

基于BP-DEMATEL的山西省冬小麦水足迹影响因素识别

韩宇平^{1,2}, 马伏枥¹, 贾冬冬^{1,2}, 黄会平^{1,2}, 张庚辰¹, 苗浩东¹

(1. 华北水利水电大学水资源学院, 河南 郑州 450045;

2. 华北水利水电大学河南省黄河流域水资源节约集约利用重点实验室, 河南 郑州 450045)

摘要:针对山西省冬小麦水足迹历史演变及关键影响因素识别问题, 分析了1993—2021年山西省冬小麦水足迹历史演变规律, 利用BP神经网络-决策实验室(BP-DEMATEL)模型对冬小麦水足迹演变的关键影响因素进行识别, 将其分为驱动型因素及特征型因素, 并揭示了影响因素之间的作用机制。结果表明:1993—2021年山西省冬小麦水足迹及单位水足迹均呈下降趋势;2021年山西省冬小麦总水足迹为27亿 m^3 (蓝水占比57%), 单位水足迹为 $1\,122\text{ m}^3/\text{t}$, 与前期高点相比分别下降38%(较1994年)和21%(较1993年);气温、相对湿度和灌溉面积为冬小麦水足迹演变的关键驱动型因素, 化肥施用量和农业机械总动力为关键特征型因素。

关键词:BP神经网络-决策实验室模型; 水足迹; 冬小麦; 山西省

中图分类号:TV213.4

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2024)02-0009-07

Identification of influencing factors on water footprint of winter wheat in Shanxi Province based on BP-DEMATEL//HAN Yuping^{1,2}, MA Fuli¹, JIA Dongdong^{1,2}, HUANG Huiping^{1,2}, ZHANG Gengchen¹, MIAO Haodong¹

(1. College of Water Resources, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China;

2. Key Laboratory of Water Resources Conservation and Intensive Utilization in the Yellow River Basin of Henan Province, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China)

Abstract: In response to the historical evolution of winter wheat water footprint in Shanxi Province and the identification of key influencing factors, the historical evolution law of winter wheat water footprint in Shanxi Province from 1993 to 2021 was analyzed. The key influencing factors of winter wheat water footprint evolution were identified using the BP neural network-decision-making trial and evaluation laboratory (BP-DEMATEL) model, which was divided into driving factors and characteristic factors, and the mechanism of action between the influencing factors was revealed. The results show that from 1993 to 2021, the water footprint and yield water footprint of winter wheat in Shanxi Province showed a downward trend. In 2021, the total water footprint of winter wheat in Shanxi Province was $2.7 \times 10^8\text{ m}^3$ (blue water accounted for 57%), with a unit water footprint of $1\,122\text{ m}^3/\text{t}$. Compared to the previous high point, it has decreased by 38% (compared to 1994) and 21% (compared to 1993), respectively. Temperature, relative humidity, and irrigation area are key driving factors for the evolution of winter wheat water footprint, while fertilizer application and total power of agricultural machinery are key characteristic factors.

Key words: BP neural network-decision-making trial and evaluation laboratory model; water footprint; winter wheat; Shanxi Province

2002年,荷兰学者Hoekstra提出了水足迹的概念,水足迹指生产某一产品或提供某种服务所消耗的淡水资源量,可以分为绿水足迹和蓝水足迹^[1-2]。对于农作物来讲,绿水足迹指作物生长过程中降水通过入渗进入土壤然后以蒸散发的方式被消耗掉的

那部分水量;蓝水足迹指作物生长过程中消耗的地表水及地下水量。学者围绕水足迹核算、水足迹评价基准构建、水足迹影响因素识别等开展了大量研究,并取得诸多成果。例如:卓拉等^[3]基于Aqua Crop模型对黄河流域小麦生产足迹进行了量化;赵

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(52009043);河南省软科学研究计划项目(222400410118)

