ANP 的网络关系可以表示准则之间的相关性,并计算每个控制层之间的极限影响,形成超矩阵。本文借助 SuperDecision3.20 软件,基于 ANP 法计算各指标的权重。

熵权法用于计算指标的客观权重^[29],ANP-熵权法是一种主观与客观赋权相结合的组合权重模型,可提高指标权重和评价结果的准确性。该方法可避免主观赋权的随意性,并考虑了样本数据的客观性。本文采用基于最小二乘法的 ANP-熵权法组合权重模型^[30]求解各指标的组合权重:

$$\begin{cases} \min F(w) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \{ [(w_{sj} - w_j)z_{ij}]^2 + [(w_{oj} - w_j)z_{ij}]^2 \} \\ \sum_{j=1}^m w_j = 1 \quad w_j \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $F(w)$ 为组合权重偏差; w_{sj} 、 w_{oj} 、 w_j 分别为指标 j 的主观权重、客观权重、组合权重; z_{ij} 为标准化后的数据矩阵元素; n 为评价对象总数; m 为指标总数。

2.4 水资源承载力评价模型

a. 可变模糊集模型。基于模糊数学的变量模糊评估方法是一种综合评估方法,具有清晰的系统结构。该方法将定性评价转化为定量评估,可以解决由多个因素影响的问题,更好地解决不确定性难题,适用于各种非确定性问题^[31]。该方法计算归一化隶属度的基本步骤详见文献^[32]。

b. 级别特征法。级别特征公式综合考虑各级别的隶属度信息和特征,能够更好地描述模糊概念的分级特征。级别特征的计算公式为

$$H = \sum_{k=1}^c kv_{Ak} \quad (2)$$

式中: H 为级别特征值,即水资源承载力评分值; k 为承载力级别; c 为承载力级别总数,本文中 $c=5$; v_{Ak} 为承载力级别 k 对应的归一化隶属度。

基于表 1 和水资源承载力评价模型可以得出对应于石羊河流域水资源承载力 I~V 级的评价价值分级标准分别为:0~<2、2~<2.51、2.51~<3.45、3.45~<4、4~<5。评分值越小,表示流域水资源承载力越高。

2.5 GMR 模型

GMR 模型是一种非线性回归模型,对于高维数据、小样本数据等具有良好的适应性^[14],具有参数模型的紧密结构,同时又保留了非参数模型的灵活性^[33]。其通过将目标变量的条件分布表示为多个高斯分布的加权组合,且每个高斯分布由其均值、方差和权重定义,以适应不同数据分布特征的情况。本文采用 GMR 模型拟合水资源承载力指标数据与承载力评分值的关系。GMR 模型的计算步骤详见文献^[34]。

贝叶斯优化自动调参方法具有提升算法性能、快速确定参数的优点^[35]。本文采用贝叶斯优化对 GMR 模型调参,选择均方根误差 (RMSE) 作为模型精度评估指标,通过 5 折交叉验证,将验证集上 RMSE 的均值作为模型参数优化的目标函数,最终得到的最优参数为:高斯分布的数量为 3 个,方差形式为共享协方差,其余参数均为默认参数。

为检验 GMR 模型的准确度和泛化能力,将包

含水资源承载力评价指标数据及评分值数据集按 8 : 2 的比例划分训练集和测试集,该过程重复执行 20 次,以确保结果的稳定性和可靠性。每次划分后,利用训练集数据对 GMR 模型进行训练,利用测试集数据评估模型性能。采用决定系数 (R^2)、RMSE 和平均值绝对误差 (MAE) 作为模型的定量评价指标。

2.6 可解释机器学习方法

经训练的 GMR 模型无法明确呈现水资源承载力指标数据与承载力评分值的关系,但对模型所得的拟合结果进行解释可以深入挖掘水资源承载力的影响机制。本文采用 3 种可解释的机器学习方法识别主要影响因素、可视化因素与水资源承载力的非线性关系,呈现各年份因素对水资源承载力的影响。

a. 基于交叉验证的排列特征重要性 (cross-validated permutation feature importance, CVPFI) 可解释性方法。排列特征重要性 (permutation feature importance, PFI) 方法基于对特征的随机重排,计算特征的重要性,评估模型中各个特征的贡献程度。而 CVPFI 方法在 PFI 方法的基础上考虑了特征之间的相关性,在样本量较少且特征之间存在相关性的情况下,能够稳定而准确地计算每个特征的贡献程度,具体计算步骤详见文献 [36]。

