

文章编号: 1672 - 3317 (2023) 08 - 0055 - 08

不同调亏灌溉处理对高产矮秆小麦光合性能的影响

郑梦瑶, 李豪杰, 王文定, 杨晨璐, 李玉琳, 安露昌, 欧行奇, 郑会芳*

(河南科技学院 生命科技学院, 河南 新乡 453003)

摘要:【目的】探明不同调亏灌溉处理对高产矮秆小麦光合性能的影响。【方法】基于盆栽试验, 以百农 207(BN207)、百农 307(BN307) 以及百农 607(BN607) 高产矮秆小麦为供试材料, 以充分灌溉为对照(CK), 设置 3 个中度调亏灌溉处理, 分别为: 苗期—越冬期、拔节期—抽穗期、扬花期—灌浆中期进行中度调亏灌溉(W1); 苗期—越冬期、扬花期—灌浆中期进行中度调亏灌溉(W2); 苗期—越冬期、拔节期—抽穗期进行中度调亏灌溉(W3)。分析不同处理下小麦产量、叶片光合速率(Pn) 及叶绿素荧光动力学参数的差异。【结果】与 CK 相比, 3 个小麦品种在 W3 处理下的产量、生物量、叶片叶绿素相对量(SPAD) 及光化学活性均显著提升。在同一调亏灌溉处理下, 不同品种间的光合性能存在差异。BN207 品种在长期调亏灌溉下具有抵御光合电子传递限制的能力, BN607 在生长前期进行适度的调亏灌溉更有利于增强其生长后期对水分亏缺的适应能力, BN307 在苗期—越冬期和拔节期—抽穗期进行中度调亏灌溉有利于提升 Pn 。【结论】在苗期—越冬期、拔节期—抽穗期进行中度调亏灌溉有利于提升小麦产量与光合性能。

关键词: 调亏灌溉; 生物量; 叶绿素荧光动力学参数; OJIP 曲线

中图分类号: S512.1+1

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022554

OSID: 

郑梦瑶, 李豪杰, 王文定, 等. 不同调亏灌溉处理对高产矮秆小麦光合性能的影响[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(8): 55-62.
ZHENG Mengyao, LI Haojie, WANG Wending, et al. Effects of Regulated Deficit Irrigation on Photosynthesis of High-yield Dwarf Wheat Cultivar[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(8): 55-62.

0 引言

【研究意义】华北平原水资源危机日益严峻, 漫灌等传统灌溉方式会导致地下水过度开采, 从而威胁粮食可持续生产与生态安全^[1]。冬小麦是华北平原的主要粮食作物之一^[2]。调亏灌溉(RDI)作为一种有效的节水灌溉方式, 可通过调节光合产物在不同器官间的分配来达到节水、增产的目的^[3]。作物品种特性不仅影响作物对水分的吸收利用, 而且决定着作物的光合性能^[4]。研究表明, 矮秆小麦基因型更有利于在适当水分胁迫条件下提升叶片光合性能^[5]。然而, 调亏灌溉处理下的不同矮秆小麦品种在不同生育期的光合性能存在较大的不确定性。因此, 研究矮秆小麦品种在调亏灌溉下的光合性能变化可为该地区选育高产、节水的矮秆小麦品种提供理论指导。**【研究进展】**目前, 针对调亏灌溉对小麦不同生育时期光合性能的影响研究大多针对的是单一小麦品种。孟兆江等^[6]通过对不同调亏灌溉处理下单一小麦品种的研究发现,

在返青期—拔节期进行适度调亏灌溉对光合速率(Pn) 和产量均无显著影响, 然而在拔节期—抽穗期或生育后期进行中、重度调亏灌溉则会显著降低小麦叶片 Pn , 进而降低产量。盛钰等^[7]研究发现, 在拔节期或灌浆期进行调亏灌溉降低了 Pn 。Liu 等^[8]研究发现, 在小麦返青期—拔节期、拔节期—开花期、灌浆期进行不同程度的调亏灌溉均会导致小麦旗叶 Pn 下降, 但忽略了电子传递链中各电子传递位点对调亏灌溉的响应。叶绿素荧光动力学参数是评价逆境胁迫对作物光合性能影响的常用指标, 可反映光系统 II(PSII) 和光合电子传递链的生理状况^[9]。不同小麦品种在不同干旱胁迫下对 PSII 叶绿素荧光参数的响应存在差异。原佳乐等^[10]研究发现, 不同品种的小麦在不同程度干旱胁迫下的最大光化学效率(ϕ_{Po})、电子传递到电子传递链中超过 Q_A 的其他电子受体的概率(Ψ_O) 以及用于电子传递的量子产额(ϕ_{Eo}) 均有所降低。朱荣等^[11]研究发现, 不同小麦品种在中度调亏灌溉处理下其单位反应中心吸收的光能(ABS/RC) 和单位反应中心耗散的能量(DI_o/RC) 明显升高, 导致光合电子传递受阻, 从而引起光合作用下降。**【切入点】**目前, 不同调亏灌溉处理对高产矮秆小麦光合性能的影响尚不清晰。**【拟解决的关键问题】**鉴于此, 本研究基于盆栽试验, 以高产矮秆小麦品种百农 207(BN207)、百农 307(BN307) 以及百农 607(BN607)

收稿日期: 2022-10-08 修回日期: 2023-03-31 网络出版日期: 2023-05-23
基金项目: 河南省自然科学基金项目(212300410144); 河南省科技计划攻关项目(212102110296); 新乡市科技攻关计划项目(GG2021006); 河南省农业良种联合攻关项目(2022010101)

作者简介: 郑梦瑶(2000-), 女, 硕士研究生, 主要从事小麦高产节水栽培研究。E-mail: a704671041@163.com

通信作者: 郑会芳(1989-), 女, 河南安阳人。讲师, 博士研究生, 主要从事小麦水资源高产高效栽培研究。E-mail: hfzheng1021@163.com

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

为供试材料,通过设置不同生育期的调亏灌溉处理,探讨不同调亏灌溉处理对小麦灌浆中期旗叶光合性能的影响,揭示不同矮秆小麦品种旗叶的光合性能对调亏灌溉的生理响应机制,为华北平原小麦节水、增产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

