

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2019.01.002

基于通径分析的海河流域冬小麦水足迹及影响因素

韩宇平^{1,2,3}, 贾冬冬¹, 黄会平⁴, 王春颖^{1,2}, 曲唱¹

(1. 华北水利水电大学水利学院, 河南 郑州 450046; 2. 水资源高效利用与保障工程河南省协同创新中心, 河南 郑州 450046; 3. 河南省水环境治理与模拟重点实验室, 河南 郑州 450046; 4. 华北水利水电大学测绘与地理信息学院, 河南 郑州 450046)

摘要:为量化冬小麦对水资源的消耗、合理利用区域水资源,基于彭曼公式、日尺度土壤水量平衡与通径分析法核算了1958—2016年海河流域冬小麦水足迹,分析了气象、农业生产投入因素对冬小麦水足迹的直接和间接影响。结果表明:流域冬小麦多年平均总水足迹为239.6亿 m^3 ,平均水足迹为1840 m^3/t ;海河流域冬小麦水足迹呈整体下降趋势,空间上京津地区最高,山西次之,山东、河南地区最低;农业机械总动力、化肥施用折纯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。可通过提高农业生产力的方式降低冬小麦水足迹,京津等灰水足迹较高的地区应减少施肥。

关键词:冬小麦;水足迹;通径分析;海河流域

中图分类号:TV213.4

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2019)01-0006-08

Water footprint of winter wheat and its influencing factors in Haihe River Basin based on path analysis // HAN Yuping^{1,2,3}, JIA Dongdong¹, HUANG Huiping⁴, WANG Chunying^{1,2}, QU Chang¹ (1. School of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China; 2. Collaborative Innovation Center of Water Resources Efficient Utilization and Support Engineering, Zhengzhou 450046, China; 3. Henan Key Laboratory of Water Environment Simulation and Treatment, Zhengzhou 450046, China; 4. College of Surveying and Geo-informatics, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: In order to quantify the water consumption of winter wheat, and make use of the regional water resources rationally, water footprint of winter wheat in Haihe River Basin from 1958 to 2016 was accounted, and direct and indirect effects of meteorological and agricultural input on water footprint of winter wheat was analyzed based on Penman formula, daily scale soil water balance and path analysis. The results show that the years average total water footprint of winter wheat in the basin was 239.6 billion m^3 and the average unit water footprint was 1840 m^3/t . The water footprint shows a significantly decreasing trend. The water footprint was heterogeneous in space with the largest water footprint in Beijing and Tianjin, followed by Shanxi, Shandong and Henan. The total power of agricultural machinery and the amount of converted fertilizer application have the biggest direct effect on the water footprint of winter wheat. Meteorological factors influence water footprint of winter wheat mainly by input factors of agricultural production. Water footprint of winter wheat can be reduced by increasing agricultural productivity. Fertilization should be reduced in areas with high grey water footprint, such as Beijing and Tianjin.

Key words: winter wheat; water footprint; path analysis; Haihe River Basin

水资源短缺以及大量施肥导致的农业面源污染是我国农业水资源面临的突出问题。量化农业对水资源的消耗并分析其影响因素对于区域水资源高效利用具有重要意义。荷兰学者 Hoekstra^[1]于2002年提出了水足迹的概念,水足迹指的是生产某一产

品或提供某种服务所消耗的淡水资源量,它能够综合体现消耗的水量、水源类型以及污染量和污染类型,目前被广泛用于水资源管理^[2-4]。农业水足迹是生产单位作物所消耗的水资源量,包括绿水足迹、蓝水足迹和灰水足迹^[2]。绿水足迹是作物生长过程

基金项目:“十三五”国家重点研发计划(2016YFC0401402);国家自然科学基金(51679089, 51609084, 51709017)

作者简介:韩宇平(1975—),男,教授,博士,主要从事水资源系统工程研究。E-mail: han0118@163.com

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;蓝水足迹是作物生长过程中消耗的地表水及地下水量;灰水足迹是为稀释农业生产过程中产生的污染物使其达到环境要求的水质标准所消耗的水量^[5-7]。

目前,大量学者从全球^[8-9]、国家^[10-11]、流域^[12-14]、地区^[15-16]等尺度对农业水足迹进行了核算和评价。受气象因子、农业生产水平等多因素影响,农业水足迹呈现显著的时空差异性。Sun 等^[17]分析了中国河套灌区主要作物水足迹的际年变化及其影响因素,指出农业投入增加为水足迹际年减小的主要影响因子(贡献率为 84%)。Zhi 等^[18]基于分解分析,研究了 2002—2007 年海河流域水足迹变化的贡献因素,指出技术因素为流域水足迹增长的最主要贡献因子。Zhao 等^[19]基于对数平均迪氏分解方法分析指出经济活动为我国水足迹增长的主要贡献因素。Feng 等^[20]运用结构分解得出张掖市在迅速城市化过程中的技术效应为水足迹轻微的主要因素,并且结构调整效应部分抵消了技术效应造成的水足迹变化。李泽红等^[21]运用灰色关联分析研究了武威绿洲区农业水足迹,指出人口增长以及农业生产投入为水足迹变化的主要驱动因素。孙世坤等^[22]基于通径分析确定了我国冬小麦空间差异的影响因素,指出农业生产水平和气候条件差异为造成我国冬小麦空间差异的主要原因,其中化肥、农业机械投入为主要农业生产因子,太阳辐射和降水量为主要气候因子。郭相等^[23]分析了我国农作物水足迹时空分布及影响因素,指出人口密度、人均纯收入和化肥施用量为我国农作物水足迹时空变化的主要驱动因子。以上研究通过不同方法或从不同尺度分析了各因素对农业水足迹的贡献,然而针对各因素之间的相互影响关注较少或者研究不够深入。

