

基于实际耗水的固原地区马铃薯生产水足迹研究

李怡瑶^{1,2}, 王彦军¹, 马安平¹, 梁云峰³, 朱永宁⁴, 冯东溥^{1,2}

(1. 宁夏大学 土木与水利工程学院, 宁夏 银川 750021; 2. 旱区现代农业水资源高效利用教育部工程研究中心, 宁夏 银川 750021; 3. 宁夏大学 机械工程学院, 宁夏 银川 750021; 4. 中国气象局旱区特色农业气象灾害监测预警与风险管理重点实验室, 宁夏 银川 750002)

摘要: 通过水足迹理论准确评估固原地区马铃薯生产的水资源利用效率情况, 为当地马铃薯产业发展提供理论依据。采用基于实际耗水的水足迹计算原理、Mann-Kendall 检验、Sen 斜率法、LMDI 模型, 研究了固原地区马铃薯生产水足迹的变化趋势和主要影响因素。研究表明: 1981-2017 年固原市马铃薯生产水足迹均值为 1.48 m³/kg, 下辖县(区)均值在 1.17~2.04 m³/kg 之间, 全市和各县(区)马铃薯生产水足迹均呈显著减小趋势, 全市年均变幅为 -0.04 m³/(kg·a); 固原市单位面积绿水消耗量和单产量均值分别为 2 778.4 m³/hm² 和 2.18 t/hm², 下辖县(区)分别在 2 622.2~3 401.3 m³/hm² 和 1.65~3.19 t/hm² 之间, 各县(区)单产量均呈显著增加趋势, 从西北到东南单产量和单位面积绿水消耗量增大, 水足迹减少; 固原市单产量全时段贡献率为 80.8%, 贡献量在 0~-2.30 m³/kg 之间, 单位面积绿水消耗量贡献率为 19.2%, 各县(区)单产量贡献率为 76.3%~84.0%, 单位面积绿水消耗量贡献率为 16.0%~23.7%。水足迹计算方法中考虑了实际耗水条件, 比充分灌溉条件更能反映实际情况。固原地区马铃薯水足迹显著下降主要是由于单产量增加, 单产量作为主要驱动因子仍有提升潜力, 今后应该加强农业现代化发展, 提高水资源利用效率。

关键词: 马铃薯; 水足迹; LMDI 模型; 作物耗水量; 固原地区

中图分类号: TV213; S273 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2021)05-0227-06

Water footprint of potato production based on crop water consumption in Guyuan, Ningxia Province

LI Yiyao^{1,2}, WANG Yanjun¹, MA Anping¹, LIANG Yunfeng³, ZHU Yongning⁴, FENG Dongpu^{1,2}

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. Engineering Research Center for Efficient Utilization of Modern Agricultural Water Resources in Arid Regions, Ministry of Education, Yinchuan 750021, China; 3. School of Mechanical Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 4. Key Laboratory for Meteorological Disaster Monitoring and Early Warning and Risk Management of Characteristic Agriculture in Arid Regions, China Meteorological Administration, Yinchuan 750002, China)

Abstract: The water footprint theory was employed to accurately evaluate the water resources utilization efficiency of Guyuan potato production in order to provide a theoretical support for the development of local potato industry. The Penman-Monteith equation based on actual water consumption, Mann-Kendall trend test, Sen's slope and logarithmic mean Divisia index (LMDI) model were adopted to analyze the variation trend of potato water footprint (PWF) and its contributing factors. The results showed that the average PWF in Guyuan City during 1981-2017 was 1.48 m³/kg, and in its subordinate counties was between 1.17 and 2.04 m³/kg, which all showed a decreasing trend, with an average annual variation of -0.04 m³/(kg·a) in the City. The green water consumption per hectare (CWU_{green}) and the average yield per hectare (Y) were 2 778.4 m³/hm² and 2.18 t/hm², respectively; whereas those of subordinate counties were in the range of 2 622.2-3 401.3 m³/hm² and 1.65-3.19 t/hm², respectively. The

收稿日期: 2021-04-27; 修回日期: 2021-07-12

基金项目: 宁夏自然科学基金项目(2020AAC03039); 宁夏重点研发引才专项(2020BEB04028); 中国气象局兰州干旱气象研究所基本科研业务费项目“出苗-分枝期干旱胁迫对马铃薯生长发育的影响试验研究”

作者简介: 李怡瑶(1999-), 女, 甘肃陇南人, 硕士研究生, 主要从事农业水资源相关研究。

通讯作者: 冯东溥(1986-), 男, 宁夏银川人, 博士, 讲师, 主要从事农业水资源相关研究。

Y in the subordinate counties all showed a significant upward trend. From northwest to southeast, the Y and CWU_{green} increased, but the water footprint decreased. The contribution rate of Y for changes in PWF during the whole period was 80.8%, and the contribution amount was in the range of 0 – -2.30 m³/kg. The contribution rate of CWU_{green} was 19.2%, whereas in the subordinate counties the contribution rates of Y were in the range of 76.3% – 84.0%, and those of CWU_{green} were in the range of 16.0% – 23.7%. The water footprint calculation method adopted here is based on the actual water consumption condition, which can reflect the real situation better than the full irrigation condition. The increase of Y contributes the most to the significant decrease of PWF in Guyuan, which still has potential to improve. Therefore, the local government and farmers should strengthen the development of agricultural modernization and improve the utilization efficiency of water resources to increase the yield.

