文章编号:1000-7601(2022)02-0119-10 doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2022.02.15

底墒和补灌量对冬小麦产量和水分利用的影响

许卫娜[1,2], 杨宝平[1,2], 聂俊峰[1,2],丁瑞霞[1,2], 杨万忠[1,2],
韩清芳[1,2],王俊鹏[1,2], 张 鹏[1,2], 韩文霆[1,3], 贾志宽[1,2]

(1.西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院,陕西 杨凌 712100;2.农业农村部西北黄土高原作物生理生态与耕作重点实验室,陕西 杨凌 712100;3.西北农林科技大学机械与电子工程学院,陕西 杨凌 712100)

摘 要:在大型半自动控制防雨池栽条件下,采用裂区设计,以不同底墒(350、450、650 mm)为主处理,生育期补灌量(0、56.3、78.1、100 mm)为副处理,研究了不同土壤底墒和补灌量对冬小麦产量、产量构成和水分利用的影响。结果表明,在不补灌条件下,0~200 cm 土壤有效底墒最大利用率为 42.6%~74.2%,其中 0~50 cm 为 92.2%~123.4%,50 cm 以下为 53.9%~65.3%,能保持到冬小麦抽穗。随着补灌量的增加,高、中、低底墒 0~200 cm 土层有效底墒利用率增加。高、中、低底墒高量补灌(R3)0~200 cm 有效底墒利用率分别比低量补灌(R1) 增加 4.3%、37.2%、7.5%;各土层有效底墒利用率均大于不补灌处理。冬小麦营养生长阶段浅层耗水量大于生殖生长阶段,但深层耗水量正好相反,随着冬小麦生育期的推进,尤其在生殖生长阶段,深层土壤贮水量发挥了积极的"补偿作用"。底墒对冬小麦产量及其构成、水分利用效率有显著影响。随补灌量的增加,产量及产量构成均增大,且底墒越低增加幅度越大,但差异不显著。低底墒增产效应分别较中、高底墒提高 70.9%~108.5%、389.7%~ 402.7%。随补灌量的增加,低底墒的水分利用效率增加 1.7%~1.8%,中、高底墒的水分利用效率降低 0.7%~14.2%。因此,播前底墒是保证干旱半干旱区冬小麦稳产、高产的关键所在,作物产量与土壤有效底墒供水量之间呈明显的非线性关系。

关键词:冬小麦;底墒;补灌量;产量;有效底墒利用率;水分利用效率

中图分类号:S512.1+1;S274 **文献标志码**:A

Effects of soil moisture storage at planting and supplementary irrigation on winter wheat yield and water use

XU Weina[1,2], YANG Baoping[1,2], NIE Junfeng[1,2],DING Ruixia[1,2], YANG Wanzhong[1,2],
HAN Qingfang[1,2], WANG Junpeng[1,2], ZHANG Peng[1,2], HAN Wenting[1,3], JIA Zhikuan[1,2]

(1. *The Institute of Water-saving Agriculture in Arid Areas of China*, *Northwest A&F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*; 2. *Key Laboratory of Crop Physi-ecology and Tillage Sicence in Northwest Loess Plateau*, *Minister of Agriculture and Rural Affairs*, *Northwest A&F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*; 3. *College of Mechanical and Electronic Engineering*, *Northwest A&F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: A 2-yr experiment was conducted in a mobile rain-proof shed using a split-plot design that included three soil moisture storage at planting (SMSp, 350, 450 mm and 650 mm) as main plot treatment and four supplemental water during the growing period (0, 56.3, 78.1, 100 mm) as split-plot treatment. The results showed that under no supplemental water, the maximum utilization rate of available soil moisture storage at planting (SMSp) in the 0~200 cm soil profile was from 42.6% to 74.2% by the end of heading. The utilization rate was from 92.2% to 123.4% in the 0~50 cm soil profile, and from 53.9% to 65.3% in the 50 cm below. With increasing supplemental

收稿日期:2020-10-10 **修回日期**:2021-10-21

基金项目:国家高技术研究发展计划 863 项目(2011AA100504;2013AA102902);"十二五"国家科技支持计划(2012BAD09B03;2011BAD29B09);国家重点研发计划项目(2017YFC0403203)

作者简介:许卫娜(1980-),女,陕西西安人,博士研究生,研究方向为作物生理生态。E-mail:xunana0921@163.com

通信作者:韩文霆(1972-),男,内蒙古五原人,研究员,博士生导师,主要从事无人机遥感与精准灌溉技术研究。E-mail:hanwt2000@126.com

贾志宽(1962-),男,山西朔州人,教授,博士生导师,主要从事旱区农业资源管理与开发研究。E-mail: zhikuan@tom.com

water, the utilization rate of available SMSp (*Rc*) in the 0~200 cm soil profile in 350, 450 mm and 650 mm SMSp increased. *Rc* with 100 mm supplemental water in the 0~200 cm soil profile increased by 7.5%, 37.2% and 4.3% in 350, 450 mm and 650 mm SMSp respectively than 56.3 mm supplemental water. With the development of winter wheat growth period, especially at reproductive growth stage, deep soil water storage played a positive compensation role. In the 0~200 cm soil profile, *Rc* decreased not only with the deepening soil, but also increased with increasing SMSp. *Rc* in the upper soil profile at planting-heading stage was higher than at heading-maturing stage, but *Rc* in the deeper soil profile was opposite. SMSp significantly affected winter wheat yield and its composition and water use efficiency. With the increase of water supply, the yield and yield components increased, and the worse the SMSp. The difference was not significant. The effect of low SMSp to yield was higher 70.9%~108.5% and 389.7%~402.7% middle and high SMSp, respectively. With the increase of SMSp, the water use efficiency of low SMSp increased 1.7%~1.8%, while the water use efficiency of medium and high SMSp decreased 0.7%~14.2%. SMSp was essential to ensure winter wheat grain yield on the Loess Plateau of China. Grain yield and the amount of consumed available SMSp had obvious nonlinear relationship.

