

# 畦田节灌对冬小麦光合特性、产量和水分利用效率的影响

吴宝建, 王东\*

(山东农业大学农学院/作物生物学国家重点实验室/  
农业部作物生理生态与耕作重点实验室, 山东泰安271018)

**摘要:**【目的】充分利用土壤贮水和自然降水,减少灌溉水投入,研究依据自然供水状况确定最佳畦灌时期和次数的畦田节灌技术。【方法】试验在播种期水分管理一致的基础上,设置4个水分处理,W0为不灌水处理,W1为灌3水处理(越冬水+拔节水+开花水),W2为灌2水处理(拔节水+开花水),W3为灌1水处理(开花水),研究了畦田节灌对冬小麦开花后旗叶SPAD值、光合特性、产量及水分利用效率的影响。【结果】与W2处理相比,W3处理开花后旗叶SPAD值、净光合速率、干物质同化量及其对籽粒的贡献率均降低,穗数、穗粒数和籽粒产量减少,但水分利用效率较高;W1处理籽粒产量及其构成因素没有明显变化,但水分利用效率显著降低。与W0处理相比,W3处理的籽粒产量增幅达16.2%~20.7%。结合关键生育时期土壤相对含水率分析,冬小麦越冬期0~20 cm和0~40 cm土层土壤相对含水率分别不低于65% $\theta_r$ ( $\theta_r$ 为田间持水率)和66.8% $\theta_r$ 时,灌溉越冬水对籽粒产量无明显增益作用。拔节期0~20 cm土层土壤相对含水率降至50.6% $\theta_r$ 及以下,即使0~200 cm土层土壤含水率接近80% $\theta_r$ ,仍不能满足拔节后冬小麦对水分的需求,应及时灌溉拔节水。开花期0~20 cm和0~200 cm土层土壤相对含水率分别为24.8% $\theta_r$ ~35.6% $\theta_r$ 和57.9% $\theta_r$ ~58.8% $\theta_r$ ,及时灌水增产幅度较大。【结论】在冬小麦播种期供水适宜的条件下,于拔节期和开花期实施畦灌,生长季内灌2水,能获得较高的籽粒产量和水分利用效率,避免过量灌溉。

**关键词:**冬小麦;畦灌;灌水时期;光合特性;产量;水分利用效率

中图分类号:S512.1<sup>+</sup>1

文献标志码:A

doi: 10.13522/j.cnki.ggpps.2017.0724

吴宝建,王东. 畦田节灌对冬小麦光合特性、产量和水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报,2018,37(12):1-9.

## 0 引言

黄淮和北部冬麦区水资源短缺、小麦生长季节降水量较少,季节性干旱频发<sup>[1-2]</sup>。合理灌溉是稳定该区域粮食生产能力,保障粮食安全的重要技术途径。该地区地面灌溉面积占总灌溉面积的97%左右,且以畦灌为主<sup>[3]</sup>。近年来,喷灌、滴灌和微喷灌技术不断发展并逐渐在大田作物上大面积应用<sup>[4-5]</sup>,但由于成本较高,一次性投资较大,在一定程度上制约了设施灌溉在粮食作物生产上推广应用的速度。在未来一定时期内畦灌仍将是生产中占比较大的灌溉方式。

前人为减少灌溉水投入,针对畦田规格与灌水量之间的关系做了较多的研究,指出缩短畦长、畦宽,减少畦灌面积能达到降低畦田灌水量、提高水分利用效率的目的<sup>[6-8]</sup>。此外,还采用定额灌溉的方法,研究冬小麦适宜的灌水时期和次数。但降水年型不同,适宜的灌水时期和次数亦不同,干旱年、平水年和丰水年适宜的灌水次数分别是3水、2水和1水<sup>[9]</sup>。如何准确预知降水的丰缺,并依此实施不同的灌溉方案,尚缺乏具体措施和系统研究。冬小麦生育期内表层土壤含水率与一定深度土层土壤贮水量存在显著的数量关系,在小麦各生育时期测定的一定深度土层土壤含水率可反映播种期的底墒、之前一段时间内的自然降水及小麦耗水的情况<sup>[10]</sup>。前人进行了测墒精确灌溉的研究<sup>[11-14]</sup>,然而畦灌方式难以实现精确灌溉。为此,将测墒与畦灌相结合,探索依据灌水前土壤含水率确定是否需要进行畦灌的标准,研发依据自然供水状况确定最佳畦灌时期和次数的畦田节灌技术,以充分利用土壤贮水和自然降水来满足冬小麦需水,减少灌溉水投入。

收稿日期:2017-11-24

基金项目:公益性行业(农业)科研专项经费项目(201503130);国家自然科学基金项目(31271660)

作者简介:吴宝建(1992-),男,山东滨州人。硕士研究生,主要从事小麦节水高产栽培研究。E-mail: 510932190@qq.com

通信作者:王东(1973-),男,山东滕州人。教授,博士生导师。E-mail: wangd@sdau.edu.cn

# 1 材料与方法

## 1.1 试验地概况与试验设计

试验于2015—2017年在山东省泰安市岱岳区道朗镇玄庄村试验基地进行,该试验点位于黄淮和北部冬麦区的中部,属于温带大陆性季风气候区,1986—2016年平均气温13.3℃,年降水量685.6mm,变化幅度为500~900mm,年日照时间2453.5h。试验地土壤质地为壤土,2015—2016年、2016—2017年0~20cm土层土壤体积质量分别为1.41和1.43g/cm<sup>3</sup>,0~20cm土层土壤养分见表1。地下水埋深为8m。小麦播种前,2015—2016年0~20、0~40和0~200cm土层土壤平均相对含水率分别为45.5% $\theta_r$ ( $\theta_r$ 为田间持水率)、52.2% $\theta_r$ 和75.4% $\theta_r$ ,2016—2017年分别为45.6% $\theta_r$ 、49.5% $\theta_r$ 和68.2% $\theta_r$ 。小麦全生育期间的日降水量见图1。

