

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.09.033

分期定量春灌一水对麦田蒸散量与产量构成的影响

李晓爽^{1,2} 党红凯² 宋妮¹ 申孝军¹ 马筱建¹ 孙景生¹

(1. 中国农业科学院农田灌溉研究所, 新乡 453003; 2. 河北省农林科学院旱作农业研究所, 衡水 053000)

摘要: 于2013—2017年冬小麦生长季, 选用节水高产小麦品种衡4399, 开展麦田分期定量(75 mm)灌溉(春灌一水, 设置拔节后0 d、拔节后5 d、拔节后10 d、拔节后15 d、拔节后20 d、拔节后30 d灌溉6个处理, 记为AJ0、AJ5、AJ10、AJ15、AJ20、AJ30), 进行单因素试验。结果表明: 不同灌水处理麦田蒸散量范围为361.1~505.8 mm; 随灌水时间推移, 麦田蒸散量呈先增加后减小的趋势, 以AJ15或AJ20最高。扬花前营养器官同化物运转量、运转率及对籽粒贡献率均随灌水时间的推移而呈先增加后减小的变化趋势, 以拔节后5~15 d灌水处理的较高。扬花后输入籽粒的生物产量, 以AJ10和AJ15较高, AJ0最低。各处理小麦扬花后同化物运转量对籽粒的贡献率均高于60%, 是籽粒产量的主要构成部分。小麦籽粒产量范围为6 620.4~8 650.5 kg/hm², 以拔节后5~15 d灌水处理较高。籽粒产量水分利用效率为1.32~2.54 kg/m³, 除2017年外, 以AJ0处理为最优。产量与灌前土壤含水率、土壤供水量及蒸散量正相关。在本研究生产条件下, 小麦拔节后10~15 d灌水, 既能够充分利用土壤蓄水, 也有利于提高产量和水分利用效率。

关键词: 冬小麦; 春灌一水; 农田蒸散量; 产量特征; 水分利用效率

中图分类号: S274.3; S512.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2019)09-0280-10

Effects of Irrigation Once at Different Time on Water Consumption and Dry Matter Production of Winter Wheat in Spring

LI Xiaoshuang^{1,2} DANG Hongkai² SONG Ni¹ SHEN Xiaojun¹ MA Xiaojian¹ SUN Jingsheng¹

(1. Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453003, China

2. Dryland Farming Institute, Hebei Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Hengshui 053000, China)

Abstract: In order to make clear the regulation effects of irrigation timing on water consumption and yield of wheat under limited water supply during spring growing season, a field experiment was conducted in the test station of Dryland Farming Institute, Hebei Academy of Agricultural and Forestry Sciences during 2013 to 2017. Winter wheat cultivar, Heng 4399, was used. The measurements were taken on irrigation timing for six treatments, jointing 0 d (AJ0), 5 d after jointing (AJ5), 10 d after jointing (AJ10), 15 d after jointing (AJ15), 20 d after jointing (AJ20), and 30 d after jointing (AJ30). Irrigation amount was 75 mm. Irrigation was synchronized with topdressing. The results showed that evapotranspiration of different treatments was ranged within 361.1~505.8 mm and grain yield was ranged within 6 620.4~8 650.5 kg/hm². Compared different treatments, with irrigation time delayed, evapotranspiration and yield were increased first and then decreased. The three indicators, transfer amount of dry matter before anthesis, transport rate and contribution rate to grains before anthesis, all increased with lapse of treatment time, and reached the peak between 5 d and 15 d after jointing, and then decreased. Transfer amount of dry matter in vegetative organs after anthesis, AJ10 and AJ15 were higher than other treatments, AJ0 was the lowest. The contribution rate of after-anthesis assimilated to grains was more than 60% and was the main component of grain yield. WUE was ranged within 1.32~2.54 kg/m³ which was affected by both the yield and evapotranspiration. WUE of AJ0 was the best treatment except 2017. Treatments with higher evapotranspiration was also higher in its grain yield. Evapotranspiration and grain yield were positively correlated with soil water supply amount. These results indicated that irrigation between 10 d and 15 d after jointing, could not only sufficiently use soil water storage, but also improve grain yield of wheat.

Key words: winter wheat; irrigated once in spring; water consumption; yield characteristics; water use efficiency

收稿日期: 2019-01-19 修回日期: 2019-05-09

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201503117)和国家自然科学基金项目(51309227)

作者简介: 李晓爽(1980—), 女, 博士生, 河北省农林科学院中级统计师, 主要从事作物高效用水理论, E-mail: lxsh1980@126.com

通信作者: 孙景生(1963—), 男, 研究员, 博士, 主要从事作物高效用水理论与技术研究, E-mail: jshsun623@163.com

0 引言

作为世界性粮食作物,小麦产量与种植面积均居第一^[1]。从全球分布来看,小麦集中分布在北半球欧亚大陆和北美,占总种植面积的90%。世界不同地区由于生产水平与生态环境差异致使小麦水分管理模式截然不同。美国高平原区开展灌溉可提高小麦产量2倍,提高玉米产量10倍,该地区小麦生产以雨养为主^[2]。加拿大春小麦产区,采用秸秆储雪、土地免耕等技术,提高周年水分利用效率,雨养条件下获取稳定产量^[3]。法国小麦主要分布在大西洋沿岸地区,该区属于温带海洋性气候,水分不是产量提高的限制因素^[4]。与其他国家或地区不同,我国雨养农区也种植小麦,但重要小麦产区主要分布在灌区,灌溉是维系小麦高产稳产的主要因素。进一步比较发现,北纬37.5°穿过中国河北平原,与世界著名小麦产区美国堪萨斯州、土耳其地中海沿岸及伊朗北部麦区纬度相近。美国堪萨斯州与土耳其小麦产区既有地表径流又有一定降雨^[5-6];伊朗虽为缺水区,但径流全部为内陆河,高山雪水为小麦生产提供了主要水源^[7]。我国河北平原冬小麦生长季多年平均降水量不足110 mm,雨养条件下籽粒产量不足2 250 kg/hm²^[8]。而该区冬小麦产量达7 500 kg/hm²,需水量约420 mm,降雨不足又无地表径流,高产麦田水分需求的差额由抽取深层地下水补给^[9]。在本地区长期抽取地下水形成了巨大的漏斗群,生态危机严重制约了农业的可持续生产^[10]。

河北平原属于华北平原一部分,具有中国北方半干旱农业生产区的典型特征。受温带季风性气候影响,小麦生长处于长期且稳定的干旱期。在水资源极度匮乏且需确保粮食安全条件下,为缓解小麦栽培用水与水资源短缺的矛盾,学者们围绕区域的生态特点,开展了大量节水技术研究。DENG等^[11]研究指出,小麦不同生育时期对水分亏缺的敏感性不同,其中拔节前后对水分亏缺最为敏感。ZHANG

等^[12]发现,拔节期间适度水分胁迫有助于提高后期根系对深层土壤水肥的吸收,提高水肥利用效率,同时在雨季来临前可腾出库容,提高周年水分利用效率。邱新强等^[13]认为,拔节期间是冬小麦根系生长最旺盛且生长中心逐渐下移的时期,该阶段通过水肥调节对根系调控效果最佳。ZHANG等^[14]认为,在河北平原减少农田灌水条件下,开展小麦节水栽培研究,有助于区域农业生产的可持续发展。但关于本地区大田栽培环境对拔节期间土壤含水率的影响、不同时期灌水对小麦耗水特性的影响及春季限水优化灌溉对群体构建与产量特征的影响缺乏系统研究。为此本文在大田条件下,连续4年于冬小麦需水关键期设置6个灌水时期,研究不同处理对农田水分平衡、冬小麦干物质积累运转及水分利用效率的影响,旨在为实现冬小麦节水丰产、地下水综合治理和农业可持续发展提供理论参考。

