

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2021.01.002

西安地区冬小麦灌溉水分生产率 影响因素的主成分分析

张娜, 张建丰, 李涛

(西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 为提高农业用水效率,缓解西安地区水资源短缺压力,分析冬小麦灌溉水分生产率的时间变化规律,采用主成分分析法对冬小麦灌溉水分生产率影响因素进行综合分析。结果表明:①2001—2014年,灌溉水分生产率年际间波动较大,但整体呈上升趋势;②影响冬小麦灌溉水分生产率的主要因素为化肥施用折纯量、农业机械总动力、农膜用量、支农支出4个可控因素以及生育期平均蒸发量、降水量两个不可控因素。西安地区在农业生产过程中,可通过优化辅助性产品的投入结构、合理配置农业经济投入及科学技术来提高冬小麦灌溉水分生产率。

关键词: 灌溉水分生产率; 时间规律; 主成分分析; 影响因素; 冬小麦

中图分类号: S274.3

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2021)01-0009-07

Principal component analysis of influencing factors of winter wheat irrigation water productivity in Xi'an

ZHANG Na, ZHANG Jianfeng, LI Tao

(School of Water Resources and Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: In order to improve the efficiency of agricultural water use and relieve the pressure of water shortage in Xi'an, the temporal variation law of irrigation water productivity of winter wheat was analyzed, with the influencing factors of irrigation water productivity of winter wheat comprehensively analyzed by principal component analysis. The results showed that: ①irrigation water productivity fluctuated greatly between years from 2001 to 2014, but it showed an overall upward trend; ②the main factors affecting irrigation water productivity of winter wheat are four controllable factors: the amount of chemical fertilizer applied, the total power of agricultural machinery, the amount of agricultural film, and the expenditure for supporting agriculture, and two uncontrollable factors: the average evapotranspiration and precipitation during the growth period. In the process of agricultural production in Xi'an, the irrigation water productivity of winter wheat can be improved by optimizing the input structure of auxiliary products, rationally allocating agricultural economic input and science and technology.

Key words: irrigation water productivity; time regularity; principal component analysis; influencing factors; winter wheat

在我国各用水部门中,全国总用水量的近七成消耗在农业用水上,其中农作物灌溉用水约占90%^[1,2]。随着社会经济水平的不断提高,工业、生

活用水需求的大幅度增加以及日趋严重的气候环境问题,各部门之间对水资源的竞争愈发激烈,农业用水受到冲击,灌溉面临着如何用有限的水资源去增

收稿日期: 2019-10-10; 网络出版日期: 2020-12-28

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.n.20201228.0905.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51379172);陕西省教育厅科研计划资助项目(16JS084);中国科学院“西部之光”西部青年学者人才培养计划资助项目(XAB2016AW06)

第一作者: 张娜,女,硕士生,研究方向为农业节水。E-mail: zhangnan0134@163.com

通信作者: 张建丰,男,博士,教授,博导,研究方向为农业节水、水信息检测与灌区自动化等。E-mail: jfzhang@mail.xaut.edu.cn

加更多的粮食产量的问题^[3]。而灌溉水分生产率是评判农业生产水平、农业用水科学性与合理性以及农业高效发展的重要指标^[4]。

因此,研究灌溉水分生产率及其影响因素对提高全国农业用水效率,缓解水资源压力是十分必要的^[5]。但影响农作物水分生产率的因素^[6]有很多,有的因素是可控的,例如灌溉用水量、化肥农药施用量、农业从业人员数量、经济投入等;有的因素是不可控的,比如辐射、降水量、风速、大气温度等^[7]。近10年来,为了采取更加有效的措施来提高作物的灌溉水分生产率,国内外许多学者^[8-12]对水分生产率的影响因素做了大量研究。2004年,Zwart等^[13]研究发现,全球作物水分生产率变化范围较大,这可能是气象、作物、土壤以及管理等多种因素作用于土壤-植物-水分关系造成的;2009年,张晓霞^[14]基于灰色关联分析方法对影响甘州区农作物水分生产力的10个因子进行分析,结果显示,生长期降水、沙尘天数等不可控因素对农作物水分生产力影响显著;2010年,胡广录、赵文智等^[15]以黑河流域的绿洲灌区为例,利用1995—2006年的灌溉用水量、农作物产量、气象数据等资料,采用灰色关联分析方法计算了绿洲灌区的小麦水分生产率,结果表明:不小于10℃积温、农药费用、劳动管理费用、化肥施用量、水费依次是影响水分生产率的前5位主要因素。

