

基于 HPO-SVM 模型的建三江地区水-土-能源-粮食耦合系统运行效率测度分析

刘 东^{1,2,3,4}, 周子贺¹, 张祥敏⁵, 张亮亮¹, 齐晓晨¹

- (1. 东北农业大学水利与土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150030;
2. 东北农业大学教育部寒地黑土生境健康国际合作联合实验室, 黑龙江 哈尔滨 150030;
3. 东北农业大学农业农村部农业水資源高效利用重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150030;
4. 东北农业大学黑龙江省寒区水資源与水利工程重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150030;
5. 黑龙江省泥河水库管理处, 黑龙江 兰西 151500)

摘要:为系统性评价北大荒集团建三江分公司水-土-能源-粮食(WLEF)耦合系统运行效率,基于R聚类-因子分析模型筛选了WLEF耦合系统运行效率评价指标体系的评价指标,构建猎食者优化算法改进支持向量机(HPO-SVM)模型评价了建三江分公司WLEF耦合系统运行效率,并对HPO-SVM模型性能进行了分析。结果表明:2002—2021年建三江分公司WLEF耦合系统运行效率总体呈波动上升趋势,年均增长率达3.24%,其空间分布表现出东南部高于西北部的态势;有效灌溉面积比重、人均农业产值、耕地生产率、单位面积农机投入指数、水利工程投资比重和万元GDP能耗是影响系统运行效率的关键驱动因子;与对比分析的另外两种模型相比,HPO-SVM模型在拟合性、稳定性、合理性以及评价精度等方面表现出显著优势。

关键词:WLEF耦合系统;猎食者优化算法;支持向量机;运行效率测度;建三江分公司

中图分类号:TV213.4

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2025)05-0247-11

Measurement and analysis of operation efficiency of regional Water-Land-Energy-Food coupling system based on HPO-SVM/LIU Dong^{1,2,3,4}, ZHOU Zihe¹, ZHANG Xiangmin⁵, ZHANG Liangliang¹, QI Xiaochen¹(1. School of Water Conservancy & Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China; 2. Joint International Research Laboratory of Habitat Health of Black Soil in Cold Regions, Ministry of Education, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China; 3. Key Laboratory of Effective Utilization of Agricultural Water Resources of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China; 4. Heilongjiang Provincial Key Laboratory of Water Resources and Water Conservancy Engineering in Cold Region, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China; 5. Heilongjiang Nihe Reservoir Management Office, Lanxi 151500, China)

Abstract: In order to systematically evaluate the water-land-energy-food (WLEF) coupling system operation efficiency in Jiansanjiang Branch of Beidahuang Group, the evaluation index of the comprehensive evaluation index system for the operational efficiency of the WLEF coupling system were screened based on the R-clustering-factor analysis model, and the operation efficiency of the WLEF coupling system of the Jiansanjiang Branch was evaluated by the hunter-prey optimization improved support vector machine (HPO-SVM) model, and the performance of the HPO-SVM model was analyzed. The results show that the operation efficiency of the WLEF coupling system in the Jiansanjiang Branch company has generally shown a fluctuating upward trend from 2002 to 2021, with an average annual growth rate of 3.24%, and its spatial distribution shows a trend of being higher in the southeast than in the northwest. The key driving factors affecting the efficiency of the system operation are the proportion of effective irrigation area, per capita agricultural output value, cultivated land productivity, agricultural machinery input index per unit area, the proportion of water conservancy project investment, and the energy consumption of ten thousand yuan GDP. Compared with the other two models of comparative analysis, the HPO-SVM model shows significant advantages in fitness, stability, rationality, and evaluation accuracy.

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFD1501004, 2024YFD1501700);国家自然科学基金项目(52179008, 52309012, 51579044, 41071053);黑龙江省自然科学基金联合引导项目(LH2023E003)

作者简介:刘东(1972—),男,教授,博士,主要从事水土资源优化利用与管理研究。E-mail:liudong5511@sina.com

通信作者:张亮亮(1990—),男,副教授,博士,主要从事农业水資源优化利用与管理研究。E-mail:zhangliangliang@neau.edu.cn

水、土地、能源和粮食作为必不可少的基础资源,是人类赖以生存和经济社会可持续发展的重要基础^[1]。预计到2050年,全球对水、土地、能源和粮食的需求将分别增长30%、10%、40%、70%^[2-6]。自2011年波恩会议后,传统单一资源管理模式在应对日益复杂的资源短缺和生态环境问题时,已显现出其局限性^[1]。为避免执行单一资源政策产生不利影响,应将水、土地、能源和粮食资源视为一个整体,推动四者间有效耦合和协同发展,以此保障区域资源高效利用^[7-8]。在此背景下,科学测度水-土-能源-粮食(water-land-energy-food, WLEF)耦合系统运行效率水平,探究其影响因素并提出优化路径,对于促进资源高质量协同发展,助力区域生态保护和农业可持续发展具有重要意义。

近年来,国内外学者围绕 WLEF 耦合系统的恢复力、可持续性和耦合协调度等视角开展了大量研究^[9-11]。例如:宋洁等^[12]基于系统工程与管理科学新视角,探索了智能决策赋能的水-能源-粮食耦合系统恢复力研究未来趋势;Ringer 等^[13]探讨了水、能源、土地资源稀缺对粮食安全的影响,发现提高 WLEF 耦合效率是实现可持续发展的关键;顾茉莉等^[14]分析了土地利用与水、能源和粮食间耦合协调机理,发现 WLEF 耦合系统协调发展有助于区域资源管理。Schaltegger^[15]首次将效率一词引入到生态系统中,用以评估生态系统运行状态与人类需求间的关系,此后这一概念被广泛应用于生态环境研究^[16-17]。然而,作为复杂开放巨系统^[18],目前少有学者从运行效率这一视角对 WLEF 耦合系统进行研究,难以科学把握系统平稳运行状态。

WLEF 耦合系统的评估方法多样,但传统模型或方法皆存在一定的局限性,直接应用将导致评价结果的可靠性不足,从而对关键驱动因子的精确识别造成负面影响。例如主成分分析法对数据细微变化较为敏感,导致评价结果的稳定性不足^[19];数据包络分析模型有较为明显的指标数量限制^[20];时空地理加权模型面对时空大数据激增时,计算效率面临瓶颈^[21];投影寻踪模型进行指标评价时,投影方向的物理意义不明确,导致评价结果解释性不足^[22];人工神经网络在拟合过程中收敛速度慢、稳定性较差^[23];随机森林模型在面对噪声较多的样本集时,存在泛化能力不足的问题^[24];极限学习机模型虽然通过随机初始化权重来避免过拟合,但仍存在对数据噪声敏感的问题^[25]。支持向量机(support vector

machines, SVM)模型凭借其坚实的理论基础和出色的泛化性能,在处理复杂数据时具有高准确性^[26],但其性能主要取决于惩罚参数 C 和核函数参数 G 的合理选取^[27]。相对而言,猎食者优化(hunter-prey optimization, HPO)算法具有收敛速度快、寻优能力强和鲁棒性高的优点,尤其适用于非线性、多峰等复杂函数的优化问题,在实践中取得了较好的效果^[28-29]。本文以运行效率为视角研究 WLEF 耦合系统,以北大荒集团建三江分公司(以下简称“建三江分公司”)为研究区,构建 HPO 算法改进的 SVM 模型(HPO-SVM 模型),即利用 HPO 算法优化 SVM 模型的惩罚参数 C 与核函数参数 G ,以提高 SVM 模型对区域 WLEF 耦合系统运行效率评价的精确度。在此基础上,分析研究区 WLEF 耦合系统运行效率的时空演变特征及可能成因,旨在为区域 WLEF 耦合系统运行效率的提升提供重要参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

建三江分公司(图1)位于黑龙江省东北部三江平原核心区,该地区是全球知名的三大黑土带之一,地处松花江、黑龙江与乌苏里江三江交汇的冲积平原地带。辖区总面积 1.24 万 km²,下设 15 个我国机械化程度较高的大中型农场,地区地势平坦,具备优良土壤条件及利于农作物生长的雨热同期气候,是我国重要的粮食产区^[24]。然而过度追求粮食增产、非可持续的能源利用模式、不科学的水肥管理导