作者简介:韩宇平(1975—),男,教授,博士,主要从事虚拟水及水资源管理研究。E-mail: hanyup@ncwu.edu.cn

通信作者:贾冬冬(1985—),男,讲师,博士,主要从事虚拟水及水资源管理研究。E-mail: jiadongdong@ncwu.edu.cn

勇等^[4]引入了水足迹及虚拟水的研究方法,对研究区主要粮食生产水足迹进行了量化,并对粮食贸易进行了虚拟水解析;黄会平等^[5]核算了海河流域年冬小麦和夏玉米的农业水足迹,拟合了冬小麦和夏玉米的产量,且分析了气候变化对冬小麦等农作物的影响;姜秋香等^[6]结合空间均衡分析研究了各地区水足迹的差异性;孙才志等^[7]采用能源水足迹评价模型,分析了多个国家的能源贸易隐含水足迹的贸易结构及类型,并利用分形方法深入探究了其位序规模分布规律;孙世坤等^[8]指出农业生产资料的投入和水资源利用效率是影响河套灌区小麦水足迹的主要因素;孙才志等^[9]指出我国人均水足迹数量变动是由足迹强度、资本产出、资本深化和经济活跃度4个因素共同作用的结果;王月英等^[10]指出区域气象条件和农业生产水平的差异是河北省东小麦和玉米水足迹变化的主要原因;Zhao 等^[11]基于 LMDI (logarithmic mean divisia index) 分解法得出经济发展水平提高成为我国水足迹变化的主要贡献因素;郭相等^[12]计算了多个省市农作物水足迹,并利用通径分析对农作物水足迹影响因素进行了分析。以往的研究大多关注各因素与水足迹之间的相关性或定量识别各因素对水足迹演变规律的贡献,未区分农作物水足迹各影响因素之间的因果关系。因此,本文以黄河流域中游主要粮食产区山西省为例,分析冬小麦水足迹及其演变规律,将冬小麦水足迹的影响因素分为驱动型和特征型因素,分析各因素之间的影响力大小及作用特征,以期深入认识农业水资源演变规律,促进农业水资源高效利用提供参考。

1 研究区概况与数据来源

山西省位于北纬 34° 34′ ~ 40° 44′, 东经 110° 14′ ~ 14° 33′, 总面积 15. 67 万 km², 行政区划见图 1。汾河是山西省黄河流域主要支流, 汾渭谷地分布大片粮食产区。冬小麦为山西省主要农作物之一, 2021 年山西省冬小麦播种面积为 53. 68 万 hm², 产量约 228 万 t。粮食作物的大规模种植对地区水资源造成巨大压力。

选取平均气温 (X_1)、相对湿度 (X_2)、风速 (X_3)、日照时数 (X_4)、实际水汽压 (X_5)、降水量 (X_6)、灌溉面积占比 (X_7)、农药使用量 (X_8)、化肥施用量 (X_9) 和农业机械总动力 (X_{10}) 10 个水足迹影响因素指标。生产资料数据等来源于 1993—2021 年《山西省统计年鉴》, 气象数据来源于气象数据共享网 (<http://data.cma.cn/>)。缺省值参考该地区前一年和后一年数据以及同年份相邻地区的数据进行插值。

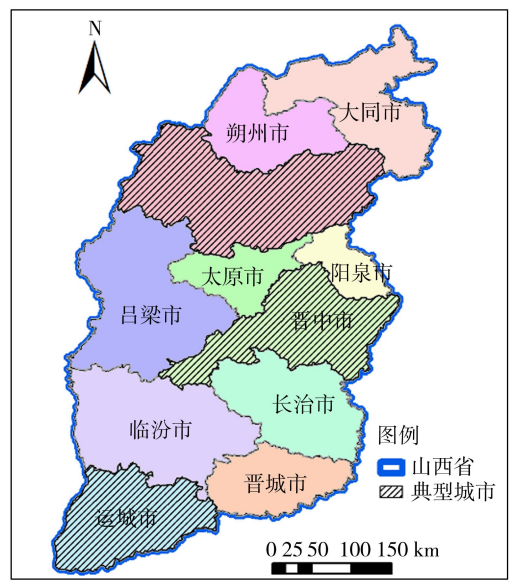


图 1 山西省行政区划
Fig.1 Administrative division of Shanxi Province

2 研究方法

2.1 农业水足迹核算方法

冬小麦水足迹通过 Cropwat 模型 8. 0 进行计算^[13], 参考农作物蒸发量根据联合国粮农组织 (Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO) 发布的 Penman-Monteith 公式进行计算^[14-15]。作物蒸散量由参考农作物蒸发量乘以作物系数获得, 作物系数采用 FAO 推荐值。利用海河流域各省市的作物灌溉面积占比计算主要作物的绿水和蓝水足迹^[16]。对于雨养农业, 作物的水足迹等于其生育期内的有效降水量, 其蓝水足迹等于 0; 对于灌溉农业, 作物绿水足迹与雨养作物绿水足迹相同, 其蓝水足迹等于作物需水量与有效降水量之差。计算公式为

$$W_g = [10\min (P_e, E_c)] / Y_a \quad (1)$$

$$W_b = [10(1 - \beta)\max (E_c - P_e, 0)] / Y_a \quad (2)$$

式中: W_g 为农作物的单位绿水足迹; W_b 为农作物的单位蓝水足迹; P_e 为作物生育期有效降水量, 按照美国农业部土壤保持局提出的方法逐旬计算; E_c 为作物蒸散量; Y_a 为作物单位面积产量; β 为区域灌溉面积所占比例。

