

山西省典型粮食作物水分生态适应性研究

职微微^{1,2} 李平春^{1,2} 李梦娜^{1,2} 祁云蛟^{1,2} 陈阜^{1,2} 雷永登^{1,2*}

(1. 中国农业大学农学院,北京 100193;

2. 农业农村部农作制度重点实验室,北京 100193)

摘要 为探究山西省典型粮食作物水分供需及水分生态适应性特征,基于1980—2018年山西省28个国家气象站点的逐日气象资料,采用Penman-Monteith公式计算玉米、谷子和马铃薯3种粮食作物生育期内的水分供需情况,并在此基础上定量分析作物的水分亏缺及水分生态适应性特征。结果表明:1)3种作物的需水量与自然降水有较好的耦合度,但自然降水仍无法满足作物生长发育的需求,尤其是马铃薯,灌溉需水量高达248.96 mm,且在全省大部分地区高于玉米和谷子;2)晋南和晋东南地区马铃薯的水分亏缺指数最高,分别为0.85和0.78,其他地区表现为玉米最高,为0.76,谷子最低,为0.75;3)作物水分生态适应性指数由高到低表现为谷子(1.22) > 玉米(1.07) > 马铃薯(0.77)。谷子的灌溉需水量和水分亏缺指数最小且水分生态适应性最高,从水资源可持续利用角度分析,山西省应适当减少玉米的种植范围,适当增加谷子的播种面积,同时应控制严重缺水地区马铃薯的种植规模。

关键词 粮食作物; 水分供需; 水分亏缺指数; 水分生态适应性

中图分类号 S512

文章编号 1007-4333(2022)10-0080-07

文献标志码 A

Study on water ecological adaptability of typical grain crops in Shanxi Province

ZHI Weiwei^{1,2}, LI Pingchun^{1,2}, LI Mengna^{1,2}, QI Yunjiao^{1,2}, CHEN Fu^{1,2}, LEI Yongdeng^{1,2*}

(1. College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. Key Laboratory of Farming System of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100193, China)

Abstract In order to explore the characteristics of water supply and demand and water ecological adaptability of typical grain crops in Shanxi Province, based on the daily meteorological data of 28 national meteorological stations in Shanxi Province from 1980 to 2018, Penman-Monteith formula was used to calculate the water supply and demand of three grain crops: maize, millet and potato. On this basis, the characteristics of crop water deficit and water ecological adaptability were analyzed quantitatively. The results showed that: 1) The water demand of the three crops had a good coupling degree with the natural precipitation, but the natural precipitation still could not meet the needs of crop growth and development, especially for potato, the irrigation water demand was as high as 248.96 mm, which was higher than that of maize and millet in most parts of the province; 2) The water deficit index of potato was the highest in southern and southeast Shanxi, which were 0.85 and 0.78, respectively. In other areas, the water deficit index of maize was the highest, 0.76, and that of millet was the lowest, 0.75; 3) The overall performance of crop water ecological adaptability index was millet (1.22) > maize (1.07) > potato (0.77). The irrigation water demand and water deficit index of millet were the smallest and the water ecological adaptability was the highest. From the perspective of sustainable utilization of water resources, Shanxi Province should appropriately reduce the planting range

收稿日期: 2021-10-08

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFD1901103); 国家自然科学基金(72061147001, 31801315); 国家社科基金(18ZDA074)

第一作者: 职微微, 硕士研究生, E-mail: zhiweiwei0426@163.com

通讯作者: 雷永登, 副教授, 主要从事气候变化与粮食安全研究, E-mail: leiyd@cau.edu.cn

of maize, appropriately increase the sowing area of millet, and control the planting scale of potato in areas with serious water shortage.