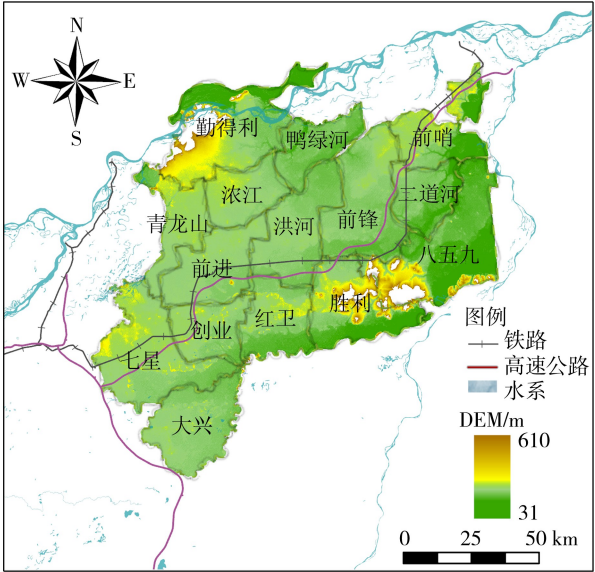


图1 研究区概况
Fig. 1 Overview of the study area

致的环境问题可能造成建三江分公司生态系统与农业产出间失衡^[30]。为提高 WLEF 耦合系统运行效率,促进区域农业可持续发展,开展建三江分公司 WLEF 耦合系统运行效率的研究工作刻不容缓。

1.2 数据来源

研究数据来源于《建三江农垦统计年鉴》(2002—2018 年)、《建三江管理局水利综合年报》(2002—2021 年)、《建三江分公司统计年鉴》(2019—2021)和《黑龙江垦区统计年鉴》(2003—2022 年)。其中,由《建三江管理局水利综合年报》整理计算得到灌溉用水量、水利工程投资投入量、水利工程年供水量、机电井数量、水土流失面积 5 个指标数据,通过《建三江农垦统计年鉴》《建三江分公司统计年鉴》查找相关农场人口数量、耕地面积与生产总值整理计算得到人均耕地面积、有效灌溉面积比重、单位面积化肥施用量、单位面积粮食产量、耕地生产率等涉及区域人口数量、总耕地面积与生产总值的指标数据,直接查找《建三江农垦统计年鉴》《建三江分公司统计年鉴》《黑龙江垦区统计年鉴》相关数据获取万元 GDP 能耗、粮食产量等指标数据。最终通过多源数据的交叉验证与计算,构建 WLEF 耦合系统运行效率评价指标体系。

1.3 WLEF 耦合系统运行效率内涵解析

自德国波恩会议界定水-能源-粮食耦合关系

后,学者在可持续发展的前提下对耦合系统研究向多元化的方向进行了拓展^[31]。目前,将 WLEF 耦合关系视为共同提高多种资源效率、优化协调多领域利益的分析方法和决策工具,已成为国内外学者的共识^[32-34]。系统运行效率指系统在资源消耗和产出效益之间达到最优平衡的能力^[35],由于 WLEF 耦合系统运行效率问题具备复杂性特征,需要界定其系统边界。基于建三江分公司作为我国重要的粮食产区这一背景^[24],本文将 WLEF 耦合系统运行效率界定为农业生产中自然生态承载力与农业产出间的平衡,其本质是农业生产中人与自然的和谐发展,其概念框架如图 2 所示。

本文基于上述 WLEF 耦合系统运行效率的内涵解析内容,结合建三江分公司区域状况,从水资源、土地资源、能源和粮食四大子系统切入,遴选涵盖自然环境、资源状况、经济水平及社会发展情况等方面的关键指标,构建具有系统性、层次性的 WLEF 耦合系统运行效率评价指标体系。

2 研究方法

2.1 指标筛选方法

基于系统性、科学性、区域性、代表性、可行性和可量化性的评价指标筛选原则,构建评价指标海选集(包含 33 个指标)。R 聚类分析可以对高相关性

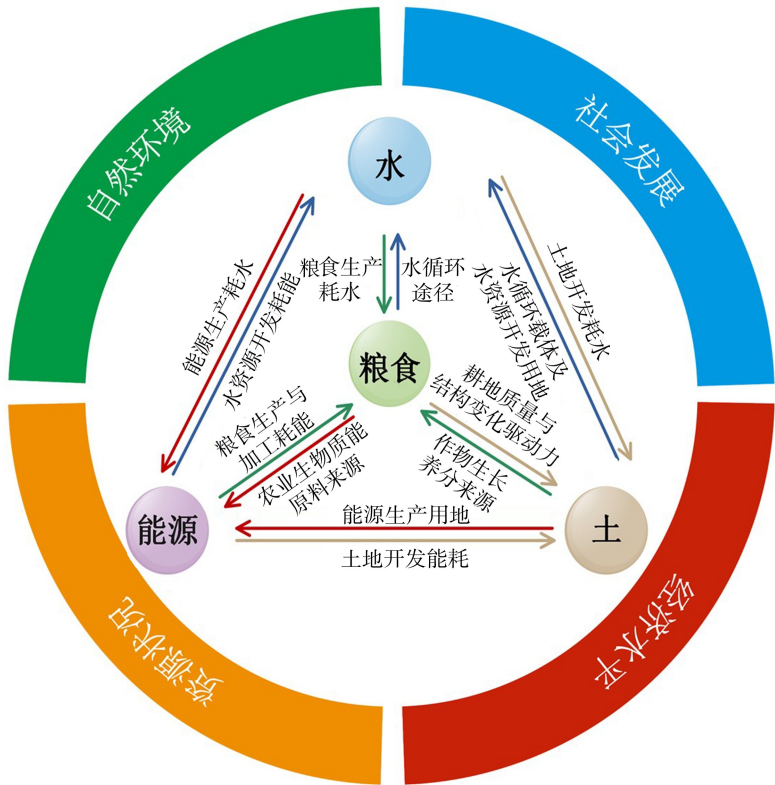


图 2 WLEF 耦合系统运行效率概念框架

Fig. 2 Conceptual framework of the operation efficiency of WLEF coupling system

变量进行分组,而因子分析可以通过提取公共因子筛选出最具代表性变量,两者相结合可以在降低信息冗余度的同时筛选出对评价结果影响显著的指标。因此本文构建 R 聚类-因子分析模型进行进一步定量筛选。具体步骤如下:

步骤 1 数据标准化处理。为降低不同指标量纲差异的影响,使指标筛选分析更为便捷,采用极值法将指标数据原始值转化至 $[0,1]$ 区间,采用极差标准化进行数据标准化处理^[36]。

步骤 2 R 聚类分析。通过对变量进行 R 聚类分析,将具有相似特征和高度相关的变量归为一类,避免出现指标信息重复问题^[37]。

步骤 3 非参数 K-W 检验。聚类分析结果中,聚类数目往往受到主观因素影响,为确保其准确性,采用非参数 K-W 检验法,对各评价指标的聚类结果进行验证。若显著性水平大于 0.05,则说明聚类后各指标间无明显差异,聚类数目科学合理^[38]。

步骤 4 变量降维简化。采用因子分析法对多维变量进行降维简化,在众多变量中找出隐藏的具有代表性的因子,从而以较少的因子反映原始数据的大部分信息,达到合理筛选指标的目的^[39]。

2.2 支持向量机模型

支持向量机模型是一种强大的监督学习模型,其目标是寻找一个最优分类面使得所有训练样本离该最优分类面的误差最小,在解决非线性和高维识别问题时具有优势,故本文将其用于 WLEF 耦合系统运行效率评价^[40]。