供试矮秆小麦品种为课题组自主培育的BN207、BN307和BN607。供试土壤为沙壤土,取自河南省新乡市辉县市北云门镇河南科技学院小麦育种基地0~20 cm耕层土壤。土壤体积质量为1.38 mg/kg,有机质量为11.6 g/kg,全氮量为0.89 mg/kg,速效磷量为18.5 mg/kg,速效钾量为106 mg/kg。盆栽试验于2020年10月—2021年6月在河南省新乡市河南科技学院防雨棚下进行,试验用盆高24 cm,盆底直径17.5 cm,盆口直径33.5 cm。于盆底层铺设石英砂,装干土(体积含水率12%)14 kg。于2020年10月25日播种,每盆土基施尿素6.5 g,五氧化二磷1 g,氯化钾1.6 g。

1.2 试验设计

根据小麦生育阶段需水特性,通过称质量法控制土壤水分,共设计4个灌溉处理,分别为:生育期充分灌溉(CK),苗期—越冬期、拔节期—抽穗期、扬花期—灌浆中期进行中度调亏灌溉(W1),苗期—越冬期、扬花期—灌浆中期进行中度调亏灌溉(W2),苗期—越冬期、拔节期—抽穗期进行中度调亏灌溉(W3),详见表1。试验采用随机区组设计,每个处理设置3个重复。在越冬期前,每3天称量1次土体质量,返青期后每1~2 d称量1次土体质量。结合土体质量及目标土壤含水率计算灌水量,冬季于10:00—12:00进行灌水,春、夏季于08:00—10:00进行灌水。叶绿素量、 Pn 和叶绿素荧光参数分别于灌浆中期复水后的第1天进行测定。

表1 试验处理

Table 1 Test treatment

处理	不同生育时期调亏灌溉		
	苗期—越冬期	拔节期—抽穗期	扬花期—灌浆中期
CK	75%~85%	75%~85%	75%~85%
W1	50%~55%	50%~55%	50%~55%
W2	50%~55%	75%~85%	50%~55%
W3	50%~55%	50%~55%	75%~85%

1.3 指标测定方法

1.3.1 生物量测定

于小麦收获期从每个处理中随机选取3株植株,取植株地上部进行烘干,在烘箱中于105 °C条件下杀青30 min后转为75 °C烘干至恒质量,称取烘干后的样品质量(g)。

1.3.2 产量测定

于小麦收获期从每个处理中随机选取3株植株,测量每株穗数和每穗的穗粒数,将所有植株脱粒,从中随机挑选100粒完整籽粒称取质量(g),每个处理重复3次。产量计算方法为:

$$\text{产量 (g/株)} = \frac{\text{每盆穗数} \times \text{穗粒数} \times \text{百粒质量 (g)}}{100} \quad (1)$$

1.3.3 SPAD 测定

于灌浆中期复水后的第1天从每个处理中随机选取6个有代表性的小麦植株,使用SPAD-502便携式叶绿素仪(JPN)测定旗叶中部SPAD。

1.3.4 光合指标测定

使用LI-6800光合分析仪(LI-COR, USA)在晴朗无风的天气于09:00—11:00测定旗叶 Pn ,每个处理重复6次。

1.3.5 叶绿素荧光动力学参数测定

使用Handy-PEA植物效率分析仪(Hansatech Instrument Ltd., UK)在晴朗无风的天气于09:00—11:00,先将旗叶经过30 min暗适应后测量叶绿素荧光曲线及参数,每个处理重复6次,具体测定过程参照文献[12]。测定的叶绿素荧光参数主要包括: PI_{abs} 、 ABS/RC 、 DI_0/RC 、 TR_0/RC 、 DI_0/CS_m 、 S_m 、 V_J 、 Ψ_0 、 ϕ_{Eo} 、 ϕ_{Po} 。叶绿素荧光瞬时曲线相关参数包括: F_T 、 F_O 、 F_M 、 $F_{100\mu s}$ 、 $F_{300\mu s}$ 、 $F_J=F_{2ms}$ 。各指标计算式与含义详见表2。

表2 叶绿素荧光诱导动力学曲线(O-J-I-P)参数及计算式

Table 2 The chlorophyll fluorescence induced dynamics curve (O-J-I-P) parameters and calculations

参数与计算式	含义
PI_{abs}	以吸收光能为基础的性能指数
ABS/RC	单位反应中心吸收的光能
DI_0/RC	单位反应中心耗散掉的能量($t=0$ 时)
TR_0/RC	单位反应中心捕获的用于还原 Q_A 的能量($t=0$ 时)
DI_0/CS_m	达到荧光测量最大值时的单位叶截面能量热耗散($t=t_{FM}$ 时)
S_m	标准化后在OJIP荧光诱导曲线和 $F=F_M$ 之间的面积
V_J	在J点的相对可变荧光
$\Psi_0=TR_0/ABS=[1-(F_O/F_M)]$	捕获的激子将电子传递到电子传递链中超过 Q_A 的其他电子受体的概率($t=0$ 时)
$\phi_{Eo}=ET_0/ABS=\phi_{Po} * \Psi_0$	用于电子传递的量子产额($t=0$ 时)
$\phi_{Po}=ET_0/TR_0=(1-V_J)$	最大光化学效率
F_T	光化光(AL)照光后,时间 t 发出的荧光
F_O	最小荧光,所有PSII反应中心全部打开
$F_M=(F_P)$	最大荧光,所有PSII反应中心全部关闭
$F_{100\mu s}$	$t=100\mu s$ 时荧光
$F_{300\mu s}$	$t=300\mu s$ 时荧光,K相/点
$F_J=F_{2ms}$	$t=2\text{ ms}$ 时荧光,J相/点
$V_{OP}=(F_T-F_O)/(F_M-F_O)$	
$\Delta V_{OP}=V_{OP}(\text{处理})-V_{OP}(\text{CK})$	
$W_{OK}=(F_T-F_O)/(F_K-F_O)$	
$W_{OJ}=(F_T-F_O)/(F_J-F_O)$	
$\Delta W_{OK}=W_{OK}(\text{处理})-W_{OK}(\text{CK})$	
$\Delta W_{OJ}=W_{OJ}(\text{处理})-W_{OJ}(\text{CK})$	
$L\text{-band } [(F_{100\mu s}-F_O)/(F_{300\mu s}-F_O)]$	
$K\text{-band } [(F_{300\mu s}-F_O)/(F_J-F_O)]$	