1 材料与与方法

1.1 试验区概况

田间试验于2013—2017年连续4个冬小麦生长季,在河北省农林科学院旱作节水试验站(115.72°E, 37.90°N,海拔21.0 m)进行。该站位于河北平原中南部,属于华北冬小麦生长区,具有中国北方半干旱农业生产区的典型特征。常年采用冬小麦-夏玉米一年两熟制。年均日照时数、无霜期、蒸发量、降水量、气温分别为2 509.4 h、188 d、1 785 mm、510 mm、12.8℃^[15]。试验田土质为壤土,0~20 cm耕层土壤养分质量比为:有机质15.68~17.42 g/kg、全氮1.48~1.54 g/kg、速效氮127.24~134.68 mg/kg、速效磷21.95~24.13 mg/kg、速效钾113.68~128.42 mg/kg。该区冬小麦生长季多年平均降水量110 mm^[8],本研究连续4个冬小麦生长季降水量115.7~158.3 mm,与平均降水量相近,具有生产代表性。播前9月与冬小麦生长季逐月降水量见表1。为保证冬小麦足墒播种,每年于9月25日玉米收获前灌水45 mm。播种前土壤体积含水率见表2。

表1 播前9月与冬小麦生育期逐月降水量

Tab. 1 Monthly precipitation in September before sowing and in growing period of winter wheat

年份	月份										全生育期
	9	10	11	12	1(翌年)	2	3	4	5	6	
2016—2017	13.0	40.5	11.9	13.0	0	7.3	7.1	19.6	24.3	62.1	119.2
2015—2016	36.3	28.0	57.6	0	1.0	12.0	0	17.3	20.6	81.1	132.1
2014—2015	53.9	4.3	15.6	0	1.2	9.5	4.5	54.9	64.0	25.2	158.3
2013—2014	34.1	4.4	8.7	0.3	0.5	5.1	0.7	49.6	35.7	26.1	115.7
1957—2012	47.8	24.8	12.6	3.1	2.4	5.9	9.4	13.0	33.5	60.7	

表2 试验地土壤类型与播前土壤含水率
Tab.2 Soil types and moistures before seeding in test area

土壤深度/ cm	土壤类型	土壤容重/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	田间持 水率/%	凋萎 含水率/%	土壤体积含水率/%			
					2013年	2014年	2015年	2016年
0~20	壤土	1.39	37.47	10.58	34.60	32.61	32.14	32.08
20~60	壤土	1.47	35.63	11.35	34.46	34.34	31.11	33.67
60~80	轻壤土	1.50	36.23	12.89	35.37	35.20	32.23	32.87
80~120	壤土	1.45	34.60	12.20	32.58	30.89	34.10	33.15
120~170	轻壤土	1.51	35.10	11.50	34.65	32.52	34.63	34.96
170~190	粘壤土	1.38	35.82	14.33	32.99	32.76	35.28	32.86
190~200	壤土	1.48	35.87	13.67	34.64	33.00	34.10	30.99

1.2 试验设计

选用当地当前大面积推广的节水高产冬小麦品种衡4399,按照常规播种量($225\text{ kg}/\text{hm}^2$)足墒播种。翌年小麦需水关键期设置6个灌水时期处理:拔节后0 d(AJ0)、拔节后5 d(AJ5)、拔节后10 d(AJ10)、拔节后15 d(AJ15)、拔节后20 d(AJ20)、拔节后30 d(AJ30),灌水量75 mm,各处理从播种至收获期间均灌1次水,灌水与追肥同步。每个处理小区面积 40 m^2 ($5\text{ m}\times 8\text{ m}$),3次重复,顺序排列,处理间设置0.5 m宽隔离区。冬小麦夏玉米收获后秸秆全量粉碎还田。整地前底施磷酸二铵 $525\text{ kg}/\text{hm}^2$ 、氯化钾 $150\text{ kg}/\text{hm}^2$ 。春季补水时追施尿素 $375\text{ kg}/\text{hm}^2$ 。折合施用化肥量为N $267\text{ kg}/\text{hm}^2$ 、 P_2O_5 $241.5\text{ kg}/\text{hm}^2$ 、 K_2O $90\text{ kg}/\text{hm}^2$ 。2013—2016年分别于10月10、12、13、15日播种,2014—2017年5月2—5日、5—7日、4—5日、4—7日扬花,6月5、6、12、10日收获。

1.3 相关指标测定和计算

采用土钻取土,干燥法测定土壤含水率,测定时间为播种后与各生育阶段末,灌水或降雨前后加测,同一处理每小区钻取0~200 cm土层土样,每10 cm为一层进行取土。采用水量平衡公式计算作物耗水量

$$E_i = 10 \sum_{i=1}^n \gamma_i H_i (\theta_{i1} - \theta_{i2}) + P + I + G - R - F \quad (1)$$

式中 E_i ——阶段耗水量,mm

i ——土层编号 n ——总土层数

γ_i ——第*i*层土壤干容重, g/cm^3

H_i ——第*i*层土壤厚度,cm

θ_{i1} 、 θ_{i2} ——第*i*层土壤时段初和时段末的含水率(以占干土质量的百分数计算),%

P ——降水量,mm

I ——时段内的灌水量,mm

G ——时段内地下水对作物根系的补给量,mm

R ——时段内测定区域的地表径流量,mm,

试验区地势平坦,无地表径流产生,故 R 为0

F ——时段内根区深层渗漏量,mm

当地下水埋深大于2.5 m时, G 可以不计,本试验的地下水埋深在7 m以下,因此无地下水补给。其中 F 计算方法为灌水(或降水)前200 cm土层内的土壤储水量(mm)加上灌水量(或降水量,mm)再减去田间持水量(mm),如果 F 小于0,说明没有深层渗漏产生,则 F 取值为0。

产量水平的水分利用效率计算公式为

$$WUE = Y/ET_c \quad (2)$$

式中 Y ——籽粒产量(该阶段生物产量), kg/hm^2

ET_c ——小麦生育期间蒸散量,mm

1.4 干物质测定

于扬花期和收获期连取代表性植株20株,作为考察样本。将样本地下部分剪去,按叶片、茎和叶鞘、穗壳、籽粒等器官拆分(除籽粒外,包括茎叶在内的其他器官为营养器官), 105°C 干燥箱杀青30 min后,于 80°C 干燥至质量恒定,冷却后称干质量。与每公顷干物质转移效率相关的计算公式分别为^[17]

$$T_v = W_1 - W_2 \quad (3)$$

$$R_1 = T_v/W_1 \times 100\% \quad (4)$$

$$T_g = W_3 - T_v \quad (5)$$

$$R_2 = T_g/W_3 \times 100\% \quad (6)$$

$$h_i = W_3/(W_2 + W_3) \times 100\% \quad (7)$$

式中 T_v ——扬花前营养器官同化物运转量,kg

T_g ——扬花后同化物输入籽粒量,kg

W_1 ——扬花期营养器官干质量,kg

W_2 ——收获期营养器官干质量,kg

W_3 ——收获期籽粒干质量,kg

R_1 ——扬花前营养器官同化物运转率,%

R_2 ——扬花前同化物对籽粒产量贡献率,%

h_i ——收获指数,%

1.5 数据处理方法

采用Excel 2010和SPSS 19.0软件进行数据处

理和统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同时间水分处理对冬小麦耗水的影响

2.1.1 灌水前与成熟期0~200 cm 土层含水率差异

图1是不同处理灌水前0~200 cm 土层剖面土壤含水率的分布结果。由图1可以看出,同一年份不同处理各土层的土壤含水率不同,0~40 cm 土层较低,40~80 cm 土层较高,100~200 cm 土层较低;同一土层处理间比较,灌水越早含水率越高,特别是100 cm 以下土层,此趋势尤为明显,AJ0、AJ5 与