2.3 HPO 算法

HPO 算法是通过模拟动物猎食的过程而衍生出的一种智能优化算法^[41],可用于自动寻找 SVM 模型中的最佳参数组合,包括惩罚参数 C 和核函数参数 G 。参数对于 SVM 模型的性能有着决定性的影响,HPO 算法的目标是在交叉验证的基础上最大化 SVM 模型的回归准确率,使模型评价结果更为精确。

2.4 HPO-SVM 模型构建

以惩罚参数 C 和核函数参数 G 作为猎食者个体,以训练样本的均方误差 (MSE) 为目标函数,利用 HPO 算法对 C 和 G 进行迭代优化,以获取最优参数下的 SVM 模型 (即 HPO-SVM 模型),实现评价结果最优。具体步骤如下:

步骤 1 收集指标数据,形成训练样本集和测试样本集。

步骤 2 根据现有研究成果^[42-44]初始化 SVM 模型相关参数。

步骤 3 将初始个体 (C, G) 作为支持向量机的参数,测试该 SVM 模型的性能,并以 MSE 作为适应

度值进行评价。

步骤 4 依次执行猎人搜索、猎物逃避和猎人猎物辨别操作,更新个体参数 (C, G),并基于适应度值评价该参数下 SVM 模型的性能。

步骤 5 判断是否达到最大迭代次数或目标函数是否达到期望值,若达到则进行步骤 6,否则重复步骤 4,直至满足条件。

步骤 6 输出最优猎食者个体 (适应度最小),即为惩罚参数 C 和核函数参数 G 。

步骤 7 采用步骤 6 得到的最优参数构建 HPO-SVM 模型。

2.5 合理性和稳定性分析方法

采用序号总和理论进行稳定性分析,即对不同模型 (SVM 模型、HPO-SVM 模型等) 评价结果进行排序并将相应序号加和重新排序,得到相对合理的排序结果,并计算 Spearman 相关系数验证每个模型的稳定性^[45-46]。具体步骤如下:①对不同 WLEF 耦合系统运行效率评价模型的评价结果进行排序,得出相对合理的排序结果;②计算不同模型的评价结果与相对合理排序结果的 Spearman 相关系数;③随机抽样,重复 n 次步骤①和②,分别采用式 (1) 和式 (2) 计算合理性系数 H 和稳定性系数 S 。

$$H = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i \tag{1}$$

$$S = 1 - \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - H)^2} \tag{2}$$

式中: n 为评价次数; P_i 为第 i 次评价结果与相对合理排序的 Spearman 相关系数。

3 结果与分析

3.1 WLEF 耦合系统运行效率评价指标初选集构建

结合内涵解析,将 WLEF 耦合系统划分为水资源系统、土地资源系统、能源系统和粮食系统 4 个子系统,参考现有研究成果^[9,47-49],将相关评价指标分配至各子系统中,构成包含 33 个评价指标的初选集,其中水资源系统、土地资源系统、能源系统和粮食系统分别包含 10、8、7、8 个评价指标,如表 1 所示。

3.2 WLEF 耦合系统运行效率评价指标优选

对构建的评价指标体系初选集采用 R 聚类-因子分析模型分类筛选评价指标,筛选过程及结果如表 1 所示。

由表 1 可知,将初选集中 33 个评价指标最终筛选至 16 个评价指标,优选后保留 $W_1, W_5, W_7, W_8, W_{10}, L_2, L_4, L_7, L_8, E_3, E_4, E_5, F_3, F_4, F_5, F_8$ 共 16 个指标,其中 $W_8, L_2, L_4, L_7, L_8, E_5, F_3, F_4, F_5, F_8$ 为正向指标, $W_1, W_5, W_7, W_{10}, E_3, E_4$ 为负向指标,基于上

表 1 WLEF 耦合系统运行效率评价指标筛选					
Table 1 Selection of evaluation indicators for the operation efficiency of WLEF coupling system					
子系统	指标	聚类类别	K-W 检验值	因子荷载	是否保留
水资源系统	单位面积灌溉用水量(W_1)	1	0.824	0.863	是
	地下水资源量(W_2)	1	0.824	0.734	否
	单位面积机电井数量(W_3)	1	0.824	0.586	否
	年平均降水量(W_4)	2	0.763	0.917	否
	农业灰水足迹(W_5)	2	0.763	0.943	是
	水利工程年供水量(W_6)	3	0.442	0.798	否
	农业用水比重(W_7)	3	0.442	0.867	是
	水利工程投资比重(W_8)	4			是
	万元 GDP 用水量(W_9)	5	0.220	0.450	否
	万元 GDP 农业增加值用水量(W_{10})	5	0.220	0.892	是
土地资源系统	人均耕地面积(L_1)	1	0.697	0.734	否
	垦殖率(L_2)	1	0.697	0.869	是
	水土流失面积比重(L_3)	1	0.697	0.719	否
	有效灌溉面积比重(L_4)	2			是
	机电井灌溉面积比重(L_5)	3	0.355	0.834	否
	机械耕作面积比重(L_6)	3	0.355	0.811	否
	耕地生产率(L_7)	3	0.355	0.873	是
	单位耕地渠道土方量(L_8)	4			是
能源系统	单位面积机械柴油消耗量(E_1)	1	0.420	0.374	否
	农业用电比重(E_2)	1	0.420	0.963	否
	单位面积化肥施用量(E_3)	1	0.420	0.994	是
	万元 GDP 能耗(E_4)	2			是
	单位面积农机投入指数(E_5)	3	0.223	0.885	是
	清洁能源使用比重(E_6)	3	0.223	0.304	否
	单位面积农业用电量(E_7)	3	0.223	0.847	否
粮食系统	第一产业 GDP 比重(F_1)	1	0.471	0.764	否
	第一产业固定资产投资比重(F_2)	1	0.471	0.648	否
	粮食自给率(F_3)	1	0.471	0.853	是
	单位面积粮食产量(F_4)	2			是
	人均农业产值(F_5)	3	0.249	0.854	是
	粮食产量(F_6)	3	0.249	0.790	否
	复种指数(F_7)	4	0.102	0.627	否
	第一产业从业人数比重(F_8)	4	0.102	0.856	是

述优选指标构建 WLEF 耦合系统运行效率评价指标体系。

3.3 WLEF 耦合系统运行效率评价等级区间确定

3.3.1 评价指标等级确定

自然间断法借助聚类原理将各类数据分为数组,使得组内数据的相似性与组间数据的相异性最大,能够更好展现数据的特点和分布规律,确保其在多指标综合评价过程中的合理性和高效性^[50]。因此,为分析建三江分公司 2002—2021 年 WLEF 耦合系统运行效率时空变异规律,采用自然间断法将研究区 WLEF 耦合系统运行效率指标评定标准由低到高分为Ⅰ~Ⅴ级,等级越高表示运行效率水平越高,分级结果如表 2 所示。

3.3.2 等级模拟区间确定

将表 2 中各指标等级阈值进行标准化处理后,

经 HPO-SVM 模型仿真模拟得到 WLEF 耦合系统运行效率Ⅰ~Ⅴ级模拟区间分别为 ≤ 1.596 、 $>1.596 \sim 2.543$ 、 $>2.543 \sim 3.568$ 、 $>3.568 \sim 4.257$ 、 >4.257 。

3.4 WLEF 耦合系统运行效率时空演变特征分析

3.4.1 年际演变特征

将 2002—2021 年指标数据代入 HPO-SVM 模型,模拟计算得到建三江分公司 WLEF 耦合系统运行效率指数。依据 WLEF 耦合系统运行效率模拟区间进行分区并绘制年际变化趋势,结果如图 3 所示。

由图 3 可知,建三江分公司 WLEF 耦合系统运行效率整体呈现上升趋势,年均增长率达 3.24%,平均运行效率等级处于Ⅲ级偏上水平。在 2003 年、2007 年、2009 年、2012 年、2018 年、2021 年出现极值。2002 年 WLEF 耦合系统运行效率处在Ⅱ级区