综上所述,国内外学者对水分生产率的相关分析因研究的技术路线、方法、影响因素不同而结果不同,而针对西安地区作物灌溉水分生产率的研究较少。因此,本文以陕西省西安地区冬小麦为例,分析选取的11个影响因素和冬小麦灌溉水分生产率的时间变化规律;采用主成分分析法^[16]定量分析并确定影响冬小麦灌溉水分生产率的主要影响因素,以期为提高冬小麦灌溉水分生产率提供合理参考。

1 数据来源与方法

1.1 研究区域概况

西安市地理坐标为东经107°40′至109°49′,北纬33°42′至34°45′,地处关中平原中部,北濒渭河,南依秦岭。辖区东西最大长度206 km,南北最大宽度101 km,全市国土面积10 108 km²。市区有渭河、泾河、沔河等多条河流,水资源较为丰富,气候属暖温带半湿润大陆性季风气候,具有丰富的土地资源和良好的光热条件,但是降水稀少、蒸发量大。年平均气温14℃左右,年最高气温40℃左右,年最低气温-8℃左右。多年平均降水量550.36 mm,降

水时空分布不均,夏季多冬季少,南部降雨多于北部。研究区降水量年际间波动较大(2001—2014年),丰水年降水量高达883.2 mm,枯水年低至405.9 mm。研究区年均气温均在13.5℃~15.5℃范围内。该区地势平坦、土地肥沃,是我国传统的粮食主产区。

1.2 灌溉水分生产率的计算

灌溉水分生产率是指单位灌溉水量所能生产的农产品的产量。灌溉水分生产率^[17-18]能反映灌区在不同阶段(如实施节水灌溉工程前后)的农业产出水平、灌溉系统工程的情况以及灌溉管理水平,表现为灌区在投入单位灌溉水量后所获得的农作物产出效益。计算式^[4]为:

$$WP = \frac{Y}{W} \quad (1)$$

式中:WP为灌溉水分生产率,kg/m³;Y为全灌区作物总产量,kg;W为总灌溉用水量,m³。

1.3 指标选取与数据来源

1.3.1 指标选取

冬小麦灌溉水分生产率与冬小麦生产过程中的总产量及灌溉用水量有关,化肥、农药等农业生产资料的投入将会直接影响冬小麦总产量;支农支出^[19]和农业从业人员等经济性因素则会对冬小麦产量产生间接影响;区域的农业气象条件通过影响冬小麦的水分消耗,从而对冬小麦灌溉水分生产率产生间接影响。由此可知,冬小麦灌溉水分生产率涉及社会、经济、气象等诸多因素。按照“资料完整、全面且具有代表性和实用性”的原则,同时考虑数据获取的难易程度,本文仅考虑经济、科技发展等可控因素和气象等不可控因素对灌溉水分生产率的影响,从而选取化肥施用折纯量(X_1)、农膜用量(X_2)、农药用量(X_3)、有效灌溉面积(X_4)、农业机械总动力(X_5)、农业从业人员(X_6)、灌溉用水量(X_7)、支农支出(X_8)、生育期平均气温(X_9)、生育期平均降水量(X_{10})、蒸散发量(X_{11})等11个指标对陕西省西安地区冬小麦灌溉水分生产率进行综合评价。

