

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2020.06.024

李涛, 张建丰, 高景灏. 西安地区主要粮食作物水分生产率时空分布特性研究. 土壤, 2020, 52(6): 1281–1289.

西安地区主要粮食作物水分生产率时空分布特性研究^①

李涛¹, 张建丰^{1*}, 高景灏^{1,2}

(1 西安理工大学水利水电学院, 西安 710048; 2 陕西水环境工程勘测设计研究院, 西安 710016)

摘要: 水分生产率是农业水资源管理的一个重要指标。为了揭示陕西省西安市农业水资源消耗与粮食生产的关系, 采用空间分析方法, 分析了 2001—2014 年西安市主要粮食作物(小麦、玉米)的灌溉水分生产率利用、作物水分生产率及总流入水分生产率的时空分布规律, 并通过灰色关联理论分析主要影响因素对作物水分生产率的影响。结果表明: 西安地区水分生产率在空间上呈现显著聚集现象; 各水分生产率指标均表现出空间分异性, 同指标不同年份水分生产率空间分布类似; 灌溉水分生产率值介于 1.5~2.5 kg/m³, 年际间波动较大, 在 2001—2010 年随着时间而逐渐增大, 在 2011—2014 年有减小趋势; 作物水分生产率介于 0.7~1.0 kg/m³, 随时间增长无明显变化; 年均气温、化肥施用量、有效灌溉面积、作物播种面积及农业机械总动力依次是影响该地区作物水分生产率的主要因素。

关键词: 水分生产率; 节水灌溉指标; 时空分布; 影响因素; 水资源管理

中图分类号: S271 **文献标志码:** A

Spatio-temporal Distribution of Crop Water Productivity in Xi'an Region

LI Tao¹, ZHANG Jianfeng^{1*}, GAO Jinghao^{1,2}

(1 Institute of Water Resources and Hydropower, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2 Shaanxi Reconnaissance and Research Institute of Water Environmental Engineering, Xi'an 710016, China)

Abstract: Water productivity is an important index of agricultural water management. In order to reveal the relationship between agricultural water consumption and grain production in Xi'an region, the temporal and spatial distribution of irrigation water productivity, crop water productivity and total inflow water productivity for main grain crops (wheat and corn) from 2001 to 2014 were analyzed using the method of spatial analysis, and the influence factors of main crop water productivity were studied by the grey correlation theory. The results showed that the spatial distribution of crop water productivity had significant aggregation phenomenon in Xi'an region. All the indexes of water productivity showed spatial variability, and to the same index, the spatial distribution of water productivity was similar in different years. Irrigation water productivity ranged from 1.5 to 2.5 kg/m³ with large variation in different years, increased from 2001 to 2010 but decreased from 2011 to 2014; Crop water productivity ranged from 0.7 to 1.0 kg/m³, changed little with time. The average annual temperature, chemical fertilizer applied amount, effective irrigation area, crop planting area and the total power of agricultural machinery were the main factors affecting crop water productivity in Xi'an region.

Key words: Water productivity; Water-saving irrigation; Spatio-temporal distribution; Influencing factors; Water resources management

水分生产率被定义为单位水资源量所获得的产量和产值^[1]。由于中国人口、农业水资源及气候条件时空分布不均, 粮食生产也出现空间错位, 粮食产量与耗水量随时空变化分布不均, 因此, 水分生产率在时间空间上也呈现不均匀分布^[2-3]。对区域水分生产

率时空分布规律进行分析评价有助于探索农业节水管理措施^[4-5]。已有的关于水分生产率的研究主要集中在田间小尺度及灌区中等尺度水分生产率的对比分析, 侯建伟等^[6]在内蒙古阴山北麓旱农区的研究表明: 间作模式可以显著提高马铃薯水分利用效率。宋

①基金项目: 国家自然科学基金项目(51379172)和陕西省教育厅重点实验室科研计划项目(16J5084)资助。

* 通讯作者(jfzhang@mail.xaut.edu.cn)

作者简介: 李涛(1984—), 男, 陕西延安人, 博士, 讲师, 主要研究方向为节水灌溉理论与新技术。E-mail: litao4891@163.com

修超等^[7]探究了水肥处理对基质栽培西瓜水分利用效率的影响,灌溉量越多水分利用效率越低,在灌水量相同条件下,适量增肥可提高水分利用效率。地区间及流域等较大尺度水分生产率的研究更具有宏观调控价值^[8]。已有一些文献在区域大尺度对水分生产率进行了时空分析: Abdullaev 和 Molden^[9]对中亚一个流域的水分生产率进行了时空分析,发现干旱年水分生产率高于湿润年,农场类型和大小对水分生产率也有影响; Mainuddin 和 Kirby^[10]以省行政边界为单元,分析了 Mekong 流域下游主要作物的水分生产率,结果发现水分生产率有显著的空间变异性,在时间上各种作物的水分生产率均有增加趋势; Yan 和 Wu^[11]对海河流域冬小麦的水分生产率进行的时空分析结果发现该地区水分生产率每年稳定增加; Li 等^[12]对中国甘肃河西走廊灌溉水分生产率时空分布做了分析,得出该地区灌溉水分生产率有很大的提升空间。