Key words: potato; water footprint; LMDI model; crop water consumption; Guyuan region

1 研究背景

水足迹是 Hoekstra 等^[1]提出的一种量化产品生产过程中水资源利用效率的指标。水足迹理论自提出以来,一直受到广泛关注^[2],近年来作物水足迹逐渐成为研究热点^[3]。Mekonnen 等^[4]评价了全球小麦生产水足迹,其结果分辨率较高,为大中尺度小麦水足迹研究提供了参考。Nouri 等^[5]提出通过覆膜和滴灌等节水方式来减少中东和北非地区作物生产水足迹,从而减缓水资源短缺。郭相平等^[6]利用实际统计数据,计算了中国大陆的农作物生产水足迹,为揭示实际作物水资源利用效率提供了参考依据。付强等^[7]基于水足迹探讨了黑龙江省粮食生产用水效率。韩宇平等^[8]基于水足迹理论分析了河北省主要农作物的耗水结构。刘帝等^[9]以陕西关中地区为例提出了基于作物实际耗水的水足迹估算方法,为虚拟水贸易和政策制定提供了科学依据。Cao 等^[10]考虑灌区作物实际耗水过程,评价了大型灌区粮食水足迹。吴普特等^[11]提出了基于区域耗水量和区域用水量的水足迹计算方法,丰富了水足迹理论。

在水足迹计算和评价的基础上一些学者尝试揭示影响水足迹的驱动因素并定量其影响的大小。Sun 等^[12]定量了农业投入和气候变化对灌区作物水足迹的影响。Arunrat 等^[13]利用 EPIC (environmental policy integrated climate) 模型研究了气候变化对泰国水稻水足迹的影响,其模型决定系数在 0.63 ~ 0.77 之间。Chen 等^[14]分析了 1996 – 2015 年间中国大陆水稻生产水足迹受气候变化的影响,结果表明降水和日照是影响最显著的驱动因子。由于以上驱动因子的影响分析都涉及到了统计学的相关方法,因此均有一定误差。对数平均迪氏指数分解模型(LMDI)是一种准确无余差的归因方法^[15]。Xu 等^[16]采用 LMDI

(logarithmic mean Divisia index)模型量化了人类活动对北京市农作物水足迹的贡献大小;Zhao 等^[17]采用 LMDI 模型分析了苏州市农作物区域水足迹的影响因素。冯东溥等^[18]利用 LMDI 模型推导了灌区尺度水足迹贡献量分解公式,定量了人类活动和气候变化的影响。

目前,关于宁夏回族自治区水足迹的研究采用的数据序列较短,且均采用充分灌溉下的理论值和统计年鉴中的实际产量来计算水足迹^[19-21]。由于宁夏回族自治区水资源相对匮乏,固原地区在耐旱且经济效益较低的马铃薯种植过程中往往不进行灌溉,因此,目前充分灌溉的理论需水量与实际不匹配使得水足迹计算和评价难以反映真实的情况。此外,固原地区马铃薯水足迹变化的原因尚未有明确的量化分析,需要进一步研究。

作为固原市政府主推的特色农产品,该地区近 10 年每年的马铃薯种植面积在 $7 \times 10^4 \sim 11 \times 10^4$ hm²^[22]之间,对固原农民的收入和脱贫攻坚有重要意义。本文以固原马铃薯为研究对象,广泛收集长序列统计数据,考虑马铃薯实际耗水情况,利用水足迹理论和 LMDI 模型,深入揭示固原地区马铃薯生产水足迹的变化规律及其影响因素,为提高固原地区马铃薯水资源利用效率提供科学依据和参考。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区概况

固原市位于宁夏回族自治区南部(105°19' ~ 106°57'E, 35°14' ~ 36°31'N),下辖西吉县、隆德县、原州区、彭阳县、泾源县 5 个县(区),总面积为 10 540 km²,常住人口为 125.05 万人。固原属于温带大陆性季风气候,年平均气温在 6.7 ~ 8.8 °C 之间,年均降水量在 458.6 ~ 668.2 mm 之间^[23]。固原