有效灌溉面积通过查看统计年鉴及相关文献进行筛选。化肥施用折纯量(X_1)、农膜用量(X_2)、农药用量(X_3)、有效灌溉面积(X_4)、农业机械总动力(X_5)、农业从业人员(X_6)、灌溉用水量(X_7)、支农支出(X_8)属于影响冬小麦灌溉水分生产率的可控因素;生育期平均气温(X_9)、生育期平均降水量(X_{10})、蒸散发量(X_{11})属于影响冬小麦灌溉水分生产率的不可控因素,具体如图1所示。

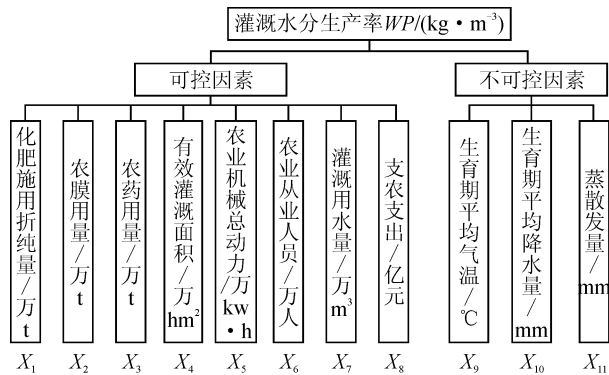


图1 影响灌溉水分生产率的指标体系

Fig. 1 Index system affecting irrigation water productivity

1.3.2 数据来源

本次研究中计算冬小麦灌溉水分生产率时所需的冬小麦产量、灌溉用水量数据均来源于《西安市统计年鉴》;其中灌溉用水量利用灌溉用水总量进行分配,首先是利用西安地区不同作物的种植结构以及灌溉定额确定不同作物灌溉用水量各占灌溉用水总量的比例,其次将灌溉用水总量分配到冬小麦、夏玉米等不同的农作物;有效灌溉面积通过查看统计年鉴及相关文献进行筛选;化肥施用折纯量、农膜用量等可控因素数据来源于《陕西省统计年鉴》、《西安市统计年鉴》、水利部网站;不可控因素中的生育期平均气温及降水量从中国气象数据网(<http://data.cma.cn>)中获取;作物蒸散发量的计算采用联合国粮农组织(FAO)推荐的 Penman-Monteith 公式^[20]。

冬小麦蒸散发量的计算采用单作物系数法^[20]:

$$ET = K_c ET_0 \quad (2)$$

式中: ET 为作物蒸散发量; K_c 为综合作物系数; ET_0 为参考作物蒸散发量。

1.4 分析方法

主成分分析^[21]是基于数学统计学中降维的思想,利用各指标之间的相关联系,把多个变量指标转化为几个少数综合性指标(主成分),其中每个主成分都能够把原始变量的大部分信息反映出来,而且所含信息互不重复。主成分分析法的基本计算步骤为:

1) 为消除量纲的影响,将原始数据标准化:

$$z_{ij} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{s_j} \quad (3)$$

式中: n 为实验样本容量; m 为单个样本变量个数; $i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m; \bar{x}_j$ 为第 j 列指标的平均值; s_j 为第 j 列指标的标准差。

2) 计算各指标的相关系数:

$$r_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^n z_{ki} z_{kj}}{\sqrt{\sum_{k=1}^n z_{ki}^2} \sqrt{\sum_{k=1}^n z_{kj}^2}} \quad (4)$$

式中: z_{ki} 、 z_{kj} 分别为标准化矩阵第 k 行、第 i 列与第 j 列数据。

3) 求出矩阵的特征值和特征向量;计算贡献率和累计贡献率,并根据累计贡献率确定主成分;计算主成分荷载矩阵和得分系数矩阵。

利用 Microsoft Excel 软件计算冬小麦灌溉水分生产率并分析时间规律。主成分分析可通过 SPSS (Statistical Product and Service Solutions)^[22] 软件高效完成,该软件目前已经广泛应用于众多领域^[23-24]。本文运用 SPSS 25.0 软件对各指标相关性进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 灌溉水分生产率影响因素随时间的变化