影响水分生产率的因素众多,从水分生产率的概念来看,它是影响作物产量提高与耗水量减少的因素综合作用的结果。我国水分生产率偏低且时空差异较大,主要影响因素也不明确^[13]。因此,有必要开展作物水分生产率影响因素的研究。Zwart 和 Bastiaanssen^[14]研究发现全球作物水分生产率变化范围较大,认为这是由于气象、作物、土壤和管理等多种因素影响土壤-植物-水分的关系造成的。纵观国内外学者对水分生产率影响因素的研究,多集中于影响因素的定性研究上,在众多影响因素中进行定量计算筛选主要影响因素的研究较少^[15]。因此,有必要对水分生产率主要影响因素进行筛选并分析量化各主要影响因素的影响程度。

本文以陕西省西安市为对象,对 2001—2014 年水分生产率指标进行了时空变化及主要影响因素分析。

目的在于全面揭示西安市水分生产率在时间及空间上的变化规律,定量描述影响西安市水分生产率的因素,确定西安市限制水分生产率提高的主要影响因素。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

西安市(107.40° ~ 109.49°E, 33.42° ~ 34.45°N)地处关中平原中部,辖 10 区 3 县,总面积 10 108 km²(图 1)。西安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,但是气候干旱、降水稀少、蒸发量大。年平均气温 14 °C 左右,年最高气温 40 °C 左右,年最低气温 -8 °C 左右。多年平均降水量 550.36 mm,降水年际变化很大,降水的季节分配也极不均匀,有 78% 的雨量集中在 5—10 月,其中 7—9 月的雨量即占全年雨量的 47%。研究区 2001—2014 年降水量年际间波动较大,丰水年降水高达 883.2 mm,枯水年低至 405.9 mm,多年平均降水量为 566.7 mm。研究年份年均气温均在 13.5 ~ 15.5 °C 范围内(图 2)。该区地势平坦、土地肥沃,主要的粮食作物为小麦和玉米,是我国传统的粮食主产区。

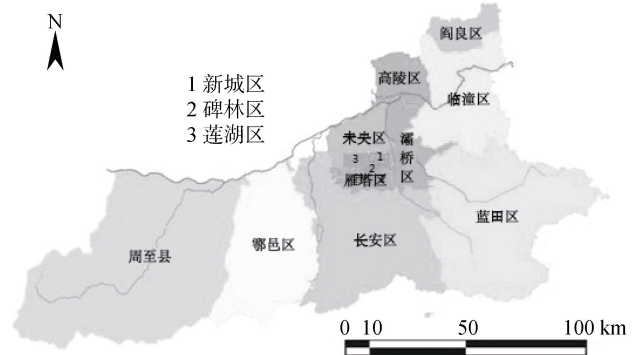


图 1 研究区示意图

Fig. 1 Sketch map of studied region

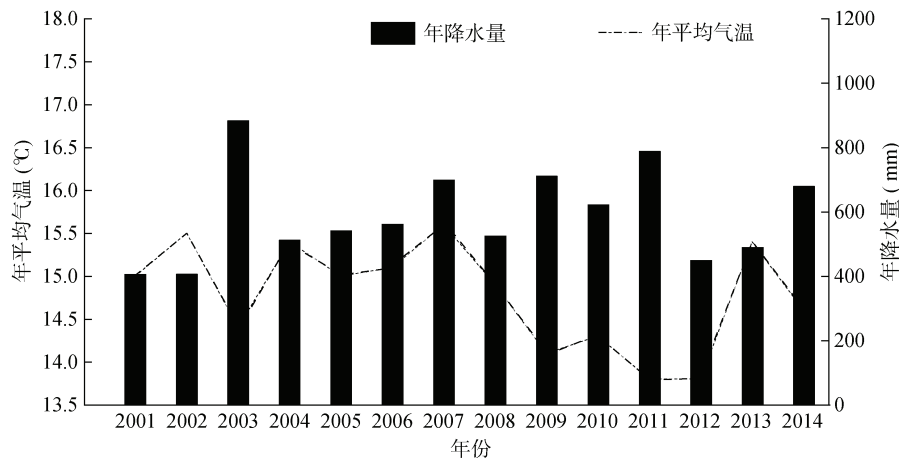


图 2 2001—2014 年研究区年平均气温与年降水量

Fig. 2 Annual mean temperature and precipitation in studied area in 2001—2014

1.2 数据来源

本研究中所用的气象数据主要来源于中国气象数据网^[16]; 研究区灌溉用水量、作物产量以及影响水分生产率的众多因素等农业统计资料及用水资料来自于2001—2016年的《西安市统计年鉴》、《陕西省水利统计年鉴》、西安市水资源公报^[17]、西安市年度水资源报表^[18]及西安地方志^[19]等, 一部分来源于实地调查与文献资料, 此外, 还有少量数据来源于网络共享数据库, 包括: 寒区旱区科学数据中心^[20], 中国经济与社会发展统计数据库^[21]。

1.3 水分生产率指标选取及其计算方法

水分生产率是指单位水资源量在一定的作物品种和耕作栽培条件下所获得的产量或产值。水分生产率指标的计算方法存在差异, 本文采用以下4种水分生产率计算指标。

1) 灌溉水分生产率(irrigation water productivity, WPI)是指单位灌溉水量所获得的作物产量。灌溉水分生产率能综合反映当地灌溉工程状况和灌溉管理水平, 直观地显示出灌溉水量投入的农作物产出效果。计算式为:

$$WPI = Y/W_i \quad (1)$$

式中: WPI: 灌溉水分生产率(kg/m³); Y: 作物总产量(kg)或单位面积产量(kg/hm²); W_i: 总灌溉用水量(m³)或单位面积灌溉用水量(m³/hm²), 一般指毛灌溉用水量。