2.2 BP 神经网络-决策实验室模型

决策实验室 (decision-making trial and evaluation laboratory, DEMATEL) 模型是一种利用图论和权值矩阵来描述因素与因素相互之间的影响程度与影响关系的方法^[17]。传统的 DEMATEL 模型依赖于专家的主观打分, 缺乏客观性, 一些学者利用 BP 神经网络替代专家打分环节^[18-20], 弥补了传统 DEMATEL 模型的缺点, 形成了 BP-DEMATEL 模

型^[21-23],其计算步骤如下:

步骤1 将要输入BP神经网络的影响因素矩阵正向化处理:

$$B_i = (b_i - b_{\min}) / (b_{\max} - b_{\min}) \quad (3)$$

式中: B_i 为正向化处理矩阵 B 的元素; b_i 为原始矩阵元素; $b_{\min}$ 为元素中的最小值; $b_{\max}$ 为元素中的最大值。

步骤2 将正向化后的影响因素矩阵输入BP神经网络,训练结束后得到输入层到隐含层的权值矩阵 w_1 和隐含层到输出层的权值矩阵 w_2 。

步骤3 计算综合权值矩阵 w ,其元素值为对应 w_1 与 w_2 元素取绝对值后的平均值。

步骤4 计算直接影响矩阵。将矩阵 B 中所有元素除以其中的最大值得到直接影响矩阵 $X = (x_{ij})_{n \times n}$,其中 i 为施加影响的因素的序号, j 为被影响的因素的序号, $1 \leq i, j \leq 10$ 。 $x_{ii} = 0$, $x_{ij} = w_i / w_j$,如果 $w_j = 0$,则 $x_{ij} = 0$ 。

步骤5 计算综合影响矩阵:

$$T = Y(I - Y) - 1 \quad (4)$$

其中

$$Y = X / \max_{1 \leq i \leq n} \sum_{j=1}^n x_{ij}$$

式中: T 为综合影响矩阵; I 为单位矩阵。

步骤6 综合影响矩阵的各行元素求和得到影响度 D ,各列元素求和得到被影响度 C ,中心度为 D 与 C 的和,原因度为 D 与 C 的差值。

根据DEMATEL模型的分类标准对冬小麦水足迹的影响因素进行识别,利用中心度的差异将其区分为关键因素和一般因素,利用原因度的差异将其区分为驱动型因素和特征型因素。原因度大于0的因素称为驱动型因素,对其他因素影响较大,其自身则较为稳定;原因度小于0代表其为特征型因素,容易受到驱动型因素的影响。在因果关系图中,在第一象限的要素中心度和原因度均高,为关键驱动型因素;在第二象限的要素中心度低和原因度高,为一般驱动型因素;在第三象限的要素中心度和原因度均低,为关键特征型因素;在第四象限的要素中心度高和原因度低,为一般特征型因素。

选取1993—2021年11组数据进行分析,其中1组为冬小麦水足迹,其余10组为冬小麦水足迹主要影响因素。灌溉水量即水足迹里的蓝水量,属于水足迹因变量的重要组成部分,因此未将其作为影响因子。影响因素作为输入矩阵,冬小麦水足迹作为目标矩阵。各地市分别建模进行运算,每个模型样本容量为 28×11 ,参考文献[18]的标准,样本容量能够满足模拟要求。在MATLAB软件中构建BP神经网络,包括输入层、隐含层和输出层^[24],隐含层节

点个数为10,输入层个数为10,每一种影响因素为一个输入点;训练集、测试集和验证集分别占70%、15%和15%,系统随机选择15%的数据(5×11)作为测试集。确定BP神经网络参数设置为:学习速率和期望误差分别为0.01、0.000 01^[25];激活函数选用sigmoid函数,初始的阈值和权值都是随机的。

3 结果与分析

3.1 山西省冬小麦水足迹及变化趋势

图2为1993—2021年山西省及典型城市冬小麦水足迹。由图2(a)可见,1993—2021年山西省冬小麦平均水足迹为34.9亿 m^3 ,总水足迹最大值为1994年的47.68亿 m^3 。1993—2021年山西省冬小麦水足迹呈下降趋势,降低了17亿 m^3 ,降幅达到41.4%。其中蓝水足迹的减少幅度较大,绿水足迹的变化不明显。水足迹的组成以蓝水足迹为主,占69.9%。山西省冬小麦总水足迹的降低与种植面积减小有关,2005年种植面积最低。由图2(b)可见,1993—2021年山西省冬小麦平均单位水足迹为1440 m^3/t ,总体呈减少趋势,下降了299 m^3/t ,下降幅度为25%。单位水足迹下降的原因可能是冬小麦单产和用水效率的提高,冬小麦单产在2021年最高,为4.53 t/hm^2 。忻州位于山西省中北部,为我