选取西安地区冬小麦灌溉水分生产率的 11 个影响因子,收集整理原始数据,如表 1 所示。

由表 1 可得,化肥施用折纯量整体呈上升趋势,仅在 2013 年下降了约 1.5%。农膜用量在 2003—2004 年有所下降,幅度在 5%~11% 之间,2004 年之后农膜用量略有增加。由于施用农药会对生态环境造成一定程度的破坏,故一直控制农药用量,所以农药用量整体呈下降趋势,并于 2001—2003 年期间大幅下降,幅度约为 25%。2012—2013 年间,冬小麦有效灌溉面积急剧降低,下降比例约为 10.3%。农业机械总动力在近 14 年中逐年递增,2008 年突增至 271.26 万 kW·h。随着经济和农业技术的发展,农业从业人员明显减少。灌溉用水量稳定降低,近 14 年下降幅度约为 33.9%。农业经济投入在 2001—2014 年间快速增长,增长比例稳定上升。对于可控因素,可以通过适当加大或降低某一指标来获取更多的冬小麦产量。由于不可控因素的特殊性,生育期平均气温、生育期平均降水量以及蒸散发量年间波动较大,且无规律。2001—2003 年,生育期平均气温下降幅度较大,近 14 年生育期最高温度出现在 2013 年,高达 11.9℃。生育期平均降水量于 2010—2012 年骤降,幅度约为 53.3%。2006—2007 年间,冬小麦蒸散发量相对较高。

表 1 2001—2014 年冬小麦灌溉水分生产率影响因子的初始数据

Tab. 1 Initial data of factors affecting irrigation water productivity of winter wheat from 2001 to 2014

年份	化肥施用 折纯量 $X_1/(万 t)$	农膜用 量 $X_2/$ (万 t)	农药用 量 $X_3/$ (万 t)	有效灌溉 面积 $X_4/$ (万 hm^2)	农业机械 总动力 $X_5/$ (万 $kW \cdot h$)	农业从业 人员 $X_6/$ 万人	灌溉用 水量 $X_7/$ (万 m^3)	支农支出 $X_8/$ 亿元	生育期平 均气温 $X_9/^\circ C$	生育期平 均降水量 $X_{10}/$ mm	蒸散 发量 $X_{11}/$ mm
2001	19.33	0.17	0.20	21.55	202.09	144.28	43 150.48	1.13	11.8	230.65	503.37
2002	20.07	0.18	0.16	20.87	205.21	143.65	40 100.65	1.39	11.2	249.85	531.93
2003	20.01	0.17	0.15	20.23	208.07	141.33	39 531.76	1.72	10.7	437.64	503.37
2004	21.07	0.16	0.14	19.87	214.07	139.82	37 425.57	2.31	11.0	489.64	685.44
2005	21.18	0.19	0.14	18.67	223.90	137.69	35 076.41	2.87	10.8	251.44	653.31
2006	21.61	0.19	0.15	18.44	227.76	135.64	35 965.38	4.24	11.4	389.98	742.56
2007	22.03	0.21	0.14	18.42	234.89	131.96	32 367.22	8.55	11.1	414.25	689.01
2008	22.59	0.21	0.15	18.30	271.26	126.46	32 865.79	11.12	10.6	303.06	660.45
2009	23.03	0.21	0.13	18.21	261.61	121.78	29 912.74	17.38	10.7	351.03	656.88
2010	23.55	0.25	0.12	18.75	267.73	116.58	29 504.36	25.14	11.0	377.92	714.00
2011	23.95	0.25	0.12	17.49	289.02	116.15	28 000.26	38.79	11.7	276.40	560.49
2012	24.33	0.27	0.13	17.86	298.40	113.29	28 698.23	45.11	10.6	176.37	542.64
2013	23.97	0.27	0.12	16.01	310.84	108.48	28 316.41	49.94	11.9	251.44	571.20
2014	25.12	0.27	0.12	16.56	320.33	110.30	28 500.87	48.76	11.1	279.54	560.49

2.2 灌溉水分生产率随时间的变化

水分生产率。

表 2 是 2001—2014 年间西安地区冬小麦灌溉

表 2 2001—2014 年西安地区冬小麦灌溉水分生产率

Tab. 2 Irrigation water productivity of winter wheat in Xi'an area from 2001 to 2014