Keywords grain crops; water supply and demand; water deficit index; water ecological adaptability

2001—2021 年,我国因干旱导致的作物受灾面积达农作物总播种面积的 9% 以上,且旱灾仍呈加剧发展趋势^[1]。《中国水资源公报》^[2]发布的数据显示,农业用水占我国总用水量的 61%,农田灌溉用水是主要的农业用水。“十年九旱”是山西省常态,区域有效降水和灌溉水资源不足,是限制其农业经济发展的重要因素^[3]。统计显示,农田灌溉用水占山西省总用水量的 58%,而有效灌溉面积仅占总耕地面积的 27%,充分且高效地利用自然降水及灌溉水对于减轻山西省农业灌溉用水压力意义重大^[4]。研究作物生育期水分亏缺是确定灌溉用水的重要基础^[5-6]。分析作物生育期水分供需特征及水分生态适应性规律,可有效提高作物的水分利用效率,促进干旱缺水地区农业水资源高效可持续利用^[7-10]。

作物水分亏缺指数可较好地反映气候及土壤状况对作物的综合影响,能够真实地表现出作物的水分亏缺情况^[11]。进一步分析作物生育期内的水分生态适应性对有效保持水土、克服水分亏缺具有重要意义^[12]。为此,王龙昌等^[13]对黄土丘陵区旱地作物的水分生态适应性进行了系统的评价,结果表明,谷子的水分生态适应性优于马铃薯。虽然对于作物干旱指标的研究已较为普遍,但是针对山西省典型粮食作物的水分生态适应性定量评价和对比研究鲜有报道。本研究基于 1980—2018 年山西省 28 个国家标准气象站点的逐日气象资料,采用 Penman-Monteith 公式,分析典型粮食作物的水分消耗情况,在此基础上定量计算作物生育期内的水分亏缺及生态适应性指数,旨在探究山西省粮食作物的水分供需及水分生态适应性特征,以期优化山西省粮食作物种植结构提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

山西省地处中纬度地带, 34°34′~40°44′ N, 110°14′~114°33′ E, 总面积为 15.67×10⁶ hm², 属于温带大陆性季风气候,疆域轮廓呈东北斜向西南的平行四边形,山地、丘陵面积占全省总面积的 80%^[14]。山西省年降水量大约在 400~650 mm,为典型的半干旱地区^[15]。

1.2 数据来源

平均气温、降水量、相对湿度和日照时数等来自山西省 28 个国家标准气象站点 1980—2018 年的逐日气象资料;作物系数参考 FAO-56《Irrigation and Drainage Paper》^[16]并结合当地气象数据进行校正;该研究涉及到的粮食作物为玉米、谷子和马铃薯,其生育期数据参考中国气象数据共享网的中国农作物生长发育数据集及相关文献^[17-18]。

1.3 研究方法

采用 Penman-Monteith 公式及分段单值平均法^[16,19],计算 3 种粮食作物的需水量(ET_c)并结合区域的气象条件,对作物系数(K_c)进行校正;作物生育期内的有效降水量(P_e)以及灌溉需水量(IR)的计算参考相关研究的核算方式;采用气象以及农业用水等研究中常用的水分亏缺指数(CWDI)和水分生态适应性指数(WEAD)定量分析 3 种典型粮食作物的水分生态适应性。

1.3.1 有效降水量

有效降水量的计算采用美国农业部土壤保持局推荐的方法^[20]:

$$P_e = \begin{cases} 4.17 + 0.1P & P_e \geq 8.3 \\ P(4.17 - 0.2P)/4.17 & P_e < 8.3 \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: P_e ,有效降水量,mm/d; P ,日自然降水量,mm/d。

1.3.2 灌溉需水量

作物灌溉需水量的一部分可以由降水供给,为作物生育期内需水量与有效降水量的差值^[21]:

$$IR = \begin{cases} ET_c - P_e & ET_c \geq P_e \\ 0 & ET_c < P_e \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中:IR,灌溉需水量,mm; ET_c ,作物需水量,mm; P_e ,有效降水量,mm。

1.3.3 水分亏缺指数

作物水分亏缺指数是常用的表征作物水分亏缺程度的指标,能够真实地反映出作物的水分亏缺情况^[22]:

$$CWDI = \begin{cases} (ET_c - P_e)/ET_c & ET_c \geq P_e \\ 0 & ET_c < P_e \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中:CWDI,水分亏缺指数; ET_c ,作物需水量,mm; P_e ,有效降水量,mm。