本文分析了海河流域 1958—2016 年冬小麦水足迹的时空分布特征,基于通径分析法分析了气象因素、农业生产投入因素对冬小麦水足迹时空差异的直接和间接影响,可为海河流域农业水资源管理提供参考。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

海河流域位于东经 112°~120°、北纬 35°~43° 之间,面积 31.8 万 km²,包括了北京、天津等 23 个大中城市,为我国政治、经济、文化的中心。海河流域属于温带半湿润、半干旱大陆性季风气候区,年平均温度为 -4.9~15℃。年平均降水量为 380~580 mm,雨季(6—9 月)降水量占全年降水量的

70%~85%。流域主要土壤为潮土和褐土。冬小麦为海河流域主要粮食作物,2016 年冬小麦产量 2377 万 t,占流域粮食产量的 41.8%。

1.2 数据及来源

数据主要包括气象数据和农业统计数据。气象数据来源于中国气象数据共享网(<http://data.cma.cn/>),包括 1958 年以来海河流域及周边 26 个气象站点的逐日最高气温、最低气温、日照时数、相对湿度、风速及降水量。26 个站点中,黄骅站缺少 1958—1959 年气象数据,其余站点数据缺失率不足 0.5%。根据相邻气象站数据对黄骅站进行了插补,对其余缺测数据进行插值以及对全部数据进行了校准。农业统计数据主要来源于国家统计局年鉴、中国农业种植网(<http://zzys.agri.gov.cn/nongqing.aspx>),主要包括冬小麦播种面积及产量、化肥施用折纯量、农业机械总动力、耕地面积、有效灌溉面积等。

1.3 冬小麦水足迹核算

冬小麦水足迹(生产水足迹)为生产单位质量冬小麦所消耗的广义水资源量。冬小麦总水足迹指一定区域内生产冬小麦所消耗的广义水资源总量。冬小麦绿水、蓝水及灰水足迹按照 Hoekstra 等^[24]提出的框架进行计算。各地区冬小麦雨养区的比例按照有效灌溉面积占该地区耕地面积之比确定。

对于雨养区,单位面积冬小麦所消耗的蓝水量为 0,绿水量等于其生育期内通过蒸散发累计消耗的水资源量。冬小麦生育期内逐日蒸散发量计算公式为

$$E_a = K_s K_c E_0 \quad (1)$$

$$\text{其中 } K_s = \begin{cases} \frac{s}{(1-p)s_m} & s < (1-p)s_m \\ 1 & s \geq (1-p)s_m \end{cases}$$

式中: E_a 为逐日腾发量,mm/d; K_s 为水分胁迫系数,反映了水分胁迫对作物蒸腾的影响,取值范围为 0~1,当 $K_s < 1$ 时,存在水分胁迫作用, $K_s = 1$ 时不存在水分胁迫作用; K_c 为作物系数,为作物生长阶段的函数,作物系数的取值及各地区逐年冬小麦生育中期及生育末期的作物系数的修正参考文献[25]; E_0 为参考作物腾发量,mm,按照 FAO 推荐的彭曼公式^[25]计算; s 为冬小麦根区实际可用的土壤含水量,mm,通过每日水量平衡模型获得^[7,9]; s_m 为根区最大可用的土壤含水量,mm; p 为没有遭受水分胁迫条件下作物能够从根区吸收的含水量占根区最大可用含水量的比例^[26]。研究区降水及灌溉引起的径流量参考文献[8]计算。

对于灌溉区,认为单位面积冬小麦消耗的绿水

量与雨养区冬小麦所消耗的绿水量相同^[9],蓝水量等于充分灌溉条件下冬小麦生育期通过蒸散发所消耗的水量($K_s = 1$)减去冬小麦消耗的绿水量。

冬小麦的绿水足迹、蓝水足迹分别由其所消耗的绿水量、蓝水量除以冬小麦产量获得。冬小麦的灰水足迹计算公式为

$$W_{\text{grey}} = \frac{\alpha A}{(c_m - c_n) Y_a} \quad (2)$$

式中: W_{grey} 为冬小麦的灰水足迹, m^3/t ; α 为氮肥淋溶率,取值10%^[26],由于海河流域冬小麦种植时期面源污染物主要来自于施肥,且氮肥施用量最大,本文按照稀释一定量的氮肥所需的水量来计算; A 为氮肥的施用量, kg/hm^2 ; c_m 为接纳水体中氮的最大允许质量浓度,参照GB 3838—2002《地表水环境质量标准》,取值 $0.01 \text{ kg}/\text{m}^3$; c_n 为自然水体中氮的本底质量浓度,取值为0; Y_a 为冬小麦产量, t/hm^2 。