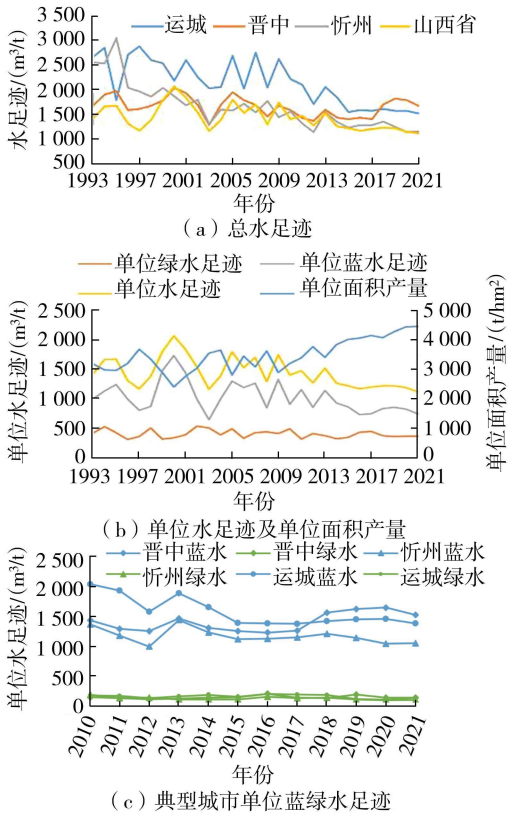


图2 1993—2021年山西省及典型城市冬小麦水足迹
Fig.2 Water footprint of winter wheat in Shanxi Province and typical cities from 1993 to 2021

国冬小麦种植的北边界,地形以山区和丘陵为主,年降水量较少,为 418 mm;运城位于山西省的最南部,地形以平原为主,年降水量 571 mm;晋中位于山西省中部,地形以山区和丘陵为主,年降水量 514 mm,选择运城、晋中、忻州 3 个典型城市进行进一步分析。由图 2(c)可见,运城单位蓝水足迹下降显著,2021 年相较 2010 年下降了 $657.3\text{ m}^3/\text{t}$;忻州单位蓝水足迹下降了 $310.8\text{ m}^3/\text{t}$;晋中单位蓝水足迹波动较大,呈先减少后增加的趋势。

3.2 影响因素分析

3.2.1 关键影响因素

分析运城、晋中、忻州 3 个典型城市冬小麦水足迹的关键影响因素,将 3 个典型城市的计算结果进行等权重法加权平均,得到山西省冬小麦水足迹的关键影响因素及作用类型。将 10 个因素的中心度均值 9.58 作为阈值,大于该值的因素即关键因素。表 1 为山西省及典型城市冬小麦水足迹影响因素的中心度及原因度,可见,冬小麦关键影响因素为化肥施用量(9.7)、农业机械总动力(9.61)、平均气温(9.58)、相对湿度(9.58)和灌溉面积占比(9.58)。随着化肥施用量和农业机械化率的提高,农业生产效率不断提高,冬小麦水足迹呈现一定下降趋势。农业机械在耕作过程中可以改善土壤结构,提高土壤的保水性能,有助于减少农业生产过程中的水分蒸发损失,降低农作物水足迹。图 3 为 3 个典型城市影响因素中心度与原因度的关系,可见,不同地区冬小麦关键影响因素有一定差异,运城的关键影响因素为农业机械总动力、相对湿度和日照时数;晋中的关键影响因素为灌溉面积占比、化肥施用量和农业机械总动力;忻州的关键影响因素为平均气温、降水量和实际水汽压。

1993—2021 年山西省冬小麦水足迹关键驱动型因素为灌溉面积占比(X_7)、相对湿度(X_2)和平均气温(X_1),其原因度分别为 0.64、0.56 和 0.34,对