1.3.4 水分生态适应性指数

水分生态适应性指数可反映作物水分生态适宜性的强弱,是评价旱地作物生态适应性的重要指标^[23]。

$$WEAI = \prod_{j=1} \left[1 - W_{aj} \left(1 - \frac{R_{aj}}{ET_{aj}} \right) \right] \quad (4)$$

式(4)中:WEAI,作物水分生态适应性指数; R_{aj} ,第 a 种作物第 j 生长期内的降水量,mm; ET_{aj} ,第 a 种作物在第 j 生长期内的需水量,mm; W_{aj} ,第 a 种作物在第 j 生长期内的权重系数的计算方法如下:

$$W_{aj} = \frac{ET_{aj}}{\sum ET_a} \quad (5)$$

式(5)中: $\sum ET_a$,第 a 种作物在各生长期需水量之和,mm。

1.4 统计方法

采用 R 语言计算作物的有效降水量、灌溉需水量、水分亏缺指数及水分生态适应性指数;采用 ArcGIS 10.4 中的反距离权重法进行空间插值分析;采用 Microsoft Excel 2013 进行数据的后期整理与作图。

2 结果与分析

2.1 典型粮食作物水分供需特征

2.1.1 典型粮食作物 K_c 系数

由表 1 可知,校正后晋南地区的马铃薯全生育期的 K_c 最高,在该地区 K_c 最低的为谷子。整体来看,山西省典型粮食作物全生育期的 K_c 由高到低表现为:马铃薯>玉米>谷子。

表 1 山西省典型粮食作物的 K_c

Table 1 K_c of typical grain crops in Shanxi Province

作物 Crop	地区 Area	生育前期 Prophase	快速生长期 Rapid growth period	生育中期 Metaphase	生育后期 Anaphase	全生育期 Whole growth period
谷子 Millet	晋北 Northern Shanxi	0.30	0.62	0.94	0.30	0.72
	晋中 Central Shanxi	0.30	0.62	0.94	0.30	0.72
	晋南 Southern Shanxi	0.30	0.61	0.91	0.30	0.69
	晋东南 Southeast Shanxi	0.30	0.59	0.87	0.30	0.66
马铃薯 Potato	晋北 Northern Shanxi	0.50	0.79	1.08	0.66	0.86
	晋中 Central Shanxi	0.50	0.80	1.10	0.68	0.88
	晋南 Southern Shanxi	0.50	0.83	1.06	0.50	0.91
	晋东南 Southeast Shanxi	0.50	0.81	1.11	0.65	0.88
玉米 Maize	晋北 Northern Shanxi	0.30	0.72	1.13	0.54	0.78
	晋中 Central Shanxi	0.30	0.71	1.13	0.50	0.77
	晋南 Southern Shanxi	0.30	0.80	1.10	0.50	0.82
	晋东南 Southeast Shanxi	0.30	0.68	1.06	0.44	0.74

2.1.2 典型粮食作物生育期内的水分供需特征

由表 2 可知,1980—2018 年,玉米和谷子在生育期内作物需水量方面的表现基本一致:晋中地区(太原、吕梁、阳泉和晋中市)2 种作物的需水量较低,均值分别为 285.72 和 285.67 mm,其他地区玉米和谷子的需水量较晋中地区分别高 25.86 和 21.28 mm。马铃薯的作物需水量在晋南(临汾、运城市)及晋东南地区(长治和晋城市)处于较低值,分

别为 271.31 和 290.22 mm,其他地区均较高。

谷子和玉米生育期内的有效降水量及作物需水量在山西省各地区有较好的耦合度,而马铃薯生育期内的需水量及有效降水量的耦合度较差。3 种粮食作物生育期内的有效降水量由高到低为:玉米(146.58 mm)>谷子(145.44 mm)>马铃薯(109.89 mm),谷子和玉米生育期内的有效降水量在山西省各地区均高于马铃薯,马铃薯生育期内的需水