AJ10 较高,AJ30 最低或较低。受降雨等天气因素影响,同年份不同处理间差异程度不同,2017 年处理间差异较大,2015 年差异较小;各年份同一处理均值比较,AJ30 处理0~200 cm 土层平均含水率最小,为15.61%;其次是AJ20 处理,比AJ30 处理高出18.99%;AJ15 和AJ10 处理土壤含水率相当,比AJ30 高30%以上。AJ0 处理0~200 cm 土层平均含水率最大,和AJ5 处理稍有差异,分别比AJ30 处理高51.12%和45.07%。说明随着灌水时间推迟,0~200 cm 土层含水率越来越少,被作物吸收利用的越多。

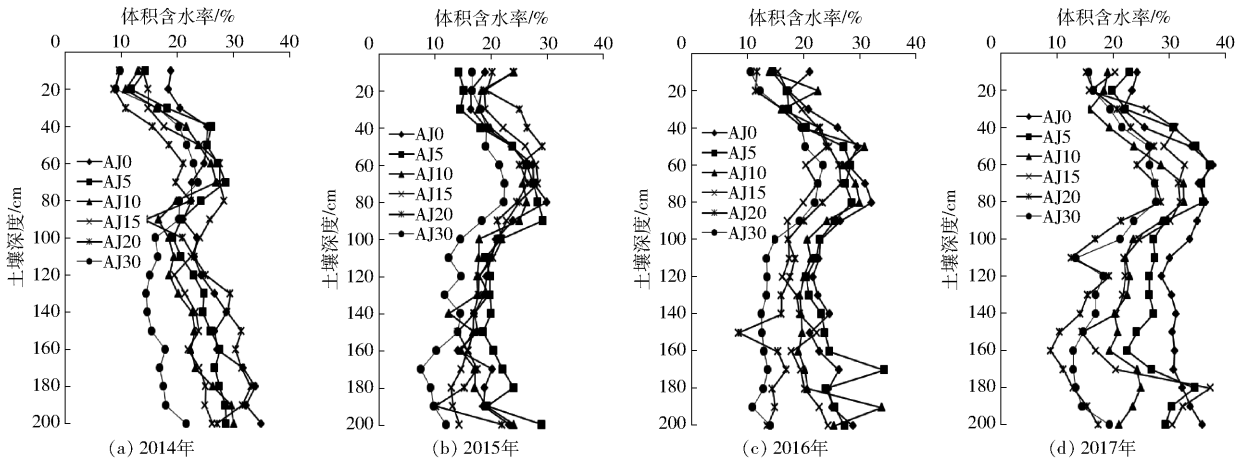


图1 灌水前各处理0~200 cm 土层体积含水率

Fig. 1 Volumetric water content in 0 ~ 200 cm soil profile at each treatment before irrigation in 2014—2017

图2是不同处理收获期0~200 cm 土层剖面土壤含水率的分布结果。由图2可以看出,同一年份不同处理成熟期土壤含水率与灌水前土壤含水率分布相似,但不完全相同。2014、2016、2017 年0~40 cm 与80~120 cm 土层含水率较低,40~80 cm 和120 cm 以下较高;2015 年不同土层土壤含水率差异不具规律。同一土层处理间比较,2014 年和2017 年0~100 cm 土层处理间差异较小,2016 年则以AJ15 处理最低;3 年100 cm 以下处理差异较大,以AJ0 处理

最高,AJ20 和AJ30 最低或较低,只有2015 年处理间差异最小。各年份同一处理均值比较,AJ0 处理0~200 cm 土层平均含水率最大,为24.04%;接下来依次为AJ5、AJ10、AJ30 和AJ15,分别为23.30%、21.54%、20.89%、20.81%;以AJ20 处理0~200 cm 土层平均含水率最小,为20.35%。可见拔节后15~30 d 灌水处理更利于土壤水分的吸收利用。

2.1.2 不同处理冬小麦耗水规律分析

由表3可以看出,各处理耗水量随生育进程而

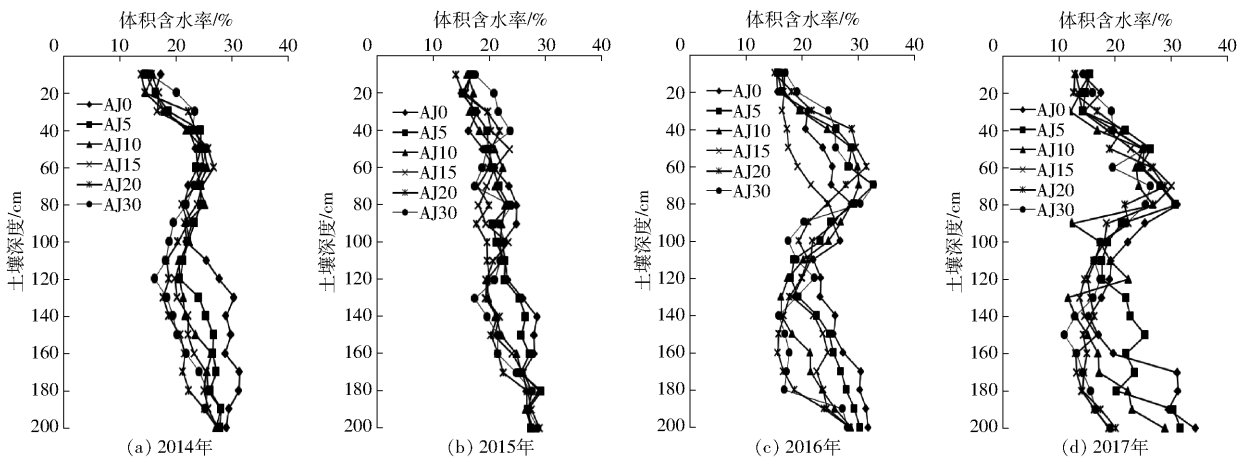


图2 收获期各处理0~200 cm 土层土壤体积含水率

Fig. 2 Volumetric water content in 0 ~ 200 cm soil profile under different treatments at mature stage in 2014—2017

增加,同一年份处理间的差异较大。越冬前各处理耗水量为 71.36 ~ 103.15 mm。拔节后 15 d 耗水量较大,达到 112.97 ~ 205.01 mm。拔节后 15 d 到扬花期耗水量也较大,至扬花期已达 232.82 ~ 310.82 mm。扬花期到成熟期耗水量进入另一快速增长期。总体来看,耗水量以拔节后 15 d 到孕穗期和灌浆期间较高。累积耗水百分率,在越冬前、拔节后 15 d、扬花期和成熟期分别达到总积累量的 16.83% ~ 22.51%、25.13% ~ 48.61%、53.11% ~ 67.68% 和

100%。另外,鉴于 3 年数据重复性较好,文中仅对 2 年数据加以分析,下同。

由表 4 可见,2 年中冬小麦耗水量较高的阶段,都在扬花期到成熟期,其前的拔节期至扬花期的耗水量也较高,播种期-越冬期阶段耗水量较小,越冬期到拔节期最小。同一处理不同年份冬小麦耗水量差异较大,以 2014—2015 年较高;同一年份不同处理冬小麦耗水量差异也较大,以 AJ20 最高,AJ0 与 AJ5 较低。

表 3 各处理耗水量变化和累积耗水百分率

Tab. 3 Change in water consumption and accumulative percentages of evapotranspiration under different treatments (2013—2015)