1.4 数据处理

使用 Excel 2019 进行数据处理与作图, 使用 SPSS 19.0 对数据进行单因素方差分析。

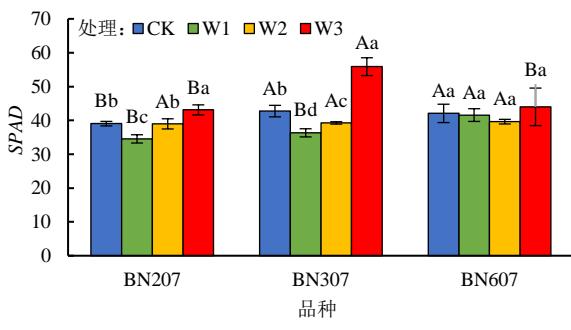
2 结果与分析

2.1 不同调亏灌溉处理对小麦 SPAD 和 Pn 的影响

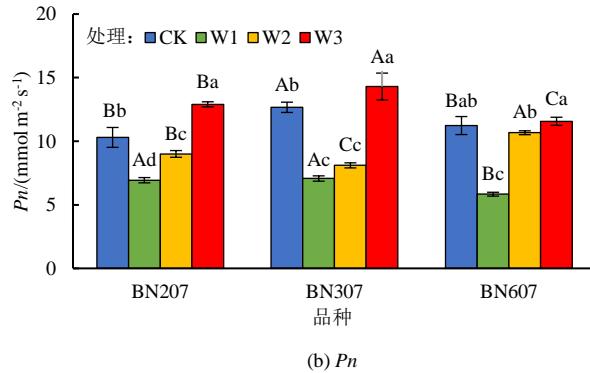
由图 1 可知, 同一小麦品种在不同调亏灌溉处理下的 SPAD 和 Pn 存在差异。与 CK 相比, BN207 和 BN307 的 SPAD 在 W3 处理下分别显著增加了 10.42% 和 30.73%, 而 W1 处理则显著降低了 11.53% 和 15.03%; BN607 的 SPAD 在不同调亏灌溉处理下均无

显著差异。3 个品种在不同调亏灌溉处理间的 Pn 规律一致, 均为 W3 处理>CK>W1 处理>W2 处理。与 CK 相比, BN207、BN307 和 BN607 的 Pn 在 W3 处理下分别增加了 25.24%、12.89% 和 2.97%, 在 W2 处理下分别降低了 12.62%、36.05% 和 5.04%, 在 W1 处理下分别显著降低了 32.69%、44.21% 和 48.07%。

同一调亏灌溉处理下不同品种间 Pn 存在差异。在 W3 处理下, BN307 的 Pn 显著高于 BN207 和 BN607; 在 W1 处理下, BN307 的 Pn 均显著高于 BN607, 但 BN207 和 BN307 品种间不存在显著差异。在 W2 处理下, 品种间的 Pn 表现为: BN607>BN207>BN307, 其中 BN607 的 Pn 显著高于 BN207 和 BN307。



(a) SPAD



注 小写字母表示同一品种不同调亏灌溉处理间在 0.05 水平差异显著, 大写字母表示在同一灌溉处理下不同品种间在 0.05 水平差异显著, 下同。

图 1 不同调亏灌溉处理对旗叶 SPAD 和 Pn 的影响Fig.1 Effects of different regulated deficit irrigation treatments on SPAD value and Pn of flag leaves

2.2 不同调亏灌溉处理对小麦品种间叶绿素荧光动力学参数的影响

如图 2 所示, 3 个小麦品种在 W3 处理下的 ψ_o 、 ϕ_{Eo} 和 S_m 均高于 CK 与 W1 处理, 而 DI_o/RC 、 ABS/RC 、 TR_o/RC 和 V_J 均低于 CK 和 W2 处理, 表明各品种在 W3 处理下均具有抵御 PS II 反应中心遭到破坏的能力。(图中, * 表示在 0.05 水平上差异显著, ns 表示在 0.05 水平上差异不显著。) 在 W3 处理下, 不同品种间的叶绿素荧光参数也存在差异(表 3—表 4)。BN207 的 ψ_o 、 ϕ_{Eo} 和 PI_{abs} 高于另外 2 个品种, 而 DI_o/RC 、 ABS/RC 和 V_J 低于另外 2 个品种。

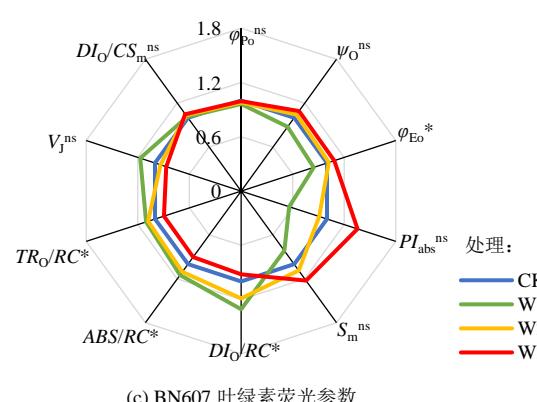
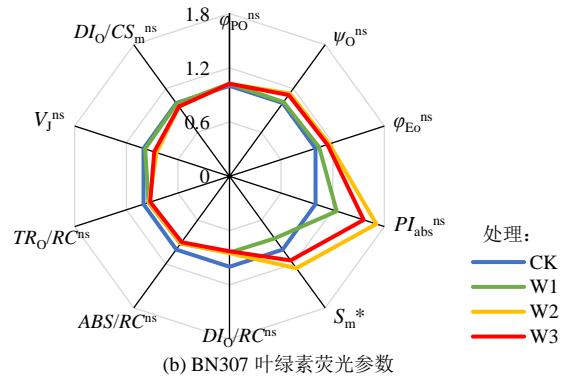
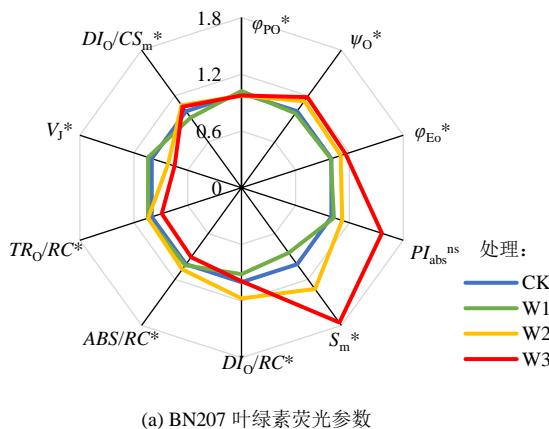