年份	冬小麦总产量/(万 t)	灌溉用水量/(万 m^3)	灌溉水分生产率/($kg \cdot m^{-3}$)
2001	63.18	43 150.48	1.46
2002	60.78	40 100.65	1.52
2003	62.86	39 531.76	1.59
2004	62.40	37 425.57	1.67
2005	64.42	35 076.41	1.84
2006	67.66	35 965.38	1.88
2007	49.86	32 367.22	1.54
2008	68.64	32 865.79	2.09
2009	66.37	29 912.74	2.22
2010	68.77	29 504.36	2.33
2011	58.29	28 000.26	2.08
2012	61.70	28 698.27	2.15
2013	53.80	28 316.41	1.90
2014	56.78	28 500.87	1.99

由表 2 可知,西安地区冬小麦灌溉水分生产率年平均价值介于 $1.46 \sim 2.33 kg/m^3$ 之间,波动较大,整体呈上升趋势,这与农业经济快速增长、农业生产要素投入逐年增加、农业生产技术及田间管理措施

的投入加大有关。冬小麦灌溉水分生产率在 2001—2005 年间缓慢增长,涨幅约为 26%。2007 年突降至低点 $1.54 kg/m^3$,查看统计年鉴及相关文献^[25]发现,受极端天气影响,2007 年冬小麦产量显

著下降,致使 2007 年灌溉水分生产率突然下降。2008—2010 年间,冬小麦灌溉水分生产率快速增长,涨幅约为 11%,虽然这 3 年间蒸散发量相对较高,但经济发展迅速、农业机械动力的推广及辅助性产品的大量使用,使得灌溉用水得到有效利用,灌溉水分生产率快速增长。灌溉水分生产率于 2010 年后再次小幅下降,这与 2010 年后冬小麦有效灌溉面积下降幅度大、辅助性用品用量得到一定程度控制导致的冬小麦单位面积产量减少有关。

2.3 灌溉水分生产率影响因素的主成分分析

表 3 是影响因素间的相关系数矩阵。从表 3 中可以看出:化肥施用折纯量 X_1 与农膜用量

X_2 (0.949)、农业机械总动力 X_5 (0.965)、支农支出 X_8 (0.912)之间的正相关系数较大。经济发展会促进农业技术性资料的投入,辅助性农产品的叠加使用可以提高冬小麦产量,农业机械总动力的投入能在一定程度上提高农业生产率,这表明农业生产技术日趋成熟,因此,化肥施用折纯量与农膜用量、农业机械总动力及支农支出均存在较大的正相关性。

由主要影响因素间的相关系数矩阵计算其特征值、各个主成分的贡献率和累计贡献率,如表 4 所示。表 4 显示,第一、第二主成分的特征值均大于 1,累计贡献率高达 83.674%(大于 80%),所以只需要提取前 2 个主成分进行分析。

表 3 影响因素间的相关系数矩阵

Tab.3 Correlation coefficient matrix between influencing factors

影响因素	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}
X_1	1	0.949	-0.867	-0.913	0.965	-0.971	-0.96	0.912	-0.038	-0.124	0.091
X_2	0.949	1	-0.778	-0.871	0.964	-0.975	-0.899	0.96	0.099	-0.262	-0.104
X_3	-0.867	-0.778	1	0.853	-0.79	0.827	0.892	-0.75	0.219	-0.16	-0.214
X_4	-0.913	-0.871	0.853	1	-0.913	0.899	0.9	-0.847	-0.07	0.053	-0.149
X_5	0.965	0.964	-0.79	-0.913	1	-0.983	-0.892	0.962	0.051	-0.2	-0.086
X_6	-0.971	-0.975	0.827	0.899	-0.983	1	0.923	-0.959	-0.059	0.147	0.027
X_7	-0.96	-0.899	0.892	0.9	-0.892	0.923	1	-0.821	0.066	0.116	-0.196
X_8	0.912	0.96	-0.75	-0.847	0.962	-0.959	-0.821	1	0.174	-0.23	-0.245
X_9	-0.038	0.099	0.219	-0.07	0.051	-0.059	0.066	0.174	1	-0.242	-0.218
X_{10}	-0.124	-0.262	-0.16	0.053	-0.2	0.147	0.116	-0.23	-0.242	1	0.484
X_{11}	0.091	-0.104	-0.214	-0.149	-0.086	0.027	-0.196	-0.245	-0.218	0.484	1