b. 基于累积局部效应 (accumulated local effects, ALE) 可解释性方法。ALE 方法旨在量化机器学习模型中单一个特征变量对模型预测结果的影响,其核心思想是将某个特征的值域划分为若干个离散区间,计算在每个区间内改变该特征值所带来的平均预测效应^[37]。该方法可以准确地表示特征值和预测结果之间的关系,以及特征值的变化对模型输出的影响程度。此外,由于 ALE 是无偏的,特征之间的相关性对 ALE 结果的影响不大^[38]。

c. 局部可解释-不可知模型 (local interpretable model-agnostic explanations, LIME)。LIME 通过构建一个可解释的局部线性模型拟合黑箱模型的预测结果,并在该局部模型中选择最具影响力的特征作为解释^[39],最后将所有局部模型的解释结果汇总,生成对整个黑箱模型预测结果的解释。LIME 基于 4 个步骤^[40]:①选择模型预测所要解释的输入数据中的一个样本;②在样本邻域内生成一组扰动数据,形成新的数据集;③利用黑箱模型预测每个扰动数据点的输出,并记录相应的输入特征;④在扰动后的数据集上训练加权的可解释模型,并通过解释局部模型来解释预测结果。

3 结果与分析

3.1 水资源承载力时序演化分析

基于组合权重模型得到 20 个指标 $x_1 \sim x_{20}$ 的组合权重分别为 0.035 8、0.028 7、0.096 1、0.053 3、0.038 9、0.074 1、0.086 4、0.031 6、0.024 6、0.035 9、0.038 1、0.059 3、0.024 1、0.063 0、0.047 1、0.086 0、0.040 7、0.054 7、0.059 5 和 0.020 1。石羊河流域 2011—2020 年水资源承载力级别特征评价结果如表 2 所示。

表 2 石羊河流域水资源承载力级别特征评价结果

Table 2 Evaluation results of water resources carrying capacity grade characteristics of the Shiyang River Basin

年份	评分值				平均	等级
	$a=1, p=1$	$a=1, p=2$	$a=2, p=1$	$a=2, p=2$		
2011	3.67	3.43	4.21	3.83	3.79	IV
2012	3.51	3.49	3.88	3.61	3.62	IV
2013	4.03	3.67	4.68	4.33	4.18	V
2014	3.74	3.48	4.28	3.91	3.85	IV
2015	3.79	3.56	4.13	3.96	3.86	IV
2016	3.43	3.35	3.56	3.56	3.48	IV
2017	3.22	3.21	3.18	3.28	3.22	III
2018	3.23	3.26	3.15	3.32	3.24	III
2019	3.12	3.18	3.01	3.20	3.13	III
2020	3.17	3.14	3.29	3.30	3.23	III

注: a 为优化准则参数; p 为距离参数, $p=1$ 时为线性模型, $p=2$ 时为非线性模型。

由表 2 可知,流域水资源承载力呈波动向好的趋势,评分值从 2011 年的 3.79 下降到 2020 年的 3.23,承载状态由最初的轻度超载甚至严重超载,逐渐在 2017 年后维持在濒临超载。这表明流域节水控水和生态治理等统筹治理措施取得了显著成效。2013 年的水资源承载力最差,评分值为 4.18,处于严重超载状态,这可能与该年降水量偏少有关。2013 年降水量为 169.3 mm,比多年平均降水量减少了 43.7 mm,相应地表水资源量比多年平均地表水资源量减少了 25.9%。2013 年是一个明显的转折点,在此之前,水资源承载力波动较大,2013 年后水资源承载力的评分值呈阶梯式递减,水资源承载力显著改善。2019 年水资源承载力最好,评分为 3.13。自 2013 年以来,流域内进一步推广了一系列高效节水和绿色增产技术,如优化作物种植结构、压缩作物种植面积、推行膜下滴灌和水肥一体化等高效节水节肥技术,这些技术的实施促进了流域农业生产方式从广种薄收、大水漫灌向以水定地、以水定种和按作物需水要求精确用水转变,有效提高了水资源承载力。同时,流域加大了生态保护力度,通过实施湿地公园和生态保护区等工程改善了生态环

境,促进了水资源承载系统的可持续发展。

3.2 GMR 模型评价结果

基于水资源承载力评价指标数据及评分值数据集,采用 R^2 、RMSE 和 MAE 对 GMR 模型进行定量评价,结果如图 3 所示。可以看出,GMR 模型模拟结果的 R^2 大于 0.86,且多数情况下大于 0.9, RMSE 和 MAE 分别小于 0.12 和 0.11,表明 GMR 模型在拟合水资源承载力指标数据与承载力评分值关系上具有较好的准确性。此外,这 3 项模型评价指标的波动较小,反映模型具有较高的泛化能力。对训练后的 GMR 模型进行解释,可以深入探究各因素对承载力的影响机制。