表1 小麦播种前试验田0~20cm土层土壤养分

年份	有机质量/(g·kg <sup>-1</sup> )	全氮量/(mg·kg <sup>-1</sup> )	碱解氮量/(mg·kg <sup>-1</sup> )	有效磷量/(mg·kg <sup>-1</sup> )	速效钾量/(mg·kg <sup>-1</sup> )
2015—2016	1.07	120.00	92.24	39.18	132.67
2016—2017	1.12	116.00	95.08	33.80	128.66

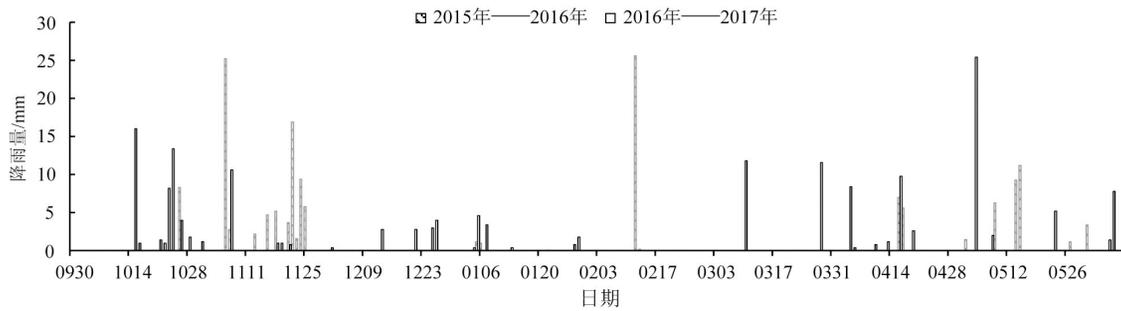


图1 小麦生育期间的日降水量

试验设置4个水分处理:W0为不灌水处理,W1为灌3水处理(越冬水+拔节水+开花水),W2为灌2水处理(拔节水+开花水),W3为灌1水处理(开花水)。灌水时期的确定依据:越冬期为日平均气温降至2℃左右,小麦植株基本停止生长时;拔节期在幼穗分化进入药隔形成期时;开花期在小麦花期结束时。小麦播种前1天测定0~20cm土层土壤含水率,当土壤含水率低于70% $\theta_r$ 时,播种后各处理均统一灌水1次,以保证出苗一致。各处理不同生育期灌水量见表2。同时在小麦越冬期、拔节期和开花期灌水前测定0~20、0~40和0~200cm土层土壤平均相对含水率。

表2 不同处理下各生育时期灌水量

年份	处理	播种期	mm			总灌水量/mm
			越冬期	拔节期	开花期	
2015—2016	W0	100.9	—	—	—	100.9
	W1	103.1	103.0	110.7	99.7	416.5
	W2	102.1	—	118.3	98.0	318.4
	W3	101.9	—	—	114	215.9
2016—2017	W0	92.1	—	—	—	92.1
	W1	91.6	91.3	100.0	97.8	380.7
	W2	92.0	—	105.9	90.4	288.3
	W3	92.7	—	—	110.4	203.1

注 “—”表示该时期未灌溉。

试验小区畦宽(左侧畦埂中心线至右侧畦埂中心线的垂直距离)2.0m,畦面宽1.6m,畦埂宽0.4m,畦长75m,面积150m<sup>2</sup>。小区间设1.0m保护行,以防止处理间水分侧渗影响。各小区等行距种植8行小麦,平均行距25cm。灌溉水水源为井水,从水源至畦田进水端采用PVC水龙带输水。畦灌的单宽流量为4.6~5.2L/(m·s)。畦灌改口成数设为90%,即当水流前锋达畦长长度90%位置时停止灌水,用水表计量实际灌水量。

播种前底施纯氮、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O,施量分别为135、135、135kg/hm<sup>2</sup>,拔节期开沟追施纯氮105kg/hm<sup>2</sup>,底肥选用氮磷钾比例为15:15:15的复合肥,追肥选用含氮量为46%的尿素。供试小麦品种为山农29,分别于2015年10月12日和2016年10月3日播种,于2016年6月11日和2017年6月9日收获。2个年度基本苗分别为1.35×10<sup>6</sup>株/hm<sup>2</sup>和1.80×10<sup>6</sup>株/hm<sup>2</sup>,均于小麦四叶期定苗。病虫害的防治等措施同一般高产田。

## 1.2 测定项目与方法

### 1.2.1 土壤含水率测定

于小麦播种前1 d和越冬期、拔节期、开花期每次灌水前1 d,用土钻采集0~20、20~40、40~60、60~80、80~100、100~120、120~140、140~160、160~180、180~200 cm土层土样,装入铝盒,烘干法测土壤质量含水率。每小区取1个点,每处理3次重复。

土壤质量含水率=(鲜土质量-干土质量)/干土质量;

土壤相对含水率=土壤质量含水率/田间持水率。

### 1.2.2 SPAD测定

于开花后0、10、20和30 d上午09:00—11:00,采用日本产Minolta SPAD-502仪(KonicaMinolta Sensing, Osaka, Japan)测定旗叶SPAD值。每个叶片测定上、中、下3个部位,取其平均值;各处理测定10个叶片(重复)。

### 1.2.3 旗叶气体交换特性测定

于开花后0、10、20和30 d上午09:00—11:00,采用便携式光合仪(LI-6400 XT, LI-COR, USA),在人工光源条件下,测定旗叶净光合速率、气孔导度和蒸腾速率。人工光源采用仪器配置的LED红蓝光源,光强设为1 400  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。各处理均测定5个叶片(重复)。旗叶瞬时水分利用效率为旗叶净光合速率与蒸腾速率的比值。