Keywords: winter wheat (*Triticum aestivum* L.); soil moisture storage at planting(SMSp); supplemental water; grain yield; utilization rate of available SMSp (*Rc*); water use efficiency

随着干旱的频繁发生、经济的发展和人口的增长,农业水资源缺乏的问题日益严重。干旱半干旱区是以旱作为主的雨养农业区,自然降水少、年际波动大、季节分布不均匀,作物供水主要依赖于大气降水,而大气降水对作物的水分供应又需要依附于土壤调节。因此,从大气降水-土壤水-作物循环系统的理论观点出发,探讨该区农田土壤贮水耗水特点及土壤贮水量对作物产量的影响程度,对土壤水库充分利用具有十分重要的意义。冬小麦休闲期正值干旱半干旱区的降雨高峰,此时土壤蓄需水量(底墒)是冬小麦生长及产量形成的重要水源。如何合理利用有限的农业水资源,提高水分利用效率备受关注[1-9]。研究表明,底墒对旱地小麦的产量有显著影响[10-13]。REGMI et al[14]研究表明,充足底墒可供给小麦 225 mm 的水分,并能保持到抽穗。0~200 cm 土层有效底墒介于 270~320 mm 时,0~200 cm 有效底墒最大供水率为 72%,可供给小麦大约 200 mm 的水分,并能保持到灌浆后期[15]。干旱半干旱区由于自然降水的不均匀和不合理的灌溉使冬小麦底墒的利用率不高,还有较大的利用潜力,且以往的研究只考虑底墒或灌水量一个因子对作物生长发育和耗水特性的影响[5,8,15-17],很少对底墒和灌水量之间的相互关系、作用程度进行深入研究。为此,本研究在大型防雨池栽条件下,设置不同底墒和生育期补灌量,精准研究水分条件变化对冬小麦底墒供水特征和产量的影响,以期为旱区麦田降水资源的合理利用和适水种植、量水生产提供理论参考。

1 材料和方法

1.1 试验材料和试验设计

试验于 2013—2015 年在西北农林科技大学旱区节水农业研究院大型作物控水监测试验场启闭式防雨棚下进行。该试场位于陕西杨凌(34°18′N、108°04′E),海拔高度 466.7 m,属暖温带半湿润易旱气候区,试验年的气候变化见表 1。试验小区面积为 6.7 m^2(3.15 m×2.13 m)的水泥池,池深 3 m,每池四周为 17 cm 厚水泥墙,用以防止水分水平交换。池中土壤为 2.5 m 深垆土原状土柱(原位土),分层填入。池底部设有滤层(0.5 m 厚沙子和石子)和排水管,以防池底积水。遇雨雪盖棚,全年防雨水进入。0~60 cm 土层土壤基础养分如表 2。

试验采用裂-裂区设计,2 次重复。土壤底墒(SMSp)为主区处理,设 3 个土壤底墒(0~200 cm 土层),分别为 350、450、650 mm,即在每年八月和九月分别灌溉 100、200、350 mm,进行人工造墒,播种前再测墒补灌调整至试验设计底墒。生育期间补灌量(R)为副区处理,设 4 个灌量:0.0 mm (R0)、56.3 mm (R1)、78.1 mm (R2)、100.0 mm (R3),具体补灌量见表 3,用水表计量,池内每小区又分成 4 个微区进行均匀微滴灌补灌,以减少测渗,确保入渗率。

以冬小麦'长旱 58'(半冬性旱地主栽,国审品种)为供试材料(指示植物),该材料由梁增基研究员培育,张睿研究员提供。于每年 10 月中旬播种,播种量为 135 kg · hm^{-2},行距 25 cm,人工开沟点播,

表 1　2013—2015 年气候变化

Table 1　Weather data change from 2013 to 2015

月份 Month	2013-2014				2014-2015			
	T_{max} /℃	T_{min} /℃	Rad /(MJ·m^{-2}·d^{-1})	*Pn* /mm	T_{max} /℃	T_{min} /℃	Rad /(MJ·m^{-2}·d^{-1})	*Pn* /mm
7 月 July	36.6	18.2	16.4	108.9	39.8	19.1	24.1	22.9
8 月 Aug.	37.5	15.9	18.5	32.0	36.0	15.1	16.5	108.6
9 月 Sept.	26.8	16.6	13.7	68.4	22.8	15.8	11.0	215.1
10 月 Oct.	30.4	4.7	11.3	33.7	20.1	10.3	10.5	55.9
11 月 Nov.	20.9	-5.3	8.2	16.0	11.6	2.7	8.6	21.9
12 月 Dec.	14.3	-9.5	8.2	0.0	6.0	-3.8	11.5	0.2
1 月 Jan.	10.0	-7.0	9.7	0.0	5.5	-3.3	8.0	6.4
2 月 Feb.	18.2	-6.7	6.8	28.0	8.9	-1.1	11.1	1.9
3 月 Mar.	25.5	-0.7	14.1	28.7	14.1	5.0	13.0	55.1
4 月 Apr.	26.9	5.3	14.3	142.0	20.4	9.2	17.0	119.6
5 月 May	32.1	5.1	20.0	38.4	26.8	14.3	19.6	31.6
6 月 June	34.0	16	20.1	51.3	28.0	18.1	16.3	107.1

注:T_{max}为最高温度;T_{min}为最低温度;Rad 为太阳辐射;*Pn* 为降雨量。

Note: T_{max} is max temperature; T_{min} is min temperature; Rad is solar radiation; *Pn* is precipitation.

株距 1.5 cm,深度 5~7 cm,播后用水平尺测平,利于后期均匀补灌。出苗三叶期后定苗,于每年 6 月上旬收获。

1.2　测定指标及方法

冬小麦从播种前一天起每隔 15 d 测定各处理小区 0~200 cm 土层的土壤含水量。0~30 cm 用常规土钻取土烘干法测定,40~200 cm 用 TDR(德国 IMKO 公司 TRIME-FM)测定,10 cm 为一间隔。

成熟时分区测产,每处理选取有代表性的 30 株小麦按常规法进行室内单株考种分析。

土壤蓄水量:

$$W = \sum W_i \times D_i \times H_i \times 10/100 \quad (1)$$

式中,W 为土壤蓄水量,mm;W_i 为第 i 层土壤质量含水量,%;D_i 为第 i 层土壤容重,g·cm^{-3};H_i 为第 i 层土层厚度,cm[17]。

作物耗水量:

$$ET = R + \Delta W \quad (2)$$

式中,ET 为作物生育期内耗水量,mm;R 为生育期内补灌量,mm;ΔW 为播前期与收获期 0 ~ 200 cm 土壤蓄水量之差,mm[18-19]。

土壤有效底墒供水量:

$$Ac = W_i - W_{i+1} \quad (3)$$

式中,Ac 为土壤有效底墒供水量,mm;W_i 为小麦某一生育时期开始时的土壤蓄水量,mm;W_{i+1} 为小麦相应生育时期末期时的土壤储水量,mm[14]。

表 2　供试土壤基础养分

Table 2　Basic nutrients of tested soil

土层深度 Soil depth/cm	有机质 Organic matter /(g·kg^{-1})	全氮 Total N /(g·kg^{-1})	碱解氮 Available N /(mg·kg^{-1})	速效磷 Available P /(mg·kg^{-1})	速效钾 Available K /(mg·kg^{-1})	pH
0~20	10.004	0.728	54.061	9.388	130.124	8.38
20~40	9.158	0.707	43.146	8.719	125.121	8.26
40~60	7.088	0.687	37.706	7.602	116.153	8.15

表 3　补灌方案/mm

Table 3　Supplemental water scheme

补灌量 Supplemental water	拔节期 Jointing stage	抽穗期 Heading stage	灌浆期 Filling stage	累计补灌量 Total irrigation amount
R0	0.0	0.0	0.0	0.0
R1	18.8	12.5	25.0	56.3
R2	21.8	18.8	37.5	78.1
R3	25.0	25.0	50.0	100.0