量较高而有效降水量又不及谷子和玉米,因此,马铃薯在山西省各地区的种植均需补充灌溉用水。

由于谷子及玉米生育期内的需水量与有效降水量有较好的空间耦合性,因此,在运城市谷子和玉米生长季所需补充的灌溉用水量均高于马铃薯,分别需要补充 272.22 和 270.04 mm。马铃薯生长季的

有效降水、需水耦合度远不及谷子和玉米,因此,在山西省大部分地区,马铃薯种植补充的灌溉需水量均远高于玉米和谷子,尤其是在太原、忻州和朔州以及吕梁市。3 种粮食作物生育期内所需补充的灌溉用水量由高到低为:马铃薯(248.96 mm) > 玉米(239.26 mm) > 谷子(237.23 mm)。

表 2 1980—2018 年山西省典型粮食作物的水分供需情况

Table 2 Water supply and demand of typical grain crops in Shanxi Province from 1980 to 2018 mm

市 City	需水量 Water demand			有效降水量 Effective precipitation			灌溉需水量 Irrigation water demand		
	谷子 Millet	马铃薯 Potato	玉米 Maize	谷子 Millet	马铃薯 Potato	玉米 Maize	谷子 Millet	马铃薯 Potato	玉米 Maize
	朔州 Shuozhou	311.00	326.65	323.33	145.14	132.08	149.72	242.89	255.24
大同 Datong	320.22	338.12	333.74	143.82	135.75	148.62	250.32	263.07	260.39
忻州 Xinzhou	308.37	327.93	313.41	146.42	135.91	148.38	240.64	255.73	244.11
太原 Taiyuan	291.20	319.94	291.56	135.02	124.00	135.19	230.46	254.97	231.23
吕梁市 Lvliang	307.17	320.21	307.72	142.01	112.27	142.26	243.12	261.02	242.37
晋中 Jinzhong	285.67	309.13	285.72	142.63	121.51	142.67	223.47	245.93	224.30
阳泉 Yangquan	287.80	313.52	288.23	154.14	134.97	154.30	221.10	243.56	221.02
运城 Yuncheng	332.62	276.55	334.02	139.44	62.41	139.95	272.22	244.41	270.04
临汾 Linfen	304.29	266.06	304.14	143.00	64.31	143.00	242.88	237.53	243.28
长治 Changzhi	283.42	296.28	283.78	153.18	99.96	153.29	218.46	239.03	219.03
晋城 Jincheng	288.70	284.16	288.64	155.00	85.66	155.00	223.93	238.02	224.62

综上,3 种作物的需水量与有效降水均有一定的耦合度,除在运城市,玉米及谷子的灌溉需水量分别为 270.04 和 272.22 mm,高于马铃薯的灌溉需水量(244.41 mm),其他地区均低于马铃薯。马铃薯生育期内的有效降水无法满足其全生育期生长的需求,在全省大部分地区均需要补充大量的灌溉用水。

2.1.3 典型粮食作物水分亏缺指数

由表 3 可知,1980—2018 年,山西省典型粮食作物生育期内水分亏缺指数最高和最低的分别是运城市的马铃薯(0.85)和阳泉市的谷子(0.73)。3 种粮食作物的水分亏缺指数在全省由高到低为:马铃薯(0.78) > 玉米(0.76) > 谷子(0.75)。马铃薯在晋南和晋东南及吕梁地区,水分亏缺指数较高,其他地区,玉米的水分亏缺指数均稍高于谷子和马铃薯,谷子水分亏缺指数在山西省各地方均保持较低且稳定的状态。

表 3 1980—2018 年山西省典型粮食作物水分亏缺指数

Table 3 Water deficit index of typical grain crops in Shanxi Province from 1980 to 2018