2) 作物水分生产率(crop water productivity, WPC)是指作物消耗单位水量所获得的产量。计算式为:

$$WPC = Y/(10ET) \quad (2)$$

式中: WPC: 作物水分生产率(kg/m³); Y: 作物产量(kg/hm²); ET: 作物蒸发蒸腾量(mm)。其中, 作物蒸发蒸腾量采用单作物系数法, 计算公式为:

$$ET = K_c ET_0 \quad (3)$$

式中: ET: 作物蒸发蒸腾量(mm); K_c: 综合作物系数; ET₀: 参考作物蒸发蒸腾量(mm)。

参考作物蒸发蒸腾量计算采用FAO推荐的Penman-Monteith公式, 可表示为:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (4)$$

式中: ET₀: 参考作物蒸发蒸腾量(mm); G: 土壤热通量(MJ/(m²·d)); R_n: 作物冠层净辐射量(MJ/(m²·d)); T: 2 m 高处的平均气温(°C); u₂: 2 m 高处风速(m/s); e_s: 饱和水汽压(kpa); e_a: 实际水汽压(kpa); Δ: 饱和水汽压与温度曲线的斜率(kpa/°C); γ: 干湿温度计常数(kpa/°C)。

3) 总流入水分生产率(total inflow water productivity, WPT)是指消耗单位总流入水量(毛灌水量+降水量)所获得的作物产量^[22]。计算式为:

$$WPT = Y/(W_i + P_i) \quad (5)$$

式中: WPT: 总流入水分生产率(kg/m³); Y: 作物产量(kg/hm²); W_i: 毛灌溉用水量(m³/hm²); P_i: 年降水量(m³/hm²)。

1.4 灰色关联度理论

影响作物水分生产率的因素众多, 涉及自然、人为、经济、技术及社会因素等方面。但是这些因素对水分生产率的影响程度都是灰色的, 难以分清楚哪些是主导因素, 哪些是非主导因素。本文利用灰色关联度理论^[23]定量分析影响主要粮食作物水分生产率的因素, 找出其主导因素。

根据西安市2001—2014年作物实际生产情况, 通过综合分析判断, 选取化肥施用量(X₁)、农膜用量(X₂)、农药用量(X₃)、有效灌溉面积(X₄)、农业机械总动力(X₅)、农业从业人员(X₈)、作物播种面积(X₆)和灌溉用水量(X₁₀)作为影响水分生产率的可控因素; 选取年平均气温(X₉)、生育期降水量(X₇)及实际作物蒸发蒸腾量(X₁₁)作为不可控因素。作物水分生产率指标更能反映作物实际耗水规律, 因此, 选取作物水分生产率为分析指标计算其灰色关联度, 分析各因素对作物水分生产率的影响。作物水分生产率的各影响因素见表1。

2 结果与讨论

2.1 水分投入与作物产出

2001—2014年研究区农业灌溉用水量(图3)随年份逐渐减小, 由2001年的81 456万m³减少至2014年的54 098万m³, 减幅高达33.6%。近几年(2011—2014年)灌溉用水量趋于平稳态势。参考作物蒸发蒸腾量主要受气象因素影响, 干旱年各气象因子的综合作用使参考作物蒸发蒸腾量较大, 而湿润年则相反。

粮食作物单位面积产量在4 000 ~ 5 500 kg/hm²范围, 单产水平较高, 随年份总体呈上升趋势, 个别年份波动较大。2010年出现峰值, 2011年单位面积产量突然下降, 随后趋于平稳, 这可能是由于以下两个方面综合影响: 一是较低气温会使作物受冷害影响减产, 气温过高会对作物产量产生负效应^[24], 2011年年均气温13.8 °C, 为西安市2001—2014年最低气温(图2); 二是灌溉水量较低且有效灌溉面积骤减, 2011年灌溉用水量52 377万m³, 为研究年份中最低值, 2011年有效灌溉面积17.49万hm², 较2010年减少1.26万hm²(表1)。

表 1 作物水分生产率的各影响因素
Table 1 Influence factors of crop water productivity

年份	施肥量 (万 t)	农膜 (t)	农药 (t)	有效灌溉 面积(万 hm ²)	农业机械总动 力(万 kW)	平均气温 (°C)	降水量 (mm)	农业从业人员 (万人)	粮食作物播种 面积(万 hm ²)	灌溉用水量 (万 m ³)	蒸散量 (mm)
2001	68.8	1 656.6	1 972.4	21.55	202.1	14.0	485.9	144.28	50.88	81456	503
2002	69.4	1 792.8	1 645.5	20.87	205.2	14.5	486.4	143.65	50.07	74976	532
2003	69.6	1 721.9	1 455.9	20.23	208.1	13.8	903.5	141.33	49.14	74411	503
2004	70.5	1 569.7	1 411.3	19.87	214.1	14.4	969.9	139.82	50.26	75763	685
2005	75.0	1 855.4	1 427.9	18.67	223.9	14.1	611.2	137.69	50.53	69349	653
2006	76.0	1 931.5	1 471.7	18.44	227.8	15.1	589.1	135.64	51.30	74404	743
2007	76.2	2 096.2	1 444.9	18.42	234.9	14.7	681.9	131.96	50.83	67169	689
2008	76.8	2 122.3	1 465.8	18.30	271.3	14.0	554.6	126.46	50.40	64860	660
2009	77.6	2 142.0	1 325.5	18.21	261.6	14.1	711.2	121.78	50.47	59071	657
2010	78.1	2 450.5	1 243.1	18.75	267.7	14.3	622.1	116.58	50.12	57832	714
2011	78.6	2 533.4	1 242.8	17.49	289.0	13.8	788.2	116.15	46.94	52377	560
2012	80.8	2 683.2	1 252.5	17.86	298.4	13.8	449.5	113.29	46.76	53808	543
2013	79.4	2 678.7	1 210.1	16.01	310.8	15.4	489.5	108.48	46.37	53792	571
2014	82.0	2 657.9	1 220.6	16.56	320.3	14.6	679.5	110.3	45.62	54098	560