年份	处理	总耗水量/mm					累积耗水百分率/%				
		越冬前	拔节后 0 d	拔节后 15 d	扬花期	成熟期	越冬前	拔节后 0 d	拔节后 15 d	扬花期	成熟期
2013—2014	AJ0	76.48 ^a	94.45 ^a	179.83 ^b	234.79 ^b	369.93 ^c	20.67 ^a	25.53 ^a	48.61 ^a	63.47 ^a	100 ^a
	AJ5	77.24 ^a	95.90 ^a	191.85 ^a	263.62 ^a	401.74 ^b	19.23 ^a	23.87 ^a	47.75 ^a	65.62 ^a	100 ^a
	AJ10	71.36 ^a	89.22 ^a	152.90 ^c	245.26 ^b	417.12 ^b	17.11 ^b	21.39 ^b	36.66 ^b	58.80 ^{ab}	100 ^a
	AJ15	78.06 ^a	96.23 ^a	118.72 ^d	244.50 ^b	422.97 ^{ab}	18.46 ^{ab}	22.75 ^{ab}	28.07 ^c	57.81 ^b	100 ^a
	AJ20	75.68 ^a	94.32 ^a	112.97 ^d	249.92 ^b	449.58 ^a	16.83 ^b	20.98 ^b	25.13 ^c	55.59 ^b	100 ^a
	AJ30	79.78 ^a	99.07 ^a	115.20 ^d	232.82 ^b	438.41 ^a	18.20 ^b	22.60 ^{ab}	26.28 ^c	53.11 ^b	100 ^a
2014—2015	AJ0	92.33 ^a	111.08 ^a	205.01 ^a	299.83 ^a	432.35 ^c	21.36 ^a	25.69 ^a	47.42 ^a	69.35 ^a	100 ^a
	AJ5	86.78 ^a	104.91 ^a	195.96 ^a	294.62 ^a	440.33 ^c	19.71 ^a	23.83 ^a	44.50 ^a	66.91 ^a	100 ^a
	AJ10	89.06 ^a	107.45 ^a	183.38 ^b	310.82 ^a	459.26 ^b	19.39 ^a	23.40 ^a	39.93 ^{ab}	67.68 ^a	100 ^a
	AJ15	98.94 ^a	118.42 ^a	152.27 ^c	309.44 ^a	467.30 ^b	21.17 ^a	25.34 ^a	32.59 ^b	66.22 ^a	100 ^a
	AJ20	102.87 ^a	122.79 ^a	157.50 ^c	310.23 ^a	482.60 ^a	21.32 ^a	25.44 ^a	32.64 ^b	64.28 ^{ab}	100 ^a
	AJ30	103.15 ^a	123.10 ^a	159.42 ^c	278.34 ^b	458.34 ^b	22.51 ^a	26.86 ^a	34.78 ^b	60.73 ^b	100 ^a

注:同列不同小写字母表示不同处理在 0.05 水平上差异显著,下同。

表 4 2013—2015 年不同处理阶段耗水量和耗水强度

Tab. 4 Water consumption amount and water consumption intensity under different treatments during 2013—2015

年份	处理	播种-越冬		越冬-拔节后 0 d		拔节后 0 d - 拔节后 15 d		拔节后 15 d - 扬花		扬花-成熟		全生育期	
		$E_t/$	$A/$	$E_t/$	$A/$	$E_t/$	$A/$	$E_t/$	$A/$	$E_t/$	$A/$	$E_t/$	$A/$
		mm	(mm·d ⁻¹)	mm	(mm·d ⁻¹)	mm	(mm·d ⁻¹)	mm	(mm·d ⁻¹)	mm	(mm·d ⁻¹)	mm	(mm·d ⁻¹)
2013—2014	AJ0	76.48 ^a	1.37 ^a	17.97 ^a	0.16 ^a	85.38 ^a	5.69 ^a	54.96 ^c	2.62 ^c	135.14 ^c	3.56 ^c	369.93 ^b	1.57 ^b
	AJ5	77.24 ^a	1.38 ^a	18.66 ^a	0.17 ^a	95.95 ^a	6.40 ^a	71.77 ^d	3.42 ^d	138.12 ^c	3.63 ^c	401.74 ^{ab}	1.70 ^{ab}
	AJ10	71.36 ^a	1.27 ^a	17.86 ^a	0.16 ^a	63.68 ^b	4.25 ^b	92.36 ^c	4.40 ^c	171.86 ^b	4.52 ^b	417.12 ^{ab}	1.77 ^{ab}
	AJ15	78.06 ^a	1.39 ^a	18.17 ^a	0.17 ^a	22.49 ^{cd}	1.50 ^c	125.78 ^{ab}	5.99 ^{ab}	178.47 ^b	4.70 ^b	422.97 ^a	1.79 ^a
	AJ20	75.68 ^a	1.35 ^a	18.64 ^a	0.17 ^a	18.65 ^d	1.24 ^c	136.95 ^a	6.52 ^a	199.66 ^a	5.25 ^a	449.58 ^a	1.91 ^a
	AJ30	79.78 ^a	1.42 ^a	19.29 ^a	0.18 ^a	16.13 ^d	1.08 ^c	117.62 ^b	5.60 ^b	205.59 ^a	5.41 ^a	438.41 ^a	1.86 ^a
2014—2015	AJ0	92.33 ^a	1.59 ^a	18.75 ^a	0.17 ^a	93.93 ^a	6.26 ^a	94.82 ^c	4.52 ^c	132.52 ^d	3.68 ^d	432.34 ^a	1.83 ^a
	AJ5	86.78 ^a	1.50 ^a	18.13 ^a	0.16 ^a	91.05 ^a	6.07 ^a	98.66 ^c	4.70 ^c	145.71 ^c	4.05 ^c	440.33 ^b	1.87 ^b
	AJ10	89.06 ^a	1.54 ^a	18.39 ^a	0.17 ^a	75.93 ^b	5.06 ^b	127.44 ^b	6.07 ^b	148.44 ^c	4.12 ^c	459.25 ^{ab}	1.95 ^{ab}
	AJ15	98.94 ^a	1.71 ^a	19.48 ^a	0.18 ^a	33.85 ^c	2.26 ^c	157.17 ^a	7.48 ^a	157.86 ^{bc}	4.39 ^{bc}	467.30 ^a	1.98 ^a
	AJ20	102.87 ^a	1.77 ^a	19.92 ^a	0.18 ^a	34.71 ^c	2.31 ^c	152.73 ^a	7.27 ^a	172.37 ^{ab}	4.79 ^{ab}	482.59 ^a	2.04 ^a
	AJ30	103.15 ^a	1.78 ^a	19.95 ^a	0.18 ^a	36.32 ^c	2.42 ^c	118.92 ^b	5.66 ^b	180.00 ^a	5.00 ^a	458.34 ^{ab}	1.94 ^{ab}

注:A 表示耗水强度。

冬小麦耗水强度变化趋势与阶段耗水量的趋势相似(表 4),最高值出现在水分处理后的拔节期到扬花期,平均每日吸收量最高达到 6.26 mm/d,越冬期-拔节期耗水强度最小,仅为 0.16 ~ 0.18 mm/d。

不同处理之间耗水强度的差异,也与不同处理之间阶段耗水量的差异类似。概括来看,全生育期阶段耗水量和耗水强度都以生育中期灌水处理后(拔节后 15 d 至扬花)最高,生育后期(扬花至成熟)次之,

生育前期(出苗至拔节)最低。

2.2 不同处理对冬小麦干物质积累分配的影响

表5为不同限水处理冬小麦群体成穗数、穗粒数、千粒质量及产量。由表5可见,各年份群体成穗数随灌水时间的推迟变化不同。2014年逐渐减小,其他年份先增加后减小,以AJ10与AJ15最高或较高。穗粒数与产量随处理先增加后降低,总体以AJ30处理最低。千粒质量受处理影响与产量及其他构成因素不同,随处理时间的推迟,先减小后增大,以AJ10处理较低或最低。同处理年际间比较,群体成穗数以2014年最低;穗粒数年际间差异不具规律性;千粒质量以2014年最高,2016年与2017年最低或较低;产量以2015年最高。