市 City	谷子 Millet	马铃薯 Potato	玉米 Maize
朔州 Shuozhou	0.75	0.75	0.75
大同 Datong	0.75	0.75	0.75
忻州 Xinzhou	0.74	0.75	0.75
太原 Taiyuan	0.77	0.77	0.78
吕梁 Lvliang	0.76	0.78	0.77
晋中 Jinzhong	0.76	0.77	0.77
阳泉 Yangquan	0.73	0.74	0.75
运城 Yuncheng	0.77	0.85	0.78
临汾 Linfen	0.76	0.84	0.77
长治 Changzhi	0.74	0.78	0.76
晋城 Jincheng	0.75	0.80	0.76
均值 Mean	0.75	0.78	0.76

2.2 典型粮食作物水分生态适应性指数

由表4可知,3种作物水分生态适应性指数在全省由高到低表现为:谷子(1.22) > 玉米(1.07) > 马铃薯(0.77)。谷子在山西省的水分生态适应指数均高于玉米和马铃薯,马铃薯的水分生态适应性指数最低,尤其在运城市,马铃薯水分生态适应性指数仅为0.50,且在山西全省马铃薯的水分生态适应性均低于另外2种作物,谷子和玉米的水分生态适应性在山西省大部分区域相差较小。阳泉、长治和晋城市谷子水分生态适应性指数较高,晋南地区马铃薯的水分生态适应性较低,而玉米在山西省各地方的水分生态适应性指数较稳定,处于三者中值。

表4 1980—2018年山西省典型粮食作物水分生态适应性指数

Table 4 Water ecological adaptability index of typical grain crops in Shanxi Province from 1980 to 2018

市 City	谷子 Millet	马铃薯 Potato	玉米 Maize
朔州 Shuozhou	1.05	0.82	1.04
大同 Datong	0.99	0.78	0.98
忻州 Xinzhou	1.13	0.87	1.09
太原 Taiyuan	1.15	0.85	1.00
吕梁 Lvliang	1.16	0.77	1.01
晋中 Jinzhong	1.27	0.87	1.09
阳泉 Yangquan	1.40	1.02	1.23
运城 Yuncheng	1.10	0.50	0.95
临汾 Linfen	1.22	0.52	1.05
长治 Changzhi	1.44	0.77	1.18
晋城 Jincheng	1.46	0.68	1.18

3 讨论

玉米是山西省播种面积占比最大的作物^[24],谷子是该省特色粮食作物^[25],马铃薯作为主粮化战略作物,且是山西省传统农作物之一^[26],因此,本研究选取这3种典型粮食作物,对其在山西省各区域的水分供需特征进行定量分析,并在此基础上进一步量化评价了作物水分亏缺度和水分生态适应性。

山西省属于湿润半湿润气候向半干旱气候的过渡地带,各地降水差异明显,总趋势为晋南向晋北递

减^[27],1978—2019年,晋北降水略有增加,晋北以南地区降水在减少^[28]。由于周计伟^[27]分析的是山西省全年自然降水情况,而本研究是关于3种作物生育期内的降水量在山西省各地的表现情况,因此,本研究关于山西省各地作物生育期内的有效降水分布情况与其研究存在一定差异。在作物系数方面,FAO-56《Irrigation and Drainage Paper》^[16]公布的作物 K_c 为无水分胁迫、高管理水平等理想条件下的参考值^[16],因此,本研究结合山西省气象数据,对3种作物生育期内的 K_c 进行了校正,结果均小于参考值,这与史梦霞等^[29]研究结果基本吻合。根据河北省当地气象条件对夏玉米的 K_c 进行校正,结果表明,1999—2018年,河北省夏玉米全生育期 K_c 为0.85,其结果同样低于FAO-56《Irrigation and Drainage Paper》^[16]公布的参考值。在作物水分供需方面,刘钰^[19]对中国主要作物灌溉需水量空间分布特征进行分析,得出玉米灌溉需水量要小于马铃薯,这与本研究的结果一致。本研究结果表明,山西省3种作物的水分亏缺指数由高到低表现为:马铃薯(0.78) > 玉米(0.76) > 谷子(0.75),因马铃薯种植需要补充大量的灌溉用水,所以其水分亏缺情况比玉米和谷子严重。水分生态适应性方面,3种作物的水分生态适应性指数由高到低表现为:谷子 > 玉米 > 马铃薯,王龙昌^[7]对黄土丘陵区旱地作物的水分生态适应性进行定量评价,结果表明,谷子的水分生态适应性指数高于马铃薯,与本研究结果基本一致。