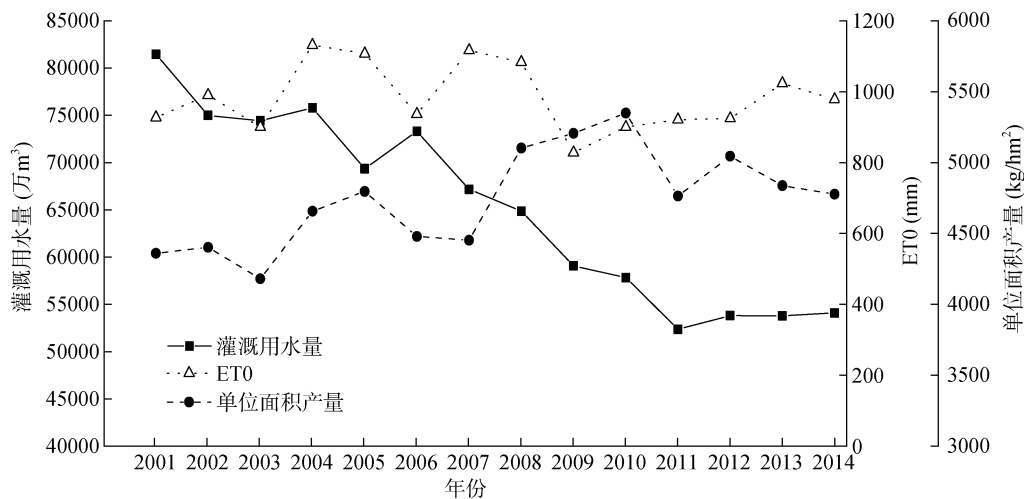


图 3 水分投入与作物产出
Fig.3 Water input and crop output

2.2 水分生产率时空变化分析

2.2.1 水分生产率指标的空间分布 根据年降水量,选取 3 个代表年,分别为干旱年(2001 年)、湿润年(2003 年)和水平年(2006 年)。表 2 展示了代表年各水分生产率指标全局 Moran's I 指数及检验值。结果显示,代表年各水分生产率指标全局 Moran's I 指数均大于零,且显著性检验 P 值均小于给定的显著性水平 0.05,说明代表年各水分生产率指标在空间上存在正自相关性,总体上表现为相似的空间显著聚集性,即水分生产率相似的区县在空间上成片聚集^[2,25]。水分生产率受地区间自然因素及社会经济条件综合影响,而这些因素在地理空间上表现出区域聚集

性,这是水分生产率在空间上聚集的主要原因。

多年平均灌溉水生产率的空间分布(图 4)表现为东高西低,南高北低的空间分异,蓝田县多年平均灌溉水生产率最高,为 4.19 kg/m^3 ,其他各区均在 $0.92 \sim 2.35 \text{ kg/m}^3$ 范围。这是由于蓝田县地貌多为黄土台塬、黄土丘陵及秦岭山地,大部分地区没有灌溉条件,作物供水来源仅为天然降水,即便是去除掉这部分雨养作物的产量,其补充灌溉作物的多年平均灌溉水生产率依然高达 4.19 kg/m^3 。低值主要为周至地区,周至县有多个中小型灌区,因地域的优势,当地并不缺乏灌溉水资源,忽略了对灌溉水合理利用的重视,多年来周至县平均灌溉用水量高达 $14\,485 \text{ 万 m}^3$,是西

表 2 各指标 Moran's I 指数及检验
Table 2 Moran's I index and inspection of each index in typical years

参数	灌溉水分生产率			作物水分生产率			总流入水分生产率		
	2001 年	2003 年	2006 年	2001 年	2003 年	2006 年	2001 年	2003 年	2006 年
Moran's I	0.378	0.287	0.588	0.712	0.443	0.458	0.279	0.015	0.243
P 值	0.003	0.001	0	0	0.019	0.008	0.024	0.045	0.036

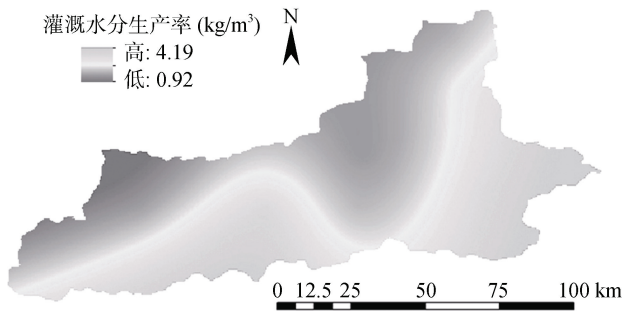


图 4 多年平均灌溉水分生产率空间分布图
Fig. 4 Spatial distribution of annual average irrigation water productivity