表5 2014—2017年不同处理冬小麦产量特征统计

Tab.5 Statistics of population characteristics in winter wheat under different treatments during 2014 to 2017

处理	群体成穗数/(万穗·hm ⁻²)				穗粒数/(粒·穗 ⁻¹)				千粒质量/g				产量/(kg·hm ⁻²)			
	2014年	2015年	2016年	2017年	2014年	2015年	2016年	2017年	2014年	2015年	2016年	2017年	2014年	2015年	2016年	2017年
AJ0	639.4 ^a	679.9 ^{ab}	663.7 ^b	617.3 ^b	32.5 ^{ab}	34.0 ^{ab}	35.9 ^{ab}	33.5 ^{ab}	49.08 ^a	39.89 ^a	35.39 ^a	40.72 ^a	7 600.5 ^a	8 117.1 ^a	7 816.5 ^b	7 506.0 ^b
AJ5	614.7 ^a	698.8 ^{ab}	686.7 ^{ab}	627.5 ^b	33.7 ^{ab}	35.8 ^a	38.6 ^a	34.2 ^a	46.30 ^a	38.72 ^a	34.03 ^a	36.63 ^b	7 883.7 ^a	8 283.8 ^a	8 034.0 ^b	7 706.0 ^b
AJ10	610.4 ^a	728.4 ^{ab}	715.1 ^a	676.3 ^{ab}	36.6 ^a	36.2 ^a	33.3 ^b	35.3 ^a	46.08 ^a	37.04 ^a	31.69 ^a	33.67 ^{bc}	7 367.0 ^a	8 650.5 ^a	8 401.0 ^a	7 884.0 ^b
AJ15	522.5 ^{ab}	800.0 ^a	646.7 ^b	711.0 ^a	31.9 ^b	36.1 ^a	34.7 ^b	34.8 ^a	49.41 ^a	37.03 ^a	32.07 ^a	29.39 ^c	6 986.1 ^{ab}	8 533.8 ^b	7 733.5 ^b	8 170.5 ^a
AJ20	508.5 ^{ab}	769.9 ^a	615.1 ^{bc}	678.8 ^{ab}	30.7 ^b	32.7 ^b	33.6 ^b	32.2 ^{ab}	47.78 ^a	38.53 ^a	35.09 ^a	32.77 ^c	7 000.4 ^{ab}	8 217.2 ^b	7 533.0 ^b	7 684.5 ^b
AJ30	475.8 ^b	575.8 ^b	606.6 ^c	636.5 ^b	31.5 ^b	31.6 ^b	32.1 ^b	30.8 ^b	51.68 ^a	38.91 ^a	37.34 ^a	36.95 ^b	6 620.4 ^b	7 750.5 ^c	6 700.0 ^c	6 645.0 ^c

表6 不同处理对干物质再分配的影响

Tab.6 Effect of different treatments on dry matter translocation of winter wheat from vegetative organs to grain

年份	处理	扬花期	成熟期	扬花前营养	扬花前营养	扬花前同化	扬花后同化	扬花后同化	收获指数/ %
		生物量/ (kg·hm ⁻²)	生物产量/ (kg·hm ⁻²)	器官同化物 运转量/ (kg·hm ⁻²)	器官同化物 运转率/%	物运转量对 籽粒的贡献 率/%	物输入籽 粒量/ (kg·hm ⁻²)	物运转量对 籽粒的贡 献率/%	
2014	AJ0	1.214 × 10 ^{4a}	1.904 × 10 ^{4a}	698.40 ^c	5.75 ^{cd}	9.19 ^c	6 902.1 ^a	90.81 ^b	39.91 ^b
	AJ5	1.138 × 10 ^{4a}	1.816 × 10 ^{4ab}	1 115.90 ^a	9.80 ^b	14.15 ^b	6 767.9 ^a	85.85 ^c	43.42 ^a
	AJ10	1.066 × 10 ^{4a}	1.732 × 10 ^{4b}	699.20 ^c	6.56 ^c	9.49 ^c	6 667.8 ^a	90.51 ^b	42.51 ^{ab}
	AJ15	1.048 × 10 ^{4ab}	1.776 × 10 ^{4b}	1 256.10 ^a	11.99 ^a	17.98 ^a	5 730.0 ^b	82.02 ^c	39.33 ^b
	AJ20	1.090 × 10 ^{4a}	1.620 × 10 ^{4c}	140.90 ^d	1.29 ^d	2.01 ^d	6 859.5 ^a	97.99 ^a	43.19 ^a
	AJ30	9.620 × 10 ^{3b}	1.534 × 10 ^{4d}	889.80 ^b	9.25 ^b	13.44 ^b	5 730.6 ^b	86.56 ^c	43.13 ^a
2015	AJ0	1.275 × 10 ^{4a}	1.948 × 10 ^{4ab}	1 378.35 ^c	10.81 ^{bc}	16.98 ^{bc}	6 738.8 ^a	83.02 ^a	41.67 ^b
	AJ5	1.376 × 10 ^{4b}	1.897 × 10 ^{4b}	3 071.85 ^a	22.33 ^a	37.08 ^a	5 211.9 ^b	62.92 ^b	43.68 ^{ab}
	AJ10	1.492 × 10 ^{4bc}	2.041 × 10 ^{4a}	3 154.95 ^a	21.14 ^a	36.47 ^a	5 495.6 ^b	63.53 ^b	42.38 ^b
	AJ15	1.231 × 10 ^{4bc}	1.915 × 10 ^{4ab}	2 693.55 ^a	21.88 ^a	31.56 ^a	5 840.3 ^b	68.44 ^b	44.56 ^a
	AJ20	1.225 × 10 ^{4bc}	1.883 × 10 ^{4b}	1 631.10 ^c	13.32 ^b	19.85 ^b	6 586.1 ^a	80.15 ^a	43.64 ^{ab}
	AJ30	1.187 × 10 ^{4c}	1.848 × 10 ^{4b}	1 134.45 ^c	9.56 ^c	14.64 ^c	6 616.1 ^a	85.36 ^a	41.94 ^b

2.3 不同处理耗水组成与水分利用效率及相关性

2.3.1 不同处理耗水组成与籽粒水分生产率

由表7可见,农田蒸散量为361.1~505.8 mm。同一年份不同处理间比较,随灌水时间推迟,蒸散量先增加后减小,以AJ15或AJ20处理最高或较高,以AJ0灌水处理较低。同一处理年际间比较,以2014—2015年和2016—2017年蒸散量较高,

由表6可知,扬花前营养器官同化物运转量、运转率及对籽粒贡献率均随灌水时间的推迟先增加后减小,以拔节后5~15 d期间灌水处理较高。同一处理年际间比较,扬花前营养器官同化物转移量、转移率及对籽粒贡献率均以2015年较高。与灌水处理对扬花前营养器官同化物运转量影响不同,扬花后同化物输入籽粒的量与扬花后同化物运转量对籽粒的贡献率,2014年以拔节期—拔节后10 d与拔节后20 d灌水处理较高;2015年以拔节期与拔节后20~30 d灌水处理较高。年际间比较,差异不具规律性。扬花后同化物运转量对籽粒的贡献率各处理均在60%以上,是籽粒产量的主要构成部分。2年收获指数差异不具规律性。

2015—2016年最低。蒸散量由灌溉水量、土壤水量和降水量组成。同一年份不同处理间比较,随灌水时间推迟,蒸散量先增加后减小,土壤供水量变幅为169.4~311.6 mm,与蒸散量变化相同。同一处理年际间比较也以2014—2015年和2016—2017年土壤供水量较高,2015—2016年最低,与蒸散量变化相同。土壤供水量占蒸散量的46.0%~61.6%,同