1.4 通径分析

通径分析是研究变量间相互关系以及自变量对因变量作用方式、程度的多元统计分析技术。通径分析是在多元回归的基础上将相关系数进行分解,采用直接通径、间接通径及总通径系数分别表示某一变量对因变量的直接影响、间接影响和总影响^[27]。通径分析不要求变量之间相互独立。通径系数通过求解以下方程获得:

$$\begin{cases} P_1 + r_{12}P_2 + r_{13}P_3 + \dots + r_{1k}P_k = r_{1y} \\ r_{21}P_1 + P_2 + r_{23}P_3 + \dots + r_{2k}P_k = r_{2y} \\ \vdots \\ r_{k1}P_1 + r_{k2}P_2 + r_{k3}P_3 + \dots + P_k = r_{ky} \end{cases} \quad (3)$$

式中: r_{ij} 为因素 x_i 与因素 x_j 的简单相关系数(皮尔逊相关系数); r_{iy} 为因素 x_i 与因变量 Y 的简单相关系数,也称因素 x_i 对因变量 Y 的总影响; P_i 为直接通径系数,表示因素 x_i 对因变量 Y 的直接影响,通过解多元线性方程获得; $r_{ij}P_j$ 为间接通径系数,表示 x_i 通过 x_j 对因变量 Y 的间接影响效应。 $r_{iy}P_i$ 表示因素 x_i 对因变量 Y 的总贡献。

决定系数表示相关因素对因变量 Y 的相对决定程度,包括单因素和双因素共同对因变量 Y 的决定作用,计算公式为

$$d_i = P_i^2 \quad (4)$$

$$d_{ij} = 2P_i r_{ij} P_j \quad (5)$$

式中: d_i 为因素 x_i 对因变量 Y 的决定系数; d_{ij} 为因素 x_i 和因素 x_j 共同对因变量 Y 产生影响的决定系数。

选择气象因素以及与农业生产投入相关的10个影响因子分析这些影响因子对水足迹时空变化的

直接影响和间接影响。气象因素包括平均气温 x_1 、相对湿度 x_2 、风速 x_3 、日照时数 x_4 、水汽压 x_5 、降水量 x_6 和太阳辐射 x_7 ,农业生产投入因素包括化肥施用折纯量 x_8 、农业机械总动力 x_9 和灌溉面积占比 x_{10} 。灌溉面积占比由灌溉面积除以耕地面积获得。

2 结果与分析

2.1 冬小麦水足迹的时空变化特征

海河流域冬小麦总水足迹的时间变化如图1所示。流域冬小麦多年平均总水足迹为 239.6 亿 m^3 。1958—1997年冬小麦总水足迹上升了58%,1997年冬小麦总水足迹最高,为 293.5 亿 m^3 ,之后下降了13%,与冬小麦播种面积的变化显著相关(相关系数 $r = 0.76, P < 0.01$)。冬小麦总灰水足迹变化幅度最大,1958—1998年冬小麦总灰水足迹从 1 亿 m^3 连续增长为 77 亿 m^3 ,1998年以后下降21%,至 61 亿 m^3 。

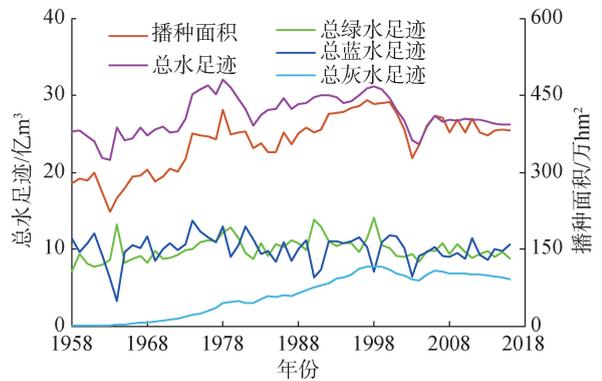


图1 1958—2016年海河流域冬小麦总水足迹

冬小麦水足迹如图2所示,多年平均水足迹为 $1840 \text{ m}^3/\text{t}$ 。冬小麦水足迹呈逐步下降趋势,主要跟冬小麦产量的提高有关($r = -0.83, P < 0.01$),也说明冬小麦的水分利用效率在逐年提高。冬小麦水足迹下降趋势可用指数函数 $y = 7120e^{-0.04(x-1958)}$ ($R^2 = 0.99$)拟合。冬小麦水足迹在1961年($12450 \text{ m}^3/\text{t}$)和1962年($8218 \text{ m}^3/\text{t}$)显著高于其他年份,主要因为1961—1962年海河流域发生严重干旱,冬小麦产

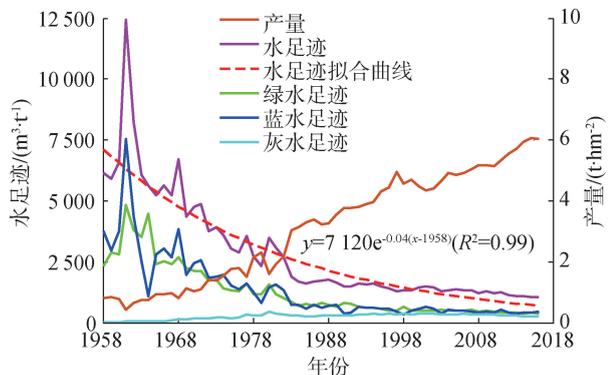


图2 1958—2016年海河流域冬小麦水足迹与产量

量严重低于多年平均值。分项来看,冬小麦蓝水足迹与绿水足迹的变化趋势与水足迹整体变化趋势一致。冬小麦灰水足迹呈先增加后减少趋势,前期主要是由于施肥量的迅速增加导致(从 2 kg/hm^2 到 170 kg/hm^2),后期由于施肥量增加不明显,同时随着产量的提高,灰水足迹呈现一定程度的减少。