有效底墒利用率表达式为:

$$Rc = \frac{Ac}{SW} \times 100\% \quad (4)$$

式中,Rc 为有效底墒利用率,%;SW 为有效底墒,mm[14]。

水分利用效率:

$$WUE = GY/ET \quad (5)$$

式中,WUE 为产量水分利用效率,kg·hm^{-2}·mm^{-1};GY 为作物籽粒产量,kg·hm^{-2}[20]。

1.3　数据分析

试验数据采用 SPSS 17.0 进行方差(ANOVA)分析,采用 LSD 法进行显著性检验。

2　结果与分析

2.1　底墒和补灌量对土壤耗水特性的影响

2.1.1　冬小麦有效底墒利用率　由表 4 可见,两年研究结果均表明,在不补灌条件下随底墒的增加,

冬小麦全生育期土壤供水量增加。不补灌(R0)条件下,0~200 cm 土层有效底墒利用率介于 41.9%~73.4% 之间。其中上层 0~50 cm 有底墒利用率介于89.0%~123.6%之间,中层 50~100 cm 有效底墒利用率介于 50.1%~78.1%之间,下层 100~200 cm 有效底墒利用率介于 2.5%~54.3%之间。可见无论底墒高低,土壤浅层(0~50 cm)底墒利用率显著大于深层底墒利用率。

随着补灌量的增加,低、中、高底墒冬小麦全生育期 0~200 cm 土层有效底墒供水量和有效底墒利用率增加。低、中、高底墒高量补灌(R3)比中量补灌(R2)有效底墒利用率分别增加 6.0%、26.0%、3.0%,中量补灌(R2)较低量补灌(R1)有效底墒利用率分别增加 4.0%、37.4%($P<0.05$)、1.3%。上层 0~50 cm 有效底墒利用率为 68.6%~93.9%;中层 50~100 cm 有效底墒利用率为 20.4%~97.8%;下层 100~200 cm 有效底墒利用率为 2.0%~61.6%,可见上层有效底墒利用率最高,其次是中层,100 cm 以下较少。两年研究结果表明,随着底墒的增加,全生育期供水量增加。无论底墒高低,土壤浅层(0~50 cm)供水量比其他深层供水量显著偏多,均占整层供水量 40.0%以上;随着底墒的增加,浅层供水量比例减少,深层供水量比例增加。50 cm 以下土层供水量显著减少,各土层仅占 7.1%~36.3%,说明土壤深层底墒利用尚有很大潜力。低、中底墒处理 100 cm 以下土层的有效底墒利用率均在 6.7%以下,亦说明深层底墒几乎没有被冬小麦所利用。

2.1.2 不同时段不同层次有效底墒利用率 从表5可知,冬小麦不同生育期底墒利用率有明显差异。从播种到抽穗期,不补灌处理土壤上层(0~50 cm)有效底墒利用率较高,均在 62.8%以上,且底墒越小其利用率越高;除了中、低底墒的 100 cm 以下底墒几乎没有被利用外,高底墒的各土层底墒均得到了充分利用,高底墒的下层(100~200 cm)有效底墒利用率仍达 39.1%;整个土层有效底墒利用率与底墒变化趋势一致。随着补灌量的增加,低、中底墒上层

表4 有效底墒供水量(mm)和有效底墒利用率(%)

Table 4 Amount of consumed available SMSp and consumption ratio of available SMSp

年份 Year	底墒 SMSp	处理 Treatment	土层 Soil layer/cm											
			0~200			0~50			50~100			100~200		
			SW /mm	*Ac* /mm	*Rc* /%	*Ac* /mm	*Rc* /mm	*Ra* /%	*Ac* /mm	*Rc* /mm	*Ra* /%	*Ac* /mm	*Rc* /mm	*Ra* /%
2013—2014	低底墒 Low SMSp	R0	73.9c	42.4c	57.4b	35.6de	123.6a	84.0a	4.8f	54.3h	11.3c	2.0d	3.8d	4.7d
		R1	74.2c	31.6c	42.6d	23.5f	79.1d	74.4bc	5.8ef	61.8f	18.4bc	2.3d	4.5d	7.3cd
		R2	73.8c	32.3c	43.8c	23.7f	81.9d	73.4bc	6.0ef	67.7e	18.6bc	2.6d	4.9d	8.0cd
		R3	74.2c	33.6c	45.3c	24.3f	83.9d	72.3bc	6.5ef	71.2e	19.3bc	2.8d	5.2d	8.3cd
	中底墒 Middle SMSp	R0	160.2b	69.7b	43.5c	40.5c	92.9b	58.1d	15.6d	55.3h	22.4a	13.6b	12.4c	19.5b
		R1	161.3b	43.2c	26.8f	32.7e	72.3e	75.7bc	7.2ef	23.8k	16.7bc	3.3d	3.5d	7.6cd
		R2	160.3b	48.6bc	30.3ef	35.6de	82.2d	73.5bc	7.8ef	30.4g	15.9bc	5.2d	5.8d	10.6c
		R3	160.1b	55.1bc	34.4de	38.8cd	93.2b	70.4c	10.2e	40.5i	18.5bc	6.1cd	6.7d	11.1c
	高底墒 High SMSp	R0	347.6a	255.0a	73.4a	118.2a	92.4b	46.4e	51.0c	78.1d	20.0abc	85.8b	54.3b	33.6a
		R1	345.7a	261.0a	75.4a	117.2a	93.9b	44.9e	56.8b	86.2c	21.8ab	87.1b	53.9b	32.8a
		R2	348.5a	263.7a	75.7a	112.7ab	90.1b	42.7e	58.5ab	91.8b	22.2a	92.5a	57.1ab	35.1a
		R3	346.7a	269.3a	77.8a	110.8b	87.5bc	41.1e	61.4a	97.8a	22.8a	97.1a	61.6a	36.1a
2014—2015	低底墒 Low SMSp	R0	74.2c	40.8c	55.0b	34.6de	118.1a	84.8a	4.3d	50.1h	10.5cb	1.9d	2.5d	4.7d
		R1	73.9c	29.4c	39.8d	22.1f	74.7d	75.2bc	5.2d	60.4ef	17.7bc	2.1d	2.8d	7.1cd
		R2	74.2c	30.9c	41.6c	22.8f	78.2d	73.8cb	5.8d	63.5e	18.8bc	2.3d	3.3d	7.4cd
		R3	74.0c	32.0c	43.2c	23.1f	80.7d	72.2bc	6.3d	67.8e	19.7b	2.6d	4.1d	8.1cd
	中底墒 Middle SMSp	R0	159.8b	66.9b	41.9c	39.2c	89.5b	58.6d	14.8c	52.4h	22.1a	12.9c	10.8c	19.3b
		R1	160.3b	36.4c	22.7f	28.7e	68.6e	78.8bc	5.0d	20.4k	13.7c	2.7d	2.0d	7.4cd
		R2	161.1b	45.6bc	28.3ef	34.3de	79.3d	75.2bc	6.7d	26.8g	14.7c	4.6d	4.0d	10.1c
		R3	160.9b	53.5bc	33.3e	37.8cd	89.4b	70.7c	9.8cd	36.8i	18.3b	5.9d	5.3d	11.0c
	高底墒 High SMSp	R0	347.4a	245.8a	70.8a	113.5a	89.0b	46.2e	48.7b	75.7d	19.8b	83.6b	49.8b	34.0a
		R1	347.6a	250.0a	71.9a	112.2a	89.9b	44.9e	53.5b	79.6c	21.4ab	84.3b	52.0b	33.7a
		R2	346.5a	258.3a	74.5a	110.6ab	85.7bc	42.8e	56.8ab	88.5ab	22.0a	90.9a	54.6a	35.2a
		R3	348.1a	265.5a	76.3a	108.8b	85.4bc	41.0e	60.5a	93.9a	22.8a	96.2a	58.4a	36.2a