表 2 WLEF 耦合系统运行效率分级标准

Table 2 WLEF coupling system operation efficiency classification standard

等级	$W_1/(m^3/hm^2)$	W_5/m^3	$W_7/\%$	$W_8/\%$	W_{10}/m^3	$L_2/\%$	$L_4/\%$	$L_7/(万元/hm^2)$
I	≥ 4065	$\geq 69\,500$	<0.976	<1.5	≥ 11470	<0.34	<0.29	<0.54
II	$3\,855\sim<4\,065$	$46\,000\sim<69\,500$	$0.976\sim<0.982$	$1.5\sim<3.5$	$6\,626\sim<11\,470$	$0.34\sim<0.48$	$0.29\sim<0.57$	$0.54\sim<1.05$
III	$3\,585\sim<3\,855$	$31\,400\sim<46\,000$	$0.982\sim<0.989$	$3.5\sim<6.4$	$4\,528\sim<6\,626$	$0.48\sim<0.58$	$0.57\sim<0.78$	$1.05\sim<1.53$
IV	$2\,955\sim<3\,585$	$20\,070\sim<31\,400$	$0.989\sim<0.995$	$6.4\sim<13.5$	$2\,989\sim<4\,528$	$0.58\sim<0.67$	$0.78\sim<0.91$	$1.53\sim<1.95$
V	$<2\,955$	$<20\,070$	≥ 0.995	≥ 13.5	$<2\,989$	≥ 0.67	≥ 0.91	≥ 1.95
等级	$L_8/(m^3/hm^2)$	$E_3/(t/hm^2)$	$E_4/10^{10}J$	$E_5/(kW/hm^2)$	$F_3/\%$	$F_4/(t/hm^2)$	$F_5/万元$	$F_8/\%$
I	<884	≥ 0.18	≥ 2.344	<1.854	<0.90	<4.0	<9.2	<0.25
II	$884\sim<1\,159$	$0.17\sim<0.18$	$1.465\sim<2.344$	$1.854\sim<2.688$	$0.90\sim<0.95$	$4.0\sim<6.0$	$9.2\sim<18.3$	$0.25\sim<0.37$
III	$1\,159\sim<1\,451$	$0.15\sim<0.17$	$1.260\sim<1.465$	$2.688\sim<3.708$	$0.95\sim<1.00$	$6.0\sim<7.7$	$18.3\sim<27.7$	$0.37\sim<0.51$
IV	$1\,451\sim<1\,808$	$0.13\sim<0.15$	$0.967\sim<1.260$	$3.708\sim<5.102$	$1.00\sim<1.10$	$7.7\sim<8.8$	$27.7\sim<42.6$	$0.51\sim<0.75$
V	$\geq 1\,808$	<0.13	<0.967	≥ 5.102	≥ 1.10	≥ 8.8	≥ 42.6	≥ 0.75

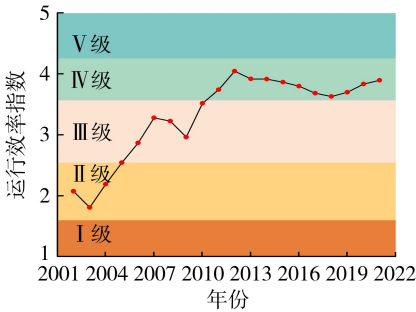


图 3 建三江分公司 WLEF 耦合系统运行效率指数
年际变化趋势

Fig. 3 The inter-annual change trend of WLEF coupling
system operation efficiency of Jiansanjiang Branch

间内,2003 年出现第一个极小值点,同时也是最小值点(1.810),此时运行效率等级处于 II 级偏下水平;2003—2007 年运行效率呈高速增长趋势,在 2007 年到达第一个极大值点(3.283),运行效率等级从 II 级升至 III 级偏上水平;2007—2012 年运行效率呈稳步增长趋势,在 2009 年向下浮动至第二个极小值点(2.966),此时运行效率等级降至 III 级偏下水平;2009—2012 年运行效率又逐步提升,2012 年达到第二个极大值点,同时也是最大值点(4.048),运行效率等级从 III 级偏下水平升至 IV 级偏上水平;2012—2021 年运行效率总体上趋势稳定,到 2018 年出现第三个极小值点(3.631),此时运行效率等级降至 IV 级偏下水平;2018—2021 年运行效率逐步回升,到 2021 年出现第三个极大值点(3.898),运行效率从 IV 级偏下水平回到 IV 级中游水平。根据以上 WLEF 耦合系统运行效率年际波动,可将其年际变化分为 5 个阶段:第一阶段(2002—2007 年)为显著上升期,第二阶段(2008—2009 年)为显著下降期,第三阶段(2010—2012 年)为稳步上升期,第四阶段(2013—2018 年)为高水平缓慢下降期,第五阶段(2019—2021 年)为高水平稳步上升期。

3.4.2 空间演变特征

针对年际变化中典型年的突出变化,进行 WLEF 耦合系统运行效率空间演变特征分析,根据建三江分公司各农场运行效率等级绘制 WLEF 耦合系统运行效率空间演变特征图,如图 4 所示。

由图 4 可知,2003 年 WLEF 耦合系统运行效率处于 II 级偏下水平,仅有前哨为 I 级,二道河、创业、洪河为 III 级,其余 12 个农场均为 II 级;2007 年运行效率处于 III 级偏上水平,其中勤得利和前哨为 II 级,二道为 IV 级,其余 12 个农场均为 III 级;2009 年运行效率处于 III 级偏下水平,其中前哨由 II 级升至 III 级,洪河和创业由 III 级升至 IV 级,二道河由 IV 级降至 III 级,其他农场运行效率指数有小幅下降但仍维持原有等级;2012 年运行效率处于 IV 级偏上水平,运行效率指数较 2009 提高了 33%,为研究期内第二个极大值点,同时也是最大值点,勤得利由 II 级升至 III 级,二道河由 IV 级升至 V 级,洪河和创业等级不变,其余 11 个农场均发生等级跃迁,研究区运行效率呈稳步上升趋势;2018 年运行效率处于 IV 级偏下水平,此时为研究区内最后一个极小值点,运行效率相较 2012 年有所降低,浓江、青龙山、前进、洪河、八五九由 IV 级降至 III 级,虽然整体水平有所降低但总体呈现良性发展态势。2021 年运行效率处于 IV 级中游水平,浓江、前进和红卫等级回到 IV 级,其余农场运行效率指数小幅增长但等级不变。

为深入探究建三江分公司 WLEF 耦合系统运行效率空间格局的时间演变特征,将不同农场 2002—2021 年的指标数据代入到 HPO-SVM 模型中,得到各农场 2002—2021 年 WLEF 耦合系统运行效率指数及运行效率等级,图 5 为建三江分公司各农场 WLEF 耦合系统运行效率变化趋势。