### 1.2.4 干物质质量测定

于开花期和成熟期,每处理选取长势一致的单茎15个。开花期按茎秆(包括叶鞘)、叶片、穗分样;成熟期按茎秆(包括叶鞘)、叶片、穗轴+颖壳、籽粒分样,于105  $^{\circ}\text{C}$ 杀青0.5 h后,在70  $^{\circ}\text{C}$ 烘箱烘干,称干物质质量。

营养器官花前贮存干物质转运量=开花期营养器官干物质质量-成熟期营养器官干物质质量;

营养器官花前贮存干物质转运率=营养器官花前贮存干物质转运量/开花期营养器官干物质质量 $\times 100\%$ ;

营养器官花前贮存干物质对籽粒贡献率=营养器官花前贮存干物质转运量/成熟期籽粒干物质质量 $\times 100\%$ ;

花后干物质积累量=成熟期籽粒干物质质量-营养器官花前贮存干物质转运量。

## 1.3 统计分析

用Microsoft Excel 2010进行数据计算和绘图,用DPS7.05统计分析软件进行数据差异显著性检验(LSD法,  $\alpha=0.05$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 冬小麦产量构成因素和水分利用效率

如表3所示,2015—2016年,W1和W2处理的穗数、穗粒数和籽粒产量均显著高于W3和W0处理的。W3处理的水分利用效率显著高于W1和W2处理的,且W1处理最低。2016—2017年的规律与2015—2016年一致。表明在拔节期和开花期供水,能显著提高穗数和穗粒数,获得较高的产量和水分利用效率;仅在开花期灌水,虽然水分利用效率明显提高,但籽粒产量显著降低。

表3 不同处理冬小麦产量构成因素和水分利用效率

年份	处理	穗数/ $(\times 10^4 \cdot \text{hm}^{-2})$	穗粒数	粒质量/mg	籽粒产量/ $(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})$	水分利用效率/ $(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1})$
2015—2016	W0	430.0b	34.7c	46.5c	6 770.5c	14.2bc
	W1	608.0a	41.8a	52.0a	8 474.7a	13.6c
	W2	617.4a	42.1a	52.5a	8 562.5a	14.9b
	W3	438.0b	39.0b	51.9a	7 869.0b	16.4a
2016—2017	W0	666.0b	34.6c	40.0b	6 349.0c	14.6b
	W1	725.0a	39.9a	49.0a	8 347.0a	12.8c
	W2	718.7a	39.9a	48.9a	8 293.0a	14.4b
	W3	695.0b	36.8b	50.2a	7 665.3b	15.1a

注 同列数据后不同字母表示相同年份的处理间差异显著( $P<0.05$ ),下同。

### 2.2 不同处理冬小麦各生育时期灌水前土壤含水率

如表4所示,2015—2016年,各处理越冬期0~20 cm和0~200 cm土层土壤相对含水率分别为69.3% $\theta_r$ 和89.7% $\theta_r$ ,拔节期灌水前,W0、W2和W3处理0~20 cm和0~200 cm土层土壤相对含水率分别为48.2% $\theta_r$ 和

79.0% $\theta_r$ ，均低于W1处理，开花期灌水前各处理在各土层土壤相对含水率相近，0~20 cm和0~200 cm土层土壤相对含水率分别为24.8% $\theta_r$ ~25.7% $\theta_r$ 和57.9% $\theta_r$ ~60.5% $\theta_r$ 。2016—2017年，各处理越冬期0~20 cm和0~200 cm土层土壤相对含水率分别为65.0% $\theta_r$ 和80.1% $\theta_r$ ；拔节期灌水前W0、W2和W3处理0~20 cm土层土壤相对含水率为50.6% $\theta_r$ ，0~200 cm土层土壤相对含水率为63.3% $\theta_r$ ，显著低于W1处理；开花期灌水前W0与W3处理的0~20 cm和0~200 cm土层土壤相对含水率分别为35.6% $\theta_r$ 和58.8% $\theta_r$ ，均低于W1和W2处理。结合各处理产量(表3)数据分析可知，当越冬期0~20 cm和0~200 cm土层土壤相对含水率分别达65.0% $\theta_r$ ~69.3% $\theta_r$ 和80.1% $\theta_r$ ~87.9% $\theta_r$ 时，在越冬期灌水无明显增产效果。而当拔节期0~20 cm和0~200 cm土层土壤相对含水率分别达48.2% $\theta_r$ ~50.6% $\theta_r$ 和63.3% $\theta_r$ ~79.0% $\theta_r$ ，及时灌水可显著提高产量。开花期0~20 cm和0~200 cm土层土壤相对含水率分别达到24.8% $\theta_r$ ~35.6% $\theta_r$ 和57.9% $\theta_r$ ~58.8% $\theta_r$ ，及时灌水增产幅度较大。

表4 小麦越冬期、拔节期和开花期灌水前不同深度土层土壤含水率 % $\theta_r$

年份	处理	越冬期			拔节期			开花期		
		0~20 cm	0~40 cm	0~200 cm	0~20 cm	0~40 cm	0~200 cm	0~20 cm	0~40 cm	0~200 cm
2015—2016	W0	69.3a	77.4a	87.9a	48.2b	60.4b	79.0b	24.8a	28.7a	57.9a
	W1	69.3a	77.4a	87.9a	52.3a	66.1a	84.5a	25.0a	30.1a	59.9a
	W2	69.3a	77.4a	87.9a	48.2b	60.4b	79.0b	25.7a	31.4a	60.5a
	W3	69.3a	77.4a	87.9a	48.2b	60.4b	79.0b	24.8a	28.7a	57.9a
2016—2017	W0	65.0a	66.8a	80.1a	50.6a	45.1b	63.3b	35.6b	36.2c	58.8b
	W1	65.0a	66.8a	80.1a	50.4a	48.8a	69.1a	39.9a	40.9b	66.0a
	W2	65.0a	66.8a	80.1a	50.6a	45.1b	63.3b	41.0a	44.0a	65.4a
	W3	65.0a	66.8a	80.1a	50.6a	45.1b	63.3b	35.6b	36.2c	58.8b