注:*SW* 为有效底墒,*Ac* 为有效底墒供水量,*Rc* 为有效底墒利用率,*Ra* 为不同土层占 0~200 cm 有效底墒供水量的比例。表中小写字母表示不同底墒补灌量处理之间差异显著($P<0.05$)。

Note: *SW* is the available soil moisture storage at planting, *Ac* is the water supply of available SMSp, *Rc* is the utilization rate of available SMSp, and *Ra* is the ratio of different soil layer to total *Ac* in the 0~200 cm layer. Different lowercase letters indicate significant differences between different soil moisture supplementary irrigation treatments ($P<0.05$).

表 5　不同时段有效底墒利用率/%

Table 5　Amount of consumed SWSp at different growth stages

年份 Year	底墒 SMSp	处理 Treatment	播种~抽穗 Sowing to heading				抽穗~成熟 Heading to maturity			
			0~50	50~100	100~200	0~200	0~50	50~100	100~200	0~200
2013 — 2014	低底墒 Low SMSp	R0	83.3a	43.8b	4.8b	32.1b	40.1a	12.4d	0.5c	13.5b
		R1	65.9a	22.0d	3.2b	24.1bc	12.9d	39.6a	0.9c	8.3c
		R2	73.8a	23.6d	3.5c	26.5bc	7.8d	43.8a	1.1c	7.1c
		R3	81.9a	25.0d	3.7c	29.1b	1.8e	45.7a	1.2c	5.7c
	中底墒 Middle SMSp	R0	67.5b	34.1c	5.4b	28.4b	25.1b	21.1d	6.8b	14.2b
		R1	54.8c	18.4d	1.2d	16.9c	17.1c	5.1e	2.1c	7.7c
		R2	68.6b	17.8d	2.9c	16.3c	13.2cd	11.9e	2.5c	13.1bc
		R3	81.0a	16.9d	3.5c	15.4c	11.7d	23.2d	3.0c	15.8b
	高底墒 High SMSp	R0	67.3b	63.2a	40.1a	54.2a	24.9b	14.7d	13.5a	17.9a
		R1	64.6b	67.9a	39.6a	53.7a	29.1b	18.0d	14.1a	20.2a
		R2	62.6b	64.9a	40.6a	52.8a	27.3b	26.6c	16.3a	22.1a
		R3	61.2b	61.3b	42.7a	52.8a	25.8b	36.2ab	18.5a	24.3a
2014 — 2015	低底墒 Low SMSp	R0	86.9a	45.9b	5.1b	35.5b	42.5a	13.5d	0.7c	14.9b
		R1	64.9a	20.0d	3.9b	24.9bc	15.7d	42.5a	1.1c	9.5c
		R2	74.8a	25.3d	3.6c	28.5bc	8.8d	46.9a	1.3c	8.5bc
		R3	83.2a	28.0d	3.9c	30.8b	2.0e	48.1a	1.5c	5.9c
	中底墒 Middle SMSp	R0	63.2b	35.1c	5.2b	29.6b	20.9b	23.5b	5.5b	13.0b
		R1	57.5c	21.7d	1.2d	19.8c	18.2c	8.2e	2.3c	9.8c
		R2	58.6b	11.1d	2.0c	13.1c	14.8cd	10.5e	2.8c	12.5bc
		R3	80.2	27.5d	3.7c	12.5c	10.5d	20.7d	3.9c	14.8b
	高底墒 High SMSp	R0	62.8b	59.6a	38.1a	50.2a	20.2b	11.5d	10.9a	15.6a
		R1	59.2b	59.9a	34.4a	50.4a	19.2b	19.5b	10.8a	15.6a
		R2	56.4b	54.9a	35.9a	54.5a	16.3b	20.6c	14.7a	20.3a
		R3	54.4b	54.8b	35.1a	52.3a	21.6c	27.2ab	15.5a	16.9a

有效底墒利用率升高,高底墒上层有效底墒利用率降低,且底墒越小其利用率越高。其中,低、中底墒 0~50 cm 土层高量补灌(R3)比中量补灌(R2)有效底墒利用率分别增加 11.1%和 26.7% ($P<0.05$),中量补灌(R2)比低量补灌(R1)有效底墒利用率分别增加 13.6%和 13.3%($P<0.05$);高底墒 0~50 cm 土层高量补灌(R3)比中量补灌(R2)有效底墒利用率减少 2.9%,中量补灌(R2)比低量补灌(R1)有效底墒利用率减少 3.6%。

从抽穗到成熟期在不补灌处理下,有效底墒供水量因土壤水分不足而明显减少,0~50 cm 有效底墒利用率为 20.2%~42.5%,与底墒变化趋势一致,深层除高底墒处理外均在 6.8%以下,在小麦生长后期只有高底墒处理的小麦仍然可以部分利用 100~200 cm 的底墒。随着补灌量的增加,上层有效底墒利用率降低,中层和下层的有效底墒利用率增加,与底墒变化趋势一致;整个土层有效底墒利用率与底墒变化趋势一致。其中,低、中、高底墒 100~200 cm 土层高量补灌(R3)比中量补灌(R2)有效底墒利用率分别增加 12.5%、30.2%、9.7%,中量补灌(R2)比低量补灌(R1)有效底墒利用率分别增加 20.0%、20.5%、24.5%。