本文以2007—2016年为例分析冬小麦水足迹的空间变化。总体来看,水足迹表现出明显的空间差异(图3(a))。京津地区水足迹最高,为 $1400\sim 1500\text{ m}^3/\text{t}$,主要由于京津地区化肥施用量显著高于海河流域平均值,过量施肥导致该地区冬小麦灰水足迹较高,同时伴随着严重的农业面源污染。因此,对于京津地区应减少施肥。山西地区水足迹次之,为 $1200\sim 1300\text{ m}^3/\text{t}$,主要因为山西各地区冬小麦产量偏低。河南、山东地区水足迹最低,多在 $1100\text{ m}^3/\text{t}$ 及以下。

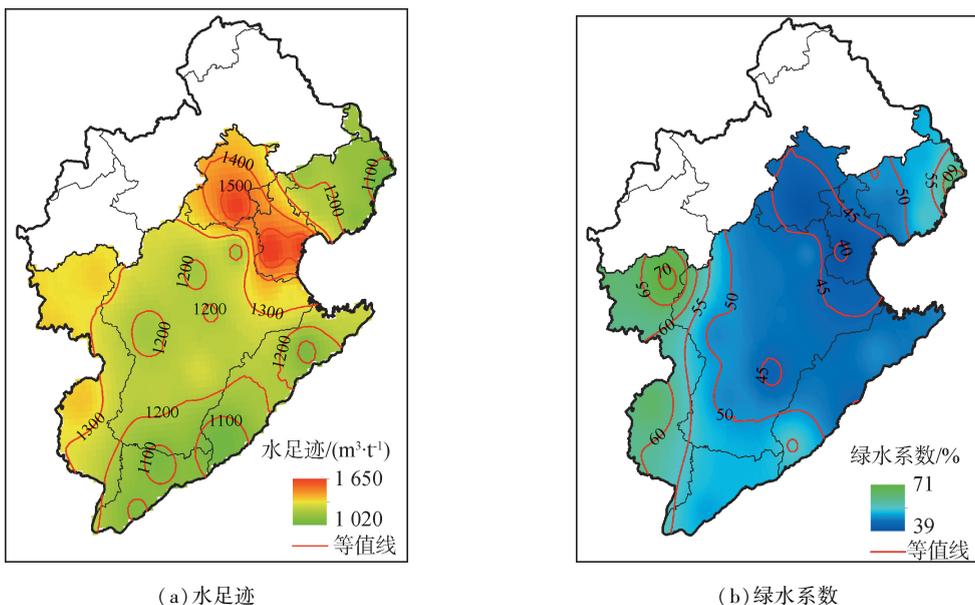
冬小麦消耗水资源的来源和结构用绿水系数表示,绿水系数为冬小麦生育期所消耗的绿水量占冬小麦生育期通过蒸散发所消耗的水量(绿水与蓝水之和)的比例。绿水系数越高,作物生长受气候变化(主要是降水)的影响越大,反之,其更加依赖于人类活动(灌溉)。总体来看,北京、天津和石家庄地区冬小麦生产主要依赖于灌溉,其余地区冬小麦水足迹主要由绿水构成。如图3(b)所示,海河流域绿水系数基本在 $40\%\sim 70\%$,山西地区绿水系数最高,为 $60\%\sim 70\%$,说明该地区冬小麦生长所消耗的水资源主要来源于降水,该地区冬小麦生产更加易受气候因素的影响。京津地区绿水系数为 $40\%\sim 45\%$,说明该地区冬小麦生长所消耗的水资源主要来源于灌溉。绿水系数从京津地区向

外逐渐升高。

2.2 冬小麦水足迹时间变化的影响因素

冬小麦的水足迹受多因素共同影响,其中气象因素如温度、降水、水汽压、风速、日照时数等对冬小麦生育期耗水(蒸散发)量以及冬小麦产量均有一定影响。农业生产投入因素如化肥施用折纯量、农业机械总动力等对冬小麦产量影响较大。化肥施用折纯量同时影响冬小麦的灰水足迹。本文采用通径分析法厘清各因素对于冬小麦水足迹的直接和间接影响,结果见表1。表1中正负号分别表示因素对冬小麦水足迹产生正影响和负影响;通径系数的大小表示各因素对于冬小麦水足迹产生影响的程度。直接通径系数表示因素对冬小麦水足迹的直接影响,间接通径系数表示因素 x_i 经 x_j 对水足迹的间接影响;总影响为直接影响和间接影响的汇总,其值等于因素 x_i 和水足迹的简单相关系数(皮尔逊相关系数)。由于缺乏数据,冬小麦水足迹核算中未考虑灌溉面积占比的逐年差异,因此未量化灌溉面积占比对冬小麦水足迹时间变化的影响,其影响在误差项中体现。