市地理位置及行政区划见图 1。

2.2 数据来源

固原市 5 个县(区)1981 - 2017 年月尺度气象资料(最高气温、最低气温、相对湿度、降水量、日照时数)来自宁夏回族自治区气象局,气象站点分布如图 1 所示。马铃薯单位面积产量、种植面积和总产量来自《宁夏统计年鉴(2018)》^[23]。

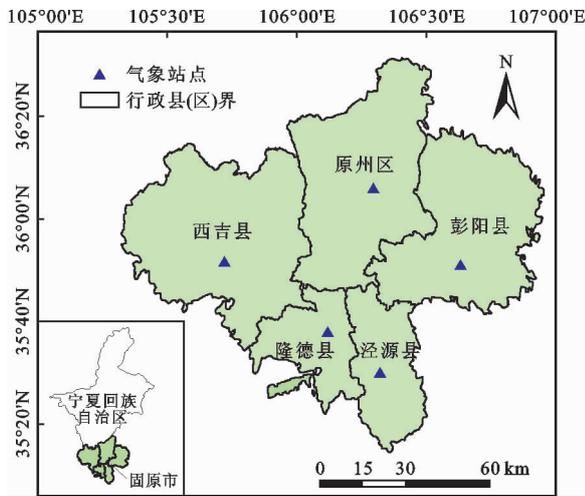


图 1 固原市地理位置、行政区及气象站分布

2.3 研究方法

2.3.1 马铃薯生产水足迹计算 作物生产水足迹由绿水足迹、蓝水足迹和灰水足迹构成。由于固原地区水资源短缺,且马铃薯生育期在当地降水量较集中的 5 - 9 月,因此马铃薯生长期间一般并不实施灌溉,施肥过程产生的灰水未进入实际耗水过程。因此对于固原地区马铃薯生产的实际耗水过程而言,不考虑蓝水和灰水,仅考虑绿水。绿水足迹是生产单位产量马铃薯所消耗的有效降水,实际耗水情况下的固原地区马铃薯生产水足迹可由公式(1) ~ (4) 计算,其中月尺度的参考作物腾发量 ET_0 采用联合国粮农组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO)推荐的 Penman - Monteith 公式^[24] 计算。

$$WF = CWU/Y \quad (1)$$

$$CWU = CWU_{green} = 10 \sum_g \text{Min}(P_{eff}, ET_c) \quad (2)$$

$$P_{eff} = \begin{cases} P(125 - 0.2P)/125 & (P \leq 250 \text{ mm}) \\ 0.1P + 125 & (P > 250 \text{ mm}) \end{cases} \quad (3)$$

$$ET_c = K_c \cdot ET_0 \quad (4)$$

式中: WF 为马铃薯生产水足迹, m^3/kg ; CWU 为马铃薯单位面积耗水量, m^3/hm^2 ; CWU_{green} 为马铃薯单位面积绿水消耗量, m^3/hm^2 ; Y 为马铃薯单产量,

kg/hm^2 ; P_{eff} 为月尺度的有效降水量, mm , 计算方法参考文献[25] 和[26]; P 为马铃薯生育期内的月降水量, mm ; g 为马铃薯生育期的月序数; ET_c 为马铃薯生育期内的作物需水量, mm ; K_c 为马铃薯作物系数, 参考 FAO 文件^[24] 进行修正。

2.3.2 指标的趋势特征分析 采用 Mann - Kendall 趋势检验法^[27 - 28] 分析序列变化趋势及显著性, Sen 斜率法^[29] 分析序列的年均变幅, 公式如下:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{l=k+1}^n \text{Sgn}(x_l - x_k) \quad (5)$$

$$\text{Sgn}(x_l - x_k) = \begin{cases} 1 & (x_l - x_k > 0) \\ 0 & (x_l - x_k = 0) \\ -1 & (x_l - x_k < 0) \end{cases} \quad (6)$$

$$\text{Var}(S) = n(n - 1)(2n + 5)/18 \quad (7)$$

$$Z = \begin{cases} \frac{S - 1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & (S > 0) \\ 0 & (S = 0) \\ \frac{S + 1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & (S < 0) \end{cases} \quad (8)$$

式中: n 为序列长度; x_l 和 x_k 分别为序列 x 的第 l 个和 k 个元素 ($l > k$); S 为符号函数统计量; Sgn 为符号函数; Var 为方差; Z 为标准化检验统计量。当 $|Z| \geq 1.645$ 和 $|Z| \geq 1.960$ 时, 分别表示序列在 P 为 0.1 和 0.05 的水平上变化显著, 否则变化趋势不显著; Z 为正值, 表示序列呈上升趋势, 负值表示序列呈下降趋势。

$$\text{Sen}_{i,j} = \text{Median}\left(\frac{x_j - x_i}{j - i}\right) \quad (i < j) \quad (9)$$