### 2.3 开花后旗叶SPAD值变化规律

各处理旗叶SPAD值在开花后的变化趋势基本一致(图2)，开花后0~20 d相对稳定，开花20 d后迅速下降。与W1处理相比，W2处理在籽粒灌浆后旗叶SPAD值在2015—2016年无显著差异，2016—2017年有所降低；W3处理仅在开花期灌1水，与W1处理相比，籽粒灌浆后旗叶SPAD值显著降低。2 a不同灌水次数之间比较，趋势与上述一致。说明开花后旗叶SPAD值主要受灌水次数的影响，减少灌水次数会降低籽粒灌浆中后期的旗叶SPAD值。

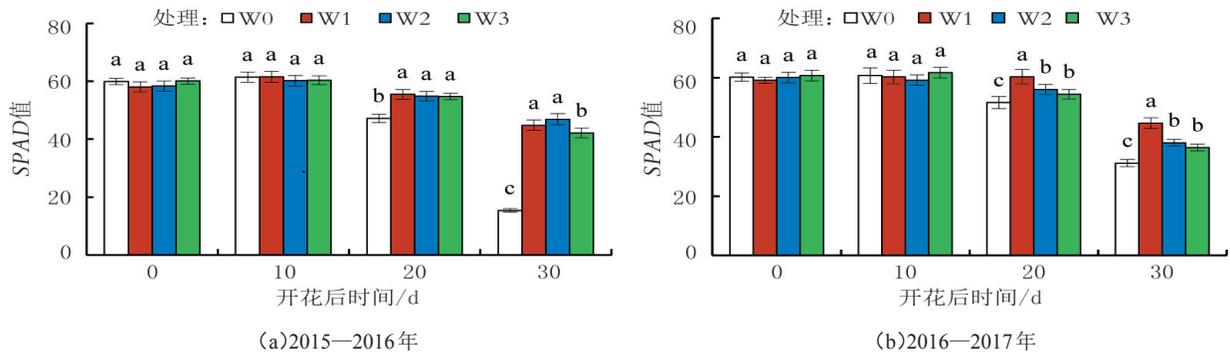


图2 开花后0~30 d不同处理小麦旗叶SPAD值变化

### 2.4 旗叶气体交换特性

#### 2.4.1 旗叶净光合速率

由图3可知，各处理旗叶净光合速率在开花后呈逐渐降低趋势(图中相同时间不同字母表示处理间差异显著( $P < 0.05$ ),下同)。2015—2016年开花前没有灌水的处理(W0和W3)开花期0~20 cm和0~40 cm土层土壤含水率分别为24.8% $\theta_r$ 和28.7% $\theta_r$ (表4)。与灌2水的W2处理相比，W1处理的旗叶净光合速率在开花后0~20 d期间无显著差异，在开花后30 d保持较高水平；仅在开花期灌水的W3处理旗叶净光合速率在开花后10 d与W1和W2处理无显著差异，在开花后0 d(开花期灌水前)和开花后20~30 d均低于W1和W2处理。2016—2017年开花前没有灌水的处理开花期0~20 cm和0~40 cm土层土壤含水率分别为35.6% $\theta_r$ 和36.2% $\theta_r$ ，各处理在开花后0 d(灌水前)的旗叶净光合速率无显著差异，在花后10~30 d，W0处理显著低于其他处理，W1和W2处理之间无显著差异。W3处理开花后20~30 d的旗叶净光合速率显著低于W1和W2处理的。表

明开花期0~20 cm和0~40 cm土层土壤含水率对冬小麦旗叶净光合速率的调节受拔节期及拔节期之前灌水的的影响;拔节期或拔节期之前有灌水的处理,即使0~40 cm土层土壤含水率在开花期降至28.7% $\theta_r$ ,旗叶净光合速率仍显著高于无灌水处理,这与其0~40 cm以下土层土壤含水率较高有关(表4);但当开花期0~20 cm和0~40 cm土层土壤含水率在36% $\theta_r$ 左右时,拔节期或拔节期之前有灌水处理的旗叶净光合速率与无灌水的处理无显著差异,说明冬小麦开花期0~40 cm土层土壤含水率在36% $\theta_r$ 以上时,其对40 cm以下土层土壤水分的依赖较小。