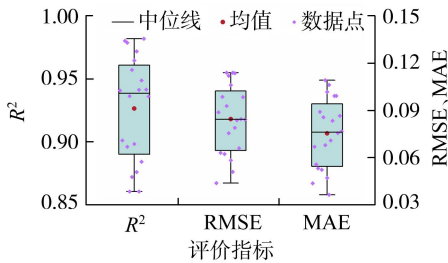


图 3 评价指标箱形图

Fig. 3 Box plots of evaluation indexes

3.3 水资源承载力的影响因素

采用 CVPFI 方法得到了影响水资源承载力的 6 个主要影响因素及其相对重要性。这 6 个主要影响因素分别为单位面积农业灌溉用水量(x_8)、污水处理回用率(x_4)、生态环境用水率(x_{10})、水资源开发利用利用率(x_6)、产水模数(x_2)和地下水开采率

(x_5),各因素的相对重要性分别为 23.29%、21.29%、18.44%、16.86%、12.94%和 7.18%。可见农业活动、人类对生态环境的保护、水资源开采程度以及当地水资源禀赋对流域水资源承载力有重要影响。

3.4 水资源承载力变化的全局解释

图 4 为采用 ALE 方法得到的主要影响因素对水资源承载力的影响,图中标出的点为样本点。ALE 值大于 0 表示影响因素对水资源承载力起抑制作用,小于 0 表示影响因素对水资源承载力起促进作用。

从图 4 可知,主要影响因素对水资源承载力的影响呈现出非线性和非单调的关系,同一因素在不同范围对水资源承载力的影响不同。农业灌溉用水量的增加对水资源承载力表现为抑制作用,其影响的临界值为 $496 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 。单位面积用水量小于 $496 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 时,对水资源承载力表现为促进作用,随着用水量增加,促进作用逐渐减弱,且在单位面积用水量为 $516 \sim 690 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 时,其抑制作用基本维持平稳,这一趋势可能是该范围内的样本数量较少所致;当单位面积用水量为 $690 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 时,又显现出进一步抑制趋势,这表明提高灌溉水利用率,优化作物种植结构,减少单位面积农业灌溉用水量有助于提高流域水资源承载力。污水处理回用率的提高对水资源承载力的促进效率整体呈现逐步增加的趋势,特别是当污水处理回用率约为 69% 后,对水资源承载力的改善作用显著。提高污水处理回用率