一年份不同处理间比较,随灌水时间推迟,比例先增加后减小,以 AJ15 或 AJ20 处理最高或较高。农田灌水量为 75 mm,占蒸散量的 14.8%~20.8%,处理间以 AJ0 和 AJ5 占蒸散量的比例较高。降水量变幅为 115.7~158.3 mm,以 2014—2015 年最高,2013—2014 年最低。降水量占蒸散量的比例为 23.5%~36.6%。同一年份,降水量占蒸散量的比例与灌水量所占比例变化相似,以 AJ0 和 AJ5 处理占蒸散量的比例较高。

表 7 2014—2017 年不同处理对耗水组成和籽粒水分利用效率的影响

Tab. 7 Effects of different treatments on water use efficiency of biomass and grain yield during 2014 to 2017

处理	蒸散量/mm				灌溉水量/mm	土壤水量/mm				WUE/(kg·m ⁻³)			
	2014年	2015年	2016年	2017年		2014年	2015年	2016年	2017年	2014年	2015年	2016年	2017年
AJ0	369.9 ^b	432.3 ^a	361.1 ^c	404.6 ^b	75	179.2 ^b	199.0 ^a	169.4 ^c	210.4 ^b	2.54 ^a	1.88 ^a	2.16 ^a	1.86 ^a
AJ5	401.7 ^{ab}	440.3 ^a	371.7 ^{bc}	412.8 ^b	75	211.0 ^{ab}	207.0 ^a	180.0 ^{bc}	218.6 ^b	1.96 ^a	1.88 ^a	2.16 ^a	1.87 ^a
AJ10	417.1 ^{ab}	459.3 ^a	404.3 ^{abc}	487.3 ^a	75	226.4 ^{ab}	226.0 ^a	212.6 ^{abc}	293.1 ^a	1.77 ^a	1.88 ^a	2.08 ^a	1.62 ^{ab}
AJ15	423.0 ^{ab}	467.3 ^a	432.2 ^a	505.8 ^a	75	232.3 ^{ab}	234.0 ^a	240.5 ^a	311.6 ^a	1.65 ^a	1.83 ^{ab}	1.79 ^{ab}	1.62 ^{ab}
AJ20	449.6 ^a	482.6 ^a	427.8 ^a	503.4 ^a	75	258.9 ^a	249.3 ^a	236.1 ^a	309.2 ^a	1.57 ^a	1.70 ^b	1.76 ^{ab}	1.53 ^b
AJ30	438.4 ^a	458.3 ^a	417.5 ^{ab}	504.4 ^a	75	247.7 ^a	225.0 ^a	225.8 ^{ab}	310.2 ^a	1.51 ^a	1.69 ^b	1.60 ^b	1.32 ^b

2.3.2 不同处理灌前土壤含水率与产量构成因素的相关性

由表 8 可见,成穗数与不同处理各土层土壤含水率的相关性因年度不同而不同。除 2017 年各土层土壤含水率与成穗数负相关外,其他年份均呈正相关,其中 2015 年 0~80 cm 达到极显著水平,2015 年 0~160 cm 与 2016 年 0~20 cm、0~200 cm 均达

到显著水平。穗粒数与各土层土壤含水率呈正相关(2015 年 0~40 cm 除外),千粒质量 2014 年与 2015 年负相关,2017 年正相关。穗粒数和千粒质量与各土层土壤含水率相关性较差,均未达到显著水平。产量与各土层土壤含水率正相关,其中 2016 年 0~200 cm 达到显著水平。

表 8 灌前不同土层土壤含水率与产量特征的相关系数

Tab. 8 Correlation coefficient between soil moisture of different soil layers before irrigation and population production characteristics of wheat

土壤深度/cm	成穗数				穗粒数				千粒质量				籽粒产量			
	2014年	2015年	2016年	2017年	2014年	2015年	2016年	2017年	2014年	2015年	2016年	2017年	2014年	2015年	2016年	2017年
0~20	0.711 0	0.664 2	0.821 4*	-0.310 1	0.163 0	0.303 2	0.728 3	0.451 1	-0.049	-0.722	-0.101 0	0.626 3	0.584 0	0.649 2	0.771 1	0.216 1
0~40	0.806 8	0.658 8	0.541 0	-0.022 0	0.340 2	-0.068 0	0.541 0	0.409 0	-0.010	-0.493	0.112 2	0.191 1	0.707 2	0.375 1	0.580 7	0.400 3
0~80	0.728 2	0.919 0**	0.730 2	-0.161 1	0.411 1	0.319 2	0.466 3	0.471 5	-0.182	-0.401	0.252 7	0.360 1	0.696 1	0.643 2	0.734 0	0.357 6
0~160	0.714 2	0.874 0*	0.786 0	-0.240 8	0.077 7	0.577 4	0.600 7	0.508 2	-0.433	-0.189	0.211 1	0.516 2	0.772 7	0.673 4	0.780 7	0.279 2
0~200	0.731 2	0.690 9	0.829 1*	-0.147 9	0.089 4	0.642 0	0.681 4	0.574 1	-0.504	-0.055	0.182 2	0.425 0	0.767 1	0.639 2	0.812 4*	0.356 1

注: * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$ 。

3 讨论

3.1 限水优化灌溉与水分利用效率

本研究条件下,不同处理农田蒸散量为 361.1~505.8 mm,略低于 ZHANG 等^[12]的结果,但高于王红光等^[17]的结果,其原因是本研究为春季限水灌溉 1 次,ZHANG 等^[12]的研究为春季灌水 2~3 次,而王红光等^[17]的研究为旱地小麦。说明随灌水量、灌水次数的增多,冬小麦耗水量有增多的趋势^[16]。本研

究在灌水量相等的条件下,由于灌水时间不同,蒸散量与产量也不同,这与 CHEN 等^[18]的研究结果一致;同一处理不同年份耗水量和产量有一定差异,均以 AJ15 或 AJ20 处理最高或较高,但其 WUE 并不是最高;相比之下,耗水量少的 AJ0 处理,虽然产量低,WUE 却是最高或较高。从农田高効用水评价指标来看,AJ15 或 AJ20 耗水量高,WUE 低;而 AJ0,耗水少,WUE 高,似乎更具高効用水特征。进一步分析发现,耗水量较高的 AJ15 或 AJ20,成熟期 100 cm

以下的深层土壤水含率较低。说明该处理促进了小麦对深层土壤水分的吸收利用^[11]。本区域的气候特点,是冬小麦收获后雨季来临,充足的降水有效补给了深层土壤水分。受降水入渗补给、蒸散等因素影响,当季冬小麦对深层土壤水分利用的差异,在冬季冬小麦播种前已经消除^[9,12]。基于上述诸多因素,产量较高的 AJ15 或 AJ20 水资源利用效率更高。因此,在本研究条件下,用耗水量和 WUE 表述用水效率,既不能衡量水资源的综合利用情况,又不能反映产量水平。在一定产量条件下,冬小麦高效利用土壤水和雨水,减小灌溉水用量,还需在精确设定不同灌水水平下,进行更深入的研究。可见,井灌区小麦生产,通过水肥调控,促进冬小麦对深层土壤水分吸收利用,改善群体结构并提高产量,在此基础上实现 WUE 的提高,才是高效用水的真谛所在。

另外,受降雨年型等因素影响,播前 0~80 cm 浅层土壤含水率年际间有一定差异(变异系数为 1.31%),80 cm 以下深层土层含水率年际间差异较小(变异系数为 0.95%)。进一步分析发现,2013 年播种前 0~80 cm 土层土壤含水率为 34.81%,高于 2015 年(31.83%)和 2016 年(32.87%),2014 年拔节期 1 m 以下深层土壤含水率(24.52%)也高于 2016 年(19.92%)和 2017 年(16.72%)。说明底墒水在保障出苗的基础上,降低了表层土壤含水率,增加了深层土壤含水率,这既能减小地面无效蒸发,又可利用根系趋水肥性,诱导根系下扎,是有效提高作物吸收利用深层土壤水分的一种方法^[19]。2017 年拔节期 AJ0、AJ5、AJ10、AJ15、AJ20 和 AJ15 处理,成熟期 1 m 以下土层含水率分别为 23.45%、23.36%、19.00%、15.16%、15.93% 和 15.30%,说明适期推迟拔节水,也可引导根系下扎并提高其对深层土壤水分的利用^[13,20]。