高耗水作物播种面积大且灌溉用水占比高是导致农业水资源短缺的主要原因^[30]。玉米在山西省播种面积占比最大,且在大部分地区的水分亏缺度较高,因此适当减少玉米的播种面积有助于减轻农业灌溉用水的压力。谷子的灌溉需水量及水分亏缺指数在山西省各地均保持较低且稳定的状态,水分生态适应性最高,因此可以考虑适当增大谷子的播种面积。马铃薯灌溉需水量较高,且在晋南地区水分亏缺较严重,为0.85,明显高于晋北、晋中及晋东南地区的均值0.78,水分生态适应性差,为此应严格控制缺水地区马铃薯的种植面积。因未获取山西省所有作物的生育期数据,本研究仅重点分析了该省3种典型粮食作物的水分生态适应性,今后可以考虑更多类别的粮食及经济作物,从而为山西省种植结构调整提供更加全面的参考。

4 结 论

山西省 3 种作物在生育期内的有效降水无法满足 3 种作物生长发育的需求。马铃薯生育期内所需补充的灌溉用水量最大,为 248.96 mm,高于玉米 239.26 mm 及谷子 237.23 mm。3 种作物的水分亏缺指数由高到低为:马铃薯(0.78) > 玉米(0.76) > 谷子(0.75);除晋南、晋东南地区,其他地区的作物水分亏缺指数均表现为玉米最高,谷子最低。山西省 3 种作物的水分生态适应性指数由高到低为:谷子(1.22) > 玉米(1.07) > 马铃薯(0.77),各地谷子的水分生态适应性指数均较高。为缓解山西省农业干旱缺水现状、提高作物种植的水分生态适应性,应适当减少玉米的种植范围,增加谷子的播种面积,同时应适当控制吕梁市马铃薯的种植规模。