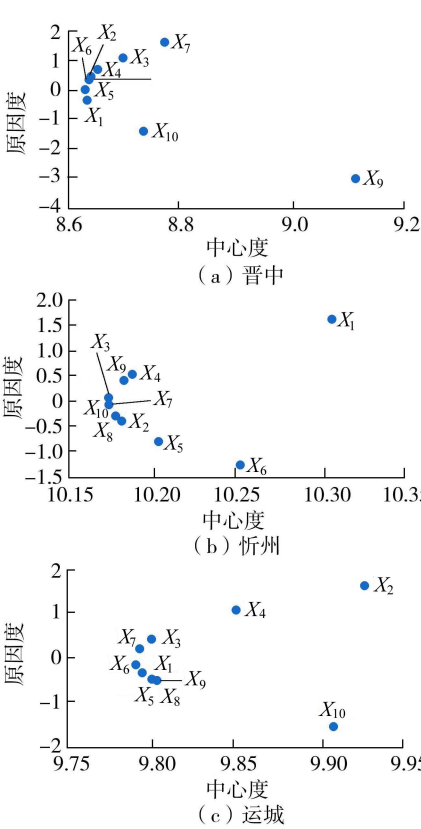


图 3 典型城市影响因素中心度与原因度关系

Fig. 3 Centrality-causality diagram of influencing factors in typical cities

水足迹及其他特征型因素产生较大的驱动作用。灌溉面积占比的变化会直接影响农业灌溉用水量^[26],灌溉面积扩大,农业灌溉用水量也会增加,产量会提高,两者均直接影响农作物水足迹。国家大力推广的滴灌、喷灌等节水灌溉技术使得灌溉面积进一步扩大,例如一些雨养农业区安装滴灌设施后变为灌溉农业区,影响冬小麦水足迹;相对湿度会对冬小麦蒸腾速率产生影响,相对湿度较高时冬小麦蒸发量会减慢,进而导致冬小麦耗水量减少;平均气温是影响农作物生长和发育的重要因素,其促进光合作用,有利于冬小麦产量增加;高温会导致蒸发作用加强,

表 1 山西省及典型城市冬小麦水足迹影响因素的中心度及原因度

影响因素	运城		晋中		忻州		山西省			
	影响度	被影响度	影响度	被影响度	影响度	被影响度	影响度	被影响度	中心度	原因度
X_1	4.74	5.06	4.15	4.49	5.99	4.32	4.96	4.62	9.58	0.34
X_2	5.79	4.13	4.52	4.12	4.89	5.29	5.07	4.51	9.58	0.56
X_3	5.12	4.68	4.91	3.79	5.12	5.05	5.05	4.51	9.56	0.54
X_4	5.47	4.38	4.66	4.00	5.37	4.82	5.16	4.40	9.56	0.77
X_5	4.68	5.12	4.32	4.31	4.71	5.50	4.57	4.97	9.54	-0.41
X_6	4.82	4.97	4.50	4.14	4.49	5.76	4.60	4.96	9.56	-0.35
X_7	5.01	4.78	5.19	3.58	5.13	5.04	5.11	4.47	9.58	0.64
X_8	4.67	5.13	4.57	4.07	4.95	5.23	4.73	4.81	9.54	-0.08
X_9	4.65	5.15	3.07	6.04	5.31	4.87	4.35	5.35	9.70	-1.01
X_{10}	4.18	5.73	3.68	5.05	5.06	5.12	4.31	5.30	9.61	-0.99

冬小麦水分需求增加,进而对冬小麦水足迹产生影响。

1993—2021 年山西省冬小麦水足迹关键特征型因素为化肥施用量 (X_9) 和农业机械总动力 (X_{10}),其原因度分别为-1.01 和-0.99,受驱动型因素的影响比较大。农业机械总动力指农业生产过程中使用的所有机械设备的动力总和,随着灌溉面积的扩大,对农业机械的需求也会相应增加。农业机械的应用促使农业生产模式由传统的人工劳动向现代化、机械化方向发展,有助于实现农业生产过程中的资源优化配置,提高农业生产的可持续性。随着农业机械技术的不断发展和普及,农业生产过程中的水资源利用将更加高效和可持续,有助于降低农作物水足迹。这些影响因素对冬小麦的生长代谢、水分调节、生长周期和参考需水量有巨大影响,进而影响水足迹。化肥在农业生产中必不可少,其可以提供农作物生长所需的养分从而提高农作物的产量和品质。化肥施用量对冬小麦的水足迹产生的影响受到诸多驱动型因素的作用,其中灌溉面积占比的增加会提高化肥的施用量。另外,使用化肥可以改善土壤结构,提高土壤的保水能力,进而提高农田水分的利用效率,从而有利于减少冬小麦的水足迹。化肥施用可以使农作物在有限的水资源条件下实现较高的产量,合理控制化肥的施用量,可以实现农业生产的可持续发展。