2.1.3　冬小麦耗水深度的时空变异　作物的耗水通常来自生长期的补灌量和土壤蓄水量两个方面,二者相辅相成,调节供给。两年研究结果表明,土壤底墒和补灌量显著影响冬小麦土壤耗水深度(图 1)。拔节期前,由于作物群体数量较少,大部分地面裸露,蒸发的主要是土壤蓄水,土壤耗水深度较浅。拔节期补灌后,抽穗期各处理土壤耗水深度差异显著。在不补灌条件下,土壤耗水深度为 100~160 cm 土层;而在补灌条件下,土壤耗水深度较浅。补灌量越大,土壤耗水深度越浅。抽穗期补灌后,灌浆中期各处理土壤耗水深度差异显著。在不补充水分的情况下,土壤耗水深度没有大的变化,土壤水分利用率进一步提高。由于前期供水,补灌处理产生了较大的作物群体。为了满足作物对水分、根系深部渗透、耗水深度的要求,补灌比不补灌的耗水深度加深。灌浆期补灌后,到成熟期土壤耗水深度继续增加,而低底墒的耗水深度变浅。中、高底墒播种期和收获期土壤体积含水量之间从上到下直到 200 cm 深的间距均较大,各层均有水分消耗,低底墒处理播前和收获期土壤体积含水量之间从上到下直到 70 cm 土层有较大间距,在 70 cm 以下到 200 cm 间距很小,有些层次甚至重合,水分消耗很少。因此,高、中底墒的供水层深度在 200 cm 以下,低底墒的供水层厚度仅在 200 cm 以内,且 70 cm 以下层次供水量很少。

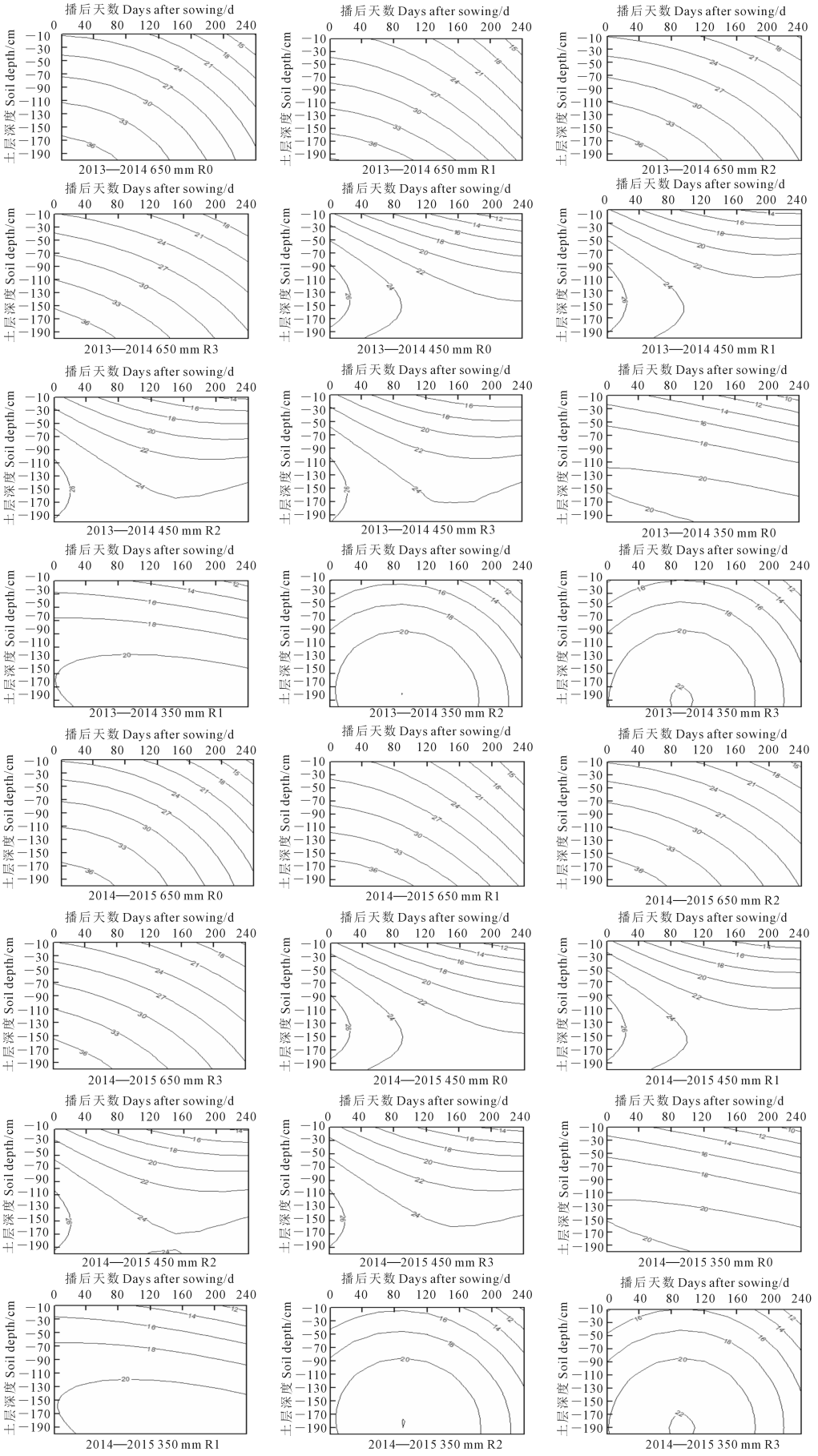


图 1 冬小麦播种至成熟期土壤体积含水量(%)时空变化图

Fig.1 Dynamic changes of soil volume water content(%) from sowing to maturity

2.2　底墒和补灌量对冬小麦产量及产量构成的影响

由表 6 可知,两年结果表明,不同底墒和补灌量处理下小麦产量及产量构成存在显著性差异,交互作用差异不显著,底墒处理产量、穗数、穗粒数大小顺序为高底墒>中底墒>低底墒,千粒重大小顺序为高底墒>低底墒>中底墒。底墒对冬小麦产量的影响效应十分明显。在不补灌条件下,中底墒产量、穗数、穗粒数较低底墒处理分别增加 815.4%、251.0%、10.44 粒,高底墒产量、穗数、穗粒数较中底墒处理分别增加 252.1%、72.5%、19.34 粒,低、中底墒处理的千粒重基本一致,高底墒千粒重较中、低底墒处理分别增加 12.24%和 10.2%。在不同补灌条件下,无论是低底墒、中底墒还是高底墒,随补灌量的增加,产量及产量构成因素均随之增大,且底墒越小增加幅度越大,各处理之间产量及产量构成因素差异不显著。而且,增幅随着补灌的增多而增加。低底墒产量、穗数、穗粒数和千粒重的增加效应分别较中底墒提高 70.9%~108.5%、86.0%~125.9%、0.02~0.12 粒、0.6%~2.3%,中底墒处理的增加效应分别较高底墒提升 57.4%~66.0%、4.3%~11.9%、0.32~0.91 粒、4.3%~4.8%。在底墒不足情况下,增加补灌量可在一定程度上减少由于墒情不足引起的产量及其构成的损失,但底墒仍是决定产量及其构成的主导因素,生育期补灌不能克服底墒不足所造成的影响。低底墒补灌处理下产量、穗数、穗粒数分别较中底墒不补灌的减少 35.4%~58.9%、28.0%~44.1%、7.8~9.4 粒,中底墒补灌处理分别较高底墒不补灌的减少 57.3%~66.9%、26.3%~35.9%、16.8~18.4 粒。