由图 5 可知,建三江分公司 2002—2021 年 WLEF 耦合系统运行效率水平空间分布呈现为东南部农场高于西北部农场的规律。结合图 4 可以看

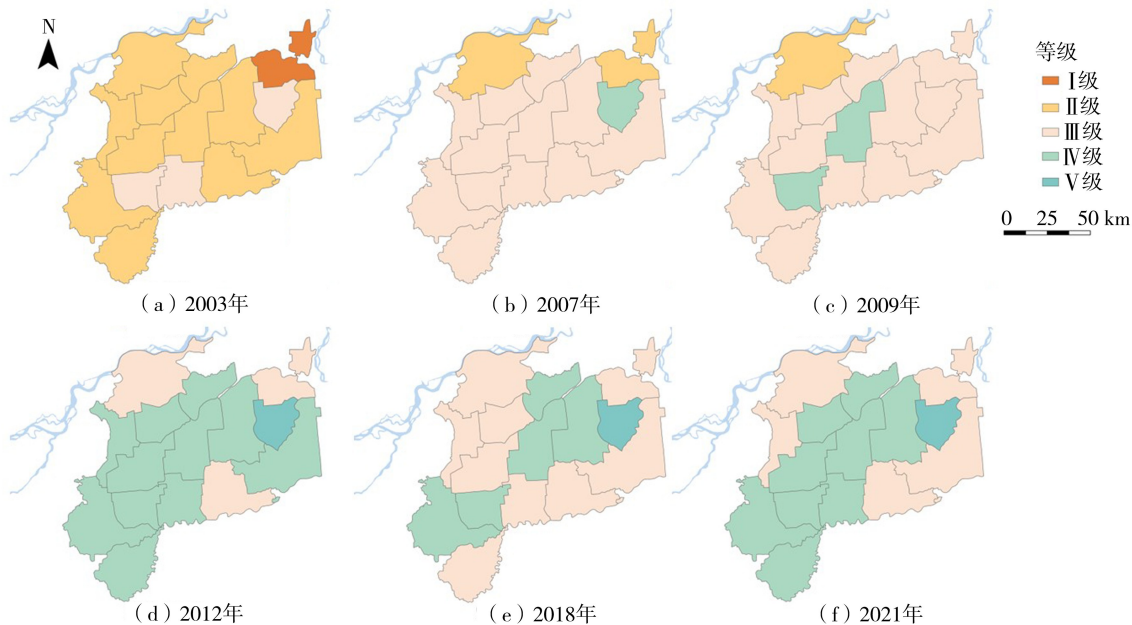


图 4 建三江分公司 WLEF 耦合系统运行效率空间演变

Fig. 4 Spatial evolution of WLEF coupling system operation efficiency of Jiansanjiang Branch

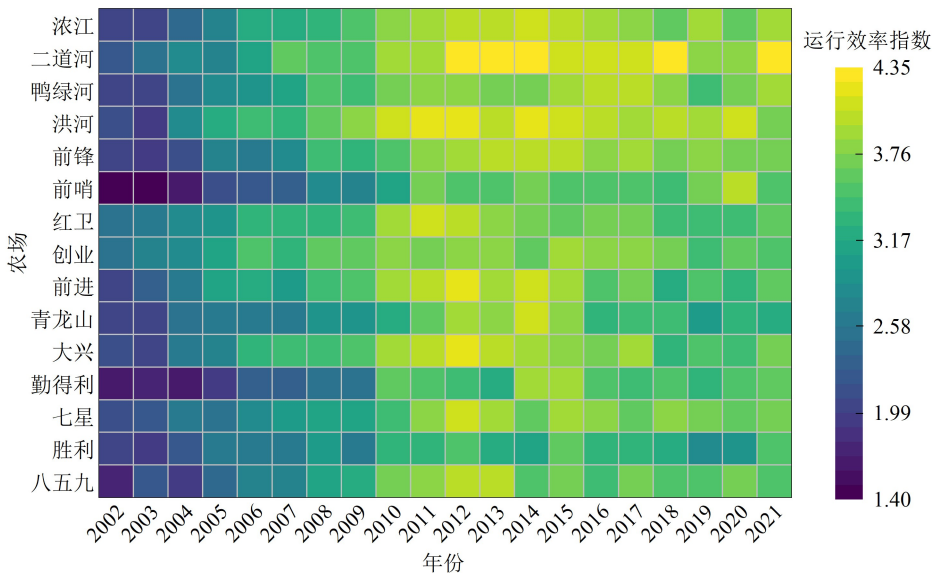


图 5 各农场 WLEF 耦合系统运行效率变化趋势

Fig. 5 Change trend of WLEF coupling system operation efficiency level of each farm

出,东南部地区 WLEF 耦合系统运行效率从大到小排序为二道河、洪河、创业、红卫、大兴、前锋、八五九、前哨、胜利,其中二道河平均运行效率水平最高,且运行效率变化趋势一直处于稳步上升状态,这归因于该农场对排水系统和土地管理设施的投资,基础设施完善有助于优化配水、防止内涝和干旱,并确保能源高效利用;胜利和前哨平均运行效率水平增幅较小,且长期处于Ⅲ级中下游水平,与建三江分公司其他农场呈现较大差异,该地区亟待合理地管理与调控 WLEF 耦合系统运行效率;红卫、大兴、八五九 3 个农场在 2012 年后呈现运行效率降低趋势,其中红卫和大兴在Ⅲ到Ⅳ级间波动,而八五九由Ⅳ级

降至Ⅲ级,鉴于这 3 个农场运行效率趋势的波动性,仍需观测未来运行效率走势来制定调控方案;相比以上农场,洪河、前锋、创业 3 个农场运行效率一直保持平稳向上的发展态势,预计未来运行效率可以进一步提高。西北部地区 WLEF 耦合系统运行效率从大到小排序为浓江、鸭绿河、前进、七星、青龙山、勤得利,其中浓江对高效节水的灌溉模式推广幅度最大,有助于水和能源资源高效利用,对于依靠抽取地下水灌溉的内陆农场来说,生态环境水平更加稳定,因此运行效率较高;勤得利和青龙山相较于其他农场更临近黑龙江与松花江,自然资源丰富,对资源有效利用有所不足,致使这两个农场的运行效率

低下;鸭绿河、前进、七星这 3 个农场运行效率虽有波动,但总体上运行效率水平呈良性态势发展。

3.5 WLEF 耦合系统运行效率驱动因子分析

为解析建三江分公司 WLEF 耦合系统运行效率时空演变态势的关键驱动力,确定其在运行效率演变过程中的影响程度,借助 HPO-SVM 模型内置的权重计算方法重确定关键驱动因子,得到影响 WLEF 耦合系统运行效率的驱动因子权重排序结果如下: F_9 (0.030)、 W_1 (0.033)、 L_2 (0.036)、 E_3 (0.046)、 L_8 (0.046)、 F_4 (0.047)、 F_3 (0.048)、 W_5 (0.053)、 W_7 (0.057)、 W_{10} (0.061)、 E_4 (0.075)、 E_5 (0.086)、 W_8 (0.086)、 L_7 (0.094)、 F_5 (0.097)、 L_4 (0.103)。其中 L_4 、 F_5 、 L_7 、 W_8 、 E_5 、 E_4 排在 16 个指标的前 6 位,权重高于其他指标,可初步认为这 6 个指标对 WLEF 耦合系统运行效率的影响较大。这些指标从经济、农业、资源利用等不同维度对 WLEF 耦合系统运行效率产生重要影响,将此 6 个指标作为 WLEF 耦合系统运行效率的关键驱动因子。

由图 3 可知,2002—2012 年建三江分公司农业处于高速发展阶段,但出现了 2002—2003 年、2007—2009 年运行效率水平降低的两个时段,并于 2012 年达到运行效率最高水平,结合关键驱动因子分析发现:与 2002 年相比,2003 年有效灌溉面积比重与水利工程投资比重降幅分别约为 20.47% 和 40.20%,虽然其他驱动因子均向良性方向发展,但水资源系统在高速发展期无法匹配其他子系统发展节奏,造成系统结构性供需失衡,进而导致系统运行效率降至研究期最低水平;2007—2009 年万元 GDP 能耗降幅 12.70%,表明能源利用效率显著提升,不仅降低了农业生产对能源的依赖程度,还优化了资源配置效率,从而推动该阶段 WLEF 耦合系统运行效率提高;与 2009 年相比,2012 年有效灌溉面积比重涨幅 37.36%,达到研究期内最高水平,耕地生产率涨幅 100%,该阶段建三江分公司精准控水和耕地生产率倍增带来的资源集约效应通过土地资源利用率提升带动能源利用率与粮食生产能力协同优化,使得系统运行效率达到研究期最高水平。2012—2021 年,随着区域农业可持续发展,“十三五”期间农业现代化的高质量发展、供给结构的进一步优化带动人均农业产值、耕地生产率、单位面积农机投入指数提高,同时遵循绿色发展理念使得万元 GDP 能耗显著降低,在此时段内 WLEF 耦合系统运行效率水平虽呈现先降低后升高的趋势,但整体波动范围并不大,侧面印证了合理的农业发展模式对于地区 WLEF 耦合系统运行效率的控制结果。