安市灌溉用水量最大的区县。为了提高未来西安市整体灌溉水生产率,需要进一步合理分配东西部灌溉水资源,加大对西部地区的农业生产、灌溉工程及田间管理措施的投入,使灌溉水合理高效地利用,同时加大对东南部降水资源的高效利用,使单位灌溉水资源与降水资源的消耗产出更多的产量。

总流入水分生产率是以毛灌溉用水量与降水量之和作为水分投入。图 5 展示了多年平均总流入水分生产率空间分布。结果显示整体总流入水分生产率值均较低,最大值为东北部的高陵县 0.995 kg/m³,最低值为东南部蓝田县 0.284 kg/m³,除高陵县与蓝田县出现极大极小值外,其他区域水分生产率值分布于 0.4~0.7 kg/m³,空间分布较为均匀。查阅相关资料,高陵县多年平均降水量为 493.2 mm,远小于其他区县年均降水量,导致高陵县总流入水分生产率出现高值。

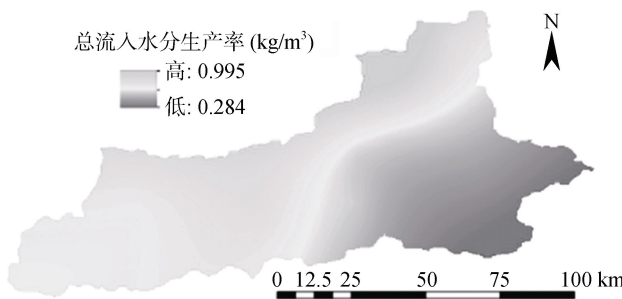


图 5 多年平均总流入水分生产率空间分布
Fig. 5 Spatial distribution of annual average total inflow water productivity

对比图 4 与图 5,蓝田县多年平均灌溉水分生产

率为 4.19 kg/m³,为各区县最大值,而多年平均总流入水分生产率仅为 0.284 kg/m³,为各区县最小值。出现这种现象的原因可能是蓝田县降水资源投入量大,年均降水量为 671.0 mm,远高于西安市多年平均降水量 566.7 mm。另外,蓝田县雨养作物占比较大,占总耕地面积的 65%,灌溉作物占比较小,且多年平均灌溉水投入为 974 万 m³,仅占总水分投入的 2%,而作物生产过程中,不能充分利用降水资源,造成大量降水资源浪费,使蓝田县总流入水分生产率出现极小值。为进一步研究西安市主要粮食作物水分生产率的空间分布格局,选取 2001 年(干旱年)、2003 年(湿润年)及 2006 年(水平年)为代表年,对主要粮食作物水分生产率运用局部多项式插值法进行空间插值,得到空间分布图如图 6 所示。

结果显示,各代表年及多年平均作物水分生产率介于 0.5~1.4 kg/m³,空间分布差异明显,且空间分布规律趋于一致,总体上均表现为北高南低、西高东低的规律,展现出由西北地区向东南地区逐渐减小的趋势。最高可达 1.33 kg/m³,位于东北部地区,但仍远低于世界先进水平,以色列粮食水分生产率可达 2.35 kg/m³[25]。不同代表年之间的分布规律极为相似,说明造成这种空间分布差异的原因主要是有着地理空间相似性的降水、气温、辐射等气象因素,土壤、作物类型等自然因素,生产投入及农业管理方式等社会经济因素共同作用,这与全局空间自相关 Moran's I 指数分析结果一致。

2.1.2 水分生产率指标随时间变化 2001—2014 年西安市平均灌溉水生产率年际间波动较大,如图 7 所示。各年灌溉水分生产率值的范围 1.5~2.5 kg/m³,作物水分生产率值的范围 0.7~1.0 kg/m³,前者远大于后者,说明降水资源在粮食生产中的重要作用。作物水分生产率随时间增长无明显变化,总流入水分生产率值在 3 种指标中最低,介于 0.3~0.8 kg/m³,年际间波动较大,且随时间并没有发现明显的变化规律。灌溉水分生产率值随年际间变化主要分为 3 个阶段,分别为 2001—2006 年缓慢增长阶段、2007—2010 年快速增长阶段及 2011—2014 年下降阶段。2001—2006 年灌溉水分生产率增长较缓慢,涨幅为 7.6%,