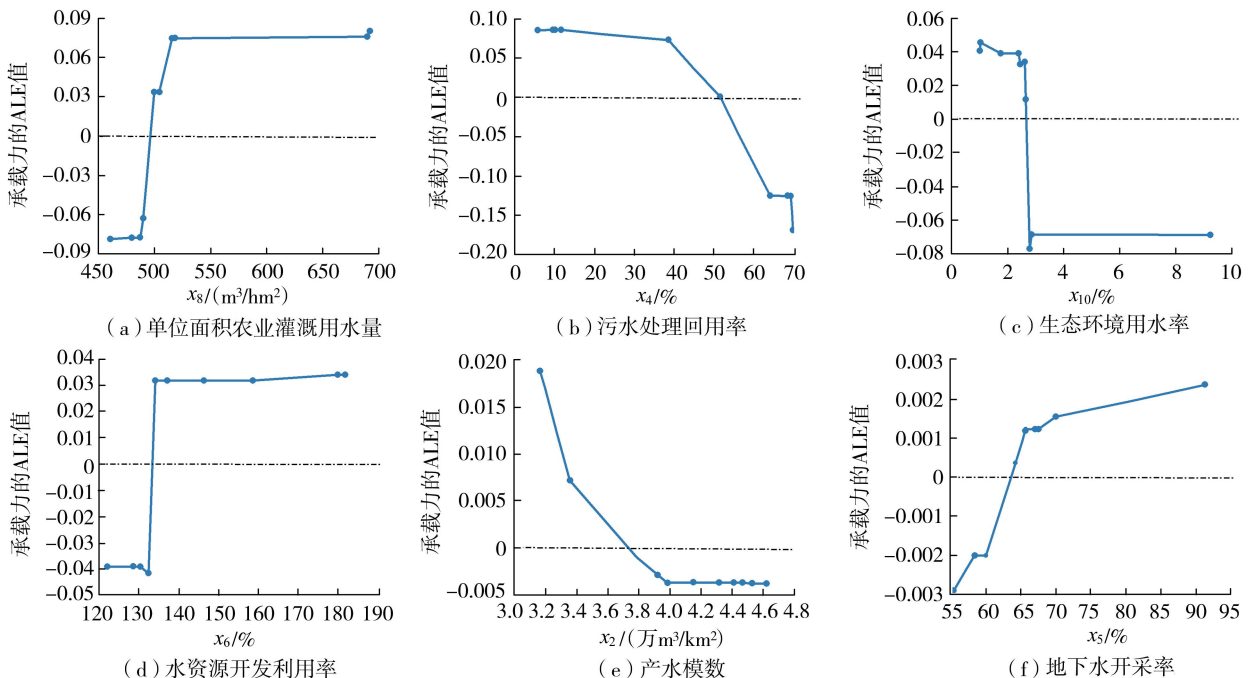


图 4 主要影响因素对水资源承载力的影响

Fig. 4 Influences of dominant factors on water resources carrying capacity

不仅可以缓解水资源紧缺现状还能减少污水中的有害物质,保护自然水体和生态环境。生态环境用水率对水资源承载力的影响趋势近似“乙”形,生态环境用水率约为 2.6% 时,水资源承载力的 ALE 值变化较为剧烈,水资源承载力对其较为敏感。在水资源开发利用率较低的情况下,增加水资源开发在短时间内不会导致水资源承载力恶化,但当开发利用率超过一定的阈值后,对水资源承载力转为抑制作用,因此应合理开发水资源。在产水模数方面,初始阶段的增大会明显改善水资源承载力,但当产水模数增大到 $3.98 \text{ 万 m}^3/\text{km}^2$ 后,对水资源承载力的影响趋于平稳。地下水开采率对水资源承载力的影响趋势与水资源开发利用率基本一致,尽管地下水增加了水资源承载系统的输入,但由于地下水储量相对有限,当地下水开采率大于 63% 时,对水资源承载力转为抑制作用,这表明过度开采地下水会导致地下水位下降和水质恶化,从而影响水资源的可持续利用,因此,应当将地下水开采率控制在 63% 以内。

3.5 水资源承载力变化的局部解释

表 3 为采用 LIME 得到的 2011—2020 年流域水资源承载力的 6 个主要影响因素排序。可以看出,2011—2015 年多数主要影响因素对水资源承载力表现为抑制作用;而 2016—2020 年多数主要影响因素对水资源承载力则表现为促进作用。这可能与“十三五”期间流域持续实施推进节水型社会建设,加强水资源及河湖管理保护,大力实施水生态治理与修复的一系列措施有关。除 2013 年外,单位面积农业灌溉用水量(x_8)和污水处理回用率(x_4)是影响水资源承载力的前两个因素。具体而言,2011—2015 年两者共同对水资源承载力产生负面影响,而从 2016 年开始,污水处理回用率转为正面影响,随后两者共同表现为正面影响,表明流域在协调生态与农业发展方面开展了积极的工作。值得注意的是,地下水开采率(x_2)和水资源开发利用率(x_6)的作用呈波动变化,表明地下水超采的情况尚未完全

表 3 2011—2020 年流域水资源承载力的主要影响因素排序
Table 3 Ranking of dominant factors of water resources carrying capacity in the river basin from 2011 to 2020

排序	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年
1	x_8	x_8	x_4	x_8	x_8	x_8	x_4^*	x_4^*	x_4^*	x_4^*
2	x_4	x_4	x_6	x_4	x_4	x_4^*	x_8^*	x_8^*	x_8^*	x_8^*
3	x_6	x_{10}	x_{10}	x_6^*	x_6	x_2^*	x_6^*	x_{10}^*	x_{10}^*	x_{10}^*
4	x_{10}	x_2^*	x_8^*	x_2^*	x_{10}	x_5^*	x_2^*	x_6^*	x_6^*	x_6
5	x_2	x_{17}	x_2	x_{18}	x_5	x_3	x_9^*	x_2^*	x_1^*	x_2
6	x_5	x_5	x_5	x_5	x_1	x_1	x_{11}	x_5^*	x_5	x_5