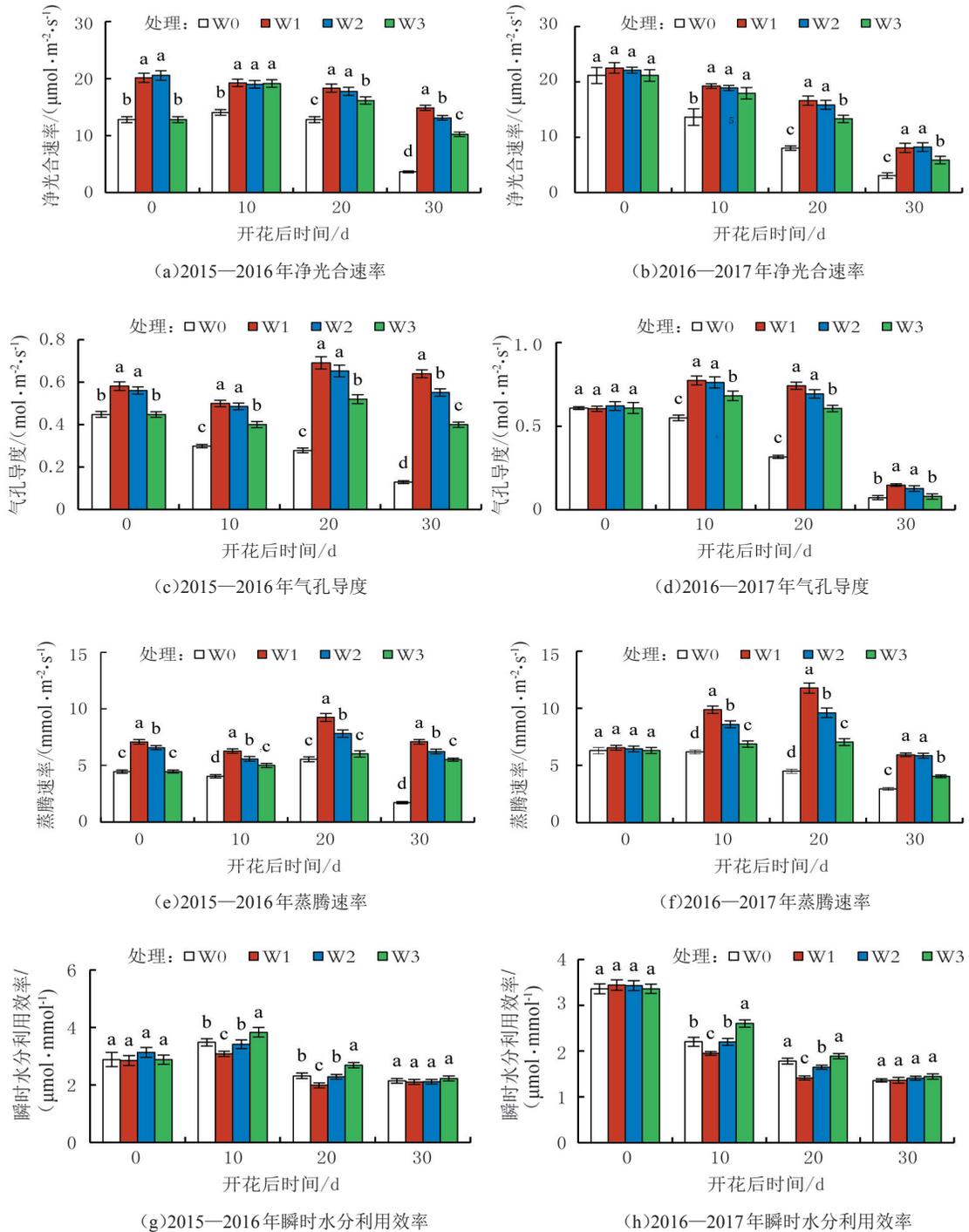


图3 开花后0~30 d旗叶气体交换特性的变化

#### 2.4.2 气孔导度和蒸腾速率

旗叶气孔导度和蒸腾速率的变化规律与净光合速率的变化规律基本一致。2015—2017年小麦开花后0~30 d,以无灌水处理最低,W1和W2处理均显著高于W3处理。2016—2017年小麦开花后0 d,各处理之间

无显著差异;在开花后 10~30 d,W1 和 W2 处理的气孔导度和蒸腾速率显著高于 W3 和 W0 处理。

### 2.4.3 旗叶瞬时水分利用效率

由图 3(g)、图 3(h)可知,2015—2016 年,W3 处理旗叶瞬时水分利用效率在开花后 10 d 和 20 d 显著高于 W1 和 W2 处理,在开花后 30 d 与 W1 和 W2 处理无显著差异。2016—2017 年小麦开花后 0 d 和 30 d,各处理旗叶瞬时水分利用效率无显著差异,在开花后 10~20 d 期间以 W3 处理最高。表明在小麦开花初期,旗叶气孔导度、蒸腾速率和瞬时水分利用效率对 0~40 cm 土层土壤含水率的反应与光合速率一致。尽管开花初期 0~40 cm 土层土壤含水率较高时,各灌水处理蒸腾速率和瞬时水分利用效率无显著差异,但是开花前有灌水的处理由于 0~40 cm 以下土层土壤含水率较高,籽粒灌浆期的旗叶蒸腾速率较高,瞬时水分利用效率相对较低。

### 2.5 干物质积累分配

如图 4 所示(图中同一器官不同小写字母表示差异达 0.05 显著水平),2015—2016 年,W1 和 W2 处理开花期的茎、叶、穗部的干物质积累量显著高于 W3 处理;与 W0 处理比较,茎干物质质量分别提高 33.5%和 35.4%,穗干物质质量增加 34.5%和 25.6%。W1 和 W2 处理成熟期的干物质分配到茎、叶、颖壳+穗轴及籽粒的量显著高于 W3 处理,籽粒干物质质量以 W0 处理最低。2016—2017 年,各处理开花期茎干物质质量无显著差异;W1 和 W2 处理的穗干物质质量显著高于 W0 处理。W1 和 W2 处理成熟期籽粒干物质质量均显著高于 W0 处理。表明于拔节期和开花期供水,不仅能提高开花期穗干物质质量,而且有利于促进开花后籽粒干物质质量增加。前期干旱,开花期灌水导致穗干物质质量和成熟期籽粒干物质质量均降低;但灌水过多则造成开花期穗干物质质量和成熟期籽粒干物质质量增幅较小。