4 HPO-SVM 模型性能分析

4.1 性能检验

4.1.1 拟合性能评价

为检验 HPO-SVM 模型性能,引用 SVM 模型和灰狼优化算法优化 SVM(GWO-SVM)模型,与 HPO-SVM 模型进行对比分析。选择平均绝对误差(MAE)、均方误差(MSE)、平均绝对百分比误差(MAPE)、模型拟合优度(R^2)以及模型运行时间(T)作为检验模型性能的指标。为避免随机性,将 3 个模型分别运行 50 次,计算每个拟合指标 50 次运行的平均值进行对比,结果如表 3 所示。

表 3 模型性能对比

Table 3 Model performance comparison					
模型	T/s	MAE	MSE	MAPE	R^2
HPO-SVM 模型	24.03	0.056 1	0.005 4	0.022 8	0.997 3
GWO-SVM 模型	31.74	0.073 6	0.008 4	0.033 9	0.994 0
SVM 模型	3.50	0.109 2	0.012 0	0.040 3	0.992 5

由表 3 可知,HPO-SVM 模型相较于 SVM 和 GWO-SVM 模型表现出更高效的性能,对比 SVM 和 GWO-SVM 模型,HPO-SVM 模型的 MAE 降低了 48.63%和 23.78%,MSE 降低了 55.00%和 35.71%,MAPE 降低了 43.42%和 32.74%, R^2 提高了 0.48%和 0.33%。在运行时间上,HPO-SVM 模型较 GWO-SVM 模型降低了 24.29%。说明 HPO-SVM 模型在寻优速度和评价精度上明显提高,因此,HPO-SVM 模型在区域 WLEF 耦合系统运行效率评价方面更具备优势。

4.1.2 可靠性分析

为验证 HPO-SVM 模型运行结果的可靠性,将表 2 中各指标等级阈值归一化数据分别代入 GWO-SVM、SVM 模型,经 GWO-SVM 和 SVM 模型仿真模拟得到 WLEF 耦合系统运行效率 I ~ V 级模拟区间分别为 ≤ 1.598 、 $>1.598 \sim 2.570$ 、 $>2.570 \sim 3.583$ 、 $>3.583 \sim 4.236$ 、 ≥ 4.236 和 ≤ 1.574 、 $>1.574 \sim 2.537$ 、 $>2.537 \sim 3.546$ 、 $>3.546 \sim 4.293$ 、 ≥ 4.293 。

将建三江分公司 2002—2021 年数据分别代入 HPO-SVM、GWO-SVM 和 SVM 模型中,得到 3 个模型不同模拟区间下的运行效率评价结果如表 4 所示。由表 4 可知,HPO-SVM 模型与 GWO-SVM、SVM 模型的评价结果无明显差异。与 HPO-SVM 模型相比,GWO-SVM 和 SVM 模型的评价差异主要出现在大兴和二道河 2 个农场上,大兴 SVM 模型的评价结果为Ⅳ级,HPO-SVM 和 GWO-SVM 模型的评价结果均为Ⅲ级;二道河 GWO-SVM 模型的评价结果为Ⅴ级,HPO-SVM 和 SVM 模型的评价结果均为

Ⅳ级。但 3 个模型对于运行效率的评价结果均处于中高水平,基本一致,由此可见 HPO-SVM 模型评价结果具有较高的可靠性。

表 4 各农场 WLEF 耦合系统运行效率评价结果对比
Table 4 Comparison of the evaluation results of WLEF coupling system operation efficiency in each farm

农场	HPO-SVM 模型	GWO-SVM 模型	SVM 模型
八五九	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ
胜 利	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ
七 星	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ
勤得利	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ
大 兴	Ⅲ	Ⅲ	Ⅳ
青龙山	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ
前 进	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ
创 业	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ
红 卫	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ
前 哨	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ
前 锋	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ
洪 河	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ
鸭绿河	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ
二道河	Ⅳ	Ⅴ	Ⅳ
浓 江	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ

4.1.3 合理性和稳定性分析

为验证评价模型的合理性与稳定性,随机选取采用序号总和理论排序的 10 个农场的相对合理排序结果(表 5),计算得到 HPO-SVM、GWO-SVM、SVM 3 个模型的评价结果与相对合理排序的 Spearman 相关系数(重复计算 10 次),再采用式(1)和式(2)计算得到合理性系数分别为 0.966、0.937、0.922,稳定性系数分别为 0.979、0.964、0.961,可见 HPO-SVM 模型的合理性系数和稳定性系数较高,说明 HPO-SVM 模型具有较好的稳定性,其评价结果更加合理可靠。

表 5 3 个模型评价结果排序
Table 5 The evaluation results ranking of 3 models

农场	WLEF 耦合系统运行效率指数排序			序号 总和	相对合 理排序
	HPO-SVM 模型	GWO-SVM 模型	SVM 模型		
八五九	9	10	9	28	9
七 星	8	7	7	22	7
大 兴	5	4	6	15	5
前 进	6	6	5	17	6
红 卫	4	5	3	12	4
前 哨	10	9	10	29	10
前 锋	7	8	8	23	8
洪 河	2	2	4	8	2
二道河	1	1	1	3	1
浓 江	3	3	2	8	2

4.2 与现有研究成果对比

在现有 WLEF 耦合系统运行效率研究中,郝帅等^[51]重点分析了我国水、能源和粮食间相互作用关系对系统效率的影响,本文在其基础上增加了土地资源状况,并将耕地生产率、有效灌溉面积比重等作

为评价指标,以 2009—2012 年为例,建三江分公司有效灌溉面积比重达到研究期最高水平,耕地生产率翻倍,使得该阶段通过土地资源利用率的提升驱动系统运行效率达到研究期最高水平。由此可见,将土地资源纳入水-能源-粮食耦合系统研究中,对以农业为主的地区具有重要影响。在对关键驱动因子的识别中,4 个子系统均存在影响运行效率的关键指标,由此可见,水、土地、能源和粮食系统间的优化配置对 WLEF 耦合系统运行效率具有显著影响,这与王勇等^[52]对于京津冀地区在考虑水、能源、粮食协同发展的同时,应考虑土地对 WEF 耦合系统的影响的观点相符。

5 结 论

a. 针对水资源、土地资源、能源和粮食资源 4 个子系统选取 33 个指标作为指标初选集,利用 R 聚类-因子分析模型对指标初选集进行优化筛选,确定了由 16 个指标构成的建三江分公司 WLEF 耦合系统运行效率评价指标体系。

b. 建三江分公司 WLEF 耦合系统运行效率整体呈现上升趋势,系统运行效率处于中等偏上水平,2002—2007 年为显著上升期,2007—2009 年为显著下降期,2009—2012 年为稳步上升期,2012—2018 年为高水平缓慢下降期,2018—2021 年为高水平稳步上升期。从空间分布上看,东南部农场运行效率水平高于西北部农场,其中二道河运行效率水平最高,应推广该农场先进管理经验及调控方案;有效灌溉面积比重、人均农业产值、耕地生产率、单位面积农机投入指数、水利工程投资比重、万元 GDP 能耗为影响 WLEF 耦合系统运行效率的关键驱动因子。

c. 与 SVM 和 GWO-SVM 模型相比,HPO-SVM 模型在拟合精度和寻优效率上都表现出明显优势;HPO-SVM 模型合理性系数和稳定性系数高达 0.966 和 0.979,表明 HPO-SVM 模型能够稳定合理地对区域 WLEF 耦合系统运行效率作出评价。

参考文献:

[1] PAHL-WOSTL C. Governance of the water-energy-food security nexus: a multi-level coordination challenge [J]. Environmental Science & Policy, 2019, 92: 356-367.
[2] EL-GAFY I. Water-food-energy nexus index: analysis of water-energy-food nexus of crop ' s production system applying the indicators approach [J]. Applied Water Science, 2017, 7(6): 2857-2868.
[3] DAVIS K F, D ' ODORICO P, RULLI M C. Land grabbing: a preliminary quantification of economic impacts on rural livelihoods [J]. Population and Environment,