式中: $\text{Sen}_{i,j}$ 为 Sen 斜率; x_i 和 x_j 为第 i 和第 j 时刻的序列值; Median 为取中值函数。

2.3.3 水足迹变化的归因分析 根据公式(1) 利用 LMDI 模型^[16] 得到如下公式:

$$\Delta WF = \Delta WF_C + \Delta WF_Y \quad (10)$$

$$\Delta WF_C = \phi[WF(t), WF(0)] \ln \frac{CWU(t)}{CWU(0)} \quad (11)$$

$$\Delta WF_Y = \phi[WF(t), WF(0)] \ln \frac{Y(0)}{Y(t)} \quad (12)$$

$$\phi[X(t), X(0)] = \begin{cases} \frac{X(t) - X(0)}{\ln X(t) - \ln X(0)} & (X(t) \neq X(0)) \\ X(0) & (X(t) = X(0)) \end{cases} \quad (13)$$

式中: ΔWF 为固原地区马铃薯生产水足迹变化量, m^3/kg ; ΔWF_C 为单位面积绿水消耗量对水足迹变化的贡献量, m^3/kg ; ΔWF_Y 为单位面积产量对水足

迹变化的贡献量, m^3/kg ; t 为研究期内的时段序数。以因子的贡献量绝对值之和占水足迹变化量绝对值之和的百分比作为时段内因子贡献率。

3 结果与分析

3.1 固原地区马铃薯生产水足迹

1981—2017年固原市及所辖各县(区)马铃薯生产水足迹时程变化曲线见图2,各统计特征值见表1。

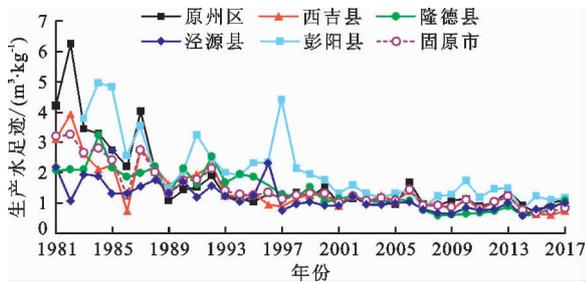


图2 1981—2017年固原市及所辖各县(区)马铃薯生产水足迹时程变化曲线

表1 1981—2017年固原市及所辖各县(区)马铃薯生产水足迹各统计特征值

地区	均值/ ($m^3 \cdot kg^{-1}$)	最大值/ ($m^3 \cdot kg^{-1}$)	最小值/ ($m^3 \cdot kg^{-1}$)	标准差 <i>SD</i>	M-K 检 验 <i>Z</i> 值
固原市	1.48	3.26	0.68	0.85	-6.53
彭阳县	2.04	4.96	0.79	1.05	-5.60
原州区	1.67	6.23	0.66	1.08	-5.32
西吉县	1.43	3.94	0.60	0.87	-5.32
隆德县	1.41	3.22	0.58	0.80	-5.17
泾源县	1.17	2.33	0.57	0.66	-5.17

由图2可见,1981—2017年固原市及所辖各县(区)马铃薯生产水足迹整体呈减小趋势,尤以20世纪80年代变化幅度最大,90年代除彭阳县以外其他县(区)变幅迅速减小,到2000年以后固原市及所辖各县(区)的马铃薯生产水足迹稳定在 $0.57 \sim 1.72 m^3/kg$ 的区间。固原市马铃薯生产水足

迹年代特征明显,20世纪80年代生产水足迹均值为 $2.44 m^3/kg$,90年代为 $1.48 m^3/kg$,21世纪00年代为 $1.09 m^3/kg$,10年代为 $0.89 m^3/kg$ 。在最值方面,除泾源县以外其他县(区)的最大值均出现在1982年,在1987、1996和1997年各县(区)的水足迹也较高。

由表1各统计特征值可知,固原市马铃薯生产水足迹平均值为 $1.48 m^3/kg$,所辖各县(区)平均值从大到小排序为彭阳县>原州区>西吉县>隆德县>泾源县。标准差表明数据离散程度排序为原州区>彭阳县>西吉县>隆德县>泾源县。经Mann-Kendall检验1981—2017年固原地区马铃薯生产水足迹均呈显著减小趋势($P < 0.05$),全市马铃薯生产水足迹年均变幅为 $-0.04 m^3/(kg \cdot a)$,各县(区)变幅在 $-0.03 \sim -0.05 m^3/(kg \cdot a)$ 之间。

3.2 固原地区马铃薯生产水足迹驱动因子变化特征

由公式(1)可知,单位面积绿水消耗量和单位面积产量是直接影响作物生产水足迹的两个驱动因子。为了定量分析这两个驱动因子对马铃薯生产水足迹的影响,绘制了1981—2017年固原市及所辖各县(区)马铃薯生产水足迹驱动因子时程变化曲线,如图3所示,各统计特征值见表2、3。