图 2 不同调亏灌溉处理在灌浆中期对小麦旗叶 PS II 荧光动力学参数的影响

Fig.2 Effects of different regulated deficit irrigation treatments on PS II fluorescence kinetic parameters of flag leaves of BN207, BN307 and BN607 at the middle stage of grain filling

表 3 不同调亏灌溉处理在灌浆中期对小麦旗叶 φ_{Po} 、 Ψ_{O} 、 φ_{Eo} 、 PI_{abs} 和 S_m 的影响Table 3 Effects of different regulated deficit irrigation treatments on φ_{Po} , Ψ_{O} , φ_{Eo} , PI_{abs} and S_m parameters of flag leaves at the middle stage of grain filling

品种	处理	叶绿素荧光参数			
		φ_{Po}	Ψ_{O}	φ_{Eo}	PI_{abs}
BN207	CK	0.799±0.013Ab	0.581±0.027Ab	0.464±0.026Ab	2.721±0.750Ab
	W1	0.818±0.005Aa	0.564±0.039Ab	0.461±0.035Ab	2.796±0.593Ab
	W2	0.778±0.008Ac	0.658±0.026Aa	0.512±0.015Aa	3.047±0.202Aab
	W3	0.780±0.008Ac	0.688±0.033Aa	0.537±0.030Aa	4.251±1.048Aa
BN307	CK	0.769±0.009Ba	0.528±0.036Aa	0.406±0.031Ba	1.591±0.343Ba
	W1	0.788±0.015Ba	0.537±0.022Aa	0.423±0.015Aa	1.983±0.283ABa
	W2	0.786±0.008Aa	0.599±0.067Aa	0.471±0.057Aa	2.717±1.212Aa
	W3	0.787±0.019Aa	0.586±0.020Ba	0.462±0.026Ba	2.482±0.462Ba
BN607	CK	0.790±0.016ABA	0.583±0.042Aab	0.460±0.030Aa	2.463±0.417ABab
	W1	0.760±0.012Cb	0.512±0.075Ab	0.389±0.063Ab	1.384±0.531Bc
	W2	0.773±0.009Aab	0.609±0.048Aa	0.470±0.032Aa	2.236±0.355Abc
	W3	0.785±0.008Aab	0.637±0.033ABA	0.500±0.031ABA	3.336±0.774ABA

表 4 不同调亏灌溉处理在灌浆中期对小麦旗叶 DI_{O}/RC 、 ABS/RC 、 TR_{O}/RC 、 V_J 和 DI_{O}/CS_m 的影响Table 4 Effects of different regulated deficit irrigation treatments on DI_{O}/RC , ABS/RC , TR_{O}/RC , V_J and DI_{O}/CS_m parameters of flag leaves at the middle stage of grain filling

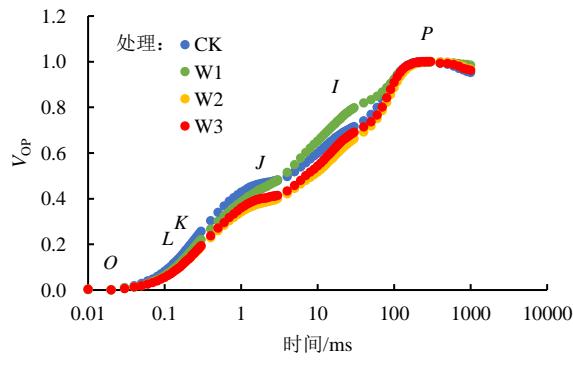
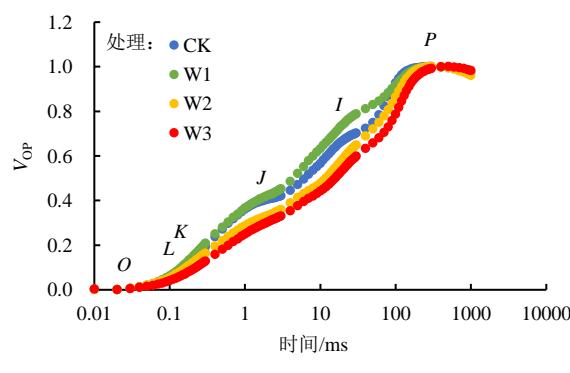
品种	处理	叶绿素荧光参数				
		DI_{O}/RC	ABS/RC	TR_{O}/RC	V_J	DI_{O}/CS_m
BN207	CK	0.421±0.063Bb	2.084±0.206Bab	1.663±0.147Aa	0.419±0.027Aa	459.667±25.482Aab
	W1	0.385±0.020Cb	2.115±0.049Bab	1.730±0.031Ba	0.436±0.039Aa	422.333±16.563Bb
	W2	0.493±0.028ABA	2.223±0.084Aa	1.730±0.066Aa	0.342±0.026Ab	497.250±28.300Aa
	W3	0.417±0.042Ab	1.894±0.127Ab	1.477±0.085Ab	0.312±0.033Bb	487.333±14.012Aa
BN307	CK	0.551±0.047Aa	2.382±0.114Aa	1.831±0.069Aa	0.472±0.036Aa	465.000±18.330Aa
	W1	0.465±0.040Bab	2.191±0.117Ba	1.726±0.099Ba	0.463±0.022Aa	462.000±25.710ABA
	W2	0.468±0.060Bab	2.182±0.205Aa	1.714±0.146Aa	0.401±0.067Aa	444.000±32.496Ba
	W3	0.456±0.038Ab	2.144±0.153Aa	1.688±0.143Aa	0.414±0.020Aa	443.333±17.098Ba
BN607	CK	0.458±0.063ABbc	2.174±0.129ABb	1.716±0.068Ab	0.417±0.042Aab	473.200±37.205Aa
	W1	0.599±0.046Aa	2.493±0.069Aa	1.894±0.023Aa	0.488±0.075Aa	480.000±16.971Aa
	W2	0.544±0.016Aab	2.397±0.030Aa	1.853±0.043Aa	0.391±0.048Ab	490.000±23.516ABA
	W3	0.422±0.037Ac	1.959±0.117Ac	1.537±0.082Ac	0.363±0.033ABb	496.333±20.404Aa