3.2 产量与降雨年型及栽培环境的关系

2013—2014 年与 2016—2017 年降水量相似,同处理农田蒸散量以 2016—2017 年高。究其原因,2016 年秋季降水量大,提高了土壤蓄水量;2017 年 3—6 月冬小麦生长季日均气温(17.94℃)、日照时数(8.39 h)及日均风速(1.96 m/s)均高于 2013—2014 年(分别为 17.13℃、8.04 h、1.86 m/s),上述两个因素是 2016—2017 年农田蒸散量高的原因^[15]。另外,比较 2017 年与 2016 年 AJ20 处理,降水量与成穗数相近,但 2016 年 3—6 月冬小麦生长季日均气温(17.05℃)、日照时数(8.10 h)及日均风速(1.86 m/s)均低于 2017 年,故 2017 年农田蒸散量(503.4 mm)高于 2016 年(427.8 mm);2014 年与 2015 年气象条件相近,AJ20 处理 2015 年群体成穗

数(769.9 万穗/hm²)高于 2014 年(508.5 万穗/hm²),2015 年农田蒸散量(482.6 mm)高于 2014 年(449.6 mm)。可见,在气象因子差异较大时,蒸散量与栽培年型相关;在天气差异较小时,蒸散量与群体成穗数相关^[16,21]。且降雨年型造成的差异比群体更大。

拔节期根密度以 20~80 cm 最大^[13],4 年土层含水率统计,AJ0、AJ5、AJ10、AJ15、AJ20 与 AJ30 灌水前土壤含水率分别为 23.8%、23.0%、21.7%、22.0%、20.4% 和 19.1%,各处理灌水前 20~80 cm 土层含水率均高于凋萎湿度,说明本研究灌水前土壤水分本底值虽有差异,但对冬小麦生产影响较小。本研究连续 4 年的 AJ0、AJ5、AJ10、AJ15、AJ20 与 AJ30 处理,群体成穗数分别为 650.08、656.93、682.55、677.05、643.08、573.68 万穗/hm²,对冬小麦成穗数的影响不同,但不同土层对小麦生产的相关性不具明显规律。仅从土壤有效水分分析不出灌水前土壤墒情差异对冬小麦生长与产量造成的影响。本研究春季灌水追肥同步,肥水耦合是影响群体成穗数和扬花期生物量的因素之一^[22]。另外,纵观 4 年来扬花期群体与生物产量和成熟期籽粒产量,均以 2015 年最高或较高,从灌水处理上也不能发现原因。本研究 0~20 cm 耕层土壤肥力全氮质量比 1.48~1.54 g/kg,速效磷质量比 21.95~24.13 mg/kg,速效钾质量比 113.68~128.42 mg/kg,高于土壤养分缺乏临界值^[23](全氮质量比 1.0 g/kg,速效磷质量比 10.3 mg/kg,速效钾质量比 67.2 mg/kg)。2015 年 3 月 30 日—4 月 5 日的有效降水过程,实现了雨水与土壤中的养分耦合,利于冬小麦的吸收利用,进而增加了扬花期的生物产量^[24]。而该年 AJ30 扬花期群体和生物产量虽然高于其他年份,但各年处理间比较均以 AJ30 最低。可见,AJ30 主要是追肥过晚,田间肥力不足所致。穗数建成后,2015 年 5 月降雨也较高(64.0 mm),本年高产与上述因素密切相关。综上可见,本区域生产水平下,水分对产量的贡献比肥大^[25];但在关键生育期不能及时补肥,肥力不足时水对高产的调控也会一定程度上减弱^[18,25]。水肥处理还对生育期有一定影响,AJ30 处理扬花期比其他处理提前 1~3 d。

从本研究结果还可以看出,物质生产还受降雨时期的影响。2015 年拔节后 5~10 d(3 月 30 日—4 月 5 日)有一次降雨过程,导致扬花期特别是成熟期 AJ15、AJ20 与 AJ30 处理生物产量差异较小。2014 年降雨集中在拔节后 30 d(4 月 25 日)以后,降雨对生物产量的影响较小,但降低了扬花前营养器官同化物运转量与运转率,最终使其产量较低。可

见,该阶段降水量大或供水充足,不利于花前物质向籽粒中运转^[12]。总体来看,降雨时期不同对群体构建与耗水特征有不同的影响。在本研究条件下,该影响没有改变不同灌水处理对冬小麦产量和水分利用的整体变化趋势。

3.3 限水优化灌溉与墒情苗情互作效应对冬小麦生产的影响

土壤有效水分是土壤所含大于凋萎湿度的水分。本研究连续4年播种时0~80 cm土壤有效水含量均在180 mm以上,而播种-拔节阶段平均耗水量不足180 mm,说明本研究条件下,土壤水可满足小麦在播种-拔节阶段的水分需求^[16]。

2013年冬前积温(441.7℃,其他年份均在480℃以上)低,积温不足导致本年苗期群体较小;与其他年份不同,2013年秋季播种到次年4月25日有效降雨不足20 mm,本年份群体较弱的条件下,起身拔节期及早水肥处理,促进冬小麦早发育,以弥补群体不足,最终提高了扬花期干物质积累量和群体成穗数。水肥处理最晚的AJ30,冬小麦在缺水缺肥双重胁迫下,群体成穗数、扬花期生物产量和籽粒产量历年均最低。进一步比较2014年与2015年物质再分配,2014年群体较小,物质生产不足(扬花期干物质质量比2015年低19.45%),扬花后营养器官同化物转移率小(平均仅占7.44%,2015年为16.50%)。因此2014年早灌水处理,转弱苗为壮苗,提高成穗数,利于产量提高。但苗情较好的2015年,随灌水时间的推移,冬小麦成穗数、扬花后营养器官同化物转移量与转移率变化不具规律,早灌水处理不仅没有提高群体成穗数,还降低了物质生产量,整体表现为随灌水时间的推迟群体成穗数与生物产量先增加后下降。

同一年内群体成穗数最高的处理,其最终产量也较高,2014—2017年群体成穗数最高的处理分别为AJ0(639.4万穗/hm²)、AJ15(800.0万穗/hm²)、AJ10(715.1万穗/hm²)和AJ15(711.0万穗/hm²)。结合灌前不同土层土壤含水率与产量特征的相关性,成穗数和籽粒产量与0~160 cm土层土壤水分

相关性较高。上述各处理灌前0~160 cm土壤含水率依次为23.64%、21.23%、18.21%和22.26%。另外,最高群体成穗数还与起身期群体总茎数有关^[21],2014—2017年起身期群体总茎数分别为749.4、1537.4、1200.3、1183.6万株/hm²。综上可见,起身期群体总茎数不足750万株/hm²,拔节期土壤含水率接近23%时即应及早灌水;土壤含水率高于20%,群体总茎数不低于1100万株/hm²,可适当推迟春季水肥管理,于拔节后15 d补水补肥;起身期群体总茎数1200万株/hm²,土壤含水率接近18%,及时灌水追肥。实际实施过程中,结合当年降水量预报来确定具体灌水日期,有利于产量及水分利用效率提高^[16]。