由表1可知,化肥施用折纯量(-0.482)、太阳辐射(0.427)对冬小麦水足迹时间变化的直接影响最大,化肥施用折纯量直接对冬小麦水足迹产生负影响,太阳辐射直接对冬小麦水足迹产生正影响。各影响因素对冬小麦水足迹时间变化的直接影响从大到小依次为化肥施用折纯量 x_8 、太阳辐射 x_7 、风速 x_3 、日照时数 x_4 、农业机械总动力 x_9 、水汽压 x_5 、平均气温 x_1 、相对湿度 x_2 和降水量 x_6 。水汽压、平均气温、相对湿度及降水量对冬小麦水足迹的直接影响均较小(直接通径系数不足 0.1)。



(a) 水足迹

(b) 绿水系数

图3 冬小麦水足迹及生育期绿水系数空间分布

表 1 冬小麦水足迹时间变化影响因素分析

影响因素	直接通径系数	间接通径系数									总影响
		x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	
x_1	0.056		0.022	-0.144	0.072	-0.016	0.000	-0.087	-0.237	-0.058	-0.391
x_2	-0.054	-0.023		0.026	0.080	-0.038	-0.002	-0.105	0.127	0.037	0.049
x_3	0.347	-0.023	-0.004		-0.116	0.018	0.000	0.151	0.133	0.039	0.545
x_4	-0.321	-0.012	0.013	0.125		0.025	0.001	0.424	0.211	0.055	0.521
x_5	-0.060	0.015	-0.034	-0.101	0.134		-0.002	-0.180	-0.040	-0.005	-0.273
x_6	-0.004	-0.005	-0.024	-0.022	0.099	-0.026		-0.136	0.010	0.004	-0.104
x_7	0.427	-0.011	0.013	0.123	-0.318	0.025	0.001		0.200	0.052	0.513
x_8	-0.482	0.027	0.014	-0.096	0.140	-0.005	0.000	-0.177		-0.119	-0.697
x_9	-0.129	0.025	0.015	-0.104	0.136	-0.002	0.000	-0.173	-0.443		-0.675

间接通径系数表明各因素通过其他因素对冬小麦水足迹的影响程度,由表 1 可知,气象因素中,平均气温、相对湿度主要通过化肥施用折纯量对冬小麦水足迹产生影响,风速、日照时数、水汽压、降水量主要通过太阳辐射对冬小麦水足迹产生影响。日照时数通过太阳辐射以及太阳辐射通过日照时数对水足迹产生影响的间接通径系数分别为 0.424 和 -0.318,为间接通径系数中较大的两项(第二和第三),说明两者存在一定的相互影响(共线性),对于共线性强的因素在下一步建立多元回归方程时进行剔除。农业生产投入因素中,农业机械总动力通过化肥施用折纯量对冬小麦水足迹产生负影响。农业机械化提高了肥料的利用效率,从而提高了作物的产量^[28]。从总影响来看,化肥施用折纯量和农业机械总动力对冬小麦水足迹的总影响最大,且为负影响,说明施肥量的增加和农业生产力的提高为冬小麦水足迹逐年下降的最主要原因。

决定系数反映了单个因素或者两个因素共同对因变量 Y 的决定作用。各因素对冬小麦水足迹时间变化的决定系数及贡献见表 2。由表 2 可知,9 个因素对冬小麦水足迹的决定系数之和 $R^2 = 0.656$,说明已知的 9 个因素决定了冬小麦水足迹 65.6% 的变化,误差项决定系数为 0.344。误差项对水足迹的决定作用最大,其次为日照时数和太阳辐射的共同作用(-0.272),第三为化肥施用折纯量

表 2 各因素对冬小麦水足迹时间变化的决定系数及贡献

决定因素	决定系数	贡献因素	对 R^2 的贡献
x_e	0.344	x_8	0.336
x_4, x_7	-0.272	x_7	0.219
x_8	0.232	x_3	0.189
x_7	0.182	x_4	-0.167
x_7, x_8	0.171	x_9	0.087
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
合计	1.00	合计	0.656

(0.232),其余因素的决定系数均不足 0.2。各变量对决定系数贡献较大的主要有化肥施用折纯量、太阳辐射及风速。

2.3 冬小麦水足迹空间变化的影响因素

冬小麦水足迹空间变化的通径分析结果如表 3 所示。由表 3 可知,各因素对冬小麦水足迹空间变化的直接影响从大到小依次为:农业机械总动力 x_9 、灌溉面积占比 x_{10} 、化肥施用量 x_8 、风速 x_3 、日照时数 x_4 、平均气温 x_1 、相对湿度 x_2 、太阳辐射 x_7 、水汽压 x_5 和降水量 x_6 。农业机械总动力、化肥施用折纯量对冬小麦水足迹的直接影响为负影响,说明农业生产力的提高对冬小麦的水足迹空间变化的直接影响为负影响。水汽压和降水对冬小麦水足迹空间变化的直接影响较小,两者均小于 0.1。京津地区冬小麦水足迹较高,尽管化肥施用折纯量对冬小麦水足迹的直接影响为负影响,但当施肥量超过一定程度就会导致农业面源污染等问题。河南、山东地区冬小麦水足迹最低,主要因为河南、山东为我国的冬小麦主产区之一,农业生产投入大,如农业机械化水平较高,灌溉农业占比较高以及合理施肥等提高了该地区农业生产力,降低了该地区冬小麦水足迹。