注: * 表示该指标对水资源承载力表现为促进作用,其他指标对水资源承载力表现为抑制作用。

改善,管理者应采取积极有效的措施提高水资源利用效率,降低水资源开发利用率和地下水开采率。

3.6 建议

石羊河流域水资源承载力影响机制的分析结果表明,单位面积农业灌溉用水量、污水处理回用率、生态环境用水率、水资源开发利用率、产水模数和地下水开采率是水资源承载力的主要影响因素,尽管污水处理回用率和生态环境用水率两个因素得到了提高,但地下水超采和水资源过度开发阻碍了流域水资源承载力的提升。此外,流域农业发展和生态保护之间的关系仍然是制约水资源承载系统健康发展的主要因素,平衡水资源、农业和生态之间的关系是流域未来可持续发展的重点。建议采取深度节水控水措施,提高农业灌溉用水效率,减少农业灌溉用水量,如推进“互联网+灌区”,采用空天地一体化网络技术实时监测土壤湿度和气象条件,根据需求调整灌溉制度,实现时空精准灌溉;改进灌区配套设施,积极建立国家高效节水示范区等。此外,应持续提高污水处理回用率,增加非常规水利用,合理开源、适度引调水,构建当地水、非常规水调配体系,加强应急备用水源建设,以保障区域供水安全。在水生态建设方面,应加强祁连山水源涵养与保护,保障生态环境用水,修复水生态环境,以提升流域生态廊道功能。在地下水管理和保护方面,应落实《甘肃省地下水超采区治理方案》,完善流域地下水取水总量和水位“双控”指标体系建立,加大超采治理的力度,逐步减小地下水开采率,确保地下水可持续利用。

4 结 论

a. 基于水代谢和水循环理论建立的评价指标体系为全面评价水资源承载力奠定了客观基础。石羊河流域水资源承载力评分值由 2011 年的 3.79 到 2020 年的 3.23,2013 年达到最大值 4.18,之后呈减小态势,表明承载力呈波动向好态势。2013 年后承载力提高趋势显著,但至今仍处于濒临超载的状态。

b. GMR 模型在处理高维和小样本水资源承载力数据方面有较高的预测精度与泛化性能。

c. 单位面积农业灌溉用水量、污水处理回用率、生态环境用水率、水资源开发利用率、产水模数和地下水开采率是流域水资源承载力的主要影响因素。从全局来看,主要影响因素与水资源承载力呈非线性和非单调的复杂关系,且同一因素在不同范围对水资源承载力的影响不同。从局部来看,2011—2015 年,多数主要影响因素表现为对水资源承载力的抑制作用;而 2016—2020 年逐步转变为促进作用。两者结合可以更好地理解石羊河流域水资源承

参考文献:

- [1] ZHU Guofeng, LIU Yuwei, SHI Peiji, et al. Stable water isotope monitoring network of different water bodies in Shiyang River Basin, a typical arid river in China [J]. *Earth System Science Data*, 2022, 14 (8) : 3773-3789.
- [2] ZHANG Wenhao, ZHU Guofeng, QIU Dongdong, et al. Effects of agricultural activities on hydrochemistry in the Shiyang River Basin, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 30 (5) : 12269-12282.
- [3] 薛辰影, 方红远, 吉久伟. 水资源承载力评价指标约简方法研究 [J]. *南水北调与水利科技*, 2019, 17 (3) : 23-30. (XUE Chenying, FANG Hongyuan, JI Jiwei. An index reduction method for water resources carrying capacity [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2019, 17 (3) : 23-30. (in Chinese))
- [4] ZHANG Shanghong, XIANG Mengshi, YANG Jiasheng, et al. Distributed hierarchical evaluation and carrying capacity models for water resources based on optimal water cycle theory [J]. *Ecological Indicators*, 2019, 101 : 432-443.
- [5] REN Chongfeng, GUO Ping, LI Mo, et al. An innovative method for water resources carrying capacity research: metabolic theory of regional water resources [J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, 167 : 139-146.
- [6] 董怡, 邹磊, 夏军, 等. 武汉市人水系统耦合协调发展及障碍因素识别 [J]. *水资源保护*, 2023, 39 (6) : 87-94. (DONG Yi, ZOU Lei, XIA Jun, et al. Coupling and coordinated development of human-water system in Wuhan City and identification of obstacle factors [J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39 (6) : 87-94. (in Chinese)) .
- [7] WANG Xiaoyan, ZHANG Silong, TANG Xiongpeng, et al. Research on water resources environmental carrying capacity (WRECC) based on support-pressure coupling theory: a case study of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area [J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 320 : 115805.
- [8] 李激, 姜珊, 赵勇, 等. 京津冀水-能源-粮食耦合系统安全评价 [J]. *水资源保护*, 2023, 39 (5) : 39-48. (LI Wei, JIANG Shan, ZHAO Yong, et al. Safety evaluation of water-energy-food coupling system in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39 (5) : 39-48. (in Chinese))
- [9] 刘玘玘. 基于熵权 TOPSIS-耦合协调度-灰色关联度的长江经济带水资源承载力综合评价 [J]. *武汉大学学报 (工学版)*, 2023, 56 (5) : 532-541. (LIU Honghong. Comprehensive evaluation of water resources carrying capacity in the Yangtze River Economic Belt based on entropy weight TOPSIS-coupling coordination degree-grey correlation degree [J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2023, 56 (5) : 532-541. (in Chinese))
- [10] 刘敏, 聂振龙, 王金哲, 等. 华北平原地下水资源承载力模糊综合评价 [J]. *水土保持通报*, 2014, 34 (6) : 311-315. (LIU Min, NIE Zhenlong, WANG Jinzhe, et al. Fuzzy comprehensive evaluation of groundwater resources carrying capacity in North China Plain [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2014, 34 (6) : 311-315. (in Chinese))
- [11] 吴明艳, 曾晓春, 刘兴德, 等. 基于熵权 TOPSIS 模型的西北五省区水资源承载力评价研究 [J]. *中国农村水利水电*, 2022 (12) : 78-85. (WU Mingyan, ZENG Xiaochun, LIU Xingde, et al. Research on the evaluation of water resources carrying capacity in five northwest provinces based on entropy TOPSIS model [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2022 (12) : 78-85. (in Chinese))
- [12] LUNDBERG S M, ERION G, CHEN H, et al. From local explanations to global understanding with explainable AI for trees [J]. *Nature Machine Intelligence*, 2020, 2 (1) : 56-67.
- [13] 王鹏新, 王颖, 田惠仁, 等. 基于 LightGBM 的冬小麦产量估测与可解释性研究 [J]. *农业机械学报*, 2023, 54 (12) : 197-206. (WANG Pengxin, WANG Ying, TIAN Huiran, et al. Interpretability on yield estimation of winter wheat based on LightGBM [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54 (12) : 197-206. (in Chinese))
- [14] 赵腾远, 宋超, 何欢. 小样本条件下江苏软土路基回弹模量的贝叶斯估计: 基于静力触探数据与高斯过程回归的建模分析 [J]. *岩土工程学报*, 2021, 43 (增刊 2) : 137-141. (ZHAO Tengyuan, SONG Chao, HE Huan. Bayesian estimation of resilient modulus of Jiangsu soft soils from sparse data: Gaussian process regression and cone penetration test data-based modelling and analysis [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, 43 (Sup2) : 137-141. (in Chinese))
- [15] 戴文渊, 郭武, 郑志祥, 等. 石羊河流域水生态安全影响因素及驱动机制研究 [J]. *干旱区研究*, 2022, 39 (5) : 1555-1563. (DAI Wenyuan, GUO Wu, ZHENG Zhixiang, et al. Water ecological security influence factor and driving mechanism research in Shiyang River Basin [J]. *Arid Zone Research*, 2022, 39 (5) : 1555-1563. (in Chinese))
- [16] YANG Jie, HUANG Xin. The 30m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019 [J]. *Earth System Science Data*, 2021, 13 (8) : 3907-3925.
- [17] SERRAO-NEUMANN S, RENOUF M A, MORGAN E, et al. Urban water metabolism information for planning water sensitive city-regions [J]. *Land Use Policy*, 2019, 88 : 104144.