2.3 不同调亏灌溉处理对小麦品种间叶绿素荧光诱导动力学曲线的影响

叶绿素荧光瞬时曲线 (V_{OP} 曲线) 在 O-K-J-I-P 的基本步骤中表现出典型的多相上升 (图 3 (a)、图 3 (b)、图 3 (c))。W1 处理的 OJIP 瞬时异质性显著增加 (图 3 (d)、图 3 (e)、图 3 (f))。而 W2 处理与 W3 处理的相对荧光强度显著低于 CK (图 3 (d)、图 3 (e)、图 3 (f))，这表明 3 个品种

在 W1 处理下光合电子传递受阻严重，而在 W2、W3 处理下光合电子传递受限制程度较小。

如图 4 所示，在调亏灌溉下，L 点 (0.15 ms) 和 K 点 (0.3 ms) 的相对可变荧光以及 ΔV_{OK} 和 ΔV_{OJ} 值因处理的时期不同而不同。BN207 与 BN607 在 W1、W2 处理下的 L 点和 K 点的相对可变荧光显著高于 CK，而 BN307 与 BN607 在 W3 处理下的 L 点和 K 点的相对可变荧光显著低于 CK。



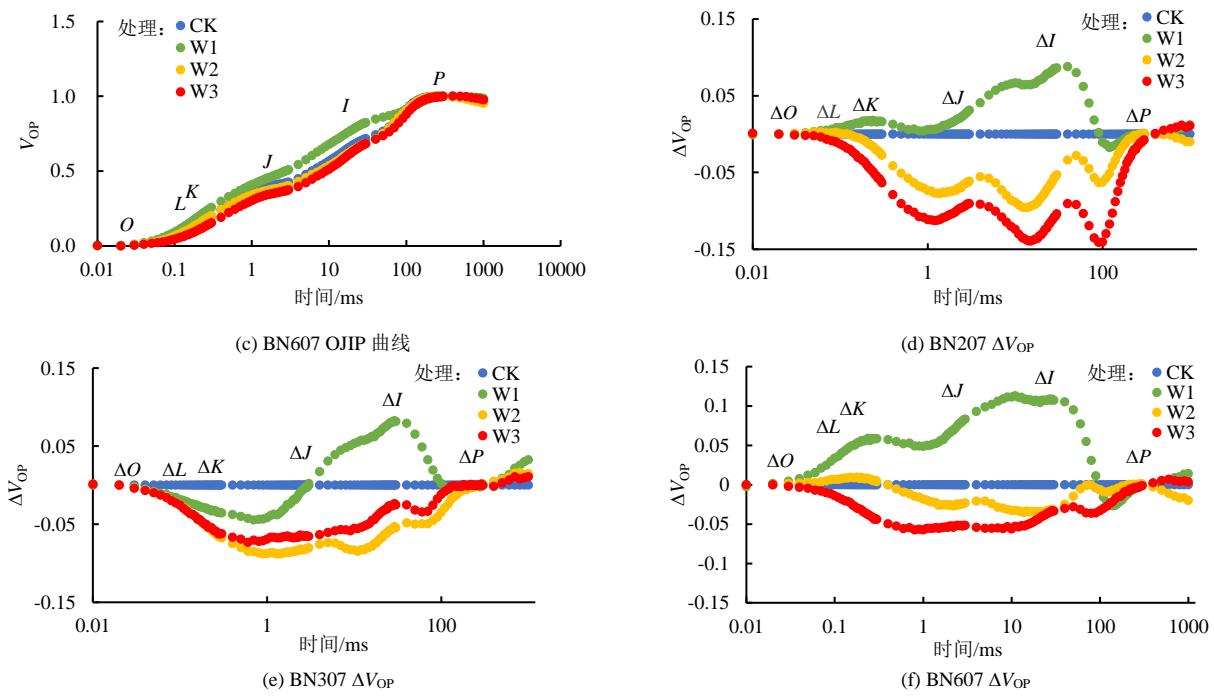


图 3 不同调亏灌溉处理在灌浆中期对 OJIP 曲线的影响

Fig.3 Effects of different regulated deficit irrigation treatments on OJIP curves in the middle stage of grain filling