3.2.2 稳健性分析

为了尽量减小 BP-DEMATEL 模型模拟的误差,验证结果的合理性,删除模型中的一个影响因子,观察结果与原计算结果的差异。方法为:首先,删去平均气温数据,分别核算删除前后晋中、忻州和运城冬小麦水足迹各影响因素的中心度和原因度,并基于等权重法得到山西省水足迹各影响因素的中心度和原因度,进而获得关键驱动型因素和关键特征型因素,评估结果是否发生重大改变;其次,逐一删去单个其他因子,获得关键驱动型因素和关键特征型因素,评估结果是否发生重大改变。结果表明,删减影响因子后山西省冬小麦水足迹演变的关键特征型因素不变,而关键驱动型因素发生改变。删除平均气温或实际水汽压后未发现关键驱动型因素,删除相对湿度、降水量或农药使用量后关键驱动型因素为灌溉面积占比,删除风速或日照时数后关键驱动型因素为灌溉面积占比和相对湿度,删除灌溉面积占比后关键驱动型因素为相对湿度,删除农业机械总动力后关键驱动型因素为平均气温。主要原因为:灌溉面积占比、相对湿度和平均气温 3 项因素的中心度均在阈值附近波动,原模型中该 3 项因素的中

心度恰好等于关键因素的评估阈值,因此可以认为模型的模拟结果并未发生大的改变。本文出于实用性考虑将灌溉面积占比、相对湿度和平均气温均定义为关键影响因素。

3.3 讨论

化肥施用量、农业机械总动力、灌溉面积占比、平均气温、相对湿度为 1993—2021 年山西省冬小麦的水足迹变化的关键影响因素。其中灌溉面积占比、平均气温、相对湿度等为驱动型因素,其通过农业机械总动力、化肥施用量等特征型因素对冬小麦造成影响。稳健性分析结果显示关键影响因素并未发生大的改变。韩宇平等^[27-28]认为农业机械总动力、化肥施用量对冬小麦水足迹直接影响最大,气象因素主要通过农业生产投入因素对冬小麦水足迹产生影响;并指出人民胜利渠灌区对冬小麦蓝水足迹影响最大的因素为农用化肥施用量,农业机械总动力和有效降水量对蓝水足迹的影响次之。孙世坤等^[29]指出影响小麦水足迹的主要农业生产因子是化肥、农业机械投入,与本文结论基本一致。Sun 等^[30]指出化肥施用量和农业机械总动力等农业投入因素是冬小麦水足迹的主要影响因素,与本文所得的关键影响因素相吻合。于成等^[31]认为冬小麦的生产水足迹可能与作物本身的生长特性、种植面积、气候条件、灌溉水平等影响因素有关。

结合本文结论与前人的成果,为使黄河流域水足迹发展秉持高质量发展理念,首先要合理利用化肥,化肥在冬小麦生产中占据极为重要的地位,能有效减少农作物的种植成本,提高冬小麦的产量。随着科学技术的飞速发展,化肥在农业生产中占据越来越重要的地位,为提高粮食的产量,加大对化肥研发和使用的投入对农业发展有着重要的意义。其次应当提高农业机械化水平,农业机械装备是现代农业生产的重要物质基础,农业机械化是转变农业生产方式。应加大对农业大型拖拉机、大型收割机、大型采棉机、农用飞机等机械设备的投入,以提高农业生产率和农业的生产力水平。

4 结论

a. 1993—2021 年山西省冬小麦多年平均水足迹为 34.9 亿 m^3 , 冬小麦平均单位水足迹为 1440 m^3/t ,均呈逐渐减少的趋势,主要原因是农业生产资料投入不断增加、种植技术不断发展、种植面积减少、单位面积产量不断上升。

b. 化肥施用量、农业机械总动力、灌溉面积占比、平均气温、相对湿度为 1993—2021 年山西省冬小麦的水足迹变化的关键影响因素。化肥使用量、

农业机械总动力和灌溉面积占比对水足迹产生负影响,增大农业生产投入有效减少了水足迹产生,促进了黄河流域高质量和可持续发展,其中对冬小麦水足迹影响最大的是农业机械总动力。

c. 平均气温和相对湿度是关键驱动型因素,农业机械总动力、化肥施用量和灌溉面积占比是关键特征型因素。气候因素相较于农业生产投入因素对水足迹的影响较小,平均气温和相对湿度与水足迹呈正相关关系。

参考文献:

[1] HOEKSTRA A Y. Virtual water trade[C]// Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade. Delft: UNESCO-IHE, 2003.

[2] 马海良, 鄢浩楠, 李一凡. 基于水足迹理论的山西省水资源与经济增长脱钩分析[J]. 水利经济, 2022, 40(5): 23-28. (MA Hailiang, YUN Haonan, LI Yifan. Decoupling analysis of water resources and economic growth in Shanxi Province from the perspective of water footprint[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2022, 40(5): 23-28. (in Chinese))

[3] 卓拉, 王伟, 冯变变, 等. 黄河流域小麦生产水足迹量化与评价[J]. 农业机械学报, 2019, 50(9): 264-271. (ZHUO La, WANG Wei, FENG Bianbian, et al. Water footprint accounting and evaluation for wheat production in Yellow River Basin [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2019, 50(9): 264-271. (in Chinese))