- [18] YANG Xuechun, WANG Yutao, SUN Mingxing, et al. Exploring the environmental pressures in urban sectors: an energy-water-carbon nexus perspective [J]. *Applied Energy*, 2018, 228: 2298-2307.
- [19] ZHANG Shanghong, FAN Weiwei, YI Yujun, et al. Evaluation method for regional water cycle health based on nature-society water cycle theory [J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 551: 352-364.
- [20] 丁月龙, 高腾, 赵春子, 等. 哈长城市群水资源承载力时空格局及耦合协调度[J]. *中山大学学报(自然科学版)(中英文)*, 2023, 62(2): 146-155. (DING Yuelong, GAO Teng, ZHAO Chunzi, et al. The temporal-spatial pattern and coupling coordination degree of water resources carrying capacity in the Harbin-Changchun urban agglomeration [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2023, 62(2): 146-155. (in Chinese))
- [21] 王建华, 翟正丽, 桑学锋, 等. 水资源承载力指标体系及评判准则研究[J]. *水利学报*, 2017, 48(9): 1023-1029. (WANG Jianhua, ZHAI Zhengli, SANG Xuefeng, et al. Study on index system and judgment criterion of water resources carrying capacity [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2017, 48(9): 1023-1029. (in Chinese))
- [22] 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))
- [23] 崔毅, 唐慧彦, 金菊良, 等. 基于动态差异度系数的区域水资源承载力评价与诊断[J]. *水资源保护*, 2023, 39(5): 152-160. (CUI Yi, TANG Huiyan, JIN Juliang, et al. Evaluation and diagnosis of regional water resources carrying capacity based on dynamic difference degree coefficient [J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(5): 152-160. (in Chinese))
- [24] 高玉琴, 吴迪, 刘海瑞, 等. 城市化影响下区域水资源承载力评价[J]. *水利水电科技进展*, 2022, 42(3): 1-8. (GAO Yuqin, WU Di, LIU Hairui, et al. Evaluation of regional water resources carrying capacity under urbanization [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2022, 42(3): 1-8. (in Chinese))
- [25] 安莉娜, 范国福, 吴迪, 等. 基于水资源承载力与城市经济社会发展水平耦合协调度模型的遵义市发展评价[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2023, 51(2): 35-41. (AN Lina, FAN Guofu, WU Di, et al. Development evaluation of Zunyi City based on coupling coordination degree model of water resources carrying capacity and urban economic and social development level [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2023, 51(2): 35-41. (in Chinese))
- [26] 金菊良, 刘东平, 周戎星, 等. 基于投影寻踪权重优化的水资源承载力评价模型[J]. *水资源保护*, 2021, 37(3): 1-6. (JIN Juliang, LIU Dongping, ZHOU Rongxing, et al. Evaluation model of water resources carrying capacity based on projection pursuit weight optimization [J]. *Water Resources Protection*, 2021, 37(3): 1-6. (in Chinese))
- [27] 黄亦轩, 徐宗学, 陈浩, 等. 深圳河流域内陆侧洪涝风险分析[J]. *水资源保护*, 2023, 39(1): 101-108. (HUANG Yixuan, XU Zongxue, CHEN Hao, et al. Analysis on flood/waterlogging risk at inland side of the Shenzhen River Basin [J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(1): 101-108. (in Chinese))
- [28] KO Y Y, CHIU Y H. Empirical study of urban development evaluation indicators based on the urban metabolism concept [J]. *Sustainability*, 2020, 12(17): 7129.
- [29] 郑鹏鑫, 杨博, 王红瑞, 等. 长江经济带产业绿色发展等级评估[J]. *水资源保护*, 2023, 39(1): 142-149. (JIA Pengxin, YANG Bo, WANG Hongrui, et al. Evaluation of industrial green development level in Yangtze River Economic Belt [J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(1): 142-149. (in Chinese))
- [30] 徐存东, 王鑫, 刘子金, 等. 基于云模型的干旱扬水灌区地下水环境状态综合评价[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2021, 52(12): 166-177. (XU Cundong, WANG Xin, LIU Zijin, et al. Cloud model-based comprehensive evaluation of groundwater environmental status in arid pumping irrigation area [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2021, 52(12): 166-177. (in Chinese))
- [31] YANG Shuhong, YANG Tao. Exploration of the dynamic water resource carrying capacity of the Keriya River Basin on the southern margin of the Taklimakan Desert, China [J]. *Regional Sustainability*, 2021, 2(1): 73-82.
- [32] 陈建生, 何会祥, 王涛. 基于熵权-可变模糊集模型的堤坝渗漏探测[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2016, 44(4): 358-363. (CHEN Jiansheng, HE Huixiang, WANG Tao. Dam leakage detection based on entropy weight-variable fuzzy set model [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2016, 44(4): 358-363. (in Chinese))
- [33] WANG Guofeng, QIAN Lei, GUO Zhiwei. Continuous tool wear prediction based on Gaussian mixture regression model [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 66(9): 1921-1929.
- [34] LI Qinghua, ZHANG Lei, ZHANG Mengyao, et al. Robust human upper-limbs trajectory prediction based on Gaussian mixture prediction [J]. *IEEE Access*, 2023, 11: 8172-8184.