通过各因子间接通径系数分析可知,气象因素中,平均气温、相对湿度、风速、水汽压均通过化肥施用折纯量、农业机械总动力间接对冬小麦水足迹产生负影响,通过灌溉面积占比对冬小麦水足迹产生正影响。日照时数通过太阳辐射以及太阳辐射通过日照时数对水足迹产生影响的间接通径系数分别为 -0.257 和 0.321,体现了两个因素之间的相互影响(共线性),对于共线性强的因素下一步建立多元回归方程时进行剔除。农业生产投入因素中,农业机械总动力与化肥施用折纯量相互通过对间接对冬小麦水足迹产生负影响。从各因素对冬小麦的总影响来看,相对湿度对冬小麦水足迹的影响最大(-0.568),其次为农业机械总动力(-0.469)。

表3 冬小麦水足迹空间变化影响因素分析

影响因素	直接通径系数	间接通径系数										总影响
		x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	
x_1	0.298		0.017	0.029	-0.215	0.066	0.000	0.106	-0.291	-0.149	0.075	-0.063
x_2	-0.286	-0.018		0.041	-0.043	0.056	0.000	0.022	-0.124	-0.272	0.055	-0.568
x_3	0.407	0.021	-0.029		0.048	0.011	0.000	-0.039	-0.094	-0.075	0.145	0.395
x_4	0.358	-0.179	0.034	0.054		-0.048	0.000	-0.257	0.227	-0.037	0.087	0.239
x_5	0.091	0.217	-0.176	0.048	-0.189		0.000	0.100	-0.332	-0.345	0.139	-0.449
x_6	-0.008	0.010	-0.001	0.009	0.009	0.002		-0.002	-0.066	-0.039	-0.002	-0.086
x_7	-0.286	-0.110	0.022	0.055	0.321	-0.032	0.000		0.222	0.097	-0.092	0.198
x_8	-0.465	0.186	-0.076	0.082	-0.175	0.065	-0.001	0.137		-0.421	0.318	-0.349
x_9	-0.840	0.053	-0.093	0.036	0.016	0.037	0.000	0.033	-0.233		0.522	-0.469
x_{10}	0.673	0.033	-0.023	0.088	0.046	0.019	0.000	0.039	-0.220	-0.651		0.004

各因素对水足迹空间变化的决定系数及贡献见表4。由表4可知,各因素对冬小麦水足迹的决定系数之和 $R^2 = 0.852$, 误差项决定系数为 0.148。说明已知的 10 个因素决定了冬小麦水足迹空间变化的 85.2%, 误差项对水足迹空间变化的决定作用为 14.8%。农业机械总动力与灌溉面积占比的共同作用对水足迹的决定系数最大, 其次为农业机械总动力。决定系数较大的因素均为农业生产投入因素或农业生产投入因素之间的相互作用, 说明空间上, 农业生产投入因素对冬小麦水足迹的空间变化起决定作用, 这与水足迹时间变化的决定因素一致。各变量对决定系数贡献较大的主要有农业机械总动力(0.394)、相对湿度(0.162)、化肥施用折纯量(0.162)及风速(0.161)。

表4 各因素对冬小麦水足迹空间变化的决定系数及贡献

决定因素	决定系数	贡献因素	对 R^2 的贡献
x_9, x_{10}	-0.877	x_9	0.394
x_9	0.706	x_2	0.162
x_{10}	0.453	x_8	0.162
x_8, x_9	0.392	x_3	0.161
x_8, x_{10}	-0.296	x_4	0.086
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
合计	1.00	合计	0.852

2.4 讨论

农业生产投入因素为海河流域冬小麦水足迹时空差异的主要影响因素, 例如农业机械总动力的增加、化肥施用折纯量的增加等对冬小麦水足迹产生直接的负影响。Sun 等^[17]指出河套灌区农业生产投入增加为水足迹年际减少的主要贡献因子, 并指出化肥、农业机械总动力为影响我国水足迹变化的主要农业生产投入因子^[22], 本研究结果与其一致, 因此, 可通过提高农业生产力的方式降低冬小麦水足迹, 提高水资源的利用效率。气象因素为影响海河流域冬小麦水足迹的次要因素, 例如海河流域风

速呈逐年下降趋势, 直接和间接引起冬小麦水足迹的逐年下降。孙世坤等^[22]指出太阳辐射、降水量为影响我国农业水足迹的主要气候因子。本研究发现太阳辐射对水足迹的直接影响较大, 但降水量对水足迹影响较小, 可能是研究区域气象条件不同导致的。从间接影响看, 各气象因子主要通过农业机械总动力、化肥施用折纯量等农业生产投入因素对冬小麦水足迹产生影响。