由图3(a)和表2可知,1981—2017年固原地区单位面积绿水消耗量均值为 $2778.4 m^3/hm^2$,所辖各县(区)均值在 $2622.2 \sim 3401.3 m^3/hm^2$ 之间,降序排列为泾源县>隆德县>原州区>彭阳县>西吉县。最小值出现在固原西北的西吉县,最大值出现在南部的泾源县。Sen斜率表明固原市单位面积绿水消耗量年均变幅为 $-13.34 m^3/(hm^2 \cdot a)$,各县(区)单位面积绿水消耗量也呈减少趋势,年均变幅为 $-3.80 \sim -14.88 m^3/(hm^2 \cdot a)$,经Mann-Kendall检验,西吉县单位面积绿水消耗量有较为显著的减小趋势($P < 0.1$),其他县(区)未通过显著性检验。

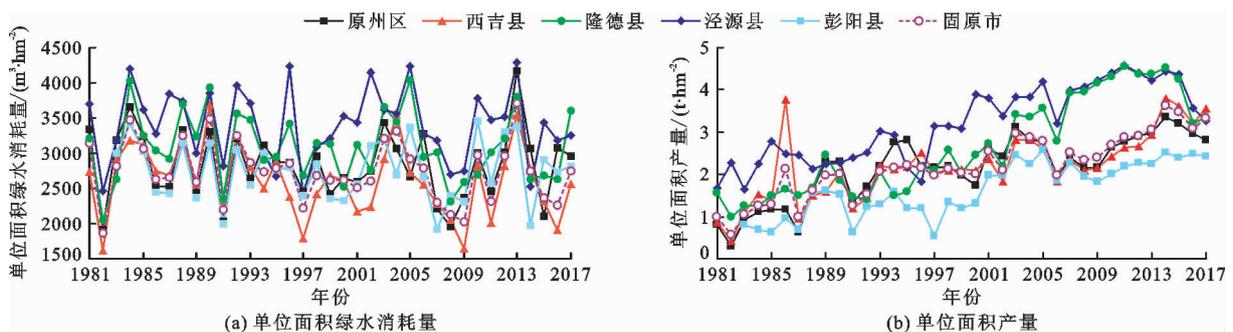


图3 1981—2017年固原市及所辖各县(区)马铃薯生产水足迹驱动因子时程变化曲线

表 2 1981 - 2017 年固原市及所辖各县(区)马铃薯单位面积绿水消耗量统计特征值

地区	均值/ ($m^3 \cdot hm^{-2}$)	最大值/ ($m^3 \cdot hm^{-2}$)	最小值/ ($m^3 \cdot hm^{-2}$)	标准差 <i>SD</i>	M-K 检 验 Z 值
固原市	2778.4	3715.2	1872.8	21.0	-1.66
彭阳县	2756.3	3454.2	1922.2	20.5	-0.28
原州区	2835.0	4167.5	1916.5	22.3	-0.69
西吉县	2622.2	3685.2	1623.5	22.5	-1.67
隆德县	3089.2	4035.2	2050.9	22.2	-0.85
泾源县	3401.3	4287.5	2411.8	22.8	-0.40

表 3 1981 - 2017 年固原市及所辖各县(区)马铃薯单位面积产量统计特征值

地区	均值/ ($t \cdot hm^{-2}$)	最大值/ ($t \cdot hm^{-2}$)	最小值/ ($t \cdot hm^{-2}$)	标准差 <i>SD</i>	M-K 检 验 Z 值
固原市	2.18	3.63	0.57	0.86	6.24
彭阳县	1.65	2.59	0.54	0.80	5.21
原州区	2.15	3.36	0.31	0.88	5.38
西吉县	2.19	3.78	0.41	0.90	5.32
隆德县	2.65	4.55	0.98	1.07	6.47
泾源县	3.19	4.59	1.64	0.95	6.00

由图 3(b)和表 3 可知,1981 - 2017 年固原地区马铃薯单位面积产量上升幅度较大,趋势明显。20 世纪 80 年代固原市马铃薯单产均值为 $1.31 t/hm^2$, 90 年代为 $1.95 t/hm^2$, 21 世纪 00 年代为 $2.45 t/hm^2$, 10 年代为 $3.12 t/hm^2$ 。泾源县马铃薯单产量高于其他县(区),原州区、彭阳县和西吉县基本处于同一水平,其间差距不大,彭阳县单产量较少。除泾源县外,其他县(区)最小单产量在 1982 年;西吉县最大单产量在 1986 年,其他县(区)的最大单产量均在 2000 年以后。所有县(区)的单产量均有显著的增大趋势($P < 0.05$)。

3.3 固原地区马铃薯生产水足迹变化归因分析

以 1981 年为基准期,分析时间段 t 为 1982 - 2017 年,利用 LMDI 法将固原市马铃薯生产水足迹变化量分解为单位面积产量和单位面积绿水消耗量的贡献量,如图 4 所示。