[4] 赵勇, 黄可静, 高学睿, 等. 黄河流域粮食生产水足迹及虚拟水流动影响评价[J]. 水资源保护, 2022, 38(4): 39-47. (ZHAO Yong, HUANG Kejing, GAO Xuerui, et al. Evaluation of grain production water footprint and influence of grain virtual water flow in the Yellow River Basin[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(4): 39-47. (in Chinese))

[5] 黄会平, 张冰, 李新生, 等. 海河流域农业水足迹分布及对气候变化的响应[J]. 人民黄河, 2019, 41(2): 64-69. (HUANG Huiping, ZHANG Bing, LI Xinsheng, et al. Spatial-temporal characteristics agricultural water footprint in Haihe River Basin and its response to climate change [J]. Yellow River, 2019, 41(2): 64-69. (in Chinese))

[6] 姜秋香, 吴云星, 王子龙, 等. 黑龙江省水足迹时空分布规律及空间均衡分析[J]. 水资源保护, 2022, 38(5): 122-131. (JIANG Qiuxiang, WU Yunxing, WANG Zilong, et al. Spatio-temporal distribution and spatial equilibrium analysis of water footprint in Heilongjiang Province[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(5): 122-131. (in Chinese))

[7] 孙才志, 高春阳. 中国与“一带一路”沿线国家能源贸易隐含水足迹分形特征分析[J]. 水资源保护, 2022, 38(1): 52-61. (SUN Caizhi, GAO Chunyang. Analysis on fractal characteristics of implied water footprint of energy trade between China and countries along “the Belt and Road” [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1): 52-61. (in Chinese))

[8] 孙世坤, 刘文艳, 刘静, 等. 河套灌区春小麦生产水足迹影响因子敏感性 & 贡献率分析[J]. 中国农业科学, 2016, 49(14): 2751-2762. (SUN Shikun, LIU Wenyan, LIU Jing, et al. Sensitivity and contribution rate analysis of the influencing factors of spring wheat water footprint in Hetao Irrigation District [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(14): 2751-2762. (in Chinese))

[9] 孙才志, 张灿灿. 中国人均水足迹驱动效应分解与空间聚类分析[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2018, 39(2): 1-11. (SUN Caizhi, ZHANG Canan, et al. Driving effect decomposition and spatial clustering analysis of per capita water footprint in China [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2018, 39(2): 1-11. (in Chinese))

[10] 王月英, 刘科伟, 孙贵先. 河北省小麦-玉米水足迹区域差异及成因分析[J]. 河北农业大学学报, 2020, 43(1): 140-147. (WANG Yueying, LIU Kewei, SUN Guixian, et al. Regional difference and cause analysis of water footprint of wheat and maize in Hebei province [J]. Journal of Hebei Agricultural University, 2020, 43(1): 140-147. (in Chinese))

[11] ZHAO X, LIU J, LIU Q, et al. Physical and virtual water transfers for regional water stress alleviation in China [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2015, 112(4): 1031-1035.

[12] 郭相平, 高爽, 吴梦洋, 等. 中国农作物水足迹时空分布与影响因素分析[J]. 农业机械学报, 2018, 49(5): 295-302. (GUO Xiangping, GAO Shuang, WU Mengyang, et al. Analysis of temporal-spatial distribution and influencing factors of water footprint in crop production system of China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 295-302. (in Chinese))

[13] 田园宏, 诸大建, 王欢明, 等. 中国主要粮食作物的水足迹值: 1978-2010 [J]. 中国人口·资源与环境, 2013, 23(6): 122-128. (TIAN Yuangong, ZHU Dajian, WANG Huanming, et al. Water footprint calculation of China's main food crops: 1978-2010 [J]. China Population, Resources and Environment, 2013, 23(6): 122-128. (in Chinese))

[14] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements: FAO irrigation and drainage paper 56 [M].