由于数据不足和研究方法不一, 研究仍存在一些不确定性。①尽管海河流域冬小麦水足迹的核算考虑了水分胁迫的影响及不同时间、地点作物系数的修正, 然而仍不能保证水足迹的核算结果接近真实值, 后期还需进一步开展试验观测, 加强水足迹核算值与真实值的对比。②基于通径分析的冬小麦水足迹影响因素分析主要依赖于各因素之间的相关系数。相关系数仅表示两个变量之间具有一定的相关性, 并不能确定两者之间是否具有因果关系。对于通径分析的结果还需结合其他方法所得结果相互印证。③受资料限制, 本研究空间上化肥施用折纯量、农业机械总动力以及灌溉面积占比均为省尺度数据, 可能代表性不够。

3 结论

a. 海河流域冬小麦多年平均总水足迹为 239.6 亿 m^3 , 平均水足迹为 1840 m^3/t 。海河流域冬小麦水足迹呈整体下降趋势, 空间上呈现京津地区最高, 山西次之, 两地区向外逐渐递减的趋势。

b. 农业生产投入因素, 如农业机械总动力、化肥施用折纯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造成正影响或负影响。

c. 气象因子中风速对冬小麦水足迹直接影响较大, 风速和平均气温对冬小麦水足迹的直接影响为正影响, 相对湿度和降水为负影响。

d. 可以通过提高产业生产力的方式提高作物产量,以降低冬小麦整体水足迹;对于京津等水足迹较高的地区可以通过减少施肥的方式降低冬小麦的水足迹及减少农业面源污染。

参考文献:

[1] HOEKSTRA A Y. Virtual water: an introduction [C] // HOEKSTRA A Y. Virtual Water Trade: Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade. Delft: IHE, 2003: 13-23.

[2] HOEKSTRA A Y. Water footprint assessment: evolution of a new research field [J]. Water Resources Management, 2017, 31: 3061-3081.

[3] 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及其贡献率分析 [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))

[4] 黄晶, 王学春, 陈阜. 水足迹研究进展及其对农业水资源利用的启示 [J]. 水资源保护, 2016, 32 (1): 135-141. (HUANG Jing, WANG Xuechun, CHEN Fu. Research progress of water footprint and its implication for utilization of agricultural water [J]. Water Resources Protection, 2016, 32 (1): 135-141. (in Chinese))

[5] HOEKSTRA A Y. Human appropriation of natural capital: comparing ecological footprint and water footprint analysis [J]. Ecological Economics, 2007, 68, 1963-1974.

[6] HOEKSTRA A Y, MEKONNEN M M. The water footprint of humanity [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2012, 109 (9): 3232-3237.

[7] CHENOWETH J, HADJIKAKOU M, ZOUMIDES C. Quantifying the human impact on water resources: a critical review of the water footprint concept [J]. Hydrology and Earth System Sciences Discussion, 2013, 10: 9389-9433.

[8] MEKONNEN M M and HOEKSTRA A Y. A global and high-resolution assessment of the green, blue and grey water footprint of wheat [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2010, 14: 1259-1276.

[9] MEKONNEN M M , HOEKSTRA A Y. The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2011, 15: 1577-1600.

[10] CAO C X, WU P T, WANG Y B, et al. Assessing blue and green water utilization in wheat production of China from the perspectives of water footprint and total water use [J]. Hydrology and Earth System Science, 2014: 18, 3165-

3178.

[11] ZHUO L, MEKONNEN M M, HOEKSTRA A Y. Benchmark levels for the consumptive water footprint of crop production for different environmental conditions: a case study for winter wheat in China [J]. Hydrology and Earth System Science, 2016, 20: 4547-4559.

[12] ZENG Z, LIU J, KOENEMAN P H, et al. Assessing water footprint at river basin level: a case study for the Heihe River Basin in Northwest China [J]. Hydrology and Earth System Science, 2012, 16: 2771-2781.

[13] ZHUO L, MEKONNEN M M, HOEKSTRA A Y, et al. Inter- and intra-annual variation of water footprint of crops and blue water scarcity in the Yellow River Basin (1961-2009) [J]. Advances in Water Resources, 2016, 87: 29-41.

[14] HAN Y, JIA D, ZHUO L, et al. Assessing the water footprint of wheat and maize in Haihe River Basin, Northern China (1956-2015) [J]. Water, 2018, 10 (7): 867.

[15] 王勤勤, 刘俊国, 赵丹丹. 京津冀地区主要农作物生产水足迹研究 [J]. 水资源保护, 2018, 34 (2): 22-27. (WANG Qinqin, LIU Junguo, ZHAO Dandan. Study on water footprint of main crop production in Jing-Jin-Ji Region [J]. Water Resources Protection, 2018, 34 (2): 22-27. (in Chinese))

[16] 王丹阳, 李景保, 叶亚亚, 等. 基于不同受纳水体的湖南省农业灰水足迹分析 [J]. 水资源保护, 2016, 32 (4): 49-54. (WANG Danyang, LI Jingbao, YE Yaya, et al. Analysis of agricultural grey water footprint in Hunan Province based on different receiving water bodies [J]. Water Resources Protection, 2016, 32 (4): 49-54. (in Chinese))

[17] SUN S K, WU P T, WANG Y B, et al. The impacts of inter-annual climate variability and agricultural inputs on water footprint of crop production in an irrigation district of China [J]. Science of the Total Environment, 2013, 444: 498-507.

[18] ZHI Y, YANG Z F, YIN X A. Decomposition analysis of water footprint changes in a water limited river basin: a case study of the Haihe River Basin, China [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2014, 18: 1549-1559.