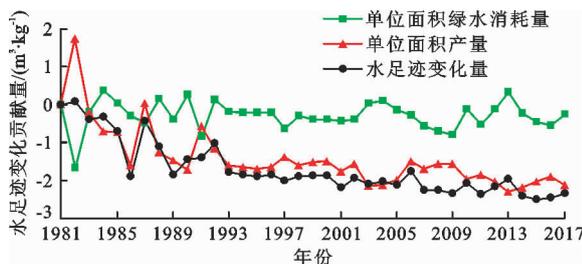


图 4 1982 - 2017 年驱动因子对固原市马铃薯生产水足迹变化的贡献量(以 1981 年为基准)

由图 4 可看出,单产量的贡献量在 1982 和 1987 年为正,说明相比于基准期,这两个年份的单产量变化使得固原市马铃薯生产水足迹增加,其中 1982 年增幅明显。与图 3 对比发现,1982 年是固原市单产量和单位面积绿水消耗量曲线最低点,表明当年单产量发生锐减,但同时由于单位面积绿水消耗量也大幅减小,两者互相抵消导致水足迹变化量不大。除 1982 年外,其他时段单位面积绿水消耗量的贡献量在 $-0.78 \sim 0.34 m^3/kg$ 的区间内波动变化,单产量的贡献量在 $0 \sim -2.30 m^3/kg$ 的区间内变化。绝大多数情况两者的贡献量均为负,造成马铃薯生产水足迹越来越小。

通过计算得出 1982 - 2017 年驱动因子对固原市及所辖各县(区)马铃薯生产水足迹变化的贡献率,如表 4 所示。由表 4 可知,固原市马铃薯生产水足迹变化的主要驱动因子为单产量,贡献率达 80.8%,次要驱动因子为单位面积绿水消耗量,贡献率为 19.2%。在所辖各县(区)的驱动因子贡献率中,单产量占 76.3% ~ 84.0%,单位面积绿水消耗量占 16.0% ~ 23.7%。单位面积绿水消耗量的贡献率降序排列为隆德县 > 泾源县 > 原州区 > 彭阳县 > 西吉县,单产量的贡献率排序则与之相反。

表 4 1982 - 2017 年驱动因子对固原市及所辖各县(区)马铃薯生产水足迹变化的贡献率

地区	驱动因子贡献率/%	
	单位面积绿水消耗量	单产量
固原市	19.2	80.8
彭阳县	18.0	82.0
原州区	18.1	81.9
西吉县	16.0	84.0
隆德县	23.7	76.3
泾源县	19.4	80.6

4 讨论

与相同或相邻区域的相关研究成果比较,本文计算得出的马铃薯生产水足迹偏低,如李亚婷^[19]计算 2007 - 2015 年宁夏海原县薯类生产水足迹为 $3.45 m^3/kg$,高海燕等^[21]计算 2008 - 2017 年宁夏马铃薯的平均生产水足迹为 $3.02 m^3/kg$ 。这是由于本文考虑用实际耗水量和统计产量计算马铃薯水足迹,而上述文献采用充分灌溉的理论值和统计产量计算马铃薯水足迹。作物在充分灌溉下的产量和实际耗水时的产量一般有一定差距,因此本文的计

算方法更能反映真实情况。

归因分析表明,单产量对固原地区马铃薯生产水足迹变化的贡献率远大于单位面积绿水消耗量的贡献率。单产量的贡献表现为两方面,正贡献主要发生在20世纪80年代初期马铃薯遭受减产期,负贡献则是由于马铃薯不断增产提高了水分利用效率从而减少了生产水足迹,这也反映出固原地区农业技术的迅速发展。农业水平的不断提高带来的增产增收是水足迹减小的主要原因,由于灾害导致的减产歉收是水足迹增大的主要原因。此外无论是水足迹还是驱动因素均表现出了一定的空间特征,主要特征是固原地区从西北到东南呈现出单产量和单位面积绿水消耗量增加、水足迹减少的态势,这表明固原地区空间尺度虽然较小,但是不同县(区)的气候条件和农业水平仍有较大差别。

与国外马铃薯的种植水平相比,如阿根廷草原地区的马铃薯水足迹^[30]为 $0.32\text{ m}^3/\text{kg}$,其中绿水足迹为 $0.10\text{ m}^3/\text{kg}$,单产量为 $48.80\text{ t}/\text{hm}^2$,而目前固原市马铃薯最大单产量仅为 $3.63\text{ t}/\text{hm}^2$,说明固原市马铃薯产业还有很大的提升空间,今后需要将工作重点放在提高农艺水平和培育高产高品质种上。