表 4 总方差解释

Tab.4 Total variance explained

成分	初始特征值			提取载荷平方和		
	总计	方差百分比/%	累积/%	总计	方差百分比/%	累积/%
1	7.328	66.617	66.617	7.328	66.617	66.617
2	1.876	17.057	83.674	1.876	17.057	83.674
3	0.861	7.827	91.502			
4	0.576	5.232	96.734			
5	0.157	1.423	98.157			
6	0.107	0.976	99.133			
7	0.042	0.385	99.518			
8	0.029	0.267	99.785			
9	0.015	0.132	99.917			
10	0.008	0.068	99.985			
11	0.002	0.015	100			

对于特征值 7.328、1.876,分别求其特征向量 e_1 、 e_2 ,计算各变量 X_1, X_2, \dots, X_{11} 在主成分上的载荷,如表 5 所示。主成分因子载荷矩阵显示了各个因素指标与提取的主成分之间的关系,指标与某一

主成分之间相关系数越大,该主成分与指标之间的联系就越紧密。由表 5 可知:①化肥施用折纯量(X_1)、农膜用量(X_2)、农业机械总动力(X_5)、支农支出(X_8)与第一主成分呈现出较强的正相关;②生育期

平均降水量(X_{10})和蒸散发量(X_{11})在第二主成分上的载荷较高。对所提取的 2 个主成分中载荷值较高的影响因素进行排序:化肥施用折纯量 $X_1 >$ 农业机械总动力 $X_5 >$ 农膜用量 $X_2 >$ 支农支出 $X_8 >$ 生育期平均蒸散发量 $X_{11} >$ 生育期平均降水量 X_{10} 。

从排序中可得出,在与主成分有较强相关关系的 6 个影响因素中,化肥施用折纯量、农业机械总动力等可控因素有 4 个,占比 67%,而不可控因素包括生育期平均降水量以及蒸散发量,但排序较为靠后。说明西安地区冬小麦灌溉水分生产率受可控因素的影响明显大于不可控因素的影响。排序结果表明,随着经济与科学技术的快速发展,农业机械、化肥及农膜等农业生产辅助资料的使用,对冬小麦灌溉水分生产率影响显著,从而说明现代农业的灌溉水分生产率与科技水平及生产资料投入密切相关。因此,可通过适当加大农业生产中科学技术及辅助

表 5 主成分因子载荷矩阵

Tab. 5 Principal component factor loading matrix

主成分	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}
1	0.986	0.972	-0.875	-0.94	0.980	-0.987	-0.952	0.947	0.028	-0.151	0.013
2	0.072	-0.15	-0.357	-0.105	-0.096	0.042	-0.155	-0.237	-0.587	0.778	0.818

3 结 论

1) 随着经济的迅速发展,农业机械总动力在持续增长,辅助性用品中农膜用量以及化肥施用折纯量逐渐增加,表明农业生产过程中科学技术逐渐成熟;农业从业人员、农药用量、有效灌溉面积、灌溉用水量在稳定下降;不可控因素中生育期平均气温、生育期平均降水量以及蒸散发量变化较大。

2) 2001—2014 年,西安地区冬小麦灌溉水分生产率年均值介于 $1.46 \sim 2.33 \text{kg/m}^3$ 之间,整体上呈增长趋势,年际间波动较大,不同因素的变化都会导致冬小麦灌溉水分生产率的改变。近年来,冬小麦灌溉水分生产率有降低的趋势,这与西安地区冬小麦有效灌溉面积的大幅减少有关,建议适当减少灌溉用水量,控制有效灌溉面积,使冬小麦灌溉水分生产率趋于稳定。