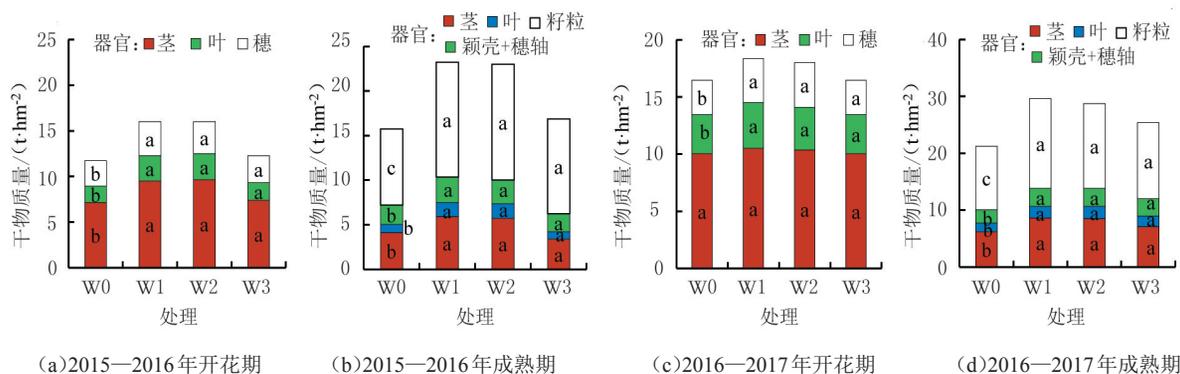


图 4 冬小麦开花期和成熟期干物质在不同器官中的分配

### 2.6 开花前营养器官贮藏干物质的转运及其对籽粒的贡献

如表 5 所示,2015—2016 年,W0 处理开花后干物质的同化量及其对籽粒的贡献率均低于其余处理的,W1 和 W2 处理显著高于 W3 处理。W3 处理开花前干物质转运率及其对籽粒的贡献率显著高于 W1 和 W2 处理的。2016—2017 年的规律与 2015—2016 年一致。表明在拔节期和开花期供水,能显著增加开花后干物质同化量;前期干旱仅在开花期灌水,虽然能促进营养器官开花前临时贮存干物质在开花后向籽粒的再分配,但开花后干物质同化量显著降低。

表 5 不同灌水处理下冬小麦开花前营养器官贮藏干物质再分配及其对籽粒的贡献率

年份	处理	营养器官花前贮存干物质转运量/(t·hm <sup>-2</sup> )	营养器官花前干物质转运率/%	营养器官花前干物质转运量对籽粒的贡献率/%	开花后干物质同化量/(t·hm <sup>-2</sup> )	开花后干物质同化量对籽粒的贡献率/%
2015—2016	W0	4.6c	38.8b	53.2b	4.0c	46.8b
	W1	5.6b	35.3b	43.9c	7.2a	56.1a
	W2	6.0a	37.5b	46.1b	7.0a	53.9a
	W3	6.0a	49.2a	56.9a	4.6b	43.1b
2016—2017	W0	6.4a	38.9a	57.5a	4.7c	42.5c
	W1	4.5c	24.6c	28.7c	11.2a	71.3a
	W2	4.2c	24.5c	28.3c	10.7a	71.7a
	W3	4.5c	27.3b	33.6b	6.9b	66.4b

### 3 讨论

干旱条件下叶片 *SPAD* 值与叶绿素密度和净光合速率均显著正相关<sup>[15-16]</sup>。春小麦灌二棱水和孕穗水显著降低抽穗至开花期旗叶 *SPAD* 值,但灌浆后期旗叶 *SPAD* 值则随灌水的增加而增大<sup>[17]</sup>。本研究结果表明,旗叶 *SPAD* 值在开花后 0~10 d 的变化趋势与旗叶净光合速率并不一致;各水分处理小麦旗叶 *SPAD* 值在开花后 0 d 和 10 d 无显著差异,这可能与该阶段各水分处理 0~20 cm 土层土壤含水率差异较小有关,同时说明旗叶 *SPAD* 值在该阶段受开花前灌水导致的深层土壤含水率增高的影响较小。但减少灌水次数会降低灌浆中后期的旗叶 *SPAD* 值,这可能与籽粒灌浆中后期深层土壤贮水量的多少有关。

遮雨池栽条件下,开花后 0~100 cm 土层土壤含水率保持在 60% $\theta_r$ ~70% $\theta_r$ ,旗叶净光合速率高于土壤含水率为 40% $\theta_r$ ~50% $\theta_r$ 和 80% $\theta_r$ ~90% $\theta_r$ 的处理<sup>[18]</sup>。在全生育期降水 137.0~267.4 mm 条件下,开花期 0~60 cm 土层土壤含水率降至 55% $\theta_r$ 时,灌浆后期旗叶净光合速率比 70% $\theta_r$ 的处理高 9.6%,比 45% $\theta_r$ 的处理高 20.6%<sup>[19]</sup>。田间条件下,于拔节期和开花期灌溉,灌水量分别为 21.3~96.0 mm 和 29.0~38.5 mm 时有利于在开花后保持较高的叶片光合性能<sup>[20]</sup>。本研究结果表明,在开花期灌水量基本一致的条件下,拔节期及拔节期之前的水分管理对开花后旗叶的光合同化能力仍有显著影响。拔节期或拔节期之前有灌水的处理与无灌水处理相比,0~20 和 0~40 cm 土层土壤含水率差异较小,而 0~200 cm 土层土壤含水率较高,这与其前期在 40 cm 以下土层贮存较多灌溉水有关。前期有灌水的处理即使 0~40 cm 土层土壤含水率在开花期降至 28.7% $\theta_r$ ,其旗叶净光合速率仍显著高于前期无灌水的处理;但当开花期 0~20 cm 和 0~40 cm 土层土壤含水率在 36% $\theta_r$ 左右时,前期无灌水处理的旗叶净光合速率与有灌水处理的无显著差异,说明冬小麦开花期 0~40 cm 土层土壤含水率在 36% $\theta_r$ 以上时,其对 40 cm 以下土层土壤水分的依赖较小,当 0~40 cm 土层土壤含水率降至 30% $\theta_r$ 左右时,40 cm 以下土层土壤含水率对其有显著影响。