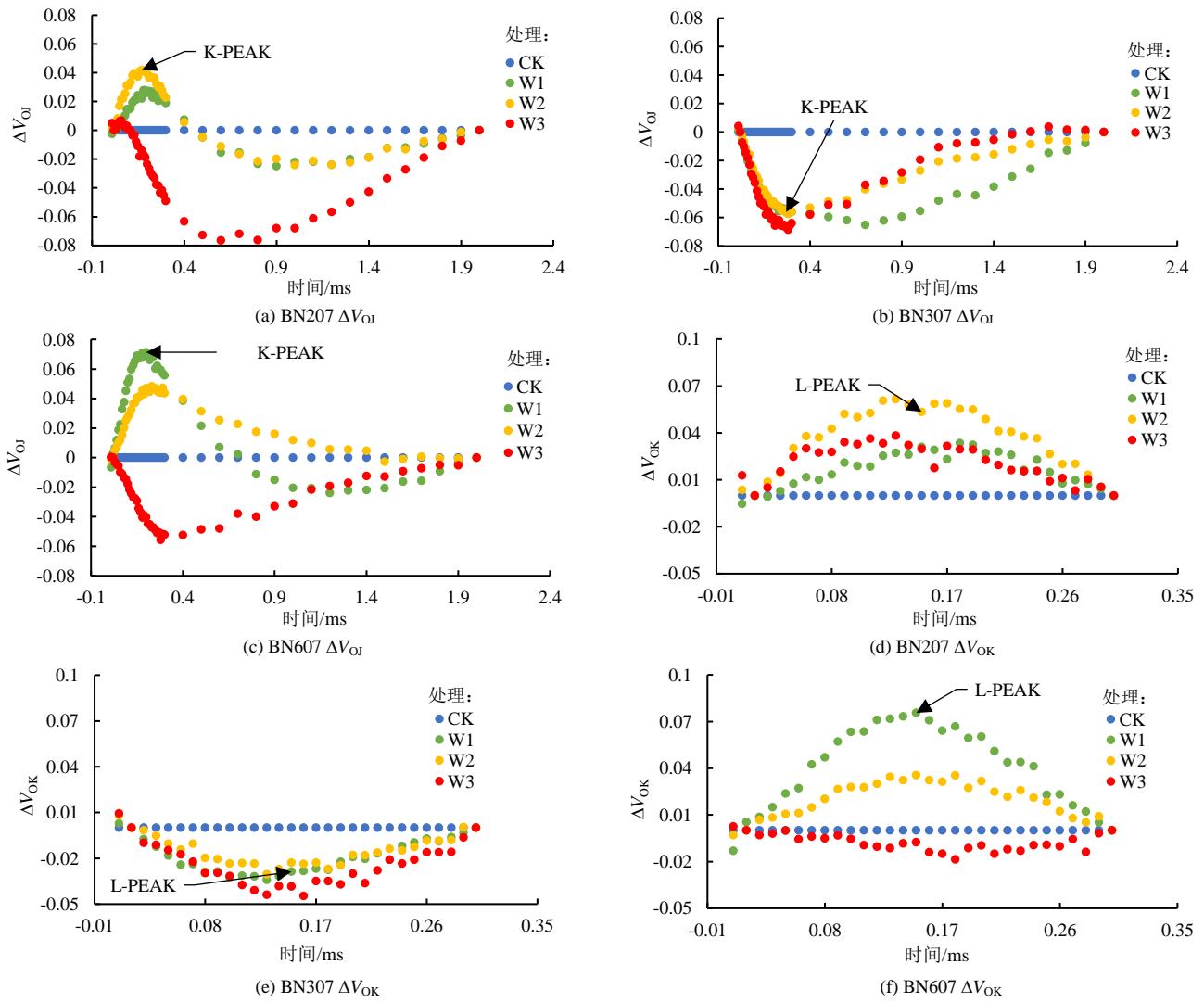
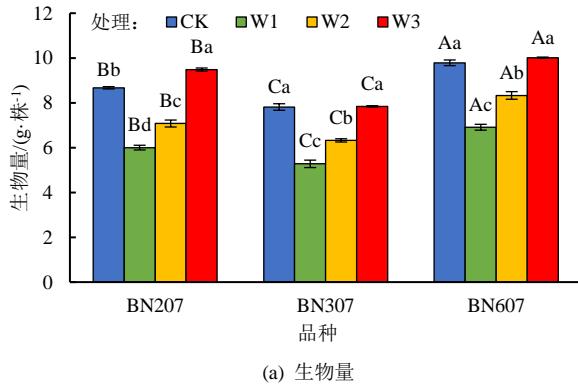


图 4 不同调亏灌溉处理在灌浆中期对小麦旗叶 O-K 和 O-J 标准化曲线的差异动力学曲线的影响

Fig.4 Effects of different regulated deficit irrigation treatments on the differential dynamic curves of O-K and O-J standardization curves of flag leaves in the middle stage of grain filling

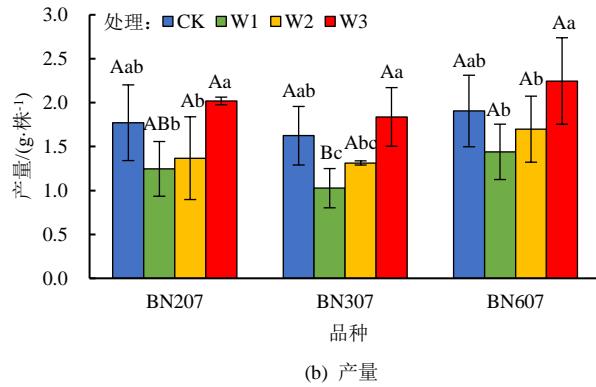
2.4 不同调亏灌溉处理对小麦品种间产量和生物量的影响

如图 5 所示, W3 处理更有利于提高小麦产量与生物量。与 CK 相比, BN207 在 W3 处理下显著增加了 9.38%, 而 BN207、BN307 与 BN607 在 W1 处理下分别显著降低了 30.78%、32.47% 和 29.39%, 在



(a) 生物量

W2 处理下分别显著降低了 18.39%、19.07% 和 14.88%。同一调亏灌溉处理下, 不同品种间产量和生物量也存在差异。在调亏灌溉下, 品种间产量和生物量均表现为: BN607>BN207>BN307, 表明适度调亏灌溉对 BN607 的产量与生物量的影响最小。



(b) 产量

Fig.5 Effects of different regulated deficit irrigation treatments on wheat biomass and yield among wheat cultivar

3 讨论

叶绿素是植物光合作用的重要参数^[13]。与 CK 相比, 3 个品种在 W1、W2 处理下的 Pn 和 $SPAD$ 的降低表明所有小麦品种在生长后期进行中度调亏灌溉均会导致旗叶叶绿素量降低, 进而影响小麦光合能力, 这与孟兆江等^[6]的研究结果一致。在 W3 处理下, Pn 的增加归因于该处理下叶绿素量的增加, 这与王正航等^[14]的研究结果一致。杨宝斌等^[15]研究表明, 小麦在抽穗期经历中度干旱胁迫会导致 Pn 与 $SPAD$ 明显降低, 这可能是由于小麦在苗期—越冬期进行调亏灌溉有利于根系下扎, 从而促进根系对深层土壤水分的吸收, 缓解了后期调亏灌溉对小麦生长的影响^[16]。

荧光被认为是研究光能分配和光化学活性的有效探针^[17]。与 CK 相比, W3 处理下 3 个品种的 Pn 、 Ψ_O 、 φ_{Eo} 、 PI_{abs} 和 S_m 均有所增加, 而 $DI_{O/RC}$ 、 ABS/RC 、 $TR_{O/RC}$ 、 V_I 以及 OJIP 曲线上各个特征位点的峰值有所下降。其中, Ψ_O 、 φ_{Eo} 和 S_m 反映了 PSII 受体侧电子传递速率的变化, 这些指标在 W3 处理下的增加表明小麦在苗期—越冬期和拔节期—抽穗期进行中度调亏灌溉可以提高 Q_A 传递电子的能力, 减轻 PSII 受体侧的光抑制损伤程度^[18-19]。 Pn 的增加表明小麦在苗期—越冬期和拔节期—抽穗期进行调亏灌溉有利于将更多的光能用于光合电子传递, 从而更好地推动光化学反应并抵御水分亏缺^[20]。在 W1 处理下, 3 个品种的 OJIP 瞬时曲线的各个特征位点的峰值均有所增加, 且 BN207 与 BN607 的 Ψ_O 和 φ_{Eo} 均有所降低, 而 ABS/RC 和 $TR_{O/RC}$ 有所增加。这表明 W1 处理增加了 BN207 与 BN607 以荧光形式耗散掉的能量, 从