4 结束语

本研究条件下,不同灌水处理的蒸散量和籽粒产量变化范围分别为361.1~505.8 mm和6620.4~8650.5 kg/hm²。蒸散量与产量随灌水时间推移均表现为先增加后减小的变化趋势。扬花前营养器官同化物运转量、运转率及对籽粒贡献率均随灌水时间的推移先增加后减小,以拔节后5~15 d灌水处理较高。扬花后同化物运转量对籽粒的贡献率各处理均在60%以上,以AJ10和AJ15较高,以AJ0最低。各处理冬小麦的水分利用效率为1.32~2.54 kg/m³,且随灌水时间推移水分利用效率逐渐减小,AJ0处理的水分利用效率最高(除2017年以AJ5最高)。产量与灌前土壤含水率、土壤供水量及蒸散量正相关。拔节后10~15 d的灌水处理,既能充分利用土壤蓄水,又利于冬小麦产量和水分利用效率的提高。结合不同年份返青期群体总茎数,起身期不足750万株/hm²,拔节时土壤含水率接近23%则需要灌水;土壤含水率高于20%,群体总茎数不低于1100万株/hm²,可适当推迟春季水肥管理,于拔节后15 d灌水追肥;起身期群体总茎数为1200万株/hm²,土壤含水率在18%左右,需要及时灌水追肥。实际实施过程中,结合当年降水量预报来确定具体灌水时间,将会更有利于产量及水分利用效率的提高。

参 考 文 献

- [1] ALISON B, JIA P W, DODSON J. The origins of wheat in China and potential pathways for its introduction: a review[J]. *Quaternary International*, 2014, 348: 158-168.
- [2] 裴宏伟,王彦芳,沈彦俊,等. 美国高平原农业发展对地下水资源的影响及启示[J]. *农业现代化研究*, 2016, 37(1): 166-178.
PEI Hongwei, WANG Yanfang, SHEN Yanjun, et al. The impacts and enlightenments of irrigated agriculture on groundwater resources in the U. S. High Plains[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2016, 37(1): 166-178. (in Chinese)
- [3] CUTFORTH H W, McCONKEY B G. Stubble height effects on microclimate, yield and water use efficiency of spring wheat grown in semiarid climate on the Canadian prairies[J]. *Canadian Journal of Plant Science*, 1997, 77(3): 359-366.
- [4] PLAZA-BONILLA D, NOLOT J M, RAFFAILLAC D, et al. Innovative cropping systems to reduce N inputs and maintain wheat

- yields by inserting grain legumes and cover crops in southwestern France[J]. *European Journal of Agronomy*, 2017, 82: 331–341.
- [5] YUKSEL I. Water management for sustainable and clean energy in Turkey[J]. *Energy Reports*, 2015, 1: 137–155.
- [6] ZHANG T, LIN X. Assessing future drought impacts on yields based on historical irrigation reaction to drought for four major crops in Kansas[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 550: 851–860.
- [7] OSTAD-ALI-ASKARI K, SHAYANNEIAD M. Study of sensitivity of autumnal wheat to under irrigation in Shahrekord, Shahrekord City, Iran[J]. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*, 2015, 8(4): 602–605.
- [8] QIN W, WANG D Z, GUO X S, et al. Productivity and sustainability of rainfed wheat-soybean system in the North China Plain: results from a long-term experiment and crop modeling[J]. *Scientific Reports*, 2015. DOI:10.1038/srep17514.
- [9] 杜雄, 张永升, 王磊, 等. 不同种植制度与土下微膜覆盖的小麦玉米水分利用效果[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(3): 226–234.
- DU Xiong, ZHANG Yongsheng, WANG Lei, et al. Yield and water use efficiency of maize and wheat under two different cropping systems and soil-coated ultra-thin plastic-film mulching[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(3): 226–234. (in Chinese)
- [10] XIE H L, CHEN L J, LY T G. Factors influencing farmer willingness to fallow winter wheat and ecological compensation standards in a groundwater Funnel Area in Hengshui, Hebei Province, China[J]. *Sustainability*, 2017, 9(5): 2–18.
- [11] DENG X P, SHAN L, ZHANG H P, et al. Improving agricultural water use efficiency in arid and semiarid areas of China[J]. *Agricultural Water Management*, 2006, 80(1–3): 23–40.
- [12] ZHANG X Y, PEI D, CHEN S Y, et al. Performance of double-cropped winter wheat-summer maize under minimum irrigation in the North China Plain[J]. *Agronomy Journal*, 2006, 98(6): 1620–1626.
- [13] 邱新强, 高阳, 黄玲, 等. 冬小麦根系形态性状及分布[J]. *中国农业科学*, 2013, 46(11): 2211–2219.
- QIU Xinqiang, GAO Yang, HUANG Ling, et al. Temporal and spatial distribution of root morphology of winter wheat[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(11): 2211–2219. (in Chinese)
- [14] ZHANG H L, ZHAO X, YIN X G, et al. Challenges and adaptations of farming to climate change in the North China Plain [J]. *Climatic Change*, 2015, 129(1–2): 213–224.
- [15] 党红凯, 李伟, 曹彩云, 等. 乳熟后灌溉对夏玉米水分利用效率及干物质转运的影响[J/OL]. *农业机械学报*, 2014, 45(5): 131–138.
- DANG Hongkai, LI Wei, CAO Caiyun, et al. Effect of late milk irrigation on water use efficiency and dry matter distribution of maize [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(5):131–138. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140521&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.05.021. (in Chinese)
- [16] SHAO L W, ZHANG X Y, CHEN S Y, et al. Effects of irrigation frequency under limited irrigation on root water uptake, yield and water use efficiency of winter wheat[J]. *Irrigation and Drainage*, 2009, 58(4): 393–405.
- [17] 王红光, 于振文, 张永丽, 等. 推迟拔节水及其灌水量对小麦耗水量和耗水来源及农田蒸散量的影响[J]. *作物学报*, 2010, 36(7): 1183–1191.
- WANG Hongguang, YU Zhenwen, ZHANG Yongli, et al. Effects of delayed irrigation at jointing stage and irrigation level on consumption amount and resources of water in wheat and farmland evapotranspiration[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2010, 36(7): 1183–1191. (in Chinese)
- [18] CHEN S F, SUN C C, WU W L, et al. Water leakage and nitrate leaching characteristics in the winter wheat-summer maize rotation system in the North China Plain under different irrigation and fertilization management practices[J]. *Water*, 2017, 9(2): 141–154.
- [19] SANG X G, WANG D, LIN X. Effects of tillage practices on water consumption characteristics and grain yield of winter wheat under different soil moisture conditions[J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 163: 185–194.
- [20] LI Q, DONG B, QIAO Y, et al. Root growth, available soil water, and water-use efficiency of winter wheat under different irrigation regimes applied at different growth stages in North China[J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(10): 1676–1682.
- [21] CLARK G A, SMAJSTRLA A G, ZAZUETA F S. Atmospheric parameters which affect evapotranspiration[M]. Florida: University of Florida, 1989: 1–6.
- [22] RODRIGUEZ J A, WEATHERHEAD E K, KNOX J W, et al. Climate change impacts on irrigation water requirements in the Guadalquivir river basin in Spain[J]. *Regional Environmental Change*, 2007, 7(3): 149–159.
- [23] 胡承霖. 安徽麦作学[M]. 合肥: 安徽科学技术出版社, 2009: 130–134.
- [24] 白珊珊, 万书勤, 康跃虎. 华北平原滴管施肥灌溉对冬小麦生长与耗水的影响[J/OL]. *农业机械学报*, 2018, 49(2): 269–276.
- BAI Shanshan, WAN Shuqin, KANG Yuehu. Effects of drip fertigation on winter wheat growth and water use in North China Plain[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(2):269–276. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180234&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.02.034. (in Chinese)
- [25] DUAN W, SHI Y, ZHAO J, et al. Depth of nitrogen fertiliser placement affects nitrogen accumulation, translocation and nitrate-nitrogen content in soil of rainfed wheat[J]. *International Journal of Plant Production*, 2015, 9(2): 237–256.