土壤水分亏缺时,作物通过调节叶片水分利用效率适应逆境,以缓解由于气孔导度下降导致叶片光合能力不足带来的不利影响<sup>[21]</sup>。在中度和重度水分胁迫条件下,叶片水分利用效率的降幅低于光合速率、蒸腾速率和气孔导度的降幅,从而能够增强叶片对水分的利用和适应干旱胁迫的能力<sup>[22]</sup>。研究表明,在开花期灌 1 水,与全生育期无灌水处理相比,小麦开花后旗叶净光合速率显著提高,而气孔导度和蒸腾速率的增幅相对较小,开花后平均瞬时水分利用效率提高;在拔节期和开花期各灌 1 水,开花后旗叶平均净光合速率继续提高,但蒸腾速率增幅总体加大,导致瞬时水分利用效率降低。全生育期灌 3 水,开花后平均瞬时水分利用效率保持不变或降低。说明田间条件下采用畦灌方式,在一定范围内增加灌水次数虽然有利于提高开花后光合同化能力,但水分利用效率不高。

前人采用定额灌溉的方法,研究发现在小麦拔节期、开花期和灌浆期分别灌水 37.5、15 和 15 mm,籽粒产量显著高于仅在拔节期灌水 67.5 mm 和拔节期、开花期各灌水 37.5、30 mm 的处理<sup>[23]</sup>;可是在同一生态区内,另有结果表明越冬期、拔节期和灌浆期分别灌水 75、45 和 45 mm,能获得最优的产量、效益及水分利用效率<sup>[24]</sup>;还有研究认为,在拔节期灌水 120 mm 或在拔节期和开花期各灌水 60 mm 能获得最高的籽粒产量和水分利用效率<sup>[25]</sup>。上述研究结果的差异可能与自然供水(土壤贮水和自然降水)量的不同有关<sup>[26]</sup>。冬小麦关键生育时期一定深度土层土壤贮水量是前期土壤贮水、降水、灌溉及作物耗水的综合表现<sup>[13]</sup>。Zhang 等<sup>[27]</sup>研究发现,小麦拔节期和灌浆期 0~60 cm 土层土壤含水率由 65% $\theta_r$ ~70% $\theta_r$ 降为 50% $\theta_r$ ~60% $\theta_r$ ,干物质积累总量和产量分别提高 11.1%和 14.5%。前期研究表明,在小麦拔节期和开花期通过补灌使 0~140、0~40 和 0~20 cm 土层土壤含水率分别达到 75% $\theta_r$ 、70% $\theta_r$ 和 100% $\theta_r$ ,均能获得较高的籽粒产量和水分利用效率<sup>[11-14]</sup>。本试验研究发现在拔节期和开花期各灌 1 水,相比于全生育期灌 3 水和灌 1 水的处理,较好地协调了开花后叶片光合同化与蒸腾耗水及开花后干物质同化积累与开花前临时贮存干物质转移再分配的关系,获得了较高的籽粒产量和水分利用效率。通过分析小麦地上部植株性状和产量结果,本试验还发现,灌水前土壤含水率在越冬期 0~20 cm 土层高于 65% $\theta_r$ 时,无需灌溉。拔节期 0~20 cm 土层土壤含水率降至 50% $\theta_r$ ,即使 0~200 cm 土层土壤含水率为 80% $\theta_r$ ,仍不能满足该时期小麦水分需求。开花期作为小麦生殖生长最重要的关键时期,该时期灌水较不灌水处理产量提升幅度达到 16.2%~20.7%,因此开花期亦是重要的灌水时期。

## 4 结论

1)冬小麦开花期0~20 cm和0~40 cm土层土壤含水率对冬小麦旗叶净光合速率的调节受拔节期及拔节期之前灌水的影响;开花期0~40 cm土层土壤含水率在36% $\theta_r$ 以上时,冬小麦对40 cm以下土层土壤水分的依赖较小,当0~40 cm土层土壤含水率降至30% $\theta_r$ 左右时,40 cm以下土层土壤含水率对其有显著影响。

2)在冬小麦越冬期灌水前0~20 cm土层土壤含水率高于65% $\theta_r$ 时,无需灌溉。拔节期0~20 cm土层土壤含水率降至50.6% $\theta_r$ ,即使0~200 cm土层土壤含水率接近80% $\theta_r$ ,仍不能满足该时期小麦水分需求。开花期灌水较不灌水处理增产幅度达到16.2%~20.7%,开花期亦是重要的灌水时期。本试验得出,在拔节期和开花期各灌1水,较好地协调了开花后叶片光合同化与蒸腾耗水及开花后干物质同化积累与开花前临时贮存干物质转移再分配的关系,获得了较高的籽粒产量和水分利用效率。