3) 冬小麦灌溉水分生产率不仅受单一因素的影响,本文研究发现,可控因素中的化肥施用折纯量、农业机械总动力、农膜用量及支农支出都对冬小麦的灌溉水分生产率有显著作用;不可控因素中,生育期平均降水量以及蒸散发量对冬小麦灌溉水分生产率影响较小。这说明西安地区冬小麦灌溉水分生产率受可控因素的影响明显大于不可控因素的影响。

性产品的投入来提高冬小麦产量,进而提高冬小麦灌溉水分生产率。不可控因素中生育期平均降水量虽然存在一定影响,但关联度较低,这是因为可根据降水量的大小对灌溉水量及辅助性产品进行一定的调整,从而弥补降水量对灌溉水分生产率的影响。而由 1.2 节式(1)可知,灌溉用水量(X_7)指标与灌溉水分生产率有直接关系,但其影响相对较低是因为单位面积灌溉水量不仅受灌溉工程条件和灌溉管理水平的影响,而且受年降水量和作物种植结构的影响,而文中数据表明,生育期平均降水量对灌溉水分生产率影响较大,所以相对来说,灌溉用水量的影响稍微偏弱。同时,灌溉形式、管理模式、水源类型、土壤特性、盐渍化以及作物种植结构等对灌溉水分生产率的影响还需要进一步研究。综上,要提高西安地区冬小麦灌溉水分生产率,可通过合理配置农业生产过程中辅助性产品的投入比例来实现。

4) 提高冬小麦灌溉水分生产率需要考虑农业科学技术、农资产品使用等多个影响因素。因此在农业生产过程中,可以通过优化农业辅助性产品的投入结构、适当加大对农业的经济投入及合理使用先进的农业科学技术来提高冬小麦灌溉水分生产率。

参考文献:

- [1] 操信春,吴普特,王玉宝,等. 中国灌区水分生产率及其时空差异分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(13): 1-7.
CAO Xinchun, WU Pute, WANG Yubao, et al. Analysis on temporal and spatial differences of water productivity in irrigation districts in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(13): 1-7.
- [2] ZHAN J Y, SUN Z, ZHAN W, et al. Simulated water productivity in Gansu Province, China[J]. Physics & Chemistry of the Earth, 2015, 79-82: 67-75.
- [3] KIJINE J W, BARKER R, MOLDEN D. Water productivity in agriculture limits and opportunities for improvement[M]. Wallingford: CABI Publishing, 2013.
- [4] 李远华,赵金河,张思菊,等. 水分生产率计算方法及其应用[J]. 中国水利, 2001(8): 65-66, 5.
LI Yuanhua, ZHAO Jinhe, ZHANG Siju, et al. Calculation method and application of moisture productivity [J]. China Water Resources, 2001(8): 65-66, 5.
- [5] SUN S K, ZHANG C F, LI X, et al. Sensitivity of