参考文献 References

- [1] 王利民,刘佳,张有智,杨福刚,高建孟,刘述彬. 我国农业干旱灾害时空格局分析[J]. 中国农业资源与区划, 2021, 42(1): 96-105
Wang L M, Liu J, Zhang Y Z, Yang F G, Gao J M, Liu S B. Analysis of spatial and temporal patterns of agricultural drought disaster in China[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2021, 42(1): 96-105 (in Chinese)
- [2] 水利部. 2019 年《中国水资源公报》[EB/OL]. [2021-06-02]. <http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/szygb/>
Ministry of Water Resources. 2019 China Water Resources Bulletin[EB/OL]. [2021-06-02]. <http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/szygb/> (in Chinese)
- [3] 李丽红. 山西省农业干旱时空演变规律遥感研究[D]. 太原:太原理工大学, 2015
Li L H. Remote sensing study on temporal and spatial evolution of agricultural drought in Shanxi Province [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2015 (in Chinese)
- [4] 李粉婵. 山西省小麦、玉米依靠作物降雨满足作物需水程度的分析[J]. 山西水利科技, 2015(1): 21-23
Li F C. Degree to meet water requirement of wheat and maize meeting crop water demand by crop rainfall in Shanxi Province[J]. *Shanxi Hydraulic Science and Technology*, 2015(1): 21-23 (in Chinese)
- [5] 曹丹,易秀,陈小兵. 基于黄河三角洲农业灌溉需水量计算的作物结构优化研究[J]. 水资源保护, 2021, 2(23): 1-13
Cao D, Yi X, Chen X B. Study on crop structure optimization based on agricultural irrigation water demand calculation in the Yellow River Delta[J]. *Water Resources Protection*, 2021, 2(23): 1-13 (in Chinese)
- [6] 孔箫铤,张海林,陈卓,宋振伟. 基于 SIMETA W 模型的北京地区主要作物需水量估算[J]. 中国农业大学学报, 2009, 14(5): 109-115
Kong J X, Zhang H L, Chen F, Song Z W. Estimation main crop water requirement in Beijing based on SIMETA W model[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2009, 14(5): 109-115 (in Chinese)
- [7] 王龙昌,王立祥,卞新民. 宁南黄土丘陵区旱地作物水分平衡特征与水分生态适应性研究[J]. 中国农学通报, 2004, 20(2): 232-235
Wang L C, Wang L X, Bian X M. Study on water balance characteristics and water ecological adaptability of dry land crops in Loess Hilly Region of South Ningxia[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2004, 20(2): 232-235 (in Chinese)
- [8] 陈斐,闫霜,王鹤龄,张凯,赵福年,黄小燕. 不同水分胁迫下的春小麦叶片气体交换参数和水分利用效率研究[J]. 干旱区研究, 2021, 38(3): 821-832
Chen F, Yan S, Wang H L, Zhang K, Zhao F N, Huang X Y. Study on leaf gas exchange parameters and water use efficiency of spring wheat leaves under different levels of water stress[J]. *Study on Arid Area*, 2021, 38(3): 821-832 (in Chinese)
- [9] 宋晨菲. 灵丘主要旱地作物水分生态适应性评价[D]. 北京: 中国农业大学, 2019
Song C F. Evaluation of water ecological adaptability of main dry land crops in Lingqiu [D]. Beijing: China Agricultural University, 2019 (in Chinese)
- [10] 曹生奎,冯起,司建华,常宗强,席海洋,卓玛措. 植物水分利用效率研究方法综述[J]. 中国沙漠, 2009, 29(5): 853-858
Cao S K, Feng Q, Si J H, Chang Z Q, Xi H Y, Zhuomacuo. Summary on research methods of plant water use efficiency in plant[J]. *Journal of Desert Research*, 2009, 29(5): 853-858 (in Chinese)
- [11] 王连喜,胡海玲,李琪,孔坚文. 基于水分亏缺指数的陕西冬小麦干旱特征分析[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(5): 237-244
Wang L X, Hu H L, Li Q, Kong J W. Analysis on drought characteristics of winter wheat in Shaanxi Province based on crop water deficit index[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2015, 33(5): 237-244 (in Chinese)
- [12] 张云兰. 高温伏旱区旱地农作系统水分供需平衡特征与生态适应性研究[D]. 重庆:西南大学, 2010
Zhang Y L. Study on water supply-demand equilibrium and ecological adaptability of dryland farming system in hot and summer drought areas[D]. Chongqing: Southwest University, 2010 (in Chinese)
- [13] 王龙昌,谢小玉,王立祥,卞新民. 黄土丘陵区旱地作物水分生态适应性系统评价[J]. 应用生态学报, 2004, 15(5): 758-762