### 参考文献:

- [1] YUAN Z, YAN D H, YANG Z Y, et al. Temporal and spatial variability of drought in Huang-Huai-Hai river basin, China[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2015, 122(3/4): 755-769.
- [2] 杨志勇,袁喆,严登华,等. 黄淮海流域旱涝时空分布及组合特性[J]. *水科学进展*, 2013, 24(5): 617-625.
- [3] 郑和祥,史海滨,郭克贞,等. 不同灌水参数组合时田面坡度对灌水质量的影响研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2011, 29(6): 43-48.
- [4] 杨逗逗,张黛静,王艳杰,等. 微喷对冬小麦冠层微环境日变化及叶片水势的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2017, 36(6): 13-17.
- [5] 宜丽宏,王丽,张孟妮,等. 不同灌溉方式对冬小麦生长发育及水分利用效率的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2017, 36(10): 14-19.
- [6] 董宝娣,刘孟雨,乔匀周,等. 不同畦长灌溉对冬小麦产量及水分利用特性的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2016, 24(8): 1 080-1 087.
- [7] 马尚宇,于振文,石玉,等. 不同灌溉畦长对小麦光合特性、干物质积累及水分利用效率的影响[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(4): 997-1 005.
- [8] 马尚宇,于振文,张永丽,等. 不同畦宽灌溉对小麦耗水特性和产量及水分利用效率的影响[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(8): 1 531-1 540.
- [9] SUN H Y, SHEN Y J, YU Q, et al. Effect of precipitation change on water balance and WUE of the winter wheat - summer maize rotation in the North China Plain[J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97: 1 139-1 145.
- [10] 王东. 黄淮流域冬小麦按需补灌方法及其应用[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(6): 220-228.
- [11] GUO Z J, YU Z W, WANG D, et al. Photosynthesis and winter wheat yield responses to supplemental irrigation based on measurement of water content in various soil layers[J]. *Field Crops Research*, 2014, 166: 102-111.
- [12] 林祥,王东. 不同底墒条件下补灌对冬小麦耗水特性、产量和水分利用效率的影响[J]. *作物学报*, 2017, 43(9): 1 357-1 369.
- [13] WANG D, YU Z W, WHITE P J. The effect of supplemental irrigation after jointing on leaf senescence and grain filling in wheat[J]. *Field Crops Research*, 2013, 151(9): 35-44.
- [14] 张黛静,杨逗逗,马建辉,等. 测墒滴灌对氮肥调控下冬小麦水分利用效率及灌浆动态的影响[J]. *河南师范大学学报(自然科学版)*, 2017, 45(1): 47-55.
- [15] PUANGBUT D, JOGLOY S, VORASOOT N. Association of photosynthetic traits with water use efficiency and SPAD chlorophyll meter reading of jerusalem artichoke under drought conditions[J]. *Agricultural Water Management*, 2017, 188: 29-35.
- [16] ARUNYANGR K A, JOGLOY S, AKKASAENG C, et al. Chlorophyll stability is an indicator of drought tolerance in peanut[J]. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2008, 194(2): 113-125.
- [17] 党根友,魏亦勤,刘旺清,等. 灌水模式对春小麦光合性能和干物质生产的影响[J]. *麦类作物学报*, 2015, 35(2): 198-206.
- [18] 马东辉,赵长星,王月福,等. 施氮量和花后土壤含水量对小麦旗叶光合特性和产量的影响[J]. *生态学报*, 2008, 28(10): 4 896-4 901.
- [19] KANG S Z, ZHANG L, LIANG Y, et al. Effects of limited irrigation on yield and water use efficiency of winter wheat in the Loess Plateau of China[J]. *Agricultural Water Management*, 2002, 55(3): 203-216.
- [20] 徐学欣,王东. 微喷补灌对冬小麦旗叶衰老和光合特性及产量和水分利用效率的影响[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(14): 2 675-2 686.
- [21] 刘祖贵,陈金平,段爱旺,等. 不同土壤水分处理对夏玉米叶片光合等生理特性的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2006, 24(1): 90-95.
- [22] 于文颖,纪瑞鹏,冯锐,等. 不同生育期玉米叶片光合特性及水分利用效率对水分胁迫的响应[J]. *生态学报*, 2015, 35(9): 2 902-2 909.
- [23] 崔帅,刘慧婷,王红光,等. 限水减氮对小麦旗叶光合特性和群体干物质积累与分配的影响[J]. *河北农业大学学报*, 2016, 39(5): 1-7.
- [24] 周吉红,毛思帅,王俊英,等. 限量灌溉对京郊小麦产量、水分利用效率及效益的影响[J]. *麦类作物学报*, 2016, 36(8): 1 043-1 049.
- [25] BIAN C, MA C, LIU X, et al. Responses of winter wheat yield and water use efficiency to irrigation frequency and planting pattern:[J]. *Plos One*, 2016, 11(5): 0154673.
- [26] WANG D. Water use efficiency and optimal supplemental irrigation in a high yield wheat field[J]. *Field Crops Research*, 2017, 213: 213-220.
- [27] ZHANG B, LI F M, HUANG G, et al. Yield performance of spring wheat improved by regulated deficit irrigation in an arid area[J]. *Agricultural Water Management*, 2006, 79(1): 28-42.

# Response of Photosynthesis, Yield and Water Use Efficiency of Winter Wheat to Schedule of Border Irrigation

WU Baojian, WANG Dong\*

(College of Agronomy, Shandong Agricultural University/State Key Laboratory of Crop Biology/  
Key Laboratory of Crop Ecophysiology and Farming System, Ministry of Agriculture, Taian 271018, China)

**Abstract:**【Objective】 This paper investigates the consequent impact of frequency and timing of border irrigation on *SPAD* value, photosynthetic rate of flag leaf after anthesis, yield and water use efficiency of winter wheat under different border irrigation schedules, aiming to improve use efficiency of both soil water and precipitation by the plant. 【Method】 We compared four treatments after the seedling emerged: rainfed (W0), irrigating at wintering, jointing and anthesis stage respectively (W1), irrigating at jointing and anthesis stage respectively (W2), irrigating at anthesis only (W3). 【Result】 Compared with W2, W3 reduced the *SPAD*, net photosynthetic rate of flag leaf after anthesis, the assimilation of dry matter and its contribution to grain, the number of spikes, grains per spike and grain yield, despite its increases in water use efficiency. In contrast, the yield and yield components in W1 were approximately the same as that in W2 in spite of its significant decrease in water use efficiency. Compared with W0, W1 increased grain yield by 16.2%~20.7%. In all treatments, the soil moisture in 0~20 cm and 0~40 cm soil was more than 65% and 66.8% of the field capacity respectively at wintering stage, and thus irrigation at this stage had no significant effect on wheat grain yield. Root uptake and evaporation reduced the moisture in 0~20 cm soil quickly to 50.6% of the field capacity even though the soil moisture in 0~200 cm was close to 80% of the field capacity. Therefore, irrigation was required to replenish the water lost via evapotranspiration. When soil water content in 0~20 cm and 0~200 cm soil at the anthesis stage was 24.8%~35.6% and 57.9%~58.8% of the field capacity respectively, timely irrigation could greatly increase the yield. 【Conclusion】 Irrigation at jointing and anthesis stage can improve both grain yield and water use efficiency.

**Key words:** winter wheat; border irrigation; irrigation stage; photosynthetic characteristics; yield; water use efficiency

责任编辑:白芳芳