- crop water productivity to the variation of agricultural and climatic factors: a study of Hetao irrigation district, China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 142: 2562-2569.
- [6] LIX L, LING T, NIU J, et al. Spatio-temporal distribution of irrigation water productivity and its driving factors for cereal crops in Hexi Corridor, Northwest China[J]. *Agricultural Water Management*, 2017, 179: 55-63.
- [7] 胡广录. 绿洲灌区农作物水分生产率影响因素的主成分分析[J]. *甘肃水利水电技术*, 2012, 2(48): 25-28.
HU Guanglu, Principal component analysis of influencing factors of crop water productivity in oasis irrigation area[J]. *Gansu Water Resources and Hydropower Technology*, 2012, 2(48): 25-28.
- [8] 郑和祥,李和平,程满金,等. 锡林河流域主要作物水分生产率及尺度效应分析[J]. *灌溉排水学报*, 2014, 33(Z1): 81-85.
ZHENG Hexiang, LI Heping, CHENG Manjin, et al. Analysis of water use efficiency and scale effect in Xilin River Basin[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2014, 33(Z1): 81-85.
- [9] 陈远景. 不同灌溉方式对水稻产量和水分生产率的影响[J]. *农业与技术*, 2013, 33(10): 108-109.
CHEN Yuanjing. Effects of different irrigation methods on rice yield and water productivity[J]. *Agriculture and Technology*, 2013, 33(10): 108-109.
- [10] NIU J, QI L, KANG S, et al. The response of crop water productivity to climatic variation in the upper-middle reaches of the Heihe River Basin, Northwest China[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 563: 909-926.
- [11] LI X, ZHANG X, NIU J, et al. Irrigation water productivity is more influenced by agronomic practice factors than by climatic factors in Hexi Corridor, Northwest China[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 10-21.
- [12] YAN N, WU B. Integrated spatial-temporal analysis of crop water productivity of winter wheat in Hai Basin[J]. *Agricultural Water Management*, 2014, 133(1): 24-33.
- [13] ZWART S J, BASTIAANSEN W G. Review of measured crop water productivity values for irrigated wheat, rice, cotton and maize[J]. *Agricultural Water Management*, 2004, 69(2), 115-133.
- [14] 张晓霞. 农作物水分生产力影响因素的灰色关联分析[J]. *发展*, 2009(8): 125-126.
- [15] 胡广录,赵文智,武俊霞. 绿洲灌区小麦水分生产率及其影响因素的灰色关联分析[J]. *中国沙漠*, 2010, 30(2): 369-375.
HU Guanglu, ZHAO Wenzhi, WU Junxia. Grey correlation analysis of wheat water productivity and its influencing factors in oasis irrigation district[J]. *Journal of Desert Research*, 2010, 30(2): 369-375.
- [16] LIU R X, KUANG J, GONG Q, et al. Principal component regression analysis with SPSS[J]. *China Public Health*, 2001, 71(2): 141-147.
- [17] 高景灏. 西安地区主要粮食作物水分生产率时空分布规律分析及其模拟研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2018.
GAO Jinghao. Analysis and simulation of spatial and temporal distribution of water productivity in major grain crops in Xi'an area[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2018.
- [18] 操信春,吴普特,王玉宝,等. 水分生产率指标的时空差异及相关关系[J]. *水科学进展*, 2014, 25(2): 268-274.
CAO Xinchun, WU Pute, WANG Yubao, et al. Temporal and spatial variation and correlativity of water productivity indexes in irrigated land of China[J]. *Advances in Water Science*, 2014, 25(2): 268-274.
- [19] 王艳,胡月英. 安徽省粮食产量影响因素实证分析[J]. *中国管理信息化*, 2020, 23(11): 179-181.
- [20] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. *Cropevapotranspiration* [M]. Rome: FAO Irrigation and Drainage Paper 56, 1998.
- [21] 徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. 第2版. 北京: 化学工业出版社, 2001.
- [22] 薛薇. 基于SPSS的数据分析[M]. 第2版. 北京: 中国人民大学出版社, 2014.
- [23] 高科,盖艾鸿,潘韬,等. 黄河源区土壤水分空间变异及其主控因子[J]. *甘肃农业大学学报*, 2019, 54(1): 166-174.
GAO Ke, GAI Aihong, PAN Tao, et al. Spatial variation and its main control factors of soil moisture in the source region of the Yellow River[J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2019, 54(1): 166-174.
- [24] 张怡. 基于SPSS数据分析中国主要省市的农林牧副渔业产值大小[J]. *软件*, 2019, 40(1): 159-165.
ZHANG Yi. Analysis of the output value of agriculture, forestry, animal husbandry and sideline fishery in major provinces and cities in China based on SPSS data[J]. *Computer Engineering & Software*, 2019, 40(1): 159-165.
- [25] 马琪. 气候变化下关中地区冬小麦适宜度及极端天气风险评价[D]. 西安: 陕西师范大学, 2012.
MA Qi. Winter wheat suitability and extreme weather risk assessment in Guanzhong area under climate change[D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2012.