2.3　底墒和补灌量对冬小麦水分利用效率的影响

从表 6 可知,两年结果表明,在不补灌条件下,高底墒较中底墒处理水分利用效率降低 3.8%,中底墒较低底墒处理水分利用效率提高 438.2%。随补

表 6　各处理冬小麦产量、产量构成和水分利用效率

Table 6　Yield, yield composition and *WUE* of winter wheat in each treatment

年份 Year	项目 Item	处理 Treatment	穗数 Ear number /(10^6 · hm^{-2})	穗粒数 Kernel number	千粒重/g 1000 weights	产量 Grain yield /(kg · hm^{-2})	水分利用效率 *WUE* /(kg · hm^{-2} · mm^{-1})
2013—2014	低底墒 Low SMSp	R0	0.55f	8.74e	36.42gh	156.3c	3.3c
		R1	1.10d	9.45de	38.99cd	549.5gh	5.8c
		R2	1.16d	10.35de	39.59cd	650.0gh	5.9c
		R3	1.40d	11.33d	41.07abc	802.9fg	6.0c
	中底墒 Middle SMSp	R0	2.04d	18.91c	35.77g	1160.0ef	18.5a
		R1	2.32cd	19.57bc	38.13de	1304.1e	14.4b
		R2	2.48cd	21.08b	38.39de	1571.0de	14.2b
		R3	2.60c	21.46b	38.97de	1866.0d	14.1b
	高底墒 High SMSp	R0	3.31b	37.94a	39.94bc	4453.3c	17.1ab
		R1	3.66ab	38.57a	40.53abc	4772.3bc	14.7b
		R2	3.95a	39.29a	41.79ab	4975.2ab	14.6b
		R3	4.08a	39.82a	42.01a	5333.9a	14.3b
	F 值	SWSp	323.2**	2383.9**	21.8**	1803.4**	249.3**
		R	5.4**	7.7**	8.3**	22.3**	6.5**
		SWSp× R	1.8	0.1	0.6	0.2	8.0**
2014—2015	低底墒 Low SMSp	R0	0.51e	6.19c	35.66cd	116.9i	3.5d
		R1	0.98d	7.53c	37.17bc	479.9h	5.7cd
		R2	1.08d	8.02c	38.01b	616.7h	5.8cd
		R3	1.29cd	8.90c	38.78b	811.9g	5.9cd
	中底墒 Middle SMSp	R0	1.68c	16.89b	35.00d	1341.1f	18.0a
		R1	1.78bc	18.05b	36.25cd	1612.1e	13.9ab
		R2	1.92b	18.13b	37.05bc	1668.1e	12.0b
		R3	2.12b	19.47b	37.78bc	1894.3d	10.3bc
	高底墒 High SMSp	R0	3.08b	36.55a	39.49a	4352.0c	18.1a
		R1	3.12a	37.10a	39.57a	4503.3c	15.1ab
		R2	3.17a	37.49a	39.74a	4737.8b	14.7ab
		R3	3.28a	37.95a	40.29a	4910.3a	14.5ab
	F 值	SWSp	315.6**	2353.7**	20.8**	1759.3**	205.6**
		R	5.0**	7.2**	7.9**	20.9**	6.2**
		SWSp× R	1.6	0.1	0.3	0.1	7.9**

注:** 表示在 $P<0.01$ 水平上差异显著,* 表示在 $P<0.05$ 水平上差异显著。R 为补灌量。

Note: ** and * indicate that the correlation is significant at $P<0.01$ and $P<0.05$, respectively. R is supplementary irrigation.

灌量增加,低底墒处理水分利用效率增大,中、高底墒处理籽粒产量水平上的水分利用效率减小,且水分利用效率的增加量减小。低底墒高量补灌(R3)处理的水分利用效率最高,中、高底墒不补灌(R0)处理的水分利用效率最高,比低量补灌(R1)处理分别提高 16.9%($P<0.05$)和 18.1%,比中量补灌(R2)处理提高1.7%。中底墒补灌处理比低底墒水分利用效率提高 77.6%~148.3%,高底墒补灌处理比中底墒水分利用效率分别提高 1.4%~40.8%。

2.4 土壤有效底墒供水量对冬小麦产量的影响

利用土壤有效底墒供水量与籽粒产量进行相关分析,得到方程为:

2013—2014 年:

$$Y=0.0351Ac^2+27.7792Ac+88.8553 \quad (R^2=0.9332)$$

2014—2015 年:

$$Y=0.0431Ac^2+29.4653Ac+81.0981 \quad (R^2=0.9275)$$

式中,Y 为籽粒产量,kg · hm^{-2};Ac 为土壤有效底墒供水量,mm。经检验,其信度水平达到 0.01。两者呈显著的抛物线关系(图 2),土壤有效底墒供水量在 0~300 mm 范围内,随着底墒供水量的增加产量呈明显增加趋势。

3 讨论与结论

研究表明,播种前土壤有效水的多少直接影响小麦的出苗与生长状况,能够弥补春季的水分不足而形成较好的产量[21-24],这与本试验结果一致。多数研究指出,改善水分条件可以协调产量构成因素,提高产量[5,25-26]。本研究结果亦表明,随着补灌量的增加,冬小麦产量及其构成呈增加趋势,且底墒越小产量及其构成增加效应越大,这与前人的研究结论一致。在低底墒条件下,没有灌溉和降水补给,底墒能够提供大约 43 mm 的水分,并且保持到抽穗,其冬小麦产量仅为 136.6 kg · hm^{-2}。

雨养农业条件下,天然降水是农田土壤水分的唯一来源,降水年型不同,则农田土壤贮水状况及土壤供水性能明显不同,作物农田土壤贮水利用程度也不同。其干旱年各层次土壤贮水的利用程度明显高于湿润年;冬小麦土壤耗水深度无论干旱年还是湿润年都在 1 m 土层以下。无论干旱年还是正常年,冬小麦生育期内均存在较严重的土壤水分亏缺[27],这与本研究结论一致。相关研究认为:限量供水提高了作物对底墒尤其是对 1~2 m 深层底墒的利用[28-31]。本研究结果亦表明,随着补灌量的增加,高、中、低底墒全生育期 0~200 cm 土层总供水量和有效底墒利用率增加。无论底墒高低,土壤浅层(0~50 cm)供水量比其他深层供水量显著偏多,均占整层供水量 40.7% 以上;随着底墒的增加,浅层供水量比例减少,深层供水量比例增加。50 cm 以下土层供水量显著减少,各层仅占 4.6%~36.3%,说明深层底墒利用尚有很大潜力。中、低底墒处理 100 cm 以下土层的有效底墒利用率均在 5.4% 以下,说明深层底墒几乎没有被冬小麦所利用。