而减少用于光合电子传递的光能, 导致其光合性能下降。此外, 植物光合作用中 Pn 与 Rubisco 活性呈正相关, 而核酮糖-1,5-二磷酸羧化酶/加氧酶 (rca) 是调控 Rubisco 的关键酶^[12], 而不同调亏灌溉处理对 Pn 的影响是否与 rca 有关尚不清楚, 未来有待在此研究基础上对光合作用的机理进行深入研究。

BN307 在 W3 处理下 $SPAD$ 和 Pn 最高, 但产量和生物量最低, 这可能是单位反应中心将更多的能量分配于热耗散, 从而减少用于光合电子传递的能量。BN607 在 W2 处理下的产量与生物量均高于其余 2 个品种, 这主要归因于 Pn 和 $SPAD$ 的增加, 可能在生长前期进行中度调亏灌溉有利于促进深层根系的发育, 进而提高后期对水分亏缺的抵抗能力^[15]。而 BN207 在 W1 处理下的 Ψ_O 、 φ_{Eo} 和 PI_{abs} 均高于其余 2 个品种, 这可能与该品种能够在逆境水平下诱导 $Lhcb1$ 和 $psbA$ 等基因的表达有关^[21], 也可能与长期逆境下细胞色素 b6f 复合体对电子传递的调节有关。

4 结论

在苗期—越冬期、拔节期—抽穗期进行中度调亏灌溉是一种有效的小麦节水高产策略。

BN207 品种更有利于阻拦长期水分亏缺对光合电子传递和 PSII 的光合作用活力的损伤; BN607 品种可通过增强小麦的 Pn 和 $SPAD$ 来实现高产。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

参考文献:

- [1] 康绍忠. 水安全与粮食安全[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(8): 880-885.

- KANG Shaozhong. Towards water and food security in China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, 22(8): 880-885.
- [2] 张金鑫, 葛均筑, 马玮, 等. 华北平原冬小麦-夏玉米种植体系周年水分高效利用研究进展[J]. 作物学报, 2023, 49(4): 879-892.
- ZHANG Jinxin, GE Junzhu, MA Wei, et al. Research advance on annual water use efficiency of winter wheat-summer maize cropping system in North China Plain[J]. Acta Agronomica Sinica, 2023, 49(4): 879-892.
- [3] 张喜英. 提高农田水分利用效率的调控机制[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(1): 80-87.
- ZHANG Xiying. Regulating mechanisms for improving farmland water use efficiency[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(1): 80-87.
- [4] 高宏云, 李军宏, 王远远, 等. 2个不同耐旱性棉花品种光合特性和干物质累积对干旱的响应[J]. 新疆农业科学, 2020, 57(2): 233-244.
- GAO Hongyun, LI Junhong, WANG Yuanyuan, et al. Response of photosynthetic characteristics and dry matter accumulation to drought of two cotton varieties with different drought resistance[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2020, 57(2): 233-244.
- [5] NENOVA V R, KOCHEVA K V, PETROV P I, et al. Wheat Rht-B1 dwarfs exhibit better photosynthetic response to water deficit at seedling stage compared to the wild type[J]. Journal of Agronomy and Crop Science, 2014, 200(6): 434-443.
- [6] 孟兆江, 孙景生, 刘祖贵, 等. 调亏灌溉对冬小麦不同生育阶段光合速率的影响[J]. 麦类作物学报, 2011, 31(6): 1 130-1 135.
- MENG Zhaojiang, SUN Jingsheng, LIU Zugui, et al. Effect of regulated deficit irrigation on photosynthesis rate at different growth stages of winter wheat[J]. Journal of Triticeae Crops, 2011, 31(6): 1 130-1 135.
- [7] 盛钰, 赵成义, 贾宏涛. 水分胁迫对冬小麦光合及生物学特性的影响[J]. 水土保持学报, 2006, 20(1): 193-196.
- SHENG Yu, ZHAO Chengyi, JIA Hongtao. Effect of water stress on photosynthetic and biology character of winter wheat[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20(1): 193-196.
- [8] LIU E K, MEI X R, YAN C R, et al. Effects of water stress on photosynthetic characteristics, dry matter translocation and WUE in two winter wheat genotypes[J]. Agricultural Water Management, 2016, 167: 75-85.
- [9] KALAJI, Hazem M, JAJOO Anjana, OUKARROUM Abdallah, et al. Chlorophyll a fluorescence as a tool to monitor physiological status of plants under abiotic stress conditions[J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2016, 38(4): 102.
- [10] 原佳乐, 马超, 冯雅岚, 等. 不同抗旱性小麦快速叶绿素荧光诱导动力学曲线对干旱及复水的响应[J]. 植物生理学报, 2018, 54(6): 1 119-1 129.
- YUAN Jiale, MA Chao, FENG Yalan, et al. Response of chlorophyll fluorescence transient in leaves of wheats with different drought resistances to drought stresses and rehydration[J]. Plant Physiology Journal, 2018, 54(6): 1 119-1 129.
- [11] 朱荣, 李亚婷, 虎芳芳, 等. 花后干旱对春小麦荧光动力学参数的影响[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(10): 139-142.
- [12] ZHENG H F, XIN L F, GUO J M, et al. Adaptation of photosynthesis to water deficit in the reproductive phase of a maize (*Zea mays* L.) inbred line[J]. Photosynthetica, 2019, 57(2): 399-408.
- [13] 张玉玉, 王进鑫, 马戎, 等. 干旱后复水对侧柏幼苗叶绿素含量的影响[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2021, 41(5): 10-17.
- ZHANG Yuyu, WANG Jinxin, MA Xu, et al. Effect of rewetting on chlorophyll content of *Platycladus orientalis* seedlings after drought[J]. Journal of Southwest Forestry University(Natural Sciences), 2021, 41(5): 10-17.
- [14] 王正航, 武仙山, 昌小平, 等. 小麦旗叶叶绿素含量及荧光动力学参数与产量的灰色关联度分析[J]. 作物学报, 2010, 36(2): 217-227.
- WANG Zhenghang, WU Xianshan, CHANG Xiaoping, et al. Chlorophyll content and chlorophyll fluorescence kinetics parameters of flag leaf and their gray relational grade with yield in wheat[J]. Acta Agronomica Sinica, 2010, 36(2): 217-227.
- [15] 杨宝斌, 王利书, 贾艳辉, 等. 抽穗期水分胁迫对冬小麦光合特性的影响[J]. 节水灌溉, 2020(12): 88-93.
- YANG Baobin, WANG Lishu, JIA Yanhui, et al. Effects of water stress on the photosynthetic characteristics of winter wheat in the heading stage[J]. Water Saving Irrigation, 2020(12): 88-93.
- [16] 单长卷, 吴雪平, 刘遵春. 水分胁迫对冬小麦水分生理特性和产量构成三因素的影响[J]. 江苏农业学报, 2008, 24(1): 11-16.
- SHAN Changjuan, WU Xueping, LIU Zunchun. Effect of water stress on water physiology and three components of yield of winter wheat[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2008, 24(1): 11-16.
- [17] 李英浩, 刘景辉, 赵宝平, 等. 干旱胁迫对燕麦生长及叶片光系统II活性的影响[J]. 西北植物学报, 2020, 40(10): 1 706-1 713.
- LI Yinghao, LIU Jinghui, ZHAO Baoping, et al. Effect of drought stress on oat growth and leaf photosystem II activity[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalis Sinica, 2020, 40(10): 1 706-1 713.
- [18] 李鹏民, 高辉远, RETO J. Strasser. 快速叶绿素荧光诱导动力学分析在光合作用研究中的应用[J]. 植物生理与分子生物学学报, 2005, 31(6): 559-566.
- LI Pengmin, GAO Huiyuan, RETO J. Strasser. Application of the fast chlorophyll fluorescence induction dynamics analysis in photosynthesis study[J]. Physiology and Molecular Biology of Plants, 2005, 31(6): 559-566.
- [19] LI Ya'nan, FANG Anqi, ZHANG Tengzi, et al. Exogenous calcium improves photosynthetic capacity of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* under drought[J]. Forests, 2022, 13(12): 2 155.
- [20] WANG Ye, LIU Ziqi, XIEMUXIDING Anarguli, et al. Fulvic acid, brassinolide, and uniconazole mediated regulation of morphological and physiological traits in maize seedlings under water stress[J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2023, 42(3): 1 762-1 774.
- [21] LIU Huajie, ZHU Qidi, PEI Xinxin, et al. Comparative analysis of the photosynthetic physiology and transcriptome of a high-yielding wheat variety and its parents[J]. The Crop Journal, 2020, 8(6): 1 037-1 048.