5 结 论

(1)固原市马铃薯生产水足迹在1981-2017年间的平均值为 $1.48\text{ m}^3/\text{kg}$,其所辖各县(区)平均值在 $1.17\sim 2.04\text{ m}^3/\text{kg}$ 之间。全市和各县(区)马铃薯生产水足迹均呈显著减小趋势,全市年均变幅为 $-0.04\text{ m}^3/(\text{kg}\cdot\text{a})$ 。

(2)固原市马铃薯单位面积绿水消耗量和单产量均值分别为 $2778.4\text{ m}^3/\text{hm}^2$ 和 $2.18\text{ t}/\text{hm}^2$,所辖各县(区)两者均值分别在 $2622.2\sim 3401.3\text{ m}^3/\text{hm}^2$ 和 $1.65\sim 3.19\text{ t}/\text{hm}^2$ 之间。各县(区)单产量均呈显著增大趋势。从西北到东南呈现单产量和单位面积绿水消耗量增加、水足迹减少的态势。

(3)归因分析表明,单产量是影响固原市马铃薯生产水足迹的主要驱动因子,在研究时段内其贡献率为80.8%,贡献量在 $0\sim -2.30\text{ m}^3/\text{kg}$ 的区间内波动变化;次要驱动因子单位面积绿水消耗量的贡献率为19.2%,绝大多数时段贡献量在 $-0.78\sim 0.34\text{ m}^3/\text{kg}$ 的区间内波动变化,各县(区)单产量的贡献率为76.30~84.0%。

参考文献:

[1] HOEKSTRA A Y, CHAPAGAIN A K, ALDAYA M M, et al. The water footprint assessment manual: Setting the

global standard[M]. London: Earthscan Press, 2011.

- [2] GAO Jie, ZHUO La, LIU Yilin, et al. Efficiency and sustainability of inter-provincial crop-related virtual water transfers in China [J]. *Advances in Water Resources*, 2020, 138: 103560.
- [3] WANG Qiang, GE Shuting. Carbon footprint and water footprint in China: Similarities and differences [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 739: 140070.
- [4] MEKONNEN M M, HOEKSTRA A Y. A global and high-resolution assessment of the green, blue and grey water footprint of wheat [J]. *Hydrology and Earth System Science*, 2010, 14(121): 1259-1276.
- [5] NOURI H, STOKVIS B, GALINDO A, et al. Water scarcity alleviation through water footprint reduction in agriculture: The effect of soil mulching and drip irrigation [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 653: 241-252.
- [6] 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.
- [7] 付强,刘焯,李天霄,等.水足迹视角下黑龙江省粮食生产用水分析[J].*农业机械学报*,2017,48(6):184-192.
- [8] 韩宇平,曲唱,贾冬冬.河北省主要农作物水足迹与耗水结构分析[J].*灌溉排水学报*,2019,38(10):121-128.
- [9] 刘帝,操信春,王玉宝.基于田间实际耗水的作物生产水足迹[J].*排灌机械工程学报*,2014,32(8):719-724.
- [10] CAO Xinchun, WU Pute, WANG Yubao, et al. Water footprint of grain product in irrigated farmland of China [J]. *Water Resources Management*, 2014, 28(8): 2213-2227.
- [11] 吴普特,孙世坤,王玉宝,等.作物生产水足迹量化方法与评价研究[J].*水利学报*,2017,48(6):651-660+669.
- [12] SUN Shikun, WU Pute, WANG Yubao, et al. The impacts of interannual 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.
- [13] ARUNAT N, PUMIJUMNOG N, SEREENONCHAI K, et al. Assessment of climate change impact on rice yield and water footprint of large-scale and individual farming in Thailand [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 726: 137864.
- [14] CHEN Sheng, WU Mengyang, CAO Xinchun, et al. Analysis of the characteristics and driving forces of water footprint productivity in paddy rice cultivation in China [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2020, 100(4): 1764-1774.
- [15] ANG B W, LIU F L. A new energy decomposition method: Perfect in decomposition and consistent in aggregation [J]. *Energy*, 2001, 26(6): 537-548.

(下转第240页)