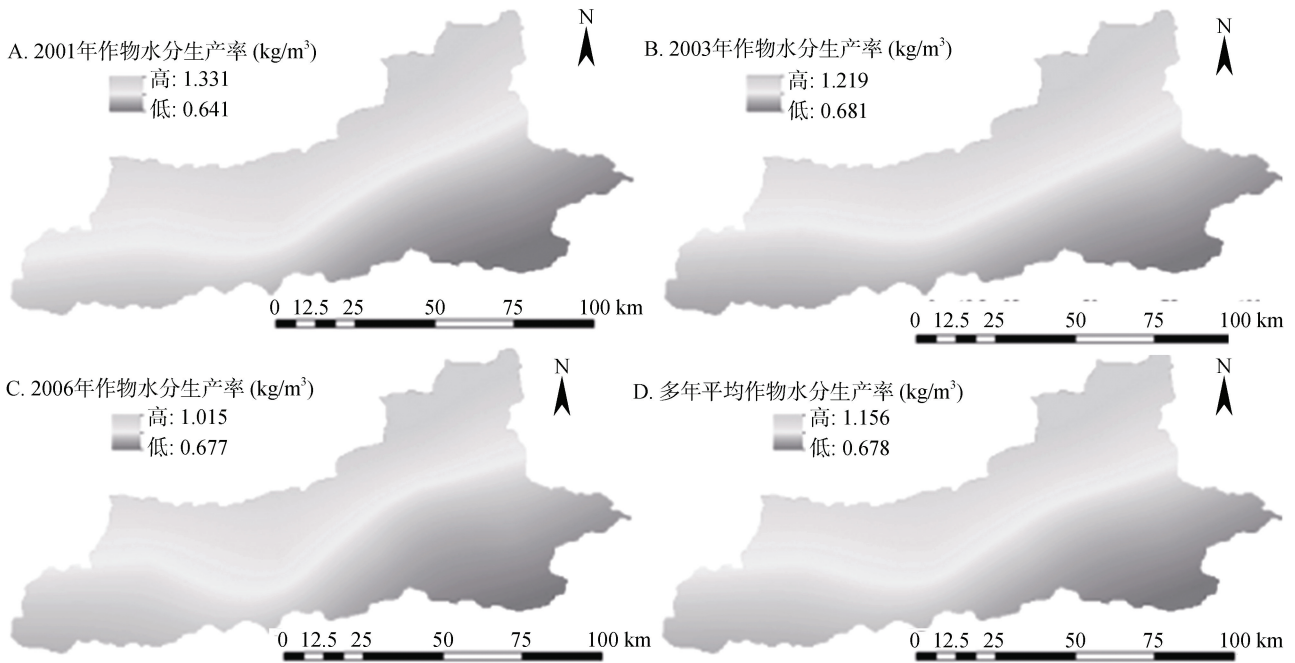


图 6 代表年及多年平均作物水分生产率空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of typical year and annual average crop water productivity

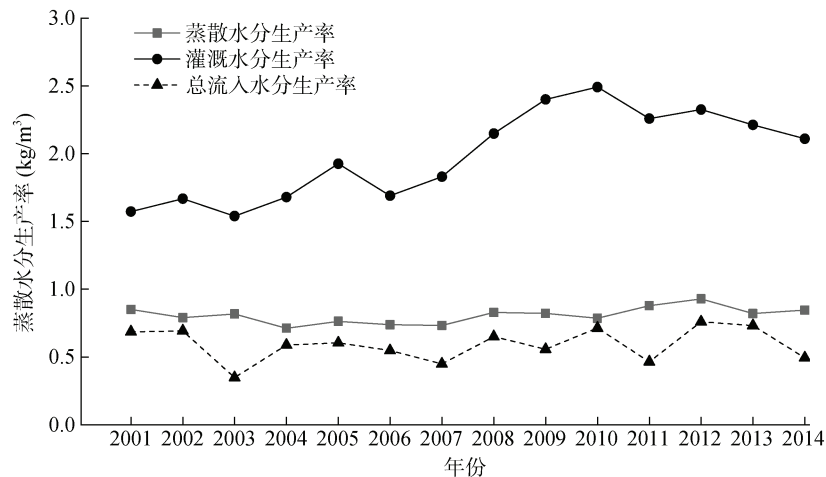


图 7 各指标水分生产率随时间变化

Fig. 7 Changes in water productivities of indexes with time

且年间波动较大，这主要是因为经济发展相对滞后，对农业生产、灌溉工程及田间管理措施的投入薄弱而忽略了对灌溉水合理利用的重视，浪费了大量的水资源；2007—2010 年灌溉水分生产率快速增长，从 2007 年的 1.83 kg/m³ 增长至 2010 年的 2.49 kg/m³，涨幅高达 36.1%，这是因为地区经济发展快速增长，对农业生产技术及田间管理措施的投入加大，使灌溉用水量急剧减少而作物产量依然保持平稳增长；2011—2014 年灌溉水分生产率出现缓慢下降的趋势，作物单位面积产量也逐渐下降，而灌溉用水量保持平稳，分析其原因可能是由于 2010 年之后西安市

有效灌溉面积的大幅减少(表 1)，造成粮食作物单位面积产量减少。对比图 7 与图 3 灌溉用水量曲线，不难看出，有限的灌溉水对于减小有效灌溉面积比单位面积增加灌溉用水量对产量的影响更小，因此，对于西安市灌溉农业，可以采取适当压缩灌溉量，不压缩有效灌溉面积的政策。同时，也可以看出西安市灌溉水分生产率还存在较大的提升空间，有着较大的节水潜力。

为分析各区县水分生产率指标的变化情况并对比变化幅度的空间差异，计算了各指标年均变化率并绘制了指标年均变化率空间分布图。图 8 展示了研究

区 2001—2014 年灌溉水生产率年均变化率空间分布。大部分地区灌溉水生产率随时间呈现增加趋势，少部分地区呈减少趋势，但增减趋势大小在空间分布上存在地区差异。总体上自南向北逐渐减少，减少幅度极大，由南部地区 10.59% 的年均增长率减小至东北部地区的 -3.17%，说明东北部及东部的高陵县、临潼区及蓝田县灌溉水生产率年际间较稳定，随时间变化增长不明显，西南部地区随时间增长明显。作物水分生产率年均变化率空间分布(图 9)表现出由东南部地区向西北部地区减小的趋势，且变化幅度较小，最高与最低年均增长率分别为 2.6% 与 -0.6%。