研究认为,底墒充足或比较充足时有利于作物利用土壤储蓄的水分;当底墒较差时,增加灌水量才能提高植株利用土壤水分的能力和效率[8,30,32],这与本研究结论相一致。本研究亦表明,冬小麦营养生长阶段浅层耗水量大于生殖阶段,但深层耗水量正好相反,随着冬小麦生育期的推进,尤其在生殖生长阶段,深层土壤贮水量发挥了积极的“补偿作用”。随补灌量的增加,土壤贮水利用率呈上升趋势。因而在干旱半干旱地区冬小麦生产管理中,播种时重视灌足底墒水,增加土壤蓄水量,特别是深层蓄水,可减少春季灌水次数和灌水量,是推行农业节水灌溉,节约农业水资源,量水生产的有效措施。

本试验条件下,作物产量与土壤底墒供水量之间并不呈简单的线性关系,而是呈明显的非线性关系,其原因有待进一步研究。

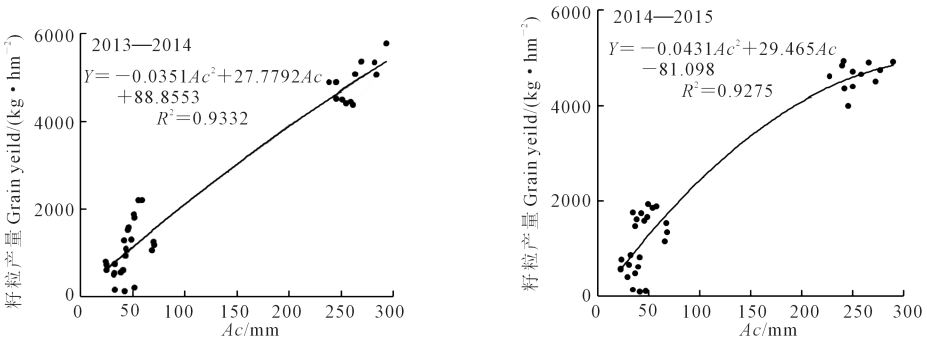


图 2 籽粒产量与土壤有效底墒供水量的关系

Fig.2 Relationship between grain yield and *Ac*

土壤深层蓄水有利于小麦增产。应足墒播种,适水种植,量水生产。如底墒不足,必须补灌。

参 考 文 献:

[1] ANGUS J F, NIX H A, RUSSELL J S, et al. Water use,growth and yield of wheat in a subtropical environment[J]. Australian Journal of Agricultural Research, 1980, 31: 873-886.

[2] 邓振镛,张强,王强,等.黄土高原旱塬区土壤贮水量对冬小麦产量的影响[J].生态学报,2011,31(18):5281-5290.
DENG Z Y, ZHANG Q, WANG Q, et al. Influence of water storage capacity on yield of winter wheat in dry farming area in the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(18): 5281-5290.

[3] 李超,刘文兆,林文,等.黄土塬区冬小麦产量及水分利用效率对播前底墒变化与生育期差别供水的响应[J].中国农业科学,2017,50(18):3549-3560.
LI C, LIU W Z, LIN W, et al. Grain yield and wue responses to different soil water storage before sowing and water supplies during growing period for winter wheat in the loess tableland[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(18): 3549-3560.

[4] 吕军杰,张洁,丁志强,等.豫西旱地小麦-玉米种植模式下农田水分供应及水分利用效率研究[J].作物研究,2020,34(3):248-252.
LV J J, ZHANG J, DING Z Q, et al. Study on water supply and water use efficiency under wheat-maize cropping pattern in dry-land of western Henan province[J]. Crop Research, 2020, 34(3): 248-252.

[5] 罗俊杰,王勇,樊廷录.旱地不同生态型冬小麦水分利用效率对播前底墒的响应[J].干旱地区农业研究,2010,28(1):61-65,71.
LUO J J, WANG Y, FAN T L. Effect of winter wheat yield and WUE with different soil water before sowing in semi-arid areas[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2010, 28(1): 61-65, 71.

[6] NIELSEN D C, VIGIL M F, ANDERSON R L, et al. Cropping system influence on planting water content and yield of winter wheat[J]. Agronomy Journal, 2002, 94(5):962-967.

[7] 蒲金涌,姚小英,贾海源,等.甘肃陇西黄土高原旱作区土壤水分变化规律及有效利用程度研究[J].土壤通报,2005,36(4):483-486.
PU J Y, YAO X Y, JIA H Y, et al.Variation and effective utilization of soil water in Longxi loessial tableland Gansu Province[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2005, 36(4): 483-486.

[8] 任三学,赵花荣,郭安红,等.底墒对冬小麦植株生长及产量的影响[J].麦类作物学报,2005, 25(4):79-85.
REN S X, ZHAO H R, GUO A H, et al. Impact of available soil water at planting on plant growth and yield of winter wheat[J]. Journal of Triticeae Crops, 2005, 25(4): 79-85.

[9] 杨占平,杨稚娟,薛毅芳,等.原状土柱模拟不同降水年型条件下冬小麦、夏谷子耗水量研究[J].河南农业科学,2011,40(9):58-61.
YANG Z P, YANG Z J, XUE Y F, et al. Study on water consumption of winter wheat and summer millet using undisturbed soil columns under different precipitation years[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2011, 40(9): 58-61.

[10] 邵鹏.沂南县冬小麦不同灌水模式的生长性状与产量差异[J].农技服务,2020,37(4):21-22.
SHAO P. Differences of winter wheat growth characters and yield under different irrigation patterns in Yinan county[J]. Agricultural Technology Service, 2020, 37(4): 21-22.

[11] MUSICK J T, JONES O R, STEWART B A, et al. Water-yield relationships for irrigated and dryland wheat in the U.S. southern plains [J]. Agronomy Journal, 1994, 86(6): 980-986.

[12] NORWOOD C A. Dryland winter wheat as affected by previous crops [J]. Agronomy Journal, 2000, 92(1): 121-127.

[13] SCHILLINGER W F, SCHOFSTOLL S E, ALLDREDGE J R. Available water and wheat grain yield relations in a Mediterranean climate [J]. Field Crops Research, 2008, 109(1/3): 45-49.

[14] REGMI A P, LADHA J K, PATHAK H, et al. Yield and soil fertility trends in a 20-year rice-rice-wheat experiment in Nepal[J]. Soil Science Society of America Journal, 2002, 66(3): 857-867.

[15] ANSQ, LIUGS, GUOAH. Consumption of available soil water stored at planting by winter wheat[J]. Agricultural Water Management, 2003, 63(2): 99-107.

[16] 李玉山,喻宝屏.土壤深层储水对小麦产量效应的研究[J].土壤学报,1980,(1):43-54.
LI Y S, YU B B.The effect of water storage in deep soil layer on the growth and yield of wheat plant[J]. Acta Pedologica Sinica, 1980, (1): 43-54.

[17] 黄玲,高阳,邱新强,等.灌水量和时期对不同品种冬小麦产量和耗水特性的影响[J].农业工程学报,2013,29(14):99-108.
HUANG L, GAO Y, QIU X Q, et al. Effects of irrigation amount and stage on yield and water consumption of different winter wheat cultivars[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(14): 99-108.