- Wang L C, Xie X Y, Wang L X, Bian X M. Systematic analysis on water ecological adaptability of upland crops in loess hilly zone[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(5): 758-762 (in Chinese)
- [14] 赵春明. 山西省干旱缺水趋势及旱地农业技术发展[J]. 中国农业资源与区划, 2005, 26(3): 45-48
- Zhao C M. Trend of drought and water shortage and development of dry land agricultural technology in Shanxi Province[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2005, 26(3): 45-48 (in Chinese)
- [15] 王耀琴. 山西省种植业生产资料动态及结构分析[D]. 晋中:山西农业大学, 2007
- Wang Y Q. Studies of agricultural inputs dynamic and structure of crops farming in Shanxi Province[D]. Jinzhong: Shanxi Agricultural University, 2007 (in Chinese)
- [16] Allen R G, Pereira L S, Raes D, Smith M. *FAO Irrigation and Drainage Paper*[M]. 56thed. Rome: United Nations Food and Agriculture Organization, 1998
- [17] 姬青云. 晋南马铃薯早熟品种春季栽培技术要点[J]. 种子科技, 2005, 23(3): 176-178
- Ji Q Y. Cultivation techniques of early maturing potato varieties in spring in southern Shanxi[J]. *Seed Science & Technology*, 2005, 23(3): 176-178 (in Chinese)
- [18] 程玉斌. 长治地区马铃薯种植气候条件分析[J]. 山西科技, 2014, 29(6): 143-144
- Cheng Y B. Analysis on the weather conditions of Changzhi area for potato planting[J]. *Shanxi Science and Technology*, 2014, 29(6): 143-144 (in Chinese)
- [19] 刘钰, 汪林, 倪广恒, 丛振涛. 中国主要作物灌溉需水量空间分布特征[J]. 农业工程学报, 2009, 25(12): 9-12
- Liu Y, Wang L, Ni G H, Cong Z T. Spatial distribution characteristics of irrigation water requirement for main crops in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(12): 9-12 (in Chinese)
- [20] Öll P, Siebert S. Global modeling of irrigation water requirements[J]. *Water Resources Research*, 2002, 38(4): 1-8
- [21] Dashora R, Singh P K, Purohit R C, Kothari M, Jain N, Kothari S. Assessment of crop water requirement for wheat and mustard crop in Dharta Watershed[J]. *Journal of Trend in Scientific Research and Development*, 2020, 4(3): 984-988
- [22] Wang Q X, Takahashi H. Seasonal variation of the land-surface water deficit index (WDI) over the loess plateau, China[J]. *Journal of Agricultural Meteorology*, 1997, 52(5): 661-664
- [23] Rao N H, Sarma P B S, Chander S. A simple dated water production function for use in irrigated agriculture [J]. *Agricultural Water Management*, 1988, 13(1): 25-32
- [24] 栾青, 郭建平, 马雅丽, 米晓楠, 张丽敏, 李孟蔚. 山西省主要粮食作物气候资源利用率评估[J]. 生态学杂志, 2021, 40(5): 1386-1396
- Luan Q, Guo J P, Ma Y L, Mi X N, Zhang L M, Li M W. Evaluation of climate resource utilization rate of main grain crops in Shanxi Province [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, 40(5): 1386-1396 (in Chinese)
- [25] 任君, 阎小涛, 秦秀珍. 山西省谷子产业发展现状及前景展望[J]. 现代农业科技, 2017(20): 267-268
- Ren J, Yan X T, Qin X Z. Development status and prospect of millet industry in Shanxi Province [J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2017(20): 267-268 (in Chinese)
- [26] 冯耀斌. 山西省马铃薯产业发展分析[J]. 中国马铃薯, 2018, 32(5): 315-318
- Feng Y B. Analysis of potato industry development in Shanxi Province [J]. *Chinese Potato Journal*, 2018, 32(5): 315-318 (in Chinese)
- [27] 周计伟. 山西省旱作农业发展战略探讨[D]. 北京: 中国农业大学, 2004
- Zhou J W. Study on the development strategy of dry farming in Shanxi Province [D]. Beijing: China Agricultural University, 2004 (in Chinese)
- [28] 李高磊. 气候变化下山西省种植业结构优化对策研究[D]. 晋中: 山西农业大学, 2019
- Li G L. Study on optimization countermeasures of planting structure in Shanxi Province under climate change [D]. Jinzhong: Shanxi Agricultural University, 2019 (in Chinese)
- [29] 史梦霞, 张佳笑, 石晓宇, 褚庆全, 陈阜, 雷永登. 近20年河北省几种高耗水作物的水分利用效率分析[J]. 作物学报, 2021, 47(12): 2450-2458
- Shi M X, Zhang J X, Shi X Y, Chu Q Q, Chen F, Lei Y D. Water use efficiency of several water-intensive crops in Hebei Province in recent 20 years [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2021, 47(12): 2450-2458 (in Chinese)
- [30] 马俊永, 郑春莲, 党红凯, 李科江, 曹彩云. 河北地下水超采情势及种植结构调整对策的经济分析[J]. 水资源研究, 2019, 8(6): 575-580
- Ma J Y, Zheng C L, Dang H K, Li K J, Cao C Y. Economic analysis of groundwater over exploitation situation and planting structure adjustment countermeasures in Hebei Province [J]. *Water Resource Research*, 2019, 8(6): 575-580 (in Chinese)

责任编辑: 吕晓梅