- 2014,36(2):180-192.
- [4] JAGGARD K W, QI Aiming, OBER E S. Possible changes to arable crop yields by 2050 [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 2010, 365 (1554) : 2835-2851.
- [5] DE FRAITURE C, WICHELS D, ROCKSTORM J, et al. Looking ahead to 2050: scenarios of alternative investment approaches [M] // MOLDEN D. Water for Food Water for Life: A Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture. London: Routledge, 2007: 91-145.
- [6] RULLI M C, BELLOMI D, CAZZOLI A, et al. The water-land-food nexus of first-generation biofuels [J]. Scientific reports, 2016, 6 (1) : 22521.
- [7] ENDO A, TSURITA I, BURNETT K, et al. A review of the current state of research on the water, energy, and food nexus [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2017, 11: 20-30.
- [8] 林志慧, 刘宪锋, 陈瑛, 等. 水-粮食-能源纽带关系研究进展与展望 [J]. 地理学报, 2021, 76 (7) : 1591-1604. (LIN Zhihui, LIU Xianfeng, CHEN Ying, et al. Water-food-energy nexus: progress, challenges and prospect [J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76 (7) : 1591-1604. (in Chinese))
- [9] SUN Caizhi, YAN Xiaodong, ZHAO Liangshi. Coupling efficiency measurement and spatial correlation characteristic of water-energy-food nexus in China [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2021, 164: 105151.
- [10] 黄雅丽. 基于资源效率的长江经济带粮食-水-能源纽带关系研究 [D]. 杭州: 浙江财经大学, 2021.
- [11] ZHANG Pan, CAI Yanpeng, ZHOU Ya, et al. Quantifying the water-energy-food nexus in Guangdong, Hong Kong, and Macao regions [J]. Sustainable Production and Consumption, 2022, 29: 188-200.
- [12] 宋洁, 黄静思, 何冠楠, 等. 水-能源-粮食纽带系统的风险测度与韧性提升研究 [J]. 中国管理科学, 2025, 33 (1) : 323-334. (SONG Jie, HUANG Jingsi, HE Guannan, et al. Risk Measurement and resilience improvement of water-energy-food coupling systems [J]. Chinese Journal of Management Science, 2025, 33 (1) : 323-334. (in Chinese))
- [13] RINGLER C, BHADURI A, LAWFORDE R. The nexus across water, energy, land and food (WELF) : potential for improved resource use efficiency? [J]. Current Opinion in Environmental Sustainability, 2013, 5 (6) : 617-624.
- [14] 顾茉莉, 叶长盛, 楼婷婷, 等. 长江经济带水-能源-粮食-土地耦合协调发展研究 [J]. 人民长江, 2023, 54 (6) : 11-18. (GU Moli, YE Changsheng, LOU Tingting, et al. Coupling mechanism of coordinated development of land use and water-energy-food systems in Yangtze River Economic Belt [J]. Yangtze River, 2023, 54 (6) : 11-18. (in Chinese))
- [15] SCHALTEGGER S, STRUM A. Ecological rationality: approaches to design of ecology-oriented management instruments [J]. Die Unternehm, 1990, 4 (4) : 273-290.
- [16] CUI Xufeng, XIONG Jiaqi, LIU Yong. Agricultural eco-efficiency: progress, challenges, and prospects [J]. Journal of Resources and Ecology, 2024, 15 (5) : 1358-1367.
- [17] 任月, 曹娟娟, 曹玉昆, 等. 关于山水林田湖草系统运行效率的理论思考 [J]. 世界林业研究, 2023, 36 (1) : 97-102. (REN Yue, CAO Juanjuan, CAO Yukun, et al. Theoretical analysis of operational efficiency of mountains-rivers-forests-farmlands-lakes-grasslands system [J]. World Forestry Research, 2023, 36 (1) : 97-102. (in Chinese))
- [18] 陈红, 周思姝, 韩哲英. “水-土-能-粮-碳”适配度的空间异质性及影响因素研究 [J]. 生态经济, 2023, 39 (6) : 115-122. (CHEN Hong, ZHOU Sishu, HAN Zheyang. The spatial heterogeneity and the influencing factors of “water-soil-energy-grain-carbon” suitability [J]. Ecological Economy, 2023, 39 (6) : 115-122. (in Chinese))
- [19] ARUHAN, LIU Dongchang. Study on the influencing factors of the evolution of space pattern based on principal component analysis in Duolun County [J]. Scientific Reports, 2024, 14 (1) : 20567.
- [20] 魏可可. 数据包络分析方法的发展现状和局限性分析 [J]. 中国市场, 2020 (13) : 191. (WEI Keke. Analysis of the development status and limitations of data envelopment analysis method [J]. China Market, 2020, 13) : 191. (in Chinese))
- [21] 卢宾宾, 葛咏, 秦昆, 等. 地理加权回归分析技术综述 [J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2020, 45 (9) : 1356-1366. (LU Binbin, GE Yong, QIN Kun, et al. A review on geographically weighted regression [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2020, 45 (9) : 1356-1366. (in Chinese))
- [22] LIU Dong, ZHANG Guodong, LI Heng, et al. Projection pursuit evaluation model of a regional surface water environment based on an ameliorative moth-flame optimization algorithm [J]. Ecological Indicators, 2019, 107: 105674.
- [23] 刘东, 李帅, 付强, 等. 基于 KHA 优化 BP 神经网络的地下水水质综合评价方法 [J]. 农业机械学报, 2018, 49 (9) : 275-284. (LIU Dong, LI Shuai, FU Qiang. Comprehensive evaluation method of groundwater quality based on BP network optimized by Krill Herd algorithm [J]. Acta Agricultural Machinery, 2018, 49 (9) : 275-284. (in Chinese))
- [24] LIU Dong, WANG Chunqing, JI Yi, et al. Measurement and analysis of regional flood disaster resilience based on a support vector regression model refined by the selfish herd