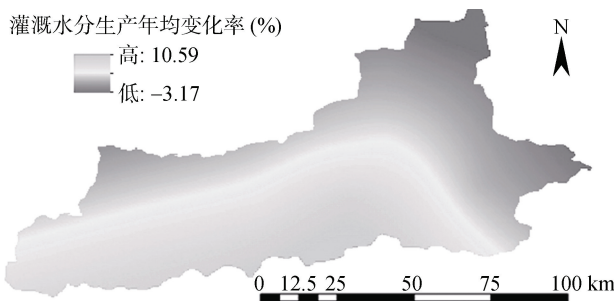


图 8 灌溉水生产率年均变化率空间分布
Fig. 8 Spatial distribution of annual variation rate of irrigation water productivity

2.3 主影响因素分析

为使计算结果更加精确，灰色关联度的计算采用分梯度计算方法，即根据研究年份序列由水分生产率

随时间变化的 3 个阶段并设置重叠年份将各影响因素序列分为 4 部分(2001—2014 阶段、2001—2008 阶段、2004—2011 阶段、2007—2014 阶段)分别计算其灰色关联度值，综合分析每部分关联度排序情况。

表 3 是作物水分生产率影响因素的灰色关联度及其排序结果。从分阶段排序结果可以看出，2001—2014 年排名前五位的是化肥施用量>年平均气温>作物播种面积>有效灌溉面积>农业机械总动力；2001—2008 年排名前五位的是有效灌溉面积>农药用量>灌溉用水量>农业从业人员>作物播种面积；2004—2011 年排名前五位的是农业机械总动力>化肥施用量>作物播种面积>有效灌溉面积>年平均气温；2007—2014 年排名前五位的是农业机械总动力>化肥施用量>农膜用量>年平均气温>作物播种面积。

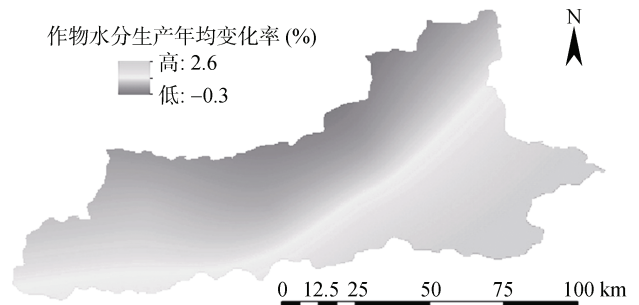


图 9 作物水分生产率年均变化率空间分布
Fig. 9 Spatial distribution of annual variation rate of crop water productivity

表 3 作物水分生产率影响因素的灰色关联度分析
Table 3 Grey correlation analysis of factors affecting crop water productivity

年份	关联分析	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁
2001—2014	关联度	0.80	0.71	0.69	0.75	0.75	0.78	0.66	0.73	0.76	0.68	0.63
	排序	1	7	8	4	5	2	10	6	3	9	11
	关联程度	S	S	M	S	S	S	M	S	S	M	M
2001—2008	关联度	0.73	0.69	0.78	0.81	0.68	0.73	0.59	0.77	0.75	0.77	0.60
	排序	6	8	2	1	9	6	11	4	5	3	10
	关联程度	S	M	S	S	M	S	M	S	S	S	M
2004—2011	关联度	0.81	0.70	0.70	0.75	0.82	0.73	0.65	0.64	0.76	0.59	0.68
	排序	2	6	7	4	1	5	9	10	3	11	8
	关联程度	S	S	M	S	S	S	M	M	S	M	M
2007—2014	关联度	0.79	0.76	0.69	0.69	0.79	0.72	0.60	0.69	0.70	0.65	0.60
	排序	2	3	7	6	1	4	11	8	5	9	10
	关联程度	S	S	M	M	S	S	M	M	M	M	M

注：S 表示强关联；M 表示中关联。

排序结果表明，化肥施用量、农业机械总动力、有效灌溉面积、作物播种面积等可控因素和不可控因

素中的年均气温对作物水分生产率的影响较为显著，这与胡广录等^[26]的研究结果一致。在干旱半干旱地

区,养分限制显著影响产量上限,化肥用量低会限制水生产率提高^[27],因此,化肥用量在各阶段中显著性排名均居于前列。农业机械总动力是反映农业生产机械化水平的重要指标,从 2001—2008 年第九位上升至 2004—2011 年及 2007—2014 年阶段的第一位,说明随着西安市农业机械化水平的显著提高,逐渐成为影响作物水分生产率的主要因素。土地和灌溉是粮食生产不可或缺的元素,作物播种面积与有效灌溉面积反映了作物生产和灌溉的情况,成为影响粮食产量和水生产率的重要因素。年均气温也直接影响了植物的新陈代谢和蒸腾的强度,同时也影响作物土壤温度,而土温影响植物根系的生长发育,因此,年均气温成为影响作物水分生产率的主要不可控因素。灌溉用水量在 2001—2008 年阶段排第三位,2004—2011 年及 2007—2014 年阶段分别排第十一位和第九位,说明随着节水灌溉工作取得一定的成果,灌溉用水量不断减少,近几年趋于稳定,已不再成为影响作物水分生产率的主要因素。不可控因素中的年降水量和蒸发蒸腾量排名均靠后,对作物水分生产率的影响不显著。