Effects of Regulated Deficit Irrigation on Photosynthesis of High-yield Dwarf Wheat Cultivar

ZHENG Mengyao, LI Haojie, WANG Wending, YANG Chenlu,
LI Yulin, AN Luchang, OU Xingqi, ZHENG Huifang*

(School of Life Science and Technology, Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang 453003, China)

Abstract: 【Objective】 Regulated deficit irrigation is an improved irrigation technology to sustain crop production in regions where freshwater resources are not abundant. This paper is to investigate the effect of deficit irrigation on

photosynthesis of high-yield dwarf wheat cultivars. 【Method】 Pot experiments were conducted using three high-yield dwarf wheat cultivars: Bainong 207 (BN207), Bainong 307 (BN307), and Bainong 607 (BN607). For each cultivar, moderate regulated deficit irrigation was imposed at the seedling-winter period, jointing-beading, and flowering-filling stages (W1), or at the seedling-winter period and middle flowering-filling stage (W2), or at seedling-winter period and middle jointing-beading stage. The control (CK) was sufficient irrigation. In each treatment, we measured the photosynthetic rate (Pn) and chlorophyll fluorescence kinetic parameters of the leaves.

【Result】 Compared with CK, W3 significantly increased yield, biomass, SPAD values, and photochemical activity of all three cultivars, as opposed to W1 which reduced all these traits. The impact of the deficit irrigation on photosynthesis varied with cultivars, with BN207 showing resistance to limitations in photosynthetic electron transfer under long-term regulated deficit irrigation. Moderate regulated deficit irrigation at the early growth stage of BN607 enhanced its response to water deficit in the late growth stage. Deficit irrigation at the seedling-winter period and jointing - heading stage increased Pn of BN307. 【Conclusion】 Among the treatments we compared, W3 was optimal for achieving both high yield and photosynthesis of the three wheat cultivars investigated in this paper.

Key words: regulated deficit irrigation; biomass; chlorophyll fluorescence kinetic parameters; OJIP curves

责任编辑：韩 洋

(上接第 47 页)

Using Eddy Covariance Method to Analyze Energy Balance of Jujube Orchard in Arid Areas

QIAO Ying, ZHANG Baihe*, QIU Kai, WANG Tengfei

(Xinjiang Institute of Technology, Aksu 843100, China)

Abstract: 【Objective】 Jujube is an important cash crop in the arid region in northwestern China. Understanding energy dynamics in it is hence crucial to improving water use efficiency. This paper is to analyze the energy balance in a jujube orchard using the eddy covariance. 【Method】 Flux from a jujube orchard was measured from 2018 to 2019 using the eddy covariance method. The data were used to analyze the patterns and distribution of the energy changes, and daily variations in the thermal storage. 【Result】 ① Daily average energy change in net radiation, latent heat flux, sensible heat flux, and soil heat flux exhibited a single-peaked pattern in each month, primarily driven by net radiation changes. ② The annual 30-minute energy balance ratio in 2018 and 2019 was 73.45% and 73.11%, respectively. Incorporating the heat storage term increased the energy balance by 3.72% and 2.75% to 77.17% and 75.86%, respectively, in 2018 and 2019. ③ The daily change in soil heat storage exhibited similar pattern during the fertility and dormancy stage. Latent and sensible heat storage showed different patterns between fertility and dormancy stage, while photosynthesis and canopy heat storage were zero during the dormancy stage and displayed typical daily variation during the fertility stage. 【Conclusion】 The thermal storage has a minimal contribution to the energy balance. Thus, the energy allocation to the jujube is influenced mainly by water, vegetation types and climate.

Key words: arid area; jujube forests; eddy covariance method; energy balance

责任编辑：白芳芳