- Rome;FAO,1998.
- [15] HOEKSTRA A Y. The water footprint assessment manual: setting the global standard[M]. Routledge; Earthscan, 2011.
 - [16] 范星, 陈彬. 三江平原粮食作物生产水足迹时空特征及影响因素[J]. 生态学报, 2022,42(15):6368-6380. (FAN Xing, CHEN Bin. Spatio-temporal patterns and influencing factors of the water footprint of grain crop production in the Sanjiang Plain [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(15): 6368-6380. (in Chinese))
 - [17] 孙永河, 韩玮, 段万春. 复杂系统 DEMATEL 算法研究进展评述[J]. 控制与决策, 2017, 32(3):385-392. (SUN Yonghe, HAN Wwei, DUAN Wanchun. Review on research progress of DEMATEL algorithm for complex systems[J]. Control and Decision, 2017, 32(3):385-392. (in Chinese))
 - [18] RUMELHART D E, HINTON G E, WILLIAMS R J. Learning internal representations by error propagation [R]. Oakland: California University San Diego La Jolla Institute for Cognitive Science, 1985.
 - [19] MCCLELLAND J L, RUMELHART D E. Explorations in parallel distributed processing: a handbook of models, programs, and exercises[M]. Cambridge: MIT Press, 1989.
 - [20] 朱诚, 王昭敏, 隆锋, 等. 基于 ABC-BP 神经网络的地铁盾构地表沉降预测[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(4):72-80. (ZHU Cheng, WANG Zhaomin, LONG Feng, et al. Prediction of ground settlement of subway shield based on ABC-BP neural network [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2023, 51(4):72-80. (in Chinese))
 - [21] 崔强, 武春友, 匡海波. BP-DEMATEL 在空港竞争力影响因素识别中的应用[J]. 系统工程理论与实践, 2013, 33(6):1471-1478. (CUI Qiang, WU Chunyou, KUANG Haibo, et al. Influencing factors research of airports competitiveness based BP-DEMATEL model[J]. Systems Engineering: Theory & Practice, 2013, 33(6):1471-1478. (in Chinese))
 - [22] 孙亚翡, 王涛, 路锦枝, 等. 基于 BP-DEMATEL 算法的冰情预报因子敏感性分析[J]. 水利学报, 2022, 53(9):1083-1091. (SUN Yafei, WANG Tao, LU Jinzhi, et al. Sensitivity analysis of BP-DEMATEL model to control parameters of ice processes [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53(9):1083-1091. (in Chinese))
 - [23] 樊振宇. BP 神经网络模型与学习算法[J]. 软件导刊, 2011, 10(7):66-68. FAN Zhenyu. Back propagation neural network model and learning algorithm[J]. Software Guide, 2011, 10(7):66-68. (in Chinese))
 - [24] 卓美燕, 林文介. 基于机器学习的跨海管道泄漏位置预测模型[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(3):45-50. (ZHUO Meiyang, LIN Wenjie. Leakage location prediction model of trans-oceanic pipelines based on machine learning [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(3): 45-50. (in Chinese))
 - [25] 王嵘冰, 徐红艳, 李波, 等. BP 神经网络隐含层节点数确定方法研究[J]. 计算机技术与发展, 2018, 28(4):31-35. (WANG Rongbing, XU Hongyan, LI Bo, et al. Research on method of determining hidden layer nodes in BP neural network [J]. Computer Technology and Development, 2018, 28(4):31-35. (in Chinese))
 - [26] 刘静, 余钟波. 基于水足迹理论的中国水资源压力评价[J]. 水资源保护, 2019, 35(5):35-39. (LIU Jing, YU Zhongbo. Water resources pressure assessment in China based on water footprint theory [J]. Water Resources Protection, 35(5):35-39. (in Chinese))
 - [27] 韩宇平, 贾冬冬, 黄会平, 等. 基于通径分析的海河流域冬小麦水足迹及影响因素[J]. 水资源保护, 2019, 35(1):6-13. (HAN Yuping, JIA Dongdong, HUANG Huiping, et al. Water footprint of winter wheat and its influencing factors in Haihe River Basin based on path analysis[J]. Water Resources Protection, 2019, 35(1):6-13. (in Chinese))
 - [28] 韩宇平, 张嘉彧, 代小平, 等. 灌区粮食生产水足迹的影响因素研究[J]. 人民黄河, 2017, 39(2):42-46. (HAN Yuping, ZHANG Jiayu, DAI Xiaoping, et al. Study on factors impacting water footprint of grain production of irrigation area[J]. Yellow River, 2017, 39(2): 42-46. (in Chinese))
 - [29] 孙世坤, 王玉宝, 吴普特, 等. 小麦生产水足迹区域差异及归因分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(13):142-148. (SUN Shikun, WANG Yubao, WU Pute, et al. Spatial variability and attribution analysis of water footprint of wheat in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(13):142-148. (in Chinese))
 - [30] SUN S K, WU P T, WANG Y B, et al. The virtual water content of major grain crops and virtual water flows between regions in China[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2013, 93(6):1427-1437.
 - [31] 于成, 张祖陆. 山东省冬小麦夏玉米作物生产水足迹研究[J]. 水电能源科学, 2013, 31(12):202-204. (YU Cheng, ZHANG Zulu. Study on production water footprint of winter-wheat and summer-maize in Shandong Province [J]. Water Resources and Power, 2013, 31(12):202-204. (in Chinese))

(收稿日期:2023-07-17 编辑:王芳)