- 价[J]. 地理空间信息, 2020, 18(12): 87-91+100.
- [10] 赵少飞, 赵鑫, 陈翔. 基于改进密切值法的区域工业绿色技术创新能力评价[J]. 工业技术经济, 2020, 39(7): 152-160.
- [11] 王松华, 赵玲. 城市脆弱性综合评价体系建构研究[J]. 苏州大学学报(哲学社会科学版), 2014, 35(5): 30-37.
- [12] 张晓杰, 林英杰. 京津冀一体化区域特色农业协调发展模式分析[J]. 基层农技推广, 2019, 7(6): 50-52.
- [13] 那向丰. 干旱的脆弱性分析与管理策略制定探析[J]. 黑龙江水利科技, 2020, 48(2): 118-120, 192.
- [14] 张永芳, 贾士靖, 刘蕾, 等. 基于综合权重法的河北省水资源脆弱性评价及影响因素分析[J]. 水电能源科学, 2020, 38(4): 22-25+83.
- [15] 燕玲玲, 高秉丽, 徐彩仙, 等. 半干旱黄土丘陵区县域社会生态系统脆弱性时空变化及其影响因素——以定西市安定区为例[J]. 水土保持研究, 2020, 27(5): 373-380.
- [16] 徐晗. 改进的 TOPSIS 模型在陕西省农业干旱脆弱性区划中的应用[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(4): 251-258.
- [17] 贾元童, 崔骁勇, 刘月仙, 等. 内蒙古自治区干旱脆弱性评价[J]. 生态学报, 2020, 40(24): 9070-9082.
- [18] 王晨, 黄馨, 黄晓军. 西北地区城市干旱脆弱性评价研究[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(1): 114-121.
- [19] 杨法暄, 郑乐, 钱会, 等. 基于 DPSIR 模型的城市水资源脆弱性评价——以西安市为例[J]. 水资源与水工程学报, 2020, 31(1): 77-84.
- [20] 王海科, 徐盼盼, 钱会. 关中地区干旱等级模糊综合评价[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(3): 43-47+54.
- [21] 肖枝洪, 王一超. 关于“评测指标权重确定的结构熵权法”的笔记[J]. 运筹与管理, 2020, 29(6): 145-149.
- [22] WANG Rui, CHEN Shiwen, LU Jing. Electric short-term load forecast integrated method based on time-segment and improved MDSC-BP[J]. Systems Science & Control Engineering, 2021, 9(S1): 80-86.
- [23] 康永辉, 解建仓, 黄伟军, 等. 农业干旱脆弱性模糊综合评价[J]. 中国水土保持科学, 2014, 12(2): 113-120.
- [24] 周苏娥, 张明军, 王圣杰, 等. 甘肃省河西地区自然-社会系统脆弱性评价[J]. 资源科学, 2018, 40(2): 452-462.
- [25] 徐晗. 基于熵权法的陕西省农业干旱脆弱性评价及影响因素识别[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(3): 198-205.
- [26] 王莺, 赵文, 张强. 中国北方地区农业干旱脆弱性评价[J]. 中国沙漠, 2019, 39(4): 149-158.

(上接第 232 页)

- [16] XU Yanjie, HUANG Kai, YU Yajuan, et al. Changes in water footprint of crop production in Beijing from 1978 to 2012: A logarithmic mean Divisia index decomposition analysis[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 87: 180-187.
- [17] ZHAO X, TILLOTSON M R, LIU Y W, et al. Index decomposition analysis of urban crop water footprint[J]. Ecological Modelling, 2017, 348: 25-32.
- [18] 冯东溥, 魏晓妹, 降亚楠. 宝鸡峡灌区小麦水足迹时空变化特征与归因分析[J]. 农业机械学报, 2017, 48(12): 269-277.
- [19] 李亚婷. 基于水足迹的宁夏中部干旱带农业结构优化[D]. 银川: 宁夏大学, 2016.
- [20] 齐娅荣, 张嗣墨, 唐莲, 等. 宁夏固原市主要农作物生产水足迹分析[J]. 水资源与水工程学报, 2020, 31(1): 91-96+103.
- [21] 高海燕, 李王成, 李晨, 等. 宁夏主要农作物生产水足迹及其变化趋势研究[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(3): 110-118.
- [22] 固原市地方志编纂委员会办公室. 固原年鉴[M]. 西安: 陕西人民出版社, 2018.
- [23] 宁夏回族自治区统计局, 国家统计局宁夏调查总队. 宁夏统计年鉴(2018)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018.
- [24] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration—Guidelines for computing crop water requirements requirements—FAO irrigation and drainage paper [M]. Rome: Food and Agriculture Organization of United Nations, 1998.
- [25] SMITH M. CROPWAT: A computer program for irrigation planning and management[M]. Roma: Food and Agriculture Organization of United Nations, 1992.
- [26] 孙世坤. 近 50 年来河套灌区作物生产水足迹时空演变过程研究[D]. 西安: 中国科学院大学, 2013.
- [27] KENDALL M G. Rank correlation methods[M]. London: Charles Griffin, 1975.
- [28] MANN H B. Nonparametric tests against trend[J]. Econometrica, 1945, 13(3): 245-259.
- [29] SEN P K. Estimates of the regression coefficient based on kendall's Tau[J]. Journal of the American Statistical Association, 2012, 63(324): 1379-1389.
- [30] RODRIGUEZ C I, RUIZ DE GALARRETA V A, KRUSE E. Analysis of water footprint of potato production in the pampean region of Argentina[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 90(1): 91-96.