[18] LV L H, WANG H J, JIA X L, et al. Analysis on water requirement and water-saving amount of wheat and corn in typical regions of the North China Plain[J]. Frontiers of Agriculture in China, 2011, 5(4): 556-562.

[19] CHATTARAJ S, CHAKRABORTY D, GARG R N, et al. Hyperspectral remote sensing for growth-stage-specific water use in wheat[J]. Field Crops Research, 2013, 144: 179-191.

[20] SEPASKHAH A R, TAFTEH A. Yield and nitrogen leaching in rapeseed field under different nitrogen rates and water saving irrigation [J]. Agricultural Water Management, 2012, 112: 55-62.

[21] LI F M, SONG Q H, LIU H S, et al. Effects of pre-sowing irrigation and phosphorus application on water use and yield of spring wheat under semi-arid conditions [J]. Agricultural Water Management, 2001, 49(3): 173-183.

[22] SADRAS V. Interaction between rainfall and nitrogen fertilisation of wheat in environments prone to terminal drought: economic and environmental risk analysis[J]. Field Crops Research, 2002, 77(2/3): 201-215.

[23] 史国安,魏良友,陈明灿,等.模拟不同降水类型旱地冬小麦产量性状的通径分析[J].干旱地区农业研究,2000,18(3):64-69.
SHI G A, WEI L Y, CHEN M C, et al. A path anlysis of relative yield characters of winter wheat in dryland under simulated rainfall conditions[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2000, 18(3): 64-69.

[24] 崔亚强,朱元骏.黄土塬区降水变化条件下冬小麦田土壤水分消耗与补给[J].干旱地区农业研究,2018,36(4):158-164.
CUI Y Q, ZHU Y J. Soil moisture consumption and replenishment in winter wheat land under the conditions of precipitation change in loess plateau[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2018, 36(4): 158-164.

[25] FERNANDES-SILVA A A, FERREIRA T C, CORREIA C M, et al. Influence of different irrigation regimes on crop yield and water use efficiency of olive[J]. Plant and Soil, 2010, 333(1): 35-47.

[26] LIU H J, YU L P, LUO Y, et al. Responses of winter wheat(*Triticumaestivum* L.)evapotranspiration and yield to sprinkler irrigation regimes[J]. Agricultural Water Management, 2011, 98(4): 483-492.

[27] 李锋瑞,高崇岳.陇东黄土旱塬区几种作物田间耗水量及土壤水分亏缺分异特征[J].应用与环境生物学报,1996,(3):259-267.
LI F R, GAO C Y.Variation characteristics of field water consumption and soil water deficit for some crops growing on the rainfed loess plateau of eastern Gansu[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 1996,(3): 259-267.

[28] ANGADI S V, ENTZ M H. Root system and water use patterns of different height sunflower cultivars[J]. Agronomy Journal, 2002, 94(1): 136-145.

[29] OWEIS T, ZHANG H P, PALA M. Water use efficiency of rainfed and irrigated bread wheat in a Mediterranean environment[J]. Agronomy Journal, 2000, 92(2): 231-238.

[30] SUN H Y, LIU C M, ZHANG X Y, et al. Effects of irrigation on water balance, yield and WUE of winter wheat in the North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2006, 85(1/2): 211-218.

[31] ZHANG X Y, CHEN S Y, SUN H Y, et al. Water use efficiency and associated traits in winter wheat cultivars in the North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(8): 1117-1125.

[32] LI W L, LI W D, LI Z Z. Irrigation and fertilizer effects on water use and yield of spring wheat in semi-arid regions[J]. Agricultural Water Management, 2004, 67(1): 35-46.

(上接第 58 页)

[34] 杜艳伟,赵晋锋,王高鸿,等.密度与行距配置对春谷子农艺性状及产量的影响[J].山西农业科学,2019,47(1):49-52.
DU Y W, ZHAO J F, WANG G H, et al. Effects of different density and row spacing on agronomic traits and yield of spring millet[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2019, 47(1): 49-52.

[35] YANG Y S, XU W J, HOU P, et al. Improving maize grain yield by matching maize growth and solar radiation[J]. Scientific Reports, 2019, 9(1): 3635.

[36] 金容,李钟,杨云,等.密度和株行距配置对川中丘区夏玉米群体光分布及雌雄穗分化的影响[J].作物学报,2020,46(4):614-630.
JIN R, LI Z, YANG Y, et al. Effects of density and row spacing on population light distribution and male and female spike differentiation of summer maize in hilly area of central Sichuan[J]. Acta Agronomica Sinica, 2020, 46(4): 614-630.

[37] 辛宗绪,赵术伟,孔凡信,等.不同种植方式对高粱生长发育及产量的影响[J].中国种业,2014,(6):40-43.
XIN Z X, ZHAO S W, KONG F X, et al. Effects of different plant patterns on growth development and yield in sorghum[J]. China Seed Industry, 2014,(6): 40-43.

[38] 徐娥,景希强,葛超,等.不同种植形式和播种方式对春玉米光合特性及产量的影响[J].玉米科学,2012,20(3):97-100.
XU E, JING X Q, GE C, et al. Effects of different planting patterns and different seeding methods on the photosynthesis capacity and yield of spring maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2012, 20(3): 97-100.

[39] MOHAMMADI G R, GHOBADI M E, SHEIKHEH-POOR S. Phosphate biofertilizer, row spacing and plant density effects on corn (*Zea mays* L.) yield and weed growth[J]. American Journal of Plant Sciences, 2012, 3(4): 425-429.

[40] 杨辉,景希强,葛超,等.不同种植形式与密度对玉米品种丹玉 405 产量及光合特性的影响[J].作物杂志,2015,(3):142-145.
YANG H, JING X Q, GE C, et al. Effects of planting patterns and density on yield and photosynthetic characteristics of Danyu 405[J]. Crops, 2015,(3): 142-145.

[41] 王节之,王根全,郝晓芬,等.适应机械中耕的谷子宽窄行种植模式研究[J].山西农业科学,2012,40(5):462-465,474.
WANG J Z, WANG G Q, HAO X F, et al. Study on planting modes of wide/narrow row space for adapting to mechanical intertillage in millet[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2012, 40(5): 462-465, 474.

[42] 段有厚,李志华,卢峰.配置方式对矮秆糯高粱光合特性及干物质生产影响[J].山西农业大学学报(自然科学版),2020,40(3):54-61.
DUAN Y H, LI Z H, LU F. Effect of different field configuration methods on photosynthetic characteristics and dry matter accumulation of dwarf glutinous sorghum[J]. Journal of Shanxi Agricultural University(Natural Science Edition), 2020, 40(3): 54-61.

[43] 史磊,王延波,王金艳,等.种植模式对玉米干物质积累、光合特性和产量的影响[J].园艺与种苗,2015,(6):52-54,75.
SHI L, WANG Y B, WANG J Y, et al. Effect of different planting patterns on dry matter accumulation, photosynthetic characters and yield in maize[J]. Horticulture & Seed, 2015,(6): 52-54, 75.