[19] ZHAO C, CHEN B. Driving force analysis of the agricultural water footprint in China based on the LMDI method [J]. Environmental Science and Technology, 2014, 48 (21): 12723-12731.

[20] FENG L, CHEN B, HAYAT T, et al. The driving force of water footprint under the rapid urbanization process: a structural decomposition analysis for the Zhangye City in China [J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 163: 322-328.

[21] 李泽红, 董锁成, 李宇, 等. 武威绿洲区农业水足迹变化及其驱动机制研究 [J]. 自然资源学报, 2018, 28 (3): 3178.

- 410-416. (LI Zehong, DONG Suocheng, LI Yu, et al. Dynamic analysis on agricultural water footprint and its driving mechanism in Wuwei Oasis [J]. Journal of Natural Resources, 2013, 28(3): 410-416. (in Chinese))
- [22] 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))
- [23] 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))
- [24] HOEKSTRA A Y, CHAPAGAIN A K, ALDAYA M M, et al. The water footprint manual; setting the global standard [M]. London: Earthscan, 2011: 40-42.
- [25] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements [R]. Rome: Food and Agriculture Organization, 1998.
- [26] CHAPAGAIN A K, HOEKSTRA A Y, SAVENIJE H H G, et al. The water footprint of cotton consumption; an assessment of the impact of worldwide consumption of cotton products on the water resources in the cotton producing countries [J]. Ecological Economics, 2006, 60(1): 186-203.
- [27] 蔡甲冰,刘钰,许迪等. 基于通径分析原理的冬小麦缺水诊断指标敏感性分析[J]. 水利学报, 2008, 39(1): 83-90. (CAI Jiabing, LIU Yu, XU Di, et al. Sensitivity analysis on water deficit indicator of winter wheat based on path analysis theory [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(1): 83-90. (in Chinese))
- [28] 赵四申,王秀,高清海,等. 不同机械施肥方式对玉米生长发育及产量效应的影响[J]. 农业工程学报, 1999, 15(3): 123-127. (ZHAO Sishen, WANG Xiu, GAO Qinghai, et al. Effect of different mechanical fertilization patterns on maize growth and yield [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 1999, 15(3): 123-127. (in Chinese))

(收稿日期:2018-10-09 编辑:熊水斌)

(上接第5页)

- [10] 王同生. 莱茵河的水资源保护和流域治理[J]. 水资源保护, 2002(4): 60-62. (WANG Tongsheng. Water resources protection for Rhine River and management of the river basin [J]. Water Resources Protection, 2002(4): 60-62. (in Chinese))
- [11] CHU Junying, WANG Hao, WANG Can. Exploring price effects on the residential water conservation technology diffusion process; a case study of Tianjin city [J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2013, 7(5): 688-698.
- [12] 刘美玲,石高平. 流域水污染的协作治理研究[J]. 水利经济, 2018, 36(2): 54-58. (LIU Meiling, SHI Gaoping. Collaborative governance of water pollution in basins [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2018, 36(2): 54-58. (in Chinese))
- [13] 杨朝晖,褚俊英,陈宁,等. 国外典型流域水资源综合管理的经验与启示[J]. 水资源保护, 2016, 32(3): 33-37. (YANG Zhaohui, CHU Junying, CHEN Ning, et al. Experiences and lessons of integrated water resources management in typical watersheds abroad [J]. Water Resources Protection, 2016, 32(3): 33-37. (in Chinese))
- [14] LEE J G, SELVAKUMAR A, ALVI K et al. A watershed-scale design optimization model for stormwater best management practices [J]. Environmental Modelling & Software, 2012, 37: 6-18.
- [15] 刘起方,马光文,刘群英. 流域水污染治理模式的进化博弈模型[J]. 水资源保护, 2008, 24(3): 69-72. (LIU Qifang, MA Guangwen, LIU Qunying. Evolutionary game theory for water pollution control in river basins [J]. Water Resources Protection, 2008, 24(3): 69-72. (in Chinese))
- [16] 曹寅白,甘泓,汪林,等. 海河流域水循环多为临界整体调控阈值与模式研究[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [17] CHU Junying, WANG Jianhua, WANG Can. A structure-efficiency based performance evaluation of the urban water cycle in Northern China and its policy [J]. Resources, Conservation & Recycling, 2015, 104: 1-11
- [18] 余海霞,来勇,李晓龙,等. 杭州城市河道综合治理工程生态环境效应评估指标体系[J]. 水资源保护, 2017, 33(3): 90-94. (YU Haixia, LAI Yong, LI Xiaolong, et al. Evaluation index system of ecological environmental effect of urban river comprehensive treatment projects in Hangzhou City [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(3): 90-94. (in Chinese))
- [19] 邓义祥,郑一新,富国,等. 路径分析法在滇池流域水污染防治规划中的应用[J]. 湖泊科学, 2011, 23(4): 520-526. (DENG Yixiang, ZHENG Yixin, FU Guo, et al. Application of route analysis method in the water pollution control planning in Lake Dianchi Catchment [J]. Journal of Lake Science, 2011, 23(4): 520-526. (in Chinese))

(收稿日期:2018-06-26 编辑:彭桃英)