- optimizer with elite opposition-based learning[J]. Journal of Environmental Management,2021,300:113764.
- [25] HUANG Guangbin, ZHU Qinyu, SIEW C K. Extreme learning machine: theory and applications [J]. Neurocomputing,2006, 70(1/2/3):489-501.
- [26] ABDULLAH D M, ABDULAZEEZ A M. Machine learning applications based on SVM classification a review [J]. Qubahan Academic Journal,2021,1(2):81-90.
- [27] DING Shichuan, HAO Menglu, CUI Zhiwei, et al. Application of multi-SVM classifier and hybrid GSAPSO algorithm for fault diagnosis of electrical machine drive system[J]. ISA Transactions,2023,133:529-538.
- [28] ZHAO Yuntao, LI Wen, LI Weigang. Dual quaternion hand-eye calibration algorithm for hunter-prey optimization based on twice opposition-learning and random differential variation[J]. Applied Soft Computing,2024,154:111249.
- [29] JI Peng, SHI Shiliang, SHI Xingyu. Research on early warning of coal and gas outburst based on HPO-BiLSTM [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement,2023,72: 2529808.
- [30] ZHANG Zhiqin, ZHANG Liangliang, LIU Dong, et al. Measurement and analysis of regional water-energy-food nexus resilience with an improved hybrid kernel extreme learning machine model based on a dung beetle optimization algorithm [J]. Agricultural Systems, 2024, 218:103966.
- [31] BREARS R C. The green economy and the water-energy-food nexus[M]. Cham:Palgrave Macmillan,2023:31-61.
- [32] LEE S H, TANIGUCHI M, MOHTAR R H, et al. An analysis of the water-energy-food-land requirements and CO₂ emissions for food security of rice in Japan [J]. Sustainability,2018,10(9):3354.
- [33] NAMANY S, AL-ANSARI T, GOVINDAN R. Sustainable energy, water and food nexus systems:a focused review of decision-making tools for efficient resource management and governance[J]. Journal of Cleaner Production,2019, 225:610-626.
- [34] 王恒,方兰. 中国水-能源-粮食纽带系统安全水平与全要素生产率时空耦合协调关系分析[J]. 水资源保护, 2023, 39 (1): 150-157. (WANG Heng, FANG Lan. Spatial-temporal coupling coordination relationship between the security level of water-energy-food nexus system and total factor productivity in China[J]. Water Resources Protection, 2023, 39 (1): 150-157. (in Chinese))
- [35] HU Yihang, LIU Xuan, ZHANG Zhengyu, et al. Spatiotemporal heterogeneity of agricultural land eco-efficiency;a case study of 128 cities in the Yangtze River Basin[J]. Water,2022,14(3):422.
- [36] CHEN Junwei, ZHOU Xiaoping, ZHOU Lunshi, et al. Simple and effective approach to modeling crack propagation in the framework of extended finite element method[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2020,106:102452.
- [37] LIU Dong, FENG Jianping, LI Heng, et al. Spatiotemporal variation analysis of regional flood disaster resilience capability using an improved projection pursuit model based on the wind-driven optimization algorithm [J]. Journal of Cleaner Production,2019,241: 118406.
- [38] LI Xuesong, LI Heng, LIU Dong, et al. Connotation analysis and evaluation index system construction of regional agricultural soil and water resource composite system harmony[J]. Journal of Cleaner Production,2020, 263:121438.
- [39] MAIR P. Modern psychometrics with R [M]. Cham: Springer,2018:17-61.
- [40] HUANG Shujun, CAI Nianguang, PACHECO P P, et al. Applications of support vector machine(SVM) learning in cancer genomics [J]. Cancer Genomics & Proteomics, 2018,15(1):41-51.
- [41] NARUEI I, KEYNIA F, MOLAHOSSEINI S A. Hunter-prey optimization: algorithm and applications [J]. Soft Computing,2022,26(3): 1279-1314.
- [42] 刘喆,孟辉,张永彬,等. 基于 LLE 与 Gold-SA-SVM 的海藻三维荧光光谱门类识别[J]. 光学学报,2022,42 (4):0430001. (LIU Zhe, MENG Hui, ZHANG Yongbin, et al. Category recognition of three-dimensional fluorescence spectra of algae based on LLE and Gold-SA-SVM [J]. Acta Optica Sinica,2022,42(4):0430001. (in Chinese))
- [43] 宋治岑,张顺平,卢敏. 基于 HHO-SVM 的水质预测模型及应用[J]. 水电能源科学,2023,41 (8): 70-72. (SONG Zhicen, ZHANG Shunping, LU Min. Water quality prediction model based on HHO-SVM and its application [J]. Water Resources and Power, 2023, 41 (8): 70-72. (in Chinese))
- [44] 周恒,肖文波,李勇波,等. 基于猎犬-猎物优化支持向量机的光伏阵列故障识别研究[J]. 南昌航空大学学报 (自然科学版), 2024, 38 (1): 93-104. (ZHOU Heng, XIAO Wenbo, LI Yongbo, et al. Research on fault diagnosis of photovoltaic array based on hunter-prey optimization support vector machine [J]. Journal of Nanchang Hangkong University(Natural Sciences), 2024, 38(1):93-104. (in Chinese))
- [45] ZHANG Liangliang, LI Heng, LIU Dong, et al. Identification and application of the most suitable entropy model for precipitation complexity measurement [J]. Atmospheric Research,2019,221:88-97.

Swan-Canning Estuary[J]. Hydrological Processes,2001, 15(13):2595-2616.

[16] WERNER A D, LOCKINGTON D A. Tidal impacts on riparian salinities near estuaries[J]. Journal of Hydrology, 2006,328(3/4):511-522.

[17] LENKOPANE M,WERNER A D,LOCKINGTON D A,et al. Influence of variable salinity conditions in a tidal creek on riparian groundwater flow and salinity dynamics[J]. Journal of Hydrology,2009,375(3/4):536-545.

[18] TREFRY M G,SVENSSON T J A,DAVIS G B. Hypoagig influences on groundwater flux to a seasonally saline river [J]. Journal of Hydrology,2007,335(3/4):330-353.

[19] ZHANG Bo, ZHENG Tianyuan, ZHENG Xilai, et al. Dynamics of upstream saltwater intrusion driven by tidal river in coastal aquifers [J]. Science of the Total Environment,2023,877:162857.

[20] MAO X,ENOT P,BARRY D A,et al. Tidal influence on behaviour of a coastal aquifer adjacent to a low-relief estuary[J]. Journal of Hydrology, 2006, 327(1/2):110-127.

[21] XIAO Kai, LI Hailong, XIA Yuqiang, et al. Effects of tidally varying salinity on groundwater flow and solute transport: insights from modelling an idealized creek marsh aquifer[J]. Water Resources Research, 2019, 55(11): 9656-9672.

[22] HUYAKORN P S, PINDER G F. Computational methods in subsurface flow[M]. New York: Academic Press, 1983: 473.

[23] 孙昭华,严鑫,谢翠松,等. 长江口北支倒灌影响区盐度预测经验模型[J]. 水科学进展,2017,28(2):213-222. (SUN Zhaohua, YAN Xin, XIE Cuisong, et al. An empirical predictive model for saltwater intrusion in the South Branch influenced by tidal flow from the North Branch in the Yangtze River Estuary [J]. Advances in Water Science,2017,28(2):213-222. (in Chinese))

[24] ZHANG Jiaxu, LU Chunhui, SHEN Chengji, et al. Effects of a low-permeability layer on unstable flow pattern and land-sourced solute transport in coastal aquifers [J]. Journal of Hydrology,2021,598:126397.

[25] KUAN W K, JIN Guangqiu, XIN Pei, et al. Tidal influence on seawater intrusion in unconfined coastal aquifers [J]. Water Resources Research,2012,48(2):W02502. (收稿日期:2024-11-15 编辑:刘晓艳)

+++++

(上接第257页)

[46] ZHANG Liangliang, LI Tianxiao, LIU Dong, et al. Spatial variability and possible cause analysis of regional precipitation complexity based on optimized sample entropy[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society,2020,146(732):3384-3398.

[47] ZHOU Yan, ZHANG Xinrui, CHEN Yingshan, et al. A water-land-energy-carbon nexus evaluation of agricultural sustainability under multiple uncertainties: the application of a multi-attribute group decision method determined by an interval-valued intuitionistic fuzzy set [J]. Expert Systems with Applications,2024,242:122833.

[48] WANG Yong, XIE Yanjing, QI Lin, et al. Synergies evaluation and influencing factors analysis of the water-energy-food nexus from symbiosis perspective: a case study in the Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Science of the Total Environment,2022,818:151731.

[49] 洪思扬,程涛,王佳友,等. 贸易视角下广东省水-能源-粮食流通与资源间压力互馈研究[J]. 水资源保护, 2024, 40(6):48-57. (HONG Siyang, CHENG Tao, WANG Jiayou, et al. Research on water-energy-food circulation and interaction pressure between resources in Guangdong Province from perspective of trade[J]. Water Resources Protection,2024,40(6):48-57. (in Chinese))

[50] CHEN Jian, YANG Shentian, LI Hongwei, et al. Research on geographical environment unit division based on the method of natural breaks (Jenks) [J]. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences,2013,40:47-50.

[51] 郝帅,孙才志,翟小清. 中国水资源-能源-粮食系统效率时空格局及影响因素[J]. 地理学报,2024,79(9):2389-2406. (HAO Shuai, SUN Caizhi, ZHAI Xiaoqing. Spatio-temporal pattern and influencing factors of efficiency of water-energy-food system in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2024, 79(9):2389-2406. (in Chinese))

[52] 王勇,孙瑞欣. 土地利用变化对区域水-能源-粮食系统耦合协调度的影响:以京津冀城市群为研究对象[J]. 自然资源学报,2022,37(3):582-599. (WANG Yong, SUN Ruixin. Impact of land use change on coupling coordination degree of regional water-energy-food system: a case study of Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration [J]. Journal of Natural Resources,2022,37(3):582-599. (in Chinese)) (收稿日期:2025-01-13 编辑:熊水斌)