为进一步说明各影响因素对作物水分生产率的影响程度,对 2001—2014 年每年关联系数排序前五位的影响因素进行频次统计分析。结果发现,频次排名前五位的是年均气温>化肥施用量>有效灌溉面积>作物播种面积>农业机械总动力。这与分阶段关联度排序结果相似,说明影响作物水分生产率的主要因素大多是可控因素与不可控因素中的年均气温。因此,提高作物水分生产率主要是依靠增加可控因素中化肥施用量、作物播种面积、农业机械总动力及有效灌溉面积等的投入。虽然结果表明增加这些因素的投入对作物水分生产率提高有积极作用,但是从农业生产的角度应该避免盲目增加各要素投入,应该进一步对各生产要素综合评价来决策最优的投入比例以制定科学有效的提升方法。

3 结论

1)西安市水分生产率在空间上呈现显著聚集现象,相邻区县水分生产率值相似。

2)西安市各水分生产率指标均表现出空间分异性。

3)西安市灌溉水分生产率年际间变化较大,有限的灌溉水对于减小有效灌溉面积比单位面积增加灌溉用水量对产量的影响更小,

4)作物水分生产率的主要因素是可控因素与不

可控因素中的年均气温。在农业生产中,可以通过合理投入化肥、农业机械等要素,优化要素投入比例,适当增加作物播种面积及有效灌溉面积来提高该地区的粮食生产能力和水分生产率。

参考文献:

- [1] Playán E, Mateos L. Modernization and optimization of irrigation systems to increase water productivity[J]. *Agricultural Water Management*, 2006, 80(1/2/3): 100–116.
- [2] 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.
- [3] Jiao L. Food security. Water shortages loom as Northern China's aquifers are sucked dry[J]. *Science*, 2010, 328(5985): 1462–1463.
- [4] Zhang W F, Cao G X, Li X L, et al. Closing yield gaps in China by empowering smallholder farmers[J]. *Nature*, 2016, 537(7622): 671.
- [5] Brown L R, Hilweil B. China's water shortage could shake world food security[J]. *World Watch*, 1998, 7(8): 10–18.
- [6] 侯建伟,段玉,张君,等. 内蒙古阴山北麓旱农区马铃薯间作模式的生产力与水分利用[J]. *土壤*, 2018, 50(1): 79–85.
- [7] 宋修超,仇美华,郭德杰,等. 水肥处理对基质栽培西瓜生长、水分利用效率及光合特性的影响[J]. *土壤*, 2019, 51(2): 284–289.
- [8] 杨迎,伍靖伟,杨金忠. 海河流域冬小麦水分生产率特征分析[J]. *灌溉排水学报*, 2011, 30(3): 6–11.
- [9] Abdullaev I, Molden D. Spatial and temporal variability of water productivity in the Syr Darya Basin, central Asia[J]. *Water Resources Research*, 2004, 40(8): 1–11.
- [10] Mainuddin M, Kirby M. Spatial and temporal trends of water productivity in the lower Mekong River Basin[J]. *Agricultural Water Management*, 2009, 96(11): 1567–1578.
- [11] Yan N N, Wu B F. Integrated spatial-temporal analysis of crop water productivity of winter wheat in Hai Basin[J]. *Agricultural Water Management*, 2014, 133: 24–33.
- [12] Li X L, Tong L, 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.
- [13] 刘金鹏,费良军,尹亚坤,等. 干旱区绿洲水分生产力影响因素研究[J]. *西安理工大学学报*, 2011, 27(3): 334–338.
- [14] Zwart S J, Bastiaanssen W G M. Review of measured crop water productivity values for irrigated wheat, rice, cotton and maize[J]. *Agricultural Water Management*, 2004, 69(2): 115–133.
- [15] 刘鹤,赵文智. 农业水生产力研究进展[J]. *地球科学进展*, 2007, 22(1): 58–65.
- [16] 中国气象数据网[DB/OL]. <http://data.cma.cn/>.
- [17] 西安市水务局. 西安市水资源公报[EB/OL]. <http://swj.xa.gov.cn/>.

- [18] 西安市水务局. 西安市年度用水资源报表[EB/OL]. <http://swj.xa.gov.cn/>.
- [19] 西安市地方志办公室. 西安地方志[DB/OL]. <http://xadfz.xa.gov.cn/xadfz.html>.
- [20] 寒区旱区科学数据中心[DB/OL]. <http://westdc.westgis.ac.cn>.
- [21] 中国经济与社会发展统计数据库[DB/OL]. <http://tongji.cnki.net/kns55/index.aspx>.
- [22] 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.
- [23] 赵旭, 李毅, 刘俊民. 新疆地区参考作物腾发量的灰色模型预测[J]. 农业工程学报, 2009, 25(10): 50–56.
- [24] 杨轩, 王自奎, 曹铨, 等. 陇东地区几种旱作作物产量对降水与气温变化的响应[J]. 农业工程学报, 2016, 32(9): 106–114.
- [25] Wang S, Huang G H, Lin Q G, et al. Comparison of interpolation methods for estimating spatial distribution of precipitation in Ontario, Canada[J]. International Journal of Climatology, 2014, 34(14): 3745–3751.
- [26] 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.
- [27] Breman H, Groot J J R, van Keulen H. Resource limitations in Sahelian agriculture[J]. Global Environmental Change, 2001, 11(1): 59–68.