(下转第 157 页)

- nanoparticles as a green and sustainable catalyst for 4-nitrophenol reduction[J]. *Heliyon*,2023,9(3):e14111.
- [80] GAO Yue, XUE Yanan, ZHEN Kai, et al. Remediation of soil contaminated with PAHs and γ -HCH using Fenton oxidation activated by carboxymethyl cellulose-modified iron oxide-biochar [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2023,453:131450.
- [81] YANG Pinpin, GAO Yaqian, XUE Lefei, et al. Lignocellulose reconstituted shape-controllable self-supporting carbonaceous capacitance-anodes with high electron transfer rates for high-performance microbial electrochemical system [J]. *Bioresource Technology*, 2023,380:129072.
- [82] VUONG N M T, NGUYEN P T, NGUYEN T K O, et al. Application of Nano zero-valent iron particles coated by carboxymethyl cellulose for removal of Congo red dye in aqueous solution [J]. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*,2023,8:100469.
- [83] XI Yanni, XIE Tanghuan, LIU Yanfen, et al. Carboxymethyl cellulose stabilized ferrous sulfide @ extracellular polymeric substance for Cr(VI) removal: characterization, performance, and mechanism[J]. *Journal of Hazardous Materials*,2022,425:127837.
- [84] 王敏. 底物对微生物燃料电池产电性能及微生物群落结构的影响研究[D]. 青岛:中国海洋大学,2014.
- [85] MANZOOR N, CAO Lianbin, DENG Dandan, et al. Cellulase extraction from cellulolytic bacteria promoting bioelectricity production by degrading cellulose [J]. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 2018, 829: 241-248.
- [86] REN Z Y, WARD T E, REGAN J M. Electricity production from cellulose in a microbial fuel cell using a defined binary culture[J]. *Environmental Science & Technology*, 2007,41(13):4781-4786.
- [87] CAO Lianbin, MA Yamei, DENG Dandan, et al. Electricity production of microbial fuel cells by degrading cellulose coupling with Cr(VI) removal[J]. *Journal of Hazardous Materials*,2020,391:122184.
- (收稿日期:2023-12-15 编辑:王芳)

(上接第 94 页)

- [35] DAGASAN Y, RENARD P, STRAUBHAAR J, et al. Automatic parameter tuning of multiple-point statistical simulations for lateritic bauxite deposits [J]. *Minerals*, 2018,8(5):220.
- [36] KANEKO H. Cross-validated permutation feature importance considering correlation between features[J]. *Analytical Science Advances*,2022,3(9/10):278-287.
- [37] APLEYD W, ZHU Jingyu. Visualizing the effects of predictor variables in black box supervised learning models[J]. *Journal of the Royal Statistical Society Series B:Statistical Methodology*,2020,82(4):1059-1086.
- [38] XENOCHRISTOU M, HUTTON C, HOFMAN J, et al. Short-term forecasting of household water demand in the UK using an interpretable machine learning approach[J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2021,147(4):04021004.
- [39] RIBEIRO M, SINGH S, GUESTRIN C. “Why should I trust you?”: explaining the predictions of any classifier [C]//Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. San Francisco: Association for Computing Machinery,2016:1135-1144.
- [40] XU Chongchong, LIAO Zhicheng, LI Chaojie, et al. Review on interpretable machine learning in smart grid [J]. *Energies*,2022,15(12):4427.
- (收稿日期:2023-09-17 编辑:施业)

(上接第 140 页)

- [43] BROGI S R, HA S Y, KIM K, et al. Optical and molecular characterization of dissolved organic matter in the Arctic ice core and the underlying seawater (Cambridge Bay, Canada): implication for increased autochthonous dissolved organic matter during ice melting[J]. *Science of the Total Environment*,2018,627:802-811.
- [44] LIN Hui, GUO Laodong. Variations in colloidal dissolved organic matter composition with molecular weight within individual water samples as characterized by flow field-flow fractionation and EEM-PARAFAC analysis [J]. *Environmental Science & Technology*,2020,54(3):1657-1667.
- [45] CATALÁ T S, RECHE I, FUENTES-LEMA A, et al. Turnover time of fluorescent dissolved organic matter in the dark global ocean[J]. *Nature Communications*,2015,6:5986.
- [46] SHUTOVA Y, BAKER A, BRIDGEMAN J, et al. Spectroscopic characterisation of dissolved organic matter changes in drinking water treatment: from PARAFAC analysis to online monitoring wavelengths [J]. *Water Research*,2014,54:159-169.
- [47] YAMASHITA Y, SCINTO L J, MAIE N, et al. Dissolved organic matter characteristics across a subtropical wetland's landscape: application of optical properties in the assessment of environmental dynamics [J]. *Ecosystems*,2010,13(7):1006-1019.
- (收稿日期:2024-01-06 编辑:王芳)